

Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Пермский национальный исследовательский
политехнический университет»

О.М. Зверев, А.В. Перминов

СБОРНИК ЗАДАЧ ПО ФИЗИКЕ

*Утверждено
Редакционно-издательским советом университета
в качестве учебного пособия*

Издательство
Пермского национального исследовательского
политехнического университета
2017

УДК 53(076.2)

3-43

Рецензенты:

д-р физ.-мат. наук, профессор *В.А. Демин*
(Пермский государственный национальный
исследовательский университет);

канд. физ.-мат. наук, доцент *В.В. Бурдин*
(Пермский национальный исследовательский
политехнический университет)

Зверев, О.М.

3-43 Сборник задач по физике : учеб. пособие / О.М. Зверев,
А.В. Перминов. – Пермь : Изд-во Перм. нац. исслед. поли-
техн. ун-та, 2017. – 471 с.

ISBN 978-5-398-01843-1

Представлены задачи для самостоятельного решения, разби-
тые на модули в соответствии с Федеральным государственным
образовательным стандартом. Приведены методические указания
к решению задач, основные формулы и примеры решения.

Предназначено для самостоятельной работы студентов
дневного отделения всех специальностей.

УДК 53(076.2)

ISBN 978-5-398-01843-1

© ПНИПУ, 2017

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение	5
Глава 1. Механика	8
1.1. Кинематика	8
Основные формулы	9
Примеры решения задач	13
1.2. Динамика материальной точки	18
Основные формулы	19
Примеры решения задач	21
1.3. Динамика вращательного движения твердого тела	27
Основные формулы	28
Примеры решения задач	29
1.4. Гидромеханика	32
Основные формулы	34
Примеры решения задач	35
1.5. Механические колебания и волны	36
Основные формулы	38
Примеры решения задач	41
Глава 2. Молекулярная физика и термодинамика	49
2.1. Основы молекулярно-кинетической теории	49
2.2. Законы идеального газа	50
Основные формулы	51
Примеры решения задач	54
2.3. Теплота и работа. Основы термодинамики	58
Основные формулы	60
Примеры решения задач	63
Глава 3. Электричество и магнетизм	71
3.1. Электростатика	71
Основные формулы	74
Примеры решения задач	79
3.2. Постоянный ток	93
Основные формулы	95
Примеры решения задач	97
3.3. Электромагнетизм	104
Основные формулы	106
Примеры решения задач	110
Глава 4. Оптика. Атомная и ядерная физика	120
4.1. Геометрическая оптика	120
Основные формулы	121

Примеры решения задач	122
4.2. Волновая оптика	123
Основные формулы	125
<i>Интерференция света</i>	125
<i>Дифракция света</i>	126
<i>Поляризация света</i>	128
Примеры решения задач	128
4.3. Квантовая оптика	136
Основные формулы	137
<i>Законы теплового излучения</i>	137
<i>Фотоэлектрический эффект</i>	138
<i>Давление света. Фотон</i>	139
<i>Эффект Комптона</i>	139
Примеры решения задач	140
4.4. Атомная и ядерная физика	144
Основные формулы	144
<i>Атом водорода</i>	144
<i>Волны де Бройля</i>	146
<i>Соотношения неопределенностей</i>	146
<i>Радиоактивность</i>	146
<i>Энергия связи атомных ядер</i>	148
<i>Ядерные реакции</i>	148
Примеры решения задач	149
Варианты заданий для самостоятельной работы	157
Модуль 1. Механика	157
Модуль 2. Колебания и волны	211
Модуль 3. Основы молекулярной физики и термодинамики	250
Модуль 4. Электростатика. Постоянный электрический ток	280
Модуль 5. Магнитное поле. Электромагнитные колебания и волны	338
Модуль 6. Геометрическая и волновая оптика	383
Модуль 7. Квантовая оптика. Основы квантовой механики и атомной физики	417
Модуль 8. Основы физики атомного ядра. Элементарные частицы	442
Список литературы	461
Приложение. справочные данные и таблицы	462

ВВЕДЕНИЕ

Общие рекомендации по решению физических задач

В изучении курса физики решение задач имеет исключительно важное значение, и им отводится значительная часть курса.

Решение и анализ задач позволяют понять и запомнить основные законы и формулы физики, создают представление об их характерных особенностях и границах применения. Задачи развивают навык в использовании общих законов материального мира для решения конкретных вопросов, имеющих практическое и познавательное значение. Умение решать задачи – лучший критерий оценки глубины изучения программного материала и его усвоения. В основу каждой физической задачи положено то или иное частное проявление одного или нескольких фундаментальных законов природы и их следствий. Исходя из этого, прежде чем приступать к решению задач какого-либо раздела курса, следует тщательно проработать теорию вопроса и внимательно разобрать иллюстрирующие ее примеры. Без твердого знания теории нельзя рассчитывать на успешное решение и анализ даже сравнительно простых задач, не говоря уже о более сложных.

В процессе решения физической задачи можно выделить три этапа: *физический, математический и анализ решения.*

Физический этап начинается с ознакомления с условием задачи и уяснения физических закономерностей, лежащих в ее основе. Ознакомившись с условием задачи, никогда не следует заострять внимание на искомой величине и тем более пытаться сразу ее найти. Необходимо помнить, что ближайшая цель решения состоит в том, чтобы свести задачу от физической к математической, записав ее условие при помощи формул.

Далее следует коротко записать условия задачи в буквенных обозначениях и выразить их в Международной системе единиц СИ.

Чтобы хорошо понять условие задачи, необходимо сделать схематический чертёж, поясняющий ее суть, и на чертеже, хотя бы условно, указать все величины, характеризующие данное явление. Если при этом окажется, что для полного описания процесса надо использовать величины, не фигурирующие в условии задачи, их нужно ввести в решение самим, так как в большинстве случаев без них невозможно найти связь между искомыми и заданными величинами. Следует твердо помнить, что почти во всех случаях чертёж сильно упрощает и поиск, и само решение. (Впрочем, этот пункт нередко опускается, если данный физический процесс и условие задачи оказываются достаточно ясными и понятными). После этого приступают к анализу физических процессов, происходящих в ситуации, описанной в условии, к выявлению тех законов, которым подчиняются эти процессы. Заканчивается физический этап составлением уравнений, связывающих физические величины, которые характеризуют рассматриваемое явление с количественной стороны. Применение известных законов и формул физики для математической записи условий задачи представляет основную трудность при решении почти всех задач по физике. Сделав такую запись, мы получаем одно или несколько уравнений, в которых неизвестным служит искомая величина, и физический этап переходит в математический.

Математический этап начинается решением системы уравнений и заканчивается получением числового ответа. Безусловно, математический этап является менее важным, чем этап физический, но необходимо подчеркнуть, что он не является второстепенным. К сожалению, иногда недооценивают роль этого этапа. Но если при решении системы уравнений, переводе единиц или арифметическом расчете совершена ошибка, решение задачи в целом окажется неверным. С точки зрения практики

задача решена правильно только в том случае, если получен ее верный общий и числовой ответ. Неправильно считать математический этап второстепенным еще и потому, что после него должен следовать анализ решения. Последний этап вообще нельзя провести, если не получен общий и числовой ответ задачи. Таким образом, для окончательного решения задачи по физике физический и математический этапы являются в равной степени необходимыми.

После получения решения в общем виде и числового ответа следует этап анализа решения. На этом этапе выясняют, как и от каких физических величин зависит найденная величина, при каких условиях эта зависимость осуществляется и т.д. При анализе числового ответа исследуют:

- размерность полученной величины;
- соответствие полученного числового ответа физически возможным значениям искомой величины; например, если для скорости какого-либо тела получено значение большее, чем скорость света в вакууме ($c = 3 \cdot 10^8$ м/с), то этот ответ явно неверен;
- при получении многозначного ответа соответствие полученных ответов условиям задачи.

Глава 1. МЕХАНИКА

Механика – раздел физики, который изучает простейший способ движения материи – механическое движение тел в пространстве и во времени.

В механике важную роль играют два абстрактных идеальных понятия – материальная точка и абсолютно твердое тело. *Материальная точка* – это тело, размерами которого можно пренебречь в условиях данной задачи.

Абсолютно твердое тело – это тело, форма и размеры которого не изменяются под воздействием других тел. Абсолютно твердое тело можно рассматривать как совокупность жестко связанных между собой материальных точек, т.е. как систему материальных точек, расстояния между которыми не изменяются в процессе движения. Следует всегда помнить, что понятия материальной точки и абсолютно твердого тела – математические абстракции, приближенно соответствующие реальным физическим телам.

1.1. Кинематика

Кинематика – раздел механики, в котором изучается движение тел и не рассматриваются причины, вызывающие то или иное движение.

Для решения кинематических задач необходимо усвоить следующие понятия: система отсчета, скорость, ускорение; уравнения, определяющие зависимость координат и скорости в равномерном и равноускоренном движениях, закон сложения скоростей, идею о том, что всякое движение можно разложить на два (в общем случае на три) простых движения вдоль осей координат; идею о том, что при свободном падении любое тело, какую бы скорость оно не имело, будет двигаться под действием притяжения к Земле с ускорением, равным g , направленным вертикально вниз (при отсутствии сопротивления среды).

При решении задач рекомендуется придерживаться следующей последовательности действий:

1. Выбрать систему отсчета (это предполагает выбор тела отсчета, начала системы координат, положительного направления осей, момента времени, принимаемого за начальный).

Начало координат всегда удобно помещать в начальной точке движения, а оси OX и OY направлять так, чтобы приходилось делать минимум разложений векторов, т.е. чтобы как можно больше проекций векторов оказались равными нулю и уравнения по осям были предельно простыми.

2. Определить вид движения вдоль каждой из осей и написать кинематические уравнения движения вдоль каждой оси – уравнение для координаты и для скорости (если тел несколько, уравнения пишутся для каждого тела).

3. Определить начальные условия (координаты и проекции скорости в начальный момент времени), а также проекции ускорения на оси и подставить эти величины в уравнения движения.

4. Определить дополнительные условия, т.е. координаты или скорости для каких-либо моментов времени (или точек траектории), и подставить эти значения координат и скорости в уравнения движения.

5. Решить полученную систему уравнений относительно искомых величин.

Основные формулы

1. Кинематическое уравнение движения материальной точки в векторной форме

$$\vec{r} = \vec{r}(t),$$

вдоль оси x

$$x = f(t),$$

где $f(t)$ – некоторая функция времени.

Перемещение материальной точки

$$\Delta\vec{r} = \vec{r}_2 - \vec{r}_1,$$

где \vec{r}_1 и \vec{r}_2 – ее радиус-векторы в начальном и конечном положениях соответственно.

Пройденный путь – длина траектории.

2. Вектор средней скорости

$$\langle \vec{v} \rangle = \frac{\Delta \vec{r}}{\Delta t}.$$

Средняя скорость при движении вдоль оси x

$$\langle v_x \rangle = \frac{\Delta x}{\Delta t}.$$

Средняя путевая скорость (скорость вдоль траектории)

$$\langle v \rangle = \frac{\Delta S}{\Delta t},$$

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

Мгновенная скорость

$$\vec{v} = \frac{d\vec{r}}{dt},$$

ее проекция на ось x

$$v_x = \frac{dx}{dt}.$$

3. Среднее ускорение

$$\langle \vec{a} \rangle = \frac{\Delta \vec{v}}{\Delta t},$$

его проекция на ось x

$$\langle a_x \rangle = \frac{\Delta v_x}{\Delta t}.$$

Мгновенное ускорение

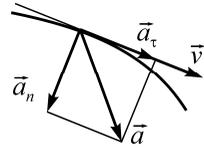
$$\vec{a} = \frac{d\vec{v}}{dt},$$

его проекция на ось x

$$a_x = \frac{dv_x}{dt}.$$

4. При криволинейном движении ускорение можно представить как сумму нормальной \vec{a}_n и тангенциальной \vec{a}_τ составляющих:

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



Абсолютное значение этих ускорений

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

где R – радиус кривизны в данной точке траектории.

5. Кинематическое уравнение равномерного движения материальной точки вдоль оси x ($v = \text{const}$, $a = 0$)

$$x = x_0 + v_x t,$$

где x_0 – начальная координата; t – время.

6. Кинематическое уравнение равнопеременного движения вдоль оси x ($a = \text{const}$)

$$x = x_0 + v_{0x} t + \frac{a_x t^2}{2},$$

где v_0 – начальная скорость; t – время.

Скорость точки при равнопеременном движении вдоль оси x

$$v_x = v_{0x} + a_x t.$$

7. Положение твердого тела (при заданной оси вращения) определяется углом поворота (или угловым перемещением) $\vec{\varphi}$.

Кинематическое уравнение вращательного движения

$$\vec{\varphi} = \vec{\varphi}(t).$$

Угловая скорость

$$\vec{\omega} = \frac{d\vec{\varphi}}{dt}.$$

Угловое ускорение

$$\vec{\varepsilon} = \frac{d\vec{\omega}}{dt}.$$

Угловое перемещение, угловая скорость и угловое ускорение являются псевдовекторами, их направления совпадают с осью вращения и определяются по правилу правого винта.

8. Кинематическое уравнение равномерного вращения ($\omega = \text{const}$, $\varepsilon = 0$)

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

где φ_0 – начальное угловое перемещение; t – время.

9. T – период вращения (время одного полного оборота),

$$T = \frac{t}{N};$$

ν – частота вращения (число оборотов в единицу времени),

$$\nu = \frac{N}{T} \text{ или } \nu = \frac{1}{T},$$

где N – число оборотов, совершаемых телом за время t ,

$$\omega = \frac{2\pi}{T} = 2\pi\nu.$$

10. Кинематическое уравнение равнопеременного вращения ($\varepsilon = \text{const}$)

$$\varphi = \varphi_0 + \omega_0 t + \frac{\varepsilon \cdot t^2}{2},$$

где ω_0 – начальная угловая скорость; $\varphi = 2\pi N$.

Угловая скорость тела при равнопеременном вращении

$$\omega = \omega_0 + \varepsilon t.$$

11. Связь между линейными и угловыми величинами, характеризующими вращение материальной точки,

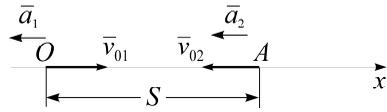
$$S = \varphi R, \nu = \omega R, a_\tau = \varepsilon R, a_n = \frac{v^2}{R} = \omega^2 R.$$

Примеры решения задач

№ 1. Два велосипедиста едут навстречу друг другу. Один, имея скорость 18 км/ч, движется равнозамедленно с ускорением $0,2 \text{ м/с}^2$; другой, имея скорость 5,4 км/ч, движется равноускоренно с тем же ускорением. Через какое время велосипедисты встретятся и какой путь проедет каждый из них до встречи, если расстояние между ними в начальный момент времени 130 м?

Р е ш е н и е.

Начало системы координат (т. O) помещаем в точку, где в начальный момент времени на-



ходился первый велосипедист, а ось x совпадает с направлением его движения (рисунок). На чертеже изображаем векторы скоростей и ускорений обоих велосипедистов. Очевидно, что $x_{01} = 0$, $x_{02} = S$. Уравнения движения велосипедистов с учетом выбранного положительного направления оси x будут

$$x_1 = v_{01}t - \frac{a_1 t^2}{2}, \quad x_2 = S - v_{02}t - \frac{a_2 t^2}{2}.$$

В момент встречи ($t = \tau$) $x_1 = x_2$. Тогда, с учетом того, что $|\vec{a}_1| = |\vec{a}_2|$, получаем

$$\tau = \frac{S}{v_{01} + v_{02}} = \frac{130}{5 + 1,5} = 20 \text{ с},$$

$$S_1 = x_1 |_{t=\tau} = v_{01}\tau - \frac{a_1 \tau^2}{2} = 5 \cdot 20 - \frac{0,2 \cdot 20^2}{2} = 60 \text{ м},$$

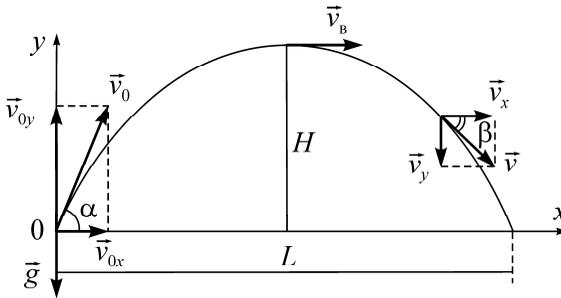
$$S_2 = S - S_1 = 130 - 60 = 70 \text{ м}.$$

№ 2. Из орудия вылетает снаряд со скоростью v_0 под углом α к горизонту. Определить: а) скорость (модуль и направление) и положение (координаты) снаряда в любой момент времени; б) время подъема до наивысшей точки и время полета; в) высоту подъема и дальность полета. Сопротивлением воздуха пренебречь.

Решение.

Делаем чертеж (рисунок). Начало координат удобнее выбрать на месте выстрела, оси x и y направить в стороны полета снаряда. Векторы скорости и перемещения изменяются по следующим законам: $\vec{v} = \vec{v}_0 + \vec{g}t$, $\vec{S} = \vec{v}_0t + \frac{\vec{g}t^2}{2}$, где \vec{g} – ускорение свободного падения. Разложим на проекции. Если $x_0 = 0$ и $y_0 = 0$, проекция перемещения равна координате:

$$\left. \begin{aligned} v_x &= v_0 \cos \alpha & (1) \\ v_y &= v_0 \sin \alpha - gt & (2) \end{aligned} \right\}; \quad \left. \begin{aligned} x &= v_0 \cos \alpha t & (3) \\ y &= v_0 \sin \alpha t - \frac{gt^2}{2} & (4) \end{aligned} \right\}.$$



По принципу независимости движений движение тела, брошенного под углом к горизонту, мы представили как состоящее из двух более простых: равномерного движения в горизонтальном направлении и равноускоренного (с ускорением \vec{g}) – в вертикальном.

Модуль скорости можно найти из формулы $v = \sqrt{v_x^2 + v_y^2}$, а направление (угол с горизонтом β) из соотношения $\operatorname{tg} \beta = \frac{v_y}{v_x}$.

Причем в точке, показанной на рисунке, угол $\beta < 0$, так как проекция скорости $v_y < 0$; это говорит о том, что снаряд уже уменьшает высоту.

В наивысшей точке траектории скорость \vec{v}_B направлена горизонтально, ее проекция $v_{By} = 0$; подставив 0 в уравнение (2), получаем время подъема $t_{\text{под}} = \frac{v_0 \sin \alpha}{g}$. Положив в уравнении (4) $y = 0$, получаем два корня: первый $t = 0$ соответствует началу полета, второй времени полета $t_{\text{пол}} = \frac{2v_0 \sin \alpha}{g}$. Заметьте, $t_{\text{пол}} = 2t_{\text{под}}$, значит, время подъема равно времени спуска.

Максимальную высоту подъема найдем из уравнения (4), подставив $t_{\text{пол}}$: $H = \frac{v_{0y}^2}{2g} = \frac{v_0^2 \sin^2 \alpha}{2g}$. Эту же формулу можно получить, разложив на проекции уравнение $2\vec{a}\vec{S} = v^2 - v_0^2$.

Подставив $t_{\text{пол}}$ в уравнение (3) и вспомнив, что $2 \sin \alpha \cos \alpha = \sin 2\alpha$, получаем дальность полета снаряда $L = \frac{v_0^2 \sin 2\alpha}{g}$.

Из формулы видно, что наибольшая дальность полета при угле $\alpha = 45^\circ$.

Если в полученных выше формулах подставить $\alpha = 0^\circ$, получим формулы для вертикального движения. Выразив время t из уравнения (3) и подставив в выражение (4), увидим что **траектория – парабола**.

№ 3. Зависимость угла поворота тела от времени дается уравнением $\varphi = A + Bt + Ct^2 + Dt^3$, где $A = 1$ рад, $B = 0,1$ рад/с, $C = 0,02$ рад/с², $D = 0,01$ рад/с³. Найти: а) угловой путь, пройденный за 3 с от начала отсчета времени; б) среднюю угловую скорость; в) среднее угловое ускорение за 3 с от начала движения.

Р е ш е н и е.

Угловой путь, пройденный за 3 с, $\varphi = \varphi_2 - \varphi_1$, где φ_2 – угловой путь, пройденный за 3 с ($t_2 = 3$ с); φ_1 – угловой путь к моменту времени $t_1 = 0$ с:

а) из зависимости углового пути от времени $\varphi(t)$ (см. условие задачи) найдем φ_1 и φ_2 :

$$\varphi_1 = A = 1 \text{ рад};$$

$$\varphi_2 = A + Bt + Ct^2 + Dt^3 = 1 + 0,1 \cdot 3 + 0,02 \cdot 3^2 + 0,01 \cdot 3^3 = 1,75 \text{ рад};$$

$$\varphi = \varphi_2 - \varphi_1 = 1,75 - 1 = 0,75 \text{ рад};$$

б) средняя угловая скорость за 3 с от начала вращения выражается формулой

$$\langle \omega \rangle = \frac{\varphi_2 - \varphi_1}{t_2 - t_1} = \frac{1,75 - 1}{3 - 0} = 0,25 \text{ рад/с};$$

в) среднее угловое ускорение за 3 с от начала вращения

$$\langle \varepsilon \rangle = \frac{\omega_2 - \omega_1}{t_2 - t_1},$$

где ω_2 – угловая скорость в момент времени $t_2 = 3$ с; ω_1 – угловая скорость в момент времени $t_1 = 0$ с.

Мгновенную угловую скорость найдем по определению

$$\omega = \frac{d\varphi}{dt} = B + 2Ct + 3Dt^2.$$

Подставим числовые данные:

$$t_1 = 0 \text{ с}, \omega_1 = B = 0,1 \text{ рад/с},$$

$$t_2 = 3 \text{ с}, \omega_2 = 0,1 + 2 \cdot 0,02 \cdot 3 + 3 \cdot 0,01 \cdot 3^2 = 0,49 \text{ рад/с}.$$

Среднее угловое ускорение

$$\langle \varepsilon \rangle = \frac{0,49 - 0,1}{3 - 0} = 0,13 \text{ рад/с}^2.$$

№ 4. Тело вращается вокруг неподвижной оси по закону

$$\varphi = 10 + 20t - 2t^2.$$

Найти полное ускорение точки (величину и направление), находящейся на расстоянии 0,1 м от оси вращения, для момента времени $t = 4$ с.

Р е ш е н и е.

Каждая точка вращающегося тела описывает окружность. Полное ускорение точки, движущейся по кривой линии, может быть найдено как геометрическая сумма тангенциального \vec{a}_τ , направленного по касательной к траектории, и нормального \vec{a}_n , направленного к центру кривизны траектории:

$$a = \sqrt{a_\tau^2 + a_n^2}. \quad (1)$$

Тангенциальное и нормальное ускорения точки вращающегося тела выражаются формулами

$$a_\tau = \varepsilon R, \quad (2)$$

$$a_n = \omega^2 R, \quad (3)$$

где ε – угловое ускорение тела; R – расстояние точки от оси вращения; ω – угловая скорость тела.

Подставляя формулы (2) и (3) в выражение (1), находим

$$a = \sqrt{\varepsilon^2 R^2 + \omega^4 R^2} = R\sqrt{\varepsilon^2 + \omega^4}. \quad (4)$$

Угловая скорость вращающегося тела равна первой производной от угла поворота по времени:

$$\omega = \frac{d\varphi}{dt} = 20 - 4t.$$

В момент времени $t = 4$ с угловая скорость

$$\omega = (20 - 4 \cdot 4) = 4 \text{ рад/с.}$$

Угловое ускорение вращающегося тела равно первой производной от угловой скорости по времени:

$$\varepsilon = \frac{d\omega}{dt} = -4 \text{ рад/с}^2.$$

Это выражение не содержит аргумента времени t , следовательно, угловое ускорение имеет постоянное значение, не зависящее от времени.

Подставив значения ω и ε в формулу (4), получим

$$\varepsilon = 0,1 \cdot \sqrt{(-4)^2 + 4^4} = 1,65 \text{ м/с}^2.$$

1.2. Динамика материальной точки

Динамика – раздел механики, в котором изучается движение тел с причинно-следственной точки зрения, т.е. под действием других тел. Из опыта известно, что все тела взаимодействуют между собой. Мера взаимодействия тел, в результате которого тела деформируются или приобретают ускорение, называют *силой*.

Основная задача динамики материальной точки состоит в том, чтобы найти законы движения точки, зная приложенные к ней силы, или, наоборот, по известным законам движения определить силы, действующие на эту точку. Для овладения методом решения этих задач необходимо усвоить следующее: понятие силы как вектора, имеющее абсолютное значение (модуль), направление и точку приложения; формулировки и физическую сущность трех законов Ньютона; типы сил, рассматриваемых в механике (трения, упругости, тяготения). Рекомендуется придерживаться следующей последовательности действий:

1. Выбрать систему отсчета (см. главу «Кинематика»).

2. Найти все силы, действующие на тело, и изобразить их на чертеже. Определить (или предположить) направление ускорения и изобразить его на чертеже.

Следует помнить, что, говоря о движении какого-либо тела, например поезда, самолета, автомобиля и т.д., мы подразумеваем под этим движение материальной точки. Расставляя силы, приложенные к телу, необходимо всё время руководствоваться третьим законом Ньютона, помня, что силы могут действовать на это тело только со стороны других тел: со стороны Земли это будет сила тяжести, равная $m\vec{g}$; со стороны нити – сила натяжения \vec{T} ; со стороны поверхности – силы нормальной реакции \vec{N} и трения $\vec{F}_{\text{тр}}$.

3. Записать для данного тела (тел) уравнение второго закона Ньютона в векторной форме и перейти к скалярной записи, заменив все векторы их проекциями на оси координат.

4. Исходя из физической природы сил, выразить силы через величины, от которых они зависят. Скажем, силу трения нужно представить через коэффициент трения и силу нормального давления, если известно, что тело скользит по поверхности.

5. Если в задаче требуется определить положение или скорость точки, то к полученным уравнениям динамики необходимо добавить кинематические уравнения.

6. Решить полученную систему уравнений относительно искомых величин.

Основные формулы

1. Импульс материальной точки, движущейся поступательно со скоростью v ,

$$\vec{p} = m\vec{v}.$$

2. Второй закон Ньютона

$$d\vec{p} = \vec{F}dt,$$

$$\sum_{i=1}^N \vec{F}_i = m\vec{a},$$

где \vec{F} – сила, действующая на тело.

3. Силы, рассматриваемые в механике:

а) сила упругости

$$F_{\text{упр}} = kx,$$

где k – коэффициент упругости (в случае пружины – жесткость);
 x – абсолютная деформация;

б) вес \vec{P} – сила, с которой тело действует на опору или подвес;

в) сила гравитационного притяжения

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

где m_1 и m_2 – массы взаимодействующих тел; r – расстояние между телами (тела – материальные точки или шарообразной формы);

г) сила тяжести

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

где \vec{g} – ускорение свободного падения;

д) сила трения скольжения

$$F_{\text{тр}} = \mu N,$$

где μ – коэффициент трения; N – сила нормальной реакции опоры.

4. Закон сохранения импульса: *импульс замкнутой системы не изменяется с течением времени:*

$$\sum_{i=1}^n m\vec{v}_i = \text{const} \quad \text{при} \quad \sum_{j=1}^k \vec{F}_{\text{внеш}} = 0.$$

Для двух тел ($i = 2$)

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

где v_1 и v_2 – скорости тел в момент времени, принятый за начальный; u_1 и u_2 – скорости тех же тел в момент времени, принятый за конечный.

5. Кинетическая энергия тела, движущегося поступательно,

$$W_{\text{к}} = \frac{mv^2}{2}, \quad \text{или} \quad W_{\text{к}} = \frac{p^2}{2m}.$$

6. Потенциальная энергия:

а) упругодеформированной пружины

$$W_{\text{п}} = \frac{1}{2}kx^2,$$

где k – жесткость пружины; x – абсолютная деформация;

б) гравитационного взаимодействия

$$W_{\text{п}} = -G \frac{m_1 m_2}{r},$$

где G – гравитационная постоянная; m_1 и m_2 – массы взаимодействующих тел; r – расстояние между ними (тела – материальные точки или шарообразной формы);

в) тела, находящегося в однородном поле силы тяжести,

$$W_{\text{п}} = mgh,$$

где g – ускорение свободного падения; h – высота тела над уровнем, принятым за нулевой (формула справедлива при условии $h \ll R$, где R – радиус Земли).

7. Закон сохранения механической энергии: *механическая энергия консервативной системы не изменяется с течением времени:*

$$W = W_{\text{к}} + W_{\text{п}} = \text{const},$$

если система консервативна, т.е. работа неконсервативных сил $A^{\text{н/к}}(F_{\text{тр}}, F_{\text{сопр}}) = 0$.

8. Механическая работа

$$dA = (\vec{F}d\vec{r}) = Fdr\cos\alpha,$$

$$A = \int_1^2 \vec{F}d\vec{r} = \int_{S_1}^{S_2} F_S dS,$$

для постоянной силы

$$A = FS\cos\alpha,$$

или

$$A = \Delta W = W_2 - W_1.$$

Примеры решения задач

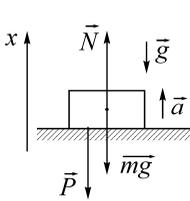
№ 1. Лифт опускается вниз и перед остановкой движется замедленно. Определить, с какой силой \vec{P} (вес тела) будет давить на пол лифта человек массой 60 кг, если ускорение лифта равно 4 м/с^2 .

Р е ш е н и е.

Записываем второй закон Ньютона:

$$\sum_{i=1}^n \vec{F}_i = m\vec{a}.$$

2. Делаем схематический чертеж, на котором указываем силы, действующие на тело, ускорение тела и систему отсчета:



$m\vec{g}$ – сила тяжести; \vec{N} – сила нормальной реакции опоры (пола кабины). По третьему закону Ньютона вес тела \vec{P} численно равен силе нормальной реакции \vec{N} , противоположно направленной и приложенной к опоре: $\vec{P} = -\vec{N}$.

3. Расписываем второй закон Ньютона в векторной форме в соответствии с условием задачи:

$$\vec{m\vec{g}} + \vec{N} = m\vec{a}.$$

4. Записываем это уравнение в скалярной форме, проектируя все векторы на ось (направление оси выбирается произвольно):

$$x: N - mg = ma.$$

Из этого уравнения выражаем N :

$$N = mg + ma.$$

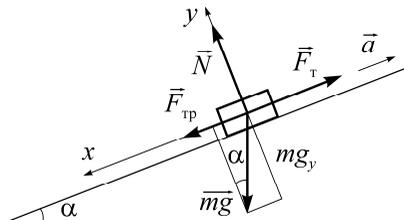
Следовательно,

$$P = m(g + a).$$

Подставляем числовые данные:

$$P = 60(4 + 9,8) = 828 \text{ Н}.$$

№ 2. Вагонетку массой 3 т поднимают по рельсам в гору, наклон которой 30° . Какую работу совершает сила тяги на пути в 50 м, если известно, что вагонетка двигалась с ускорением $0,2 \text{ м/с}^2$? Коэффициент трения принять равным 0,1.



Р е ш е н и е.

Работа постоянной силы тяги F_T определяется по формуле

$$A = F_T S \cos \alpha_0,$$

где α_0 – угол между силой и перемещением. Сила тяги направлена вдоль перемещения, поэтому угол $\alpha_0 = 0$ и $\cos \alpha_0 = 1$.

1.
$$\sum_{i=1}^n \vec{F}_i = m\vec{a}.$$

2. Делаем чертеж.

3. Записываем уравнение второго закона Ньютона в векторной форме.

На тело действуют четыре силы: $m\vec{g} + \vec{F}_T + \vec{F}_{\text{тр}} + \vec{N} = m\vec{a}.$

Поскольку силы направлены под углом друг к другу, систему отсчета составим из двух взаимно перпендикулярных осей x и y , развернув ее для удобства так, что одну ось направим вдоль наклонной плоскости параллельно ускорению, а другую – перпендикулярно ей.

4. Записываем уравнение в проекциях на оси:

$$x: mg \sin \alpha - F_T + F_{\text{тр}} + 0 = -ma,$$

$$y: -mg \cos \alpha + 0 + 0 + N = 0,$$

$$F_{\text{тр}} = \mu N,$$

где μ – коэффициент трения.

Решаем систему трех уравнений относительно F_T :

$$F_T = mg \sin \alpha + \mu mg \cos \alpha + ma = m(g \sin \alpha + \mu g \cos \alpha + a).$$

5. $A = F_T S = m(g \sin \alpha + \mu g \cos \alpha + a)S.$

Подставляем числовые данные:

$$A = 3 \cdot 10^3 (9,81 \cdot 0,5 + 0,1 \cdot 9,81 \cdot 0,866 + 0,2) \cdot 50 = 893 \text{ кДж}.$$

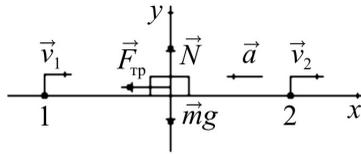
№ 3. Трамвайный вагон массой 16 т движется по горизонтальному пути со скоростью 6 м/с. Какова должна быть тормозящая сила, чтобы остановить вагон на расстоянии 10 м?

Р е ш е н и е.

1. Определяем, какие силы действуют в системе. Поскольку в системе работают и консервативные силы (mg) и неконсервативные ($F_{\text{тр}}$), а движение горизонтальное, удобно применить теорему об изменении кинетической энергии

$$\Delta W_{\text{к}} = \sum A^{\text{к}} + A^{\text{нк}}.$$

2. Делаем чертеж, на котором указываем начальное и конечное положения тела, силы, скорость, ускорение и систему отсчета.



3. Расписываем теорему об изменении кинетической энергии:

$$\frac{mv_2^2}{2} - \frac{mv_1^2}{2} = A_{mg} + A_N + A_{\text{тр}}.$$

Кинетическая энергия в конечном состоянии $\frac{mv^2}{2} = 0$, работы сил тяжести и нормальной реакции опоры в направлении оси x тоже равны нулю ($A = FScos\alpha$).

4. Записываем уравнение в окончательном варианте:

$$-\frac{mv_1^2}{2} = F_{\text{тр}} S \cos 180^\circ.$$

5. Определяем силу торможения

$$F_{\text{тр}} = \frac{mv_1^2}{2S}.$$

Подставляем данные:

$$F_{\text{тр}} = \frac{16 \cdot 10^3 \cdot 36}{2 \cdot 10} = 28,8 \text{ кН}.$$

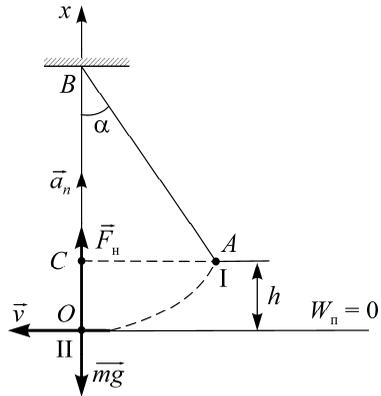
№ 4. Люстра весом 98 Н висит на цепи, которая выдерживает нагрузку 196 Н. На какой максимальный угол α можно отклонить люстру от положения равновесия, чтобы при последующих колебаниях цепь не оборвалась?

Р е ш е н и е.

1. Определяем, какие силы действуют в системе (сила тяжести mg и сила натяжения нити F_n), и выбираем идею решения. Поскольку в задаче фиксируются два положения тела, а система консервативна (работа неконсервативных сил равна нулю), решить задачу можно с использованием закона сохранения энергии:

$$W_M = \text{const}, A^{\text{HK}} = 0.$$

2. Делаем чертеж (рисунок). За нулевой уровень потенциальной энергии удобно принять уровень положения равновесия (т. O). Отметим положения I и II системы, силы тяжести и натяжения, вектор нормального ускорения, скорость при прохождении положения равновесия, высоту h , на которую поднимается люстра, угол отклонения α .



3. Расписываем закон сохранения энергии:

$$W_{M1} = W_{MII}, \quad W_{II} + 0 = 0 + W_{кII},$$

$$mgh = \frac{mv^2}{2}.$$

4. Поскольку этого уравнения недостаточно для нахождения неизвестного, применим второй закон Ньютона для криволинейного движения и решим систему двух уравнений:

$$mgh = \frac{mv^2}{2}, \quad (1)$$

$$\vec{F}_n + m\vec{g} = m\vec{a}_n. \quad (2)$$

5. Запишем второе уравнение в скалярной форме (через проекции на ось x):

$$x: F_n - mg = \frac{mv^2}{R}, \quad (3)$$

где R – длина нити, $R = l$.

Из первого уравнения выразим mv^2 и подставим в выражение (3):

$$F_n - mg = \frac{2mgh}{l}.$$

6. Введем неизвестное, обратившись к рисунку.

Из треугольника ABC : $BC = AB\cos\alpha = l\cos\alpha$.

$$h = l - l\cos\alpha = l(1 - \cos\alpha).$$

Высоту поднятия h подставим в рабочее уравнение и найдем α :

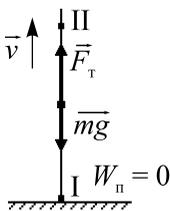
$$F_n - mg = 2mg(1 - \cos\alpha),$$

$$\cos\alpha = \frac{3mg - F_n}{2mg} = \frac{3 \cdot 98 - 196}{2 \cdot 98} = 0,5,$$

$$\alpha = 60^\circ.$$

№ 5. Какую мощность N должен развить двигатель ракеты для обеспечения подъема ракеты на высоту $h = 1$ км, если масса ракеты $m = 3000$ кг, а время подъема $t = 1$ мин? Движение считать равноускоренным.

Решение.



1. Как и в предыдущих задачах, определяем силы, действующие в системе, выбираем идею решения.

Поскольку система неконсервативна – на ракету действуют консервативная сила тяжести ($m\vec{g}$) и неконсервативная сила тяги (\vec{F}_T),

а движение вертикальное, удобно выбрать закон превращения полной механической энергии:

$$W_{\text{МII}} - W_{\text{MI}} = A^{\text{HK}},$$

где $W_{\text{M}} = W_{\text{K}} + W_{\text{П}}$.

2. Делаем чертеж.

3. Расписываем уравнение закона изменения энергии

$$\left(\frac{mv^2}{2} + mgh \right) - 0 = A_{\text{T}},$$

где 0 – полная энергия в положении I; A_{T} – работа силы тяги двигателя.

4. Записываем уравнение мощности по определению

$$N_{\text{cp}} = \frac{A}{t},$$

подставляем в него выражение A_{T} :

$$N_{\text{cp}} = \frac{\frac{mv^2}{2} + mgh}{t} = \frac{mv^2}{2t} + \frac{mgh}{t}.$$

5. Выражаем скорость v в конечном состоянии II, используя уравнения равноускоренного движения $v = v_0 + at$, где $v_0 = 0$:

$$h = \frac{at^2}{2} = \frac{v}{2}t \Rightarrow v = \frac{2h}{t}.$$

6. Подставляем v в формулу мощности

$$N_{\text{cp}} = \frac{m2h^2}{t^3} + \frac{mgh}{t} = \frac{mgh}{t} \left(\frac{2h}{gt^2} + 1 \right).$$

7. Производим вычисления:

$$N_{\text{cp}} = 0,35 \text{ МВт.}$$

1.3. Динамика вращательного движения твердого тела

Вращательным движением твердого тела вокруг неподвижной оси называется такое движение, при котором все точки

твердого тела движутся по окружностям, центры которых лежат на одной прямой, называемой *осью вращения*.

Основные формулы

1. Момент силы

$$\vec{M} = [\vec{r} \times \vec{F}],$$

$$M = rF\sin\alpha = F \cdot l,$$

где l – плечо силы, $l = r\sin\alpha$.

2. Момент импульса тела, вращающегося относительно неподвижной оси,

$$\vec{L} = I\vec{\omega},$$

где ω – угловая скорость тела.

3. Основное уравнение динамики вращательного движения относительно неподвижной оси

$$\vec{M} = I\vec{\varepsilon},$$

где \vec{M} – результирующий момент внешних сил, действующих на тело; I – момент инерции тела относительно оси вращения; $\vec{\varepsilon}$ – угловое ускорение.

4. Моменты инерции некоторых тел массой m относительно оси, проходящей через центр масс:

а) стержня длины l относительно оси, перпендикулярной стержню,

$$I = \frac{1}{12}ml^2;$$

б) обруча (тонкостенного цилиндра) относительно оси, перпендикулярной плоскости обруча (совпадающей с осью цилиндра),

$$I = mR^2;$$

в) диска (сплошного цилиндра) радиусом R относительно оси, перпендикулярной плоскости диска,

$$I = \frac{1}{2} mR^2.$$

5. Закон сохранения момента импульса системы тел, вращающихся вокруг неподвижной оси,

$$\sum_{i=1}^N I\vec{\omega}_i = \text{const} \quad \left(\sum \vec{M}_{\text{вн}} = 0 \right),$$

для двух тел

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

где $I_1, \omega_1, I_2, \omega_2$ – моменты инерции и угловые скорости тел в момент времени, принятый за начальный; $I'_1, \omega'_1, I'_2, \omega'_2$ – те же величины в момент времени, принятый за конечный.

6. Кинетическая энергия тела, вращающегося вокруг неподвижной оси,

$$W_k = \frac{I\omega^2}{2}.$$

Примеры решения задач

№ 1. Маховик, выполненный в виде диска радиусом 0,4 м и имеющий массу 100 кг, был раскручен до частоты вращения 480 об/мин и предоставлен самому себе. Под действием трения вала о подшипники маховик остановился через 1 мин 20 с. Определить момент силы трения вала о подшипники.

Р е ш е н и е.

Используем основное уравнение динамики вращательного движения

$$M\Delta t = I\omega_2 - I\omega_1,$$

где M – тормозящий момент; Δt – время действия тормозящего момента; I – момент инерции маховика; ω_2 – конечная угловая скорость; ω_1 – начальная угловая скорость.

Решая уравнение относительно M , получим

$$M = \frac{I(\omega_2 - \omega_1)}{\Delta t}.$$

Найдем числовые значения величин и подставим их в выражение для M :

$$I = \frac{mR^2}{2} = \frac{100 \cdot (0,4)^2}{2} = 8 \text{ кг} \cdot \text{м}^2,$$

$$\omega_1 = \frac{2\pi n}{60} = \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 480}{6} = 50 \text{ рад/с},$$

$$M = \frac{8(0 - 50)}{80} = -5 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Знак «минус» означает, что момент M – тормозящий.

№ 2. Платформа в виде диска радиусом $R = 1,5$ м и массой $m_1 = 180$ кг вращается по инерции около вертикальной оси, делая $n = 10$ об/мин. В центре платформы стоит человек массой $m_2 = 60$ кг. Какую линейную скорость относительно пола будет иметь человек, если он перейдет на край платформы?

Р е ш е н и е.

Записываем закон сохранения момента импульса

$$\sum_{i=1}^n (I\omega)_i = \text{const}$$

или

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

Для данной задачи

$$(I_1 + I_2)\omega = (I_1 + I'_2)\omega', \quad (1)$$

где I_1 – момент инерции платформы; I_2 – момент инерции человека, стоящего в центре платформы; ω – угловая скорость платформы с человеком, стоящим в центре; I'_2 – момент инерции человека, стоящего на краю платформы; ω' – угловая скорость платформы с человеком, стоящим на ее краю.

3. Линейная скорость человека, стоящего на краю платформы, связана с угловой скоростью соотношением

$$v = \omega'R. \quad (2)$$

4. Угловую скорость ω' выразим из уравнения (1):

$$\omega' = \frac{I_1 + I_2}{I_1 + I_2'} \omega,$$

и подставим в уравнение (2):

$$v = \frac{I_1 + I_2}{I_1 + I_2'} \omega R. \quad (3)$$

5. Момент инерции платформы (диска)

$$I_1 = \frac{1}{2} mR^2,$$

момент инерции человека (материальной точки)

$$I_2 = 0, \quad I_2' = m_2 R^2.$$

Угловая скорость платформы ω до перехода человека

$$\omega = 2\pi n.$$

6. Подставим выражения для I_1 , I_2 , I_2' и ω в формулу (3):

$$v = \frac{0,5m_1R^2}{0,5m_1R^2 + m_2R^2} 2\pi nR,$$

упростим:

$$v = \frac{m_1}{m_1 + 2m_2} 2\pi nR.$$

7. Подставляем числовые значения величин:

$$v = \frac{180}{180 + 2 \cdot 60} \cdot 2 \cdot 3,14 \cdot \frac{1}{6} \cdot 1,5 \approx 1 \text{ м/с.}$$

№ 3. На краю диска, масса которого m и радиус R , стоит человек массой M . Диск совершает вращательное движение

с частотой n (об/с). Чему равна кинетическая энергия системы? Чему равна работа внешних сил, в результате действия которых частота вращения увеличивается вдвое?

Р е ш е н и е.

Запишем формулу кинетической энергии вращающегося тела

$$E_{\text{к}} = \frac{I\omega^2}{2}, \quad (1)$$

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

Выразим момент инерции системы I и угловую скорость ω . Момент инерции системы складывается из моментов инерции тел системы:

$$I = I_1 + I_2,$$

где I_1 – момент инерции диска, $I_1 = \frac{mR^2}{2}$; I_2 – момент инерции человека, $I_2 = MR^2$. Угловая скорость $\omega = 2\pi n$. Подставим выражения I_1 и I_2 в формулу (1):

$$W_{\text{к}} = \frac{I_1 + I_2}{2} (2\pi n)^2 = \left(\frac{mR^2}{2} + MR^2 \right) \frac{4\pi^2 n^2}{2} = (m + 2M) \frac{R^2 4\pi^2 n^2}{4},$$

$$W_{\text{к}} = \pi^2 n^2 R^2 (m + 2M). \quad (2)$$

Работу сил определяем по теореме об изменении кинетической энергии:

$$W_{\text{к}2} - W_{\text{к}1} = \sum A.$$

Используя уравнение (2) и условие $n_2 = 2n_1$, запишем

$$A = \pi^2 4n^2 R^2 (m + 2M) - \pi^2 n^2 R^2 (m + 2M) = 3\pi^2 n^2 R^2 (m + 2M).$$

1.4. Гидромеханика

Основная задача гидромеханики состоит в том, чтобы найти законы распределения давлений и скоростей внутри жидкости.

Сравнительно просто эта задача решается для идеальной несжимаемой жидкости, в которой отсутствуют силы трения между ее слоями (нет вязкости). Со стороны идеальной жидкости на тела могут действовать только нормальные силы упругости.

Задачи, связанные с нахождением давлений и сил давления в какой-либо точке внутри жидкости, решаются на основании закона Паскаля и вытекающих из него следствий. К ним можно отнести задачи на сообщающиеся сосуды. Порядок их решения может быть следующим:

1. Сделать схематический чертеж и отметить равновесные уровни жидкости, которые она занимает по условию задачи. Если даны сообщающиеся сосуды с разнородными жидкостями, то нужно отметить уровни каждой из них. Затем следует выбрать поверхность нулевого уровня, от которого будут отсчитываться высоты столбов всех жидкостей. Эта поверхность должна проходить через однородную жидкость; обычно ее выбирают на нижней границе раздела сред (жидкость – жидкость, жидкость – воздух) или на уровне трубки, соединяющей сосуды. Если по условию задачи происходит перетекание жидкости из одного сосуда в другой и при этом имеется два или несколько равновесных состояний жидкостей, то необходимо отметить высоты всех уровней, отсчитывая их от поверхности нулевого уровня.

2. Указав высоты столбов всех жидкостей в сосудах относительно поверхности нулевого уровня, следует записать уравнение равновесия жидкостей.

3. Составив уравнение равновесия, следует, при необходимости, дополнить его условиями, которые связывают между собой высоты h_1 , h_2 и т.д. Например, если жидкость перетекала из одного сосуда в другой, то обычно в качестве дополнительного условия используется свойство несжимаемости жидкостей: при уменьшении объема жидкости в одном из сосудов объем этой жидкости в другом сосуде увеличивается на такую же величину. Совместное решение полученных уравнений позволяет найти искомые величины.

В другую группу задач можно выделить задачи на применение силы Архимеда при плавании или движении тел в жидкости. Принципиально решение таких задач не отличается от решения задач статики и динамики. Здесь, кроме сил, рассмотренных в п. 2.2, должна быть учтена сила Архимеда.

Основные формулы

1. Давление, производимое силой F , равномерно распределенной по плоской поверхности площадью S и действующей перпендикулярно поверхности, находим следующим образом:

$$p = \frac{F_{\perp}}{S}.$$

2. Давление, создаваемое покоящейся жидкостью, называют гидростатическим.

При отсутствии движения внутри идеальной жидкости, находящейся в равновесии, давление, производимое жидкостью на глубине h , вычисляется по формуле

$$p = \rho gh,$$

где ρ – плотность жидкости; g – модуль ускорения свободного падения.

Формула носит общий характер: давление не зависит от того, какую форму имеет сосуд, содержащий жидкость.

3. На тело, погруженное в жидкость, действует выталкивающая сила, модуль которой равен весу жидкости, вытесненной телом:

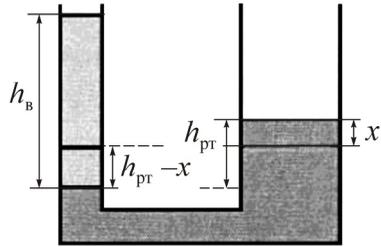
$$F_A = \rho_{\text{ж}} g V_{\text{в.ж}},$$

где $\rho_{\text{ж}}$ – плотность жидкости; $V_{\text{в.ж}}$ – объем вытесненной жидкости.

4. Уравнение Бернулли $\frac{\rho v^2}{2} + \rho gh + p = \text{const.}$

Примеры решения задач

№ 1. В сообщающихся сосудах находится ртуть. Площадь сечения одного сосуда в 2 раза больше, чем другого. В узкий сосуд наливают столб воды высотой 1,02 м. На сколько миллиметров поднимется ртуть в широком сосуде?



Р е ш е н и е.

Приравнявая давления в сосудах на уровне границы ртути с водой, приходим к уравнению

$$\rho_{\text{рт}} h_{\text{рт}} = \rho_{\text{в}} h_{\text{в}}$$

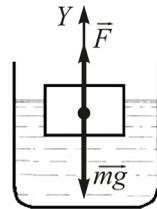
Обозначив за x изменение уровня ртути в широком сосуде, запишем условие неизменности объема ртути

$$2Sx = S(h_{\text{рт}} - x)$$

(увеличение объема ртути в широком сосуде равно уменьшению в узком сосуде). Решая совместно эти уравнения, получаем

$$x = \frac{\rho_{\text{в}} h_{\text{в}}}{3\rho_{\text{рт}}} = 25 \cdot 10^{-3} \text{ м} = 25 \text{ мм.}$$

№ 2. Однородное тело плавает на поверхности керосина ($\rho_{\text{к}} = 800 \text{ кг/м}^3$) так, что объем погруженной части составляет 0,92 всего объема тела. Определить объем погруженной части при плавании тела на поверхности воды.



Р е ш е н и е.

Обозначим: V – объем всего тела; $V_{\text{п}}^{\text{к}}$ – объем погруженной части тела, плавающего в керосине; $V_{\text{п}}^{\text{в}}$ – объем погруженной части тела, плавающего в воде. На тело, плавающее в керосине, действуют mg – сила тяжести; $F = \rho_{\text{к}} V_{\text{п}}^{\text{к}} g$ – сила Архимеда; $\rho_{\text{к}}$ и

$\rho_{\text{в}}$ – плотности керосина и воды. Из условия плавания следует, что $mg = F$, или

$$mg = \rho_{\text{к}} V_{\text{п}}^{\text{к}} g = \rho_{\text{к}} \cdot 0,92Vg. \quad (1)$$

Аналогично запишем условие плавания тела в воде:

$$mg = F_{\text{в}} \text{ или } mg = \rho_{\text{в}} V_{\text{п}}^{\text{в}} g. \quad (2)$$

Из уравнений (1) и (2) получим $\rho_{\text{к}} \cdot 0,92Vg = \rho_{\text{в}} V_{\text{п}}^{\text{в}} g$, откуда

$$V_{\text{п}}^{\text{в}} = \frac{0,92\rho_{\text{к}}}{\rho_{\text{в}}} V = \frac{0,92 \cdot 800}{1000} V \approx 0,74V.$$

1.5. Механические колебания и волны

Колебательным называется такое движение, при котором тело многократно проходит одно и то же устойчивое положение равновесия. Если при этом оно возвращается в исходное положение через равные промежутки времени, то такие колебания называют *периодическими*. Если в периодических колебаниях изменения всех физических величин происходят по закону синуса (или косинуса), то такие колебания называются *гармоническими*, а частица, совершающая гармонические колебания, называется *гармоническим осциллятором*. Простейшей колебательной системой с одной степенью свободы является линейный осциллятор, описываемый дифференциальным уравнением

$$x'' + \omega_0^2 x = 0.$$

В данной системе реализуются гармонические колебания вида

$$x = A \cdot \sin(\omega_0 t + \varphi_0),$$

где A – амплитуда колебаний; ω_0 – циклическая частота; φ_0 – начальная фаза.

Задачи данного подраздела можно условно разделить на три группы: задачи, требующие применения общих уравнений

гармонических колебаний, и задачи на сложение колебаний; задачи о математических и физических маятниках; задачи о распространении механических колебаний в пространстве, т.е. волн.

При решении задач *первой группы* следует обратить особое внимание на составление дифференциального уравнения для точки, совершающей гармонические колебания. Это уравнение в конечном итоге приводит к соотношению $k = m\omega_0^2$, в котором коэффициент k должен быть выражен через те или иные величины, характеризующие колебательную систему. Нахождение выражения для этого коэффициента фактически и представляет основное содержание задач такого типа.

Для решения задач на сложение колебаний одного направления достаточно часто используется метод вращающегося вектора амплитуды (метод векторных диаграмм), когда складываемые колебания изображаются в виде двух векторов, амплитуда и фаза результирующего колебания находятся по теореме косинусов.

При решении задач на сложение взаимно перпендикулярных колебаний для нахождения траектории результирующих колебаний можно воспользоваться уравнением эллипса

$$\frac{x^2}{A_1^2} - \frac{2xy}{A_1 A_2} \cos(\Delta\varphi) + \frac{y^2}{A_2^2} = \sin^2(\Delta\varphi).$$

В этом случае наибольшую сложность представляет определение $\Delta\varphi$ – разности фаз складываемых колебаний. При этом надо помнить, что складываемые колебания должны иметь одинаковую частоту. В некоторых случаях задачи данного типа решаются с использованием формул тригонометрии.

При решении задач *второй группы* нужно представлять, что при ускоренном движении точки подвеса математического маятника изменяется сила натяжения нити, что приводит к изменению равнодействующей силы и, следовательно, частоты и периода колебаний. Формулу периода колебаний легко полу-

чить для каждого конкретного случая, внося соответствующую поправку в формулу периода математического маятника:

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{l}{a}},$$

где l – длина подвеса; a – модуль ускорения, сообщаемого грузу силой натяжения нити. Если маятник в том или ином направлении приобретает переносное ускорение \vec{a}_n , то $\vec{a} = \vec{g} - \vec{a}_n$. Найдя обычными методами модуль этого ускорения и подставив его в приведенную выше формулу, получим выражение для периода колебаний математического маятника с учетом движения точки подвеса.

Что касается задач на физический маятник, то здесь нужно хорошо знать понятие приведенной длины физического маятника, которая зависит от момента инерции маятника и расстояния между точкой подвеса и центром тяжести.

Решение задач *третьей группы* сводится обычно к записи уравнения плоской волны и соотношения между длиной волны и скоростью ее распространения, что дает возможность определить фазу (разность фаз) или смещение точки от положения равновесия в произвольный момент времени.

Основные формулы

1. Связь между периодом, циклической частотой и частотой

$$T = \frac{2\pi}{\omega_0} = \frac{1}{\nu}.$$

2. Кинематические характеристики колебательного движения:

– путь (смещение) $x = A \sin(\omega_0 t + \varphi_0)$;

– скорость $v = A\omega_0 \cos(\omega_0 t + \varphi_0)$, максимальная скорость

$$v_{\max} = A\omega_0;$$

– ускорение $a = A\omega_0^2 \sin(\omega_0 t + \varphi_0)$, максимальное ускорение $a_{\max} = A\omega_0^2$.

3. Динамические характеристики колебательного движения:

– сила $F = ma = mA\omega_0^2 \sin(\omega_0 t + \varphi_0)$;

– кинетическая энергия $W_k = \frac{mv^2}{2} = \frac{mA^2\omega_0^2 \cos^2(\omega_0^2 t + \varphi_0)}{2}$;

– потенциальная энергия $W_{\text{п}} = \frac{kx^2}{2} = \frac{mA^2\omega_0^2 \sin^2(\omega_0^2 t + \varphi_0)}{2}$;

– полная энергия $W = \frac{mA^2\omega_0^2}{2}$.

4. Период колебаний пружинного маятника

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k}}.$$

5. Период колебаний математического маятника

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{l}{g}}.$$

6. Период колебаний физического маятника

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{L}{g}} = 2\pi\sqrt{\frac{I}{mbg}},$$

где L – приведенная длина; I – момент инерции; b – расстояние от точки подвеса до центра тяжести.

7. Сложение колебаний:

а) сложение колебаний одинаковой частоты, направленных вдоль одной прямой:

– амплитуда результирующего колебания

$$A = \sqrt{A_1^2 + A_2^2 + 2A_1A_2 \cos(\varphi_2 - \varphi_1)};$$

– начальная фаза результирующего колебания

$$\varphi = \operatorname{arctg} \frac{A_1 \sin \varphi_1 + A_2 \sin \varphi_2}{A_1 \cos \varphi_1 + A_2 \cos \varphi_2},$$

где A_1 и A_2 – амплитуды складываемых колебаний; φ_1 и φ_2 – начальные фазы складываемых колебаний;

б) сложение взаимно перпендикулярных колебаний:

$$x = A_1 \sin(\omega_0 t + \varphi_1), \quad y = A_2 \sin(\omega_0 t + \varphi_2);$$

уравнение эллипса $\frac{x^2}{A_1^2} - \frac{2xy}{A_1 A_2} \cos(\varphi_2 - \varphi_1) + \frac{y^2}{A_2^2} = \sin^2(\varphi_2 - \varphi_1)$.

8. Затухающие колебания:

– уравнение $x = A_0 e^{-\beta t} \sin(\omega t + \varphi_0)$, где β – коэффициент затухания;

– период затухающих колебаний $T = \frac{2\pi}{\omega} = \frac{2\pi}{\sqrt{\omega_0^2 - \beta^2}}$;

– время релаксации $\tau = \frac{1}{\beta}$;

– декремент затухания $\sigma = \frac{A(t)}{A(t+T)} = e^{\beta T}$;

– логарифмический декремент затухания $\delta = \ln \sigma = \beta T$.

9. Вынужденные колебания:

– амплитуда $B = \frac{f_0}{\sqrt{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + 4\beta^2 \omega^2}}$,

– начальная фаза $\alpha = \operatorname{arctg} \frac{2\beta\omega}{\omega_0^2 - \omega^2}$,

где $f_0 = \frac{F_0}{m}$, F_0 – амплитуда вынуждающей силы; ω_0 – циклическая частота собственных колебаний; ω – циклическая частота вынужденных колебаний;

– резонансная частота $\omega_{\text{рез}} = \sqrt{\omega_0^2 - 2\beta^2}$;

– резонансная амплитуда $A_{\text{рез}} = \frac{f_0}{2\beta\sqrt{\omega_0^2 - \beta^2}}$.

10. Уравнение плоской бегущей незатухающей волны

$$x = A_0 \sin\left(\omega_0 t - \frac{2\pi}{\lambda} l\right).$$

11. Вектор Умова

$$\vec{p} = w\vec{v},$$

где w – объемная плотность энергии; v – скорость распространения волны. Его модуль равен энергии, переносимой волной за единицу времени через единичную площадку, расположенную перпендикулярно направлению распространения волны.

Примеры решения задач

№ 1. Материальная точка массой $m = 0,01$ кг совершает гармонические колебания по закону синуса с периодом $T = 2$ с и начальной фазой φ_0 , равной нулю. Полная энергия колеблющейся точки $W = 0,1$ мДж.

Требуется: найти амплитуду A колебаний; написать закон данных колебаний $x = f(t)$; найти наибольшее значение силы F_{max} , действующей на точку.

Р е ш е н и е.

1. Записываем закон гармонических колебаний

$$x = A \sin \omega t.$$

Поскольку закон не дает возможности определить амплитуду A , следует обратиться к условию задачи и воспользоваться полной энергией E . Полная энергия колеблющейся точки E равна, например, ее максимальной кинетической энергии $W_{\text{к, max}}$.

$$W = W_{\text{к, max}} = \frac{mv_{\text{max}}^2}{2}.$$

Скорость v колеблющейся точки определяем, взяв первую производную смещения x по времени:

$$v = \frac{dx}{dt} = A\omega \cos\omega t .$$

Учтем, что $v_{\max} = A\omega$ ($\cos\omega t = 1$), и подставим это выражение в уравнение энергии

$$W_{\text{к, max}} = \frac{mA^2\omega^2}{2} .$$

Найдем амплитуду колебаний

$$A = \frac{1}{\omega} \sqrt{\frac{2W}{m}} .$$

Выразим амплитуду через период T , учитывая что $\omega = \frac{2\pi}{T}$:

$$A = \frac{T}{2\pi} \sqrt{\frac{2W}{m}} .$$

Произведем вычисления:

$$\omega = \pi \text{ рад/с};$$

$$A = \frac{1}{3,14} \sqrt{\frac{2 \cdot 10^{-4}}{10^{-2}}} = 0,045 \text{ м} .$$

2. Записываем уравнение гармонических колебаний для данной точки:

$$x = 0,045 \sin \pi t .$$

3. Второй закон Ньютона

$$|F_{\max}| = ma .$$

Найдем ускорение колеблющейся точки, взяв первую производную скорости по времени:

$$a = \frac{dv}{dt} = -A\omega^2 \sin\omega t .$$

Максимальное ускорение (при $\sin\omega t = 1$)

$$|a_{\max}| = A\omega^2 .$$

Запишем выражение силы

$$|F_{\max}| = mA\omega^2.$$

Произведем вычисления:

$$F_{\max} = 0,01 \cdot 0,045 \cdot 3,14^2 \text{ Н} = 4,44 \cdot 10^{-3} \text{ Н}.$$

№ 2. Складываются два колебания одинакового направления, заданные уравнениями

$$x_1 = \cos\pi(t + 1/6),$$

$$x_2 = 2\cos\pi(t + 1/2)$$

(длина – в сантиметрах, время – в секундах). Определить амплитуды, периоды и начальные фазы складывающихся колебаний; написать уравнение результирующего колебания.

Р е ш е н и е.

1. Запишем уравнение гармонического колебания в общем виде

$$x = A\cos\left(\frac{2\pi}{T}t + \varphi_0\right). \quad (1)$$

2. Приводим заданные уравнения в соответствие с общим уравнением:

$$x_1 = A\cos\left(\pi t + \frac{\pi}{6}\right), \quad (2)$$

$$x_2 = A\cos\left(\pi t + \frac{\pi}{2}\right). \quad (3)$$

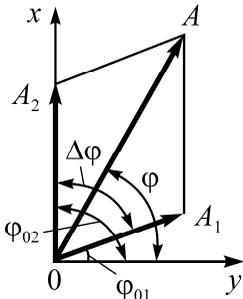
3. Сравним уравнения (2) и (3) с уравнением (1). Из сравнения: $A_1 = 1$ см; $A_2 = 2$ см.

$$\frac{2\pi}{T}t = \pi t, \quad \frac{2\pi}{T}t = \pi t \Rightarrow T_1 = 2 \text{ с}, T_2 = 2 \text{ с},$$

$$\varphi_{01} = \pi/6 \text{ рад} = 30^\circ, \varphi_{02} = \pi/2 \text{ рад} = 90^\circ.$$

Для написания уравнения результирующего колебания необходимо определить параметры результирующего колебания T , A , φ_0 .

1. Поскольку периоды колебаний одинаковы, период результирующего колебания будет тот же: $T = 2$ с.



2. Для определения амплитуды результирующего колебания A удобно воспользоваться векторной диаграммой. В системе координат xOy откладываем под углами, соответствующими начальным фазам, векторы амплитуд \vec{A}_1 и \vec{A}_2 . На них, как на сторонах, строим параллелограмм, диагональ которого и будет амплитудой результирующего колебания. Ее величину определим, используя теорему косинусов:

$$A = \sqrt{A_1^2 + A_2^2 + 2A_1A_2\cos(\Delta\varphi)}.$$

Подставим числовые значения:

$$A = \sqrt{1^2 + 2^2 + 2 \cdot 1 \cdot 2 \cos(90^\circ - 30^\circ)} = \sqrt{7} = 2,6 \text{ см.}$$

Начальную фазу результирующего колебания определяем по тангенсу угла φ_0 :

$$\operatorname{tg}\varphi_0 = \frac{A_1\sin\varphi_1 + A_2\sin\varphi_2}{A_1\cos\varphi_1 + A_2\cos\varphi_2},$$

откуда начальная фаза

$$\varphi_0 = \operatorname{arctg} \frac{A_1\sin\varphi_1 + A_2}{A_1\cos\varphi_1}.$$

Подставляем данные:

$$\varphi_0 = \operatorname{arctg} \frac{1\sin 30^\circ + 2}{2\cos 30^\circ} = 71^\circ = 0,4\pi \text{ рад.}$$

Таким образом, параметры результирующего колебания найдены:

$$A = 2,6 \text{ см, } T = 2 \text{ с, } \varphi = 0,4\pi \text{ рад.}$$

Запишем закон колебания:

$$x = 2,6 \cos \left(\frac{2\pi}{2} t + 0,4\pi \right),$$

или

$$x = 2,6 \cos \pi(t + 0,4).$$

№ 3. Материальная точка участвует одновременно в двух взаимно перпендикулярных гармонических колебаниях, уравнения которых имеют вид

$$x = \cos \pi t, \quad (1)$$

$$y = 2 \cos \frac{\pi}{2} t \quad (2)$$

(амплитуда – в сантиметрах, время – в секундах).

Определить траекторию точки.

Р е ш е н и е.

Для определения траектории необходимо получить зависимость координат $y = f(x)$. Для этого из уравнений (1) и (2) следует исключить время. Применяв формулу косинуса половинного угла

$$\cos \frac{\alpha}{2} = \sqrt{\frac{1 + \cos \alpha}{2}},$$

можно записать

$$y = 2 \cos \frac{\pi t}{2} = \pm \sqrt{\frac{1 + \cos \pi t}{2}}.$$

Поскольку $\cos \pi t = x(1)$,

$$y = \pm 2 \sqrt{\frac{1+x}{2}}, \quad y = \pm \sqrt{2x+2},$$

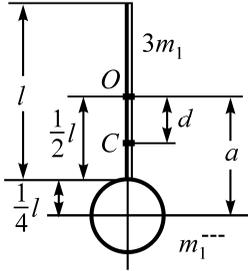
или

$$y^2 = 2 + 2x.$$

№ 4. Физический маятник представляет собой стержень длиной $l = 1$ м и массой $3m_1$ с прикрепленным к одному из его

концов обручем диаметром $D = l/2$ и массой m_1 . Горизонтальная ось маятника проходит через середину стержня перпендикулярно ему. Определить период T колебаний этого маятника.

Р е ш е н и е.



1. Период колебаний физического маятника

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{I}{mgd}}, \quad (1)$$

где I – момент инерции маятника относительно оси колебаний; m – его масса; d – расстояние от центра масс маятника (точка C) до оси колебаний (точка O).

2. Определим момент инерции системы. Момент инерции маятника равен сумме моментов инерции стержня I_1 и обруча I_2 :

$$I = I_1 + I_2. \quad (2)$$

Момент инерции стержня относительно оси, перпендикулярной стержню и проходящей через его центр масс, определим по формуле $I_1 = \frac{1}{12}ml^2$. В данном случае $m = 3m_1$ и

$$I_1 = \frac{1}{4}m_1l^2.$$

Момент инерции обруча находим по теореме Штейнера:

$$I_2 = I_0 + ma^2,$$

где I_2 – момент инерции обруча относительно произвольной оси; I_0 – момент инерции относительно оси, проходящей через центр масс обруча параллельно заданной оси; a – расстояние между указанными осями.

$$I_2 = m_1 \left(\frac{l}{4}\right)^2 + m_1 \left(\frac{3}{4}l\right)^2 = \frac{5}{8}m_1l^2.$$

Найдем момент инерции системы, подставив выражения I_1 и I_2 в формулу (2):

$$I = \frac{1}{4}m_1l^2 + \frac{5}{8}m_1l^2 = \frac{7}{8}m_1l^2.$$

3. Найдем расстояние d от оси колебаний до центра масс маятника

$$d = \frac{\sum m_i x_i}{\sum m_i} = \frac{3m_1 \cdot 0 + m_1 \frac{3}{4}l}{3m_1 + m_1} = \frac{\frac{3}{4}m_1 l}{4m_1} = \frac{3}{16}l.$$

4. Определяем период колебаний T , подставив в формулу (1) момент инерции маятника I , расстояние d , массу системы ($m = m_1 + 3m_1 = 4m_1$):

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{(7/8)m_1l^2}{4m_1g(3/16)l}} = 2\pi \sqrt{\frac{7l}{6g}},$$

$$T = 2,17 \text{ с.}$$

№ 5. Волна распространяется по прямой со скоростью $v = 20$ м/с. Две точки, находящиеся на этой прямой на расстоянии $l_1 = 12$ м и $l_2 = 15$ м от источника волн, колеблются по закону синуса с одинаковыми амплитудами $A = 0,1$ м и с разностью фаз $\Delta\varphi = 0,75\pi$ рад. Найти длину волны λ ; написать уравнение волны; найти смещение указанных точек в момент времени $t = 1,2$ с.

Р е ш е н и е.

1. Точки, находящиеся друг от друга на расстоянии, равном длине волны λ , колеблются с разностью фаз, равной 2π рад; точки, находящиеся друг от друга на любом расстоянии Δl , колеблются с разностью фаз

$$\Delta\varphi = \frac{\Delta l}{\lambda} 2\pi.$$

Решим это уравнение относительно λ :

$$\lambda = \Delta l \frac{2\pi}{\Delta\varphi},$$

где Δl – расстояние между точками, равное 3 м.

Подставим значения величин:

$$\lambda = 3 \frac{2\pi}{0,75\pi} = 8 \text{ м.}$$

2. Запишем уравнение плоской волны:

$$s = A \sin(\omega t - kx),$$

где k – волновое число $2\pi/\lambda$,

или

$$s = A \sin \omega \left(t - \frac{l}{v} \right).$$

$$\left. \begin{aligned} \omega &= \frac{2\pi}{T} \\ \lambda &= vT \end{aligned} \right\},$$

решая систему относительно ω , получаем

$$\omega = \frac{2\pi v}{\lambda} = \frac{2\pi \cdot 20}{8} = 5\pi \text{ рад/с.}$$

Уравнение волны

$$s = 0,1 \sin 5\pi \left(t - \frac{l}{20} \right).$$

3. Найдем смещение s , подставляя в это уравнение значения t и l :

$$s_1 = 0,1 \sin 5\pi \left(1,2 - \frac{12}{20} \right) = 0,1 \sin 3\pi = 0,$$

$$s_2 = 0,1 \sin 5\pi \left(1,2 - \frac{12}{20} \right) = 0,1 \sin 2,25\pi = 1 \sin 0,25\pi = 0,071 \text{ м.}$$

Глава 2. МОЛЕКУЛЯРНАЯ ФИЗИКА И ТЕРМОДИНАМИКА

2.1. Основы молекулярно-кинетической теории

Любое вещество состоит из огромного числа мельчайших частиц, сохраняющих все химические свойства данного вещества. Эти мельчайшие частицы называются *молекулами*. Сами молекулы состоят из более простых частиц – *атомов*. Например, молекула воды H_2O состоит из трех атомов: одного атома кислорода и двух атомов водорода. Если различного вида молекул известно огромное число (миллионы), то различных атомов совсем немного. В настоящее время известно 118 различных видов атомов, причем в природе их встречается 88, остальные получены искусственным путем. Это атомы так называемых химических элементов. Размеры молекул и составляющих их атомов чрезвычайно малы: если представить их в виде шариков, то их радиус имеет численное значение порядка 10^{-10} м. Зато число частиц в веществе очень велико. В одном грамме воды, например, содержится $3,3 \cdot 10^{22}$ молекул. Массы атомов и молекул тоже малы, поэтому их удобнее измерять не в килограммах, а в специальных единицах. Эта единица называется *атомной единицей массы* [а.е.м.]. Согласно современным измерениям $1 \text{ а.е.м.} = 1,66 \cdot 10^{-27} \text{ кг}$.

В молекулярной физике удобно использовать понятие *количества вещества*. Единица количества вещества называется *молем*. По определению, моль любого вещества – это такое количество вещества, которое содержит столько же молекул (или атомов, если вещество состоит из одноатомных молекул), сколько их содержится в 0,012 кг углерода ^{12}C . Из определения моля следует, что моль любого вещества состоит из одинакового числа молекул. Это число называется *числом Авогадро* N_A . Масса одного моля вещества называется его *молярной массой* μ (кг/моль). Ясно, что $\mu = m_0 N_A$. Число молекул в m (кг) вещества

$$N = \nu N_A = \frac{m}{\mu} N_A.$$

2.2. Законы идеального газа

Идеальным газом называется такой газ, в котором силами взаимодействия молекул и размерами молекул можно пренебречь. Время от времени молекулы сталкиваются между собой, но столкновения происходят настолько редко, что большую часть времени молекулы газа движутся равномерно и прямолинейно. Чем более разрежен реальный газ, тем ближе его свойства к свойствам идеального. Для такого газа оказывается возможным получить зависимость между его макроскопическими параметрами p , V и T , рассматривая движение одной молекулы, а затем усредняя это движение по огромному числу составляющих этот газ молекул.

Задачи на расчет параметров состояния газов можно разделить на две основные группы. К первой следует отнести задачи, в которых рассматриваются два или несколько состояний газа постоянной массы и к которым, следовательно, применимо уравнение объединенного газового закона (уравнение Клапейрона)

$$\frac{p_1 V_1}{T_1} = \frac{p_2 V_2}{T_2}.$$

Вторую группу составляют задачи, в условии которых дана масса газа или рассматриваются процессы, в которых масса газа изменяется.

I. Если по условию задачи даны два состояния газа и при переходе газа из одного состояния в другое его масса не меняется, то для решения задачи можно рекомендовать следующую последовательность:

1. Составить схему, отметив каждое состояние газа, указать параметры p , V , T , характеризующие эти состояния. Определить из условия, какой из этих трех параметров не меняется. В общем случае могут изменяться все три параметра.

2. Записать для данных двух состояний уравнение объединенного газового закона. Если какой-либо параметр считается

неизменным, уравнение автоматически переходит в одно из трех уравнений, выражающих закон Бойля–Мариотта, Гей-Люссака или Шарля.

3. Представить в развернутом виде параметры p_1 , V_1 , p_2 , V_2 , выразив их через заданные величины. Естественно, что речь идет о параметрах, заданных косвенно (например, $V = m/\rho$ или $p = F/S$).

4. Записать математически все вспомогательные условия и решить полученную систему уравнений относительно неизвестной величины.

В задачах на газовые законы рекомендуется пользоваться только абсолютной температурой и сразу же переводить значения температуры по шкале Цельсия в значения по шкале Кельвина.

II. Если по условию задачи дано только одно состояние газа и требуется определить какой-либо параметр этого состояния или же даны два состояния с разной массой газа, то рекомендуется поступать так:

1. Установить, какие газы участвуют в рассматриваемых процессах.

2. Для каждого состояния газа составить уравнение Менделеева – Клапейрона. Если дана смесь газов, то это уравнение записывают для каждого компонента. Связь между значениями давлений отдельных газов и давления смеси устанавливается законом Дальтона.

3. Записать математически дополнительные условия задачи и решить полученную систему уравнений относительно искомой величины.

Основные формулы

1. Уравнение Менделеева–Клапейрона (уравнение состояния идеального газа)

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

где m – масса газа; μ – молярная масса газа; R – молярная газовая постоянная; T – термодинамическая температура; ν – количество вещества;

2. Опытные газовые законы, являющиеся частными случаями уравнения Менделеева–Клапейрона для изопроцессов:

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

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

или для двух состояний газа

$$p_1V_1 = p_2V_2;$$

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

$$\frac{V}{T} = \text{const},$$

или для двух состояний

$$\frac{V_1}{T_1} = \frac{V_2}{T_2};$$

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

$$\frac{p}{T} = \text{const},$$

или для двух состояний

$$\frac{p_1}{T_1} = \frac{p_2}{T_2};$$

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

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

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

3. Закон Дальтона, определяющий давление смеси газов,

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

где p_i – парциальные давления компонентов смеси; n – число компонентов смеси.

Парциальным давлением называется давление газа, которое производил бы газ, если бы только он один находился в сосуде, занятой смесью, при одинаковой с ней температуре.

Молярная масса смеси газов

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

где m_i – масса i -го компонента смеси; ν_i – количество вещества i -го компонента смеси; n – число компонентов смеси.

Массовая доля i -го компонента смеси газа (в долях единицы или процентах)

$$\omega_i = \frac{m_i}{m},$$

где m – масса смеси.

4. Концентрация молекул

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

где N – число молекул, содержащихся в данной системе; ρ – плотность вещества; V – объем системы. Формула справедлива не только для газов, но и для любого агрегатного состояния вещества.

5. Основное уравнение кинетической теории газов

$$p = \frac{2}{3} n \frac{m_0 v_{\text{ср.кв}}^2}{2},$$

где m_0 – масса молекулы; $v_{\text{ср.кв}}$ – средняя квадратичная скорость поступательного движения молекулы.

6. Зависимость давления газа от концентрации молекул и температуры

$$p = nkT.$$

7. Скорости молекул:

$$v_{\text{ср.кв}} = \sqrt{\frac{3kT}{m_0}} = \sqrt{\frac{3RT}{\mu}} \text{ – среднеквадратичная;}$$

$$\langle v \rangle = \sqrt{\frac{8kT}{\pi m_0}} = \sqrt{\frac{8RT}{\pi \mu}} \text{ – среднеарифметическая;}$$

$$v_{\text{в}} = \sqrt{\frac{2kT}{m_0}} = \sqrt{\frac{2RT}{\mu}} \text{ – наиболее вероятная,}$$

где m_0 – масса одной молекулы.

Примеры решения задач

№ 1. Определить число N молекул, содержащихся в объеме $V = 1 \text{ мм}^3$ и массу m_0 молекулы воды.

Р е ш е н и е.

Число N молекул, содержащихся в некоторой массе m , равно произведению числа Авогадро N_A на количество вещества ν :

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

где μ – молярная масса.

Выразив в этой формуле массу как произведение плотности на объем V , получим

$$N = \frac{\rho V}{\mu} N_A. \quad (1)$$

Подставим в формулу (1) следующие значения величин: $\rho = 10^3 \text{ кг/м}^3$; $V = 1 \text{ мм}^3 = 10^{-9} \text{ м}^3$; $\mu = 18 \cdot 10^{-3} \text{ кг/моль}$; $N_A = 6,02 \cdot 10^{23} \text{ моль}^{-1}$ и произведем вычисления:

$$N = \frac{10^3 \cdot 10^{-9}}{18 \cdot 10^{-3}} \cdot 6,02 \cdot 10^{23} \text{ молекул} = 3,34 \cdot 10^{19} \text{ молекул.}$$

Массу одной молекулы можно найти делением молярной массы на число Авогадро:

$$m_1 = \frac{\mu}{N_A}.$$

Подставив сюда числовые значения μ и N , найдем массу молекулы воды:

$$m_0 = \frac{18 \cdot 10^{-3}}{6,02 \cdot 10^{23}} \text{ кг} = 2,99 \cdot 10^{-26} \text{ кг}.$$

№ 2. В баллоне объемом $V = 10$ л находится гелий под давлением $p_1 = 1$ МПа при температуре $T_1 = 300$ К. После того как из баллона было взято $m = 10$ г гелия, температура в баллоне понизилась до $T_2 = 290$ К. Определить давление p_2 гелия, оставшегося в баллоне.

Р е ш е н и е.

Для решения задачи воспользуемся уравнением Менделеева–Клапейрона, применив его к конечному состоянию газа:

$$p_2 V = \frac{m_2 R T_2}{\mu}, \quad (1)$$

где m_2 – масса гелия в баллоне в конечном состоянии; μ – молярная масса гелия; R – универсальная газовая постоянная.

Из уравнения (1) выразим искомое давление p_2 :

$$p_2 = \frac{m_2}{\mu} \frac{R T_2}{V}. \quad (2)$$

Массу гелия m_2 выразим через массу m_1 и массу m гелия, взятого из баллона:

$$m_2 - m_1 = m. \quad (3)$$

Массу гелия m_1 найдем также из уравнения Менделеева–Клапейрона, применив его к начальному состоянию:

$$m_1 = \frac{\mu p_1 V}{R T_1}. \quad (4)$$

Подставляя в выражение (3) массу m_1 из формулы (4), а затем полученное выражение m_2 в формулу (2), найдем

$$p_2 = \left(\frac{\mu p_1 V}{RT_1} - m \right) \frac{RT_2}{\mu V},$$

или после преобразования и сокращения

$$p_2 = \frac{T_2}{T_1} p_1 - \frac{m RT}{\mu V}.$$

Выразим величины, входящие в эту формулу, в единицах СИ и произведем вычисления: $p_1 = 1 \text{ МПа} = 10^6 \text{ Па}$; $m = 10 \text{ г} = 10^{-2} \text{ кг}$; $\mu = 4 \cdot 10^{-3} \text{ кг/моль}$; $R = 8,31 \text{ Дж/моль}\cdot\text{К}$; $T_1 = 300 \text{ К}$; $T_2 = 290 \text{ К}$; $V = 10^{-2} \text{ м}^3$.

$$p_2 = \frac{290}{300} \cdot 10^6 - \frac{10^{-2}}{4 \cdot 10^{-3}} \frac{8,31 \cdot 290}{10^{-2}} \approx 0,37 \cdot 10^6 = 0,37 \text{ МПа}.$$

№ 3. Баллон содержит $m_1 = 80 \text{ г}$ кислорода и $m_2 = 320 \text{ г}$ аргона. Давление смеси $p = 1 \text{ МПа}$, температура $T = 300 \text{ К}$. Принимая данные газы за идеальные, определить объем V баллона.

Р е ш е н и е.

По закону Дальтона давление смеси равно сумме парциальных давлений газов, входящих в состав смеси.

По уравнению Менделеева–Клапейрона парциальные давления кислорода p_1 и аргона p_2 выражаются формулами

$$p_1 = \frac{m_1}{\mu_1} \frac{RT}{V}, \quad p_2 = \frac{m_2}{\mu_2} \frac{RT}{V}.$$

Следовательно, по закону Дальтона давление смеси газов

$$p = p_1 + p_2 \quad \text{или} \quad p = \left(\frac{m_1}{\mu_1} + \frac{m_2}{\mu_2} \right) \frac{RT}{V},$$

откуда объем баллона

$$V = \left(\frac{m_1}{\mu_1} + \frac{m_2}{\mu_2} \right) \frac{RT}{p}.$$

Выразим в единицах СИ числовые значения величин, входящих в эту формулу: $m_1 = 0,08 \text{ кг}$, $\mu_1 = 32 \cdot 10^{-3} \text{ кг/моль}$;

$m_2 = 0,32$ кг; $\mu_2 = 40 \cdot 10^{-3}$ кг/моль; $p_1 = 1$ МПа = 10^6 Па; $R = 8,31$ Дж/моль·К.

Подставим числовые значения в формулу объема баллона и произведем вычисления:

$$V = \left(\frac{0,08}{32 \cdot 10^{-3}} + \frac{0,32}{40 \cdot 10^{-3}} \right) \frac{8,31 \cdot 300}{10^6} = 0,0262 \text{ м}^3 = 26,2 \text{ л.}$$

№ 4. Найти среднюю кинетическую энергию $\langle \varepsilon_{\text{вращ}} \rangle$ вращательного движения одной молекулы кислорода при температуре $T = 350$ К, а также кинетическую энергию W_k вращательного движения всех молекул кислорода массой $m = 4$ г.

Р е ш е н и е.

Известно, что на каждую степень свободы молекулы газа приходится одинаковая средняя энергия $\langle \varepsilon_1 \rangle = \frac{1}{2}kT$, где k – постоянная Больцмана; T – абсолютная температура газа. Поскольку вращательному движению двухатомной молекулы (молекула кислорода – двухатомная) соответствуют две степени свободы, то средняя энергия вращательного движения молекулы кислорода выразится формулой

$$\langle \varepsilon_{\text{вращ}} \rangle = 2 \frac{1}{2} kT. \quad (1)$$

Подставив в формулу (1) значения $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К и $T = 350$ К, получим:

$$\langle \varepsilon_{\text{вращ}} \rangle = 1,38 \cdot 10^{-23} \cdot 350 \text{ Дж} = 4,83 \cdot 10^{-21} \text{ Дж.}$$

Кинетическая энергия вращательного движения всех молекул газа определяется равенством

$$W_k = \langle \varepsilon_{\text{вращ}} \rangle N. \quad (2)$$

Число всех молекул газа можно вычислить по формуле

$$N = N_A \frac{m}{\mu}, \quad (3)$$

где N_A – число Авогадро; μ – количество вещества.

Подставив это выражение в формулу (2), получим

$$W_k = N_A \frac{m}{\mu} \langle \varepsilon_{\text{вращ}} \rangle. \quad (4)$$

Выразим величины, входящие в эту формулу, в единицах СИ: $N_A = 6,02 \cdot 10^{23}$ моль⁻¹; $m = 4$ г = $4 \cdot 10^{-3}$ кг; $\mu = 32 \cdot 10^{-3}$ кг/моль; $\langle \varepsilon_{\text{вращ}} \rangle = 4,83 \cdot 10^{-21}$ Дж. Подставив эти значения в формулу (4), найдем

$$W_k = 6,02 \cdot 10^{23} \cdot \frac{4 \cdot 10^{-3}}{32 \cdot 10^{-3}} \cdot 4,83 \cdot 10^{-21} = 364 \text{ Дж.}$$

2.3. Теплота и работа. Основы термодинамики

Любое тело (твердое, жидкое, газообразное), находящееся в состоянии теплового равновесия, которое характеризуется его макроскопическими параметрами p , V и T , обладает определенным запасом *внутренней энергии* U . Внутренняя энергия тела складывается из кинетической энергии движения молекул, кинетической энергии движения атомов внутри молекулы (если молекула не одноатомная), потенциальной энергии взаимодействия между атомами внутри молекулы и потенциальной энергии взаимодействия молекул между собой. В нее, однако, не входит кинетическая энергия движения тела как целого и потенциальная энергия внешних сил, действующих на тело.

Внутренняя энергия тела обладает тем замечательным свойством, что при переходе тела из какого-то первоначального состояния 1 (p_1 , V_1 , T_1) в конечное состояние 2 (p_2 , V_2 , T_2) изменение внутренней энергии ΔU не зависит от того, с помощью какого процесса произошел этот переход, и

$$\Delta U = U_2 - U_1,$$

где U_1 – внутренняя энергия тела в начальном и U_2 – в конечном состояниях. Если тело совершает *циклический процесс*, то изменение внутренней энергии при этом $\Delta U = 0$, так как $U_2 = U_1$

(в результате циклического процесса тело возвращается в исходное состояние). Исходя из этого говорят, что внутренняя энергия тела является *функцией состояния*.

Изменение внутренней энергии и передача ее от одного тела к другому происходит в процессе взаимодействия тел. Есть два способа, две формы такого взаимодействия. При первом способе внутренняя энергия одного тела изменяется за счет изменения энергии упорядоченного (механического) движения частиц другого тела (механической работы, электризации, переманчивания, облучения). Мерой изменения энергии упорядоченного движения частиц вещества в процессе макроскопического взаимодействия тел служит работа A .

Во втором случае изменение внутренней энергии происходит вследствие соударения хаотически движущихся молекул соприкасающихся тел.

Процесс изменения внутренней энергии тела, обусловленный передачей теплового движения молекул без совершения работы внешней средой, называют тепловым процессом, или процессом теплопередачи.

Мерой взаимодействия тел, приводящего к изменению энергии хаотического движения и взаимодействия молекул (мерой энергии хаотического движения, переданной от одного тела к другому в процессе теплообмена), служит величина Q , называемая количеством теплоты.

При решении задач на определение количества тепла, полученного или отданного рабочим телом за цикл, работы за цикл или КПД цикла удобно придерживаться следующей последовательности:

1. Внимательно рассмотрев циклический процесс, ясно представить, в каких процессах участвует рабочее тело. Часто удобно изобразить цикл графически на диаграмме $p-V$; если по условию задачи цикл уже задан графически, но в переменных $p-T$ или $V-T$, то перестроить его на диаграмму $p-V$, отметив параметры состояния в начале и конце каждого процесса.

2. Найти работу A , совершаемую рабочим телом (или над ним), и количество тепла Q , полученное (или отданное) им, для всех рассматриваемых процессов, составляющих цикл.

3. Проанализировав условие задачи, установить, на каких участках цикла рабочее тело отдавало тепло, а на каких получало. Сумма количеств теплоты на участках, где $Q > 0$, будет равна количеству теплоты, полученной рабочим телом за цикл, т.е. теплу, полученному от нагревателя Q_1 . Сумма количеств теплоты в процессах, где $Q < 0$, будет равна теплоте, отданной за цикл холодильнику Q_2 .

4. Работу A за цикл вычислить как алгебраическую сумму работ на каждом из его участков. Если график цикла в переменных p – V представляет собой простую геометрическую фигуру (треугольник, квадрат, трапеция и т.п.), то работу можно определить как площадь фигуры, ограниченной петлей цикла; при этом работа положительна, если состояние рабочего тела изменяется в цикле по часовой стрелке, в противном случае – отрицательна.

5. Вычислить КПД цикла. Если тепловая машина работает по циклу Карно, то схема решения задач такая же, как для произвольного цикла, за тем исключением, что КПД такой машины можно также вычислить через температуры нагревателя T_1 и холодильника T_2 .

Следует также помнить, что машина Карно получает тепло лишь на участке изотермического расширения, а отдает – на участке изотермического сжатия. При этом количество полученного или отданного тепла за цикл равно работе соответствующего изотермического процесса.

Основные формулы

1. Средняя кинетическая энергия поступательного движения молекулы

$$\langle \varepsilon_n \rangle = \frac{3}{2} kT,$$

где k – постоянная Больцмана.

Полная средняя кинетическая энергия молекулы

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

где i – число степеней свободы молекулы.

2. Внутренняя энергия идеального газа

$$U = \frac{m}{\mu} \frac{i}{2} RT = \frac{m}{\mu} C_V T.$$

3. Теплоемкость тела $C_T = \frac{dQ}{dt}$.

Удельная теплоемкость $c = \frac{dQ}{m dt}$.

Молярная теплоемкость $C = \frac{dQ}{\nu dt} = \frac{\mu}{m} \frac{dQ}{dt}$.

4. Удельные теплоемкости газа при постоянном объеме (c_V) и постоянном давлении (c_p):

$$c_V = \frac{i}{2} \frac{R}{\mu}, \quad c_p = \frac{i+2}{2} \frac{R}{\mu}.$$

Связь между удельной и молярной теплоемкостями

$$c = \frac{C}{\mu}, \quad C = c\mu.$$

Уравнение Майера

$$C_p - C_V = R.$$

5. Работа расширения газа:

$$A = \int_{V_1}^{V_2} p dV \quad \text{– в общем случае;}$$

$A = p(V_2 - V_1)$ – при изобарном процессе;

$$A = \frac{m}{\mu} RT \ln \frac{V_2}{V_1} \quad \text{– при изотермическом процессе.}$$

6. Первое начало термодинамики

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

где Q – теплота, сообщенная системе (газу); ΔU – изменение внутренней энергии системы; A – работа, совершенная системой против внешних сил.

7. Адиабатный процесс – процесс в теплоизолированной системе ($\sum Q_i = 0$). Уравнения Пуассона, связывающие параметры идеального газа при адиабатном процессе:

$$pV^\gamma = \text{const}, \quad \frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{V_1}{V_2}\right)^{\gamma-1},$$

$$\frac{p_2}{p_1} = \left(\frac{V_1}{V_2}\right)^\gamma, \quad \frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{p_1}{p_2}\right)^{(\gamma-1)/\gamma},$$

$$A = -\Delta U = -\frac{m}{\mu} c_V \Delta T, \quad \text{или} \quad A = \frac{RT_1}{\gamma-1} \frac{m}{\mu} \left[1 - \left(\frac{V_1}{V}\right)^{\gamma-1} \right],$$

где γ – показатель адиабаты, $\gamma = \frac{c_p}{c_V}$.

8. Термический КПД цикла

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

где Q_1 – теплота, полученная рабочим телом от теплоисточника; Q_2 – теплота, переданная рабочим телом теплоприемнику.

9. Термический КПД цикла Карно (имеет наибольший КПД)

$$\eta = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} = \frac{T_1 - T_2}{T_1},$$

где T_1 и T_2 – термодинамические температуры нагревателя и холодильника.

10. Изменение энтропии при переходе из состояния 1 в состояние 2

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

Примеры решения задач

№ 1. Вычислить удельные теплоемкости при постоянном объеме c_V и при постоянном давлении c_p неона и водорода, принимая эти газы за идеальные.

Решение.

Удельные теплоемкости идеальных газов выражаются формулами

$$c_V = \frac{i R}{2 \mu}, \quad (1)$$

$$c_p = \frac{i + 2 R}{2 \mu}, \quad (2)$$

где i – число степеней свободы молекулы газа; μ – молярная масса.

Для неона (одноатомный газ) $i = 3$ и $\mu = 20 \cdot 10^{-3}$ кг/моль. Вычисляя по формулам (1) и (2), получим

$$c_V = \frac{3}{2} \cdot \frac{8,31}{20 \cdot 10^{-3}} = 6,24 \cdot 10^2 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К}),$$

$$c_p = \frac{3 + 2}{2} \cdot \frac{8,31}{20 \cdot 10^{-3}} = 1,04 \cdot 10^3 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К}).$$

Для водорода (двухатомный газ) $i = 5$ и $\mu = 2 \cdot 10^{-3}$ кг/моль. Вычисляя по тем же формулам, получим

$$c_V = \frac{5}{2} \cdot \frac{8,31}{2 \cdot 10^{-3}} = 1,04 \cdot 10^4 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К}),$$

$$c_p = \frac{5 + 2}{2} \cdot \frac{8,31}{2 \cdot 10^{-3}} = 1,46 \cdot 10^4 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К}).$$

№ 2. Вычислить удельные теплоемкости c_V и c_p смеси неона и водорода, если массовая доля неона $\omega_1 = 80 \%$, массовая доля водорода $\omega_2 = 20 \%$. Значения удельных теплоемкостей газов взять из предыдущего примера.

Р е ш е н и е.

Удельную теплоемкость смеси при постоянном объеме c_V найдем следующим образом. Теплоту, необходимую для нагревания смеси на ΔT , выразим двумя способами:

$$Q = c_V (m_1 + m_2) \Delta T, \quad (1)$$

$$Q = (c_{V,1} m_1 + c_{V,2} m_2) \Delta T, \quad (2)$$

где $c_{V,1}$ – удельная теплоемкость неона; $c_{V,2}$ – удельная теплоемкость водорода.

Приравняв правые части уравнений (1) и (2) и разделив обе части полученного равенства на ΔT , получим

$$c_V (m_1 + m_2) = c_{V,1} m_1 + c_{V,2} m_2,$$

откуда

$$c_V = c_{V,1} \frac{m_1}{m_1 + m_2} + c_{V,2} \frac{m_2}{m_1 + m_2}, \quad (3)$$

или

$$c_V = c_{V,1} \omega_1 + c_{V,2} \omega_2, \quad (4)$$

где ω_1 и ω_2 – массовые доли неона и водорода в смеси,

$$\omega_1 = \frac{m_1}{m_1 + m_2}, \quad \omega_2 = \frac{m_2}{m_1 + m_2}.$$

Подставив в формулу (4) числовые значения величин, найдем

$$c_V = (6,24 \cdot 10^2 \cdot 0,8 + 1,04 \cdot 10^4 \cdot 0,2) = 2,58 \cdot 10^3 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К}).$$

Рассуждая таким же образом, получим формулу для вычисления удельной теплоемкости смеси при постоянном давлении:

$$c_p = c_{p,1} \omega_1 + c_{p,2} \omega_2. \quad (5)$$

Подставим в формулу (5) числовые значения величин:

$$c_p = (1,04 \cdot 10^3 \cdot 0,8 + 1,46 \cdot 10^4 \cdot 0,2) = 3,75 \cdot 10^3 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К}).$$

№ 3. Кислород массой $m = 2$ кг занимает объем $V_1 = 1$ м³ и находится под давлением $p_1 = 0,2$ МПа. Газ был нагрет сначала при постоянном давлении до объема $V_2 = 3$ м³, а затем при постоянном объеме до давления $p_3 = 0,5$ МПа. Найти изменение ΔU внутренней энергии газа, совершенную им работу A и теплоту Q , переданную газу.

Р е ш е н и е.

Изменение внутренней энергии газа выражается формулой

$$\Delta U = c_V m \Delta T = \frac{i}{2} \frac{R}{\mu} m \Delta T, \quad (1)$$

где i – число степеней свободы молекул газа (для двухатомных молекул кислорода $i = 5$); μ – молярная масса.

Начальную и конечную температуры газа найдем из уравнения Менделеева–Клапейрона $pV = \frac{m}{\mu} RT$:

$$T = \frac{pV\mu}{mR}. \quad (2)$$

Выпишем заданные величины в системе СИ: $m = 2$ кг, $\mu = 32 \cdot 10^{-3}$ кг/моль, $R = 8,31$ Дж/(моль·К), $V_1 = 1$ м³, $V_2 = V_3 = 3$ м³, $p_1 = p_2 = 0,2$ МПа = $2 \cdot 10^5$ Па, $p_3 = 0,5$ МПа = $5 \cdot 10^5$ Па. Подставляя эти значения в выражение (2) и выполняя арифметические действия, получим

$$T_1 = \frac{2 \cdot 10^5 \cdot 1 \cdot 32 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot 8,31} = 385 \text{ К},$$

$$T_2 = \frac{2 \cdot 10^5 \cdot 3 \cdot 32 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot 8,31} = 1155 \text{ К} \approx 1,16 \text{ кК},$$

$$T_3 = \frac{5 \cdot 10^5 \cdot 3 \cdot 32 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot 8,31} = 2887 \text{ К} \approx 2,89 \text{ кК}.$$

Подставляя в выражение (1) числовые значения величин, входящих в него, находим

$$\Delta U = \frac{5}{2} \cdot \frac{8,31}{32 \cdot 10^{-3}} \cdot 2(2887 - 385) = 3,24 \cdot 10^6 \text{ Дж} = 3,24 \text{ МДж}.$$

Работа расширения газа при постоянном давлении выражается формулой

$$A = R \frac{m}{\mu} \Delta T.$$

Подставляя числовые значения величин, получим

$$A = 8,31 \cdot \frac{2}{32 \cdot 10^{-3}} \cdot (1155 - 385) = 0,400 \cdot 10^6 \text{ Дж} = 0,4 \text{ МДж}.$$

Работа газа, нагреваемого при постоянном объеме, равна нулю, т.е. $A_2 = 0$. Следовательно, полная работа, совершенная газом, равна $A = A_1 + A_2 = 0,4 \cdot 10^6 \text{ Дж}$.

Согласно первому началу термодинамики теплота Q , переданная газу, равна сумме изменения внутренней энергии ΔU и работы A ; $Q = \Delta U + A$, следовательно, $Q = 0,4 \cdot 10^6 + 3,24 \cdot 10^6 = 3,64 \cdot 10^6 \text{ Дж} = 3,64 \text{ МДж}$.

№ 4. В цилиндре под поршнем находится водород массой $m = 0,02 \text{ кг}$ при температуре $T = 300 \text{ К}$. Водород сначала расширился адиабатически, увеличив свой объем в $n_1 = 5$ раз, а затем был сжат изотермически, причем объем газа уменьшился в $n_2 = 5$ раз. Найти температуру в конце адиабатического расширения и работу, совершенную газом при этих процессах.

Р е ш е н и е.

Температуры и объемы газа, совершающего адиабатический процесс, связаны между собой соотношением

$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{V_1}{V_2} \right)^{\gamma-1}, \text{ или } \frac{T_2}{T_1} = \frac{1}{n^{\gamma-1}},$$

где γ – отношение теплоемкостей газа при постоянном давлении и постоянном объеме (для водорода как двухатомного газа $\gamma = 1,4$),

$$n_1 = V_2/V_1 = 5.$$

Отсюда получаем выражение для конечной температуры

$$T_2 = \frac{T_1}{n_1^{\gamma-1}}.$$

Подставляя числовые значения заданных величин, находим

$$T_2 = \frac{300}{5^{1,4-1}} \approx \frac{300}{1,91} \approx 157 \text{ К}.$$

Работа A_1 газа при адиабатическом расширении может быть определена по формуле

$$A_1 = \frac{m}{\mu} C_V (T_1 - T_2) = \frac{m}{\mu} \frac{i}{2} R (T_1 - T_2),$$

где C_V – молярная теплоемкость газа при постоянном объеме.

Подставив числовые значения величин $R = 8,31$ Дж/(моль К) и $i = 5$ (для водорода как двухатомного газа), $\mu = 2 \cdot 10^{-3}$ кг/моль, $m = 0,02$ кг, $T_1 = 300$ К, $T_2 = 157$ К в правую часть последней формулы, получим

$$A_1 = \frac{0,02 \cdot 5 \cdot 8,31}{2 \cdot 10^{-3} \cdot 2} \cdot (300 - 157) \approx 2,98 \cdot 10^4 \text{ Дж}.$$

Работа A_2 газа при изотермическом процессе может быть выражена в виде

$$A_2 = \frac{m}{\mu} RT_2 \ln \frac{V_3}{V_2}, \quad \text{или} \quad A_2 = \frac{m}{\mu} RT_2 \ln \frac{1}{n_2},$$

где $n_2 = V_2/V_3 = 5$.

Подставляя известные числовые значения величин, входящих в правую часть этого равенства, находим

$$A_2 = \frac{0,02}{2 \cdot 10^{-3}} \cdot 8,31 \cdot 157 \ln \frac{1}{5} \approx -2 \cdot 10^4 \text{ Дж}.$$

Знак «минус» показывает, что работа при сжатии совершается над газом внешними силами.

№ 5. Тепловая машина работает по обратимому циклу Карно. Температура нагревателя $T_1 = 500$ К. Определить термический КПД цикла и температуру T_2 охладителя тепловой машины, если за счет каждого килоджоуля теплоты, полученной от нагревателя, машина совершает работу $A = 350$ Дж.

Р е ш е н и е.

Термический КПД тепловой машины, называемый также коэффициентом использования теплоты, показывает, какая доля теплоты, полученной от нагревателя, превращается в механическую работу. Термический КПД выражается формулой

$$\eta = \frac{A}{Q_{\text{н}}},$$

где $Q_{\text{н}}$ – теплота, полученная от нагревателя; A – работа, совершенная рабочим телом тепловой машины. Подставив числовые значения в эту формулу, получим

$$\eta = \frac{350}{1000} = 0,35.$$

Зная КПД цикла, можно по формуле $\eta = \frac{T_1 - T_2}{T_1}$ определить температуру охладителя

$$T_2 = T_1(1 - \eta).$$

Подставив в эту формулу полученное значение КПД и температуру T_1 нагревателя, получим

$$T_2 = 500 \cdot (1 - 0,35) \text{ К} = 325 \text{ К}.$$

№ 6. Найти изменение ΔS энтропии при нагревании воды массой $m = 100$ г от температуры $t_1 = 0$ °С до температуры $t_2 = 100$ °С и последующем превращении воды в пар той же температуры.

Р е ш е н и е.

Найдем отдельно изменение энтропии $\Delta S'$ при нагревании воды и изменение энтропии $\Delta S''$ при превращении ее в пар. Полное изменение энтропии выразится суммой $\Delta S'$ и $\Delta S''$.

Как известно, изменение энтропии выражается общей формулой

$$\Delta S = S_2 - S_1 = \int \frac{dQ}{T}. \quad (1)$$

При бесконечно малом изменении температуры нагреваемого тела затрачивается количество теплоты $dQ = mc dT$, где m – масса тела; c – его удельная теплоемкость. Подставив выражение dQ в равенство (1), получим формулу для вычисления изменения энтропии при нагревании воды

$$\Delta S' = \int_{T_1}^{T_2} \frac{mc dT}{T}.$$

Вынесем за знак интеграла постоянные величины и произведем интегрирование, тогда получим

$$\Delta S' = mc \ln \frac{T_2}{T_1}.$$

Выразим заданные величины в единицах СИ: $m = 0,1$ кг; $T_1 = 273$ К; $T_2 = 373$ К; $c = 4190$ Дж/кг К; $\lambda = 2,26$ МДж/кг.

После вычислений найдем

$$\Delta S' = 0,1 \cdot 4190 \cdot \ln \frac{373}{273} = 131 \text{ Дж/К}.$$

При вычислении по формуле (1) изменения энтропии во время превращения воды в пар той же температуры постоянная температура T_2 выносится за знак интеграла. Вычислив интеграл, найдем

$$\Delta S = \frac{1}{T_2} \int_1^2 dQ = \frac{Q}{T_2}, \quad (2)$$

где Q – количество теплоты, переданное при превращении нагретой воды в пар той же температуры.

Подставив в равенство (2) выражение количества теплоты $Q = \lambda m$, где λ – удельная теплота парообразования, получим

$$\Delta S'' = \frac{\lambda m}{T_2}. \quad (3)$$

Произведя вычисления по формуле (3), найдем

$$\Delta S' = \frac{2,26 \cdot 10^6 \cdot 0,1}{373} = 606 \text{ Дж/К}.$$

Полное изменение энтропии при нагревании воды и последующем превращении ее в пар

$$\Delta S = \Delta S' + \Delta S'' = 737 \text{ Дж/К}.$$

Глава 3. ЭЛЕКТРИЧЕСТВО И МАГНЕТИЗМ

3.1. Электростатика

Задачи по электростатике удобно разделить на три группы. К первой можно отнести задачи о точечных зарядах и системах, сводящихся к ним, ко второй – все задачи о заряженных телах, размерами которых нельзя пренебречь, к третьей – задачи на определение емкости, потенциала или заряда какого-либо тела, расчет соединений конденсаторов и энергии электрического поля.

Решение задач *первой группы* основано на применении законов механики совместно с законом Кулона и вытекающих из него следствий. Такие задачи рекомендуется решать в следующем порядке:

1. Расставить силы, действующие на точечный заряд, помещенный в электрическое поле, записать для него уравнение равновесия или уравнение второго закона Ньютона.

2. Выразить силы электрического взаимодействия через заряды и характеристики поля и подставить эти выражения в исходное уравнение. Силы взаимодействия зарядов можно рассчитать или по закону Кулона, или по формуле $\vec{F} = q\vec{E}$, считая, что один из зарядов находится в поле действия другого.

3. Если при взаимодействии заряженных тел между ними происходит перераспределение зарядов, к составленным уравнениям добавляют уравнение закона сохранения зарядов.

4. Далее записывают вспомогательные формулы и решают систему уравнений относительно неизвестной величины.

Проводя вычисления, полезно помнить, что множитель

$k = \frac{1}{4\pi\epsilon_0}$, входящий во многие расчетные формулы, равен

$9 \cdot 10^9$ м/Ф. Именно такое значение и следует подставлять в окончательную формулу.

Во *вторую группу* входят задачи, связанные с расчетами напряженности и потенциала электрического поля, создаваемого системами точечных зарядов, заряженными плоскостями и телами сферической формы.

В задачах на вычисление напряженности электрического поля особое внимание нужно обратить на векторный характер \vec{E} :

- векторы напряженности электрического поля уединенного точечного заряда направлены от заряда, если он положителен, и к заряду, если он отрицателен;

- поле заряженной плоскости однородно; векторы напряженности поля плоскости направлены перпендикулярно ее поверхности от плоскости, если ее заряд положителен, и к плоскости, если заряд отрицателен;

- для электрического поля заряженной сферы в точках, расположенных за ее пределами, векторы напряженности направлены так же, как у точечного заряда, находящегося в центре сферы; внутри сферы электрическое поле равно нулю;

- для поля шара, заряженного равномерно по объему, в точках, расположенных за его пределами, векторы напряженности направлены так же, как у сферы; внутри – как у точечного заряда, помещенного в центр шара (совпадают только направления, а не величины!); если шар проводящий, то нескомпенсированные заряды расположатся на его поверхности, что с точки зрения электростатики эквивалентно заряженной сфере;

- электрическое поле внутри проводника и внутри полый проводящей оболочки отсутствует (это справедливо независимо от наличия у проводника заряда и внешнего электрического поля).

При решении задач данной группы часто используется метод дифференцирования и интегрирования (метод ДИ).

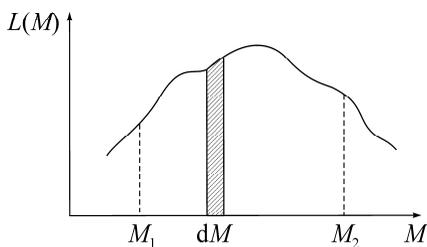
Сущность метода ДИ заключается в следующем. Предположим, что физический закон имеет вид $K = LM$, где K , L , M – некоторые физические величины. Выделим столь малый промежуток dM изменения величины M , чтобы изменением величины

на этом промежутке можно было пренебречь (рисунок). Таким образом, приближенно на участке dM можно L считать постоянной ($L = \text{const}$).

Тогда

$$dK = L(M)dM,$$

где dK – изменение величины K на участке dM .



Используя принцип суперпозиции (суммируя величины по всем участкам изменения величины M), получаем значение величины K в виде $K = \int_{M_1}^{M_2} L(M)dM$, где M_1 и M_2 – начальное

и конечное значения величины M . Таким образом, метод ДИ состоит из двух частей. В первой *находят дифференциал* искомой величины. Для этого в большинстве случаев производят или деление тел на столь малые части, чтобы последние можно было принять за материальные точки, или деление большого промежутка времени на такие малые промежутки времени dt , чтобы в течение этих малых промежутков процесс можно было *приблизительно* считать равномерным (или стационарным), и т.д.

Во второй части метода *производят суммирование (интегрирование)*. Наиболее трудными в этой части являются *выбор переменной интегрирования и определение пределов интегрирования*. Для определения переменной интегрирования необходимо детально проанализировать, от каких переменных зависит дифференциал искомой величины и какая переменная является главной, наиболее существенной. Эту переменную чаще всего и выбирают в качестве переменной при интегрировании. После этого все остальные переменные выражают как функции от этой переменной. В результате дифференциал искомой величины принимает вид функции от переменной интегри-

рования. Затем определяют пределы интегрирования как крайние (предельные) значения переменной интегрирования. После вычисления определенного интеграла получают числовое значение искомой величины.

Третью группу составляют задачи на определение емкости, потенциала или заряда какого-либо тела, расчет соединений конденсаторов и энергии электрического поля.

Если по условию задачи дано одно заряженное тело, то величины, характеризующие электрические свойства тела, связаны между собой известными формулами

$$C = \frac{q}{U}, \quad C = \frac{\varepsilon_0 \cdot \varepsilon \cdot S}{d}, \quad W = \frac{q \cdot U}{2} = \frac{C \cdot U^2}{2} = \frac{q^2}{2 \cdot C}.$$

С учетом зависимости потенциала от величины заряда эти формулы позволят найти одни из величин, если другие заданы.

Следует иметь в виду, что если плоский конденсатор подключить к источнику питания, зарядить его и затем отключить, то при изменении емкости конденсатора C вследствие раздвижения (сближения) пластин, внесения (удаления) диэлектрика **заряд на конденсаторе не меняется**. Что при этом происходит с напряжением U или энергией конденсатора W , легко установить, анализируя вышеприведенные формулы. Если же конденсатор подключен к источнику постоянного напряжения, то при всех изменениях емкости конденсатора напряжение между его пластинами остается неизменным.

Основные формулы

1. Закон Кулона

$$\vec{F}_{12} = -\vec{F}_{21} = \frac{1}{4\pi \varepsilon_0 \varepsilon} \frac{q_1 q_2}{r^2} \vec{r}_{12}, \quad F = \frac{1}{4\pi \varepsilon_0 \varepsilon} \frac{q_1 q_2}{r^2},$$

где \vec{F}_{12} – сила, с которой заряд q_1 действует на заряд q_2 ; \vec{F}_{21} – равная ей и противоположно направленная сила; \vec{r}_{12} – радиус-вектор, направленный от q_1 к q_2 ; r – модуль \vec{r}_{12} ; ε – диэлектриче-

ская проницаемость среды, $\varepsilon = \frac{E_0}{E}$; E_0 – напряженность электростатического поля в вакууме; E – напряженность электростатического поля внутри однородного диэлектрика; ε_0 – электрическая постоянная.

2. Напряженность электрического поля и потенциал

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q}, \quad \varphi = \frac{W_{\text{п}}}{q},$$

где $W_{\text{п}}$ – потенциальная энергия положительного точечного заряда q , находящегося в данной точке поля.

Сила, действующая на точечный заряд q , находящийся в электрическом поле, и потенциальная энергия этого заряда

$$\vec{F} = q\vec{E}, \quad W_{\text{п}} = q\varphi.$$

3. Напряженность и потенциал поля, создаваемого точечным зарядом q ,

$$E = \frac{q}{4\pi\varepsilon_0\varepsilon r^2}, \quad \varphi = \frac{q}{4\pi\varepsilon_0\varepsilon r},$$

где r – расстояние от заряда q до точки, в которой определяются напряженность или потенциал.

4. Напряженность и потенциал поля, создаваемого системой точечных зарядов (принцип суперпозиции полей),

$$\vec{E} = \sum_{i=1}^n \vec{E}_i, \quad \varphi = \sum_{i=1}^n \varphi_i,$$

где \vec{E}_i , φ_i – напряженность и потенциал в данной точке поля, создаваемого i -м зарядом.

5. Напряженность и потенциал поля, создаваемого сферой радиусом R на расстоянии r от центра сферы:

$$\text{а) } E = 0, \quad \varphi = \frac{q}{4\pi\varepsilon_0\varepsilon R} \quad (\text{при } r < R);$$

$$\text{б) } E = \frac{q}{4\pi\epsilon_0\epsilon R^2}, \quad \varphi = \frac{q}{4\pi\epsilon_0\epsilon R} \quad (\text{при } r = R);$$

$$\text{в) } E = \frac{q}{4\pi\epsilon_0\epsilon r^2}, \quad \varphi = \frac{q}{4\pi\epsilon_0\epsilon r} \quad (\text{при } r > R),$$

где q – заряд сферы.

6. Линейная плотность заряда $\tau = dq/dl$, или $\tau = q/l$.

Поверхностная плотность заряда $\sigma = dq/dS$, или $\sigma = q/S$.

Объемная плотность заряда $\rho_3 = dq/dV$, или $\rho_3 = q/V$.

Связь заряда и плотностей $dq = \sigma dS = \tau dl = \rho_3 dV$.

7. Напряженность и потенциал поля, создаваемого распределенными зарядами. Если заряд равномерно распределен вдоль линии с линейной плотностью τ , то на линии выделяется малый участок длиной dl с зарядом $dq = \tau dl$. Такой заряд можно рассматривать как точечный и применять формулы

$$d\vec{E} = \frac{\tau dl}{4\pi\epsilon\epsilon_0 r^2} \frac{\vec{r}}{r}, \quad d\varphi = \frac{\tau dl}{4\pi\epsilon\epsilon_0 r},$$

где \vec{r} – радиус-вектор, направленный от выделенного элемента dl к точке, в которой вычисляется напряженность; r – его модуль.

Используя принцип суперпозиции электрических полей, находим интегрированием напряженность \vec{E} и потенциал φ поля, создаваемого распределенным зарядом:

$$\vec{E} = \frac{\tau}{4\pi\epsilon\epsilon_0} \int_l \frac{dl \vec{r}}{r^2 r}, \quad \varphi = \frac{\tau}{4\pi\epsilon\epsilon_0} \int_l \frac{dl}{r}.$$

Интегрирование ведется вдоль всей длины l заряженной линии.

8. Напряженность поля, создаваемого бесконечно прямой равномерно заряженной линией или бесконечно длинным цилиндром,

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

где r – расстояние от нити или оси цилиндра до точки, в которой определяется напряженность поля.

Напряженность поля, создаваемого бесконечной равномерно заряженной плоскостью,

$$E = \frac{\sigma}{2\varepsilon\varepsilon_0}.$$

Электрическое смещение (электрическая индукция)

$$\vec{D} = \varepsilon_0\varepsilon \vec{E}.$$

Теорема Гаусса

$$\oint_S \vec{E} d\vec{S} = \frac{1}{\varepsilon\varepsilon_0} \sum q^{\text{овв}}, \text{ или } \oint_S \vec{D} d\vec{S} = \sum q^{\text{овв}}.$$

10. Связь потенциала с напряженностью:

а) $\vec{E} = -\text{grad } \varphi$, или $\vec{E} = -\left(\vec{i} \frac{\partial \varphi}{\partial x} + \vec{j} \frac{\partial \varphi}{\partial y} + \vec{k} \frac{\partial \varphi}{\partial z} \right)$ в общем слу-

чае, где \vec{i} , \vec{j} , \vec{k} – единичные векторы вдоль осей координат (орты);

б) $E = \frac{\varphi_1 - \varphi_2}{d}$ в случае однородного поля;

в) $E = -\frac{d\varphi}{dr}$ в случае поля, обладающего центральной или

осевой симметрией.

11. Электрический момент диполя

$$\vec{P} = |q| \vec{l},$$

где q – заряд; l – плечо диполя (векторная величина, направленная от отрицательного заряда к положительному и численно равная расстоянию между зарядами).

12. Работа сил поля по перемещению заряда q из точки поля с потенциалом φ_1 в точку с потенциалом φ_2

$$A_{12} = q \int_1^2 E_l dl = q(\varphi_1 - \varphi_2).$$

13. Электроемкость уединенного тела и конденсатора

$$C = \frac{q}{\phi}, \quad C = \frac{q}{U},$$

где ϕ – потенциал проводника; U – разность потенциалов пластин конденсатора.

Следует помнить, что при изменении электрической емкости конденсатора, подключенного к источнику напряжения, меняется величина заряда на его пластинах, а разность потенциалов остается постоянной и равной ЭДС источника тока. При изменении емкости конденсатора, отключенного от источника напряжения, меняется разность потенциалов на его пластинах, а величина заряда остается при этом неизменной.

Электроемкость плоского конденсатора

$$C = \frac{\epsilon\epsilon_0 S}{d},$$

где S – площадь одной пластины конденсатора; d – расстояние между пластинами.

Электроемкость батареи конденсаторов:

а) $\frac{1}{C} = \sum_{i=1}^N \frac{1}{C_i}$ при последовательном соединении;

б) $C = \sum_{i=1}^N C_i$ при параллельном соединении,

где N – число конденсаторов в батарее.

Энергия заряженного конденсатора

$$W = \frac{qU}{2} = \frac{CU^2}{2} = \frac{q^2}{2C},$$

$$W = \frac{1}{2} \epsilon_0 \epsilon E^2 V,$$

где V – объем конденсатора.

Объемная плотность энергии электрического поля

$$w_3 = \frac{W}{V} = \frac{\epsilon_0 \epsilon E^2}{2}.$$

Примеры решения задач

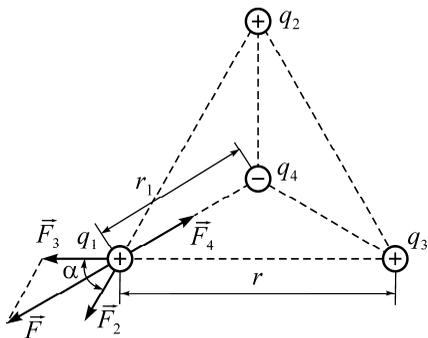
№ 1. Три точечных заряда $q_1 = q_2 = q_3 = 1$ нКл расположены в вершинах равностороннего треугольника. Какой заряд q_4 нужно поместить в центре треугольника, чтобы указанная система зарядов находилась в равновесии?

Р е ш е н и е.

Все три заряда, расположенные по вершинам треугольника, находятся в одинаковых условиях, поэтому достаточно выяснить, какой заряд следует поместить в центре треугольника, чтобы какой-нибудь один из трех зарядов, например q_1 , находился в равновесии. Заряд q_1 будет находиться в равновесии, если векторная сумма действующих на него сил равна нулю:

$$\vec{F}_2 + \vec{F}_3 + \vec{F}_4 = \vec{F} + \vec{F}_4 = 0, \quad (1)$$

где \vec{F}_2 , \vec{F}_3 , \vec{F}_4 – силы, с которыми соответственно действуют на заряд q_1 заряды q_2 , q_3 , q_4 ; \vec{F} – равнодействующая сил \vec{F}_2 и \vec{F}_3 .



Поскольку силы \vec{F} и \vec{F}_4 направлены по одной прямой в противоположные стороны, то векторное равенство (1) можно заменить скалярным равенством $F - F_4 = 0$, откуда

$$F_4 = F.$$

Выразив в последнем равенстве F через F_2 и F_3 и учитывая, что $F_3 = F_2$, получим $F_4 = F = 2F_2 \cos \frac{\alpha}{2}$.

Применяя закон Кулона и имея в виду, что $q_2 = q_3 = q_1$, найдем

$$\frac{q_1 q_4}{4\pi\epsilon_0 r_1^2} = \frac{q_1^2}{4\pi\epsilon_0 r^2} 2 \cos \frac{\alpha}{2},$$

откуда

$$q_4 = \frac{q_1 r_1^2}{r^2} 2 \cos \frac{\alpha}{2}. \quad (2)$$

Из геометрических построений в равностороннем треугольнике ($\alpha = 60^\circ$) следует, что

$$r_1 = \frac{r}{2 \cos \frac{\alpha}{2}} = \frac{r}{\sqrt{3}}.$$

С учетом этого формула (2) примет вид

$$q_4 = \frac{q_1}{\sqrt{3}}.$$

Подставив числовое значение $q_1 = 1 \text{ нКл} = 10^{-9} \text{ Кл}$, получим

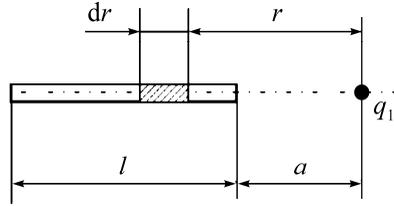
$$q_4 = \frac{10^{-9}}{\sqrt{3}} \approx 5,77 \cdot 10^{-10} = 577 \text{ пКл}.$$

Следует отметить, что равновесие системы зарядов будет неустойчивым.

№ 2. Тонкий стержень длиной $l = 20$ см несет равномерно распределенный заряд. На продолжении оси стержня на расстоянии $a = 10$ см от ближайшего конца находится точечный заряд $q_1 = 40$ нКл, который взаимодействует со стержнем с силой $F = 6$ мкН. Определить линейную плотность τ заряда на стержне.

Решение.

При вычислении силы F следует иметь в виду, что заряд на стержне не является точечным, поэтому закон Кулона непосредственно применить нельзя. Применим метод ДИ. Выделим на стержне малый участок dr с зарядом $dq = \tau dr$. Этот заряд можно рассматривать как точечный. Тогда, согласно закону Кулона,



$$d\vec{F} = \frac{q_1 \tau dr}{4\pi\epsilon_0 r^2} \vec{r}, \quad (1)$$

где $d\vec{F}$ – сила взаимодействия заряда q_1 и заряда участка dr . Поскольку все $d\vec{F}$ сонаправлены, можно воспользоваться скалярным выражением для $d\vec{F}$

$$dF = \frac{q_1 \tau dr}{4\pi\epsilon_0 r^2}. \quad (2)$$

Интегрируя это выражение в пределах от a до $a + l$, получим

$$F = \frac{q_1 \tau}{4\pi\epsilon_0} \int_a^{a+l} \frac{dr}{r^2} = \frac{q_1 \tau}{4\pi\epsilon_0} \left(\frac{1}{a} - \frac{1}{a+l} \right) = \frac{q_1 \tau l}{4\pi\epsilon_0 a(a+l)},$$

откуда интересующая нас линейная плотность заряда

$$\tau = \frac{4\pi\epsilon_0 a(a+l)F}{q_1 l}.$$

Выразим все величины в единицах СИ: $q_1 = 40 \text{ нКл} = 4 \cdot 10^{-8} \text{ Кл}$; $F = 6 \text{ мкН} = 6 \cdot 10^{-6} \text{ Н}$; $l = 0,2 \text{ м}$; $a = 0,1 \text{ м}$; $4\pi\epsilon_0 = \frac{1}{9 \cdot 10^9} \text{ Ф/м}$; $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ Ф/м}$.

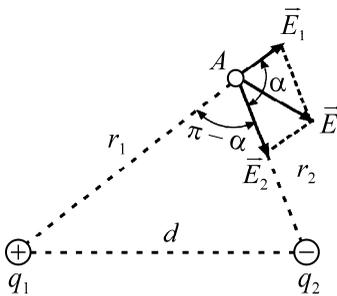
Подставим числовые значения величин в полученную формулу и произведем вычисления:

$$\tau = \frac{0,1 \cdot (0,1 + 0,2) \cdot 6 \cdot 10^{-6}}{9 \cdot 10^9 \cdot 4 \cdot 10^{-8} \cdot 0,2} \text{ Кл/м} = 2,5 \cdot 10^{-9} \text{ Кл/м} = 2,5 \text{ нКл/м}.$$

№ 3. Два точечных электрических заряда $q_1 = 1$ нКл и $q_2 = -2$ нКл находятся в воздухе на расстоянии $d = 10$ см друг от друга. Определить напряженность \vec{E} и потенциал ϕ поля, создаваемого этими зарядами в точке A , удаленной от заряда q_1 на расстояние $r_1 = 9$ см и от заряда q_2 на $r_2 = 7$ см.

Решение.

Согласно принципу суперпозиции электрических полей каждый заряд создает поле независимо от присутствия в пространстве других зарядов. Исходя из этого напряженность \vec{E}



электрического поля в искомой точке может быть найдена как геометрическая сумма напряженностей \vec{E}_1 и \vec{E}_2 полей, создаваемых каждым зарядом в отдельности: $\vec{E} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2$. Напряженность электрического поля, создаваемого в воздухе ($\epsilon = 1$) зарядом q_1 ,

$$E_1 = \frac{q_1}{4\pi\epsilon_0 r_1^2}, \quad (1)$$

зарядом q_2

$$E_2 = \frac{q_2}{4\pi\epsilon_0 r_2^2}. \quad (2)$$

Вектор \vec{E}_1 направлен по силовой линии от заряда q_1 , так как заряд q_1 положителен; вектор \vec{E}_2 направлен также по силовой линии, но к заряду q_2 , так как заряд q_2 отрицателен.

Абсолютное значение вектора \vec{E} найдем как следствие из теоремы косинусов:

$$E = \sqrt{E_1^2 + E_2^2 + 2E_1 E_2 \cos \alpha}, \quad (3)$$

где α – угол между векторами \vec{E}_1 и \vec{E}_2 , который может быть найден из треугольника со сторонами r_1 , r_2 и d по теореме косинусов:

$$d^2 = r_1^2 + r_2^2 - 2r_1r_2 \cos(\pi - \alpha) = r_1^2 + r_2^2 + 2r_1r_2 \cos \alpha,$$

$$\cos \alpha = \frac{d^2 - r_1^2 - r_2^2}{2r_1r_2}.$$

В данном случае во избежание громоздких записей удобно значение $\cos \alpha$ вычислить отдельно:

$$\cos \alpha = \frac{(0,1)^2 - (0,09)^2 - (0,07)^2}{2 \cdot 0,09 \cdot 0,07} = -0,238.$$

Подставляя выражение E_1 из формулы (1) и E_2 из формулы (2) в равенство (3) и вынося общий множитель $1/(4\pi\epsilon_0)$ за знак корня, получим

$$E = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \sqrt{\frac{q_1^2}{r_1^4} + \frac{q_2^2}{r_2^4} + 2 \frac{q_1 q_2}{r_1^2 r_2^2} \cos \alpha}. \quad (4)$$

Подставим числовые значения величин в формулу (4) и произведем вычисления:

$$E = 9 \cdot 10^9 \sqrt{\frac{(10^{-9})^2}{(0,04)^4} + \frac{(2 \cdot 10^{-9})^2}{(0,07)^4} + 2 \frac{10^{-9} \cdot 2 \cdot 10^{-9}}{(0,09)^2 \cdot (0,07)^2} (-0,238)} \approx 3,58 \text{ кВ/м}.$$

При вычислении E знак заряда q_2 опущен, так как знак заряда определяет направление вектора напряженности, а направление \vec{E}_2 было учтено при его графическом изображении (рисунок).

В соответствии с принципом суперпозиции электрических полей потенциал ϕ результирующего поля, создаваемого двумя зарядами q_1 и q_2 , равен алгебраической сумме потенциалов, т.е.

$$\phi = \phi_1 + \phi_2. \quad (5)$$

Потенциал электрического поля, создаваемого в вакууме точечным зарядом q на расстоянии r от него, выражается формулой

$$\varphi = \frac{q}{4\pi\epsilon_0 r}. \quad (6)$$

В нашем случае согласно формулам (5) и (6) получим

$$\varphi = \frac{q_1}{4\pi\epsilon_0 r_1} + \frac{q_2}{4\pi\epsilon_0 r_2},$$

или

$$\varphi = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \left(\frac{q_1}{r_1} + \frac{q_2}{r_2} \right).$$

Подставляя в это выражение числовые значения физических величин, получим

$$\varphi = 9 \cdot 10^9 \left(\frac{10^{-9}}{0,09} + \frac{-2 \cdot 10^{-9}}{0,07} \right) = -157 \text{ В.}$$

№ 4. Точечный заряд $q = 25$ нКл находится в поле, созданном прямым бесконечным цилиндром радиусом $R = 1$ см, равномерно заряженным с поверхностной плотностью $\sigma = 0,2$ нКл/см². Определить силу F , действующую на заряд, если его расстояние от оси цилиндра $r = 10$ см.

Р е ш е н и е.

Численное значение силы F , действующей на точечный заряд q , находящийся в поле, определяется по формуле

$$F = qE, \quad (1)$$

где E – напряженность поля, создаваемого заряженным цилиндром.

Как известно, напряженность поля бесконечно длинного равномерно заряженного цилиндра

$$E = \frac{\tau}{2\pi\epsilon_0 r}, \quad (2)$$

где τ – линейная плотность заряда.

Выразим линейную плотность τ через поверхностную плотность σ . Для этого выделим элемент цилиндра длиной l и выразим находящийся на нем заряд q двумя способами:

$$q = \sigma S = \sigma 2\pi Rl, \quad q = \tau l.$$

Приравняв правые части этих равенств и сократив на l , получим

$$\tau = 2\pi R\sigma.$$

С учетом этого формула (2) примет вид

$$E = \frac{R\sigma}{\epsilon_0 r}.$$

Подставив это выражение в формулу (1), получим искомую силу F :

$$F = \frac{qR\sigma}{\epsilon_0 r}. \quad (3)$$

Выпишем в единицах СИ числовые значения величин: $q = 25 \text{ нКл} = 2,5 \cdot 10^{-8} \text{ Кл}$, $\sigma = 0,2 \text{ нКл/см}^2 = 2 \cdot 10^{-6} \text{ Кл/м}^2$, $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ Ф/м}$. Поскольку R и r входят в формулу в виде отношения, они могут быть выражены в любых, но только одинаковых единицах. Подставим в уравнение (3) числовые значения величин:

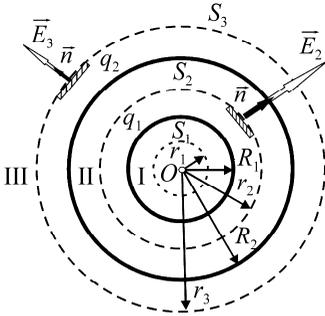
$$F = \frac{2,5 \cdot 10^{-8} \cdot 2 \cdot 10^{-6} \cdot 1}{8,85 \cdot 10^{-12} \cdot 10} = 0,565 \cdot 10^{-3} \text{ Н} = 565 \text{ мкН}.$$

Направление силы \vec{F} совпадает с направлением напряженности \vec{E} , а последняя направлена перпендикулярно поверхности цилиндра.

№ 5. Две концентрические проводящие сферы радиусами $R_1 = 6 \text{ см}$ и $R_2 = 10 \text{ см}$ несут соответственно заряды $q_1 = 1 \text{ нКл}$ и $q_2 = -0,5 \text{ нКл}$. Найти напряженность E поля в точках, отстоящих от центра сфер на расстояния $r_1 = 5 \text{ см}$, $r_2 = 9 \text{ см}$, $r_3 = 15 \text{ см}$.

Решение.

Заметим, что точки, в которых требуется найти напряженности электрического поля, лежат в трех областях (рисунок): область I ($r_1 < R_1$), область II ($R_1 < r_2 < R_2$), область III ($r_3 > R_2$).



1. Для определения напряженности E_1 в области I проведем замкнутую сферическую поверхность S_1 радиусом r_1 и воспользуемся теоремой Гаусса:

$$\oint_S E_n dS = 0$$

(так как суммарный заряд, находящийся внутри данной замкнутой поверхности, равен нулю). Следовательно, E_1 (напряженность поля в области I) во всех точках, удовлетворяющих условию $r_1 < R_1$, будет равна нулю.

2. В области II замкнутую поверхность проведем радиусом r_2 . В этом случае

$$\oint_{S_2} E_n dS = \frac{q_1}{\epsilon_0}$$

(так как внутри этой замкнутой поверхности находится только заряд q_1).

Поскольку $E_n = E = \text{const}$, E можно вынести за знак интеграла:

$$E \oint_{S_2} dS = \frac{q_1}{\epsilon_0},$$

или

$$E S_2 = \frac{q_1}{\epsilon_0}.$$

Обозначив напряженность E для области II через E_2 , получим

$$E_2 = \frac{q_1}{\epsilon_0 S_2},$$

где S_2 – площадь замкнутой сферической поверхности, $S_2 = 4\pi r_2^2$.
Тогда

$$E_2 = \frac{q_1}{4\pi\epsilon_0 r_2^2}. \quad (1)$$

3. В области III сферическая поверхность проводится радиусом r_3 . Обозначим напряженность E области III через E_3 и учтем, что в этом случае замкнутая поверхность охватывает обе сферы и, следовательно, суммарный заряд будет равен $q_1 + q_2$. Тогда

$$E_3 = \frac{q_1 + q_2}{4\pi\epsilon_0 r_3^2}.$$

Выразим все величины в единицах СИ ($q_1 = 10^{-9}$ Кл; $q_2 = -0,5 \cdot 10^{-9}$ Кл; $r_1 = 0,05$ м; $r_2 = 0,09$ м; $r_3 = 0,15$ м; $1/(4\pi\epsilon_0) = 9 \cdot 10^9$ м/Ф) и произведем вычисления:

$$E_2 = 9 \cdot 10^9 \frac{10^{-9}}{(0,09)^2} \approx 1,11 \text{ кВ/м},$$

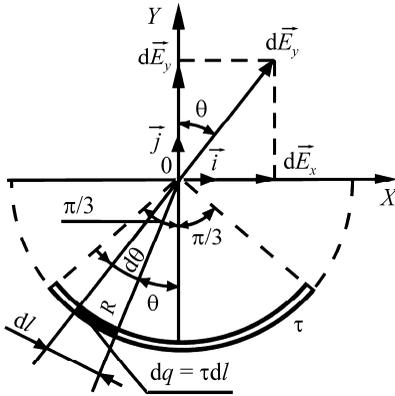
$$E_3 = 9 \cdot 10^9 \frac{(1 - 0,5) \cdot 10^{-9}}{(0,15)^2} = 200 \text{ В/м}.$$

№ 6. По тонкой нити, изогнутой по дуге окружности, равномерно распределен заряд с линейной плотностью $\tau = 10$ нКл/м. Определить напряженность E и потенциал ϕ электрического поля, создаваемого таким распределенным зарядом в точке, совпадающей с центром кривизны дуги. Длина l нити составляет одну треть длины окружности и равна 16 см.

Р е ш е н и е.

Выберем оси координат так, чтобы начало координат совпадало с центром кривизны дуги, а ось Y была бы симметрично расположена относительно концов дуги.

На нити выделим элемент длины dl . Заряд $dq = \tau dl$, находящийся на выделенном участке, можно считать точечным.



Определим напряженность электрического поля в точке O . Для этого найдем сначала напряженность $d\vec{E}$ поля, создаваемого зарядом dq :

$$d\vec{E} = \frac{\tau dl}{4\pi\epsilon_0 r^2} \frac{\vec{r}}{r},$$

где r – радиус-вектор, направленный от элемента $d\vec{l}$ к точке, напряженность в которой вычисляется.

Выразим вектор $d\vec{E}$ через проекции dE_x и dE_y на оси координат:

$$d\vec{E} = \vec{i}dE_x + \vec{j}dE_y,$$

где \vec{i} и \vec{j} – единичные векторы направлений (орты).

Напряженность \vec{E} найдем интегрированием:

$$\vec{E} = \int_l d\vec{E} = \vec{i} \int_l dE_x + \vec{j} \int_l dE_y.$$

Интегрирование ведется вдоль дуги длины l . В силу симметрии интеграл $\int_l dE_x$ равен нулю. Тогда

$$\vec{E} = \vec{j} \int_l dE_y, \quad (1)$$

где $dE_y = dE \cos \theta = \frac{\tau dl}{4\pi\epsilon_0 r^2} \cos \theta$.

Поскольку $r = R = \text{const}$, $dl = R d\theta$, то

$$dE_y = \frac{\tau R d\theta}{4\pi\epsilon_0 R^2} \cos \theta = \frac{\tau}{4\pi\epsilon_0 R} \cos \theta d\theta.$$

Подставим найденное значение dE_y в выражение (1) и, приняв во внимание симметричное расположение дуги относительно

но оси Y , пределы интегрирования возьмем от 0 до $\pi/3$, а результат удвоим:

$$\vec{E} = \vec{j} \frac{2\tau}{4\pi\epsilon_0 R} \int_0^{\pi/3} \cos \theta d\theta = \vec{j} \frac{\tau}{2\pi\epsilon_0 R} \sin \theta \Big|_0^{\pi/3}.$$

Подставив указанные пределы и выразив R через длину дуги ($3l = 2\pi R$), получим

$$\vec{E} = \vec{j} \frac{\tau}{6\epsilon_0 l} \sqrt{3}.$$

Из этой формулы видно, что вектор \vec{E} совпадает с положительным направлением оси Y .

Подставим значения τ и l в полученную формулу и произведем вычисления:

$$E = \frac{10^{-8} \cdot 1,73}{6 \cdot 8,85 \cdot 10^{-12} \cdot 0,15} = 2,18 \text{ кВ/м.}$$

Найдем потенциал электрического поля в точке 0. Сначала найдем потенциал $d\varphi$, создаваемый точечным зарядом dq в точке 0:

$$d\varphi = \frac{\tau dl}{4\pi\epsilon_0 r}.$$

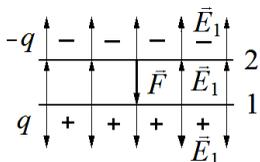
Заменим r на R и произведем интегрирование:

$$\varphi = \frac{\tau}{4\pi\epsilon_0 R} \int_0^l dl = \frac{\tau l}{4\pi\epsilon_0 R}.$$

Поскольку $l = 2\pi R/3$, то $\varphi = \tau/6\epsilon_0$. Произведем вычисления:

$$\varphi = \frac{10^{-8}}{6 \cdot 8,85 \cdot 10^{-12}} = 188 \text{ В.}$$

№ 7. На пластинах плоского конденсатора находится заряд $q = 10$ нКл. Площадь S каждой пластины конденсатора равна 100 см^2 , диэлектрик – воздух. Определить силу F , с которой притягиваются пластины.



Р е ш е н и е.

Заряд q второй пластины находится в поле напряженностью E_1 , созданном зарядом первой пластины конденсатора. Следовательно, на заряд q действует сила

$$F = qE_1. \quad (1)$$

Поскольку

$$E_1 = \frac{\sigma}{2\varepsilon_0} = \frac{q}{2\varepsilon_0 S}, \quad (2)$$

где σ – поверхностная плотность заряда пластины, то формула (1) с учетом выражения (2) примет вид

$$F = \frac{q^2}{2\varepsilon_0 S}. \quad (3)$$

Подставив числовые значения величин в формулу (3), получим

$$F = \frac{10^{-18}}{2 \cdot 8,85 \cdot 10^{-12} \cdot 10^{-2}} = 5,65 \cdot 10^{-4} \text{ Н.}$$

№ 8. Электрическое поле создано длинным цилиндром радиусом $R = 1$ см, равномерно заряженным с линейной плотностью $\tau = 20$ нКл/м. Определить разность потенциалов двух точек этого поля, находящихся на расстоянии $a_1 = 0,5$ см и $a_2 = 2$ см от поверхности цилиндра в средней его части.

Р е ш е н и е.

Для определения разности потенциалов воспользуемся соотношением между напряженностью поля и изменением потенциала

$$\vec{E} = -\text{grad } \varphi.$$

Для поля с осевой симметрией, каким является поле цилиндра, это соотношение можно записать в виде

$$E_r = -\frac{d\varphi}{dr}, \text{ или } d\varphi = -E_r dr.$$

Интегрируя это выражение, найдем разность потенциалов двух точек, отстоящих на расстояниях r_1 и r_2 от оси цилиндра:

$$\varphi_2 - \varphi_1 = - \int_{r_1}^{r_2} E_r dr. \quad (1)$$

Поскольку цилиндр длинный и точки взяты вблизи его средней части, для напряженности можно воспользоваться формулой напряженности поля, создаваемого бесконечно длинным цилиндром:

$$E_r = \frac{\tau}{2\pi\epsilon_0 r}.$$

Подставив выражение E_r в формулу (1), получим

$$\varphi_2 - \varphi_1 = - \frac{\tau}{2\pi\epsilon_0} \int_{r_1}^{r_2} \frac{dr}{r} = - \frac{\tau}{2\pi\epsilon_0} \ln \frac{r_2}{r_1},$$

или

$$\varphi_1 - \varphi_2 = \frac{\tau}{2\pi\epsilon_0} \ln \frac{r_2}{r_1}. \quad (2)$$

Выразим τ и $1/2\pi\epsilon_0$ в единицах СИ: $\tau = 20 \text{ нКл/м} = 2 \cdot 10^{-8} \text{ Кл/м}$; $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ Ф/м}$.

Поскольку величины r_1 и r_2 входят в формулу (2) в виде отношения, их можно выразить в любых, но только одинаковых единицах: $r_1 = R + a_1 = 1,5 \text{ см}$; $r_2 = R + a_2 = 3 \text{ см}$. Подставим числовые значения в выражение (2) и вычислим:

$$\varphi_1 - \varphi_2 = 2 \cdot 10^{-8} \cdot 1,8 \cdot 10^{10} \ln \frac{3}{1,5} = 3,6 \cdot 10^2 \cdot 2,3 \cdot \ln 2 = 250 \text{ В}.$$

№ 9. Конденсатор емкостью $C_1 = 3 \text{ мкФ}$ был заряжен до разности потенциалов $U_1 = 40 \text{ В}$. После отключения от источника тока конденсатор был соединен параллельно с другим незаряженным конденсатором емкостью $C_2 = 5 \text{ мкФ}$. Какая энергия W' израсходуется на образование искры в момент присоединения второго конденсатора?

Р е ш е н и е.

Энергия, израсходованная на образование искры,

$$W' = W_1 - W_2, \quad (1)$$

где W_1 – энергия, которой обладал первый конденсатор до присоединения к нему второго конденсатора; W_2 – энергия, которую имеет батарея, составленная из первого и второго конденсаторов. Энергия заряженного конденсатора определяется по формуле

$$W = \frac{CU^2}{2}, \quad (2)$$

где C – емкость конденсатора или батареи конденсаторов; U – разность потенциалов.

Выразив в формуле (1) энергии W_1 и W_2 по формуле (2) и принимая во внимание, что общая емкость параллельно соединенных конденсаторов равна сумме емкостей отдельных конденсаторов, получим

$$W' = \frac{C_1 U_1^2}{2} - \frac{(C_1 + C_2) U_2^2}{2}, \quad (3)$$

где U_2 – разность потенциалов на зажимах батареи параллельно соединенных конденсаторов.

Учитывая, что заряд после присоединения второго конденсатора остается прежним, выразим разность потенциалов U_2 следующим образом:

$$U_2 = \frac{q}{C_1 + C_2} = \frac{C_1 U_1}{C_1 + C_2}.$$

Подставим выражение U_2 в формулу (3):

$$W' = \frac{C_1 U_1^2}{2} - \frac{(C_1 + C_2) C_1^2 U_1^2}{2(C_1 + C_2)^2} = \frac{C_1 U_1^2}{2} - \frac{C_1^2 U_1^2}{2(C_1 + C_2)}.$$

После преобразований имеем $W' = \frac{1}{2} \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2} U_1^2$.

Подставим числовые значения и вычислим W' :

$$W' = \frac{1 \cdot 3 \cdot 10^{-5} \cdot 5 \cdot 10^{-6}}{2 \cdot 3 \cdot 10^{-6} + 5 \cdot 10^{-6}} \cdot 1600 = 1,5 \text{ мДж.}$$

3.2. Постоянный ток

Задачи на постоянный ток можно разделить на два типа: вычисление сопротивлений, сил токов или напряжений на каком-либо участке цепи; задачи на работу, мощность и тепловое действие тока.

Из задач *первого типа* можно выделить вспомогательную группу – задачи на вычисление сопротивлений отдельных проводников и соединений из них. Если в условии задачи указано, из какого материала изготовлен проводник, или приводятся сведения о его геометрических размерах или массе, то для нахождения неизвестной величины нужно воспользоваться формулой сопротивления и соотношением между массой, объемом и плотностью проводника. Решение задач на вычисление сопротивлений сложных соединений нужно начинать с анализа схемы и отыскания в ней каких-нибудь двух (иногда более) проводников, соединенных друг с другом последовательно или параллельно. Их сопротивление следует заменить одним эквивалентным сопротивлением, используя соответствующие формулы

$$R_{\text{посл}} = \sum_{i=1}^n R_i \text{ и } \frac{1}{R_{\text{парал}}} = \sum_{i=1}^n \frac{1}{R_i},$$

и получить упрощенную схему. В схемах, представляющих собой комбинацию последовательно и параллельно включенных проводников, этот прием нужно применять несколько раз и таким образом найти общее сопротивление.

При решении задач на определение силы тока, напряжения или сопротивления на каком-либо участке цепи следует:

а) начертить схему и указать на ней все элементы цепи – источники тока, резисторы и конденсаторы;

б) установить, какие элементы цепи включены последовательно, какие – параллельно;

в) расставить токи и напряжения на каждом участке цепи;

г) используя законы Ома, установить связь между токами и напряжениями (ЭДС). В результате получается система уравнений, полностью отражающая условия задачи и позволяющая определить искомую величину.

Задачи *второго типа* можно, в свою очередь, разбить на три группы. К первой группе относятся задачи на расчет электрической цепи, аналогичные рассмотренным выше. Для их решения составляют те же уравнения законов Ома, но к ним добавляют формулы мощности (работы). Особое внимание следует обратить на выбор исходной формулы мощности. Если речь идет о мощности, выделяемой на участке цепи, нужно пользоваться формулой

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

Мощность, развиваемая источником, – полная мощность определяется по формуле

$$P_0 = I\varepsilon = \frac{\varepsilon^2}{R + r},$$

а мощность во внешней цепи источника тока

$$P = I\varepsilon - I^2 r = \frac{\varepsilon^2 R}{(R + r)^2}.$$

Ко второй группе относятся задачи на тепловое действие тока. Основным расчетным соотношением в них является закон Джоуля–Ленца

$$Q = I^2 R t.$$

Если участок цепи не содержит источников тока, то количество теплоты, выделяющееся на этом участке, можно определять по формуле

$$Q = IUt = \frac{U^2}{R}t.$$

Третью, небольшую, группу составляют задачи о превращении электрической энергии в механическую, тепловую и химическую при работе электромашин постоянного тока. Решение таких задач основано на применении уравнения закона сохранения и превращения энергии.

Основные формулы

1. Сила тока

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

где q – заряд, прошедший через поперечное сечение проводника за время t .

Плотность тока

$$j = I/S,$$

где S – площадь поперечного сечения проводника.

Связь плотности тока со средней скоростью $\langle \vec{v} \rangle$ упорядоченного движения заряженных частиц

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

где q – заряд частиц; n – их концентрация.

2. Закон Ома:

а) $I = \frac{\varphi_1 - \varphi_2}{R} = \frac{U}{R}$ – для участка цепи, не содержащего

ЭДС (для пассивного или однородного участка цепи), где $\varphi_1 - \varphi_2 = U$ – разность потенциалов (напряжение) на концах участка цепи; R – сопротивление участка;

б) $I = \frac{(\varphi_1 - \varphi_2) \pm \varepsilon}{R}$ – для участка цепи, содержащего ЭДС

(для активного или неоднородного участка цепи), где ε – ЭДС источника тока; R – полное сопротивление участка (сумма

внешних и внутренних сопротивлений). Знаки «+» или «-» выбираются в зависимости от полярности включения источника;

$$в) I = \frac{\varepsilon}{R + r} \text{ – для замкнутой (полной) цепи, где } R \text{ – сопротивление внешней цепи; } r \text{ – сопротивление внутреннее (сопротивление источника тока).}$$

3. Правила Кирхгофа:

$$а) \sum I_i = 0 \text{ – первое правило;}$$

$$б) \sum I_i R_i = \sum \varepsilon_i \text{ – второе правило,}$$

где $\sum I_i$ – алгебраическая сумма сил токов, сходящихся в узле;

$\sum I_i R_i$ – алгебраическая сумма произведений сил токов и сопротивлений участков замкнутого контура; $\sum \varepsilon_i$ – алгебраическая сумма ЭДС в замкнутом контуре.

4. Сопротивление R и проводимость G однородного проводника:

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

где ρ – удельное сопротивление; γ – удельная проводимость; l – длина проводника; S – площадь поперечного сечения.

Зависимость удельного сопротивления от температуры

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

где α – температурный коэффициент сопротивления; t – температура по шкале Цельсия.

Сопротивление системы проводников:

$$а) R = \sum R_i \text{ – при последовательном соединении;}$$

$$б) \frac{1}{R} = \sum \frac{1}{R_i} \text{ – при параллельном соединении,}$$

где R_i – сопротивление i -го проводника.

5. Работа тока:

$$dA = IUdt = I^2 Rdt = \frac{U^2}{R} dt.$$

Закон Джоуля–Ленца (тепловое действие тока)

$$dQ = dA = I^2 Rdt,$$

где dQ – количество теплоты, выделяющейся в проводнике; dt – промежуток времени, в течение которого выделялось тепло.

Мощность тока полной цепи

$$P = I\varepsilon.$$

Мощность тока на внешнем участке цепи

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

Закон Ома в дифференциальной форме

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

Закон Джоуля–Ленца в дифференциальной форме

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

где w – объемная плотность тепловой мощности (количество тепла, выделяющегося в единице объема за единицу времени).

Примеры решения задач

№ 1. Сила тока в проводнике равномерно нарастает от $I_0 = 0$ до $I = 2$ А в течение времени $\tau = 5$ с. Определите заряд, прошедший по проводнику.

Р е ш е н и е.

Поскольку сила тока в проводнике изменяется, воспользоваться для подсчета заряда формулой $Q = It$ нельзя, поэтому возьмем дифференциал заряда $dQ = Idt$ и проинтегрируем:

$$Q = \int_0^{\tau} Idt. \quad (1)$$

В силу равномерного нарастания тока $I = kt$, где k – коэффициент пропорциональности, очевидно, что

$$k = \frac{I - I_0}{\tau} = \frac{I}{\tau} \text{ и } dQ = ktdt = \frac{1}{\tau}tdt.$$

Проинтегрировав, получим

$$Q = \frac{1}{\tau} \int_0^{\tau} t dt = \frac{I\tau}{2}.$$

Подставим числовые значения:

$$Q = \frac{2 \cdot 5}{2} = 5 \text{ Кл.}$$

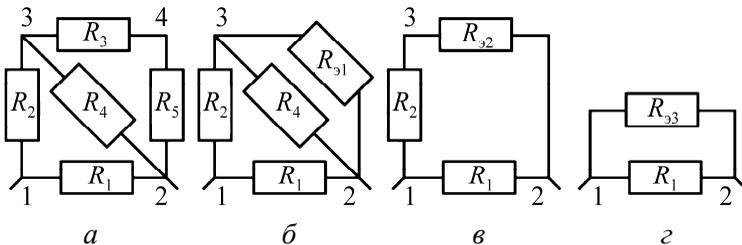
№ 2. Найти полное сопротивление схемы (а), если она включена в цепь в точках 1 и 2. $R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = R_5 = R$.

Р е ш е н и е.

Очевидно, что сопротивления R_3 и R_5 соединены последовательно, так как в точке 4 разветвлений нет. Определив их общее сопротивление $R_{31} = 2R$, представим схему в виде б. Теперь можно выделить параллельно соединенные сопротивления R_{31}

и R_4 . Сопротивление между точками схемы 2 и 3 $R_{32} = \frac{R_{31}R_4}{R_{31} + R_4} =$

$$= \frac{2RR}{2R + R} = \frac{2}{3}R.$$



Схему можно представить в виде в. Тогда имеем последовательно соединенные сопротивления R_{32} и R_2 . Их общее сопро-

тивление $R_{33} = R_{32} + R_2 = \frac{5}{3}R$. Наконец, общее сопротивление всей схемы (з) равно сопротивлению параллельно включенных сопротивлений R_{33} и R_1 :

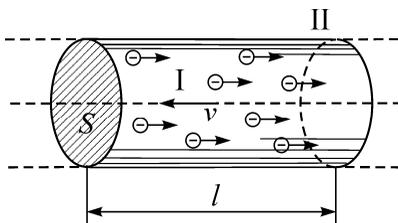
$$R_{12} = \frac{R_{33}R_1}{R_{33} + R_1} = \frac{\frac{5}{3}RR}{\frac{5}{3}R + R} = \frac{5}{8}R.$$

№ 3. По железному проводнику, диаметр d сечения которого равен 0,6 мм, течет ток 16 А. Определите среднюю скорость $\langle v \rangle$ направленного движения электронов, считая, что концентрация n свободных электронов равна концентрации n' атомов проводника.

Р е ш е н и е.

Средняя скорость направленного (упорядоченного) движения электронов определяется по формуле

$$\langle v \rangle = \frac{l}{t}, \quad (1)$$



где t – время, в течение которого все свободные электроны, находящиеся в отрезке проводника между сечениями I и II, пройдя через сечение II, перенесут заряд $Q = eN$ и создадут ток

$$I = \frac{Q}{t} = \frac{eN}{t}, \quad (2)$$

где e – элементарный заряд; N – число электронов в отрезке проводника; l – его длина.

Число свободных электронов в отрезке проводника объемом V можно выразить следующим образом:

$$N = nV = n l S, \quad (3)$$

где S – площадь сечения.

По условию задачи $n = n'$. Следовательно,

$$n = n' = \frac{N}{V} = \frac{mN_A}{\mu V} = \frac{N_A \rho}{\mu}, \quad (4)$$

где N_A – постоянная Авогадро; V – объем металла; μ – молярная масса металла; ρ – его плотность.

Подставив последовательно выражения n из формулы (4) в равенство (3) и N из формулы (3) в равенство (2), получим

$$I = \frac{N_A \rho l S e}{\mu t}.$$

Отсюда найдем

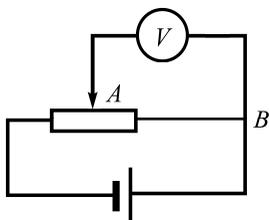
$$l = \frac{I \mu t}{N_A \rho S e}.$$

Подставив выражение l в формулу (1), сократив на t и выразив площадь S сечения проводника через диаметр d , найдем среднюю скорость направленного движения электронов

$$\langle v \rangle = \frac{4I\mu}{\pi d^2 N_A \rho e}.$$

Произведем по этой формуле вычисления:

$$\langle v \rangle = \frac{4 \cdot 16 \cdot 56 \cdot 10^{-3}}{3,14 \cdot 0,36 \cdot 10^{-6} \cdot 6 \cdot 10^{23} \cdot 98 \cdot 10^{-9} \cdot 1,6 \cdot 10^{-19}} = 4,2 \cdot 10^{-3} \text{ м/с}.$$



№ 4. Потенциометр с сопротивлением $R_{\Pi} = 100$ Ом подключен к батарее, ЭДС которой $\varepsilon = 150$ В и внутреннее сопротивление $r = 50$ Ом. Определить показание вольтметра с сопротивлением $R_V = 500$ Ом, соединенным с одной из клемм потенциометра и подвижным контактом, установленным посередине потенциометра. Какова разность потенциалов между теми же точками потенциометра при отключении вольтметра?

Р е ш е н и е.

Показание U_1 вольтметра, подключенного к точкам A и B (рисунок), определяется по формуле

$$U_1 = I_1 R_1, \quad (1)$$

где I_1 – сила тока в неразветвленной части цепи; R_1 – сопротивление параллельно соединенных вольтметра и половины потенциометра.

Силу тока I_1 найдем по закону Ома для всей цепи:

$$I_1 = \frac{\varepsilon}{R + r}, \quad (2)$$

где R – сопротивление внешней цепи.

Внешнее сопротивление R есть сумма двух сопротивлений:

$$R = \frac{R_{\text{п}}}{2} + R_1. \quad (3)$$

Сопротивление R_1 параллельного соединения может быть найдено по формуле $\frac{1}{R_1} = \frac{1}{R_V} + \frac{2}{R_{\text{п}}}$, откуда $R_1 = \frac{R_{\text{п}} R_V}{R_{\text{п}} + 2R_V}$.

Подставив числовые значения, найдем

$$R_1 = \frac{100 \cdot 500}{100 + 2 \cdot 500} = 45,5 \text{ Ом.}$$

Из выражений (2) и (3) определим силу тока:

$$I_1 = \frac{\varepsilon}{\frac{R_{\text{п}}}{2} + R_1 + r} = \frac{150}{50 + 45,5 + 50} \approx 1,03 \text{ А.}$$

Если подставить значения I_1 и R_1 в формулу (1), то можно определить показание вольтметра: $U_1 = 1,03 \cdot 45,5 \text{ В} = 46,9 \text{ В}$.

Разность потенциалов между точками A и B при отключенном вольтметре равна произведению силы тока I_2 на половину сопротивления потенциометра: $U_2 = I_2 \frac{R_{\text{п}}}{2} = \frac{\varepsilon}{R_{\text{п}} + r} \frac{R_{\text{п}}}{2}$.

Подставляя в эту формулу числовые значения, получим

$$U_2 = \frac{150}{100 + 50} \cdot \frac{100}{2} = 50 \text{ В.}$$

№ 5. Электрическая цепь состоит из двух гальванических элементов, трех сопротивлений и гальванометра. В этой цепи $R_1 = 100 \text{ Ом}$, $R_2 = 50 \text{ Ом}$, $R_3 = 20 \text{ Ом}$, ЭДС элемента $\varepsilon_1 = 2 \text{ В}$. Гальванометр регистрирует ток $I_3 = 50 \text{ мА}$, идущий в направлении, указанном стрелкой. Определить ЭДС ε_2 второго элемента. Сопротивлением гальванометра и внутренним сопротивлением элементов пренебречь.

Решение.

Выберем направления токов, как они показаны на рисунке, и условимся обходить контуры по часовой стрелке.

По первому правилу Кирхгофа для узла F имеем

$$I_1 - I_2 - I_3 = 0. \quad (1)$$

По второму правилу Кирхгофа имеем для контура $ABCDF A$

$$-I_1 R_1 - I_2 R_2 = -\varepsilon_1,$$

или, после умножения обеих частей равенства на -1 ,

$$I_1 R_1 + I_2 R_2 = \varepsilon_1. \quad (2)$$

Соответственно, для контура $AFGHA$

$$I_1 R_1 + I_3 R_3 = \varepsilon_2. \quad (3)$$

После подстановки числовых значений в формулы (1), (2) и (3) получим

$$\begin{aligned} I_1 - I_2 &= 0,05, \\ 50I_1 + 25I_2 &= 1, \\ 100I_1 + 0,05 \cdot 20 &= \varepsilon_2. \end{aligned}$$

Перенеся в этих уравнениях неизвестные величины в левые части, а известные – в правые, получим следующую систему уравнений:

$$I_1 - I_2 = 0,05, \quad 50I_1 + 25I_2 = 1, \quad 100I_1 - \varepsilon_2 = -1.$$

Эту систему с тремя неизвестными можно решить обычными приемами алгебры, но, так как по условию задачи требуется определить только одно неизвестное ε_2 из трех, воспользуемся методом Крамера.

Составим и вычислим определитель Δ системы:

$$\Delta = \begin{vmatrix} 1 & -1 & 0 \\ 50 & 25 & 0 \\ 100 & 0 & -1 \end{vmatrix} = (-1) \begin{vmatrix} 1 & -1 \\ 50 & 25 \end{vmatrix} = -(25 + 50) = -75.$$

Составим и вычислим определитель $\Delta\varepsilon_2$:

$$\begin{aligned} \Delta\varepsilon_2 &= \begin{vmatrix} 1 & -1 & 0,05 \\ 50 & 25 & 1 \\ 100 & 0 & -1 \end{vmatrix} = 1 \begin{vmatrix} 25 & 1 \\ 0 & -1 \end{vmatrix} - (-1) \begin{vmatrix} 50 & 1 \\ 100 & -1 \end{vmatrix} + 0,05 \begin{vmatrix} 50 & 25 \\ 100 & 0 \end{vmatrix} = \\ &= -25 - 50 - 125 = -300. \end{aligned}$$

Разделив определитель $\Delta\varepsilon_2$ на определитель Δ , найдем числовое значение ЭДС

$$\varepsilon_2 = -300/(-75) = 4 \text{ В.}$$

№ 6. Сила тока в проводнике сопротивлением $R = 20$ Ом нарастает в течение времени $\Delta t = 2$ с по линейному закону от $I_0 = 0$ до $I_2 = 6$ А. Определить теплоту Q , выделившуюся в этом проводнике за вторую секунду.

Решение.

Закон Джоуля–Ленца в виде $Q = I^2 R t$ справедлив только для постоянного тока ($I = \text{const}$). Если же сила тока в проводнике изменяется, то указанный закон справедлив для бесконечно малого промежутка времени и записывается в виде

$$dQ = I^2 R dt. \quad (1)$$

Здесь сила тока I является некоторой функцией времени. В нашем случае

$$I = kt + I_0, \quad (2)$$

где k – коэффициент пропорциональности, численно равный приращению силы тока в единицу времени, т.е.

$$k = \frac{\Delta I}{\Delta t} = \frac{6}{2} = 3 \text{ A/c.}$$

С учетом выражения (2) формула (1) примет вид

$$dQ = k^2 R t^2 dt. \quad (3)$$

Для определения теплоты, выделившейся за конечный промежуток времени Δt , выражение (3) следует проинтегрировать в пределах от t_1 до t_2 :

$$Q = k^2 R \int_{t_1}^{t_2} t^2 dt = \frac{1}{3} k^2 R (t_2^3 - t_1^3).$$

При определении теплоты Q , выделившейся за вторую секунду, пределы интегрирования $t_1 = 1$ с, $t_2 = 2$ с, тогда

$$Q = \frac{1}{3} \cdot 3^2 \cdot 20 (8 - 1) = 420 \text{ Дж.}$$

3.3. Электромагнетизм

Задачи по теме электромагнетизма можно разделить на две основные группы: задачи о силовом действии однородного магнитного поля на проводники с током и заряженные частицы и задачи на закон электромагнитной индукции.

Задачи расчетного характера о силах, действующих на проводники с током в однородном магнитном поле, удобно решать по следующей схеме:

1. Сделать схематический чертеж, на котором указать контур (проводник) с током и направление линий магнитной индукции поля. Обозначить углы между направлением вектора \vec{B} и отдельными элементами контура, если последний состоит из нескольких проводников.

2. Используя правило левой руки, определить направление сил Ампера, действующих на каждый элемент контура, и нанести их на чертеж.

3. Если в задаче рассматривается равновесие проводника, то, помимо сил Ампера, нужно указать все остальные силы, приложенные к проводнику, и записать условие его равновесия.

Решение задач на движение заряженных частиц в электромагнитных полях в большинстве случаев основано на составлении основного уравнения динамики материальной точки с учетом сил, действующих на заряженную частицу со стороны магнитного и электрического полей. При нахождении направления силы Лоренца следует обратить особое внимание на знак заряда частицы. Указав силы, нужно попытаться определить вид траектории частицы. Иногда это удается сделать просто, иногда это представляет основное содержание задачи.

При решении задач на закон электромагнитной индукции следует придерживаться следующей последовательности действий:

1. Анализируя условие задачи, необходимо прежде всего установить причины изменения магнитного потока, сцепленного с контуром, и определить, какая из величин B , S или α – изменится с течением времени. После этого нужно записать закон Фарадея. Если в задаче рассматривается поступательное движение прямого проводника, то ЭДС индукции определяют по формуле $\varepsilon = Blv\sin\alpha$ (l – длина проводника; v – его скорость), вытекающей из закона электромагнитной индукции.

2. Выражение для Φ представить в развернутом виде. Для этого выбирают два момента времени и для каждого из них определяют потоки Φ_1 и Φ_2 , связанные с данным контуром. Изменение магнитного потока будет или $\Delta\Phi = (B_2 - B_1)S\cos\alpha$, если изменяется индукция магнитного поля, или $\Delta\Phi = BS(\cos\alpha_2 - \cos\alpha_1)$ при изменении положения рамки, или $\Delta\Phi = B\Delta S\cos\alpha$, где ΔS – изменение площади контура, описанного в пространстве движущимся проводником.

3. Подставить выражение для $\Delta\Phi$ в исходную формулу закона Фарадея и, записав дополнительные условия, решить совместно полученные уравнения относительно искомой величины.

Основные формулы

Связь магнитной индукции \vec{B} с напряженностью \vec{H} магнитного поля

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

где μ – магнитная проницаемость однородной среды; μ_0 – магнитная постоянная. В вакууме $\mu = 1$, и магнитная индукция в вакууме $\vec{B} = \mu_0\vec{H}$.

2. Закон Био–Савара–Лапласа

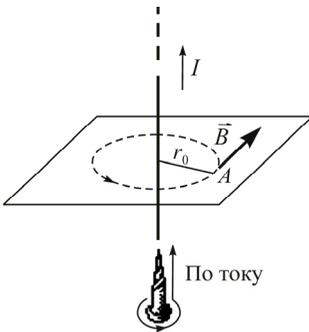
$$d\vec{B} = \frac{\mu\mu_0}{4\pi} \left[d\vec{l} \times \vec{r} \right] \frac{I}{r^3}, \text{ или } dB = \frac{\mu\mu_0}{4\pi} \frac{I \sin\alpha}{r^2} dl,$$

где $d\vec{B}$ – магнитная индукция поля, создаваемого элементом провода длиной $d\vec{l}$ с током I ; \vec{r} – радиус-вектор, направленный от элемента проводника к точке, в которой определяется магнитная индукция; α – угол между радиус-вектором и направлением тока в элементе провода.

3. Принцип суперпозиции магнитных полей

$$\vec{B} = \sum_{i=1}^n \vec{B}_i, \text{ или } \vec{B} = \int d\vec{B}$$

для $d\vec{B}$, созданных элементом тока $I d\vec{l}$.



Направление вектора магнитной индукции \vec{B} поля, создаваемого прямым током, определяется по правилу буравчика (правого винта). Для этого проводим магнитную силовую линию (штриховая линия на рисунке) и по касательной к ней в интересующей нас точке проводим вектор \vec{B} . Вектор магнитной индукции \vec{B} в точке A направлен перпендикулярно плоскости чертежа от нас.

4. Магнитная индукция в центре кругового тока

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

где R – радиус кругового витка.

Магнитная индукция на оси кругового тока

$$B = \frac{\mu\mu_0}{4\pi} \frac{2\pi R^2 I}{(R^2 + h^2)^{3/2}},$$

где h – расстояние от центра витка до точки, в которой определяется магнитная индукция.

Магнитная индукция поля, создаваемого отрезком провода с током (вывод этой формулы в примере № 1),

$$B = \frac{\mu\mu_0}{4\pi} \frac{I}{r_0} (\cos \alpha_1 - \cos \alpha_2).$$

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

$$B = \frac{\mu\mu_0 I}{2\pi r_0},$$

где r_0 – расстояние от оси провода до точки, в которой определяется магнитная индукция.

Магнитная индукция поля бесконечно длинного соленоида

$$B = \mu\mu_0 n I,$$

где n – отношение числа витков соленоида N к его длине l .

5. Сила, действующая на элемент провода с током в магнитном поле (закон Ампера),

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

где $d\vec{l}$ – вектор, равный по модулю длине участка провода и совпадающий по направлению с током; α – угол между направлением тока в проводе и вектором магнитной индукции \vec{B} .

Для однородного магнитного поля и прямого отрезка провода получим

$$F = IBlsin\alpha.$$

6. Магнитный момент плоского контура с током

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

где \vec{n} – единичный вектор нормали (положительной) к плоскости контура; I – сила тока, протекающего по контуру; S – площадь контура.

7. Механический вращающий момент, действующий на контур с током, помещенный в однородное магнитное поле,

$$\vec{M} = [\vec{p}_m \times \vec{B}], \text{ или } M = p_m B sin\alpha = IB S sin\alpha,$$

где α – угол между векторами \vec{p}_m и \vec{B} .

8. Сила Лоренца

$$\vec{F} = q[\vec{v} \times \vec{B}], \text{ или } F = qvB sin\alpha,$$

где \vec{v} – скорость заряженной частицы; α – угол между векторами \vec{v} и \vec{B} .

Если частица находится одновременно в электрическом и магнитном полях, то на нее действует сила

$$\vec{F} = q\vec{E} + q[\vec{v} \times \vec{B}].$$

9. Магнитный поток (через поверхность S):

а) в случае однородного магнитного поля и плоской поверхности

$$\Phi = BS cos\alpha, \text{ или } \Phi = B_n S,$$

где S – площадь контура; α – угол между нормалью к плоскости контура и вектором магнитной индукции;

б) в случае неоднородного поля и произвольной поверхности

$$\Phi = \int_S \vec{B} d\vec{S} = \int_S B_n dS$$

(интегрирование ведется по всей поверхности).

Потокосцепление (полный поток) $\Psi = N\Phi$.

Эта формула верна для соленоида и тороида с равномерной намоткой плотно прилегающих друг к другу N витков.

10. Работа по перемещению замкнутого контура с током в магнитном поле $\delta A = Id\Phi$, или $A = I\Delta\Phi$.

11. Основной закон электромагнитной индукции (закон Фарадея – Максвелла) $\varepsilon_i = -\frac{d\Psi}{dt} = -N\frac{d\Phi}{dt}$.

Разность потенциалов на концах проводника, движущегося со скоростью \vec{v} в магнитном поле, $U = Blv\sin\alpha$, где l – длина провода; α – угол между векторами \vec{v} и \vec{B} .

Заряд, протекающий по замкнутому контуру при изменении магнитного потока, пронизывающего этот контур, $dq = -\frac{d\Phi}{R}$,

или $dq = -N\frac{d\Phi}{R} = -\frac{d\Psi}{R}$, где R – сопротивление контура.

12. Индуктивность контура $L = \Phi/I$.

Индуктивность соленоида $L = \mu\mu_0 n^2 l S$, где n – отношение числа витков соленоида к его длине; l – длина соленоида, S – площадь его поперечного сечения.

13. ЭДС самоиндукции

$$\varepsilon_{si} = -L\frac{dI}{dt}.$$

14. Мгновенное значение силы тока в цепи, обладающей сопротивлением R и индуктивностью L :

а) $I = \frac{\varepsilon}{R}(1 - e^{-Rt/L})$ – при замыкании цепи, где ε – ЭДС источника тока; t – время, прошедшее после замыкания цепи;

б) $I = I_0 e^{-Rt/L}$ – при размыкании цепи, где I_0 – сила тока в цепи при $t = 0$; t – время, прошедшее с момента размыкания цепи.

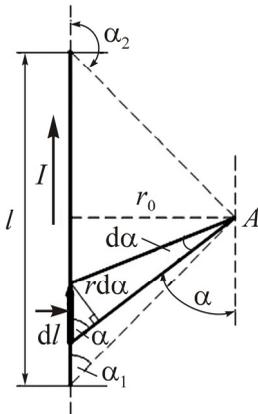
15. Энергия магнитного поля соленоида $W = \frac{LI^2}{2}$.

Объемная плотность энергии магнитного поля (отношение энергии поля к его объему)

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

Примеры решения задач

№ 1. По отрезку прямого провода длиной $l = 80$ см течет ток $I = 50$ А. Определить магнитную индукцию \vec{B} поля, создаваемого этим током в точке A , равноудаленной от концов отрезка провода и находящейся на расстоянии $r_0 = 30$ см от его середины.



Р е ш е н и е.

Для решения задачи воспользуемся законом Био–Савара–Лапласа

$$d\vec{B} = \frac{\mu\mu_0 I}{4\pi r^3} [d\vec{l} \times \vec{r}] \quad (1)$$

и принципом суперпозиции магнитных полей

$$\vec{B} = \int_l d\vec{B}, \quad (2)$$

где символ l означает, что интегрирование распространяется на всю длину провода; $d\vec{B}$ – магнитная индукция,

создаваемая элементом тока $I d\vec{l}$ в точке, определяемой радиус-вектором \vec{r} ; μ_0 – магнитная постоянная; μ – магнитная проницаемость среды, в которой находится провод (в нашем случае $\mu = 1$). Векторы $d\vec{B}$ от различных элементов тока сонаправлены, поэтому выражения (1), (2) можно переписать в скалярной форме:

$$dB = \frac{\mu_0 I \sin \alpha}{4\pi r^2} dl, \quad B = \int_l dB,$$

где α – угол между вектором $d\vec{l}$ и радиус-вектором \vec{r} . Таким образом,

$$B = \frac{\mu_0 I}{4\pi} \int \frac{\sin\alpha}{r^2} dl. \quad (3)$$

Выразим длину элемента провода dl через угол $d\alpha$: $dl = r d\alpha / \sin\alpha$.

Запишем выражение $\frac{\sin\alpha}{r^2} dl$ в виде $\frac{\sin\alpha}{r^2} \frac{rd\alpha}{\sin\alpha} = \frac{d\alpha}{r}$. Переменная r также зависит от α ($r = r_0 / \sin\alpha$), следовательно, $\frac{d\alpha}{r} = \frac{\sin\alpha}{r_0} d\alpha$. Таким образом, выражение (3) можно переписать

в виде $B = \frac{\mu_0 I}{4\pi r_0} \int_{\alpha_1}^{\alpha_2} \sin\alpha d\alpha$, где α_1 и α_2 – пределы интегрирования.

Выполним интегрирование:

$$B = \frac{\mu_0 I}{4\pi r_0} (\cos\alpha_1 - \cos\alpha_2). \quad (4)$$

При симметричном расположении точки A относительно отрезка провода $\cos\alpha_2 = -\cos\alpha_1$. С учетом этого формула (4) примет вид

$$B = \frac{\mu_0 I}{2\pi r_0} \cos\alpha_1. \quad (5)$$

Из рисунка следует, что

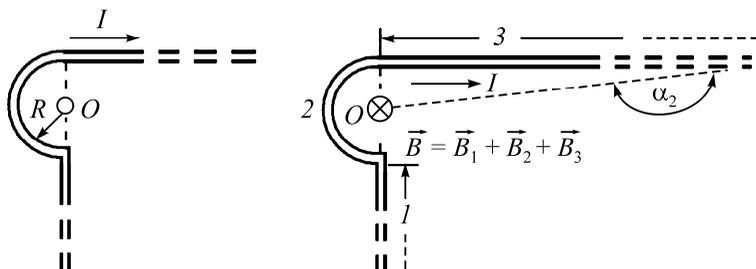
$$\cos\alpha_1 = \frac{l}{2\sqrt{\left(\frac{l}{2}\right)^2 + r_0^2}} = \frac{l}{\sqrt{4r_0^2 + l^2}}.$$

Подставив выражение $\cos\alpha_1$ в формулу (5), получим

$$B = \frac{\mu_0 I}{2\pi r_0} \frac{l}{\sqrt{4r_0^2 + l^2}}. \quad (6)$$

Произведя вычисления по формуле (6), получим $B = 26,7$ мкТл.

№ 2. Бесконечно длинный провод изогнут так, как изображено на рисунке. Радиус R дуги окружности равен 10 см. Определить индукцию \vec{B} магнитного поля, создаваемого в точке O током $I = 80$ А, текущим по этому проводу.



Решение.

Магнитную индукцию \vec{B} в точке O найдем, используя принцип суперпозиции магнитных полей $\vec{B} = \sum \vec{B}_i$.

В нашем случае провод можно разбить на три части: два прямолинейных провода (1 и 3), одним концом уходящие в бесконечность, и дугу полуокружности (2) радиусом R . Тогда $\vec{B} = \vec{B}_1 + \vec{B}_2 + \vec{B}_3$, где \vec{B}_1 , \vec{B}_2 и \vec{B}_3 – индукции магнитных полей в точке O , создаваемые током первого, второго и третьего участков провода.

Поскольку точка O лежит на оси провода 1, $\vec{B}_1 = 0$, и тогда $\vec{B} = \vec{B}_2 + \vec{B}_3$. Учитывая, что векторы \vec{B}_2 и \vec{B}_3 направлены в соответствии с правилом буравчика перпендикулярно плоскости чертежа от нас, геометрическое суммирование можно заменить алгебраическим: $B = B_2 + B_3$.

Магнитную индукцию B_2 найдем, воспользовавшись выражением для магнитной индукции в центре кругового тока

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

В нашем случае магнитное поле в точке O создается лишь половиной кругового тока, поэтому $B_2 = \frac{\mu_0 I}{4R}$.

Магнитную индукцию B_3 найдем, применив соотношение (4) (пример 1): $B_3 = \frac{\mu_0 I}{4\pi r_0} (\cos\alpha_1 - \cos\alpha_2)$.

В нашем случае $r_0 = R$, $\alpha_1 = \pi/2$ ($\cos\alpha_1 = 0$), $\alpha_2 \rightarrow \pi$ ($\cos\alpha_2 = -1$). Тогда $B_3 = \frac{\mu_0 I}{4\pi R}$.

Используя найденные выражения, получим $B = B_2 + B_3 = \frac{\mu_0 I}{4R} + \frac{\mu_0 I}{4\pi R}$, следовательно, $B = \frac{\mu_0 I}{4\pi R} (\pi + 1)$.

Произведем вычисления:

$$B = \frac{4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 80}{4\pi \cdot 0,1} (\pi + 1) = 3,31 \cdot 10^{-4} \text{ Тл.}$$

№ 3. По двум бесконечным параллельным прямым проводам, находящимся на расстоянии $d = 20$ см друг от друга, текут одинаковые токи $I = 1$ кА. Вычислить силу взаимодействия токов, приходящуюся на 1 м длины проводника.

Р е ш е н и е.

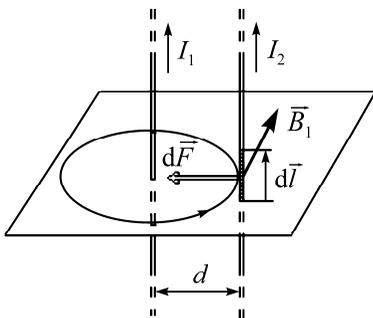
Взаимодействие двух проводов, по которым текут токи, осуществляется через магнитное поле. Каждый ток создает магнитное поле, которое действует на другой провод.

Предположим, что оба тока (обозначим их I_1 и I_2) текут в одном направлении. Ток I_1 создает в месте расположения второго провода (с током I_2) магнитное поле, направление вектора

магнитной индукции \vec{B}_1 определяется по правилу буравчика. Модуль магнитной индукции B_1 задается соотношением

$$B_1 = \frac{\mu_0 I}{2\pi d}. \quad (1)$$

Согласно закону Ампера на каждый элемент $d\vec{l}$ второго провода действует в магнитном поле сила $dF = I_2 B_1 dl \sin \alpha$. Поскольку вектор $d\vec{l}$ перпендикулярен вектору \vec{B} , $\sin \alpha = 1$, и тогда $dF = I_2 B_1 dl$. Подставив в это выражение значение B_1 , получим



чим

$$dF = \frac{\mu_0 I_1 I_2}{2\pi d} dl.$$

Силу F взаимодействия токов найдем интегрированием:

$$F = \frac{\mu_0 I_1 I_2}{2\pi d} \int_0^l dl = \frac{\mu_0 I_1 I_2}{2\pi d} l.$$

Учитывая, что $I_1 = I_2 = I$, получим

$$F = \frac{\mu_0 I^2 l}{2\pi d}.$$

Произведем вычисления:

$$F = \frac{4\pi \cdot 10^{-7} \cdot (10^3)^2 \cdot 1}{2\pi \cdot 0,2} = 1 \text{ Н.}$$

Сила \vec{F} сонаправлена с силой $d\vec{F}$, а направление $d\vec{F}$ определяется правилом левой руки.

№ 4. Протон, прошедший ускоряющую разность потенциалов $U = 600 \text{ В}$, влетел в однородное магнитное поле с индукцией $B = 0,3 \text{ Тл}$ и начал двигаться по окружности. Вычислить радиус R окружности.

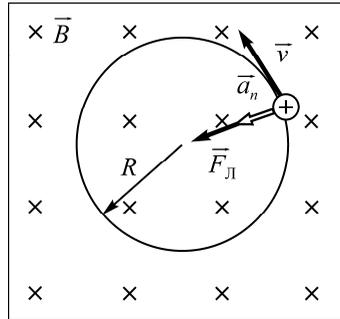
Решение.

Движение заряженной частицы в однородном магнитном поле будет происходить по окружности только в том случае, если частица влетит в магнитное поле перпендикулярно линиям индукции: $\vec{v} \perp \vec{B}$. Поскольку сила Лоренца перпендикулярна вектору \vec{v} , она сообщает частице (протону) нормальное ускорение \vec{a}_n .

Согласно второму закону Ньютона

$$\vec{F}_L = m\vec{a}_n, \quad (1)$$

где m – масса протона. На рисунке совмещена траектория протона с плоскостью чертежа и дано (произвольно) направление вектора скорости \vec{v} . Силу Лоренца направим перпендикулярно вектору \vec{v} к центру окружности (векторы \vec{a}_n и \vec{F}_L сонаправлены).



Используя правило левой руки, определим направление магнитных силовых линий (направление вектора \vec{B}).

Перепишем выражение (1) в скалярной форме (в проекции на радиус):

$$F_L = ma_n. \quad (2)$$

В скалярной форме $F_L = qvB\sin\alpha$. В нашем случае $\vec{v} \perp \vec{B}$ и $\sin\alpha = 1$, тогда $F_L = qvB$. Поскольку нормальное ускорение $a_n = v^2/R$, выражение (2) перепишем следующим образом: $qvB = mv^2/R$. Отсюда выразим радиус окружности:

$$R = mv/(qB). \quad (3)$$

Скорость протона найдем, воспользовавшись связью между работой сил электрического поля и изменением кинетической энергии протона, т.е. $A = \Delta W$, или $q(\varphi_1 - \varphi_2) = W_2 - W_1$, где $(\varphi_1 - \varphi_2) = U$ – ускоряющая разность потенциалов (или уско-

ряющее напряжение); W_1 и W_2 – начальная и конечная кинетические энергии протона.

Пренебрегая начальной кинетической энергией протона $W_1 \approx 0$ и учитывая, что $W_k = mv^2/2$, получим $qU = mv^2/2$.

Найдем из этого выражения скорость $v = \sqrt{\frac{2qU}{m}}$ и подставим ее в формулу (3), в результате получим

$$R = \frac{1}{B} \sqrt{\frac{2mU}{q}}. \quad (4)$$

Произведем вычисления:

$$R = \frac{1}{0,3} \sqrt{\frac{2 \cdot 1,67 \cdot 10^{-27} \cdot 600}{1,6 \cdot 10^{-19}}} = 0,0118 \text{ м.}$$

№ 5. Электрон, влетев в однородное магнитное поле ($B = 0,2$ Тл), стал двигаться по окружности радиусом $R = 5$ см. Определить магнитный момент p_m эквивалентного кругового тока.

Решение.

Электрон начинает двигаться по окружности, если он влетает в однородное магнитное поле перпендикулярно линиям магнитной индукции.

Движение электрона по окружности эквивалентно току, который в данном случае определяется выражением $I_{\text{эkv}} = \frac{q}{\Delta t} = \frac{e}{T}$, где e – заряд электрона; T – период его обращения.

Период обращения можно найти через скорость электрона и путь, проходимый электроном за период $T = (2\pi R)/v$. Тогда

$$I_{\text{эkv}} = \frac{ev}{2\pi R}. \quad (1)$$

По определению магнитный момент контура с током выражается соотношением

$$p_m = I_{\text{экв}} S, \quad (2)$$

где S – площадь, ограниченная окружностью, описываемой электроном,

$$S = \pi R^2. \quad (3)$$

Учитывая выражения (1), (2) и (3), получим

$$p_m = \frac{ev}{2\pi R} \pi R^2, \text{ или } p_m = \frac{1}{2} evR. \quad (4)$$

Известно, что $R = mv/(eB)$ (см. пример 4). Тогда для скорости v электрона находим $v = \frac{eBR}{m}$. Подставив это выражение

в формулу (4) для магнитного момента p_m электрона получим

$$p_m = \frac{e^2 BR^2}{2m}.$$

Произведем вычисления:

$$p_m = \frac{(1,6 \cdot 10^{-19}) \cdot 0,2 \cdot (0,05)^2}{2 \cdot 9,1 \cdot 10^{-31}} = 7,03 \cdot 10^{-12} \text{ А} \cdot \text{м}^2.$$

№ 6. На железный стержень длиной 50 см и сечением 2 см² намотан в один слой провод так, что на каждый сантиметр длины стержня приходится 20 витков. Определить энергию магнитного поля в сердечнике соленоида, если сила тока в обмотке 0,5 А.

Р е ш е н и е.

Энергия магнитного поля соленоида с индуктивностью L , по обмотке которого течет ток I , выражается формулой

$$W = \frac{1}{2} LI^2.$$

Индуктивность соленоида зависит от числа витков на единицу длины n , от объема сердечника V и от магнитной проницаемости μ сердечника, т.е. $L = \mu \mu_0 n^2 V$, где μ_0 – магнитная постоянная.

Магнитную проницаемость можно выразить следующей формулой: $\mu = \frac{B}{\mu_0 H}$, где B – индукция магнитного поля; H – напряженность.

Подставив в формулу энергии магнитного поля выражение индуктивности L и магнитной проницаемости, получим

$$W = \frac{1}{2} \frac{B}{H} n^2 V I^2.$$

Объем сердечника выразим через длину l и сечение S :

$$W = \frac{1}{2} \frac{B}{H} n^2 I^2 S l.$$

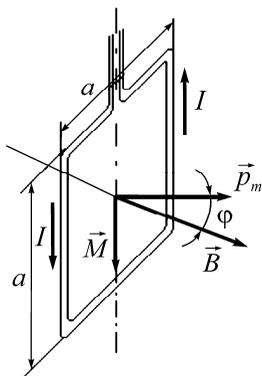
Напряженность магнитного поля найдем по формуле $H = nI$.

Подставив данные в единицах СИ, получим $H = 2 \cdot 10^3 \cdot 0,5 \text{ А/м} = 10^3 \text{ А/м}$.

Значению напряженности намагничивающего поля в 10^3 А/м в железе соответствует индукция $B = 1,3 \text{ Тл}$ (см. график зависимости между H и B в приложении).

Произведем вычисления:

$$W = \frac{1}{2} \cdot \frac{1,3}{10^3} (2 \cdot 10^3)^2 \cdot 0,5^2 \cdot 2 \cdot 10^{-4} \cdot 0,5 = 0,065 \text{ Дж}.$$



№ 7. Плоский квадратный контур со стороной $a = 10 \text{ см}$, по которому течет ток $I = 100 \text{ А}$, свободно установился в однородном магнитном поле ($B = 1 \text{ Тл}$). Определить работу A , совершаемую внешними силами при повороте контура относительно оси, проходящей через середины его противоположных сторон, на угол $\varphi = 90^\circ$. При повороте контура сила тока в нем поддерживается неизменной.

Р е ш е н и е.

На контур с током в магнитном поле действует момент силы

$$M = p_m B \sin \varphi, \quad (1)$$

где p_m – магнитный момент контура, $p_m = I \cdot S = I \cdot a^2$; B – индукция магнитного поля; φ – угол между вектором \vec{p}_m (направлен по нормали к контуру) и вектором \vec{B} .

По условию задачи в начальном положении контур свободно установился в магнитном поле. При этом момент силы равен нулю ($M = 0$), а значит, угол $\varphi = 0$, т.е. векторы \vec{p}_m и \vec{B} сонаправлены. Если внешние силы выведут контур из положения равновесия, то возникший момент сил будет стремиться вернуть контур в исходное положение. Против этого момента и будет совершаться работа внешними силами. Поскольку момент сил переменный (зависит от угла поворота φ), для подсчета работы применим формулу работы в дифференциальной форме $dA = M d\varphi$. Учитывая формулу (1), получаем $dA = IBa^2 \sin\varphi d\varphi$.

Взяв интеграл от этого выражения, найдем работу при повороте на конечный угол $A = IBa^2 \int_0^{\varphi} \sin\varphi d\varphi$. Работа при повороте на угол $\varphi = 90^\circ$

$$A = IBa^2 \int_0^{\pi/2} \sin\varphi d\varphi = IBa^2 (-\cos\varphi) \Big|_0^{\pi/2} = IBa^2. \quad (2)$$

Произведем вычисления: $A = 100 \cdot 1 \cdot (0,1)^2 = 1$ Дж.

Глава 4. ОПТИКА. АТОМНАЯ И ЯДЕРНАЯ ФИЗИКА

4.1. Геометрическая оптика

Здесь можно выделить следующие типы задач: задачи на отражение света, задачи на преломление света и задачи на линзы.

Первую группу составляют задачи на построение изображения в плоском зеркале с использованием закона отражения. При построении изображения предмета в плоском зеркале следует помнить, что все лучи, исходящие из какой-либо точки предмета A , после отражения от зеркала пойдут так, что их продолжения будут пересекаться за зеркалом в одной и той же точке A^1 , которая является мнимым изображением точки A . В результате изображение предмета получается прямым, мнимым, равным по величине самому предмету, расположенному симметрично с ним по отношению к плоскости зеркала.

Задачи *второй группы* сравнительно просты. Их решают на основании формулы закона преломления с использованием геометрии и тригонометрии. При решении задачи прежде всего надо сделать чертеж, где следует указать ход лучей, идущих из одной среды в другую. Перед тем как чертить преломленный луч, необходимо установить, переходит ли он из оптически менее плотной среды в более плотную или наоборот. В зависимости от этого луч отклоняется от своего начального направления или приближаясь к нормали в точке падения, или удаляясь от нее. После того как сделан чертеж, нужно записать формулу закона преломления для каждого перехода луча из одной среды в другую и составить вспомогательные уравнения, связывающие углы и расстояния, используемые в задаче.

Задачи *третьей группы* – на построение изображения в одиночных линзах и расчеты, связанные с этим изображением, – решаются почти так же, как и задачи на зеркала. Для каждого положения предмета нужно построить изображение, отметить

характерные точки линзы (F и $2F$), расстояния от линзы до предмета и его изображения (d и f) и записать формулу линзы и формулу увеличения, связывающие расстояния d , f и F . Добавив к основным уравнениям вспомогательные (обычно они устанавливают дополнительные связи между расстоянием от линзы до предмета и изображения), нужно решить полученную систему уравнений.

Основные формулы

1. Отношение синуса угла падения α к синусу угла преломления β для данной пары веществ есть величина постоянная, называемая относительным показателем преломления второго вещества относительно первого:

$$n_{21} = \frac{\sin \alpha}{\sin \beta}.$$

Абсолютным показателем преломления какого-либо вещества называется показатель преломления этого вещества по отношению к вакууму или воздуху.

Относительный показатель преломления второго вещества относительно первого n_{21} равен отношению абсолютных показателей преломления этих веществ:

$$n_{21} = \frac{n_2}{n_1}.$$

Если луч света переходит из оптически более плотного вещества (n_1) в оптически менее плотное ($n_2 < n_1$), то при некотором предельном значении угла падения $\alpha_{\text{пред}}$ угол преломления становится равным 90° , преломленный луч исчезает, а падающий испытывает полное отражение. Предельный угол определяется из формулы

$$\sin \alpha_{\text{пред}} = \frac{n_2}{n_1}, \text{ где } n_2 < n_1.$$

2. Формула тонкой линзы

$$\frac{1}{d} + \frac{1}{f} = \frac{1}{F} \text{ (собирающая линза),}$$

$$\frac{1}{d} - \frac{1}{f} = -\frac{1}{F} \text{ (рассеивающая линза),}$$

где d – расстояние от предмета до линзы; f – расстояние от линзы до изображения; F – фокусное расстояние линзы.

Оптическая сила линзы

$$D = \frac{1}{F}.$$

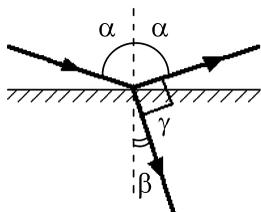
Линейное увеличение предмета – это отношение размера изображения H к размеру предмета h :

$$\Gamma = \frac{H}{h} = \frac{f}{d} = \frac{F}{d - F}.$$

Примеры решения задач

№ 1. На стеклянную пластинку, показатель преломления которой 1,5, падает луч света. Найти угол падения луча, если угол между отраженным и преломленным лучами 90° .

Р е ш е н и е.



Из рисунка видно, что $\alpha + \beta + \gamma = \pi$, откуда $\beta = \pi - \gamma - \alpha = \pi/2 - \alpha$, тогда по

закону преломления $\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = n$. Но $\sin \beta =$

$= \sin(\pi/2 - \alpha) = \cos \alpha$, тогда $\frac{\sin \alpha}{\cos \alpha} = n$ или

$\operatorname{tg} \alpha = n$, откуда $\alpha = \operatorname{arctg} n = 0,98$ рад.

№ 2. В фокусе рассеивающей линзы установлен предмет высотой 5 см. На каком расстоянии от линзы находится изобра-

жение? Определите размеры изображения. Фокусное расстояние линзы 10 см.

Решение.

Для рассеивающей линзы формула тонкой линзы имеет вид

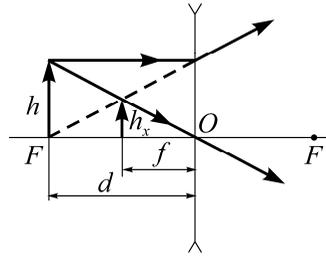
$$\frac{1}{d} - \frac{1}{f} = -\frac{1}{F},$$

где $d = F$, откуда находим расстояние мнимого изображения от линзы

$$f = \frac{F}{2} = 0,05 \text{ м.}$$

Увеличение $\Gamma = \frac{f}{d} = \frac{h_x}{h}$, откуда

$$h_x = \frac{hf}{d} = \frac{0,05 \cdot 0,05}{0,1} = 0,025 \text{ м.}$$



4.2. Волновая оптика

Волновой оптикой называют раздел физики, в котором изучаются оптические явления на основе представления о свете как электромагнитной волне. Основной задачей волновой оптики является установление закономерностей распространения световых волн в прозрачных средах и взаимодействия света с веществом. Волновой характер света проявляется в таких физических явлениях, как интерференция, дифракция и поляризация.

Задачи на *интерференцию света* делятся в основном на две группы: задачи, связанные с интерференцией волн от двух когерентных источников, и задачи на интерференцию в тонких пленках.

Если когерентные источники образуются путем деления одного и того же источника на два (с помощью зеркал, призм или как-либо еще), то предварительно нужно определить положение этих источников друг относительно друга и относительно

экрана. Для этого следует воспользоваться законами геометрической оптики. Далее если положения источников света известны, то координаты максимумов и минимумов интерференционной картины на экране можно найти следующим образом:

- ввести систему координат и выбрать произвольную точку на экране;

- провести в эту точку лучи от обоих источников;

- из геометрических соображений найти пути l_1 и l_2 волн, распространяющихся вдоль этих лучей, выразив их через координаты точки на экране и расстояние до экрана;

- найти оптические пути n_1l_1 и n_2l_2 волн;

- найти оптическую разность хода волн;

- если требуется определить координаты максимумов, то полученную оптическую разность хода следует приравнять к величине, равной целому числу длин волн (или четному числу длин полуволн); если требуется определить координаты минимумов, то разность хода лучей следует приравнять величине, равной нечетному числу длин полуволн;

- найти координаты максимумов и минимумов интерференционной картины, расстояние между интерференционными полосами и ширину интерференционных полос.

При интерференции в тонких пленках оптическая разность хода интерферирующих волн возникает за счет дополнительного расстояния, пройденного одной из них. В таких задачах следует учитывать, что одна из интерферирующих волн отражается от границы раздела сред. Если отражение происходит от среды с показателем преломления большим, чем среда, в которой распространяется свет, то фаза отраженной волны изменится на π радиан, что соответствует оптическому пути, равному $\pm \lambda/2$. Если отражение света происходит от среды с меньшим показателем преломления, то фаза отраженной волны не меняется.

Задачи на *дифракцию* также делятся на две группы соответственно двум видам дифракции – дифракции Френеля и дифракции Фраунгофера.

Для решения задач на дифракцию Френеля (или дифракцию в расходящихся лучах) необходимо освоить метод зон Френеля, позволяющий путем геометрических построений установить закономерности распределения интенсивности волны на круглом отверстии или круглом диске.

Большинство задач на дифракцию Фраунгофера (или дифракцию в параллельных лучах) связано с дифракционной решеткой – совокупностью большого числа щелей одинаковой ширины, разделенных одинаковыми по ширине непрозрачными промежутками. Из основной формулы дифракционной решетки $d \sin \varphi = \pm k \lambda$ можно сделать три вывода: 1) число главных максимумов ограничено, и наибольшее значение k определяется условием $k_{\max} = d/\lambda$, так как значение синуса не может превышать единицы; 2) дифракционная картина является симметричной относительно первичного луча, проходящего через главный фокус линзы; 3) положения главных максимумов, за исключением только центрального максимума ($k = 0$), зависят от длины волны света. Из последнего вывода следует, что дифракционная решетка обладает способностью разлагать падающий на нее свет по длинам волн. Если, к примеру, на решетку падает белый свет, то все дифракционные максимумы, кроме нулевого, будут окрашены, т.е. разложатся в спектр, причем фиолетовый участок спектра будет располагаться ближе к центру дифракционной картины, а красный участок окажется дальше от ее центра.

Задачи на *поляризацию* в методическом плане не представляют особой трудности. Достаточно хорошо разобраться с природой поляризованного света и двумя законами – законом Малюса и законом Брюстера.

Основные формулы

Интерференция света

1. Скорость света в среде $v = \frac{c}{n}$, где c – скорость света в вакууме; n – показатель преломления среды.

2. Оптическая длина пути луча $L = nl$, где l – геометрическая длина пути луча в среде с показателем преломления n .

3. Если один луч проходит путь длиной l_1 в среде с показателем преломления n_1 , а другой луч – путь l_2 в среде с показателем преломления n_2 , то оптическая разность хода этих лучей $\Delta = n_1 l_1 - n_2 l_2$.

4. Разность фаз колебаний $\Delta\varphi$ связана с оптической разностью хода Δ интерферирующих волн соотношением $\Delta\varphi = 2\pi \frac{\Delta}{\lambda}$, где λ – длина световой волны в вакууме.

5. Условие максимального усиления света в результате интерференции $\Delta = \pm k\lambda$ ($k = 0, 1, 2, \dots$).

Условие максимального ослабления света

$$\Delta = \pm(2k + 1)\lambda/2 \quad (k = 0, 1, 2, \dots).$$

Дифракция света

6. Радиусы зон Френеля в случае плоского волнового фронта $r_k = \sqrt{kr_0\lambda}$, где r_k – радиус зоны, k – номер зоны ($k = 1, 2, \dots$); r_0 – расстояние от круглого отверстия в непрозрачном экране до точки наблюдения, расположенной на оси отверстия; λ – длина световой волны.

7. При дифракции параллельного пучка лучей монохроматического света на одной узкой длинной щели:

а) направления, в которых амплитуда колебаний дифрагированных лучей минимальна, определяются из условия $a \sin\varphi = \pm 2k \frac{\lambda}{2} = \pm k\lambda$ ($k = 1, 2, 3, \dots$), где a – ширина щели;

φ – угол отклонения лучей от нормали к плоскости щели, определяющий направление на дифракционный минимум; k – порядковый номер минимума; λ – длина световой волны;

б) направления, по которым амплитуда колебаний дифрагированных лучей после их интерференции максимальна, определяются по формуле $a \sin \varphi' = \pm (2k + 1) \frac{\lambda}{2}$ ($k = 1, 2, 3, \dots$).

8. При дифракции на плоской дифракционной решетке направления, в которых наблюдаются максимумы света, определяются из условия $(a + b) \sin \varphi = \pm k\lambda$ ($k = 0, 1, 2, \dots$), где a – ширина прозрачной полоски (щели); b – ширина непрозрачного штриха; d – период решетки (или постоянная решетки), $d = (a + b)$; φ – угол между нормалью к поверхности решетки и направлением дифрагированных лучей; k – порядковый номер дифракционного максимума.

9. Разрешающая сила дифракционной решетки $R = \frac{\lambda}{\Delta\lambda}$, где $\Delta\lambda$ – наименьшая разность длин волн двух соседних спектральных линий (λ и $\lambda + \Delta\lambda$), при которой эти линии могут быть видны раздельно в спектре, полученном посредством данной решетки.

Разрешающая сила R решетки тем больше, чем больше штрихов решетка содержит и чем больше порядковый номер дифракционного максимума: $R = kN$, где N – полное число штрихов решетки.

10. Угловая дисперсия решетки $D = \frac{d\varphi}{d\lambda} = \frac{k}{(a + b) \cos \varphi}$.

При дифракции рентгеновских лучей на кристаллической решетке направления, в которых имеет место зеркальное отражение (дифракционный максимум), определяются из уравнения Вульфа–Брэггов $2d \sin \theta = k\lambda$, где d – расстояние между атомными плоскостями кристалла; θ – угол скольжения (угол между направлением пучка параллельных рентгеновских лучей, падающих на кристалл, и гранью кристалла).

Поляризация света

11. Закон Брюстера. Луч, отраженный от поверхности диэлектрика, максимально поляризован, если тангенс угла падения α луча на поверхность раздела двух сред равен относительному показателю преломления n_{21} второй среды относительно первой: $\operatorname{tg}\alpha_{\text{Бр}} = n_{21}$. Закон Брюстера неприменим в случае отражения от поверхности проводников.

12. Закон Малюса. Интенсивность I_2 плоскополяризованного света, прошедшего через анализатор, прямо пропорциональна квадрату косинуса угла α между направлением колебаний света, падающего на анализатор, и направлением колебаний, которые анализатор пропускает без ослабления: $I_2 = I_1 \cos^2 \alpha$, где I_1 – интенсивность света, падающего на анализатор.

13. Вращение плоскости поляризации. Угол поворота плоскости поляризации монохроматического света:

а) в твердых телах $\varphi = \alpha d$, где α – постоянная вращения; d – толщина пластинки, вырезанной из твердого тела;

б) в чистых жидкостях $\varphi = [\alpha] \rho l$, где $[\alpha]$ – удельное вращение; ρ – плотность жидкости; l – длина столбика жидкости;

в) в растворах $\varphi = [\alpha] Cl$, где C – концентрация раствора (масса активного вещества в единице объема раствора).

Примеры решения задач

№ 1. От двух когерентных источников S_1 и S_2 ($\lambda = 0,8$ мкм) лучи попадают 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 d_{\min} пленки это возможно?

Решение.

Изменение интерференционной картины на противоположную означает, что на тех участках, где наблюдались интерференционные максимумы, стали наблюдаться интерференцион-

ные минимумы. Такой сдвиг интерференционной картины возможен при изменении оптической разности хода лучей на нечетное число половин длин волн, т.е.

$$\Delta_2 - \Delta_1 = (2k + 1) \frac{\lambda}{2}, \quad (1)$$

где Δ_1 – оптическая разность хода лучей до внесения пленки; Δ_2 – оптическая разность хода тех же лучей после внесения пленки; $k = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$.

Наименьшей толщине d_{\min} пленки соответствует $k = 0$. При этом формула (1) примет вид

$$\Delta_2 - \Delta_1 = \frac{\lambda}{2}. \quad (2)$$

Выразим оптические разности хода Δ_2 и Δ_1 . Из рисунка следует: $\Delta_1 = l_1 - l_2$, $\Delta_2 = [(l_1 - d_{\min}) + nd_{\min}] - l_2 = (l_1 - l_2) + d_{\min}(n - 1)$. Подставим выражения Δ_2 и Δ_1 в формулу (2):

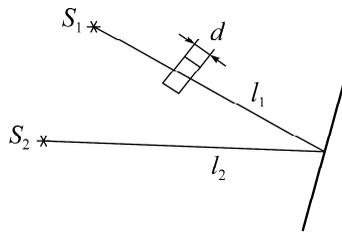
$$(l_1 - l_2) + d_{\min}(n - 1) - (l_1 - l_2) = \frac{\lambda}{2}, \text{ или } d_{\min}(n - 1) = \frac{\lambda}{2}.$$

Отсюда $d_{\min} = \frac{\lambda}{2(n-1)}$. Подставив числовые значения,

найдем

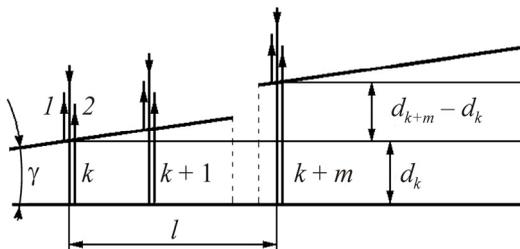
$$d_{\min} = \frac{0,8}{2(1,33-1)} = 1,21 \text{ мкм.}$$

№ 2. На стеклянный клин с малым углом нормально к его грани падает параллельный пучок лучей монохроматического света с длиной волны $\lambda = 0,6$ мкм. Число m возникающих при этом интерференционных полос, приходящихся на 1 см, равно 10. Определить угол клина α . Показатель преломления стекла $n = 1,5$.



Р е ш е н и е.

Лучи, падая нормально к грани клина, отражаются как от верхней, так и от нижней грани. Эти лучи когерентны, поэтому на поверхности клина будут наблюдаться интерференционные полосы. Поскольку угол клина мал, то отраженные лучи 1 и 2 (рисунок) будут практически параллельны.



Темные полосы видны на тех участках клина, для которых разность хода лучей кратна нечетному числу половин длин волн:

$$\Delta = (2k + 1) \frac{\lambda}{2} \quad (k = 0, \pm 1, \pm 2, \dots). \quad (1)$$

Разность хода Δ двух лучей складывается из разности оптических длин путей ($2dncos\beta$) этих лучей и половины длины волны $\lambda/2$. Величина $\lambda/2$ представляет собой добавочную разность хода, возникшую при отражении луча 1 от оптически более плотной среды. Подставляя в формулу (1) значение разности хода Δ лучей, получим

$$2d_k n \cos\beta + \lambda/2 = (2k + 1)\lambda/2, \quad (2)$$

где d_k – толщина клина в том месте, где наблюдается темная полоса, соответствующая номеру k ; β – угол преломления второго луча.

Согласно условию угол падения равен нулю, следовательно, и угол преломления β равен нулю, а $\cos\beta = 1$. Раскрыв скобки в правой части равенства (2), после упрощения получим

$$2d_k n = k\lambda. \quad (3)$$

Пусть произвольной темной полосе k -го номера соответствует толщина d_k клина, а темной полосе $(k + m)$ -го номера – толщина d_{k+m} клина. Тогда из рисунка, учитывая, что m полос укладывается на расстоянии l , найдем

$$\operatorname{tg} \gamma = \sin \gamma = \frac{d_{k+m} - d_k}{l}. \quad (4)$$

Выразим из формулы (3) d_k и d_{k+m} и подставим их в формулу (4). Затем, учитывая, что из-за малости угла γ $\sin \gamma \approx \gamma$, получим

$$\gamma = \frac{\frac{k+m}{2n} \lambda - \frac{k}{2n} \lambda}{l} = \frac{m \lambda}{2nl}.$$

Подставляя числовые значения физических величин, найдем

$$\gamma = \frac{10 \cdot 0,6 \cdot 10^{-6}}{2 \cdot 1,5 \cdot 10^{-2}} = 2 \cdot 10^{-4} \text{ рад.}$$

№ 3. На дифракционную решетку нормально к ее поверхности падает монохроматический свет. Период решетки $d = 2$ мкм. Какого наибольшего порядка дифракционный максимум дает эта решетка в случае красного ($\lambda_1 = 0,7$ мкм) и в случае фиолетового ($\lambda_2 = 0,41$ мкм) света?

Р е ш е н и е.

На основании известной формулы дифракционной решетки напишем выражение порядка дифракционного максимума

$$m = \frac{d \sin \varphi}{\lambda}, \quad (1)$$

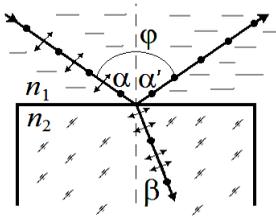
где d – период решетки; φ – угол между направлением на дифракционный максимум и нормалью к решетке; λ – длина волны монохроматического света. Поскольку $\sin \varphi$ не может быть больше 1, то, как следует из формулы (1), число m не может быть больше d/λ , т.е.

$$m \leq d/\lambda. \quad (2)$$

Подставив в формулу (2) числовые значения, получим: для красных лучей $m \leq 2/0,7 = 2,86$; для фиолетовых лучей $m \leq 2/0,41 = 4,88$.

Если учесть, что порядок максимумов является целым числом, то для красного света $m_{\max} = 2$ и для фиолетового $m_{\max} = 4$.

№ 4. Естественный луч света падает на полированную поверхность стеклянной пластины, погруженной в жидкость. Отраженный от пластины луч образует угол $\varphi = 97^\circ$ с падающим лучом (рисунок). Определить показатель преломления n_1 жидкости, если отраженный свет максимально поляризован.



Р е ш е н и е.

Согласно закону Брюстера луч света, отраженный от диэлектрика, максимально поляризован в том случае, если тангенс угла падения численно равен относительному показателю преломления: $\operatorname{tg}\alpha = n_{21}$, где n_{21} – показатель преломления второй среды (стекла) относительно первой (жидкости).

Относительный показатель преломления равен отношению абсолютных показателей преломления. Следовательно, $\operatorname{tg}\alpha = n_2/n_1$. Поскольку угол падения равен углу отражения, то

$$\alpha = \varphi/2, \text{ и, следовательно, } \operatorname{tg}\varphi/2 = n_2/n_1, \text{ откуда } n_1 = \frac{n_2}{\operatorname{tg}\varphi/2}.$$

Подставив числовые значения, получим

$$n_1 = \frac{1,5}{\operatorname{tg}\frac{97^\circ}{2}} = \frac{1,5}{1,13} = 1,33.$$

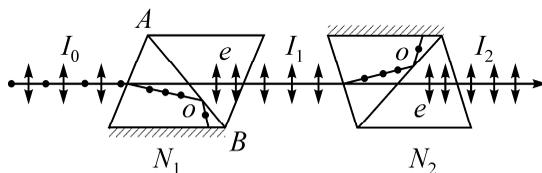
№ 5. Два николя N_1 и N_2 расположены так, что угол между их плоскостями пропускания составляет $\alpha = 60^\circ$. Определить, во

сколько раз уменьшится интенсивность I_0 естественного света: 1) при прохождении через один николю N_1 ; 2) при прохождении через оба николя. Коэффициент поглощения света в николе $k = 0,05$. Потери на отражение света не учитывать.

Р е ш е н и е.

1. Естественный свет, падая на грань призмы николя (рисунок), расщепляется вследствие двойного лучепреломления на два луча: обыкновенный и необыкновенный. Оба луча одинаковы по интенсивности и полностью поляризованы. Плоскость колебаний необыкновенного луча лежит в плоскости чертежа (плоскость главного сечения). Плоскость колебаний обыкновенного луча перпендикулярна плоскости чертежа. Обыкновенный луч o вследствие полного внутреннего отражения от границы AB отбрасывается на зачерненную поверхность призмы и поглощается ею. Необыкновенный луч e проходит через призму, уменьшая свою интенсивность вследствие поглощения:

$$I_1 = \frac{1}{2} I_0 (1 - k).$$



Относительное уменьшение интенсивности света получим, разделив интенсивность I_0 естественного света, падающего на первый николю, на интенсивность I_1 поляризованного света:

$$\frac{I_0}{I_1} = \frac{I_0}{\frac{1}{2} I_0 (1 - k)} = \frac{2}{1 - k}.$$

Подставив в это выражение числовые значения, найдем

$$\frac{I_0}{I_1} = \frac{2}{1 - 0,05} = 2,1.$$

Таким образом, интенсивность уменьшается в 2,1 раза.

2. Плоскополяризованный луч света с интенсивностью I_1 падает на второй николю N_2 и также расщепляется на два луча различной интенсивности: обыкновенный и необыкновенный. Обыкновенный луч полностью поглощается призмой, поэтому интенсивность его нас не интересует. Интенсивность необыкновенного луча I_2 , вышедшего из призмы N_2 , определяется законом Малюса (без учета поглощения света во втором николе): $I_2 = I_1 \cos^2 \alpha$, где α – угол между плоскостью колебаний в поляризованном луче и плоскостью пропускания николя N_2 .

Учитывая потери интенсивности на поглощение во втором николе, получим $I_2 = I_1(1 - k) \cos^2 \alpha$.

Искомое уменьшение интенсивности при прохождении света через оба николя найдем, разделив интенсивность I_0 естественного света на интенсивность I_2 света, прошедшего систему

из двух николей:
$$\frac{I_0}{I_2} = \frac{I_0}{I_1(1 - k) \cos^2 \alpha}.$$

Заменяя отношение I_0/I_1 его выражением по формуле относительного уменьшения интенсивности, получим

$$\frac{I_0}{I_2} = \frac{2}{(1 - k)^2 \cos^2 \alpha}.$$

Подставляя данные, произведем вычисления:

ления:

$$\frac{I_0}{I_2} = \frac{2}{(1 - 0,05)^2 \cos^2 60^\circ} = 8,86.$$

Таким образом, после прохождения света через два николя интенсивность его уменьшится в 8,86 раза.

№ 6. Плоскополяризованный монохроматический луч света падает на поляроид и полностью им гасится. Когда на пути луча поместили кварцевую пластину, интенсивность I луча света после поляроида стала равна половине интенсивности луча, падающего на поляроид. Определить минимальную толщину

кварцевой пластины. Поглощением и отражением света поляридом пренебречь, постоянную вращения кварца α принять равной 48,9 град/мм.

Р е ш е н и е.

Полное гашение света поляридом означает, что плоскость пропускания полярида (пунктирная линия на рисунке) перпендикулярна плоскости колебаний (I–I) плоскополяризованного света, падающего на него. Введение кварцевой пластины приводит к повороту плоскости колебания света на угол

$$\varphi = \alpha l, \quad (1)$$

где l – толщина пластины.

Зная, во сколько раз уменьшится интенсивность света при прохождении его через поляриод, определим угол β , который установится между плоскостью пропускания поляриода и новым направлением (II–II) плоскости колебаний падающего на поляриод плоскополяризованного света. Для этого воспользуемся законом Малюса: $I = I_0 \cos^2 \beta$.

Заметив, что $\beta = \pi/2 - \varphi$, можно написать $I = I_0 \cos^2(\pi/2 - \varphi)$, или

$$I = I_0 \sin^2 \varphi. \quad (2)$$

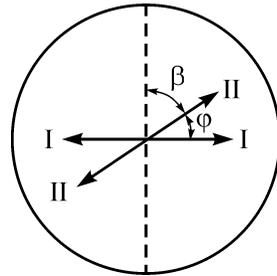
Из равенства (2) с учетом выражения (1) получим

$$\alpha l = \arcsin \sqrt{\frac{I}{I_0}}, \quad \text{откуда} \quad \text{искомая} \quad \text{толщина} \quad \text{пластины}$$

$$l = \frac{1}{\alpha} \arcsin \sqrt{\frac{I}{I_0}}. \quad \text{Подставим числовые значения и произведем}$$

вычисления (во внесистемных единицах):

$$l = \frac{1}{48,9} \arcsin \sqrt{\frac{1}{2}} = \frac{45}{48,9} \text{ мм} = 0,92 \text{ мм}.$$



4.3. Квантовая оптика

Квантовой оптикой называют раздел физики, в котором изучаются оптические явления на основе представления о свете как потоке частиц. Согласно теории М. Планка, в дальнейшем развитой А. Эйнштейном, излучение и поглощение света веществом происходит конечными порциями, называемыми квантами (фотонами). Подобно частице, фотон обладает релятивистской массой и энергией. Особенностью фотона является то, что он неделим, движется со скоростью света и его масса покоя равна нулю. Квантовая теория позволила решить задачу теплового излучения, объяснить явление фотоэффекта, эффект Комптона и давление света.

Задачи, связанные с определением массы, импульса или энергии фотона, решаются на основании соответствующих формул. При этом нельзя забывать, что фотон – релятивистская частица и формулы классической физики к нему неприменимы. Если в задаче наряду с фотонами рассматриваются другие частицы (например, фотон сталкивается с электроном, протоном и т.п., или требуется сравнить массу, импульс или энергию фотона с соответствующей характеристикой частицы) и специально не оговорено, релятивистские они или нет, то нужно вычислить энергию E и энергию покоя E_0 частицы. Если $E < E_0$, то частицу можно считать нерелятивистской и использовать законы классической физики; если $E > E_0$, то необходимо применять формулы специальной теории относительности.

Задачи на фотоэффект решаются на основании формулы Эйнштейна и вытекающих из нее соотношений:

– красная граница фотоэффекта – это минимальная частота ν_0 или максимальная длина волны λ_0 , при которых возможен фотоэффект; соответствующая энергия кванта равна работе выхода электрона из поверхности данного металла;

– задерживающее напряжение U_3 (задерживающая разность потенциалов) – это минимальная разность потенциалов между

анодом и катодом, при которой электрическое поле между электродами достаточно сильное, чтобы не дать фотоэлектронам долететь до анода; U_3 по величине равно максимальной кинетической энергии фотоэлектронов;

– ток насыщения I_n – это максимальный ток в цепи при условии, что катод освещается одним и тем же источником света; I_n по величине равен суммарному заряду всех электронов, испускаемых катодом в единицу времени.

Задачи на давление света решаются на основании формулы $p = \frac{E_3}{c}(1 + \rho)$. При этом следует помнить, что она справедлива только для случая, если свет падает перпендикулярно поверхности тела. Часто эту формулу удобно использовать в другой форме записи. Поскольку освещенность E_3 равна энергии, падающей в единицу времени на единицу площади тела, то ее можно представить в виде

$$p = (1 + \rho) \frac{nh\nu}{c},$$

где n – число фотонов с частотой ν , падающих в единицу времени на единицу площади поверхности тела.

Если свет падает на поверхность под некоторым углом α , следует обратить внимание на то, что площадь S поперечного сечения светового пучка и площадь S_0 на поверхности тела, на которое падает этот пучок, не равны друг другу, а связаны соотношением $S = S_0 \cos \alpha$.

Основные формулы

Законы теплового излучения

1. Закон Стефана–Больцмана. Энергетическая светимость абсолютно черного тела пропорциональна абсолютной температуре в четвертой степени:

$$R_3 = \sigma T^4,$$

где σ – постоянная Стефана – Больцмана.

Энергетической светимостью называется величина, численно равная энергии излучения всех длин волн с единицы поверхности тела в единицу времени: $R_\lambda = \int_0^\infty r_\lambda d\lambda$, где r_λ – спектральная плотность энергетической светимости (т.е. энергетическая светимость, приходящаяся на единичный интервал длин волн).

2. Закон смещения Вина. В спектре излучения абсолютно черного тела длина волны λ_m , на которую приходится максимум энергии излучения, обратно пропорциональна абсолютной температуре:

$$\lambda_m = \frac{b}{T},$$

где b – постоянная Вина.

Фотоэлектрический эффект

3. Формула Эйнштейна для фотоэффекта

$$h\nu = A + W_{\max},$$

где $h\nu$ – энергия фотона, падающего на поверхность металла; A – работа выхода электрона; W – максимальная кинетическая энергия фотоэлектрона, вылетевшего из металла.

Если энергия фотона меньше 5 кэВ, то кинетическая энергия W может быть определена по классической формуле

$$W_{\max} = \frac{m_e v^2}{2}, \text{ где } m_e \text{ – масса покоя электрона.}$$

Если энергия фотона больше 5 кэВ, то для вычисления кинетической энергии W следует воспользоваться релятивистской

$$\text{формулой } W = (m - m_e)c^2, \text{ или } W_{\max} = m_e c^2 \left(\frac{1}{\sqrt{1 - \beta^2}} - 1 \right), \beta = v/c.$$

4. Максимальная длина волны $\lambda_{\text{кр}}$ (минимальная частота колебаний $\nu_{\text{кр}}$), начиная с которой фотоэффект прекращается,

называется красной границей фотоэффекта: $\lambda_{\text{кр}} = \frac{hc}{A}$, или

$\nu_{\text{кр}} = \frac{A}{h}$, где h – постоянная Планка.

Давление света. Фотоны

5. Давление p , производимое светом при нормальном падении на поверхность с коэффициентом отражения ρ , выражается соотношением $p = \frac{E_0}{c}(1 + \rho)$, или $p = \omega(1 + \rho)$, где E_0 – энергетическая освещенность поверхности; c – скорость распространения света в вакууме; ω – объемная плотность энергии излучения.

В случае идеально отражающей (зеркальной) поверхности коэффициент отражения $\rho = 1$. В случае идеально поглощающей поверхности (поверхность абсолютно черного тела) коэффициент отражения $\rho = 0$.

6. Энергия ε фотона выражается формулой $\varepsilon = h\nu = \frac{hc}{\lambda}$.

Масса m фотона выражается из закона пропорциональности массы и энергии следующим образом: $m = \frac{\varepsilon}{c^2} = \frac{h}{c\lambda}$. Импульс

фотона $p = \frac{\varepsilon}{c} = \frac{h}{\lambda}$.

Эффект Комптона

7. При соударении со свободным или слабо связанным (валентным) электроном фотон передает ему часть своей энергии, вследствие этого длина волны λ' рассеянного фотона больше длины волны λ первичного фотона.

Изменение длины волны дается формулой Комптона

$$\lambda' - \lambda = \frac{h}{m_e c} (1 - \cos\theta),$$

где m_e – масса покоящегося электрона; θ – угол рассеяния. Величина $\Lambda = \frac{h}{m_e c}$ называется комptonовской длиной волны. При рассеянии на электроне $\Lambda = 2,436 \cdot 10^{-12}$ м.

Примеры решения задач

№ 1. Длина волны, на которую приходится максимум энергии в спектре излучения абсолютно черного тела, $\lambda_m = 0,58$ мкм. Определить энергетическую светимость (излучательность) R_3 поверхности тела.

Р е ш е н и е.

Энергетическая светимость R_3 абсолютно черного тела в соответствии с законом Стефана–Больцмана пропорциональна четвертой степени абсолютной температуры и выражается формулой

$$R_3 = \sigma T^4, \quad (1)$$

где σ – постоянная Стефана–Больцмана; T – термодинамическая температура.

Температуру T можно вычислить с помощью закона смещения Вина:

$$\lambda_m = b/T, \quad (2)$$

где b – постоянная закона смещения Вина.

Используя формулы (2) и (1), получим

$$R_3 = \sigma \left(\frac{b}{\lambda} \right)^4. \quad (3)$$

Выпишем числовые значения величин, входящих в эту формулу:

$\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8}$ Вт/(м²·К⁴), $b = 2,90 \cdot 10^{-3}$ м·К, $\lambda_m = 5,8 \cdot 10^{-7}$ м, и, подставив числовые значения в формулу (3), произведем вычисления:

$$R_3 = 5,67 \cdot 10^{-8} \left(\frac{2,90 \cdot 10^{-3}}{5,8 \cdot 10^{-7}} \right)^4 = 3,54 \cdot 10^7 = 35,4 \text{ МВт/м}^2.$$

№ 2. Определить максимальную скорость v_{\max} фотоэлектронов, вырываемых с поверхности серебра: 1) ультрафиолетовыми лучами с длиной волны $\lambda_1 = 0,155$ мкм; 2) γ -лучами с длиной волны $\lambda_2 = 1$ пм.

Р е ш е н и е.

Максимальную скорость фотоэлектронов можно определить из уравнения Эйнштейна для фотоэффекта:

$$\varepsilon = A + W_{\max}, \quad (1)$$

где ε – энергия фотона, падающего на поверхность металла; A – работа выхода электрона из металла; W_{\max} – максимальная кинетическая энергия фотоэлектрона.

Энергия фотона вычисляется также по формуле

$$\varepsilon = hc/\lambda, \quad (2)$$

где h – постоянная Планка; c – скорость света в вакууме; λ – длина волны.

Кинетическая энергия электрона может быть выражена или по классической формуле

$$W = \frac{m_e v^2}{2}, \quad (3)$$

или по релятивистской

$$W = E_0 \left(\frac{1}{\sqrt{1-\beta^2}} - 1 \right) \quad (4)$$

в зависимости от того, какая скорость сообщается фотоэлектрону.

Скорость фотоэлектрона зависит от энергии фотона, вызывающего фотоэффект: если энергия ε фотона много меньше энергии покоя E_0 электрона, то может быть применена формула (3), если же ε сравнима по величине с E_0 , то вычисление по формуле (3) приводит к ошибке, поэтому нужно пользоваться формулой (4).

1. Вычислим энергию фотона ультрафиолетовых лучей по формуле (2):

$$\varepsilon_1 = \frac{6,63 \cdot 10^{-34} \cdot 3 \cdot 10^8}{1,55 \cdot 10^{-7}} = 1,28 \cdot 10^{-18} \text{ Дж,}$$

$$\text{или } \varepsilon_1 = \frac{1,28 \cdot 10^{-18}}{1,6 \cdot 10^{-19}} = 8 \text{ эВ.}$$

Полученная энергия фотона (8 эВ) много меньше энергии покоя электрона (0,51 МэВ). Следовательно, для данного случая кинетическая энергия фотоэлектрона в формуле (1) может быть выражена по классической формуле (3): $\varepsilon_1 = A + \frac{m_e v_{\max}^2}{2}$, откуда

$$v_{\max} = \sqrt{\frac{2(\varepsilon_1 - A)}{m_e}}. \quad (5)$$

Выпишем числовые значения величин: $\varepsilon_1 = 1,28 \cdot 10^{-18}$ Дж (вычислено выше), $A = 4,7 \text{ эВ} = 4,7 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19}$ Дж, $m_0 = 9,11 \cdot 10^{-31}$ кг.

Подставив числовые значения в формулу (5), найдем

$$v_{\max} = \sqrt{\frac{2(1,28 \cdot 10^{-18} - 0,75 \cdot 10^{-18})}{9,11 \cdot 10^{-31}}} = 1,08 \cdot 10^6 \text{ м/с.}$$

2. Вычислим энергию фотона γ -лучей:

$$\varepsilon_2 = \frac{hc}{\lambda} = \frac{6,63 \cdot 10^{-34} \cdot 3 \cdot 10^8}{10^{-12}} = 1,99 \cdot 10^{-13} \text{ Дж, или } \varepsilon_2 = 1,24 \text{ МэВ.}$$

Работа выхода электрона ($A = 4,7$ эВ) пренебрежимо мала по сравнению с энергией фотона ($\varepsilon_2 = 1,24$ МэВ), поэтому можно принять, что максимальная кинетическая энергия электрона равна энергии фотона: $W_{\max} = \varepsilon_2 = 1,24$ МэВ. Поскольку в данном случае кинетическая энергия электрона больше его энергии покоя, для вычисления скорости электрона следует взять релятивистскую формулу кинетической энергии (4). Из этой форму-

лы найдем $\beta = \frac{\sqrt{(2E_0 + W)W}}{E_0 + W}$. Заметив, что $v = c\beta$ и $W_{\max} = \varepsilon_2$,

получим $v_{\max} = c \frac{\sqrt{(2E_0 + \varepsilon_2)\varepsilon_2}}{E_0 + \varepsilon_2}$.

Подставим числовые значения величин и произведем вычисления: $v_{\max} = 3 \cdot 10^8 \frac{\sqrt{(2 \cdot 0,51 + 1,24)1,24}}{0,51 + 1,24} = 2,85 \cdot 10^8$ м/с.

№ 3. Пучок параллельных лучей монохроматического света с длиной волны $\lambda = 663$ нм падает нормально на плоскую зеркальную поверхность. Поток излучения $\Phi = 0,6$ Вт. Определить: 1) силу F давления, испытываемую этой поверхностью; 2) число N_1 фотонов, ежесекундно падающих на поверхность.

Р е ш е н и е.

1. Сила светового давления на поверхность равна произведению светового давления p на площадь S поверхности:

$$F = pS. \quad (1)$$

Световое давление может быть найдено по формуле

$$p = \frac{E_e}{c}(\rho + 1), \quad (2)$$

где E_e – энергетическая освещенность (облученность); c – скорость света в вакууме; ρ – коэффициент отражения. Подставляя выражение (2) давления света в формулу (1), получим

$$F = \frac{E_e S}{c}(\rho + 1). \quad (3)$$

Энергетическая освещенность E_e есть величина, численно равная энергии, падающей на единичную площадку в единицу времени. Произведение E_e на S есть величина, численно равная энергии, падающей на данную площадку S в единицу времени, т.е. поток излучения $\Phi = E_e S$. С учетом этого формула (3) примет вид

$$F = \frac{\Phi}{c}(\rho + 1). \quad (4)$$

Величины, входящие в формулу (4), выпишем в единицах СИ: $\Phi = 0,6$ Вт, $c = 3 \cdot 10^8$ м/с, $\rho = 1$ (поверхность зеркальная). После подстановки этих величин в формулу (4) получим

$$F = \frac{0,6}{3 \cdot 10^8} (1 + 1) = 4 \cdot 10^{-9} \text{ Н.}$$

2. Произведение энергии ε одного фотона на число фотонов N_1 , падающих на поверхность в единицу времени, равно мощности излучения, т.е. потоку излучения: $\Phi = \varepsilon N_1$, а так как энергия фотона $\varepsilon = hc/\lambda$, то $\Phi = \frac{hc}{\lambda} N_1$, откуда

$$N_1 = \frac{\Phi \lambda}{hc}. \quad (5)$$

Выпишем величины, входящие в формулу (5), в единицах СИ: $\Phi = 0,6$ Вт, $\lambda = 6,63 \cdot 10^{-7}$ м, $h = 6,63 \cdot 10^{-34}$ Дж·с, $c = 3 \cdot 10^8$ м/с. Подставим полученные значения в расчетную формулу и произведем вычисления:

$$N_1 = \frac{0,6 \cdot 6,63 \cdot 10^{-7}}{6,63 \cdot 10^{-34} \cdot 3 \cdot 10^8} = 2 \cdot 10^{18} \text{ с}^{-1}.$$

4.4. Атомная и ядерная физика

Основные формулы

Атом водорода

Первый постулат Бора. Атомы могут длительно пребывать только в таких состояниях, находясь в которых они не излучают энергии. Этим стационарным состояниям соответствуют определенные энергии $E_1, E_2, \dots E_n$ атома.

Второй постулат Бора. При переходе из одного стационарного состояния в другое атом испускает или поглощает излуче-

ние строго определенной частоты, определяемой условием $h\nu = E_m - E_n$.

Стационарным состояниям атома соответствуют вполне определенные орбиты, по которым движутся электроны. Момент импульса L электрона для стационарных орбит кратен

$$\hbar = \frac{h}{2\pi}.$$

Радиусы круговых орбит электрона определяются равенством $L = m_e v r = n\hbar$, где r – радиус орбиты; v – скорость электрона на этой орбите; n – целое число, называемое главным квантовым числом ($n = 1, 2, 3, \dots$).

Энергия электрона, находящегося на n -й орбите,

$$E_n = -\frac{e^4 m_e}{8\varepsilon_0^2 n^2 \hbar^2}.$$

Длина волны λ света, излучаемого атомом водорода при переходе с одной орбиты на другую, может быть определена из серийной формулы

$$\frac{1}{\lambda} = R' \left(\frac{1}{n^2} - \frac{1}{m^2} \right),$$

где R' – постоянная Ридберга; n и m – квантовые числа, определяющие номера орбит электрона.

Энергия кванта света, излучаемого атомом водорода при переходе с одной орбиты на другую, $\varepsilon = E_i \left(\frac{1}{n^2} - \frac{1}{m^2} \right)$, где E_i – энергия ионизации атома водорода, $E_i = -13,6$ эВ.

Энергия ионизации, выраженная в электрон-вольтах, численно равна потенциалу ионизации, выраженному в вольтах. Потенциалом ионизации называется ускоряющая разность потенциалов, которую должен пройти бомбардирующий электрон, чтобы приобрести кинетическую энергию, достаточную для ионизации атома.

Волны де Бройля

Формула де Бройля. Длина волны λ , связанная с частицей, обладающей импульсом p , выражается равенством $\lambda = \frac{h}{p}$.

Поскольку импульс p в классическом приближении ($v \ll c$) выражается формулой $p = m_0v$, то $\lambda = \frac{h}{m_0v}$, где m_0 – масса покоя частицы.

В релятивистском случае, когда скорость частицы сравнима со скоростью света в вакууме, импульс $p = mv = m_0v / \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$.

$$\text{Тогда } \lambda = \frac{h}{m_0v} \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}.$$

Иногда при вычислениях длины волны де Бройля импульс p частицы удобно выражать через ее кинетическую энергию W . При этом следует пользоваться соотношением $p = \sqrt{2m_0W}$, в релятивистском случае $p = \frac{1}{c} \sqrt{W(W + 2E_0)}$, где E_0 – энергия покоя частицы ($E_0 = m_0c^2$).

Соотношения неопределенностей

Неопределенности координат и компонент импульса связаны соотношениями

$$\Delta x \Delta p_x \geq \hbar, \quad \Delta y \Delta p_y \geq \hbar, \quad \Delta z \Delta p_z \geq \hbar.$$

Если электрон в атоме находится в возбужденном состоянии время Δt , то его энергия может быть определена с точностью ΔW , удовлетворяющей соотношению $\Delta W \Delta t \geq \hbar$.

Радиоактивность

Основной закон радиоактивного распада: число нераспавшихся атомов в образце радиоактивного изотопа уменьшается

со временем экспоненциально: $N = N_0 \cdot e^{-\lambda t}$, где N – число нераспавшихся атомов в момент времени t ; N_0 – число нераспавшихся атомов в момент, принятый за начальный ($t = 0$); e – основание натуральных логарифмов; λ – постоянная радиоактивного распада.

Число атомов, распавшихся за время t , $N_0 - N = N_0 (1 - e^{-\lambda t})$.

Если промежуток времени Δt очень мал по сравнению с периодом полураспада $T_{1/2}$, то для определения числа распавшихся атомов служит приближенная формула $\Delta N \approx \lambda N \Delta t$.

Период полураспада $T_{1/2}$ – промежуток времени, за который число нераспавшихся атомов уменьшается в два раза. Период полураспада связан с постоянной распада соотношением

$$T_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda} = \frac{0,693}{\lambda}.$$

Среднее время жизни τ радиоактивного нуклида – промежуток времени, за который число нераспавшихся атомов уменьшается в e раз: $\tau = \frac{1}{\lambda}$.

Число атомов, содержащихся в образце нуклида, $N = \frac{m}{A} N_A$, где m – масса образца; A – масса килограмм-атома нуклида; N_A – число Авогадро.

Активность a образца измеряется числом ядер, распавшихся в единицу времени: $a = -\frac{dN}{dt} = \lambda N$, или после замены N

$$a = \lambda N_0 e^{-\lambda t}.$$

Активность образца в начальный момент (при $t = 0$) $a_0 = \lambda N_0$.

Активность образца изменяется со временем по тому же закону, что и число нераспавшихся ядер: $a = a_0 e^{-\lambda t}$.

Энергия связи атомных ядер

Дефект массы. Согласно релятивистской механике масса покоя M устойчивой системы взаимосвязанных частиц меньше суммы масс покоя $m_1 + m_2 + \dots + m_k$ тех же частиц, взятых в свободном состоянии. Разность $\Delta M = (m_1 + m_2 + \dots + m_k) - M$ называется дефектом массы системы частиц.

Уменьшение массы покоя свободных частиц при соединении их в устойчивую систему происходит вследствие освобождения некоторой части энергии покоя этих частиц. Выделившаяся энергия называется энергией связи.

Из закона сохранения энергии следует, что наименьшая энергия, которую нужно затратить, чтобы расчленив устойчивую систему взаимосвязанных частиц на отдельные свободные частицы, равна энергии связи.

Энергия связи прямо пропорциональна дефекту массы системы частиц $\Delta W = c^2 \Delta M$, где c^2 – коэффициент перехода от массы к энергии, численно равный квадрату скорости света в вакууме; $c^2 = \frac{\Delta W}{\Delta M} = 8,987 \cdot 10^{16}$ Дж/кг = $8,987 \cdot 10^{16}$ м²/с².

Если энергия выражена в мегаэлектрон-вольтах, а масса в атомных единицах, то $c^2 = 931,44$ МэВ/а.е.м.

Дефект массы ΔM атомного ядра есть разность между суммой масс свободных протонов и нейтронов и массой образовавшегося из них ядра: $\Delta M = (Zm_p + Nm_n) - M$, где Z – число протонов в ядре; N – число нейтронов ($N = A - Z$); m_p и m_n – массы свободных протона и нейтрона; M – масса ядра.

Ядерные реакции

Символическая запись ядерной реакции может быть дана или в развернутом виде, например ${}^9_4\text{Be} + {}^1_1\text{H} \rightarrow {}^4_2\text{He} + {}^6_3\text{Li}$, или сокращенно: ${}^9\text{Be} (p, \alpha) {}^6\text{Li}$.

Обозначения частиц: e – электрон; p – протон; n – нейтрон; d – дейтрон; t – тритон; α – альфа-частица; γ – гамма-фотон.

При решении задач применяются законы сохранения:

– числа нуклонов $A_1 + A_2 = A_3 + A_4$;

– заряда $Z_1 + Z_2 = Z_3 + Z_4$;

– релятивистской полной энергии $E_1 + E_2 = E_3 + E_4$;

– импульса $\vec{p}_1 + \vec{p}_2 = \vec{p}_3 + \vec{p}_4$.

Энергетический эффект ядерной реакции $Q = c^2 [(m_1 + m_2) - (m_3 + m_4)]$, где m_1 – масса покоя ядра-мишени; m_2 – масса покоя бомбардирующей частицы; $m_3 + m_4$ – сумма масс покоя ядер продуктов реакции.

Если $m_1 + m_2 > m_3 + m_4$, то энергия освобождается, энергетический эффект положителен, реакция экзотермическая.

Если $m_1 + m_2 < m_3 + m_4$, то энергия поглощается, энергетический эффект отрицателен, реакция эндотермическая.

Примеры решения задач

№ 1. Электрон в атоме водорода перешел с четвертого энергетического уровня на второй. Определить энергию испущенного при этом фотона.

Р е ш е н и е.

Для определения энергии фотона воспользуемся сериальной формулой для водородоподобных ионов

$$\frac{1}{\lambda} = R'Z^2 \left(\frac{1}{n^2} - \frac{1}{m^2} \right), \quad (1)$$

где λ – длина волны фотона; R' – постоянная Ридберга; Z – заряд ядра в относительных единицах (при $Z = 1$ формула переходит в сериальную формулу для водорода); n – номер орбиты, на которую перешел электрон; m – номер орбиты, с которой перешел электрон (n и m – главные квантовые числа).

Энергию фотона ε найдем по формуле $\varepsilon = E_i Z^2 \left(\frac{1}{n^2} - \frac{1}{m^2} \right)$.

Вычисления выполним во внесистемных единицах: $E_i = 13,6$ эВ; $Z = 1$ (заряд ядра атома водорода в относительных

единицах, где за единицу заряда принято абсолютное значение заряда электрона); $n = 2$; $m = 4$.

$$\varepsilon = 13,6 \cdot 1^2 \cdot \left(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{4^2} \right) = 13,6 \cdot \frac{3}{16} = 2,55 \text{ эВ.}$$

№ 2. Электрон, начальной скоростью которого можно пренебречь, прошел ускоряющую разность потенциалов U . Найти длину волны де Бройля для двух случаев: 1) $U_1 = 51 \text{ В}$; $U_2 = 510 \text{ кВ}$.

Р е ш е н и е.

Длина волны де Бройля для частицы зависит от ее импульса p и определяется формулой

$$\lambda = h/p, \quad (1)$$

где h – постоянная Планка.

Импульс частицы можно определить, если известна ее кинетическая энергия W . Связь импульса с кинетической энергией различна для нерелятивистского случая (когда кинетическая энергия частицы много меньше ее энергии покоя) и для релятивистского случая (когда кинетическая энергия сравнима с энергией покоя частицы).

В нерелятивистском случае

$$p = \sqrt{2m_0W}, \quad (2)$$

где m_0 – масса покоя частицы.

В релятивистском случае

$$p = \frac{1}{c} \sqrt{(2E_0 + W)W}, \quad (3)$$

где E_0 – энергия покоя частицы, $E_0 = m_0c^2$.

Формула (1) с учетом соотношений (2) и (3) запишется:

– в нерелятивистском случае

$$\lambda = \frac{h}{\sqrt{2m_0W}}; \quad (4)$$

– в релятивистском случае

$$\lambda = \frac{h}{\frac{1}{c} \sqrt{(2E_0 + W)W}}. \quad (5)$$

Сравним кинетические энергии электрона, прошедшего заданные в условии задачи разности потенциалов $U_1 = 51$ В и $U_2 = 510$ кВ, с энергией покоя электрона и в зависимости от этого решим, какую из формул – (4) или (5) – следует применить для вычисления длины волны де Бройля.

Как известно, кинетическая энергия электрона W , прошедшего ускоряющую разность потенциалов U , находится следующим образом: $W = eU$.

В первом случае $W_1 = eU_1 = 51$ эВ = 0, 51·10⁻⁴ МэВ, что много меньше энергии покоя электрона $E_0 = m_0c^2 = 0, 51$ МэВ. Следовательно, в этом случае можно применить формулу (4). Для упрощения расчетов заметим, что $W_1 = 10^{-4}m_0c^2$. Подставив это выражение в формулу (4), перепишем ее в виде

$$\lambda_1 = \frac{h}{\sqrt{2m_e 10^{-4} m_e c^2}} = \frac{10^2}{\sqrt{2}} \frac{h}{m_e c}.$$

Учитывая, что $\frac{h}{m_e c}$ есть комптоновская длина волны Λ ,

получим $\lambda_1 = \frac{10^2}{\sqrt{2}} \Lambda$. Поскольку $\Lambda = 2,43$ пм, то $\lambda_1 =$

$$= \frac{10^2}{\sqrt{2}} \cdot 2,43 = 171 \text{ пм}.$$

Во втором случае кинетическая энергия $W_2 = eU_2 = 510$ кэВ = 0,51 МэВ, т.е. равна энергии покоя электрона. В этом случае необходимо применить релятивистскую формулу (5). Учитывая, что $W_2 = 0, 51$ МэВ = $m_e c^2$, по формуле (5) найдем

$$\lambda_2 = \frac{h}{\frac{1}{c} \sqrt{(2m_e c^2 + m_e c^2)} m_e c^2} = \frac{h}{\sqrt{3} m_e c}, \text{ или}$$

$$\lambda_2 = \frac{2,43}{\sqrt{3}} = 1,4 \text{ пм.}$$

№ 3. Кинетическая энергия электрона в атоме водорода составляет величину порядка $W = 10$ эВ. Используя соотношение неопределенностей, оценить минимальные линейные размеры атома.

Р е ш е н и е.

Соотношение неопределенностей для координаты и импульса имеет вид $\Delta x \Delta p \geq \hbar$, где Δx – неопределенность координаты частицы (в данном случае электрона); Δp – неопределенность импульса частицы (электрона); \hbar – постоянная Планка, деленная на 2π .

Из соотношения неопределенностей следует, что чем точнее определяется положение частицы в пространстве, тем более неопределенным становится импульс, а следовательно, и энергия частицы. Пусть атом имеет линейные размеры l , тогда электрон атома будет находиться где-то в пределах области с неопределенностью

$$\Delta x = l/2. \quad (1)$$

Соотношение неопределенностей (1) можно записать в этом случае в виде $\frac{l}{2} \Delta p \geq \hbar$, откуда

$$l \geq 2\hbar/\Delta p. \quad (2)$$

Физически разумная неопределенность импульса Δp во всяком случае не должна превышать значения самого импульса p , т.е. $\Delta p \approx p$.

Импульс p связан с кинетической энергией W соотношением $p = \sqrt{2mW}$. Заменяем Δp на $\sqrt{2mW}$ (такая замена не увеличивает l). Переходя от неравенства к равенству, получим $l_{\min} = \frac{2\hbar}{\sqrt{2mW}}$.

Подставим числовые значения и произведем вычисления:

$$l_{\min} = \frac{2 \cdot 1,05 \cdot 10^{-34}}{\sqrt{2 \cdot 9,1 \cdot 10^{-31} \cdot 10 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19}}} = 1,24 \cdot 10^{-10} \text{ м.}$$

№ 4. Вычислить дефект массы и энергию связи ядра ${}^7_3\text{Li}$.

Решение.

Масса ядра всегда меньше суммы масс свободных (находящихся вне ядра) протонов и нейтронов, из которых ядро образовалось. Дефект массы ядра Δm и есть разность между суммой масс свободных нуклонов (протонов и нейтронов) и массой ядра, т.е.

$$\Delta m = Zm_p + (A - Z)m_n - m, \quad (1)$$

где Z – атомный номер (число протонов в ядре); A – массовое число (число нуклонов в ядре); m_p , m_n , m – соответственно массы протона, нейтрона и ядра.

В справочных таблицах всегда даются массы нейтральных атомов, но не ядер, поэтому формулу (1) целесообразно преобразовать так, чтобы в нее входила масса M нейтрального атома. Можно считать, что масса нейтрального атома равна сумме масс ядра и электронов, составляющих нейтральную оболочку атома: $M = m + Zm_e$, откуда $m = M - Zm_e$.

Выразив в равенстве (1) массу ядра по последней формуле, получим $\Delta m = Zm_p + (A - Z)m_n - M + Zm_e$, или $\Delta m = Z(m_p + m_e) + (A - Z)m_n - M$.

Замечая, что $m_e + m_p = M_H$, где M_H – масса атома водорода, окончательно получим

$$\Delta m = ZM_{\text{H}} + (A - Z)m_n - M. \quad (2)$$

Подставив в выражение (2) числовые значения масс (из справочных таблиц), получим

$$\Delta m = [3 \cdot 1,00783 + (7 - 3) \cdot 1,00867 - 7,01601] = 0,04216 \text{ а.е.м.}$$

Энергией связи ΔE ядра называется энергия, которая в той или иной форме выделяется при образовании ядра из свободных нуклонов.

В соответствии с соотношением пропорциональности массы и энергии

$$E = c^2 \Delta m, \quad (3)$$

или $c^2 = E/\Delta m = 9 \cdot 10^{16}$ Дж/кг. Если вычислить энергию связи, пользуясь внесистемными единицами, то $c^2 = 931$ МэВ/а.е.м. С учетом этого формула (3) примет вид

$$E = 931 \Delta m. \quad (4)$$

Подставив ранее найденное значение дефекта массы ядра в формулу (4), получим

$$E = 931 \cdot 0,04216 \text{ МэВ} = 39,2 \text{ МэВ.}$$

№ 5. При соударении α -частицы с ядром бора ${}^{10}_5\text{B}$ произошла ядерная реакция, в результате которой образовалось два новых ядра. Одно из них – ядро атома водорода ${}^1_1\text{H}$. Определить порядковый номер и массовое число второго ядра, дать символическую запись ядерной реакции и определить ее энергетический эффект.

Р е ш е н и е.

Обозначим неизвестное ядро символом ${}^A_Z\text{X}$. Поскольку α -частица представляет собой ядро гелия ${}^4_2\text{He}$, запись реакции имеет вид ${}^4_2\text{He} + {}^{10}_5\text{B} \rightarrow {}^1_1\text{H} + {}^A_Z\text{X}$.

Применив закон сохранения числа нуклонов, получим уравнение $4 + 10 = 1 + A$, откуда $A = 13$. Применив закон сохранения заряда, получим уравнение $2 + 5 = 1 + Z$, откуда $Z = 6$.

Следовательно, неизвестное ядро является ядром изотопа атома углерода ${}^{13}_6\text{C}$.

Энергетический эффект Q ядерной реакции определяется по формуле $Q = 931[(m_{\text{He}} + m_{\text{B}}) - (m_{\text{H}} + m_{\text{C}})]$. Здесь в первых круглых скобках указаны массы исходных ядер, во вторых скобках – массы ядер – продуктов реакции. При числовых подсчетах по этой формуле массы ядер заменяют массами нейтральных атомов. Возможность такой замены вытекает из следующих соображений.

Число электронов в электронной оболочке нейтрального атома равно его зарядовому числу Z . Сумма зарядовых чисел исходных ядер равна сумме зарядовых чисел ядер – продуктов реакции. Следовательно, электронные оболочки ядер гелия и бора содержат вместе столько же электронов, сколько их содержат электронные оболочки ядер углерода и водорода.

Очевидно, что при вычитании суммы масс нейтральных атомов углерода и водорода из суммы масс атомов гелия и бора массы электронов выпадут и мы получим тот же результат, как если бы брали массы ядер. Подставив массы атомов, взятые из справочной таблицы, в расчетную формулу, получим

$$Q = 931[(4,00260 + 10,01294) - (1,00783 + 13,00335)] \text{ МэВ} = 4,06 \text{ МэВ}.$$

№ 6. Определить начальную активность радиоактивного препарата магния ${}^{27}\text{Mg}$ массой $m = 0,2$ мкг, а также его активность A через время $t = 6$ ч. Период полураспада $T_{1/2}$ магния считать известным.

Р е ш е н и е.

Активность a изотопа характеризует скорость радиоактивного распада и равняется числу ядер, распадающихся в единицу времени:

$a = -\frac{dN}{dt}$, где dN – число ядер, распавшихся за время dt .

Согласно основному закону радиоактивного распада $-\frac{dN}{dt} = \lambda N$, где λ – постоянная радиоактивного распада. Поскольку $N = N_0 e^{-\lambda t}$, где N_0 – число нераспавшихся ядер в момент времени, принятый за начальный, то $a = \lambda N_0 e^{-\lambda t}$. Очевидно, что начальная активность при $t = 0$

$$a_0 = \lambda N_0. \quad (1)$$

Исходя из этого закон изменения активности со временем выражается формулой

$$a = a_0 e^{-\lambda t}. \quad (2)$$

Начальную активность определим по формуле (1). Входящая в эту формулу постоянная радиоактивного распада λ может быть выражена через период полураспада соотношением $\lambda = \ln 2 / T_{1/2} = 0,693 / T_{1/2}$.

Для ^{27}Mg период полураспада $T_{1/2} = 10$ мин = 600 с. Следовательно, $\lambda = 0,693 / 600 \text{ с}^{-1} = 1,15 \cdot 10^{-3} \text{ с}^{-1}$.

Число радиоактивных атомов N_0 , содержащихся в изотопе, равно произведению числа Авогадро N_A на количество вещества

ν данного изотопа: $N_0 = \nu N_A = \frac{m}{\mu} N_A$, где m – масса изотопа;

μ – молярная масса. Выразив в этой формуле значения величин в системе СИ, получим

$$N_0 = \frac{0,2 \cdot 10^{-9} \cdot 6,02 \cdot 10^{23}}{27 \cdot 10^{-3}} = 4,46 \cdot 10^{15} \text{ ядер.}$$

Вычислим по формуле (1) начальную активность изотопа: $a_0 = \lambda N_0 = 1,15 \cdot 10^{-3} \cdot 4,46 \cdot 10^{15} = 5,13 \cdot 10^{12}$ Бк, или $a_0 = 5,13$ ТБк.

Активность через 6 ч ($6 \text{ ч} = 2,16 \cdot 10^4 \text{ с}$) получим по формуле (2):

$$a = a_0 e^{-\lambda t} = 5,13 \cdot 10^{12} \cdot e^{-1,15 \cdot 10^{-3} \cdot 2,16 \cdot 10^4} = 81,3 \text{ Бк.}$$

ВАРИАНТЫ ЗАДАНИЙ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ

Модуль 1. МЕХАНИКА

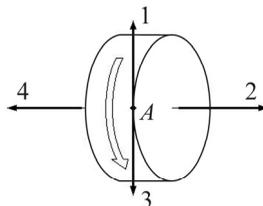
Модуль 1. Механика

Вариант 1

1. Уравнение движения точки по прямой имеет вид $x = A + Bt + Ct^3$ ($A = 4$ м, $B = 2$ м/с, $C = 0,2$ м/с³). Найдите среднюю скорость за промежуток времени от 2 до 5 с.

2. Колесо радиусом $R = 0,1$ м вращается так, что зависимость угловой координаты от времени дается уравнением $\varphi = (1 + 2t + t^3)$, рад. Для точек, лежащих на ободе колеса, найдите нормальное, тангенциальное и полное ускорения через 2 с после начала вращения.

3. Диск равноускоренно вращается вокруг оси (рисунок). Направление вектора угловой скорости точки A на ободе диска совпадает со стрелкой...



4. Маховик получил начальную угловую скорость 2π рад/с. Сделав 10 оборотов, он, вследствие трения в подшипниках, остановился. Найдите угловое ускорение маховика, считая его постоянным.

5. Найдите силу тяги, развиваемую мотором автомобиля, движущегося в гору с ускорением 1 м/с². Угол наклона горы 30° . Масса автомобиля 1 т. Коэффициент трения равен $0,1$.

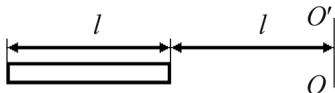
6. На каком расстоянии от поверхности Земли сила гравитационного притяжения, действующая на тело, в 2 раза меньше, чем у поверхности Земли? Радиус Земли $6,4$ Мм.

7. Тело массой 1 кг, движущееся горизонтально со скоростью 1 м/с, догоняет второе тело массой $0,5$ кг и неупруго сталкивается с ним. Какую скорость получают тела, если: 1) второе

тело стояло неподвижно; 2) второе тело двигалось со скоростью $0,5 \text{ м/с}$ в том же направлении, что и первое; 3) второе тело двигалось со скоростью $0,5 \text{ м/с}$ в противоположном направлении?

8. Тело массой 2 кг движется со скоростью 3 м/с и сталкивается абсолютно неупруго с телом массой 3 кг , движущимся со скоростью 1 м/с . Определите скорости тел после удара и количество выделившегося при ударе тепла, если тела движутся навстречу друг другу.

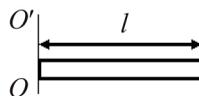
9. Два груза, массы которых относятся как $1:4$, соединены сжатой пружиной и лежат на горизонтальной поверхности гладкого стола. При распрямлении пружины груз меньшей массы получает кинетическую энергию 40 Дж . Найдите потенциальную энергию сжатой пружины.



10. Определите момент инерции стержня массой m и длиной l относительно оси, проходящей перпендикулярно стержню на расстоянии l от его конца (рисунок).

11. К ободу однородного диска радиусом $0,2 \text{ м}$ и массой 200 кг приложена постоянная касательная сила $F = 100 \text{ Н}$. При вращении на диск действует момент сил трения $M_{\text{тр}} = 4 \text{ Н}\cdot\text{м}$. Определите угловое ускорение, с которым вращается диск.

12. Определите момент импульса стержня массой m и длиной l , вращающегося с частотой ν вокруг оси OO' (рисунок).



13. На скамье Жуковского, вращающейся около вертикальной оси с частотой $\nu_1 = 0,3 \text{ об/с}$, стоит человек и держит на вытянутых руках две гири массой по 5 кг каждая. Расстояние между гирями $1,4 \text{ м}$. Когда человек опускает руки, расстояние между гирями становится равным $0,5 \text{ м}$, а частота вращения — $0,5 \text{ об/с}$. Определите момент инерции I человека и скамьи.

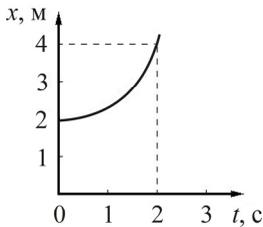
14. На краю диска, масса которого m и радиус R , стоит человек массой M . Диск совершает ν об/с. Чему равна кинетическая энергия системы?

15. Какую работу совершит человек, переходя от края платформы к ее центру, если платформа (диск) имеет массу 100 кг и вращается, делая $\nu = 15$ об/мин, а человек (точечная масса) имеет массу 60 кг? Радиус платформы 2 м.

16. В двух сообщающихся сосудах находится ртуть. Поверх нее в один сосуд налили столб воды высотой 0,8 м, а в другой – керосина высотой 0,2 м. Какая разность уровней ртути установится в сосудах? Плотность керосина $0,8 \cdot 10^3$ кг/м³, плотность ртути $13,6 \cdot 10^3$ кг/м³.

Модуль 1. Механика

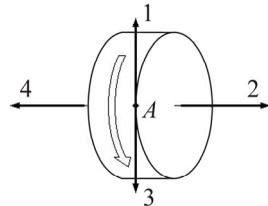
Вариант 2



1. График зависимости координаты тела x имеет вид, указанный на рисунке. Найдите зависимость $x = x(t)$ и укажите, какое это движение.

2. Точка движется по окружности радиусом $R = 0,1$ м с постоянным тангенциальным ускорением. Найдите нормальное ускорение точки через 20 с после начала движения, если известно, что к концу 5-го оборота после начала движения линейная скорость точки равна 10 см/с.

3. Диск равноускоренно вращается вокруг оси (рисунок). Направление вектора углового ускорения точки A на ободе диска совпадает со стрелкой...



4. Вентилятор вращается с частотой 900 об/мин. После выключения вентилятора, вращаясь равнозамедленно, сделал до остановки 75 об. Сколько времени прошло с момента выключения вентилятора до его полной остановки?

5. На автомобиль массой 1 т во время движения действует сила трения, равная 0,1 его силы тяжести. Найдите силу тяги,

развиваемую мотором автомобиля, если автомобиль движется с постоянной скоростью в гору с уклоном 1 м на каждые 25 м пути.

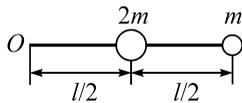
6. Каково ускорение свободного падения тела на высоте, равной половине радиуса Земли?

7. Два шарика массами 2 и 4 кг двигаются со скоростями $v_1 = 5$ м/с и $v_2 = 7$ м/с. Определите скорости шаров после прямого неупругого удара в случаях, когда: 1) большой шар догоняет меньший; 2) шары движутся навстречу друг другу.

8. Груз массой 25 кг висит на шнуре длиной 2,5 м. На какую наибольшую высоту можно отвести в сторону груз, чтобы при дальнейших свободных качаниях шнур не оборвался? Прочность шнура на разрыв 550 Н.

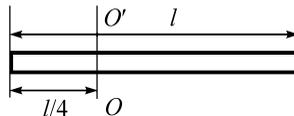
9. Пружина детского пистолета, жесткость которой 10 Н/см, имеет длину 15 см. До какой высоты поднимется шарик массой 10 г, выпущенный из пистолета вертикально вверх, если пружина была сжата до 5 см? Сопротивлением воздуха пренебречь.

10. Два шара массами m и $2m$ ($m = 10$ г) закреплены на тонком невесомом стержне длиной $l = 40$ см так, как показано на рисунке. Определите момент инерции системы относительно оси, перпендикулярной стержню и проходящей через его конец. Размерами шаров пренебречь.



11. К ободу однородного диска радиусом 0,2 м приложена постоянная касательная сила $F = 10$ Н. При вращении на диск действует момент сил трения $M_{тр} = 0,5$ Н·м. Угловое ускорение, с которым вращается диск, $\epsilon = 10$ рад/с². Определите массу диска.

12. Определите момент импульса стержня массой m и длиной l , вращающегося с частотой ν вокруг оси OO' (рисунок).



13. Горизонтальная платформа массой 100 кг вращается вокруг вертикальной оси, проходящей через центр платформы, делая 10 об/мин. Человек массой 60 кг стоит в центре платформы. Сколько оборотов в секунду будет делать платформа, если рас-

стояние человека от центра станет равным $R/4$? Платформа – однородный диск радиусом R , м, человек – точечная масса.

14. Маховик, момент инерции которого равен $40 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$, начал вращаться равноускоренно из состояния покоя под действием момента силы $M = 20 \text{ Н}\cdot\text{м}$. Вращение продолжалось в течение 10 с. Определите кинетическую энергию, приобретенную маховиком.

15. Сколько времени будет скатываться без скольжения обруч с наклонной плоскости длиной 2 м и высотой 10 см?

16. В цистерне, заполненной нефтью, на глубине 4 м поставлен кран, площадь которого 30 см^2 . С какой силой давит нефть на кран, если ее плотность 800 кг/м^3 ?

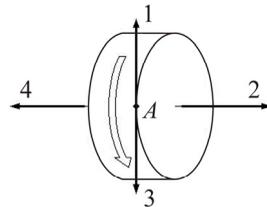
Модуль 1. Механика

Вариант 3

1. Зависимость пути от времени дана уравнением $S = 2t^2$, м. Найдите: а) среднюю скорость за первые 2 с движения; б) мгновенное ускорение в момент времени $t = 1$ с.

2. Камень брошен с горы горизонтально со скоростью 15 м/с. Через какое время его скорость будет направлена под углом 45° к горизонту?

3. Диск равноускоренно вращается вокруг оси (рисунок). Направление вектора тангенциального ускорения точки A на ободе диска совпадает со стрелкой...



4. Тело, вращаясь с частотой 1200 об/мин, начало вращаться равнозамедленно и остановилось, сделав 2000 оборотов. Найдите величину углового ускорения и время, в течение которого произошла остановка тела.

5. Человек массой 60 кг, бегущий со скоростью 3 м/с, догоняет тележку массой 80 кг, движущуюся со скоростью 0,7 м/с, и вскакивает на нее. Найдите: 1) с какой скоростью станет дви-

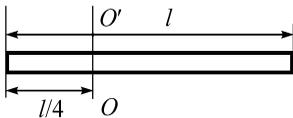
гаться тележка; 2) с какой скоростью будет двигаться тележка, если человек бежит ей навстречу.

6. Вычислите первую космическую скорость для Луны, если ее радиус равен 1700 км, а ускорение свободного падения тел на Луне $1,6 \text{ м/с}^2$.

7. Абсолютно неупругие шары массой 1 и 2 кг движутся навстречу друг другу со скоростями соответственно 1 и 2 м/с. Найдите изменение кинетической энергии системы после удара.

8. Молот массой $m_1 = 200 \text{ кг}$ падает на поковку, масса которой вместе с наковальной $m_2 = 2500 \text{ кг}$. Скорость молота в момент удара равна 2 м/с. Найдите энергию, затраченную на сотрясение (движение) фундамента. Удар молота о поковку считать неупругим.

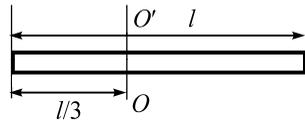
9. Груз массой 0,5 кг падает на плиту массой 1 кг, укрепленную на пружине жесткостью $k = 1000 \text{ Н/м}$. Определите наибольшее сжатие пружины, если в момент удара груз обладал скоростью 5 м/с. Удар неупругий.



10. Определите момент инерции стержня массой m и длиной l относительно оси, перпендикулярной стержню и проходящей на расстоянии $l/4$ от конца (рисунок).

11. К ободу однородного диска радиусом 0,8 м и массой 10 кг приложена постоянная касательная сила F . При вращении на диск действует момент сил трения $M_{\text{тр}} = 8 \text{ Н}\cdot\text{м}$. Угловое ускорение, с которым вращается диск, $\epsilon = 5 \text{ рад/с}^2$. Определите силу F .

12. Определите момент импульса стержня массой m и длиной l , вращающегося с частотой ν вокруг оси OO' (рисунок).



13. Горизонтальная платформа – однородный диск радиусом R и массой 100 кг – вращается вокруг вертикальной оси, проходящей через центр платформы, делая 0,5 об/с. Человек массой 60 кг стоит на расстоянии R от центра платформы.

Сколько оборотов в секунду будет делать платформа, если расстояние человека от центра станет равным $R/3$? Человек – точечная масса.

14. Сплошной цилиндр массой 4 кг катится без скольжения по горизонтальной поверхности. Линейная скорость оси цилиндра равна 1 м/с. Определите полную кинетическую энергию цилиндра.

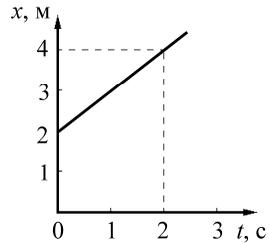
15. Диск весом 10 Н и диаметром 50 см вращается вокруг оси, проходящей через центр перпендикулярно его плоскости, делая 20 об/с. Какую работу надо совершить, чтобы остановить диск?

16. Определите показание пружинного динамометра при взвешивании в воде тела объемом 100 см^3 из меди. Плотность меди 8900 кг/м^3 .

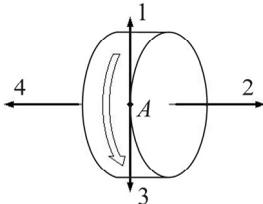
Модуль 1. Механика

Вариант 4

1. График зависимости координаты тела x имеет вид, указанный на рисунке. Найдите зависимость $x = x(t)$ и укажите, какое это движение.



2. По дуге окружности радиуса $R = 10 \text{ м}$ движется точка. В некоторый момент времени нормальное ускорение точки равно $4,9 \text{ м/с}^2$. В этот момент времени векторы полного и нормального ускорений образуют угол 60° . Найдите скорость, тангенциальное и полное ускорения точки.



3. Диск равнозамедленно вращается вокруг оси (рисунок). Направление вектора угловой скорости точки A на ободе диска совпадает со стрелкой...

4. Частота оборотов диска равна 3 об/с. С некоторого момента времени

диск тормозится и вращается равнозамедленно с угловым ускорением 2 рад/с^2 . Сколько оборотов он сделает до остановки?

5. Тело массой 100 кг , двигаясь по горизонтальной поверхности с некоторой начальной скоростью, проделало путь до остановки 20 м за 10 с . Найдите силу трения, действующую на тело.

6. Искусственный спутник обращается по круговой орбите на высоте 600 км над поверхностью Земли. Каков период его обращения?

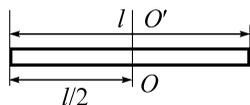
7. Граната, летящая со скоростью 15 м/с , разорвалась на два осколка массами $0,6$ и $1,4 \text{ кг}$. Скорость большего осколка, полетевшего в том же направлении, что и граната, увеличилась до 24 м/с . Определите скорость и направление движения меньшего осколка.

8. С вершины наклонной плоскости, имеющей длину 10 м и высоту 5 м , начинает двигаться без начальной скорости тело. Какую скорость будет иметь тело у основания плоскости? Коэффициент трения между телом и плоскостью $0,2$.

9. Из ствола автоматического пистолета вылетела пуля массой 10 г со скоростью 300 м/с . Затвор пистолета массой 200 г прижимается к стволу пружиной, жесткость которой 25 кН/м . На какое расстояние отойдет затвор после выстрела? Пистолет считать жестко закрепленным.

10. Определите момент инерции тонкого однородного стержня длиной $l = 60 \text{ см}$ и массой $m = 100 \text{ г}$ относительно оси, перпендикулярной ему и проходящей через точку стержня, удаленную на $a = 20 \text{ см}$ от одного из его концов.

11. К ободу однородного диска радиусом $0,6 \text{ м}$ и массой 2 кг приложена постоянная касательная сила $F = 15 \text{ Н}$. При вращении на диск действует момент сил трения $M_{\text{тр}}$. Угловое ускорение, с которым вращается диск, $\varepsilon = 50 \text{ рад/с}^2$. Определите $M_{\text{тр}}$.



12. Определите момент импульса стержня массой m и длиной l , вращающегося с частотой ν вокруг оси OO' (рисунок).

13. На скамье Жуковского, вращающейся около вертикальной оси с частотой $\nu_1 = 0,3$ об/с, стоит человек и держит на вытянутых руках две гири. Расстояние между гирями 1,5 м. Когда человек опускает руки, расстояние между гирями становится равным 0,4 м, а частота вращения – 0,5 об/с. Момент инерции человека и скамьи $10 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$. Определите массу одной гири.

14. Обруч и сплошной цилиндр, имеющие одинаковую массу $m = 2 \text{ кг}$, катятся без скольжения с одинаковой скоростью 5 м/с. Определите кинетические энергии этих тел.

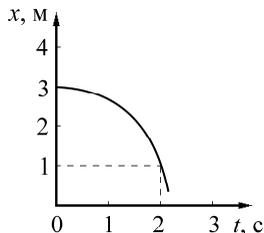
15. Диск массой 1 кг и радиусом 0,2 м вращается с частотой 5 об/с. Какую работу нужно совершить, чтобы увеличить частоту его вращения до 10 об/с?

16. В цилиндрическое ведро диаметром 25 см налита вода, занимающая объем 12 л. Каково давление воды на стенку ведра на высоте 10 см от дна? Плотность воды 1000 кг/м^3 .

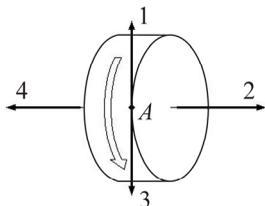
Модуль 1. Механика

Вариант 5

1. График зависимости координаты тела x имеет вид, указанный на рисунке. Найдите зависимость $x = x(t)$ и укажите, какое это движение.



2. Камень брошен под углом 30° к горизонту с начальной скоростью 10 м/с. Через какое время камень будет на высоте 1 м?



3. Диск равномерно замедленно вращается вокруг оси (рисунок). Направление вектора углового ускорения точки A на ободе диска совпадает со стрелкой...

4. Материальная точка движется по дуге окружности радиусом $R = 5 \text{ см}$ с постоянным угловым ускорением 2 рад/с^2 .

Найдите полное ускорение точки к концу третьей секунды движения.

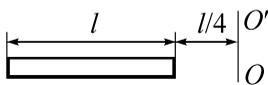
5. Тело массой 10 кг находится на наклонной плоскости, составляющей с горизонтом угол 30° . Коэффициент трения тела о плоскость $\mu = 0,6$. Какую силу нужно приложить к телу, чтобы поднимать его вверх с ускорением 2 м/с^2 ?

6. Средняя плотность Венеры 4900 кг/м^3 , а радиус планеты 6200 км. Найдите ускорение свободного падения на поверхности Венеры.

7. Два тела движутся без трения навстречу друг другу. Для тела 1: $m_1 = 5 \text{ кг}$, $v_1 = 4 \text{ м/с}$ (движется слева направо); для тела 2: $m_2 = 3 \text{ кг}$, $v_2 = 2 \text{ м/с}$. Куда и с какой скоростью будут двигаться тела после неупругого столкновения?

8. Тело движется под действием постоянной силы в 2 Н по закону $S = 6t + 4t^2$. Направление силы совпадает с направлением перемещения. Определите среднюю мощность в промежутке времени от $t_1 = 3 \text{ с}$ до $t_2 = 5 \text{ с}$.

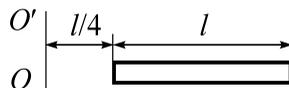
9. Гиря, положенная на верхний конец вертикальной пружины, поставленной на подставке, сжимает ее на 2 мм. На сколько сожмет пружину та же гиря, упавшая на конец пружины с высоты $h = 5 \text{ см}$?



10. Определите момент инерции стержня массой m и длиной l относительно оси, проходящей перпендикулярно стержню на расстоянии $l/4$ от его конца (рисунок).

11. На вал массой $m_1 = 20 \text{ кг}$, который может вращаться вокруг своей оси, намотана нить. К концу нити привязан груз массой $m_2 = 10 \text{ кг}$. Определите расстояние, пройденное грузом за первые 2 с его движения.

12. Определите момент импульса стержня массой m и длиной l , вращающегося с частотой ν вокруг оси OO' (рисунок).



13. Горизонтальная платформа массой 200 кг вращается вокруг вертикальной оси, проходящей через центр платформы, делая 12 об/мин. Человек массой 60 кг стоит на расстоянии R от центра платформы. Сколько оборотов в секунду будет делать платформа, если расстояние человека от центра станет равным $R/2$? Платформа – однородный диск радиусом R , человек – точечная масса.

14. Шар катится без скольжения по горизонтальной поверхности. Полная кинетическая энергия шара равна 14 Дж. Определите кинетическую энергию поступательного и вращательного движения шара.

15. Горизонтальная платформа массой 100 кг вращается вокруг вертикальной оси, проходящей через центр платформы, делая 0,5 об/с. Человек массой 60 кг стоит на расстоянии 3 м от центра платформы. Когда человек переместился на расстояние 1 м от центра платформы, частота вращения стала равной 0,97 об/с. Платформа – однородный диск, человек – точечная масса. Найдите работу, совершаемую человеком.

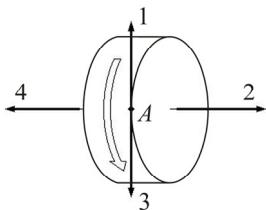
16. В U -образную трубку наливают ртуть. Затем в одно из колен трубки наливают масло, а в другое воду. Границы раздела ртути с маслом и водой в обоих коленах находятся на одном уровне. Найдите высоту столба воды, если высота столба масла 20 см, а его плотность 900 кг/м^3 .

Модуль 1. Механика

Вариант 6

1. Уравнение движения задано выражением: $x = t^3/3$, м. Определите: а) ускорение в момент времени $t = 5$ с; б) среднее ускорение за первые 5 с движения.

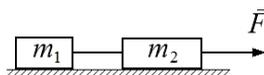
2. Точка движется по окружности радиусом $R = 0,2$ м с постоянным тангенциальным ускорением 5 см/с^2 . Через сколько времени после начала движения нормальное ускорение точки будет вдвое больше тангенциального?



3. Диск равномерно вращается вокруг оси (рисунок). Направление вектора тангенциального ускорения точки A на ободе диска совпадает со стрелкой...

4. Маховое колесо, спустя 1 мин после начала вращения, приобретает частоту 720 об/мин. Найдите угловое ускорение колеса и число оборотов колеса за эту минуту. Движение считать равноускоренным.

5. Два бруска с массами $m_1 = 2$ кг и $m_2 = 3$ кг, связанные нитью, двигаются по гладкой поверхности стола под действием горизонтальной силы $F = 15$ Н, приложенной ко второму бруску (рисунок). Определите силу натяжения нити.

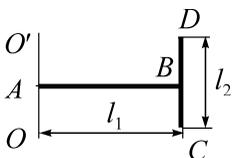


6. Среднее расстояние между центрами Земли и Луны равно 60 земным радиусам, а масса Луны в 81 раз меньше массы Земли. На каком расстоянии от центра Земли тело будет притягиваться к Земле и Луне с одинаковыми силами? Радиус Земли $6,4 \cdot 10^6$ м.

7. Шарик массой 100 г подлетает к стенке со скоростью 5 м/с по направлению нормали к стенке, упруго ударяется о нее и отскакивает. Найдите изменение импульса шарика.

8. Тело движется по закону $S = 14t + t^2$ под действием постоянной силы 10 Н. Определите мощность, развиваемую движущимся телом через 3 с после начала движения.

9. На пружине жесткостью 100 Н/м к потолку подвешен груз. На груз начинает действовать постоянная сила 6 Н, направленная вертикально вниз. Найдите максимальное перемещение груза.

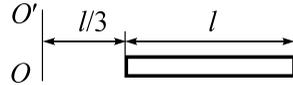


10. Два однородных тонких стержня: AB длиной $l_1 = 40$ см и массой $m_1 = 900$ г и CD длиной $l_2 = 40$ см и массой $m_2 = 400$ г скреплены под прямым углом (рисунок). Определите момент инерции системы

стержней относительно оси OO' , проходящей через конец стержня AB параллельно стержню CD .

11. Маховик в виде диска массой $m = 50$ кг и радиусом $r = 20$ см был раскручен до частоты вращения $\nu = 480$ об/мин. Вследствие трения маховик остановился, сделав 200 оборотов. Найдите момент сил трения.

12. Определите момент импульса стержня массой m и длиной l , вращающегося с частотой ν вокруг оси OO' (рисунок).



13. Горизонтальная платформа массой $M = 100$ кг вращается вокруг вертикальной оси, проходящей через центр платформы с угловой скоростью 22 рад/мин. Человек массой $m = 60$ кг стоит при этом в центре платформы. С какой угловой скоростью будет вращаться платформа, если человек перейдет из центра платформы к ее краю? Считать платформу круглым однородным диском, а человека – точечной массой.

14. К ободу сплошного однородного диска массой 10 кг приложена постоянная касательная сила $F = 30$ Н. Определите кинетическую энергию диска через 4 с после начала действия силы.

15. Стержень длиной l и массой m подвешен на горизонтальной оси, проходящей через конец стержня. Стержень отклонили на угол 90° и отпустили. Какова линейная скорость конца стержня в момент, когда он проходит положение равновесия?

16. Найдите плотность однородного тела, действующего на неподвижную опору в воздухе с силой 2,8 Н, а в воде с силой 1,69 Н. Выталкивающей силой воздуха пренебречь.

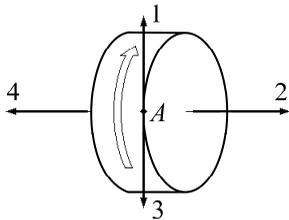
Модуль 1. Механика

Вариант 7

1. Зависимость координаты тела от времени дается уравнением $x = A + Bt + Ct^2 + Dt^3$, где $A = 0,5$ м, $B = 0,1$ м/с,

$C = 0,14 \text{ м/с}^2$, $D = 0,01 \text{ м/с}^3$. Через сколько времени после начала движения ускорение тела будет равно 1 м/с^2 ?

2. Точка движется по кривой с постоянным тангенциальным ускорением $0,5 \text{ м/с}^2$. Определите полное ускорение точки на участке кривой с радиусом кривизны $R = 3 \text{ м}$, если точка движется на этом участке со скоростью 2 м/с .



3. Диск равноускоренно вращается вокруг оси (рисунок). Направление вектора угловой скорости точки A на ободе диска совпадает со стрелкой...

4. Диск вращается с частотой 10 об/мин . При равномерном торможении диск остановился через 5 мин . Сколько оборотов он сделает до остановки?

5. Два груза массами 6 и 4 кг соединены шнуром, перекинутым через блок. Масса шнурa и масса блока много меньше массы грузов. Трения в блоке нет. Определите ускорение грузов.

6. Какую скорость должен иметь искусственный спутник, чтобы обращаться по круговой орбите на высоте 600 км над поверхностью Земли? Радиус Земли 6400 км .

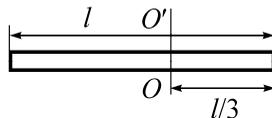
7. Снаряд массой 20 кг , летевший горизонтально со скоростью 500 м/с , попадает в платформу с песком массой 10 т и застревает в песке. С какой скоростью стала двигаться платформа от толчка?

8. Для определения скорости снаряда используют баллистический маятник (ящик с песком). Определите скорость снаряда, если его масса 10 кг , масса маятника 2 т и высота, на которую он поднялся после попадания в него снаряда, $H = 30 \text{ см}$. Какова работа деформации?

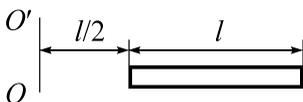
9. На полу лежит брусок массой 250 г , соединенный с вертикальной стеной недеформированной пружиной. Ось пружины горизонтальна, ее жесткость 100 Н/м , коэффициент трения $0,4$. На брусок начинает действовать постоянная сила 3 Н , направ-

ленная вдоль оси пружины. Найдите максимальную деформацию пружины.

10. Определите момент инерции тонкого стержня длиной l и массой m относительно оси, перпендикулярной стержню и отстоящей от конца стержня на одну треть длины (рисунок).



11. Под действием постоянного момента силы в $12 \text{ Н} \cdot \text{м}$ вращающееся тело в течение 3 с изменило угловую скорость с 10 до 28 рад/с . Чему равен момент инерции этого тела?



12. Определите момент импульса стержня массой m и длиной l , вращающегося с частотой ν вокруг оси OO' (рисунок).

13. Горизонтальная платформа (однородный диск радиусом R , m) массой 100 кг вращается вокруг вертикальной оси, проходящей через центр платформы, делая 1 об/с . Человек массой 60 кг стоит на расстоянии $R/4$ от центра платформы. Сколько оборотов в секунду будет делать платформа, если расстояние человека от центра станет равным 0 м ? Человек – точечная масса.

14. Шар и сплошной цилиндр, изготовленные из одного и того же материала, одинаковой массы катятся без скольжения с одинаковой скоростью. Определите, во сколько раз кинетическая энергия цилиндра больше кинетической энергии шара.

15. Горизонтальная платформа массой 100 кг вращается вокруг вертикальной оси, проходящей через центр платформы, делая $0,5 \text{ об/с}$. Человек массой 60 кг стоит на расстоянии 1 м от центра платформы. Когда человек переместился на расстояние 3 м от центра платформы, частота вращения стала равной $0,26 \text{ об/с}$. Платформа – однородный диск, человек – точечная масса. Найдите работу, совершаемую человеком.

16. В два цилиндрических сообщающихся сосуда наливают ртуть. Диаметр одного из сосудов вдвое больше другого. Широкий сосуд доливают водой до края. На какую высоту при этом

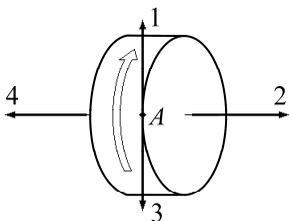
поднимется уровень ртути в другом сосуде? Первоначально уровень ртути был на расстоянии 10 см от верхнего края широкого сосуда. Плотность ртути $13,6 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$, воды – 10^3 кг/м^3 .

Модуль 1. Механика

Вариант 8

1. Движение точки задано уравнением $x = 4t - 0,05t^2$. Определите момент времени, в который скорость равна нулю.

2. Уравнение движения диска радиусом $R = 20 \text{ см}$ имеет вид $\varphi = 3 - t + 0,1t^3$, рад. Определите тангенциальное, нормальное и полное ускорения точек на окружности диска для момента времени $t = 10 \text{ с}$.



3. Диск равноускоренно вращается вокруг оси (рисунок). Направление вектора углового ускорения точки A на ободке диска совпадает со стрелкой...

4. Линейная скорость точек на окружности вращающегося диска равна 3 м/с . Точки, расположенные на $0,1 \text{ м}$ ближе к оси вращения, имеют линейную скорость 2 м/с . Каковы угловая скорость и частота вращения диска?

5. Груз массой 100 кг равноускоренно поднимают по наклонной плоскости, составляющей с горизонтом угол 30° . Коэффициент трения $k = 0,2$. Длина наклонной плоскости 2 м , время подъема 4 с . Определите силу тяги.

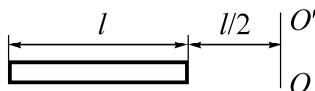
6. Ракета поднялась на высоту 1500 км . Как изменилась сила тяжести, действующая на ракету, на этой высоте по сравнению с силой тяжести у поверхности Земли? Радиус Земли 6400 км .

7. Материальная точка массой 1 кг равномерно движется по окружности со скоростью 10 м/с . Найдите модуль изменения импульса за $0,5$ периода.

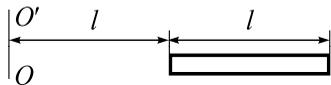
8. Какую работу совершил мальчик, стоящий на гладком льду, сообщив санкам скорость 4 м/с относительно льда, если масса санок 4 кг, а масса мальчика 20 кг?

9. На гладком полу лежит брусок массой 100 г, соединенный с вертикальной стеной недеформированной пружиной. Ось пружины горизонтальна, ее жесткость 250 Н/м. На брусок начинает действовать постоянная сила 4 Н, направленная вдоль оси пружины. Найдите максимальную скорость бруска.

10. Определите момент инерции стержня массой m и длиной l относительно оси, проходящей перпендикулярно стержню на расстоянии $l/2$ от его конца (рисунок).



11. Маховик, массу которого $m = 5$ кг можно считать равномерно распределенной по ободу радиусом 20 см, вращается с частотой $\nu = 720$ мин⁻¹. При торможении маховик останавливается через 20 с. Определите тормозящий момент.



12. Определите момент импульса стержня массой m и длиной l , вращающегося с частотой ν вокруг оси OO' (рисунок).

13. Горизонтальная платформа массой 200 кг вращается вокруг вертикальной оси, проходящей через центр платформы, делая 10 об/мин. Человек массой 60 кг стоит на расстоянии $R/2$ от центра платформы. Сколько оборотов в секунду будет делать платформа, если расстояние человека от центра станет равным R , м? Платформа – однородный диск радиусом R , м, человек – точечная масса.

14. Полная кинетическая энергия диска, катящегося по горизонтальной поверхности без скольжения, равна 24 Дж. Определите кинетическую энергию поступательного и вращательного движения диска.

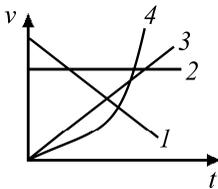
15. Шар массой m и радиусом R скатывается без скольжения вдоль наклонной плоскости с высоты h . Используя закон

сохранения энергии, найдите линейную скорость центра тяжести шара у основания наклонной плоскости.

16. В цилиндрический сосуд налиты ртуть и вода в равных по весу количествах. Общая высота двух слоев жидкостей равна 29,2 см. Определите давление жидкостей на дно сосуда. Плотность ртути $13,6 \text{ г/см}^3$.

Модуль 1. Механика

Вариант 9

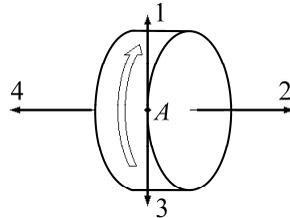


1. Какая из линий является графиком скорости равнозамедленного движения? Напишите уравнение для пути и скорости данного движения.

2. Точка движется по кривой с постоянным тангенциальным ускорением $0,7 \text{ м/с}^2$.

Определите полное ускорение точки на участке кривой с радиусом кривизны $R = 4 \text{ м}$, если точка движется на этом участке с линейной скоростью 3 м/с .

3. Диск равноускоренно вращается вокруг оси (рисунок). Направление вектора тангенциального ускорения точки A на ободе диска совпадает со стрелкой...



4. Колесо радиусом 10 см вращается с постоянным угловым ускорением. К концу пятого оборота после начала движения линейная скорость точек на ободе колеса равна $0,1 \text{ м/с}$. Определите угловое ускорение колеса.

5. В лифте, поднимающемся с ускорением 2 м/с^2 , находится человек массой 60 кг . Найдите вес человека.

6. Определите первую космическую скорость для Венеры. Масса Венеры $4,87 \cdot 10^{24} \text{ кг}$, радиус $6,05 \cdot 10^6 \text{ м}$.

7. Два неупругих тела, массы которых 2 и 6 кг, движутся навстречу друг другу со скоростями 2 м/с каждое. С какой скоростью по модулю будут двигаться эти тела после удара?

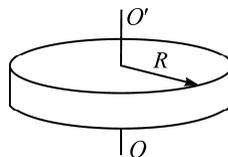
8. Свинцовый шар массой 500 г, движущийся со скоростью 10 м/с, соударяется с неподвижным шаром из воска, имеющим массу 200 г, после чего оба шара движутся вместе. Найдите кинетическую энергию шаров после соударения.

9. Два одинаковых тела массами по 5 кг соединены недеформированной пружиной жесткостью 15 Н/м и лежат на горизонтальном полу. Какую минимальную скорость, направленную вдоль оси пружины, надо сообщить одному из них, чтобы оно сдвинуло другое тело? Коэффициент трения для каждого тела 0,1.

10. Найдите момент инерции сплошного цилиндра относительно оси, совпадающей с одной из его образующих. Масса цилиндра m , радиус R .

11. К ободу колеса, имеющего форму диска радиусом 0,5 м и массой 60 кг, приложена касательная сила 98,1 Н. Найдите: 1) угловое ускорение колеса; 2) через какое время после начала действия силы колесо будет иметь скорость, соответствующую частоте 100 об/с.

12. Определите момент импульса диска массой m и радиусом R , вращающегося с частотой ν вокруг оси OO' (рисунок).



13. На горизонтальный диск, вращающийся вокруг геометрической оси с угловой скоростью $\omega_1 = 1,5$ рад/с, падает другой диск, вращающийся вокруг той же оси с угловой скоростью $\omega_2 = 1$ рад/с. Оба диска при ударе сцепляются друг с другом. Определите, какова будет угловая скорость вращения дисков после удара. Моменты инерции дисков относительно оси вращения соответственно равны $I_1 = 0,2$ кг·м², $I_2 = 0,3$ кг·м².

14. Диск массой 2 кг и радиусом 20 см катится без скольжения по горизонтальной поверхности, делая 4 об/с. Найдите полную кинетическую энергию диска.

15. Обруч массой m и радиусом R скатывается без скольжения вдоль наклонной плоскости с высоты h . Используя закон сохранения энергии, найдите линейную скорость центра обруча у основания наклонной плоскости.

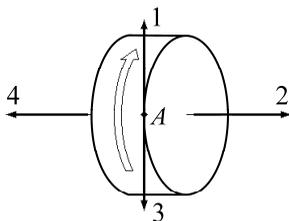
16. Какую силу нужно приложить, чтобы удержать в воде камень, вес которого в воздухе 100 Н ? Плотность камня $2,6 \cdot 10^3\text{ кг/м}^3$.

Модуль 1. Механика

Вариант 10

1. Уравнение движения точки имеет вид $x = t^3 + 2$, м. Определите: а) среднюю скорость в промежутке времени от 2 до 4 с; б) значение скорости в момент времени $t = 3$ с.

2. Движение точки по окружности радиусом $R = 4$ м задано уравнением $S = 10 - 2t + t^2$, м. Найдите тангенциальное, нормальное и полное ускорения точки в момент времени $t = 2$ с.



3. Диск равномерно вращается вокруг оси (рисунок). Направление вектора угловой скорости точки A на ободке диска совпадает со стрелкой...

4. Тело вращается равномерно, с начальной частотой 10 об/с .

После того как тело совершило 20 оборотов, его частота уменьшилась до 4 об/с . Найдите угловое ускорение и время торможения.

5. Конькобежец массой 68 кг , стоя на коньках на льду, бросает камень массой 4 кг со скоростью 5 м/с под углом 30° к горизонту. Какую скорость приобретает конькобежец сразу после броска?

6. Спутник планеты обращается по орбите радиусом $9,4 \cdot 10^6\text{ м}$ с периодом $7\text{ ч } 39\text{ мин}$. Определите массу планеты.

7. Тело массой 1 кг брошено под углом 45° к горизонту со скоростью 15 м/с. Определите потенциальную энергию тела через 1 с после начала движения.

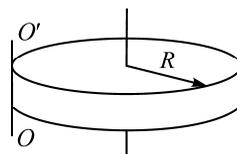
8. Пуля массой 20 г, выпущенная под углом к горизонту, в верхней точке траектории имеет кинетическую энергию 88,2 Дж. Найдите угол, если начальная скорость пули равна 600 м/с.

9. Тело массой 3 кг, лежащее на горизонтальной плоскости, соединено с вертикальной стеной недеформированной пружиной. Ось пружины горизонтальна, ее жесткость 54 Н/м, коэффициент трения между телом и плоскостью 0,3. Какую минимальную скорость надо сообщить телу вдоль оси пружины, чтобы оно вернулось в начальную точку?

10. Вычислите момент инерции проволочного прямоугольника со сторонами $a = 12$ см и $b = 16$ см относительно оси, лежащей в плоскости прямоугольника и проходящей через середины малых сторон. Масса равномерно распределена по длине проволоки с линейной плотностью $\tau = 0,1$ кг/м.

11. Тонкий однородный стержень длиной 50 см и массой 400 г вращается с угловым ускорением $\epsilon = 3$ рад/с² около оси, проходящей перпендикулярно стержню через его середину. Определите вращающий момент M .

12. Определите момент импульса диска массой m и радиусом R , вращающегося с частотой ν вокруг оси OO' (рисунок).



13. Горизонтальная платформа массой 100 кг вращается вокруг вертикальной оси, проходящей через центр платформы, делая 1 об/с. Человек массой 60 кг стоит на расстоянии $R/4$ от центра платформы. Сколько оборотов в секунду будет делать платформа, если расстояние человека от центра станет равным 0 м? Платформа – однородный диск радиусом R , м, человек – точечная масса.

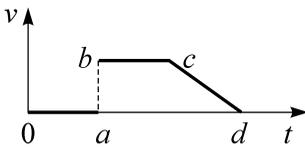
14. Обруч массой 2 кг и радиусом 1 м катится равномерно без скольжения по горизонтальной поверхности и за 5 с проходит 10 м. Какова его кинетическая энергия?

15. Мальчик катит обруч по горизонтальной дороге со скоростью 7,2 км/ч. На какое расстояние может вкатиться обруч на горку за счет своей кинетической энергии? Уклон горки 10 м на каждые 100 м пути.

16. На тело, погруженное в воду, действует сила Архимеда, составляющая седьмую часть его веса в воздухе. Определите плотность тела.

Модуль 1. Механика

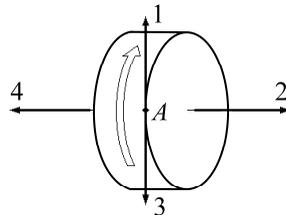
Вариант 11



1. На рисунке изображен график зависимости скорости некоторого тела от времени. Постройте графики зависимости ускорения и пути от времени.

2. Диск, брошенный под углом 45° к горизонту, достиг наибольшей высоты через 2 с. Какова дальность полета диска?

3. Диск равномерно вращается вокруг оси (рисунок). Направление вектора углового ускорения точки A на ободе диска совпадает со стрелкой...



4. Колесо вращается с постоянной частотой 120 об/мин. С некоторого момента времени колесо тормозится и вращается равнозамедленно с угловым ускорением, численно равным 2 рад/с^2 . Через сколько времени колесо остановится? Сколько оборотов сделает оно до остановки?

5. Снаряд, летевший со скоростью 400 м/с, разорвался на два осколка. Меньший осколок, масса которого составляет 40 % от массы снаряда, полетел в противоположном направлении со скоростью 150 м/с. Определите скорость большего осколка.

6. С какой минимальной скоростью летает спутник Земли на высоте 600 км? Радиус Земли 6400 км, ускорение свободного падения на этой высоте $9,1 \text{ м/с}^2$.

7. На сколько изменится потенциальная энергия бруска массой 200 кг, если его перевести из горизонтального положения в вертикальное? Брусок имеет квадратное сечение со стороной 20 см и длину 1 м.

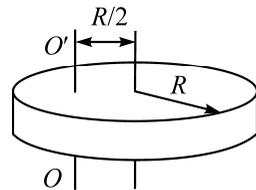
8. Свая массой 100 кг забивают в грунт копром, масса которого 400 кг. Копер свободно падает с высоты 5 м, и при каждом его ударе свая опускается на глубину 5 см. Определите силу сопротивления грунта, считая ее постоянной.

9. К нижнему концу пружины жесткостью k_1 присоединена другая пружина жесткостью k_2 , к концу которой прикреплена гиря. Пренебрегая массой пружин, определите отношение их потенциальных энергий.

10. Определите момент инерции диска массой m и радиусом R относительно оси, параллельной оси диска и проходящей через середину радиуса.

11. На горизонтальную ось насажены маховик и легкий шкив радиусом $R = 5 \text{ см}$. На шкив намотан шнур, к которому привязан груз массой $m = 0,4 \text{ кг}$. Опускаясь равноускоренно, груз за 3 с прошел путь 1,8 м. Определите момент инерции маховика. Массу шкива считать пренебрежимо малой.

12. Определите момент импульса диска массой m и радиусом R , вращающегося с частотой ν вокруг оси OO' (рисунок).



13. На скамье Жуковского, вращающейся около вертикальной оси, с частотой $\nu_1 = 0,3 \text{ об/с}$, стоит человек и держит на вытянутых руках две гири. Расстояние между гирями 1,5 м. Когда человек опускает руки, расстояние между гирями становится равным 0,4 м, а частота вращения – $0,5 \text{ об/с}$. Момент инерции человека и скамьи $10 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$. Определите массу одной гири.

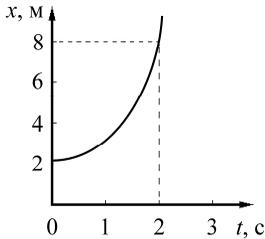
14. Диск массой 5 кг и радиусом 0,5 м катится равномерно без скольжения по горизонтальной поверхности и за 15 с проходит 45 м. Какова его кинетическая энергия?

15. Вентилятор вращается со скоростью, соответствующей частоте 900 об/мин. После выключения вентилятор, вращаясь равнозамедленно, сделал до остановки 75 оборотов. Работа сил торможения равна 44,4 Дж. Найдите: 1) момент инерции вентилятора; 2) момент сил торможения.

16. В сосуд с водой вставлена трубка сечением $S = 2 \text{ см}^2$. В трубку налили 72 г масла ($\rho_{\text{масла}} = 900 \text{ кг/м}^3$). Найдите разность уровней масла и воды.

Модуль 1. Механика

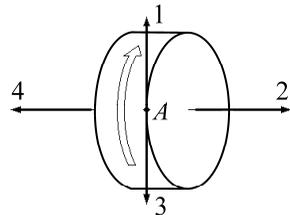
Вариант 12



1. График зависимости координаты тела x имеет вид, указанный на рисунке. Найдите зависимость $x = x(t)$ и укажите, какое это движение.

2. Тело брошено под углом 30° к горизонту. Чему равно тангенциальное ускорение в начальный момент времени?

3. Диск равнозамедленно вращается вокруг оси (рисунок). Направление вектора тангенциального ускорения точки A на ободе диска совпадает со стрелкой ...



4. Маховик вращается с частотой 60 об/мин. Начиная с некоторого момента времени маховик тормозит и вращается равнозамедленно с угловым ускорением 10 рад/с^2 . Сколько оборотов он сделает до остановки?

5. Пуля вылетает из ствола винтовки со скоростью 880 м/с. Масса пули 10 г, масса винтовки 3,5 кг. При выстреле винтовка

плотно прижата к плечу человека. Определите скорость человека при отдаче, если его масса 76,5 кг.

6. Спутник движется вокруг планеты по орбите радиусом $6 \cdot 10^9$ м со скоростью $4 \cdot 10^4$ м/с. Какова плотность планеты, если ее радиус $4 \cdot 10^8$ м?

7. Найдите работу подъема груза по наклонной плоскости длиной 2 м, если масса груза 100 кг, угол наклона $\alpha = 30^\circ$, коэффициент трения $\mu = 0,1$ и груз движется с ускорением 1 м/с^2 .

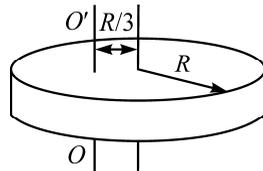
8. Пуля, пробив доску толщиной 3,6 см, продолжает лететь со скоростью, равной 80 % от начальной скорости. Какой максимальной толщины доску из того же материала она может пробить? Силу сопротивления материала доски считать постоянной, а движение пули прямолинейным.

9. Легкая пружина установлена вертикально на столе. На нее падает стальной шар массой 250 г. Чему равно максимальное сжатие пружины, если в начальный момент шар находился на высоте 40 см от поверхности стола? Жесткость пружины 50 Н/м, длина в недеформированном состоянии 30 см.

10. Определите момент инерции тонкого однородного стержня длиной $l = 50$ см и массой $m = 300$ г относительно оси, проходящей через точку, отстоящую от конца стержня на $1/6$ его длины.

11. Маховик в форме сплошного однородного диска имеет массу 50 кг и радиус 0,2 м. Он раскручен до частоты $\nu = 8$ об/с и затем предоставлен самому себе. Под влиянием силы трения, приложенной по касательной к ободу, он остановился через 50 с. Определите силу трения, считая ее постоянной.

12. Определите момент импульса диска массой m и радиусом R , вращающегося с частотой ν вокруг оси OO' (рисунок).



13. На скамье Жуковского, вращающейся около вертикальной оси с частотой $\nu_1 = 1$ об/с, стоит человек и держит на вытянутых руках две гири массой 4 кг каждая. Расстояние между гирями 1,4 м. Когда че-

ловек опускает руки, расстояние между гирями становится равным 0,5 м, а частота вращения – 4 об/с. Определите момент инерции I человека и скамьи.

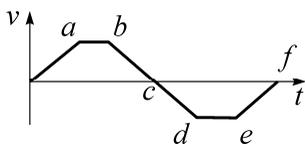
14. Кинетическая энергия вала, вращающегося с постоянной угловой скоростью 20 рад/с, равна 40 Дж. Найдите момент импульса вала относительно оси вращения.

15. Шар скатывается с наклонной плоскости высотой $h = 1$ м. Какую линейную скорость будет иметь центр шара в тот момент, когда шар скатится с плоскости?

16. В цилиндрический сосуд налиты ртуть и вода, причем их массы одинаковы. Общая высота столба жидкости 1 м. Определите давление на дно сосуда. Плотность ртути $13,6 \cdot 10^3$ кг/м³.

Модуль 1. Механика

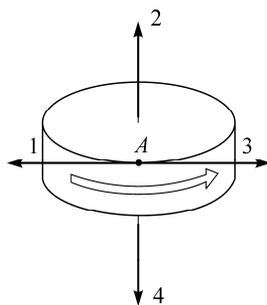
Вариант 13



1. На рисунке изображен график зависимости скорости некоторого тела от времени. Постройте графики ускорения и пути.

2. Тело брошено под углом 30° к горизонту. Чему равно нормальное ускорение в начальный момент времени?

3. Диск равноускоренно вращается вокруг оси (рисунок). Направление вектора угловой скорости точки A на ободе диска совпадает со стрелкой...



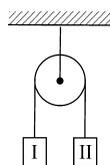
4. На цилиндр, который может вращаться около горизонтальной оси, намотана нить. К концу нити привязали груз и предоставили ему возможность опускаться. Двигаясь равноускоренно, груз за 3 с опустился на 1,5 м. Найдите угловое ускорение цилиндра, если его радиус равен 4 см.

5. Старинная пушка, не имеющая противооткатного устройства, стреляет под углом $\alpha = 40^\circ$ к горизонту. Масса ядра $m = 10$ кг, скорость $v_0 = 200$ м/с. Какова будет скорость отката пушки, если ее масса $M = 500$ кг? Трение не учитывать.

6. Найдите радиус круговой орбиты искусственного спутника Земли, имеющего период обращения 1 сут. Масса Земли $6 \cdot 10^{24}$ кг.

7. Материальная точка с массой $m = 10$ кг движется по прямой согласно уравнению $S = 4 + 2t^3$ под действием некоторой силы. Найдите мгновенную мощность в момент времени $t = 2$ с.

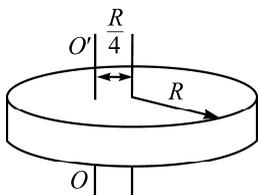
8. К потолку подвешен легкий блок. Через блок перекинута невесомая и нерастяжимая нить грузами массой $m_1 = 5$ кг и $m_2 = 3$ кг. На сколько возрастет потенциальная энергия второго груза через 2 с после начала движения?



9. Груз массой 100 г, подвешенный на пружине жесткостью 100 Н/м, сначала находится на подставке. Пружина при этом не деформирована. Подставку быстро убирают. Определите максимальную скорость груза.

10. Однородный диск массой m и радиусом R вращается относительно оси, перпендикулярной плоскости диска и проходящей через его край. Определите момент инерции диска.

11. С какой силой следует прижать тормозную колодку к колесу, делающему 30 об/с, для его остановки в течение 30 с, если масса колеса равномерно распределена по ободу и равна 10 кг? Диаметр колеса $d = 20$ см, коэффициент трения между колодкой и ободом колеса $k = 0,5$.



12. Определите момент импульса диска массой m и радиусом R , вращающегося с частотой ν вокруг оси OO' (рисунки).

13. На скамье Жуковского, вращающейся около вертикальной оси с частотой

той $v_1 = 1$ об/с, стоит человек и держит на вытянутых руках две гири массой 5 кг каждая. Расстояние между гирями 1,5 м. Когда человек опускает руки, расстояние между гирями становится равным 0,4 м. Момент инерции человека и скамьи $I = 8 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$. Определите частоту вращения v_2 после опускания гирь.

14. Обруч и диск одинаковой массы катятся без скольжения с одинаковой скоростью. Кинетическая энергия обруча равна 4 Дж. Найдите кинетическую энергию диска.

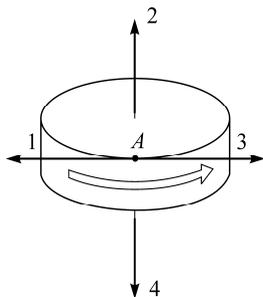
15. Шар массой 0,5 кг и радиусом $R = 0,1$ м вращается вокруг оси, проходящей через его центр. В некоторый момент времени на шар начинает действовать сила, в результате чего угол поворота шара (рад) изменяется по закону $\varphi = 2 + 3t + t^2$. Определите работу, совершенную силой за время $t = 2$ с.

16. В сообщающихся сосудах с разными диаметрами налита ртуть. После того как в узкое колено налили воду, высота которой 1 м, в широком колене уровень ртути повысился на 1 см относительно своего первоначального уровня. Во сколько раз диаметр широкого колена больше диаметра узкого?

Модуль 1. Механика

Вариант 14

1. Зависимость координаты тела от времени дается уравнением $x = A + Bt + Ct^2$, где $A = 3$ м, $B = 2$ м/с, $C = 1$ м/с². Найдите среднюю скорость и среднее ускорение тела за вторую секунду его движения.



2. Камень брошен с вышки высотой 19,6 м в горизонтальном направлении с начальной скоростью 10 м/с. На каком расстоянии от вышки он упадет на Землю?

3. Диск равноускоренно вращается вокруг оси (рисунок). Направление вектора углового ускорения точки A на ободе диска совпадает со стрелкой...

4. Маховик получил начальную угловую скорость 2 рад/с . Сделав 10 оборотов, он, вследствие трения в подшипниках, остановился. Найдите угловое ускорение маховика, считая его постоянным.

5. Снаряд массой 10 кг , летящий горизонтально вдоль железнодорожного пути со скоростью 500 м/с , попадает в вагон с песком массой 10 т и застревает в нем. Какую скорость получит вагон, если: 1) вагон стоял неподвижно; 2) вагон двигался со скоростью 36 км/ч в направлении, противоположном движению снаряда; 3) вагон двигался со скоростью 36 км/ч в том же направлении, что и снаряд.

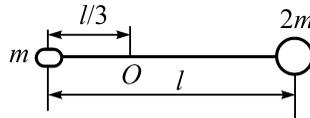
6. Спутник движется вокруг планеты по орбите радиусом $4,7 \cdot 10^9 \text{ м}$ со скоростью 10^4 м/с . Какова плотность планеты, если ее радиус $15 \cdot 10^7 \text{ м}$?

7. Тело массой 1 кг , брошенное вертикально вверх, через промежуток времени, равный половине времени подъема на максимальную высоту, находилось на высоте 9 м над точкой броска. Определите потенциальную энергию тела в высшей точке подъема.

8. Какую минимальную работу надо совершить, чтобы по наклонной плоскости с углом наклона 30° втащить груз массой 400 кг на высоту 2 м при коэффициенте трения $0,3$?

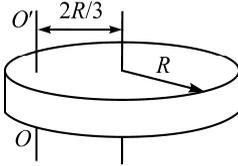
9. На горизонтальном столе лежат два бруска массами 1 кг и 3 кг , соединенных легкой пружиной. Какую наименьшую постоянную горизонтальную силу надо приложить к первому бруску, чтобы сдвинулся второй? Коэффициент трения брусков о поверхность одинаков и равен $0,2$. В начальный момент пружина не деформирована.

10. На концах однородного тонкого стержня длиной 1 м и массой $3m$ прикреплены маленькие шарики массами m и $2m$. Определите момент



инерции такой системы относительно оси, перпендикулярной стержню и проходящей через точку O , лежащую на оси стержня. Принять $m = 0,1$ кг.

11. Вал массой 100 кг и радиусом 5 см вращался с частотой 8 об/с. К цилиндрической поверхности вала прижали тормозную колодку с силой $F = 40$ Н, под действием которой вал остановился через 10 с. Определите коэффициент трения.



12. Определите момент импульса диска массой m и радиусом R , вращающегося с частотой ν вокруг оси OO' (рисунок).

13. Фигурист вращается с частотой $\nu_1 = 4$ об/с. Как и во сколько раз изменится момент инерции фигуриста, если он прижмет руки к груди и при этом частота вращения станет равной $\nu_2 = 6$ об/с?

14. Найдите кинетическую энергию велосипедиста, едущего со скоростью $\nu = 9$ км/ч. Масса велосипедиста вместе с велосипедом $M = 78$ кг, причем на колеса приходится масса $m = 3$ кг. Колеса велосипеда считать обрусцами.

15. Маховик в виде диска массой $m = 80$ кг и радиусом $R = 30$ см находится в состоянии покоя. Какую работу нужно совершить, чтобы сообщить маховику частоту $\nu = 10$ с⁻¹?

16. Определите наименьшую площадь плоской льдины толщиной 40 см, способной удержать на воде человека массой 75 кг. Плотность льда 0,9 г/см³.

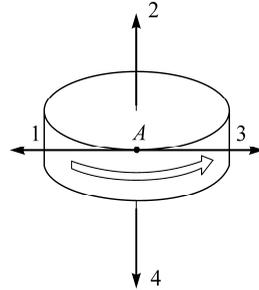
Модуль 1. Механика

Вариант 15

1. Уравнение движения точки имеет вид $x = 2t^3 + 2t^2 - t$, м. Определите: а) среднюю скорость в промежутке времени от 2 до 4 с; б) значение скорости в момент времени $t = 3$ с.

2. Камень брошен с вышки в горизонтальном направлении с начальной скоростью 30 м/с. Каким будет тангенциальное ускорение камня через 2 с после начала движения.

3. Диск равноускоренно вращается вокруг оси (рисунок). Направление вектора тангенциального ускорения точки A на ободе диска совпадает со стрелкой...



4. Маховик начал вращаться равноускоренно и, сделав 20 полных оборотов, приобрел угловую скорость, соответствующую 20 об/с. Определите угловое ускорение маховика и продолжительность вращения.

5. Две гири с массами 3 и 6,8 кг висят на концах нити, перекинутой через легкий блок. Первая гиря находится на 2 м ниже второй. Гири пришли в движение без начальной скорости. Через какое время они окажутся на одной высоте?

6. Радиус Солнца примерно в 110 раз больше радиуса Земли, а средняя плотность Солнца относится к средней плотности Земли, как 1:4. Найдите ускорение свободного падения у поверхности Солнца, если ускорение свободного падения на поверхности Земли 10 м/с^2 .

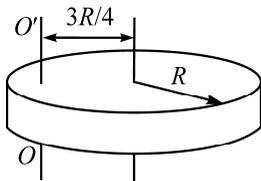
7. Камень массой 300 г, брошенный с крыши дома горизонтально с начальной скоростью 15 м/с, упал на землю под углом 60° к горизонту. Какова потенциальная энергия камня на крыше?

8. На гладкой горизонтальной поверхности лежит брусок. Пуля, летящая горизонтально со скоростью 600 м/с, пробивает брусок и вылетает из него со скоростью 300 м/с. Масса пули 9 г, масса бруска 5 кг. Сколько кинетической энергии было потеряно при движении пули в бруске? Траекторию пули считать прямолинейной.

9. Груз массой 100 г, подвешенный на пружине жесткостью 100 Н/м, сначала находится на подставке. Пружина при этом не деформирована. Подставку быстро убирают. Определите максимальное удлинение пружины.

10. Найдите момент инерции сплошного однородного шара относительно оси, совпадающей с касательной к шару. Масса шара m , радиус шара R .

11. Две гири разного веса соединены нитью и перекинуты через блок, момент инерции которого $50 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$, радиус 20 см . Разность натяжений нити по обе стороны блока равна 25 Н . С каким ускорением движутся гири?



12. Определите момент импульса диска массой m и радиусом R , вращающегося с частотой ν вокруг оси OO' (рисунок).

13. На скамье Жуковского, вращающейся около вертикальной оси с частотой $\nu_1 = 1 \text{ об/с}$, стоит человек и держит на вытянутых руках две гири массой 5 кг каждая. Расстояние между гирями $1,5 \text{ м}$. Когда человек опускает руки, расстояние между гирями становится равным $0,4 \text{ м}$. Момент инерции человека и скамьи $I = 8 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$. Определите частоту вращения ν_2 после опускания гирь.

14. Маховое колесо начинает вращаться с угловым ускорением $\varepsilon = 0,5 \text{ рад/с}^2$ и через время $t_1 = 15 \text{ с}$ после начала движения приобретает момент импульса $L = 73,5 \text{ кг}\cdot\text{м}^2/\text{с}$. Найдите кинетическую энергию колеса через 20 с после начала движения.

15. Медный шар радиусом $R = 10 \text{ см}$ вращается с частотой $n = 2 \text{ об/с}$ вокруг оси, проходящей через его центр. Какую работу надо совершить, чтобы увеличить угловую скорость вращения шара вдвое?

16. Тело плавает на поверхности ртути так, что в ртуть погружена четверть его объема. Определите плотность тела. Плотность ртути $13,6 \text{ г/см}^3$.

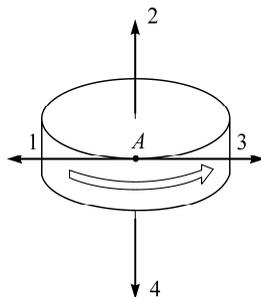
Модуль 1. Механика

Вариант 16

1. Материальная точка движется вдоль оси Ox так, что ее координата зависит от времени по закону $x = 3 + 5t - t^2$, м. Определите путь пройденный точкой за третью секунду движения.

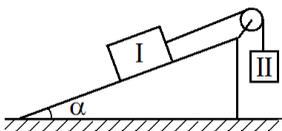
2. Камень брошен с вышки в горизонтальном направлении с начальной скоростью 30 м/с. Каким будет нормальное ускорение камня через 2 с после начала движения?

3. Диск равнозамедленно вращается вокруг оси (рисунок). Направление вектора угловой скорости точки A на ободу диска совпадает со стрелкой...



4. Диск радиусом 10 см, находившийся в состоянии покоя, начал вращаться с постоянным угловым ускорением $0,5 \text{ рад/с}^2$. Каковы были тангенциальное, нормальное и полное ускорения точек на окружности диска в конце второй секунды после начала вращения?

5. Два бруска (рисунок) массой $m_1 = 5 \text{ кг}$ и $m_2 = 3 \text{ кг}$ связаны нитью, перекинутой через невесомый блок. Брусок I может без трения скользить по плоскости, образующей с горизонтом угол 30° . Определите ускорение движения брусков.

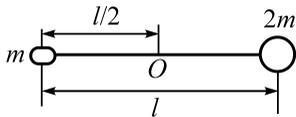


6. Каким должен быть радиус круговой орбиты искусственного спутника Земли, для того чтобы он всё время находился над одной точкой земной поверхности на экваторе? Масса Земли $6 \cdot 10^{24} \text{ кг}$.

7. Снаряд массой 5 кг летит со скоростью 100 м/с и разрывается на два осколка так, что они летят во взаимно перпендикулярных направлениях. Меньший, массой 2 кг, летит после взрыва со скоростью 200 м/с. Найдите скорость большего осколка.

8. Во сколько раз отличаются друг от друга максимальные потенциальные энергии двух тел, брошенных под углами 60° и 30° к горизонту с одинаковыми (по модулю) скоростями?

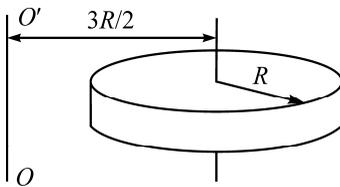
9. На горизонтальной поверхности лежит брусок массой 2 кг. К бруску прикреплена пружина жесткостью 100 Н/м. К свободному концу пружины приложили горизонтальную силу, растягивающую пружину. Какую работу совершит сила к моменту, когда брусок начнет скользить? Коэффициент трения между бруском и поверхностью 0,5.



10. На концах однородного тонкого стержня длиной 1 м и массой $3m$ прикреплены маленькие шарики массами m и $2m$. Определите момент инерции такой системы относительно оси, перпендикулярной стержню и проходящей через точку O , лежащую на оси стержня. Принять $m = 0,1$ кг.

11. Две гири разного веса соединены нитью и перекинута через блок, момент инерции которого $0,05 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$, радиус 20 см. Гири движутся с ускорением $0,02 \text{ м/с}^2$. Чему равна при этом разность натяжений нити по обе стороны блока? Трением блока пренебречь. Скольжения нити о блок нет.

12. Определите момент импульса диска массой m и радиусом R , вращающегося с частотой ν вокруг оси OO' (рисунок).



13. Горизонтальная платформа – однородный диск радиусом R , массой 100 кг вращается вокруг вертикальной оси, проходящей через центр платформы, делая 1 об/с. Человек массой 70 кг стоит на расстоянии $R/4$ от центра платформы. Сколько оборотов в секунду будет делать платформа, если расстояние человека от центра станет равным 0 м? Человек – точечная масса.

14. Маховик, момент инерции которого равен $25 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$, начал вращаться равноускоренно из состояния покоя под действием момента силы $M = 10 \text{ Н} \cdot \text{м}$. Вращение продолжалось в течение 5 с. Определите кинетическую энергию, приобретенную маховиком.

15. Колесо, вращаясь равнозамедленно, за 1 мин уменьшило частоту вращения от 300 до 180 об/мин. Момент инерции колеса $I = 2 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$. Найдите работу сил торможения.

16. В цилиндрический сосуд радиусом 10 см налита вода. В сосуд опускают деревянный брусок массой 628 г. На сколько поднимется уровень воды?

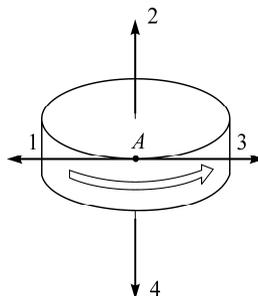
Модуль 1. Механика

Вариант 17

1. Материальная точка движется вдоль оси OX так, что ее координата зависит от времени по закону $x = 5 - 4t + t^2$, м. Определите путь, пройденный точкой за промежуток времени $0 \leq \Delta t \leq 4$ с.

2. Точка движется по окружности радиусом $R = 2$ м согласно уравнению $S = 2t^3$, м. В какой момент времени нормальное ускорение точки будет равно тангенциальному? Чему будет равно полное ускорение в этот момент времени?

3. Диск равнозамедленно вращается вокруг оси (рисунок). Направление вектора углового ускорения точки A на ободу диска совпадает со стрелкой...



4. Колесо вращается с постоянным угловым ускорением 2 рад/с^2 . Через 0,5 с после начала движения полное ускорение колеса стало равным $13,6 \text{ см/с}^2$. Найдите радиус колеса.

5. Два человека с массами 70 и 80 кг стоят на роликовых коньках друг против друга. Первый бросает второму груз массой 10 кг со скоростью, горизонтальная составляющая которой 5 м/с относительно Земли. Найдите скорость первого человека после бросания груза и скорость второго после того, как он поймает груз. Трения нет.

6. Найдите период обращения Луны вокруг Земли, если Луна движется по круговой орбите радиусом $3,8 \cdot 10^8$ м. Масса Земли $6 \cdot 10^{24}$ кг.

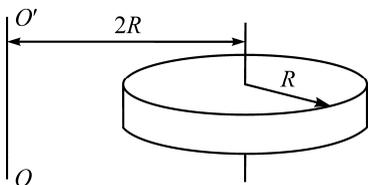
7. Груз массой 100 кг равноускоренно поднимают по наклонной плоскости, составляющей с горизонтом угол 30° . Коэффициент трения $\mu = 0,2$. Длина наклонной плоскости 2 м, время подъема 4 с. Определите работу при подъеме и кинетическую энергию в конце подъема.

8. На тонкой нити длиной 1 м висит шар массой 1 кг. Пуля массой 10 г, летящая горизонтально со скоростью 600 м/с, пробив шар, вылетает из него со скоростью 300 м/с. На какой угол отклонилась нить с шаром после взаимодействия с пулей?

9. Железнодорожный вагон массой 20 т надвигается на упор со скоростью 0,2 м/с. Обе буферные пружины вагона сжимаются, каждая на 4 см. Определите максимальное значение силы, действующей на каждую пружину.

10. Найдите момент инерции однородного шара относительно оси, проходящей через середину радиуса и перпендикулярно к нему. Масса шара m , радиус R .

11. Шар массой 10 кг и радиусом 20 см вращается вокруг оси, проходящей через его центр. Уравнение вращения шара имеет вид $\varphi = A + Bt^2 + Ct^3$, где $B = 4$ рад/с², $C = 1$ рад/с³. Определите момент сил M в момент времени $t = 2$ с.



12. Определите момент импульса диска массой m и радиусом R , вращающегося с частотой ν вокруг оси OO' (рисунок).

13. На скамье Жуковского, вращающейся около вертикальной оси с частотой $\nu_1 = 1$ об/с, стоит человек и держит на вытянутых руках ($l_1 = 1,5$ м) две гири. Когда человек опускает руки, расстояние между гирями становится равным 0,4 м, а частота вращения – 1,5 об/с. Момент инерции человека и скамьи $10 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$. Определите массу одной гири.

14. Сплошной диск массой 2 кг катится без скольжения по горизонтальной поверхности. Линейная скорость оси цилиндра равна 2 м/с. Определите полную кинетическую энергию цилиндра.

15. По ободу шкива, насаженного на общую ось с маховиком, намотана нить, к концу которой подвешен груз массой 1 кг. На какое расстояние h должен опуститься груз, чтобы маховик со шкивом получил частоту вращения 60 об/мин? Момент инерции маховика со шкивом $I = 0,42 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$, радиус шкива $R = 10 \text{ см}$.

16. Медный шар с внутренней полостью весит в воздухе 2,64 Н, в воде 2,21 Н. Определите объем внутренней полости шара. Плотность меди $8,8 \text{ г/см}^3$.

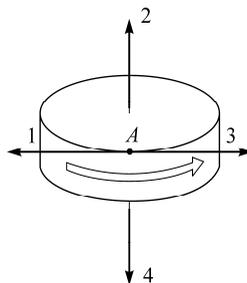
Модуль 1. Механика

Вариант 18

1. Поезд первые 10 км ехал со скоростью 30 км/ч, вторые 10 км – со скоростью 40 км/ч, третьи 10 км – со скоростью 60 км/ч. Какова средняя скорость на всем пути?

2. С вышки бросили камень в горизонтальном направлении. Через 2 с камень упал на землю на расстоянии 40 м от основания вышки. Определите начальную v_0 и конечную v скорости камня.

3. Диск равномерно замедленно вращается вокруг оси (рисунок). Направление вектора тангенциального ускорения точки A на ободу диска совпадает со стрелкой...



4. Колесо, вращаясь равноускоренно, достигло угловой скорости 20 рад/с через 10 оборотов после начала вращения. Найдите угловое ускорение.

5. С платформы массой 20 т, движущейся со скоростью 7,2 км/ч, производится выстрел из пушки по направлению движения. Снаряд массой 25 кг вылетает из орудия со скоростью

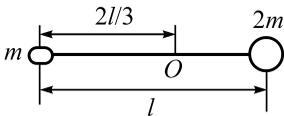
700 м/с. Найдите скорость платформы непосредственно после выстрела.

6. Определите высоту, на которой ускорение свободного падения составляет 25 % от ускорения свободного падения на поверхности Земли.

7. Автомобиль массой 1 т трогается с места и равноускоренно проходит путь 20 м за время 2 с. Какую среднюю мощность развивает мотор автомобиля?

8. Шарик массой 9 г подвешен на нити, имеющей длину 5 м. Шарик отклоняют от положения равновесия на угол 90° и отпускают без толчка. В тот момент, когда шарик проходит положение равновесия, на него садится муха массой 1 г, летевшая горизонтально навстречу шару со скоростью 1 м/с. На какую максимальную высоту поднимутся шарик с мухой?

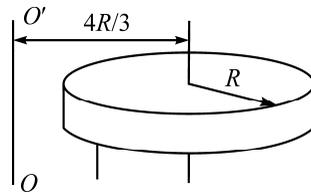
9. При подготовке игрушечного пистолета к выстрелу пружину с жесткостью 800 Н/м сжали на 5 см. Какую скорость приобретает пуля массой 20 г при выстреле в горизонтальном направлении?



10. На концах однородного тонкого стержня длиной 1 м и массой $3m$ прикреплены маленькие шарики массами m и $2m$. Определите момент инерции такой системы относительно оси, перпендикулярной стержню и проходящей через точку O , лежащую на оси стержня. Принять $m = 0,1$ кг.

11. К ободу однородного сплошного диска радиусом 0,5 м приложена постоянная касательная сила 100 Н. При вращении диска на него действует момент сил трения $M_{тр} = 2$ Н·м. Определите массу диска, если угловое ускорение постоянно и равно 16 рад/с².

12. Определите момент импульса диска массой m и радиусом R , вращающегося с частотой ν вокруг оси OO' (рисунок).



13. На скамье Жуковского, вращающейся около вертикальной оси с частотой $\nu_1 = 1$ об/с, стоит человек и держит на вытянутых руках две гири массой 5 кг каждая. Расстояние между гирями 1,5 м. Когда человек опускает руки, расстояние между гирями становится равным 0,4 м. Момент инерции человека и скамьи $I = 8 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$. Определите частоту вращения ν_2 после опускания гирь.

14. Обруч и сплошной цилиндр, имеющие одинаковую массу $m = 2 \text{ кг}$, катятся без скольжения с одинаковой скоростью 2 м/с. Определите отношение кинетических энергий этих тел.

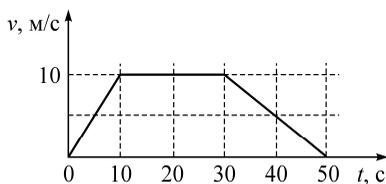
15. Однородный стержень длиной 1 м подвешен на горизонтальной оси, проходящей через верхний конец стержня. Какую скорость надо сообщить нижнему концу стержня, чтобы он сделал полный оборот вокруг оси?

16. Цистерна имеет форму лежащего на боку цилиндра диаметром 1 м. Через отверстие в верхней части цистерну доверху заполнили водой. С какой силой действует вода на вертикальную стенку цистерны?

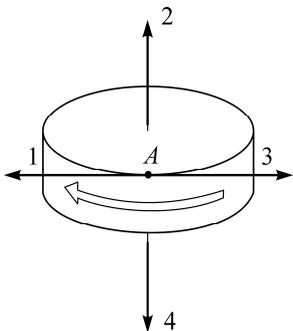
Модуль 1. *Механика*

Вариант 19

1. На рисунке представлен график зависимости модуля скорости v автомобиля от времени t . Определите по графику путь, пройденный автомобилем в интервале времени от 10 до 50 с после начала движения.



2. Пуля пущена с начальной скоростью $v_0 = 200 \text{ м/с}$ под углом $\alpha = 60^\circ$ к горизонту. Определите радиус кривизны траектории пули в ее наивысшей точке. Сопротивлением воздуха пренебречь.



3. Диск равноускоренно вращается вокруг оси (рисунок). Направление вектора угловой скорости точки A на ободе диска совпадает со стрелкой...

4. Найдите радиус вращающегося колеса, если известно, что линейная скорость точки, лежащей на ободе колеса, в 2,5 раза больше линейной скорости точки, лежащей на 5 см ближе к оси колеса.

5. Масса ракеты с топливом 20 кг. С какой скоростью будет двигаться ракета после вылета из нее 1 кг продуктов сгорания топлива со скоростью 2 км/с? Считать, что топливо сгорает мгновенно.

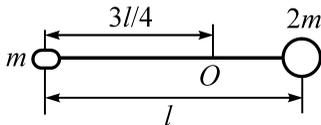
6. Два алюминиевых шарика ($\rho = 2700 \text{ кг/м}^3$) радиусами $r_1 = 3 \text{ см}$ и $r_2 = 5 \text{ см}$ соприкасаются друг с другом. Определите силу их взаимодействия.

7. Камень массой 1 кг свободно падает с высоты 20 м и в момент падения на землю имеет скорость 18 м/с. Какая работа по преодолению сопротивления воздуха была совершена при падении?

8. Для того чтобы сообщить телу скорость 2 м/с, необходимо совершить работу 10 Дж. Какую следует совершить работу, чтобы увеличить скорость еще на 2 м/с?

9. Вычислите работу силы упругости при изменении деформации пружины жесткостью 200 Н/м от 2 до 6 см.

10. На концах однородного тонкого стержня длиной 1 м и массой $3m$ прикреплены маленькие шарики массами m и $2m$. Определите момент инерции такой системы относительно оси, перпендикулярной стержню и проходящей через точку O , лежащую на оси стержня. Принять $m = 0,1 \text{ кг}$.



11. Маховое колесо, имеющее момент инерции $245 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$, вращается, делая 20 об/с . Через минуту после того, как на колесо перестал действовать вращающий момент, оно остановилось. Найдите: 1) момент сил трения; 2) число оборотов колеса до полной остановки.

12. Определите момент импульса шара массой m и радиусом R , вращающегося с частотой ν вокруг оси, проходящей через его центр.

13. Горизонтальная платформа массой 200 кг вращается вокруг вертикальной оси, проходящей через центр платформы, делая 10 об/мин . Человек массой 60 кг стоит на расстоянии $R/2$ от центра платформы. Сколько оборотов в секунду будет делать платформа, если расстояние человека от центра станет равным R , м? Платформа – однородный диск радиусом R , м, человек – точечная масса.

14. Полная кинетическая энергия шара, катящегося по горизонтальной поверхности без скольжения, равна 14 Дж . Определите кинетическую энергию поступательного и вращательного движения шара.

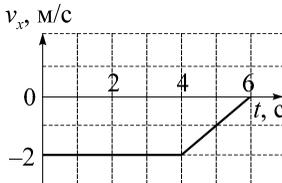
15. Сплошной цилиндр скатился с наклонной плоскости высотой $h = 15 \text{ см}$. Какую скорость поступательного движения будет иметь цилиндр в конце наклонной плоскости?

16. В сообщающиеся сосуды с ртутью долили: в один сосуд столб масла ($\rho_m = 900 \text{ кг/м}^3$) высотой 30 см , в другой – столб воды высотой $20,2 \text{ см}$. Определите разность уровней ртути в сосудах. Плотность ртути $13,6 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$.

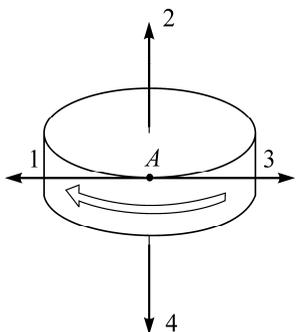
Модуль 1. Механика

Вариант 20

1. Тело движется вдоль оси OX . На графике показана зависимость проекции скорости тела на ось OX от времени. Каков путь, пройденный телом к моменту времени $t = 6 \text{ с}$?



2. Точка движется по окружности радиусом $R = 0,1$ м с постоянным тангенциальным ускорением. Найдите тангенциальное ускорение точки, если известно, что к концу пятого оборота после начала движения скорость точки стала равной $79,2$ см/с².



3. Диск равноускоренно вращается вокруг оси (рисунок). Направление вектора углового ускорения точки A на ободе диска совпадает со стрелкой...

4. Колесо, вращаясь равномерно, при торможении уменьшило частоту вращения за 40 с от 240 до 120 об/мин. Найдите угловое ускорение колеса и число оборотов, сделанных за это время.

5. С какой минимальной скоростью автомобиль должен проходить середину выпуклого моста радиусом 40 м, чтобы пассажир на мгновение оказался в состоянии невесомости?

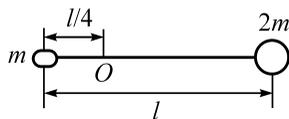
6. Чему равно ускорение свободного падения в точке, удаленной от поверхности Земли на расстояние, равное радиусу Земли?

7. Два тела, летящие в одном направлении со скоростями 2 и 5 м/с, после абсолютно неупругого удара стали двигаться как единое целое со скоростью $2,5$ м/с. Найдите отношение масс этих тел.

8. Велосипедист, масса которого вместе с велосипедом 100 кг, увеличивает свою скорость от 2 до 12 м/с на пути 100 м. Определите работу и среднюю мощность велосипедиста, если коэффициент трения равен $0,06$.

9. На какой высоте над поверхностью земли тело массой 3 кг, падающее свободно с высоты 5 м, будет иметь кинетическую энергию 90 Дж?

10. На концах однородного тонкого стержня длиной 1 м и массой $3m$ прикреплены маленькие шарики массами m



и $2m$. Определите момент инерции такой системы относительно оси, перпендикулярной стержню и проходящей через точку O , лежащую на оси стержня. Принять $m = 0,1$ кг.

11. Маховик радиусом $R = 0,2$ м массой $m = 10$ кг соединен с мотором при помощи приводного ремня. Сила натяжения ремня, идущего без скольжения, $F = 14,7$ Н. Какую частоту вращения будет иметь маховик через 10 с после начала движения?

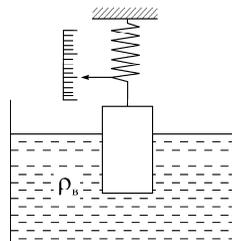
12. Определите момент импульса шара массой m и радиусом R , вращающегося с частотой ν вокруг оси, совпадающей с касательной к шару.

13. Горизонтальная платформа массой 100 кг вращается вокруг вертикальной оси, проходящей через центр платформы, делая 0,8 об/с. Человек массой 60 кг стоит на расстоянии $R/3$ от центра платформы. Сколько оборотов в секунду будет делать платформа, если расстояние человека от центра станет равным R , м? Платформа – однородный диск радиусом R , м, человек – точечная масса.

14. Диск массой 2 кг и радиусом 0,5 м катится равномерно без скольжения по горизонтальной поверхности и за 2 с проходит 5 м. Какова его кинетическая энергия?

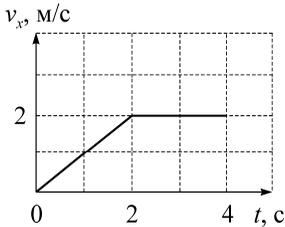
15. Горизонтальная платформа массой 100 кг вращается вокруг вертикальной оси, проходящей через центр платформы, делая 1 об/с. Человек массой 60 кг стоит в центре платформы. Когда человек переместился на расстояние 0,75 м от центра платформы, частота вращения стала равной 0,93 об/с. Платформа – однородный диск, человек – точечная масса. Найдите работу, совершаемую человеком.

16. Цилиндрическую гирю, подвешенную к динамометру, опустили в воду (рисунки). При этом уровень воды в сосуде увеличился на 10 см, а показание динамометра изменилось на 1 Н. Найдите площадь поперечного сечения сосуда.



Модуль 1. Механика

Вариант 21

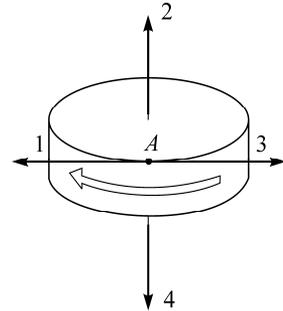


1. Тело движется по оси OX . На графике показана зависимость проекции скорости тела на ось OX от времени. Каков путь, пройденный телом к моменту времени $t = 4$ с?

2. Колесо вращается так, что зависимость угла поворота радиуса колеса от времени дается уравнением $\varphi = (3 + t + t^2 + t^3)$, рад. Найдите радиус колеса, если известно, что к концу второй секунды движения нормальное ускорение точек обода колеса равно 350 м/с^2 .

3. Диск равноускоренно вращается вокруг оси (рисунок). Направление вектора тангенциального ускорения точки A на ободу диска совпадает со стрелкой...

4. Найдите угловое ускорение колеса, если известно, что через 2 с после начала движения вектор полного ускорения точки, лежащей на ободу, составляет угол 60° с направлением линейной скорости точки.



5. Какую скорость должен иметь искусственный спутник, чтобы обращаться по круговой орбите на высоте 600 км над поверхностью Земли? Радиус Земли 6400 км.

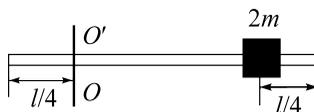
6. Ракета, пущенная вертикально вверх, поднялась на высоту 3200 км и начала падать. Какой путь пройдет ракета за первую секунду своего падения?

7. Граната, летящая со скоростью 10 м/с, разорвалась на два осколка. Большой осколок, вес которого составлял 60 % веса всей гранаты, продолжал двигаться в прежнем направлении, но со скоростью 25 м/с. Найдите скорость меньшего осколка.

8. Тело массой 1 кг, брошенное с вышки в горизонтальном направлении со скоростью 20 м/с, через 3 с упало на землю. Определите кинетическую энергию, которую имело тело в момент удара о землю.

9. Для растяжения пружины на 4 мм из недеформированного состояния необходимо совершить работу 0,02 Дж. Какую работу надо совершить, чтобы растянуть эту же пружину из того же состояния на 4 см?

10. Вычислите момент инерции тонкого однородного стержня длиной $l = 1$ м и массой $m = 0,5$ кг с насаженным на него грузом массой $2m$ относительно оси OO' . Груз принять за материальную точку.



11. На барабан радиусом $R = 20$ см, момент инерции которого $I = 0,1 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$, намотан шнур, к концу которого привязан груз массой $m = 0,5$ кг. До начала вращения барабана высота груза над полом $h = 1$ м. Через какое время груз опустится до пола?

12. Определите момент импульса шара массой m и радиусом R , вращающегося с частотой ν вокруг оси, проходящей через середину радиуса.

13. На скамье Жуковского, вращающейся около вертикальной оси с частотой $\nu_1 = 0,8$ об/с, стоит человек и держит на вытянутых руках две гири массой 4 кг каждая. Расстояние между гирями 1,4 м. Когда человек опускает руки, расстояние между гирями становится равным 0,5 м, а частота вращения – 1,2 об/с. Определите момент инерции I человека и скамьи.

14. Обруч и диск одинаковой массы катятся без скольжения с одинаковой скоростью. Кинетическая энергия диска равна 6 Дж. Найдите кинетическую энергию обруча.

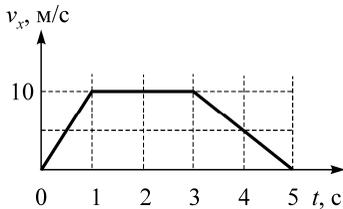
15. Полый тонкостенный цилиндр массой 0,5 кг, катящийся без скольжения, ударяется о стену и отскакивает от нее. Скорость цилиндра до удара о стену $\nu_1 = 1,4$ м/с, после удара

$v_2 = 1$ м/с. Определите выделившееся при ударе количество теплоты.

16. В сообщающихся сосудах одинакового сечения 20 см^2 находится вода, закрытая легкими поршнями. На один из поршней помещают груз массой 160 г. На сколько сантиметров поднимется уровень воды в другом сосуде?

Модуль 1. Механика

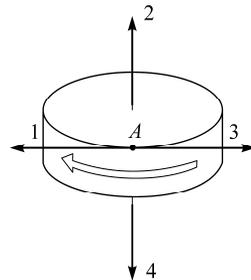
Вариант 22



1. На рисунке представлен график зависимости скорости v автомобиля от времени t . Найдите путь, пройденный автомобилем за время от 3 до 5 с.

2. Колесо радиусом $0,1$ м вращается так, что зависимость линейной скорости точек, лежащих на ободе колеса, от времени дается уравнением $v = (3t + t^2)$, м/с. Найдите угол, составляемый вектором полного ускорения с радиусом колеса через 2 с после начала движения.

3. Диск равномерно вращается вокруг оси (рисунок). Направление вектора угловой скорости точки A на ободе диска совпадает со стрелкой...



4. Маховик приведен во вращение с угловым ускорением $3,14 \text{ рад/с}^2$. Через сколько времени он сделает 16 полных оборотов?

5. Мяч массой $0,5$ кг, летевший со скоростью 10 м/с, в результате упругого столкновения со штангой ворот изменяет направление своего движения на 90° . Определите величину изменения импульса мяча в результате столкновения.

6. Зависимость потенциальной энергии тела в центральном поле от расстояния r до центра поля задается функцией

$$W_{\text{п}}(r) = \frac{A}{r^2} - \frac{B}{r} \quad (A = 6 \text{ мкДж} \cdot \text{м}^2, B = 0,3 \text{ мДж} \cdot \text{м}).$$

Определите, при каком значении r потенциальная энергия тела принимает максимальное значение.

7. При выстреле из орудия снаряд массой $m_1 = 10 \text{ кг}$ получает кинетическую энергию $1,8 \text{ МДж}$. Определите кинетическую энергию ствола орудия вследствие отдачи, если масса ствола орудия $m_2 = 600 \text{ кг}$.

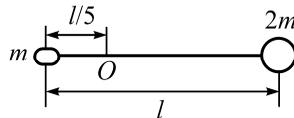
8. Зависимость потенциальной энергии тела в центральном поле от расстояния r до центра поля задается функцией

$$W_{\text{п}}(r) = \frac{A}{r^2} - \frac{B}{r} \quad (A = 6 \text{ мкДж} \cdot \text{м}^2, B = 0,3 \text{ мДж} \cdot \text{м}).$$

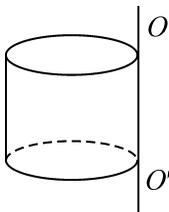
Определите, при каком значении r потенциальная энергия тела принимает максимальное значение.

9. На конце нити, перекинутой через блок, подвешено тело массой 30 г . Другой конец нити соединен с легкой пружиной, к которой прикреплено тело массой 50 г . Длина пружины в нерастянутом состоянии 10 см . Под действием силы $0,1 \text{ Н}$ пружина удлинится на 2 см . Найдите длину пружины во время движения грузов.

10. На концах однородного тонкого стержня длиной 1 м и массой $3m$ прикреплены маленькие шарики массами m и $2m$. Определите момент инерции такой системы относительно оси, перпендикулярной стержню и проходящей через точку O , лежащую на оси стержня. Принять $m = 0,1 \text{ кг}$.



11. Тонкий однородный стержень длиной 1 м и массой $0,5 \text{ кг}$ вращается около оси, проходящей перпендикулярно стержню через его середину. С каким угловым ускорением вращается стержень, если на него действует вращающий момент $M = 98,1 \text{ мН} \cdot \text{м}$?



12. Определите момент импульса цилиндра массой m и радиусом R , вращающегося с частотой ν вокруг оси, совпадающей с одной из его образующих.

13. Горизонтальная платформа массой 100 кг вращается вокруг вертикальной оси, проходящей через центр платформы, делая 0,5 об/с. Человек массой 60 кг стоит на расстоянии R от центра платформы. Сколько оборотов в секунду будет делать платформа, если расстояние человека от центра станет равным $R/3$ м? Платформа – однородный диск радиусом R , м, человек – точечная масса.

14. Диск катится без скольжения по горизонтальной поверхности. Полная кинетическая энергия диска равна 24 Дж. Определите кинетическую энергию поступательного и вращательного движения диска.

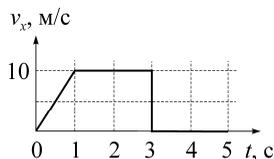
15. Колесо радиусом $R = 30$ см и массой $m = 3$ кг скатывается без трения по наклонной плоскости длиной 5 м и углом наклона $\alpha = 25^\circ$. Определите момент инерции колеса, если его скорость в конце движения стала 4,6 м/с.

16. В узкую пробирку налита вода до уровня 10 см. Когда пробирку отклонили на некоторый угол от вертикали, давление воды на ее дно уменьшилось в два раза. При этом из пробирки не вылилось ни капли воды. Определите угол, на который отклонили пробирку от вертикали.

Модуль 1. Механика

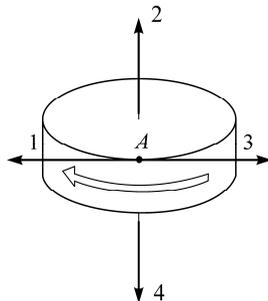
Вариант 23

1. На рисунке представлен график зависимости скорости v автомобиля от времени t . Определите по графику путь, пройденный автомобилем после начала движения, в интервале времени от 0 до 5 с.



2. Тело брошено со скоростью v_0 под углом α к горизонту. Найдите v_0 и α , если известно, что высота подъема тела $h = 3$ м и радиус кривизны траектории тела в верхней точке траектории $R = 3$ м.

3. Диск равнозамедленно вращается вокруг оси (рисунок). Направление вектора углового ускорения точки A на ободу диска совпадает со стрелкой...



4. Вал вращается с постоянной частотой 180 об/мин. С некоторого момента вал тормозит и вращается равнозамедленно с угловым ускорением 2 рад/с^2 . Через сколько времени вал остановится и сколько оборотов он сделает до остановки?

5. Автомобиль массой 1 т движется со скоростью 36 км/ч по выпуклому мосту. Траектория движения автомобиля является дугой окружности радиусом 50 м. Определите вес автомобиля в верхней точке моста.

6. Какова первая космическая скорость для планеты, масса и радиус которой в два раза больше, чем у Земли?

7. Ядро атома распадается на два осколка массами $m_1 = 1,6 \cdot 10^{-25}$ кг и $m_2 = 2,4 \cdot 10^{-25}$ кг. Определите кинетическую энергию второго осколка, если кинетическая энергия первого осколка равна 18 нДж.

8. Тело массой 2 кг поднято над Землей. Его потенциальная энергия 400 Дж. Какова будет скорость тела после прохождения $\frac{1}{4}$ расстояния до Земли?

9. На горизонтальном диске, который может вращаться вокруг вертикальной оси, лежит шайба массой 150 г. Шайба соединена легкой пружиной длиной в недеформированном состоянии 20 см с осью диска. Определите жесткость пружины, если при угловой скорости диска 4 рад/с пружина растягивается на 2 см. Коэффициент трения между шайбой и поверхностью диска 0,2.



10. Вычислите момент инерции тонкого однородного стержня длиной $l = 1$ м и массой $m = 0,5$ кг с насаженным на него грузом массой $2m$ относительно оси OO' (рисунок). Груз принять за материальную точку.

11. Однородный диск радиусом $0,2$ м и массой 5 кг вращается вокруг оси, проходящей через его центр перпендикулярно к его плоскости. Зависимость угловой скорости от времени дается уравнением $\omega = A + Bt$, где $B = 8$ рад/с². Найдите касательную силу, приложенную к ободу диска.

12. Определите момент импульса цилиндра массой m и радиусом R , вращающегося с частотой ν вокруг его оси симметрии.

13. Человек стоит на скамье Жуковского и ловит рукой мяч массой $m = 0,4$ кг, летящий в горизонтальном направлении со скоростью 20 м/с. Траектория мяча проходит на расстоянии $r = 0,8$ м от вертикальной оси вращения скамьи. С какой угловой скоростью начнет вращаться скамья Жуковского с человеком, поймавшим мяч, если суммарный момент инерции человека и скамьи равен 6 кг · м²?

14. К ободу сплошного однородного диска массой 5 кг приложена постоянная касательная сила $F = 20$ Н. Определите кинетическую энергию диска через 5 с после начала действия силы.

15. Маховик в виде сплошного диска, момент инерции которого $I = 1,5$ кг · м², вращаясь при торможении равномерно, уменьшил частоту своего вращения с 240 до 120 об/мин. Определите работу сил торможения.

16. Аквариум прямоугольной формы на $2/3$ объема заполнен водой. Определите величину силы давления воды на стенку аквариума длиной 40 см и высотой 30 см.

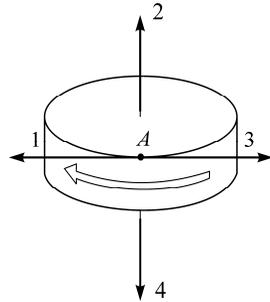
Модуль 1. Механика

Вариант 24

1. Уравнение движения материальной точки по прямой имеет вид $x = 5 + 2t - t^2 + 3t^3$, где S измеряется в метрах, время – в секундах. Найдите скорость и ускорение в моменты времени 0 и 2 с.

2. Тело, брошенное вертикально вверх с высоты 2 м над поверхностью земли, упало на землю через 2 с после броска. Определите, на какую максимальную высоту относительно земли поднималось тело при своем движении.

3. Диск равномерно вращается вокруг оси (рисунок). Направление вектора тангенциального ускорения точки A на ободе диска совпадает со стрелкой...



4. Ось с двумя дисками, расположенными на расстоянии 0,5 м друг от друга, вращается с угловой скоростью, соответствующей частоте 1600 об/мин. Летящая вдоль оси пуля пробивает оба диска. При этом отверстие от пули во втором диске смещено относительно отверстия в первом диске на угол 12° . Найдите скорость пули.

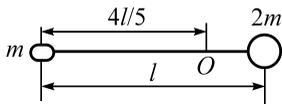
5. На горизонтальных рельсах стоит платформа с песком. Снаряд, летевший вдоль рельсов, попадает в песок и застревает в нем. В момент попадания снаряда его скорость равна 400 м/с и направлена сверху вниз под углом 30° к горизонту. Какую скорость приобрела платформа? Масса платформы с песком 5 т, масса снаряда 10 кг.

6. Средняя высота спутника над поверхностью Земли 1700 км. Определите его скорость и период вращения.

7. Тело, падая с некоторой высоты, в момент соприкосновения с Землей обладает импульсом $p = 100$ кг·м/с и кинетической энергией 500 Дж. Определите массу тела.

8. По склону горы длиной 50 м и высотой 10 м скатываются санки весом 600 Н. Найдите коэффициент трения и силу трения, если у основания горы санки имели скорость 6 м/с.

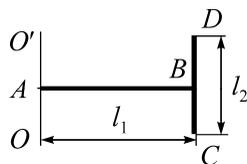
9. Деревянный брусок массой 2 кг тянут равномерно по деревянной доске, расположенной горизонтально, с помощью пружины с жесткостью 100 Н/м. Коэффициент трения равен 0,3. Найдите энергию деформации пружины.



10. На концах однородного тонкого стержня длиной 1 м и массой $3m$ прикреплены маленькие шарики массами m и $2m$. Определите момент инерции такой системы относительно оси, перпендикулярной стержню и проходящей через точку O , лежащую на оси стержня (рисунок). Принять $m = 0,1$ кг.

11. На барабан радиусом 0,5 м намотан шнур, к концу которого привязан груз массой 10 кг. Определите момент инерции барабана, если известно, что груз опускается с ускорением $a = 2$ м/с².

12. Два однородных тонких стержня: AB длиной $l_1 = 40$ см и массой $m_1 = 900$ г и CD длиной $l_2 = 40$ см и массой $m_2 = 400$ г скреплены под прямым углом (рисунок). Определите момент импульса системы стержней, вращающейся с частотой ν относительно оси OO' , проходящей через конец стержня AB параллельно стержню CD .



13. Горизонтальная платформа массой 100 кг вращается вокруг вертикальной оси, проходящей через центр платформы, делая 1 об/с. Человек массой 70 кг стоит в центре платформы. Сколько оборотов в секунду будет делать платформа, если расстояние человека от центра станет равным $R/4$? Платформа – однородный диск радиусом R , м, человек – точечная масса.

14. Шар массой 2 кг катится без скольжения по горизонтальной поверхности, делая 5 об/с. Найдите полную кинетическую энергию шара.

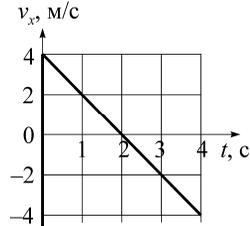
15. Горизонтальная платформа массой 100 кг вращается вокруг вертикальной оси, проходящей через центр платформы, делая 1 об/с. Человек массой 70 кг стоит на расстоянии 3 м от центра платформы. Когда человек переместился на расстояние 1 м от центра платформы, частота вращения стала равной 2,2 об/с. Платформа – однородный диск, человек – точечная масса. Найдите работу, совершаемую человеком.

16. При взвешивании в воздухе тело объемом 1000 см^3 было уравновешено медными гириями массой 890 г. Какой массы гири необходимо добавить при взвешивании этого тела в вакууме? Плотность меди $8,9 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$, воздуха – $1,2 \text{ кг/м}^3$.

Модуль 1. Механика

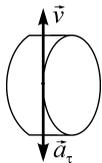
Вариант 25

1. График зависимости проекции скорости тела v_x на ось Ox от времени t приведен на рисунке. Чему равна проекция ускорения тела на эту ось?



2. Камень брошен со скоростью 20 м/с под углом 60° к горизонту. С какой скоростью будет двигаться камень в тот момент,

когда расстояние от него до поверхности земли увеличится на 1 м по сравнению с начальным значением?



3. В какую сторону вращается диск? Как направлены векторы углового перемещения, угловой скорости и углового ускорения? Сделайте чертёж.

4. Барабан молотилки вращается с постоянной частотой 2 об/с. С момента сбрасывания приводного ремня барабан тормозится и вращается равнозамедленно с угловым ускорением 3 рад/с^2 . Через какое время барабан остановится? Сколько оборотов сделает он до остановки?

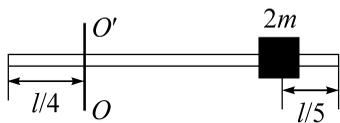
5. Молоток массой $0,8$ кг ударяет по небольшому гвоздю и забивает его в доску. Скорость молотка перед ударом 5 м/с, после удара равна 0 , продолжительность удара $0,02$ с. Какова средняя сила удара молотка?

6. Вычислите первую космическую скорость у поверхности Луны, если ее радиус 1760 км, а ускорение свободного падения у поверхности Луны в 6 раз меньше ускорения свободного падения у поверхности Земли.

7. Определите изменение импульса шарика массой 50 г, движущегося со скоростью 2 м/с при упругом ударе о неподвижную плоскость, составляющую с вектором скорости угол равный 60° .

8. Материальная точка массой 20 г движется по окружности радиусом $R = 10$ см с постоянным тангенциальным ускорением $0,1$ м/с². Определите кинетическую энергию к концу пятого оборота после начала движения.

9. На горизонтальной поверхности лежит брусок массой 1 кг. К бруску прикреплена пружина жесткостью 50 Н/м. К свободному концу пружины приложили горизонтальную силу, растягивающую пружину. Какую работу совершит сила к моменту, когда брусок начнет скользить? Коэффициент трения между бруском и поверхностью $0,4$.

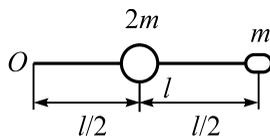


10. Вычислите момент инерции тонкого однородного стержня длиной $l = 1$ м и массой $m = 0,5$ кг с насаженным на него грузом массой $2m$ относительно оси OO' (рисунок). Груз принять за материальную точку.

11. На барабан массой $m_1 = 9$ кг намотан шнур, к концу которого привязан груз массой $m_2 = 2$ кг. Определите ускорение груза. Барабан считать однородным цилиндром. Трением пренебречь.

12. Два шара массами m и $2m$ ($m = 10$ г) закреплены на тонком невесомом стержне длиной $l = 40$ см так, как показано

на рисунке. Определите момент импульса системы, вращающейся с частотой ν относительно оси, перпендикулярной стержню и проходящей через его конец. Размерами шаров пренебречь.



13. Горизонтальная платформа массой 100 кг вращается вокруг вертикальной оси, проходящей через центр платформы, делая 0,5 об/с. Человек массой 60 кг стоит на расстоянии R от центра платформы. Сколько оборотов в секунду будет делать платформа, если расстояние человека от центра станет равным $R/3$ м? Платформа – однородный диск радиусом R , м, человек – точечная масса.

14. Кинетическая энергия вала, вращающегося с частотой 20 об/с, равна 20 Дж. Найдите момент импульса вала относительно оси вращения.

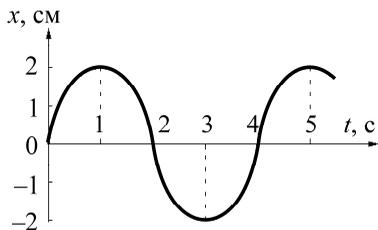
15. Кинетическая энергия вращающегося маховика равна 1 кДж. Под действием постоянного тормозящего момента маховик начал вращаться равнозамедленно и, сделав 80 оборотов, остановился. Определите момент M силы торможения.

16. На какой глубине в озере давление в 3 раза больше атмосферного давления $p_0 = 100$ кПа?

Модуль 2. КОЛЕБАНИЯ И ВОЛНЫ

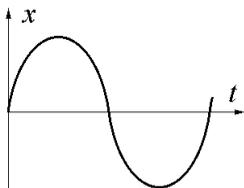
Модуль 2. Колебания и волны

Вариант 1



1. Уравнение гармонических колебаний имеет вид $x = 4,2 \cdot \sin(\pi t/2 + \pi/8)$, см. Чему равны период, амплитуда и начальная фаза этих колебаний?

2. Зависимость координаты колеблющегося тела от времени представлена графиком на рисунке. Напишите в СИ уравнение гармонических колебаний в виде $x = A \sin(\omega t + \varphi_0)$.



3. Линейный гармонический осциллятор совершает колебания. График временной зависимости его координаты x представлен на рисунке. Нарисуйте график, правильно отражающий зависимость проекции скорости v_x от времени.

4. Уравнение движения точки дано в виде $x = \sin(\pi t/6)$, см. Найдите моменты времени, в которые достигается максимальная скорость и максимальное ускорение.

5. К пружине подвешен груз. Зная, что максимальная кинетическая энергия колебаний груза равна 1 Дж, найдите коэффициент упругости пружины. Амплитуда колебаний 5 см.

6. Из однородного диска радиусом R сделали физический маятник. Сначала ось проходит через образующую диска, потом – на расстоянии $R/2$ от центра диска. Определите отношение периодов колебаний дисков.

7. Постройте векторную диаграмму сложения амплитуд и напишите уравнение результирующего гармонического колебания, полученного от сложения одинаково направленных колебаний, заданных уравнениями $x_1 = 4 \sin \pi t$, см, и $x_2 = 3 \sin(\pi t + \pi/2)$, см.

8. Материальная точка одновременно участвует в двух взаимно перпендикулярных колебаниях одинаковой частоты, заданных уравнениями $x = 2 \sin(\omega_0 t + \pi/2)$, см, и $y = 2 \sin \omega_0 t$, см. Найдите уравнение траектории, постройте ее с соблюдением масштаба и укажите направление движения.

9. Амплитуда колебаний маятника длиной 1 м за 10 мин уменьшилась в 2 раза. Определите логарифмический декремент затухания.

10. Поперечная волна распространяется вдоль оси X . Уравнение незатухающих колебаний источника дано в виде

$y = 10\sin 0,5\pi t$, см. Напишите уравнение колебаний для точек волны в момент $t = 4$ с после начала колебаний.

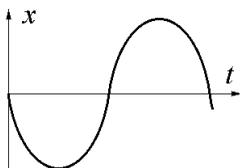
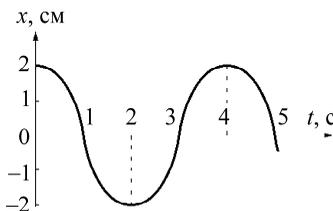
11. Две точки находятся на прямой, вдоль которой распространяются волны со скоростью 40 м/с. Частота колебаний 20 Гц, расстояние между точками 40 см. Найдите разность фаз колебаний этих точек.

Модуль 2. Колебания и волны

Вариант 2

1. Определите амплитуду, период, циклическую частоту и начальную фазу колебаний, заданных уравнением $x = 5\cos 2\pi(t + 1/8)$, см.

2. Зависимость координаты колеблющегося тела от времени представлена графиком на рисунке. Напишите в СИ уравнение гармонических колебаний в виде $x = A\sin(\omega t + \varphi_0)$.



3. Линейный гармонический осциллятор совершает колебания. График временной зависимости его координаты x представлен на рисунке. Нарисуйте график, правильно отражающий зависимость проекции скорости v_x от времени.

4. Напишите уравнение гармонического колебательного движения, если максимальное ускорение точки $49,3$ см/с², период колебаний 2 с и смещение точки от положения равновесия в начальный момент времени 25 мм.

5. Материальная точка массой 20 г колеблется по уравнению $x = 5\sin(\pi t/5 + \pi/4)$, см. Найдите период колебаний, максимальную силу, действующую на точку, и ее полную энергию.

6. Обруч диаметром 56,5 см висит на гвозде, вбитом в стену, и совершает малые колебания в плоскости, параллельной стене. Найдите период этих колебаний.

7. Точка участвует в двух одинаково направленных колебаниях: $x_1 = A_1 \sin \omega t$ и $x_2 = A_2 \cos \omega t$, где $A_1 = 1$ см, $A_2 = 2$ см, $\omega = 1$ рад/с. Определите амплитуду результирующих колебаний и их частоту.

8. Точка участвует одновременно в двух взаимно перпендикулярных колебаниях: $x = 2 \sin \omega t$ и $y = 2 \cos \omega t$. Найдите уравнение траектории, постройте ее с соблюдением масштаба и укажите направление движения.

9. Амплитуда затухающих колебаний маятника за 2 мин уменьшилась вдвое. Во сколько раз она уменьшится за 5 мин?

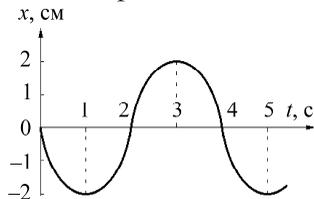
10. Поперечная волна распространяется вдоль оси X . Уравнение незатухающих колебаний источника дано в виде $y = 10 \sin 0,5 \pi t$, см. Напишите уравнение колебаний для точки, отстоящей на расстояние 600 м от источника колебаний, если скорость волны 300 м/с.

11. Определите скорость распространения волн в упругой среде, если разность фаз колебаний двух точек среды, отстоящих друг от друга на 10 см, равна $\pi/3$, а частота колебаний 25 Гц.

Модуль 2. Колебания и волны

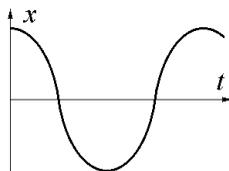
Вариант 3

1. Уравнение гармонических колебаний тела имеет вид $x = 0,1 \sin \pi(t/8 + 1/4)$, м. Чему равны амплитуда, частота и начальная фаза колебаний?



2. Зависимость координаты колеблющегося тела от времени представлена графиком на рисунке. Напишите в СИ уравнение гармонических колебаний в виде $x = A \sin(\omega t + \varphi_0)$.

3. Линейный гармонический осциллятор совершает колебания. График временной зависимости его координаты x представлен на рисунке. Постройте график, правильно отражающий зависимость проекции скорости v_x от времени.



4. Амплитуда гармонических колебаний 5 см, период 4 с. Найдите максимальную скорость колеблющейся точки и максимальное ускорение.

5. Амплитуда гармонических колебаний материальной точки $A = 0,3$ см, полная энергия колебаний $W = 3 \cdot 10^{-7}$ Дж. При каком смещении от положения равновесия на колеблющуюся точку действует сила $F = 10^{-5}$ Н?

6. Как соотносятся частоты колебаний математических маятников, если длины соотносятся как 1:4?

7. Найдите амплитуду и начальную фазу гармонического колебания, полученного от сложения одинаково направленных колебаний, заданных уравнениями $x_1 = 3\sin\pi t$, см, и $x_2 = 4\sin(\pi t + \pi/2)$, см. Напишите уравнение результирующего колебания и постройте векторную диаграмму сложения амплитуд.

8. Точка совершает одновременно два гармонических колебания, происходящих во взаимно перпендикулярных направлениях и выражаемых уравнениями $x = \sin\pi t/2$ и $y = \cos\pi t$ (длина – в см, время – в секундах). Определите уравнение траектории точки, постройте ее с соблюдением масштаба и укажите направление движения.

9. За 8 мин амплитуда затухающих колебаний маятника уменьшилась в 3 раза. Определите коэффициент затухания.

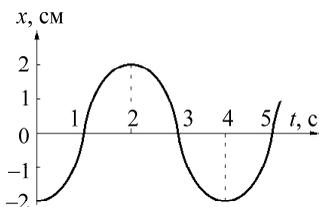
10. Поперечная волна распространяется вдоль оси X . Уравнение колебаний источника дано в виде $y = 10\sin 0,5\pi t$, см. Напишите уравнение волны, если скорость распространения колебаний 300 м/с.

11. Волны распространяются со скоростью 75 м/с. Наименьшее расстояние между точками среды, фазы колебаний которых противоположны, равно 2 м. Найдите период колебаний.

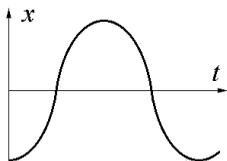
Модуль 2. Колебания и волны

Вариант 4

1. Определите амплитуду, период, циклическую частоту и начальную фазу колебаний, заданных уравнением $x = 3 \sin 2\pi(t + 1/4)$, см.



2. Зависимость координаты колеблющегося тела от времени представлена графиком на рисунке. Напишите в СИ уравнение гармонических колебаний в виде $x = A \sin(\omega t + \varphi_0)$.



3. Линейный гармонический осциллятор совершает колебания. График временной зависимости его координаты x представлен на рисунке. Нарисуйте график, правильно отражающий зависимость проекции скорости v_x от времени.

4. Уравнение гармонических колебаний тела имеет вид $x = 0,2 \cos 5\pi t$, м. Каковы амплитудные значения скорости и ускорения этого тела?

5. Материальная точка массой 10 г совершает колебания согласно уравнению $x = 0,2 \sin 8\pi t$, м. Найдите силу, действующую в момент времени $t = 0,1$ с, а также полную энергию точки.

6. Стержень длиной $l = 0,5$ м совершает малые колебания около горизонтальной оси, проходящей через его верхний конец. Определите период колебаний стержня и его приведенную длину.

7. Складываются два гармонических колебания одного направления с одинаковыми периодами $T = 1,5$ с и амплитудами $A = 2$ см. Начальные фазы колебаний $\varphi_1 = \pi/2$ рад и $\varphi_2 = \pi/3$ рад. Определите амплитуду и начальную фазу результирующего колебания. Напишите его уравнение.

8. Материальная точка участвует в двух взаимно перпендикулярных колебаниях, заданных уравнениями $x = \cos(\pi t + \pi)$, см, и $y = 2\cos \pi t$, см. Найдите уравнение траектории и начертите ее с соблюдением масштаба.

9. Математический маятник отклонился при первом колебании в одну сторону на 10 см, при втором колебании – на 8 см в ту же сторону. Определите декремент и логарифмический декремент затухания.

10. Поперечная волна распространяется вдоль упругого шнура со скоростью 15 м/с. Период колебаний точек шнура $T = 1,2$ с. Определите длину волны.

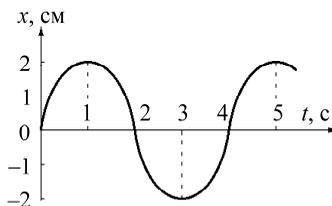
11. Волны распространяются в упругой среде со скоростью 100 м/с. Наименьшее расстояние между точками среды, фазы которых противоположны, равно 1 м. Определите частоту колебаний.

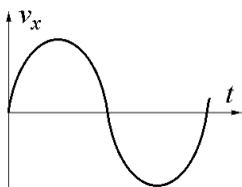
Модуль 2. Колебания и волны

Вариант 5

1. Уравнение гармонических колебаний тела имеет вид $x = 0,01\sin \pi(t/8 + 1/2)$, м. Чему равны амплитуда, частота и начальная фаза колебаний?

2. Зависимость координаты колеблющегося тела от времени представлена графиком на рисунке. Напишите в СИ уравнение гармонических колебаний в виде $x = A\cos(\omega t + \varphi_0)$.





3. Линейный гармонический осциллятор совершает колебания. График временной зависимости проекции его скорости v_x представлен на рисунке. Нарисуйте график, правильно отражающий зависимость проекции ускорения a_x от времени.

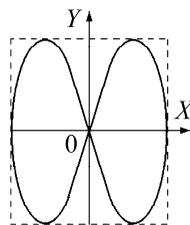
4. Материальная точка совершает гармонические колебания, уравнение которых имеет вид $x = 20 \cos \pi t / 6$, мм. Каково значение скорости точки в момент времени $t = 3$ с?

5. Материальная точка массой 0,1 кг колеблется согласно уравнению $x = 5 \sin 20\pi t$, м. Определите максимальную силу, действующую на точку, и максимальную кинетическую энергию.

6. Один математический маятник совершает в час 2000, а другой 3000 качаний. Как относятся длины этих маятников?

7. Два одинаково направленных гармонических колебания одного периода с амплитудами $A_1 = 10$ см и $A_2 = 6$ см складываются в одно колебание с амплитудой 14 см. Найдите разность фаз этих колебаний.

8. Точка одновременно участвует в двух взаимно перпендикулярных гармонических колебаниях с циклическими частотами ω_x и ω_y :
 $x = A_1 \cos(\omega_x t + \phi_1)$ и $y = A_2 \cos(\omega_y t + \phi_2)$.
 Траектория точки представлена на рисунке (*фигура Лиссажу*). Каково отношение частот ω_y / ω_x ?



9. Амплитуда затухающих колебаний маятника за 2 мин уменьшилась в три раза. Во сколько раз она уменьшится за 4 мин?

10. Найдите смещение от положения равновесия точки, отстоящей от источника колебаний на расстоянии $L = \lambda / 6$ (λ – длина волны), для момента времени $T/3$ с (T – период колебаний). Амплитуда колебаний равна 0,3 м.

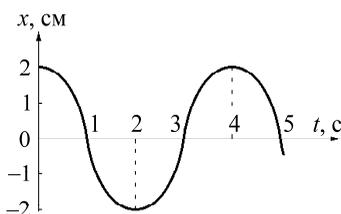
11. Определите разность фаз колебаний источника волн, находящегося в упругой среде, и точки этой среды, отстоящей на 3 м от источника. Частота колебаний 10 Гц. Скорость распространения волн 50 м/с.

Модуль 2. Колебания и волны

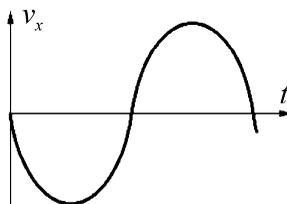
Вариант 6

1. Определите амплитуду, период, циклическую частоту и начальную фазу колебаний, заданных уравнением $x = 3 \sin 2\pi(t + 1/4)$, см.

2. Зависимость координаты колеблющегося тела от времени представлена графиком на рисунке. Напишите в СИ уравнение гармонических колебаний в виде $x = A \cos(\omega t + \varphi_0)$.



3. Линейный гармонический осциллятор совершает колебания. График временной зависимости проекции его скорости v_x представлен на рисунке. Нарисуйте график, правильно отражающий зависимость проекции ускорения a_x от времени.



4. Частота колебаний ножки камертона 500 Гц, амплитуда колебаний 0,1 мм. Определите максимальное ускорение.

5. Уравнение колебания тела массой 2 кг имеет вид $x = 5 \sin \pi(t + 0,5)$, см. Определите кинетическую энергию в момент времени $t = 6$ с.

6. Диск радиусом 24 см колеблется около горизонтальной оси, проходящей через середину одного из радиусов перпендикулярно к плоскости диска. Определите частоту ν колебаний такого физического маятника.

7. Складываются два гармонических колебания одного направления с одинаковыми периодами и равными амплитудами A_0 . Чему равна амплитуда результирующего колебания при разности фаз $\Delta\varphi = \frac{3\pi}{2}$ рад?

$$\Delta\varphi = \frac{3\pi}{2} \text{ рад?}$$

8. Точка совершает одновременно два гармонических колебания, происходящих во взаимно перпендикулярных направлениях и выражаемых уравнениями $x = \sin t/2$, см, и $y = \cos t$, см (время в секундах). Определите уравнение траектории точки, постройте ее с соблюдением масштаба и укажите направление движения.

9. Период затухающих колебаний 4 с, логарифмический декремент затухания 1,6, начальная фаза равна нулю. Смещение точки при $t = T/4$ равно 4,5 см. Напишите уравнение движения этого колебания и постройте его график в пределах двух периодов.

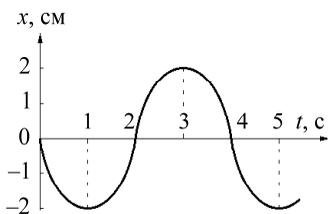
10. Поперечная волна распространяется вдоль оси X . Уравнение незатухающих колебаний источника дано в виде $y = 5\sin 10\pi t$, см. Напишите уравнение колебаний для точки, отстоящей на расстояние 600 м от источника колебаний, если скорость волны 300 м/с.

11. Найдите разность фаз колебаний двух точек, отстоящих на расстояние 2 м друг от друга, если длина волны равна 1 м.

Модуль 2. Колебания и волны

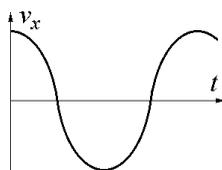
Вариант 7

1. Уравнение гармонических колебаний имеет вид $x = \cos 5\pi t$, см. Определите амплитуду, циклическую частоту, период и начальную фазу этих колебаний.



2. Зависимость координаты колеблющегося тела от времени представлена графиком на рисунке. Напишите в СИ уравнение гармонических колебаний в виде $x = A\cos(\omega t + \varphi_0)$.

3. Линейный гармонический осциллятор совершает колебания. График временной зависимости проекции его скорости v_x представлен на рисунке. Нарисуйте график, правильно отражающий зависимость проекции ускорения a_x от времени.



4. Материальная точка совершает гармонические колебания, уравнение которых имеет вид $x = 20 \cos \pi t / 6$, мм. Каково значение ускорения точки в момент времени $t = 3$ с?

5. Материальная точка массой 20 г колеблется согласно уравнению $x = 5 \cos(\pi t / 5 + \pi / 4)$, см. Найдите частоту колебаний, максимальную силу, действующую на точку, и ее полную энергию.

6. Один маятник совершает в минуту 40, а другой – 60 качаний. Как относятся длины этих маятников?

7. Точка участвует в двух одинаково направленных колебаниях одного периода с одинаковыми начальными фазами, амплитуды колебаний $A_1 = 3$ см и $A_2 = 4$ см. Найдите амплитуду результирующего колебания.

8. Материальная точка одновременно участвует в двух взаимно перпендикулярных колебаниях одинаковой частоты, заданных уравнениями $x = 3 \sin \omega_0 t$, см, и $y = 3 \sin(\omega_0 t + \pi / 2)$, см. Найдите уравнение траектории, постройте ее с соблюдением масштаба и укажите направление движения.

9. За 600 с амплитуда затухающих колебаний маятника уменьшилась в 3 раза. Определите коэффициент затухания.

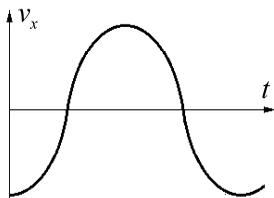
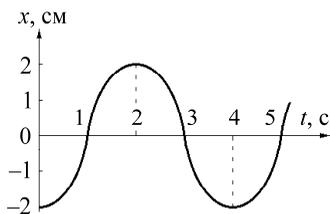
10. От источника колебаний распространяются волны вдоль прямой линии. Амплитуда колебаний 10 см. Каково смещение точки, удаленной от источника на $3/4$ длины волны, в момент, когда от начала колебаний источника прошло время, равное $0,9$ периода колебаний?

11. Волны распространяются в упругой среде со скоростью 75 м/с. Наименьшее расстояние между точками среды, фазы колебаний которых противоположны, равно 2 м. Определите период колебаний.

Модуль 2. Колебания и волны

Вариант 8

1. Уравнение гармонических колебаний тела имеет вид $x = 4\sin\pi(t + 0,1)$, см. Определите амплитуду, циклическую частоту, период и начальную фазу.



2. Зависимость координаты колеблющегося тела от времени представлена графиком на рисунке. Напишите в СИ уравнение гармонических колебаний в виде $x = A\cos(\omega t + \varphi_0)$.

3. Линейный гармонический осциллятор совершает колебания. График временной зависимости проекции его скорости v_x представлен на рисунке. Нарисуйте график, правильно отражающий зависимость проекции ускорения a_x от времени.

4. Уравнение гармонических колебаний тела имеет вид $x = 0,2\sin 5\pi t$, см. Каково максимальное ускорение этого тела?

5. Материальная точка массой 20 г совершает колебания согласно уравнению $x = 0,1\sin 4\pi t$, м. Найдите силу, действующую в момент времени $t = 0,2$ с, а также полную энергию точки.

6. Тонкий обруч, повешенный на гвоздь, вбитый горизонтально в стену, колеблется в плоскости, параллельной стене. Радиус обруча 30 см. Вычислить период T его колебаний.

7. Напишите уравнение движения, получающегося от сложения двух одинаково направленных гармонических колебаний с одинаковыми периодами по 8 с и одинаковыми амплитудами по 2 см. Начальная фаза одного колебания равна нулю, второго — $\pi/4$ рад.

8. Материальная точка одновременно участвует в двух взаимно перпендикулярных колебаниях одинаковой частоты, заданных уравнениями $x = 2\sin\omega t$, см, и $y = 3\sin(\omega t + \pi/2)$, см. Найдите уравнение траектории, постройте ее с соблюдением масштаба и укажите направление движения.

9. Амплитуда затухающих колебаний маятника за 1 мин уменьшилась вдвое. Во сколько раз она уменьшится за 4 мин?

10. Волны с периодом 1,2 с и амплитудой 3 см распространяются со скоростью 15 м/с. Чему равно смещение точки, находящейся на расстоянии 30 м от источника волн в тот момент, когда от начала колебаний прошло 3 с?

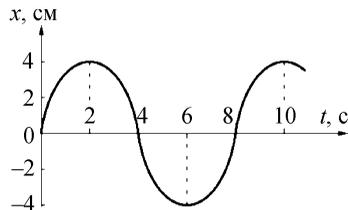
11. Найдите разность фаз колебаний двух точек, отстоящих на расстояние 4 м друг от друга, если длина волны равна 3 м.

Модуль 2. Колебания и волны

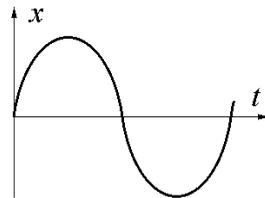
Вариант 9

1. Определите амплитуду, период, циклическую частоту и начальную фазу колебаний, заданных уравнением $x = 5\cos 10\pi(t + 0,1)$, см.

2. Зависимость координаты колеблющегося тела от времени представлена графиком на рисунке. Напишите в СИ уравнение гармонических колебаний в виде $x = A\sin(\omega t + \varphi_0)$.



3. Линейный гармонический осциллятор совершает колебания. График временной зависимости его координаты x представлен на рисунке. Нарисуйте график, правильно отражающий зависимость проекции ускорения a_x от времени.

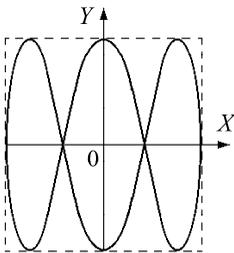


4. Напишите уравнение гармонического колебательного движения, если максимальное ускорение точки $98,6 \text{ см/с}^2$, период колебаний 2 с и смещение точки от положения равновесия в начальный момент времени 25 мм .

5. Уравнение колебания тела массой 2 кг имеет вид $x = 5 \cos \pi(t + 0,1)$, см. Определите потенциальную энергию в момент времени $t = 5 \text{ с}$.

6. Маятник длиной 2 м совершает 1268 колебаний в час. Найдите ускорение силы тяжести.

7. При сложении двух гармонических колебаний одного направления с одинаковыми периодами и равными амплитудами результирующее колебание имеет такую же амплитуду, что и складываемые колебания. Чему равна разность фаз исходных колебаний?



8. Точка одновременно участвует в двух взаимно перпендикулярных гармонических колебаниях с циклическими частотами ω_x и ω_y : $x = A_1 \cos(\omega_x t + \phi_1)$ и $y = A_2 \cos(\omega_y t + \phi_2)$. Траектория точки представлена на рисунке (*фигура Лиссажу*). Каково отношение частот ω_y/ω_x ?

9. Амплитуда колебаний маятника длиной 2 м за 2 мин уменьшилась в 2 раза. Определите логарифмический декремент затухания.

10. Поперечная волна распространяется вдоль оси X . Уравнение незатухающих колебаний источника дано в виде $y = 5 \sin 100\pi t$, см. Напишите уравнение волны, если скорость распространения колебаний 100 м/с .

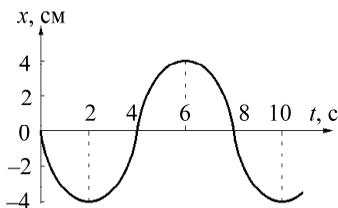
11. Определите разность фаз $\Delta\phi$ колебаний источника волн, находящегося в упругой среде, и точки этой среды, отстоящей на 2 м от источника. Частота колебаний равна 5 Гц , волны распространяются со скоростью 40 м/с .

Модуль 2. Колебания и волны

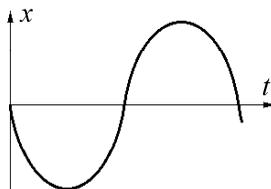
Вариант 10

1. Материальная точка совершает колебания по закону $x = 2\sin(\pi t/4 + \pi/2)$, см, где t – в секундах. Определите амплитуду колебаний, начальную фазу и период.

2. Зависимость координаты колеблющегося тела от времени представлена графиком на рисунке. Напишите в СИ уравнение гармонических колебаний в виде $x = A\sin(\omega t + \varphi_0)$.



3. Линейный гармонический осциллятор совершает колебания. График временной зависимости его координаты x представлен на рисунке. Нарисуйте график, правильно отражающий зависимость проекции ускорения a_x от времени.



4. Уравнение гармонического колебания тела имеет вид $x = 5\sin \pi(t + 0,5)$, см. Определите скорость и ускорение тела в момент времени 6 с.

5. Амплитуда гармонических колебаний материальной точки $A = 2$ мм, полная энергия колебаний $W = 2 \cdot 10^{-7}$ Дж. При каком смещении от положения равновесия на колеблющуюся точку действует сила 10^{-6} Н?

6. Однородный стержень длиной 0,5 м совершает малые колебания в вертикальной плоскости около горизонтальной оси, проходящей на расстоянии 10 см от его верхнего конца. Определите период колебаний стержня.

7. Материальная точка участвует одновременно в двух колебаниях, происходящих по одной прямой и выражаемых урав-

нениями $x_1 = \sin\pi(t + 1/6)$, см, и $x_2 = 2\sin\pi(t + 1/6)$, см. Определите амплитуду результирующего колебания.

8. Материальная точка одновременно участвует в двух взаимно перпендикулярных колебаниях одинаковой частоты, заданных уравнениями $x = 2\sin\omega_0 t$, см, и $y = 3\sin(\omega_0 t + \pi)$, см. Найдите уравнение траектории, постройте ее с соблюдением масштаба и укажите направление движения.

9. Логарифмический декремент затухания колебаний маятника равен 0,003. Сколько полных колебаний должен сделать маятник, чтобы амплитуда уменьшилась в два раза?

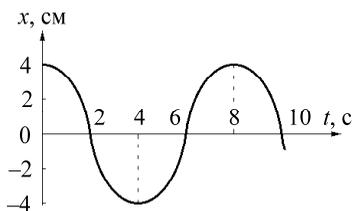
10. Поперечная волна распространяется вдоль упругого шнура со скоростью 15 м/с. Период колебаний точек шнура $T = 1,2$ с, амплитуда 2 см. Определите: 1) фазу колебаний; 2) смещение точки, отстоящей на расстояние 45 м от источника волн в момент времени $t = 4$ с.

11. Определите разность фаз колебаний источника волн, находящегося в упругой среде, и точки этой среды, отстоящей на 2 м от источника. Частота колебаний равна 20 Гц, волны распространяются со скоростью 100 м/с.

Модуль 2. Колебания и волны

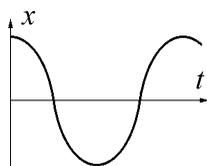
Вариант 11

1. Материальная точка совершает колебания по закону $x = 2\sin(\pi t/4 + \pi/2)$, где x – в сантиметрах, t – в секундах. Определите амплитуду колебаний, начальную фазу и период.



2. Зависимость координаты колеблющегося тела от времени представлена графиком на рисунке. Напишите в СИ уравнение гармонических колебаний в виде $x = A\sin(\omega t + \varphi_0)$.

3. Линейный гармонический осциллятор совершает колебания. График временной зависимости его координаты x представлен на рисунке. Нарисуйте график, правильно отражающий зависимость проекции ускорения a_x от времени.



4. Амплитуда гармонических колебаний 5 мм, период 0,4 с. Найдите максимальную скорость колеблющейся точки и ее максимальное ускорение.

5. Материальная точка массой 10 г колеблется с периодом 0,25 с и амплитудой 2 см. Определите полную энергию колеблющейся точки.

6. Найдите приведенную длину физического маятника, частота колебаний которого равна 0,5 Гц.

7. Найдите амплитуду и начальную фазу гармонического колебания, полученного от сложения одинаково направленных колебаний, заданных уравнениями $x_1 = 0,02\sin(5\pi t + \pi/2)$, м, и $x_2 = 0,03\sin(5\pi t + \pi/4)$, м.

8. Точка участвует одновременно в двух взаимно перпендикулярных колебаниях: $x = 2\sin\omega t$ и $y = 2\cos\omega t$. Найдите траекторию движения точки.

9. Амплитуда затухающих колебаний маятника за 1 мин уменьшилась вдвое. Во сколько раз она уменьшится за 4 мин?

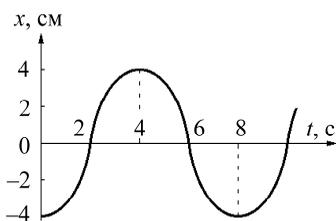
10. Источник, расположенный в точке $x = 0$, колеблется по закону $y = A\cos\omega t$. Напишите уравнение плоской бегущей незатухающей волны, распространяющейся вдоль направления x со скоростью v .

11. Найдите разность фаз колебаний двух точек, находящихся на расстояниях соответственно 10 и 16 м от источника колебаний. Период колебаний 0,04 с, скорость распространения колебаний 300 м/с.

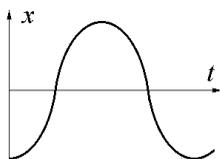
Модуль 2. Колебания и волны

Вариант 12

1. Уравнение гармонических колебаний имеет вид $x = 5 \sin \pi(t + 0,1)$, см. Чему равны период и циклическая частота этих колебаний?



2. Зависимость координаты колеблющегося тела от времени представлена графиком на рисунке. Напишите в СИ уравнение гармонических колебаний в виде $x = A \sin(\omega t + \varphi_0)$.



3. Линейный гармонический осциллятор совершает колебания. График временной зависимости его координаты x представлен на рисунке. Нарисуйте график, правильно отражающий зависимость проекции ускорения a_x от времени.

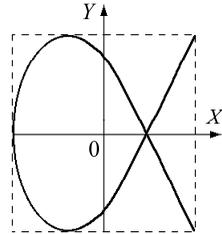
4. Напишите уравнение гармонического колебательного движения, если максимальная скорость точки 31,4 см/с, период колебаний 2 с и смещение точки от положения равновесия в начальный момент времени равно 25 мм.

5. Материальная точка массой 10 г совершает колебания согласно уравнению $x = 5 \sin \pi(t + 0,1)$, см. Найдите силу, действующую в момент времени $t = 0,4$ с, а также полную энергию точки.

6. Диск радиусом 24 см колеблется около горизонтальной оси, проходящей через середину одного из радиусов перпендикулярно к плоскости диска. Определите период T колебаний такого физического маятника.

7. Складываются два гармонических колебания одного направления с одинаковыми частотами и равными амплитудами A_0 . Чему равна амплитуда результирующего колебания при разности фаз $\Delta\varphi = \pi$ рад.

8. Точка одновременно участвует в двух взаимно перпендикулярных гармонических колебаниях с циклическими частотами ω_x и ω_y : $x = A_1 \cos(\omega_x t + \varphi_1)$ и $y = A_2 \cos(\omega_y t + \varphi_2)$. Траектория точки представлена на рисунке (*фигура Лиссажу*). Каково отношение частот ω_y/ω_x ?



9. Задано уравнение колебаний $x = 8e^{-0,1t} \sin\left(\pi t + \frac{\pi}{4}\right)$, см.

Найдите коэффициент затухания и время релаксации.

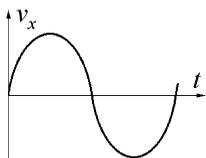
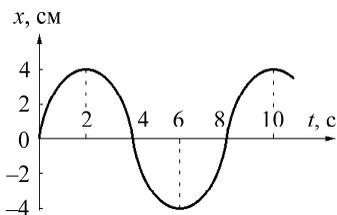
10. Поперечная волна распространяется вдоль оси X . Уравнение колебаний источника дано в виде $y = 4 \sin 600\pi t$, см. Найдите смещение от положения равновесия точки, находящейся на расстоянии 75 см от источника колебаний через 0,01 с после начала колебаний. Скорость волны 300 м/с.

11. Определите скорость распространения волн в упругой среде, если разность фаз колебаний двух точек среды, отстоящих друг от друга на 20 см, равна $\pi/4$ рад, а частота колебаний 50 Гц.

Модуль 2. Колебания и волны

Вариант 13

1. Материальная точка совершает колебания по закону $x = 2 \sin(\pi t/6 + \pi/3)$, см. Определите амплитуду колебаний, начальную фазу и период.



2. Зависимость координаты колеблющегося тела от времени представлена графиком на рисунке. Напишите в СИ уравнение гармонических колебаний в виде $x = A \cos(\omega t + \varphi_0)$.

3. Линейный гармонический осциллятор совершает колебания. График временной зависимости проекции его скорости v_x представлен на рисунке. Нарисуйте график, правильно отражающий зависимость координаты x от времени.

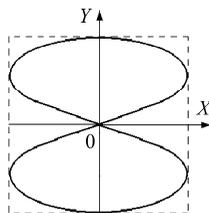
4. Частота колебаний ножки камертона 500 Гц, амплитуда колебаний 0,1 мм. Определите максимальное ускорение.

5. Полная энергия тела, совершающего колебательное движение, равна $3 \cdot 10^{-5}$ Дж, максимальная сила, действующая на него, равна $1,5 \cdot 10^{-3}$ Н. Напишите уравнение движения этого тела, если период колебания равен 2 с и начальная фаза $\pi/3$ рад.

6. Диск радиусом 24 см колеблется около горизонтальной оси, проходящей через край диска перпендикулярно к плоскости диска. Определите период T колебаний такого физического маятника.

7. Точка участвует в двух одинаково направленных колебаниях: $x_1 = A_1 \sin \omega t$ и $x_2 = A_2 \cos \omega t$, где $A_1 = 3$ см, $A_2 = 4$ см, $\omega = 1$ рад/с. Определите амплитуду результирующих колебаний и их частоту.

8. Точка одновременно участвует в двух взаимно перпендикулярных гармонических колебаниях с циклическими частотами ω_x и ω_y : $x = A_1 \cos(\omega_x t + \varphi_1)$ и $y = A_2 \cos(\omega_y t + \varphi_2)$. Траектория точки представлена на рисунке (*фигура Лиссажу*). Каково отношение частот ω_y/ω_x ?



9. Логарифмический декремент затухания математического маятника равен 0,2. Найдите, во сколько раз уменьшится амплитуда колебаний за одно полное колебание маятника.

10. От источника колебаний распространяются волны вдоль прямой линии. Амплитуда колебаний 5 см. Каково смещение точки, удаленной от источника на $3/4$ длины волны в момент, когда от начала колебаний источника прошло время, равное 0,5 периода колебаний?

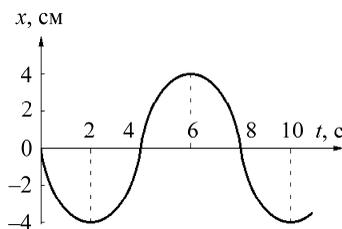
11. Волны распространяются в упругой среде со скоростью 300 м/с. Наименьшее расстояние между точками среды, фазы которых противоположны, равно 1,5 м. Определите частоту колебаний.

Модуль 2. Колебания и волны

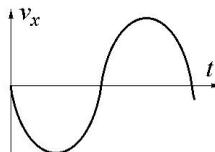
Вариант 14

1. Уравнение колебаний имеет вид $x = 3 \sin 2\pi(t + 1/6)$, см. Чему равны период, амплитуда, фаза и начальная фаза этих колебаний?

2. Зависимость координаты колеблющегося тела от времени представлена графиком на рисунке. Напишите в СИ уравнение гармонических колебаний в виде $x = A \cos(\omega t + \varphi_0)$.



3. Линейный гармонический осциллятор совершает колебания. График временной зависимости проекции его скорости v_x представлен на рисунке. Нарисуйте график, правильно отражающий зависимость координаты x от времени.

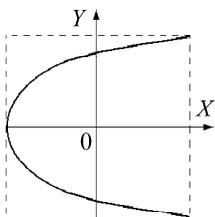


4. Уравнение движения точки дано в виде $x = \sin \pi t / 6$, см. Найдите моменты времени, в которые достигается максимальная скорость и максимальное ускорение.

5. Уравнение гармонического колебания тела массой 2 кг имеет вид $x = \sin \pi t / 6$, см. Определите скорость и кинетическую энергию в момент времени $t = 3$ с.

6. На сколько уменьшится число колебаний математического маятника с периодом колебаний 1 с за сутки, если длина его возрастет на 5 см?

7. Материальная точка участвует одновременно в двух колебаниях, происходящих по одной прямой и выражаемых уравнениями $x_1 = \sin \pi t$, м, и $x_2 = 2 \sin(\pi t + \pi/2)$, м. Определите амплитуду результирующего колебания, его частоту и начальную фазу.



8. Точка одновременно участвует в двух взаимно перпендикулярных гармонических колебаниях с циклическими частотами ω_x и ω_y : $x = A_1 \cos(\omega_x t + \varphi_1)$ и $y = A_2 \cos(\omega_y t + \varphi_2)$. Траектория точки представлена на рисунке (*фигура Лиссажу*). Каково отношение частот ω_y / ω_x ?

9. Математический маятник отклонился при первом колебании в одну сторону на 5 см, при втором колебании на 4 см в ту же сторону. Определите: а) декремент; б) логарифмический декремент затухания.

10. Задано уравнение плоской волны $x = A \cos(\omega t - kl)$, где $A = 0,5$ см, $\omega = 628$ рад/с, $k = 2$ м⁻¹. Определите: 1) частоту колебаний и длину волны; 2) максимальное значение скорости колебаний частиц среды.

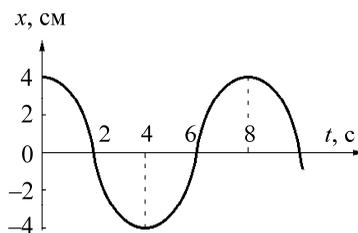
11. Определите разность фаз $\Delta\varphi$ колебаний источника волн, находящегося в упругой среде, и точки этой среды, отстоящей на 0,3 м от источника. Частота колебаний равна 100 Гц; волны распространяются со скоростью 330 м/с.

Модуль 2. Колебания и волны

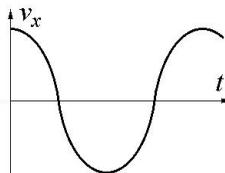
Вариант 15

1. Определите амплитуду, период, циклическую частоту и начальную фазу колебаний, заданных уравнением $x = 5 \cos 2\pi(t + 1/8)$, см.

2. Зависимость координаты колеблющегося тела от времени представлена графиком на рисунке. Напишите в СИ уравнение гармонических колебаний в виде $x = A \cos(\omega t + \varphi_0)$.



3. Линейный гармонический осциллятор совершает колебания. График временной зависимости проекции его скорости v_x представлен на рисунке. Нарисуйте график, правильно отражающий зависимость координаты x от времени.



4. Уравнение гармонического колебания тела имеет вид $x = 5 \sin \pi(t + 0,5)$, см. Определите скорость в момент времени 6 с и максимальное ускорение.

5. Материальная точка массой 10 г совершает колебания согласно уравнению $x = 5 \sin \pi(t + 0,4)$, см. Найдите силу, действующую в момент времени $t = 0,1$ с, а также полную энергию точки.

6. Как соотносятся частоты колебаний математических маятников, если длины соотносятся как 1:9?

7. Два одинаково направленных колебания складываются в одно. Напишите уравнение результирующего колебания, если складываемые колебания заданы уравнениями $x_1 = 3 \sin \omega t$, $x_2 = 4 \cos \omega t$.

8. Точка совершает одновременно два гармонических колебания, происходящих во взаимно перпендикулярных направлениях и выражаемых уравнениями $x = 4\cos\pi t$ и $y = 3\sin\pi t$ (длина – в сантиметрах, время – в секундах). Определите уравнение траектории точки, постройте ее с соблюдением масштаба и укажите направление движения.

9. Амплитуда 3-го колебания больше амплитуды 11-го колебания в 32 раза. Во сколько раз амплитуда затухающих колебаний уменьшится за одно полное колебание?

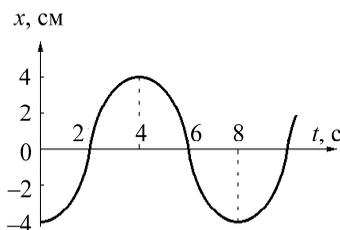
10. Поперечная волна распространяется вдоль оси X . Уравнение незатухающих колебаний источника дано в виде $y = 10\sin 0,5\pi t$, см. Найдите смещение от положения равновесия точки, находящейся на расстоянии 75 см от источника колебаний через 2 с после начала колебаний. Скорость распространения колебаний 3 м/с.

11. Найдите разность фаз колебаний двух точек, находящихся на расстояниях соответственно 4 и 10 м от источника колебаний. Частота колебаний 25 Гц, скорость распространения колебаний 300 м/с.

Модуль 2. *Колебания и волны*

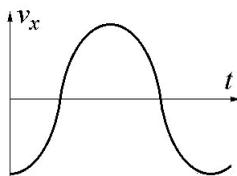
Вариант 16

1. Уравнение колебаний имеет вид $x = 4,2\sin(\pi t/2 + \pi/8)$, см. Чему равны период, амплитуда, фаза и начальная фаза этих колебаний?



2. Зависимость координаты колеблющегося тела от времени представлена графиком на рисунке. Напишите в СИ уравнение гармонических колебаний в виде $x = A\cos(\omega t + \varphi_0)$.

3. Линейный гармонический осциллятор совершает колебания. График временной зависимости проекции его скорости v_x представлен на рисунке. Нарисуйте график, правильно отражающий зависимость координаты x от времени.



4. Точка совершает гармонические колебания. Максимальная скорость точки равна 10 см/с , максимальное ускорение 100 см/с^2 . Найдите циклическую частоту колебаний, их период и амплитуду. Напишите уравнение.

5. Тело массой 5 г совершает колебания с частотой 2 Гц . Амплитуда колебаний 3 мм . Определите: 1) максимальную силу, действующую на точку; 2) полную энергию колеблющейся точки.

6. Диск радиусом 75 см колеблется около горизонтальной оси, проходящей на расстоянии 50 см от оси диска перпендикулярно к плоскости диска. Определите частоту ν колебаний такого физического маятника.

7. Два одинаково направленных гармонических колебания одинаковой частоты с амплитудами 28 и 45 мм складываются в одно колебание с амплитудой 53 мм . Какова разность фаз складываемых колебаний?

8. Материальная точка одновременно участвует в двух взаимно перпендикулярных колебаниях одинаковой частоты, заданных уравнениями $x = 4\sin(\omega_0 t + \pi/2)$, см, и $y = 3\sin(\omega_0 t)$, см. Найдите уравнение траектории, постройте ее с соблюдением масштаба и укажите направление движения.

9. Чему равен логарифмический декремент затухания математического маятника, если за 1 мин амплитуда колебаний уменьшилась в 2 раза? Длина маятника $9,81 \text{ м}$.

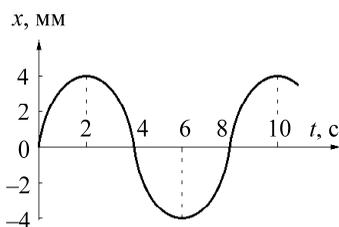
10. Найдите смещение от положения равновесия точки, отстоящей от источника колебаний на расстоянии $L = \lambda/6$ (λ — длина волны) для момента времени $T/3$ (T — период колебаний). Амплитуда колебаний $A = 0,05 \text{ м}$.

11. Определите скорость распространения волн в упругой среде, если разность фаз колебаний двух точек среды, отстоящих друг от друга на 10 см, равна $\pi/6$ рад, а частота колебаний 500 Гц.

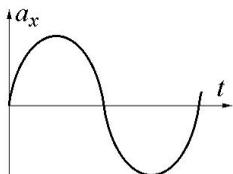
Модуль 2. Колебания и волны

Вариант 17

1. Определите амплитуду, период, циклическую частоту и начальную фазу колебаний, заданных уравнением $x = 3\sin 2\pi(t + 1/4)$, см.



2. Зависимость координаты колеблющегося тела от времени представлена графиком на рисунке. Напишите в СИ уравнение гармонических колебаний в виде $x = A\sin(\omega t + \varphi_0)$.



3. Линейный гармонический осциллятор совершает колебания. График временной зависимости проекции его ускорения a_x представлен на рисунке. Нарисуйте график, правильно отражающий зависимость координаты x от времени.

4. Напишите уравнение гармонического колебательного движения, если максимальное ускорение точки $49,3 \text{ см/с}^2$, частота колебаний 0,4 Гц и смещение точки от положения равновесия в начальный момент времени 25 мм.

5. Материальная точка массой 10 г совершает колебания согласно уравнению $x = 3\sin 2\pi(t + 1/4)$, см. Найдите силу, действующую в момент времени $t = 0,25 \text{ с}$, а также полную энергию точки.

6. Обруч диаметром 113 см висит на гвозде, вбитом в стену, и совершает малые колебания в плоскости, параллельной стене. Найдите период этих колебаний.

7. Два одинаково направленных колебания складываются в одно. Напишите уравнение результирующего колебания, если складываемые колебания заданы уравнениями $x_1 = 12\sin\omega t$, $x_2 = 5\cos\omega t$.

8. Материальная точка одновременно участвует в двух взаимно перпендикулярных колебаниях одинаковой частоты, заданных уравнениями $x = 2\sin\omega t$, см, и $y = 3\sin(\omega t + \pi)$, см. Найдите уравнение траектории, постройте ее с соблюдением масштаба и укажите направление движения.

9. Задано уравнение колебаний $x = 5e^{-0,01t}\sin\left(2\pi t + \frac{\pi}{2}\right)$, см.

Найдите коэффициент затухания и время релаксации.

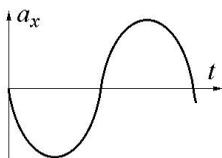
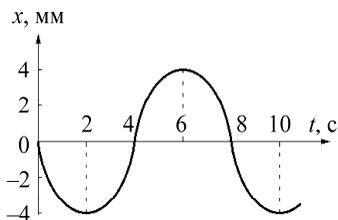
10. Волны с периодом 0,6 с и амплитудой 5 см распространяются со скоростью 20 м/с. Чему равно смещение точки, находящейся на расстоянии 40 м от источника волн в тот момент, когда от начала колебаний прошло 2 с?

11. Две точки находятся на прямой, вдоль которой распространяются волны со скоростью 400 м/с. Частота колебаний 100 Гц, расстояние между точками 40 см. Найдите разность фаз колебаний этих точек.

Модуль 2. Колебания и волны

Вариант 18

1. Определите амплитуду, период, циклическую частоту и начальную фазу колебаний, заданных уравнением $x = 6\sin\pi(t + 1/4)$, см.



2. Зависимость координаты колеблющегося тела от времени представлена графиком на рисунке. Напишите в СИ уравнение гармонических колебаний в виде $x = A \sin(\omega t + \varphi_0)$.

3. Линейный гармонический осциллятор совершает колебания. График временной зависимости проекции его ускорения a_x представлен на рисунке. Нарисуйте график, правильно отражающий зависимость координаты x от времени.

4. Амплитуда гармонического колебания 5 см, период 4 с, начальная фаза $\pi/4$ рад. Напишите уравнение этого колебания. Найдите смещение, скорость и ускорение колеблющейся точки в момент времени $t = 1,5$ с.

5. Материальная точка массой 10 г совершает колебания согласно уравнению $x = 6 \sin \pi(t + 1/4)$, см. Найдите силу, действующую в момент времени 1,25 с, а также полную энергию точки.

6. Из однородного диска радиусом R сделали физический маятник. Вначале ось проходит через образующую диска, потом на расстоянии $R/3$ от центра диска. Определите отношение периодов колебаний диска.

7. Два одинаково направленных гармонических колебания одинаковой частоты с амплитудами 12 и 5 мм складываются в одно колебание с амплитудой 13 мм. Какова разность фаз складываемых колебаний?

8. Материальная точка участвует в двух взаимно перпендикулярных колебаниях, заданных уравнениями $x = \cos(\pi t + \pi)$, см, и $y = 2 \cos \pi t$, см. Найдите уравнение траектории и начертите ее с соблюдением масштаба.

9. Амплитуда 3-го колебания больше амплитуды 7-го колебания в 4 раза. Чему равен логарифмический декремент затухания?

10. Источник, расположенный в точке $x = 0$, колеблется по закону $y = 0,02\sin 100\pi t$, м. Напишите уравнение плоской бегущей незатухающей волны, распространяющейся вдоль направления x со скоростью 300 м/с.

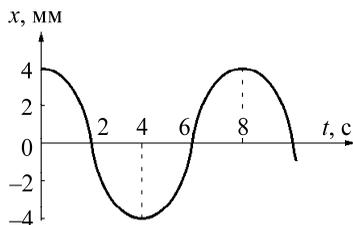
11. Найдите разность фаз колебаний двух точек, отстоящих на расстояние 3 м друг от друга, если длина волны равна 2 м.

Модуль 2. Колебания и волны

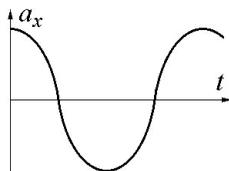
Вариант 19

1. Определите амплитуду, период, циклическую частоту и начальную фазу колебаний, заданных уравнением $x = 10\cos \pi(t + 5/8)$, см.

2. Зависимость координаты колеблющегося тела от времени представлена графиком на рисунке. Напишите в СИ уравнение гармонических колебаний в виде $x = A\sin(\omega t + \varphi_0)$.



3. Линейный гармонический осциллятор совершает колебания. График временной зависимости проекции его ускорения a_x представлен на рисунке. Нарисуйте график, правильно отражающий зависимость координаты x от времени.

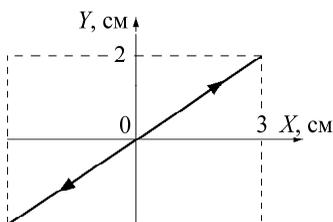


4. Амплитуда гармонического колебания 10 мм, период 2 с, начальная фаза $\pi/2$ рад. Напишите уравнение этого колебания. Найдите смещение, скорость и ускорение колеблющейся точки в момент времени $t = 1,5$ с.

5. Полная энергия колеблющегося тела равна $6 \cdot 10^{-5}$ Дж, максимальная сила, действующая на него, равна $3 \cdot 10^{-3}$ Н. Напишите уравнение движения тела, если период колебания равен 1 с и начальная фаза $\pi/6$ рад.

6. Диск радиусом 48 см колеблется около горизонтальной оси, проходящей через образующую диска перпендикулярно к плоскости диска. Определите частоту колебаний такого физического маятника.

7. Складываются два гармонических колебания одного направления с одинаковыми периодами $T = 1,5$ с и амплитудами $A_1 = 2$ см, $A_2 = 3$ см. Начальные фазы колебаний $\varphi_1 = \pi/2$ рад и $\varphi_2 = \pi/3$ рад. Определите амплитуду и начальную фазу результирующего колебания. Напишите его уравнение.



8. Точка одновременно участвует в двух взаимно перпендикулярных гармонических колебаниях с циклическими частотами $\omega_x = 2\pi$ рад/с и ω_y . Траектория точки представлена на рисунке.

Определите амплитуды, начальные фазы, частоты и напишите законы изменения координат: $x = A_1 \sin(\omega_x t + \varphi_1)$ и $y = A_2 \sin(\omega_y t + \varphi_2)$.

9. За 8 мин амплитуда затухающих колебаний маятника уменьшается в 3 раза. Во сколько раз амплитуда уменьшится за 4 мин, чему равен коэффициент затухания?

10. Поперечная волна распространяется вдоль оси X . Уравнение колебаний источника дано в виде $y = 10\sin 300\pi t$, см. Найдите смещение от положения равновесия точки, находящейся на расстоянии 100 см от источника колебаний через 0,01 с после начала колебаний. Скорость волн 300 м/с.

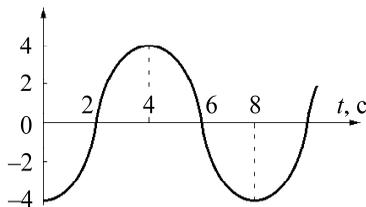
11. Определите разность фаз колебаний источника волн, находящегося в упругой среде, и точки этой среды, отстоящей на 2 м от источника. Частота колебаний равна 500 Гц; волны распространяются со скоростью 400 м/с.

Модуль 2. Колебания и волны

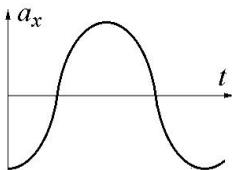
Вариант 20

1. Уравнение гармонических колебаний имеет вид $x = 5 \sin \pi(t + 0,1)$, см. Чему равны период и циклическая частота этих колебаний?

2. Зависимость координаты x , мм колеблющегося тела от времени представлена графиком на рисунке. Напишите в СИ уравнение гармонических колебаний в виде $x = A \sin(\omega t + \varphi_0)$.



3. Линейный гармонический осциллятор совершает колебания. График временной зависимости проекции его ускорения a_x представлен на рисунке. Нарисуйте график, правильно отражающий зависимость координаты x от времени.



4. Материальная точка совершает гармонические колебания, уравнение которых имеет вид $x = 20 \sin \pi t / 6$, мм. Каково значение скорости точки в момент времени 2 с?

5. Амплитуда гармонических колебаний материальной точки $A = 2$ мм, полная энергия колебаний $W = 2 \cdot 10^{-7}$ Дж. При каком смещении от положения равновесия на колеблющуюся точку действует сила 10^{-4} Н?

6. Найдите приведенную длину физического маятника, период колебаний которого равен 0,5 с.

7. Два одинаково направленных гармонических колебания одного периода с амплитудами $A_1 = 10$ см и $A_2 = 6$ см складываются в одно колебание с амплитудой 10 см. Найдите разность фаз этих колебаний.

8. Точка участвует одновременно в двух взаимно перпендикулярных колебаниях $x = 2\sin\omega t$ и $y = 2\cos\omega t$. Найдите траекторию движения точки.

9. Задано уравнение колебаний $x = 8e^{-0,1t} \sin\left(\pi t + \frac{\pi}{4}\right)$, см.

Чему равны амплитуда и координата в момент времени 1 с.

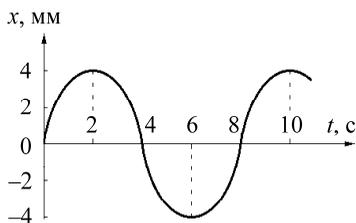
10. Волны с частотой 1 Гц и амплитудой колебаний 2 см распространяются со скоростью 30 м/с. Чему равно смещение точки, находящейся на расстоянии 30 м от источника волн, в тот момент, когда от начала колебаний источника прошло 4 с?

11. Найдите разность фаз колебаний двух точек, находящихся на расстояниях соответственно 20 и 26 м от источника колебаний. Период колебаний 0,04 с, скорость распространения колебаний 100 м/с.

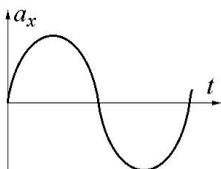
Модуль 2. Колебания и волны

Вариант 21

1. Уравнение гармонических колебаний тела имеет вид $x = 0,1\sin\pi(t/8 + 1/4)$, см. Чему равны амплитуда, частота и начальная фаза колебаний?



2. Зависимость координаты колеблющегося тела от времени представлена графиком на рисунке. Напишите в СИ уравнение гармонических колебаний в виде $x = A\cos(\omega t + \varphi_0)$.



3. Линейный гармонический осциллятор совершает колебания. График временной зависимости проекции его ускорения a_x представлен на рисунке. Нарисуйте график, пра-

вильно отражающий зависимость проекции скорости v_x от времени.

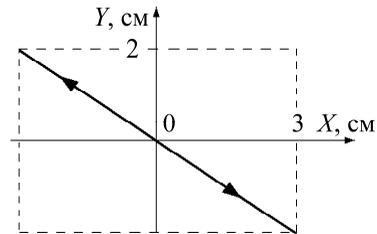
4. Материальная точка совершает гармонические колебания, уравнение которых имеет вид $x = 20 \sin \pi t / 6$, мм. Каково значение ускорения точки в момент времени 2 с?

5. Материальная точка массой 20 г колеблется с периодом 0,05 с и амплитудой 0,2 см. Определите полную энергию колеблющейся точки.

6. Однородный стержень совершает малые колебания в вертикальной плоскости около горизонтальной оси, проходящей через его верхний конец. Длина стержня $l = 1$ м. Определите период колебаний стержня и его приведенную длину.

7. Напишите уравнение движения, получающегося от сложения двух одинаково направленных гармонических колебаний с одинаковыми периодами по 8 с и одинаковыми амплитудами по 2 см. Начальная фаза одного колебания равна нулю, второго $+\pi/4$ рад.

8. Точка одновременно участвует в двух взаимно перпендикулярных гармонических колебаниях с циклическими частотами $\omega_x = 2\pi$ рад/с и ω_y . Траектория точки представлена на рисунке. Определите амплитуды, начальные фазы, частоты и напишите законы изменения координат $x = A_1 \sin(\omega_x t + \varphi_1)$ и $y = A_2 \sin(\omega_y t + \varphi_2)$.



9. Амплитуда 3-го колебания больше амплитуды 7-го колебания в 16 раз. Во сколько раз амплитуда затухающих колебаний уменьшится за одно полное колебание?

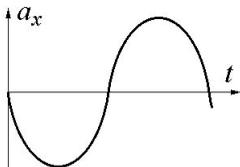
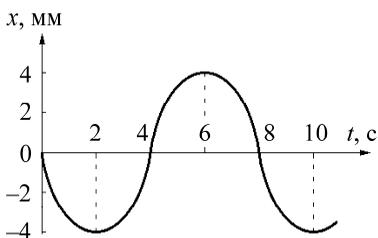
10. Найдите смещение от положения равновесия точки, отстоящей от источника колебаний на расстоянии $L = 2\lambda/3$ (λ – длина волны) для момента времени $2T/3$ с (T – период колебаний). Амплитуда колебаний равна 0,02 м.

11. Две точки находятся на прямой, вдоль которой распространяются волны со скоростью 330 м/с. Частота колебаний 10 кГц, расстояние между точками 40 см. Найдите разность фаз колебаний этих точек.

Модуль 2. Колебания и волны

Вариант 22

1. Уравнение гармонических колебаний имеет вид $x = \cos 5\pi t$, см. Определите амплитуду, циклическую частоту, период и начальную фазу этих колебаний.



2. Зависимость координаты колеблющегося тела от времени представлена графиком на рисунке. Напишите в СИ уравнение гармонических колебаний в виде $x = A \cos(\omega t + \varphi_0)$.

3. Линейный гармонический осциллятор совершает колебания. График временной зависимости проекции его ускорения a_x представлен на рисунке. Нарисуйте график, правильно отражающий зависимость проекции скорости v_x от времени.

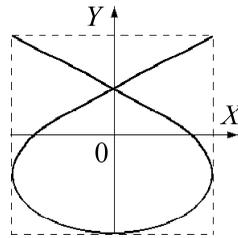
4. Материальная точка совершает гармонические колебания, уравнение которых имеет вид $x = \cos 6\pi t$, см. Каково значение скорости точки в момент времени $t = \frac{1}{12}$ с?

5. Материальная точка массой 0,1 кг колеблется согласно уравнению $x = \cos 6\pi t$, см. Определите максимальную силу, действующую на точку, и максимальную кинетическую энергию.

6. Диск радиусом 48 см колеблется около горизонтальной оси, проходящей на расстоянии 36 см от оси диска перпендикулярно к плоскости диска. Определите частоту ν колебаний такого физического маятника.

7. Складываются два колебания одинакового направления и одинакового периода: $x_1 = \sin \pi t$, см, и $x_2 = \sin \pi(t + 0,5)$, см. Определите амплитуду и начальную фазу результирующего колебания. Напишите его уравнение.

8. Точка одновременно участвует в двух взаимно перпендикулярных гармонических колебаниях с циклическими частотами ω_x и ω_y : $x = A_1 \cos(\omega_x t + \varphi_1)$ и $y = A_2 \cos(\omega_y t + \varphi_2)$. Траектория точки представлена на рисунке (*фигура Лиссажу*). Каково отношение частот ω_y/ω_x ?



9. Логарифмический декремент затухания математического маятника равен 0,02. Найдите, во сколько раз уменьшится амплитуда колебаний за одно полное колебание маятника.

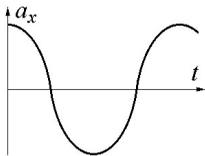
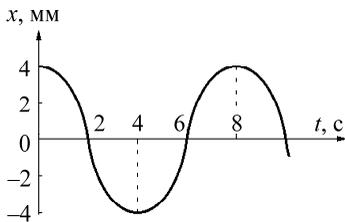
10. От источника колебаний распространяются волны вдоль прямой линии. Амплитуда колебаний 10 см. Каково смещение точки, удаленной от источника на $1/4$ длины волны, в момент, когда от начала колебаний источника прошло время, равное $1,9$ периода колебаний?

11. Определите скорость распространения волн в упругой среде, если разность фаз колебаний двух точек среды, отстоящих друг от друга на 1 см, равна $\pi/6$, а частота колебаний 50 Гц.

Модуль 2. Колебания и волны

Вариант 23

1. Определите амплитуду, период, циклическую частоту и начальную фазу колебаний, заданных уравнением $x = 3 \sin \pi(t + 1/2)$, см.



2. Зависимость координаты колеблющегося тела от времени представлена графиком на рисунке. Напишите в СИ уравнение гармонических колебаний в виде $x = A \cos(\omega t + \varphi_0)$.

3. Линейный гармонический осциллятор совершает колебания. График временной зависимости проекции его ускорения a_x представлен на рисунке. Нарисуйте график, правильно отражающий зависимость проекции скорости v_x от времени.

4. Уравнение колебаний тела имеет вид $x = \cos 6\pi t$, см. Напишите уравнения проекций скорости и ускорения этого тела?

5. Материальная точка массой 10 г колеблется по уравнению $x = 5 \sin \pi(t + 1/4)$, см. Напишите уравнение для силы, действующей на точку, и ее потенциальной энергии.

6. Один математический маятник имеет период 3 с, а другой 4 с. Каков период колебаний математического маятника, длина которого равна сумме длин указанных маятников?

7. Материальная точка участвует одновременно в двух колебаниях, происходящих по одной прямой и выражаемых уравнениями $x_1 = \sin \pi t$, мм, и $x_2 = 2 \sin \pi t$, мм. Определите амплитуду результирующего колебания, его частоту и начальную фазу. Напишите уравнение движения.

8. Точка совершает одновременно два гармонических колебания, происходящих во взаимно перпендикулярных направлениях и выражаемых уравнениями $x = 6 \cos \pi t$ и $y = 4 \sin \pi t$ (длина в миллиметрах, время – в секундах). Определите уравнение траектории точки, постройте ее с соблюдением масштаба и укажите направление движения.

9. Математический маятник отклонился при первом колебании в одну сторону на 10 см, при третьем колебании – на 8 см в ту же сторону. Определите: а) декремент; б) логарифмический декремент затухания.

10. Поперечная волна распространяется вдоль упругого шнура со скоростью 15 м/с. Период колебаний точек шнура $T = 2,2$ с. Определите длину волны.

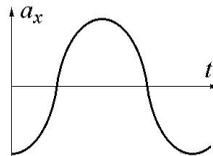
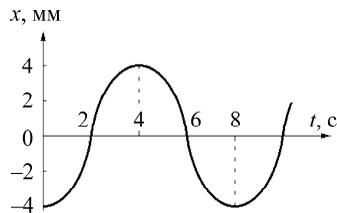
11. Определите разность фаз колебаний источника волн, находящегося в упругой среде, и точки этой среды, отстоящей на 3 м от источника. Частота колебаний равна 10 кГц, волны распространяются со скоростью 1500 м/с.

Модуль 2. Колебания и волны

Вариант 24

1. Уравнение гармонических колебаний имеет вид $x = 2\sin\pi(t + 1/8)$, см. Чему равны период, амплитуда, фаза и начальная фаза этих колебаний?

2. Зависимость координаты колеблющегося тела от времени представлена графиком на рисунке. Напишите в СИ уравнение гармонических колебаний в виде $x = A\cos(\omega t + \varphi_0)$.



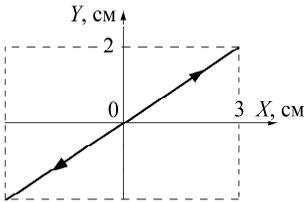
3. Линейный гармонический осциллятор совершает колебания. График временной зависимости проекции его ускорения a_x представлен на рисунке. Нарисуйте график, правильно отражающий зависимость проекции скорости v_x от времени.

4. Точка колеблется с амплитудой 10 см и периодом 20 с. Начальная фаза равна нулю. Напишите уравнение колебаний. Найдите смещение от положения равновесия, скорость и ускорение точки в момент времени $t = 2$ с.

5. Материальная точка массой 5 г колеблется по уравнению $x = 5 \sin \pi(t + 1/4)$, см. Напишите уравнение для силы, действующей на точку, и уравнение кинетической энергии.

6. Однородный стержень длиной 1 м совершает малые колебания в вертикальной плоскости около горизонтальной оси, проходящей на расстоянии 10 см от его верхнего конца. Определите период колебаний стержня.

7. Точка участвует в двух одинаково направленных колебаниях $x_1 = A_1 \sin \omega t$ и $x_2 = A_2 \cos \omega t$, где $A_1 = 1$ см, $A_2 = 2$ см, $\omega = 1$ рад/с. Определите амплитуду результирующих колебаний и их частоту.



8. Точка одновременно участвует в двух взаимно перпендикулярных гармонических колебаниях с циклическими частотами $\omega_x = 2\pi$ рад/с и ω_y . Траектория точки представлена на рисунке. Определите амплитуды, начальные

фазы, частоты и напишите законы изменения координат $x = A_1 \sin(\omega_x t + \phi_1)$ и $y = A_2 \sin(\omega_y t + \phi_2)$.

9. Задано уравнение колебаний $x = 5e^{-0,2t} \sin\left(\frac{\pi}{2}t + \frac{\pi}{2}\right)$, см.

Чему равна амплитуда и координата в момент времени 1 с.

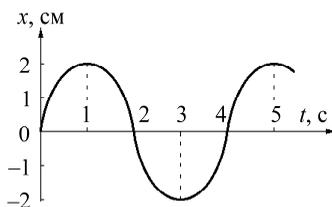
10. Поперечная волна распространяется вдоль оси X . Уравнение незатухающих колебаний источника дано в виде $y = 10 \sin \pi t$, см. Напишите уравнение координаты y для точек волны в момент $t = 2$ с после начала колебаний, если скорость волны 2 м/с.

11. Две точки находятся на одной прямой, вдоль которой распространяются волны со скоростью 50 м/с. Период колебаний 0,05 с. Расстояние между точками $x = 50$ см. Найдите разность фаз колебаний.

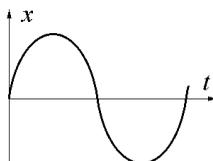
Модуль 2. Колебания и волны

Вариант 25

1. Уравнение гармонических колебаний тела имеет вид $x = 4 \sin \pi(t + 0,1)$, см. Определите амплитуду, циклическую частоту, период и начальную фазу этих колебаний.



2. Зависимость координаты колеблющегося тела от времени представлена графиком на рисунке. Напишите в СИ уравнение гармонических колебаний в виде $x = A \sin(\omega t + \varphi_0)$.



3. Линейный гармонический осциллятор совершает колебания. График временной зависимости его координаты x представлен на рисунке. Нарисуйте график, правильно отражающий зависимость проекции скорости v_x от времени.

4. Уравнение гармонического колебания тела имеет вид $x = 5 \sin \pi(t + 0,5)$, см. Определите максимальное ускорение и скорость в момент времени $t = 1$ с.

5. Уравнение гармонического колебания тела массой 2 кг имеет вид $x = 5 \cos(2\pi t + \pi/4)$, см. Определите кинетическую и потенциальную энергию в момент времени $t = 4$ с.

6. Однородный стержень длиной 1 м совершает малые колебания в вертикальной плоскости около горизонтальной оси, проходящей на расстоянии 10 см от его верхнего конца. Определите частоту колебаний.

7. Складываются два гармонических колебания одного направления с одинаковыми периодами $T = 1$ с и амплитудами $A_1 = 2$ см, $A_2 = 3$ см. Начальные фазы колебаний $\varphi_1 = \pi/2$ рад

и $\varphi_2 = \pi/4$ рад. Определите амплитуду и начальную фазу результирующего колебания. Напишите его уравнение.

8. Материальная точка участвует одновременно в двух взаимно перпендикулярных колебаниях, заданных уравнениями $x = \cos \pi t$ и $y = \cos(\pi t/2)$. Найдите уравнение траектории и вычертите ее с соблюдением масштаба.

9. Амплитуда 3-го колебания больше амплитуды 7-го колебания в 8 раз. Чему равен логарифмический декремент затухания?

10. Поперечная волна распространяется вдоль оси X . Уравнение незатухающих колебаний источника дано в виде $y = 10 \sin 300 \pi t$, см. Найдите смещение от положения равновесия точки, находящейся на расстоянии 50 см от источника колебаний через 0,01 с после начала колебаний. Скорость распространения колебаний 150 м/с.

11. Две точки находятся на прямой, вдоль которой распространяются волны со скоростью 40 м/с. Частота колебаний 20 Гц, расстояние между точками 40 см. Найдите разность фаз колебаний этих точек.

Модуль 3. ОСНОВЫ МОЛЕКУЛЯРНОЙ ФИЗИКИ И ТЕРМОДИНАМИКИ

Модуль 3. Основы молекулярной физики и термодинамики

Вариант 1

1. Найдите среднюю квадратичную скорость молекул воздуха при температуре $t = 17$ °С. Молярная масса воздуха $\mu = 0,029$ кг/моль.

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

3. Вычислите удельные теплоемкости c_V и c_P газов: 1) гелия; 2) водорода; 3) углекислого газа.

4. Воздух, занимающий объем $V_1 = 1$ л при давлении $p_1 = 0,8$ МПа изотермически расширился до $V_2 = 10$ л. Определите работу, совершенную газом.

5. Азот массой $m = 5$ кг, нагретый на $\Delta T = 150$ К, сохранил неизменный объем V . Найдите: 1) количество теплоты Q , сообщенное газу; 2) изменение ΔU внутренней энергии; 3) совершенную газом работу.

6. Определите работу адиабатного расширения водорода массой $m = 4$ г, если температура газа понизилась на $\Delta T = 10$ К.

7. Идеальная тепловая машина, работающая по циклу Карно, за цикл получает от нагревателя количество теплоты $Q_H = 2,512$ кДж. Температура нагревателя $T_H = 400$ К, температура холодильника $T_X = 300$ К. Найдите работу A , совершаемую машиной за один цикл, и количество теплоты Q_X , отдаваемое за один цикл холодильнику.

8. Вычислите изменение энтропии 1 л воды при нагревании ее от 0 до 100 °С.

9. Барометр в кабине летящего вертолета показывает давление $p = 90$ кПа. На какой высоте h летит вертолет, если на взлетной площадке барометр показал давление $p_0 = 100$ кПа? Считать, что температура T воздуха равна 290 К и не меняется с высотой.

10. Определите наиболее вероятную скорость молекул газа, плотность которого при давлении 40 кПа составляет $0,35$ кг/м³.

Модуль 3. Основы молекулярной физики и термодинамики

Вариант 2

1. В сосуде объемом $V = 2$ л находится масса $m = 10$ г кислорода при давлении $p = 90,6$ кПа. Найдите среднюю квадратичную скорость молекул газа, число молекул, находящихся в сосуде, и плотность газа.

2. В баллоне емкостью $V = 2,0$ л находится аргон под давлением $p_1 = 800$ кПа и при температуре $T_1 = 325$ К. Когда из баллона было взято некоторое количество аргона, давление в баллоне понизилось до $p_2 = 600$ кПа, а температура установилась $T_2 = 300$ К. Определите массу аргона, взятого из баллона.

3. Найдите отношение удельных теплоемкостей c_p/c_V для кислорода.

4. Какая работа совершается при изотермическом расширении водорода массой $m = 5$ г, взятого при температуре $T = 290$ К, если объем газа увеличивается в 3 раза?

5. Водород занимает объем $V_1 = 10$ м³ при давлении $p_1 = 100$ кПа. Газ нагрели при постоянном объеме до давления $p_2 = 300$ кПа. Определите: 1) изменение ΔU внутренней энергии газа; 2) работу A , совершаемую газом; 3) количество теплоты Q , сообщенное газу.

6. Кислород, занимавший объем $V_1 = 1$ л под давлением $p_1 = 1,2$ МПа, адиабатно расширился до объема $V_2 = 10$ л. Определите работу расширения газа.

7. Идеальная тепловая машина, работающая по циклу Карно, совершает за один цикл работу $A = 2,94$ кДж и отдает холодильнику теплоту $Q_x = 13,4$ кДж. Найдите КПД цикла.

8. Нагретый докрасна кусок железа массой 2 кг при температуре $T_1 = 880$ К бросают в большое озеро, температура в котором $T_2 = 280$ К. Определите изменение энтропии куска железа.

9. На какой высоте h над поверхностью Земли атмосферное давление вдвое меньше, чем на ее поверхности? Считать, что температура T воздуха равна 290 К и не меняется с высотой.

10. Определите наиболее вероятную скорость молекул азота при 27 °С.

Модуль 3. Основы молекулярной физики и термодинамики

Вариант 3

1. Масса $m = 1$ кг двухатомного газа находится под давлением $p = 80$ кПа и имеет плотность $\rho = 4$ кг/м³. Найдите энергию теплового движения w молекул газа при этих условиях.

2. Баллон емкостью $V = 40$ л заполнен азотом, температура которого $T = 300$ К. Когда часть азота израсходовали, давление в баллоне понизилось на $\Delta p = 400$ кПа. Определите массу Δm израсходованного азота. Процесс считать изотермическим.

3. Плотность двухатомного газа при нормальных условиях $\rho = 1,43$ кг/м³. Найдите удельные теплоемкости c_p и c_v этого газа.

4. Газ, занимавший объем $V_1 = 12$ л под давлением 100 кПа, был изобарно нагрет от температуры $T_1 = 300$ К до температуры $T_2 = 400$ К. Определите работу расширения газа.

5. При изохорическом нагревании кислорода объемом $V = 50$ л давление газа изменилось на $\Delta p = 0,5$ МПа. Найдите количество теплоты Q , сообщенное газу.

6. Азот занимает при температуре $T_1 = 300$ К объем $V_1 = 0,5$ м³. В результате адиабатного сжатия давление газа увеличилось в 3 раза. Определите конечный объем газа.

7. В идеальном тепловом двигателе абсолютная температура нагревателя в 3 раза выше, чем температура холодильника. Нагреватель передал газу 60 кДж теплоты. Какую работу совершил газ?

8. В теплоизолированный сосуд, содержащий 2 кг льда при температуре 0 °С, залили 1 кг воды 100 °С. Определите равновесную температуру системы и изменение энтропии системы в результате теплообмена. Удельная теплоемкость воды 4200 Дж/(кг·К), удельная теплота плавления льда 330 кДж/кг.

9. На какой высоте давление воздуха составляет 60 % от давления на уровне моря? Считать, что температура воздуха равна 10 °С и не меняется с высотой.

10. При какой температуре средняя квадратичная скорость молекул кислорода больше их наиболее вероятной скорости на 100 м/с?

Модуль 3. Основы молекулярной физики и термодинамики

Вариант 4

1. Плотность некоторого газа $\rho = 0,082 \text{ кг/м}^3$ при давлении $p = 100 \text{ кПа}$ и температуре $t = 17 \text{ }^\circ\text{C}$. Найдите среднюю квадратичную скорость молекул газа. Какова молярная масса μ этого газа?

2. Под каким давлением находится углекислый газ в баллоне огнетушителя емкостью 2 дм^3 , если баллон имел массу $4,2 \text{ кг}$, а после заполнения $5,6 \text{ кг}$? Температура баллона $37 \text{ }^\circ\text{C}$. Масса моля углекислого газа 44 г .

3. Каковы удельные теплоемкости c_p и c_v смеси газов, содержащей кислород массой $m_1 = 10 \text{ г}$ и азот массой $m_2 = 20 \text{ г}$?

4. Кислород, занимающий при давлении $p_1 = 1 \text{ МПа}$ объем $V_1 = 5 \text{ л}$, изотермически расширяется в $n = 3$ раза. Определите работу, совершенную газом.

5. Кислород при неизменном давлении $p = 80 \text{ кПа}$ нагревается. Его объем увеличивается от $V_1 = 1 \text{ м}^3$ до $V_2 = 3 \text{ м}^3$. Определите: 1) изменение ΔU внутренней энергии кислорода; 2) работу A , совершенную им при расширении; 3) количество теплоты Q , сообщенное газу.

6. Азот находится при температуре $T_1 = 300 \text{ К}$. В результате адиабатного сжатия давление газа увеличилось в 3 раза. Определите конечную температуру газа.

7. Идеальная тепловая машина работает по циклу Карно. При этом 80 % количества теплоты, получаемого от нагревателя, передается холодильнику. Машина получает от нагревателя количество теплоты $Q_n = 6,28 \text{ кДж}$. Найдите КПД цикла и работу A , совершаемую за один цикл.

8. Объем $V_1 = 1 \text{ м}^3$ воздуха, находящегося при температуре $t_1 = 0 \text{ }^\circ\text{C}$ и давлении $p_1 = 100 \text{ кПа}$, изотермически расширяется в 2 раза. Найдите изменение ΔS энтропии при этом процессе.

9. Каково давление воздуха в шахте на глубине 1 км, если считать, что температура по всей высоте постоянная и равна $22 \text{ }^\circ\text{C}$, а ускорение свободного падения не зависит от высоты? Давление воздуха у поверхности Земли примите равным p_0 .

10. Определите наиболее вероятную скорость молекул азота при $127 \text{ }^\circ\text{C}$.

Модуль 3. Основы молекулярной физики и термодинамики

Вариант 5

1. Найдите внутреннюю энергию 20 г кислорода при температуре $t = 10 \text{ }^\circ\text{C}$. Какая часть этой энергии приходится на долю поступательного движения молекул и какая часть на долю вращательного движения?

2. Найдите массу m воздуха, заполняющего аудиторию высотой $h = 5 \text{ м}$ и площадью пола $S = 200 \text{ м}^2$. Давление воздуха $p = 100 \text{ кПа}$, температура помещения $17 \text{ }^\circ\text{C}$. Молярная масса воздуха $\mu = 0,029 \text{ кг/моль}$.

3. Молярная масса некоторого газа $\mu = 0,03 \text{ кг/моль}$, отношение $c_p/c_v = 1,4$. Найдите удельные теплоемкости c_p и c_v этого газа.

4. Азот массой $m = 14 \text{ г}$ сжимают изотермически при температуре $T = 300 \text{ К}$ от давления $p_1 = 100 \text{ кПа}$ до давления $p_2 = 500 \text{ кПа}$. Определите работу сжатия.

5. Азот нагревался при постоянном давлении, причем ему было сообщено количество теплоты $Q = 21 \text{ кДж}$. Определите работу A , которую совершил при этом газ, и изменение ΔU его внутренней энергии.

6. Азот массой $m = 1 \text{ кг}$ занимает при температуре $T_1 = 300 \text{ К}$ объем $V_1 = 0,5 \text{ м}^3$. В результате адиабатного сжатия

давление газа увеличилось в 3 раза. Определите изменение внутренней энергии газа.

7. Работа, совершенная газом за цикл в идеальной тепловой машине, в 4 раза меньше теплоты, отданной газом. Каково отношение абсолютной температуры нагревателя к абсолютной температуре холодильника?

8. При нагревании 1 кмоль двухатомного газа его термодинамическая температура увеличивается в 1,5 раза. Найдите изменение ΔS энтропии, если нагревание происходит изобарически.

9. Определите отношение давления воздуха на высоте 1 км к давлению на дне скважины глубиной 1 км. Воздух у поверхности Земли находится при нормальных условиях, и его температура не зависит от высоты.

10. Определите наиболее вероятную скорость молекул водорода при 27°C .

Модуль 3. Основы молекулярной физики и термодинамики

Вариант 6

1. Среднеквадратичная скорость некоторого газа при нормальных условиях равна 480 м/с. Сколько молекул в 1 г этого газа?

2. Масса $m = 12$ г газа занимает объем $V = 4$ л при температуре $t_1 = 7^\circ\text{C}$. После нагревания газа при постоянном давлении его плотность стала равной $\rho = 0,6$ кг/м³. До какой температуры нагрели газ?

3. В баллоне находятся аргон и азот. Определите удельную теплоемкость c_V смеси этих газов, если массовые доли аргона (w_1) и азота (w_2) одинаковы и равны 0,5.

4. При изобарном нагревании $\nu = 2$ моль некоторого идеального газа на $\Delta T = 90$ К ему было сообщено количество теплоты 5,25 кДж. Определите работу, совершенную газом, и изменение его внутренней энергии.

5. Идеальный газ получил количество теплоты 300 Дж, и при этом внешние силы совершили над ним работу 100 Дж. Как изменилась внутренняя энергия газа?

6. Двухатомный идеальный газ занимает объем $V_1 = 1$ л и находится под давлением $p_1 = 0,2$ МПа. После адиабатного сжатия объем стал V_2 , а давление p_2 . В результате последующего изохорного процесса газ охлаждается до первоначальной температуры, а его давление $p_3 = 0,1$ МПа. Определите объем V_2 .

7. Температура нагревателя идеальной тепловой машины 127 °С, а холодильника 27 °С. Количество теплоты, получаемое от нагревателя за 1 с, равно 60 кДж. Вычислите количество теплоты, отдаваемое холодильнику за 10 с.

8. При нагревании 1 кмоль двухатомного газа его термодинамическая температура увеличивается в 1,5 раза. Найдите изменение ΔS энтропии, если нагревание происходит изохорически.

9. На какой высоте плотность воздуха в e раз меньше по сравнению с его плотностью на уровне моря? Температуру воздуха и ускорение свободного падения считайте не зависящими от высоты.

10. Определите среднюю арифметическую скорость молекул азота при 27 °С.

Модуль 3. Основы молекулярной физики и термодинамики

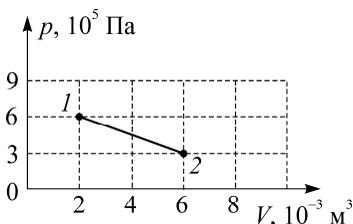
Вариант 7

1. Давление p газа равно 1 МПа, концентрация n его молекул равна 10^{20} см⁻³. Определите: 1) температуру T газа; 2) среднюю кинетическую энергию $\langle \epsilon_n \rangle$ поступательного движения молекул газа.

2. Масса $m = 10$ г кислорода находится при давлении $p = 304$ кПа и температуре $t_1 = 10$ °С. После расширения вследствие нагревания при постоянном давлении кислород занял объем $V_2 = 10$ л. Найдите объем V_1 газа до расширения, температуру

t_2 после расширения, плотности ρ_1 и ρ_2 газа до и после расширения.

3. Вычислить теплоемкость при постоянном объеме двухатомного газа, заключенного в сосуд $V = 10$ л при нормальных условиях.



4. Какую работу совершает газ при переходе из состояния 1 в состояние 2 в процессе, изображенном на рисунке?

5. Для повышения температуры газа, имеющего массу 20 кг и молярную массу 0,028 кг/моль, на 50 К при постоянном давлении необходимо затратить количество теплоты 1 МДж. Какое количество теплоты следует отнять от этого газа при постоянном объеме, чтобы его температура понизилась на 50 К?

6. Двухатомный идеальный газ занимает объем $V_1 = 1$ л и находится под давлением $p_1 = 0,1$ МПа. После адиабатного расширения газ характеризуется объемом V_2 и давлением p_2 . В результате последующего изохорного процесса газ охлаждается до первоначальной температуры, а его давление $p_3 = 0,2$ МПа. Определите давление p_2 .

7. Идеальная тепловая машина, работающая по циклу Карно, совершает за один цикл работу $7,35 \cdot 10^4$ Дж. Температура нагревателя 100 °С, температура холодильника 0 °С. Найдите: 1) КПД машины; 2) количество теплоты, получаемое машиной за один цикл от нагревателя; 3) количество теплоты, отдаваемое за один цикл холодильнику.

8. Масса $m = 10$ г кислорода нагревается от температуры $T_1 = 323$ К до температуры $T_2 = 423$ К. Найдите изменение ΔS энтропии, если нагревание происходит изобарически.

9. Обсерватория расположена на высоте $h = 3250$ м над уровнем моря. Найдите давление воздуха на этой высоте. Температуру воздуха считайте постоянной и равной 5 °С. Молярная

масса воздуха $\mu = 0,029$ кг/моль. Давление воздуха на уровне моря $p_0 = 101,3$ кПа.

10. Определите наиболее вероятную скорость молекул газа, плотность которого при давлении 100 кПа составляет $1,25$ кг/м³.

Модуль 3. Основы молекулярной физики и термодинамики

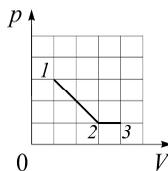
Вариант 8

1. Найдите среднюю квадратичную скорость $\langle v_{\text{кв}} \rangle$ молекул водорода. Вычисления произведите для трех значений температуры: 1) $T = 20$ К; 2) $T = 300$ К; 3) $T = 5000$ К.

2. Азот массой $m = 5$ г, находящийся в закрытом сосуде объемом $V = 4$ л при температуре 20 °С, нагревают до температуры 40 °С. Найдите давления газа до и после нагревания.

3. Разность удельных теплоемкостей $c_p - c_v$ некоторого двухатомного газа равна 260 Дж/(кг·К). Найдите молярную массу μ газа и его удельные теплоемкости c_p и c_v .

4. На рисунке показано, как менялось давление идеального газа в зависимости от его объема при переходе из состояния 1 в состояние 2, а затем в состояние 3. Каково отношение работ газа A_{12}/A_{23} на этих двух отрезках pV -диаграммы?



5. На нагревание кислорода массой $m = 160$ г на $\Delta T = 12$ К было затрачено количество теплоты $Q = 1,76$ кДж. Как протекал процесс: при постоянном объеме или при постоянном давлении?

6. Кислород, занимающий при давлении $p_1 = 1$ МПа объем $V_1 = 5$ л, адиабатно расширяется в $n = 3$ раза. Определите работу расширения газа.

7. Совершая цикл Карно, газ получил от нагревателя теплоту $Q_{\text{н}} = 1$ кДж и совершил работу $A = 200$ Дж. Температура нагревателя $T_{\text{н}} = 375$ К. Определите температуру холодильника.

8. Масса $m = 10$ г кислорода нагревается от температуры $T_1 = 323$ К до температуры $T_2 = 423$ К. Найдите изменение ΔS энтропии, если нагревание происходит изохорически.

9. На какой высоте h давление воздуха составляет 75 % от давления на уровне моря? Температуру воздуха считать постоянной и равной 0°C .

10. Определите среднюю арифметическую скорость молекул газа, плотность которого при давлении 100 кПа составляет $0,85\text{ кг/м}^3$.

Модуль 3. Основы молекулярной физики и термодинамики

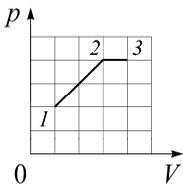
Вариант 9

1. При какой температуре T средняя квадратичная скорость атомов гелия станет равной второй космической скорости $v_2 = 11,2\text{ км/с}$?

2. При температуре $t = 50^\circ\text{C}$ давление насыщенного водяного пара $p = 12,3\text{ кПа}$. Найдите плотность ρ водяного пара.

3. Удельная теплоемкость некоторого двухатомного газа $c_p = 14,7\text{ кДж/(кг}\cdot\text{К)}$. Найдите молярную массу этого газа.

4. На рисунке показано, как менялось давление идеального газа в зависимости от его объема при переходе из состояния 1 в состояние 2, а затем в состояние 3. Каково отношение работ газа A_{12}/A_{23} на этих двух отрезках pV -диаграммы?



5. Азот массой $m = 200\text{ г}$ расширяется изотермически при температуре $T = 280\text{ К}$, причем объем газа увеличивается в два раза. Найдите: 1) изменение ΔU внутренней энергии; 2) совершенную при расширении газа работу A ; 3) количество теплоты Q , полученное газом.

6. До какой температуры охладится воздух, находящийся при $t_1 = 0^\circ\text{C}$, если он расширяется адиабатически от объема V_1 до объема $V_2 = 2V_1$?

7. Рабочее тело идеальной тепловой машины, работающей по циклу Карно, получает от нагревателя с температурой 273°C количество теплоты 80 кДж . Роль холодильника играет окру-

жающий воздух, температура которого $0\text{ }^{\circ}\text{C}$. На какую максимальную высоту эта машина может поднять груз массой 400 кг ?

8. Масса $m = 10,5\text{ г}$ азота изотермически расширяется от объема $V_1 = 2\text{ л}$ до объема $V_2 = 5\text{ л}$. Найдите изменение ΔS энтропии в этом процессе.

9. Пассажирский самолет совершает полеты на высоте $h_1 = 8300\text{ м}$. Чтобы не снабжать пассажиров кислородными масками, в кабине при помощи компрессора поддерживается постоянное давление, соответствующее высоте $h_2 = 2700\text{ м}$. Найдите разность давлений внутри и снаружи кабины. Температуру наружного воздуха считать равной $0\text{ }^{\circ}\text{C}$.

10. Определите наиболее вероятную скорость молекул водорода при температуре $327\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Модуль 3. Основы молекулярной физики и термодинамики

Вариант 10

1. Определите давление газа на стенки сосуда, если его плотность равна $0,01\text{ кг/м}^3$, а средняя квадратичная скорость молекул газа составляет 480 м/с .

2. При температуре $t = 35\text{ }^{\circ}\text{C}$ и давлении $p = 7\text{ атм}$ плотность некоторого газа $\rho = 12,2\text{ кг/м}^3$. Определите относительную молекулярную массу газа.

3. Найдите удельную теплоемкость c_p газовой смеси, состоящей из количества $\nu_1 = 3$ моль аргона и количества $\nu_2 = 2$ моль азота.

4. В процессе расширения 5 молей аргона при постоянном давлении объем газа увеличился в 5 раз, а внутренняя энергия изменилась на 60 кДж . Определите начальную температуру аргона.

5. В цилиндре под поршнем находится азот массой $m = 0,6\text{ кг}$, занимающий объем $V_1 = 1,2\text{ м}^3$ при температуре $T = 560\text{ К}$. В результате подвода теплоты газ расширился и занял объем $V_2 = 4,2\text{ м}^3$, причем температура осталась неизменной. Найдите:

1) изменение ΔU внутренней энергии; 2) совершенную при расширении газа работу A ; 3) количество теплоты Q , полученное газом.

6. Объем $V_1 = 7,5$ л кислорода адиабатически сжимается до объема $V_2 = 1$ л, причем в конце сжатия установилось давление $p_2 = 1,6$ МПа. Под каким давлением p_1 находился газ до сжатия?

7. Совершая цикл Карно, газ отдал охладителю $2/3$ теплоты, полученной от нагревателя. Определите температуру холодильника, если температура нагревателя $T_n = 425$ К.

8. Найдите изменение ΔS энтропии при изотермическом расширении массы $m = 6$ г водорода от давления $p_1 = 100$ кПа до давления $p_2 = 50$ кПа.

9. Найдите плотность воздуха у поверхности Земли и на высоте $h = 4$ км от поверхности Земли. Температуру воздуха считать постоянной и равной 0°C . Давление воздуха у поверхности Земли $p_0 = 100$ кПа.

10. При какой температуре T средняя арифметическая скорость атомов водорода станет равной второй космической скорости $v_2 = 11,2$ км/с?

Модуль 3. Основы молекулярной физики и термодинамики

Вариант 11

1. Колба вместимостью $V = 4$ л содержит некоторый газ массой $m = 0,6$ г под давлением $p = 200$ кПа. Определите среднюю квадратичную скорость $\langle v_{\text{кв}} \rangle$ молекул газа.

2. Имеются два сосуда, соединенные трубкой с закрытым краном. В левом сосуде объемом 5 л находится газ под давлением 0,2 МПа, а в правом – объемом 7 л – находится газ под давлением 0,3 МПа. Какое установится давление в сосудах, если кран открыть? Процесс изотермический.

3. В закрытом сосуде находится смесь азота массой $m_1 = 56$ г и кислорода массой $m_2 = 64$ г. Определите изменение внутренней энергии этой смеси, если ее охладили на 20°C .

4. Идеальному двухатомному газу сообщают одно и то же тепло дважды: первый раз – при постоянной температуре, второй раз – при постоянном давлении. В первый раз газ совершил работу 70 Дж. Какую работу совершил газ во второй раз?

5. Водород массой $m = 10$ г нагрели на $\Delta T = 200$ К, причем газу было передано количество теплоты $Q = 40$ кДж. Найдите изменение ΔU внутренней энергии водорода и совершенную им работу A .

6. При адиабатическом сжатии воздуха в цилиндре двигателя внутреннего сгорания давление изменяется от 0,1 до 3,5 МПа. Начальная температура воздуха $t_1 = 40$ °С. Найдите температуру воздуха в конце сжатия.

7. Нагреватель тепловой машины, работающей по циклу Карно, имеет температуру $t_1 = 200$ °С. Определите температуру охладителя, если при получении от нагревателя количества теплоты $Q_n = 1$ Дж машина совершает работу $A = 0,4$ Дж.

8. Найдите изменение ΔS энтропии при изобарическом расширении массы $m = 8$ г гелия от объема $V_1 = 10$ л до объема $V_2 = 25$ л.

9. На какой высоте h плотность водорода вдвое меньше его плотности на уровне моря? Температуру считать постоянной и равной 0 °С.

10. Группа из 22 молекул имеет следующие скорости: у двух молекул скорость равна 10 м/с, у семи – 15 м/с, у четырех – 20 м/с, у одной – 25 м/с, у пяти – 30 м/с, одна молекула имеет скорость 35 м/с и у двух молекул скорость 40 м/с. Определите: 1) среднюю арифметическую скорость молекул; 2) среднеквадратичную скорость; 3) наиболее вероятную скорость.

Модуль 3. Основы молекулярной физики и термодинамики

Вариант 12

1. При какой температуре находился газ, если при его охлаждении до -73 °С среднеквадратичная скорость молекул уменьшилась в 2 раза?

2. Газ из объема 3 л перевели в объем 6 л при постоянной температуре, затем охладили до $-20\text{ }^\circ\text{C}$. Начальное давление газа 1,16 МПа, конечное 0,5 МПа. Найдите начальную температуру газа.

3. Определите удельные теплоемкости c_p и c_v , если известно, что некоторый двухатомный газ при нормальных условиях имеет удельный объем $V/m = 0,7\text{ м}^3/\text{кг}$.

4. Объем 160 г кислорода ($m_0 = 32\text{ а.е.м.}$), температура которого $27\text{ }^\circ\text{C}$, при изобарном нагревании увеличился вдвое. Найдите работу газа.

5. Кислород массой 10 г находится под давлением 0,3 МПа при температуре $10\text{ }^\circ\text{C}$. После нагревания при постоянном давлении газ занял объем 10 л. Найдите количество теплоты, полученное газом.

6. Газ расширяется адиабатически, причем объем его увеличивается вдвое, а термодинамическая температура падает в 1,32 раза. Какое число степеней свободы i имеют молекулы данного газа?

7. Идеальный газ совершает цикл Карно. Температура холодильника равна 280 К. Во сколько раз увеличится КПД цикла, если температура нагревателя повысится от 400 до 600 К?

8. Масса $m = 6,6\text{ г}$ водорода расширяется изобарически от объема V до объема $2V$. Найдите изменение ΔS энтропии при этом расширении.

9. На сколько уменьшится атмосферное давление $p_0 = 100\text{ кПа}$ при подъеме наблюдателя над поверхностью Земли на высоту $h = 100\text{ м}$? Считать, что температура воздуха равна 300 К и не изменяется с высотой.

10. Газ находится при температуре $27\text{ }^\circ\text{C}$. Во сколько раз увеличится наиболее вероятная скорость, если температуру увеличить на 100 градусов.

Модуль 3. Основы молекулярной физики и термодинамики

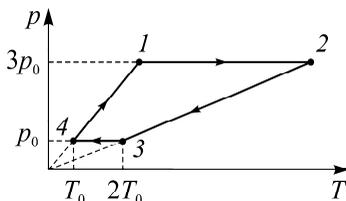
Вариант 13

1. Плотность одного газа при давлении 400 кПа равна $1,6 \text{ кг/м}^3$. Второй газ массой 2 кг занимает объем 10 м^3 при давлении 200 кПа. Во сколько раз среднеквадратичная скорость молекул второго газа больше, чем первого?

2. Газ находится под давлением $2 \cdot 10^5 \text{ Па}$ при температуре $127 \text{ }^\circ\text{C}$. Определите давление газа после того, как половина массы газа выпущена из сосуда и температура понижена на $50 \text{ }^\circ\text{C}$.

3. Термос вместимостью 5 л заполнили кипятком. Через сутки температура воды в нем понизилась до $79 \text{ }^\circ\text{C}$. Определите, на сколько изменилась внутренняя энергия воды. Удельная теплоемкость воды $4200 \text{ Дж/(кг}\cdot\text{K)}$.

4. Определите работу, которую совершает идеальный газ в цикле $1-2-3-4-1$, представленном на рисунке, где $p_0 = 10^5 \text{ Па}$, $V_0 = 1 \text{ м}^3$.



5. Определите количество теплоты, сообщенное газу, если в процессе изохорного нагревания кислорода объемом 20 л его давление изменилось на $\Delta p = 100 \text{ кПа}$.

6. Кислород, занимающий при давлении $p_1 = 1 \text{ МПа}$ объем $V_1 = 5 \text{ л}$, адиабатно расширяется в $n = 3$ раза. Определите конечное давление.

7. Идеальный газ совершает цикл Карно. Температура нагревателя в 4 раза выше температуры охладителя. Какую долю количества теплоты, получаемого за один цикл от нагревателя, газ отдает охладителю?

8. Найдите изменение ΔS энтропии при переходе массы $m = 6 \text{ г}$ водорода от объема $V_1 = 20 \text{ л}$ под давлением $p_1 = 150 \text{ кПа}$ к объему $V_2 = 60 \text{ л}$ под давлением $p_2 = 100 \text{ кПа}$.

9. Барометр в кабине летящего самолета показывает давление $p = 80$ кПа. На какой высоте h летит самолет, если на взлетной площадке барометр показал давление $p_0 = 101$ кПа? Считать, что температура T воздуха равна 300 К и не меняется с высотой.

10. Среднеарифметическая скорость гелия равна 1 км/с. При какой температуре находится газ.

Модуль 3. Основы молекулярной физики и термодинамики

Вариант 14

1. Найдите кинетическую энергию теплового движения молекул, находящихся в 1 г воздуха при температуре 15 °С. Воздух считать однородным газом, молярная масса которого равна $0,029$ кг/моль.

2. Из пятилитрового баллона со сжатым кислородом ($\mu = 32$ г/моль) изотермически израсходовали столько кислорода, что его давление упало с $9,8$ до $7,84$ МПа. Какая масса кислорода израсходована, если температура 300 К?

3. Смешали 60 л воды при температуре 90 °С и 150 л воды при 23 °С, 15% тепла, отданного горячей водой, пошло на нагрев окружающей среды. Определите конечную температуру воды.

4. Одноатомный газ с молярной массой 20 г/моль при изобарном нагревании на 70 °С совершает работу 1000 Дж. Найдите массу газа.

5. В закрытом сосуде находится 14 г азота под давлением $0,1$ МПа при температуре 27 °С. После нагревания давление в сосуде повысилось в 5 раз. Найдите: 1) до какой температуры был нагрет газ; 2) объем сосуда; 3) какое количество теплоты сообщено газу.

6. Двухатомный газ, находящийся при давлении $p_1 = 2$ МПа и температуре $t_1 = 27$ °С, сжимается адиабатически в 2 раза. Найдите температуру газа после сжатия.

7. Паровая машина мощностью $P = 14,7$ кВт потребляет за время $t = 1$ ч массу $m = 8,1$ кг угля с удельной теплотой сгорания $q = 33$ МДж/кг. Температура котла $T_n = 200$ °С, температура холодильника $T_x = 58$ °С. Найдите фактический КПД η машины и сравните его с КПД $\eta_{ид}$ идеальной тепловой машины, работающей с теми же параметрами.

8. Найдите изменение ΔS энтропии при переходе массы $m = 8$ г кислорода об объема $V_1 = 10$ л при температуре $t_1 = 80$ °С к объему $V_2 = 40$ л при температуре $t_2 = 300$ °С.

9. На какой высоте h над поверхностью Земли атмосферное давление втрое меньше, чем на ее поверхности? Считать, что температура T воздуха равна 280 К и не меняется с высотой.

10. Среднеарифметическая скорость водорода равна 2 км/с. При какой температуре находится газ.

Модуль 3. Основы молекулярной физики и термодинамики

Вариант 15

1. Чему равна энергия вращательного движения молекул, содержащихся в 1 кг азота при температуре 7 °С?

2. Какова была начальная температура воздуха, если при нагревании его на 3 К объем увеличился на 1 % от первоначального?

3. Свинцовая пуля летит со скоростью 200 м/с и попадает в земляной вал. На сколько повысилась температура пули, если 78 % кинетической энергии пули превратилось во внутреннюю? Удельная теплоемкость свинца 130 Дж/кг·К.

4. При изобарическом сжатии гелия над газом была совершена работа 20 кДж. В результате температура газа уменьшилась в 3 раза. Найдите начальный объем гелия, если его давление равно 10^5 Па.

5. В закрытом сосуде объемом 10 л находится воздух под давлением 10^5 Па. Какое количество тепла надо сообщить воздуху, чтобы повысить давление в сосуде в 5 раз?

6. Двухатомный газ, находящийся при давлении $p_1 = 2$ МПа, сжимается адиабатически в 2 раза. Найдите давление газа после сжатия.

7. Идеальный тепловой двигатель, получив от нагревателя при температуре 167°C 200 Дж теплоты, совершил работу 50 Дж. Чему равна температура холодильника?

8. Найдите изменение ΔS энтропии при плавлении 1 кг льда, взятого при температуре 0°C .

9. На какой высоте давление воздуха составляет 65 % от давления на уровне моря? Считать, что температура воздуха равна 15°C и не меняется с высотой.

10. Наиболее вероятная скорость гелия равна 1 км/с. При какой температуре находится газ.

Модуль 3. Основы молекулярной физики и термодинамики

Вариант 16

1. Чему равна энергия теплового движения молекул двухатомного газа, заключенного в сосуд объемом 2 л и находящегося под давлением 150 кПа?

2. При уменьшении объема газа в 2 раза давление увеличилось на 120 кПа, а абсолютная температура возросла на 10 %. Каким было первоначальное давление?

3. На нагревание кирпича на 63°C затрачено такое же количество теплоты, как и на нагревание воды той же массы на $13,2^\circ\text{C}$. Определите удельную теплоемкость кирпича. Удельная теплоемкость воды 4200 Дж/(кг·К).

4. В вертикальном цилиндре поперечным сечением 50 см^2 под поршнем массой 50 кг находится воздух при температуре 300 К. Первоначально поршень расположен на высоте 50 см от основания цилиндра. Какую работу совершит газ, если его нагреть на 30 К? Атмосферное давление 100 кПа. Трения нет.

5. Работа расширения некоторого двухатомного идеального газа составляет $A = 2$ кДж. Определите количество подведенной к газу теплоты, если процесс протекал изобарно.

6. В сосуде под поршнем находится гремучий газ ($i = 5$), занимающий при нормальных условиях объем $V_1 = 0,1$ л. При быстром сжатии газ воспламеняется. Определите температуру воспламенения гремучего газа, если известно, что работа сжатия $A = 46,35$ Дж.

7. Температура нагревателя 150 °С, а холодильника 20 °С. Какую работу совершит идеальный тепловой двигатель, если рабочее тело получит от нагревателя 10^5 Дж теплоты?

8. Найдите изменение ΔS энтропии при превращении массы $m = 1$ г воды ($t = 0$ °С) в пар ($t_n = 100$ °С).

9. Каково давление воздуха в шахте на глубине 3 км, если считать, что температура по всей высоте постоянная и равна 18 °С, а ускорение свободного падения не зависит от высоты? Давление воздуха у поверхности Земли примите равным p_0 .

10. Определите наиболее вероятную скорость молекул газа, плотность которого при давлении 100 кПа составляет $0,95$ кг/м³.

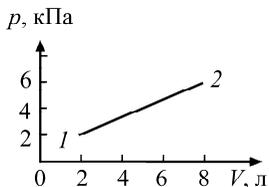
Модуль 3. Основы молекулярной физики и термодинамики

Вариант 17

1. Среднеквадратичная скорость молекул газа равна 500 м/с. Какой объем займет газ массой 1 кг при нормальном атмосферном давлении?

2. Бутылка, наполненная газом, плотно закрыта пробкой с площадью сечения $2,5$ см². До какой температуры надо нагреть газ, чтобы пробка вылетела из бутылки, если сила трения, удерживающая пробку, равна $12,5$ Н? Первоначальное давление газа в бутылке и наружное давление одинаковы и равны 100 кПа, а начальная температура 270 К.

3. Какое количество теплоты получила вода в бассейне при нагревании от 15 до 25 °С, если длина бассейна 100 м, ширина 6 м, глубина 2 м? Удельная теплоемкость воды 4200 Дж/(кг·К).



4. Газ перешел из состояния 1 в состояние 2. Какую работу он при этом совершил?

5. 1 моль азота находится в закрытом сосуде при температуре 27°C и давлении $0,3\text{ МПа}$. После нагревания давление в сосуде повысилось до $2,5\text{ МПа}$. Определите: 1) температуру азота после нагревания; 2) количество теплоты, сообщенное азоту.

6. 1 кмоль азота, находящегося при нормальных условиях, расширяется адиабатически от объема V_1 до объема $V_2 = 5V_1$. Найдите работу газа при расширении.

7. Идеальный газ совершает цикл Карно. Температура нагревателя $T_n = 197^\circ\text{C}$, температура холодильника $T_x = 9^\circ\text{C}$. При изобарическом расширении газ совершает работу $A = 100\text{ Дж}$. Определите термический КПД цикла, а также теплоту Q_x , которую газ отдает холодильнику.

8. Во сколько раз увеличился объем 5 моль идеального газа при изотермическом расширении, если его энтропия увеличилась на $\Delta S = 57,6\text{ Дж/К}$?

9. Определите отношение давления воздуха на высоте 2 км к давлению на дне скважины глубиной 500 м . Воздух у поверхности Земли находится при нормальных условиях, и его температура не зависит от высоты.

10. Определите наиболее вероятную скорость молекул углекислого газа при 0°C .

Модуль 3. Основы молекулярной физики и термодинамики

Вариант 18

1. Баллон содержит водород массой 10 г при температуре 7°C . Определите суммарную кинетическую энергию $W_{\text{пост}}$ поступательного движения и полную кинетическую энергию W всех молекул газа.

2. В цилиндре под легко подвижным поршнем находится воздух при давлении 200 кПа и температуре 27 °С. Какой массы груз надо положить на поршень после нагревания воздуха до 50 °С, чтобы объем воздуха в цилиндре остался прежним? Площадь поршня 30 см².

3. Какое количество теплоты надо сообщить кислороду массой $m = 12$ г, чтобы нагреть его на $\Delta T = 50$ К при $p = \text{const}$?

4. В цилиндре под невесомым поршнем находится воздух массой 3 кг. Температура воздуха увеличивается на 100 К при постоянном давлении. Найдите работу газа при расширении. Масса моля воздуха 0,029 кг.

5. В закрытом сосуде находится 3 моля гелия при температуре 27 °С. На сколько процентов увеличится давление в сосуде, если газу сообщить количество теплоты $Q = 3$ кДж?

6. При адиабатическом сжатии 1 кмоль двухатомного газа была совершена работа $A = 146$ кДж. На сколько увеличилась температура газа при сжатии?

7. Рабочее тело идеальной тепловой машины получило от нагревателя 70 кДж теплоты при температуре 527 °С. Если температура холодильника -23 °С, то чему равны КПД машины и количество теплоты, отданное холодильнику?

8. При нагревании $\nu = 2$ моль двухатомного идеального газа его термодинамическая температура увеличилась в 2 раза. Определите изменение энтропии, если нагревание происходит изобарно.

9. На какой высоте плотность воздуха в 5 раз меньше по сравнению с его плотностью на уровне моря? Температуру воздуха $T = 300$ К и ускорение свободного падения считайте не зависящими от высоты.

10. Определите наиболее вероятную скорость молекул кислорода при 100 °С.

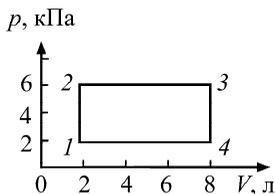
Модуль 3. Основы молекулярной физики и термодинамики

Вариант 19

1. Какой энергией теплового движения обладают молекулы двухатомного газа, занимающие объем 10 см^3 при давлении 40 мм рт. ст и температуре 27°C ?

2. Сосуд разрывается, если в нем находится 4 г гелия при температуре 327°C . При какой минимальной температуре сосуд разорвется, если в нем находится 35 г азота?

3. В закрытом сосуде объемом $V = 2 \text{ л}$ находится азот, плотность которого $\rho = 1,4 \text{ кг/м}^3$. Какое количество теплоты надо сообщить азоту, чтобы нагреть его на $\Delta T = 100 \text{ К}$?



4. Газ совершил круговой цикл $1-2-3-4-1$. Какую работу он при этом совершил?

5. 7 г углекислого газа было нагрето на 10°C в условиях свободного расширения. Найдите работу расширения газа и изменение его внутренней энергии.

6. Моль кислорода, взятый при температуре 300 К , сначала изобарно расширяют, увеличивая объем в $1,5$ раза, а затем адиабатически сжимают до прежнего объема. Определите конечную температуру газа.

7. Совершая замкнутый процесс, газ получил от нагревателя количество теплоты $Q_n = 4 \text{ кДж}$. Определите работу A газа при протекании цикла, если его термический КПД $\eta = 0,1$.

8. При нагревании $\nu = 2$ моль двухатомного идеального газа его термодинамическая температура увеличилась в 2 раза. Определите изменение энтропии, если нагревание происходит изохорно.

9. Метеостанция расположена на высоте $h = 1200 \text{ м}$ над уровнем моря. Найдите давление воздуха на этой высоте. Температуру воздуха считайте постоянной и равной 8°C . Молярная

масса воздуха $\mu = 0,029$ кг/моль. Давление воздуха на уровне моря $p_0 = 100$ кПа.

10. Определите наиболее вероятную скорость молекул гелия при 0°C .

Модуль 3. Основы молекулярной физики и термодинамики

Вариант 20

1. Масса молекулы водорода равна $3,3 \cdot 10^{-27}$ кг. Считая водород идеальным газом, вычислите его давление на стенки сосуда при концентрации 10^{25} м⁻³ и среднеквадратичной скорости молекул 700 м/с.

2. При температуре 27°C в сосуде емкостью 5 л содержится азот под давлением 10^5 Па. Сосуд соединили с другим пустым сосудом, объем которого 3 л. Определите плотность газа в сосудах.

3. Азот массой $m = 10$ г находится в закрытом сосуде при температуре 7°C . Какое количество теплоты надо сообщить азоту, чтобы вдвое увеличить его температуру?

4. В канале ствола гаубицы калибром 120 мм среднее давление пороховых газов 20 кН/см². Какова при выстреле работа пороховых газов в канале ствола, если длина ствола равна 20 калибрам?

5. При нагревании $m = 1$ кг идеального газа на $\Delta T = 1$ К при постоянном давлении требуется $Q_p = 909$ Дж тепла, а при нагревании при постоянном объеме $Q_v = 649$ Дж. Какой это газ?

6. Один и тот же одноатомный газ сжимают, уменьшая объем в 2 раза: первый раз – изобарно, второй раз – изотермически, третий раз – адиабатически. Начальные параметры состояния газа всякий раз одинаковы: $p = 100$ кПа, $V = 10$ л, $T = 300$ К. В каком случае конечная температура газа будет наименьшей? Найдите эту температуру.

7. Идеальная тепловая машина имеет полезную мощность 73,5 кВт и работает в температурном интервале от 273 до 373 К.

Найдите: 1) энергию, получаемую машиной от нагревателя за 1 ч; 2) энергию, отдаваемую холодильнику за 1 ч.

8. Кусок льда массой $m = 200$ г, взятый при температуре $t_1 = -10$ °С, был нагрет до температуры $t_2 = 0$ °С и расплавлен. Определите изменение энтропии в ходе указанных процессов.

9. На какой высоте h давление воздуха составляет 45 % от давления на уровне моря? Температуру воздуха считать постоянной и равной 0 °С.

10. Средняя энергия молекулы гелия равна $7 \cdot 10^{-20}$ Дж. Определите наиболее вероятную скорость.

Модуль 3. Основы молекулярной физики и термодинамики

Вариант 21

1. Средняя энергия молекулы одноатомного идеального газа $0,0608 \cdot 10^{-19}$ Дж. Давление газа 0,2 мПа. Найдите число молекул в одном кубическом метре газа.

2. В объеме $V = 4$ л находится 12 г газа при температуре $T_1 = 450$ К. При какой температуре T_2 плотность этого газа будет равной 6 кг/м³? Давление считать постоянным.

3. Гелий находится в закрытом сосуде объемом $V = 2$ л при температуре 20 °С и давлении 100 кПа. Какое количество теплоты надо сообщить гелию, чтобы повысить его температуру на $\Delta T = 100$ К?

4. Какую работу совершил неон массой 4 кг при изобарном нагревании на 25 К? Молярная масса неона 0,02 кг/моль.

5. Газ, занимающий объем 10 л, изобарически расширяется при давлении 200 кПа. Определите работу газа и изменение его внутренней энергии, если ему сообщается 10 кДж теплоты и при этом объем его увеличивается вдвое.

6. Один и тот же одноатомный газ сжимают, уменьшая объем в 2 раза: первый раз – изобарно, второй раз – изотермически, третий раз – адиабатически. Начальные параметры состояния газа всякий раз одинаковы: $p = 100$ кПа, $V = 10$ л, $T = 300$ К.

В каком случае над газом будет совершена наибольшая работа? Найдите эту работу.

7. Температура в цилиндрах двигателя внутреннего сгорания равна $1000\text{ }^\circ\text{C}$, температура окружающей среды $20\text{ }^\circ\text{C}$. КПД двигателя составляет 25 % от КПД идеальной машины, работающей в том же температурном интервале. Какова мощность двигателя, если за 1 ч работы он израсходовал 35 кг керосина? Удельная теплота сгорания керосина $46 \cdot 10^6\text{ Дж/кг}$.

8. Кислород массой $m = 2\text{ кг}$ адиабатически увеличил свой объем в 5 раз. Найдите изменение энтропии.

9. Найдите плотность воздуха у поверхности Земли и на высоте $h = 10\text{ км}$ от поверхности Земли. Температуру воздуха считать постоянной и равной $10\text{ }^\circ\text{C}$. Давление воздуха у поверхности Земли $p_0 = 100\text{ кПа}$.

10. Средняя энергия молекулы азота равна $7 \cdot 10^{-20}\text{ Дж}$. Определите наиболее вероятную скорость.

Модуль 3. Основы молекулярной физики и термодинамики

Вариант 22

1. Найдите концентрацию молекул кислорода, если давление его $0,2\text{ МПа}$, а среднеквадратичная скорость молекул равна 700 м/с .

2. При какой температуре находился газ в закрытом сосуде, если при нагревании его на 140 К давление возросло в 1,5 раза?

3. Какую массу углекислого газа CO_2 можно нагреть при $p = \text{const}$ на $\Delta T = 80\text{ К}$ количеством теплоты $Q = 222\text{ Дж}$?

4. В вертикально расположенном цилиндре с площадью основания 1 дм^2 под поршнем массой 10 кг , скользящим без трения, находится воздух. При изобарном нагревании воздуха поршень поднялся на 20 см . Какую работу совершил воздух, если наружное давление равно 100 кПа ?

5. Азот массой 200 г расширяется изотермически при температуре $7\text{ }^\circ\text{C}$, причем объем газа увеличился в 2 раза. Найдите:

1) изменение внутренней энергии газа; 2) совершенную при расширении газа работу; 3) теплоту Q , полученную газом.

6. Масса $m = 28$ г азота, находящегося при температуре 40°C и давлении 100 кПа, адиабатически сжимается до объема $V_2 = 13$ л. Найдите температуру азота после сжатия.

7. Тепловая машина с максимально возможным КПД имеет в качестве нагревателя резервуар с кипящей водой при температуре 100°C , а в качестве холодильника – сосуд со льдом при 0°C . Какая масса льда растает при совершении машиной работы, равной 1 МДж? Удельная теплота плавления льда 330 кДж/кг.

8. Кислород массой $m = 2$ кг при постоянной температуре 27°C увеличил свой объем в 5 раз. Найдите изменение энтропии.

9. На какой высоте h плотность кислорода в полтора раза меньше его плотности на уровне моря? Температуру считать постоянной и равной 5°C .

10. Какой газ при температуре 27°C имеет наиболее вероятную скорость $1,12$ км/с.

Модуль 3. Основы молекулярной физики и термодинамики

Вариант 23

1. Какое давление на стенки сосуда оказывал бы идеальный газ с концентрацией 100 млрд молекул в мм^3 при среднеквадратичной скорости движения молекул 1 км/с и массе молекулы $3 \cdot 10^{-27}$ кг?

2. Цилиндр с тяжелым поршнем, расположенный вертикально, заполнен кислородом, масса которого $m = 10$ г. После увеличения температуры на $\Delta T = 50$ К поршень поднялся на высоту $\Delta h = 7$ см. Найдите массу поршня, если давление газа над поршнем $p_0 = 0,1$ МПа. Площадь поршня $S = 100$ см^2 .

3. В закрытом цилиндре находится 2 кг водорода. Какое количество теплоты нужно сообщить водороду, чтобы нагреть его на 100 К?

4. Среднее давление газа в цилиндре 1,2 МПа. Площадь поршня 300 см^2 , длина хода 0,5 м. Определите работу газа за один ход поршня.

5. При изобарном нагревании одноатомного идеального газа было затрачено 1200 Дж теплоты. Какое количество теплоты пришлось бы затратить, чтобы нагреть этот газ изохорно?

6. Масса $m = 28 \text{ г}$ азота, находящегося при температуре $40 \text{ }^\circ\text{C}$ и давлении 100 кПа, адиабатически сжимается до объема $V_2 = 13 \text{ л}$. Найдите давление азота после сжатия.

7. Идеальный газ совершает цикл Карно. Температура нагревателя $T_n = 470 \text{ К}$, температура холодильника T_x равна 280 К. При изотермическом расширении газ совершает работу $A = 100 \text{ Дж}$. Определите термический КПД цикла, а также количество теплоты Q_x , которое газ отдает холодильнику при сжатии.

8. Смешали воду массой $m_1 = 5 \text{ кг}$ при температуре $T_1 = 280 \text{ К}$ с водой массой $m_2 = 8 \text{ кг}$ при температуре $T_2 = 350 \text{ К}$. Найдите температуру смеси и изменение энтропии, происходящее при смешивании.

9. На сколько уменьшится атмосферное давление $p_0 = 100 \text{ кПа}$ при подъеме наблюдателя над поверхностью Земли на высоту $h = 500 \text{ м}$? Считать, что температура воздуха равна 280 К и не изменяется с высотой.

10. Какой газ при температуре $27 \text{ }^\circ\text{C}$ имеет наиболее вероятную скорость 395 м/с.

Модуль 3. Основы молекулярной физики и термодинамики

Вариант 24

1. Какова среднеквадратичная скорость движения молекул газа, если, имея массу 6 кг, он занимает объем 5 м^3 при давлении 200 кПа?

2. Какая часть газа осталась в баллоне, давление в котором было равно 60 атм, а температура 33 °С, если давление упало до 1 атм? Баллон при этом охладился до –18 °С.

3. Масса $m = 10$ г кислорода находится при давлении $p = 0,3$ МПа и температуре 10 °С. После нагревания при $p = \text{const}$ газ занял объем $V_2 = 10$ л. Определите внутреннюю энергию газа до и после нагревания.

4. Газ совершает работу 360 Дж, расширяясь при постоянном давлении 200 кПа. Начальный объем газа 0,9 л. Найдите, до какого значения увеличился объем газа.

5. Масса $m = 6,5$ г водорода, находящегося при температуре 27 °С, расширяется вдвое при $p = \text{const}$ за счет притока тепла извне. Найдите работу расширения газа, приращение ΔU внутренней энергии и количество теплоты Q , сообщенное газу.

6. Масса $m = 28$ г азота, находящегося при температуре 40 °С и давлении 100 кПа, адиабатически сжимается до объема $V_2 = 13$ л. Найдите работу сжатия.

7. Идеальный газ, совершающий цикл Карно, получив от нагревателя количество теплоты $Q_n = 4,2$ кДж, совершил работу 590 Дж. Найдите термический КПД цикла η . Во сколько раз температура нагревателя T_n больше температуры холодильника T_x ?

8. Найдите изменение ΔS энтропии при изобарном расширении азота массой $m = 4$ г от объема $V_1 = 5$ л до объема $V_2 = 9$ л.

9. На какой высоте h плотность кислорода уменьшается на 1 %? Температура кислорода 27 °С.

10. При какой температуре среднеквадратичная скорость молекул водорода больше их наиболее вероятной скорости на 50 м/с?

Модуль 3. Основы молекулярной физики и термодинамики

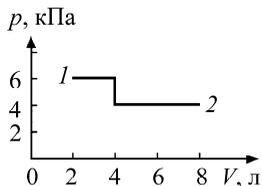
Вариант 25

1. Определите среднекинетическую энергию поступательного движения молекулы идеального газа, если при давлении $2 \cdot 10^5$ Па концентрация молекул газа $5 \cdot 10^{25}$ м⁻³.

2. В баллоне емкостью $V = 11,2$ л находится водород при нормальных условиях. После того как в баллон было введено дополнительно некоторое количество гелия, давление в баллоне возросло до $p = 0,15$ МПа, а температура не изменилась. Определите массу гелия, введенного в баллон.

3. В закрытом сосуде находится 28 г азота при температуре 20 °С. Газу было сообщено 1039 Дж теплоты. До какой температуры нагрелся газ?

4. Газ перешел из состояния 1 в состояние 2. Какую работу он при этом совершил?



5. В изотермическом процессе газ совершил работу 1000 Дж. На сколько увеличится внутренняя энергия этого газа, если ему сообщить количество теплоты вдвое большее, чем в первом процессе, а процесс проводить изохорно?

6. Воздух массой 1 кг, находящийся при давлении $p_1 = 150$ кПа и температуре 30 °С, расширяется адиабатически, и его давление падает до $p_2 = 100$ кПа. Во сколько раз увеличился объем воздуха?

7. В идеальном тепловом двигателе за счет каждой 1200 Дж энергии, полученной от нагревателя, производится работа, равная 400 Дж. Во сколько раз абсолютная температура нагревателя больше абсолютной температуры холодильника?

8. В результате изохорного нагревания водорода массой $m = 1$ г давление газа увеличилось в 2 раза. Определите изменение ΔS энтропии газа.

9. На высоте 3 км над поверхностью Земли в 1 см^3 воздуха содержится примерно 102 пылинки, а у самой поверхности – примерно 105 пылинок. Определите среднюю массу пылинки, если температура воздуха 27 °С.

10. При какой температуре среднеквадратичная скорость молекул гелия больше их наиболее вероятной скорости на 50 м/с ?

Модуль 4. ЭЛЕКТРОСТАТИКА. ПОСТОЯННЫЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТОК

Модуль 4. Электростатика. Постоянный электрический ток

Вариант 1

1. Проводящий шарик, несущий заряд $1,8 \cdot 10^{-8}$ Кл, привели в соприкосновение с такими же двумя шариками, один из которых имел заряд $0,3 \cdot 10^{-8}$ Кл, а другой – 0 Кл. Как распределится заряд между ними? С какой силой будут взаимодействовать в вакууме два из них на расстоянии 5 см один от другого?

2. Параллельно бесконечной плоскости, заряженной с поверхностной плотностью заряда 10^{-6} Кл/м², расположена бесконечно длинная прямая нить с линейной плотностью заряда 10^{-8} Кл/м. Определите силу, действующую со стороны плоскости на единицу длины нити.

3. Шарик массой 5 г и зарядом 2 мКл подвешен на нити длиной 1 м в горизонтальном электрическом поле с $E = 20$ В/м. Шарик сначала удерживают в нижнем положении, а затем отпускают. Найдите силу натяжения нити в тот момент, когда шарик поднимется на 20 см выше начального положения.

4. На расстоянии 4 см от бесконечно длинной заряженной нити находится точечный заряд, равный $0,67 \cdot 10^{-9}$ Кл. Под действием поля заряд перемещается до расстояния 2 см от нити. При этом совершается работа, равная $5 \cdot 10^{-6}$ Дж. Найдите линейную плотность заряда нити.

5. Тонкие стержни заряжены с линейной плотностью $\tau = 1,33$ нКл/м и образуют квадрат со стороной a . Найдите потенциал ϕ в центре квадрата.

6. Электрическое поле создано бесконечной плоскостью, равномерно заряженной с поверхностной плотностью $\sigma = 30$ нКл/м². На расстоянии $a = 30$ см от нити находится плоская круглая площадка радиусом $r = 1$ см. Определите поток

вектора напряженности через эту площадку, если плоскость ее составляет угол $\beta = 30^\circ$ с линией напряженности, проходящей через середину площадки.

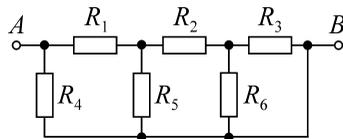
7. Два последовательно соединенных конденсатора с емкостями $C_1 = 1$ мкФ и $C_2 = 2$ мкФ подключены к источнику тока с напряжением $U = 900$ В. Возможна ли работа такой схемы, если напряжение пробоя конденсаторов $U_{пр} = 500$ В?

8. Конденсатор емкостью 1 мФ при напряжении 1200 В применяют для импульсной стыковой сварки медной проволоки. Найдите среднюю полезную мощность разряда, если он длится 10 мкс. КПД установки 4 %.

9. Сколько электронов проходит через поперечное сечение проводника площадью 4 мм² за 2 мин, если плотность тока в проводнике равна 100 А/см²?

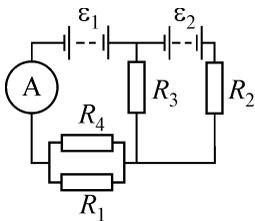
10. Напряжение U на шинах электростанции равно 6,6 кВ. Потребитель находится на расстоянии $l = 10$ км. Определите площадь сечения S медного провода ($\rho = 17$ нОм·м), который следует взять для устройства двухпроводной линии передачи, если сила тока в линии равна 20 А и потери напряжения в проводах не должны превышать 3 %.

11. Определите общее сопротивление между точками A и B цепи, представленной на рисунке, если $R_1 = 1$ Ом, $R_2 = 3$ Ом, $R_3 = R_4 = R_6 = 2$ Ом, $R_5 = 4$ Ом.

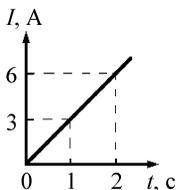


12. По медному проводнику диаметром 3,2 мм течет ток силой 5 А. Определите среднюю скорость упорядоченного движения электронов. Плотность меди $\rho_m = 8,9 \cdot 10^3$ кг/м³, молярная масса $\mu = 64 \cdot 10^{-3}$ кг/моль.

13. ЭДС элемента равна 1,6 В, внутреннее сопротивление его 0,6 Ом. Чему равен КПД элемента при силе тока в 2,5 А?



14. Батареи имеют ЭДС $\varepsilon_1 = 2\varepsilon_2$, сопротивления $R_1 = R_3 = 20$ Ом, $R_2 = 15$ Ом, $R_4 = 30$ Ом (рисунок). Через амперметр течет ток $I = 1,5$ А, направленный снизу вверх. Найдите ε_1 и ε_2 , а также токи через сопротивления R_2 и R_3 .



15. Сила тока в проводнике сопротивлением $R = 20$ Ом нарастает в течение времени $t = 2$ с по линейному закону от $I_0 = 0$ до $I_{\max} = 6$ А (рисунок). Определите количество теплоты Q_1 , выделившееся в этом проводнике за первую секунду, и Q_2 – за вторую, а также найдите отношение этих количеств теплоты Q_2/Q_1 .

Модуль 4. Электростатика.

Постоянный электрический ток

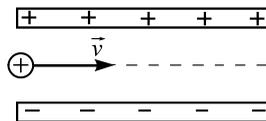
Вариант 2

1. Два одинаково заряженных маленьких шарика массой по 0,5 г, подвешенные на шелковых нитях длиной по 1 м, отталкиваясь друг от друга, разошлись на 4 см. Найдите величину заряда каждого шарика.

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

3. Положительно заряженная пылинка, имеющая массу 10^{-8} г и заряд $q = 1,8 \cdot 10^{-14}$ Кл, влетает в электрическое поле конденсатора в точке, находящейся посередине между его пластинами (рисунок). Минимальная скорость, с которой пылинка

должна влететь в конденсатор, чтобы затем пролететь его насквозь, равна 30 м/с. Расстояние между пластинами конденсатора 1 см, поле внутри конденсатора $E = 500$ кВ/м. Чему равна длина пластин конденсатора? Силой тяжести пренебречь. Система находится в вакууме.



4. Какая совершается работа при перенесении точечного заряда $2 \cdot 10^{-8}$ Кл из бесконечности в точку, находящуюся на расстоянии 1 см от поверхности шара радиусом 2 см с поверхностной плотностью заряда 10^{-9} Кл/см²?

5. Восемь заряженных водяных капель радиусом 1 мм и зарядом 0,1 нКл каждая сливаются в одну общую водяную каплю. Найдите потенциал большой капли.

6. Поле создано двумя равномерно заряженными concentрическими 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 электрического поля в точках, лежащих от центра сфер на расстояниях $r_1 = 3$ см, $r_2 = 6$ см, $r_3 = 10$ см. Постройте график зависимости $E(r)$.

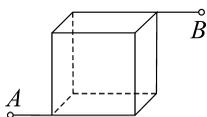
7. При последовательном соединении трех различных конденсаторов емкость цепи $C_{\text{посл}} = 1$ мкФ, а при параллельном – емкость цепи $C_{\text{пар}} = 11$ мкФ. Найдите емкость конденсаторов C_1 и C_2 , если емкость конденсатора $C_3 = 2$ мкФ.

8. Плоский воздушный конденсатор с площадью пластины, равной 500 см², подключен к источнику тока, ЭДС которого равна 300 В. Определите работу A внешних сил по раздвижению пластин от расстояния $d_1 = 1$ см до расстояния $d_2 = 3$ см, если пластины в процессе раздвижения остаются подключенными к источнику тока.

9. Определите величину заряда, проходящего через поперечное сечение проводника площадью 1 мм² в течение 5 с, если плотность тока равномерно возрастает от 0 до 100 А/см².

10. Электрическая лампочка накаливания потребляет ток $I = 0,2$ А. Диаметр вольфрамового волоска $d = 0,02$ мм, темпера-

тура волоска при горении лампы $t = 2000$ °С. Определите напряженность E электрического поля в волоске. Удельное сопротивление вольфрама $\rho_0 = 5,6 \cdot 10^{-8}$ Ом·м, температурный коэффициент сопротивления $\alpha = 4,6 \cdot 10^{-3}$ К $^{-1}$.

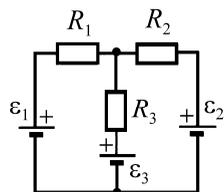


11. Определите сопротивление проволочного каркаса, имеющего форму куба, если он включен в цепь между точками A и B . Сопротивление каждого ребра каркаса $r = 3$ Ом.

12. На большой высоте в атмосфере Земли ионы He^{2+} с концентрацией $3,5 \cdot 10^{12}$ м $^{-3}$ движутся к северу со скоростью $2 \cdot 10^6$ м/с, а ионы O_2^- с концентрацией $8 \cdot 10^{11}$ м $^{-3}$ движутся к югу со скоростью $8,5 \cdot 10^6$ м/с. Определите величину и направление плотности тока.

13. ЭДС батареи 8 В. При силе тока $I = 2$ А КПД батареи равен 0,75. Определите внутреннее сопротивление батареи.

14. Электрическая цепь состоит из резисторов $R_1 = R_2 = 10$ Ом и трех идеальных источников тока, причем $\varepsilon_1 = 10$ В, $\varepsilon_2 = 14$ В. При каком значении ЭДС третьего источника ε_3 ток через сопротивление R_3 не потечет?



15. Полезная мощность, выделяемая во внешней части цепи, достигает наибольшего значения 5 Вт при силе тока 5 А. Найдите внутреннее сопротивление и ЭДС источника тока.

Модуль 4. Электростатика.

Постоянный электрический ток

Вариант 3

1. Три одинаковых точечных заряда по 2 нКл находятся в вершинах равностороннего треугольника со стороной 10 см. Определите величину и направление силы, действующей на один из зарядов со стороны двух других.

2. Параллельно бесконечной пластине, несущей заряд, равномерно распределенный по площади, с поверхностной плотностью $\sigma = 20 \text{ нКл/м}^2$ расположена нить с равномерно распределенным по длине зарядом ($\tau = 0,4 \text{ нКл/м}$). Определите силу F , действующую на отрезок нити длиной 1 м.

3. В однородное электрическое поле напряженностью $E = 1 \text{ кВ/м}$ влетает вдоль силовой линии электрон со скоростью 1 Мм/с. Определите расстояние l , пройденное электроном до точки, в которой его скорость будет равна половине начальной.

4. Два шарика с зарядами 2 и 4 нКл находятся на расстоянии 40 см друг от друга. Какую работу надо совершить, чтобы сблизить их до расстояния 20 см?

5. На отрезке тонкого прямого проводника равномерно распределен заряд с линейной плотностью $\tau = 10 \text{ нКл/м}$. Вычислите потенциал ϕ , создаваемый этим зарядом в точке, расположенной на оси проводника и удаленной от ближайшего конца отрезка на расстояние, равное длине этого отрезка.

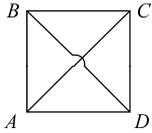
6. Электрическое поле создано бесконечной равномерно заряженной плоскостью ($\sigma = 0,3 \text{ мкКл/м}^2$). Определите поток вектора напряженности через прямоугольную площадку, две большие стороны которой параллельны заряженной плоскости и ближняя к плоскости удалена от нее на расстояние $r_1 = 20 \text{ см}$, а вторая на расстояние $r_2 = 30 \text{ см}$. Стороны площадки имеют размеры $a = 20 \text{ см}$ и $b = 40 \text{ см}$.

7. Два одинаковых плоских воздушных конденсатора соединены последовательно и подключены к источнику тока. Как изменится напряженность электрического поля в одном из них, если другой заполнить диэлектриком с диэлектрической проницаемостью 4?

8. Найдите количество теплоты, выделившееся при соединении одноименно заряженных обкладок конденсаторов с емкостями 2 и 0,5 мкФ. Разности потенциалов между обкладками конденсаторов 100 и 50 В.

9. Сила тока в проводнике меняется со временем по уравнению $I = 5 + 2t$ (I – в амперах, t – в секундах). Какое количество электричества проходит через поперечное сечение проводника за время от $t_1 = 1$ с до $t_2 = 4$ с?

10. Провод длиной 20 м и диаметром 1,5 мм обладает сопротивлением 2,5 Ом. Каким будет сопротивление провода из того же материала длиной 35 м и диаметром 3 мм?

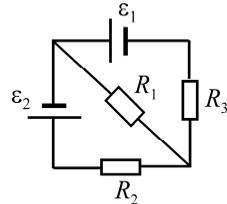


11. Определите эквивалентное сопротивление схемы (рисунок) в случае подключения ее к клеммам AB и AC . Сопротивление каждого из участков цепи равно r .

12. Определите суммарный импульс электронов в прямом проводе длиной 500 м, по которому течет ток $I = 20$ А.

13. Определите внутреннее сопротивление источника тока, имеющего ЭДС 1,1 В, если подключенный к его зажимам вольтметр показал 1 В при сопротивлении внешней цепи в 2 Ом.

14. В схеме (рисунок) $\varepsilon_1 = 2,1$ В, $\varepsilon_2 = 1,9$ В, $R_1 = 45$ Ом, $R_2 = 10$ Ом, $R_3 = 10$ Ом. Найдите силу тока во всех участках цепи. Внутренним сопротивлением элементов пренебречь.



15. От источника с напряжением $U = 10^5$ В требуется передать на расстояние $l = 5$ км мощность $P = 5$ МВт. Допустимая потеря напряжения в проводах $n = 1\%$. Вычислите минимальное сечение медного провода ($\rho = 17$ нОм·м), пригодного для этой цели.

Модуль 4. Электростатика. **Постоянный электрический ток**

Вариант 4

1. Сколько избыточных электронов содержит пылинка, если в электрическом поле с напряженностью $1,5 \cdot 10^{-5}$ В/м на нее действует сила $2,4 \cdot 10^{-10}$ Н?

2. Две длинные одинаково заряженные нити расположены на расстоянии 10 см друг от друга. Линейная плотность заряда на нитях $\tau_1 = \tau_2 = 0,1$ мкКл/см. Найдите величину и направление напряженности результирующего электрического поля в точке, находящейся на расстоянии 10 см от каждой нити.

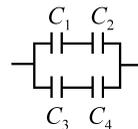
3. Электрон, пройдя в плоском конденсаторе путь от одной пластины до другой, приобретает скорость 10^6 м/с. Расстояние между пластинами 5,3 мм. Найдите: 1) разность потенциалов между пластинами; 2) напряженность электрического поля внутри конденсатора; 3) поверхностную плотность заряда на пластинах.

4. Шарик массой 40 мг, заряженный положительным зарядом 1 нКл, движется со скоростью 10 см/с. На какое расстояние может приблизиться шарик к положительному точечному заряду, равному 1,33 нКл?

5. По тонкой нити, изогнутой по дуге окружности радиусом R , равномерно распределен заряд с линейной плотностью $\tau = 10$ нКл/м. Определите потенциал электрического поля, создаваемого таким распределенным зарядом в точке O , совпадающей с центром кривизны дуги. Длина l нити составляет $1/3$ длины окружности и равна 15 см.

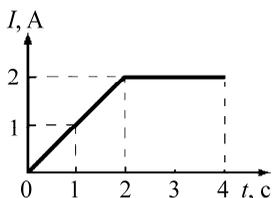
6. Свободные заряды распределены с объемной плотностью $\rho = 5$ нКл/м³ по шару радиусом $R = 10$ см из однородного изотропного диэлектрика с диэлектрической проницаемостью $\epsilon = 5$. Определите напряженность электростатического поля на расстояниях $r_1 = 5$ см и $r_2 = 15$ см от центра шара.

7. Конденсаторы емкостями $C_1 = 10$ нФ, $C_2 = 40$ нФ, $C_3 = 2$ нФ и $C_4 = 30$ нФ соединены так, как показано на рисунке. Определите емкость C соединения конденсаторов.



8. Пространство между пластинами плоского конденсатора заполнено фарфором ($\epsilon = 5$), объем которого равен 100 см³. Поверхностная плотность заряда на пластинах конденсатора равна 8,85 нКл/м². Вычислите работу, которую необходимо совершить

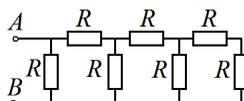
для того, чтобы удалить диэлектрик из конденсатора. Трением диэлектрика о пластины конденсатора пренебречь.



9. Какова величина заряда, прошедшего через поперечное сечение проводника за время от $t_1 = 0$ до $t_2 = 4$ с, если сила тока изменяется со временем так, как показано на рисунке?

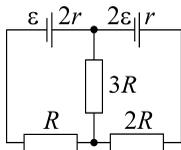
10. Проводник длиной 12 м составлен из двух отрезков медного ($\rho_1 = 17$ нОм·м) и алюминиевого ($\rho_2 = 26$ нОм·м) проводов одинаковых длины и диаметра $d = 3$ мм. Каким должно быть напряжение на концах проводника, чтобы сила тока составила 6 А?

11. Найдите сопротивление участка цепи между точками A и B на рисунке.



12. Через лампу накаливания течет ток, равный 0,6 А. Температура вольфрамовой нити диаметром 0,1 мм равна 2200 °С. Определите напряженность электрического поля в вольфраме. Удельное сопротивление вольфрама при 0 °С $\rho_0 = 55$ нОм·м, температурный коэффициент сопротивления $\alpha = 0,0045$ К⁻¹.

13. Два элемента с ЭДС 1,6 и 2 В и внутренним сопротивлением соответственно 0,3 и 0,9 Ом включены последовательно и замкнуты на внешнее сопротивление 6 Ом. Определите падение напряжения на внутреннем сопротивлении каждого из элементов.



14. Найдите силу тока в проводнике сопротивлением $3R$ (рисунок).

15. Сила тока в проводнике равномерно увеличивается от $I = 0$ А до некоторого максимального значения в течение времени $t = 10$ с.

За это время в проводнике выделилось количество теплоты $Q = 1$ кДж. Определите скорость нарастания тока в проводнике, если сопротивление его равно 3 Ом.

Модуль 4. Электростатика.
Постоянный электрический ток

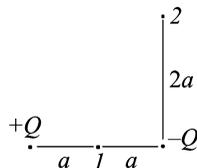
Вариант 5

1. Между пластинами плоского воздушного конденсатора, к которому приложено напряжение 500 В, находится во взвешенном состоянии пылинка массой 10^{-7} г. Расстояние между пластинами 5 см. Определите заряд пылинки.

2. На отрезке тонкого прямого проводника длиной 10 см равномерно распределен заряд с линейной плотностью $\tau = 3$ мкКл/м. Вычислите напряженность E , создаваемую этим зарядом в точке, расположенной на оси проводника и удаленной от ближайшего конца отрезка на расстояние 10 см.

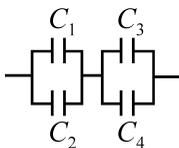
3. Электрон, находящийся в однородном электрическом поле, получил ускорение 10^{12} м/с. Найдите: 1) напряженность электростатического поля; 2) скорость, которую получит электрон за 10^{-6} с своего движения, если начальная скорость его равна нулю; 3) работу сил электростатического поля за это время; 4) разность потенциалов, пройденную при этом электроном.

4. Определите работу A_{12} по перемещению заряда $Q_1 = 50$ нКл из точки 1 в точку 2 в поле, созданном двумя точечными зарядами, модуль которых $|Q| = 1$ мкКл и $a = 0,1$ м.



5. Бесконечно длинная тонкая прямая нить несет равномерно распределенный заряд с линейной плотностью $\tau = 0,01$ мкКл/м. Определите разность потенциалов двух точек поля, удаленных от нити на $r_1 = 2$ см и $r_2 = 4$ см.

6. В центре равномерно заряженной ($q_1 = 20$ нКл) металлической сферы радиусом $R = 10$ см находится точечный заряд $q_2 = -10$ нКл. Определите напряженность и потенциал электрического поля в точках A и B , удаленных от точечного заряда на расстояния 5 и 15 см.



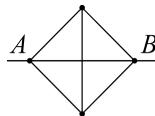
7. Конденсаторы соединены так, как показано на рисунке. Электроемкости конденсаторов: $C_1 = 0,2$ мкФ, $C_2 = 0,1$ мкФ, $C_3 = 0,3$ мкФ, $C_4 = 0,4$ мкФ. Определите электроемкость C батареи конденсаторов.

8. Обкладки конденсатора емкостью 30 мкФ, заряженного до разности потенциалов 200 В, соединяют с противоположно заряженными обкладками конденсатора емкостью 10 мкФ, заряженного до разности потенциалов 400 В. Какое количество теплоты выделилось при этом?

9. Определите плотность тока, если за 2 с через проводник сечением $1,6$ мм² прошло $2 \cdot 10^{19}$ электронов.

10. Электрическая лампочка с вольфрамовой нитью включена в цепь низкого напряжения при температуре $t_1 = 25$ °С. При этом вольтметр показывает $U_1 = 10$ мВ, амперметр $I_1 = 4$ мА. В рабочем состоянии напряжение на зажимах лампочки $U_2 = 120$ В, сила тока $I_2 = 4$ А. Определите температуру вольфрамовой нити в рабочем состоянии. Термический коэффициент сопротивления вольфрама $\alpha = 0,0042$ град⁻¹.

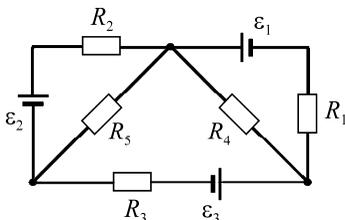
11. Найдите общее сопротивление контура (рисунок), составленного из проводников одинаковых сопротивлений r и подключенного к цепи в точках A и B .



12. По алюминиевому проводу сечением $S = 0,2$ мм² течет ток силой $I = 0,2$ А. Определите силу, действующую на отдельные свободные электроны со стороны электрического поля. Удельное сопротивление алюминия $\rho = 26$ нОм·м.

13. При подключении к батарее гальванических элементов сопротивления $R_1 = 16$ Ом сила тока в цепи была равна 1 А, а при подключении сопротивления $R_2 = 8$ Ом сила тока стала равной $1,8$ А. Найдите ЭДС и внутреннее сопротивление батареи.

14. В схеме, изображенной на рисунке, $\varepsilon_1 = 60$ В, $\varepsilon_2 = 80$ В, $\varepsilon_3 = 70$ В, $R_1 = 20$ Ом, $R_2 = 50$ Ом, $R_3 = 5$ Ом, $R_4 = 65$ Ом, $R_5 = 85$ Ом. Определите ток через сопротивление R_5 .



15. По проводнику сопротивлением 3 Ом течет ток, сила которого равномерно возрастает. Количество теплоты Q , выделившееся в проводнике за время $t = 8$ с, равно 200 Дж. Определите количество электричества q , протекшее за это время по проводнику. В начальный момент времени сила тока в проводнике равна нулю.

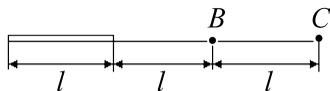
Модуль 4. Электростатика. **Постоянный электрический ток**

Вариант 6

1. Расстояние между двумя точечными зарядами 2 и 4 нКл равно 60 см. Определите точку на прямой, проходящей через эти заряды, в которую нужно поместить третий заряд так, чтобы система зарядов находилась в равновесии. Определите величину и знак заряда.

2. В трех вершинах квадрата находится по заряду в 3 нКл. Найдите напряженность электрического поля в четвертой вершине квадрата. Сторона квадрата равна 10 см.

3. Электрон, обладавший кинетической энергией 10 эВ, влетел в однородное электрическое поле в направлении силовых линий поля. Какой скоростью будет обладать электрон, пройдя в этом поле разность потенциалов 8 В?



4. На отрезке прямого провода равномерно распределен заряд с линейной плотностью $\tau = 1$ мкКл/м.

Определите работу A сил поля по перемещению заряда $Q = 1$ нКл из точки B в точку C (рисунок).

5. Электрическое поле создается бесконечной плоскостью, равномерно заряженной с поверхностной плотностью $\sigma = 1 \text{ нКл/м}^2$. Определите разность потенциалов между двумя точками этого поля, лежащими на расстояниях $x_1 = 20 \text{ см}$ и $x_2 = 50 \text{ см}$ от плоскости.

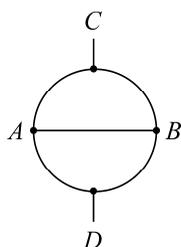
6. Между двумя концентрическими сферами с радиусами $R_1 = 5 \text{ см}$ и $R_2 = 10 \text{ см}$ и зарядами $Q_1 = -1 \text{ нКл}$ и $Q_2 = 2 \text{ нКл}$ находится диэлектрик с диэлектрической проницаемостью $\epsilon = 2$. Определите напряженности электрического поля на расстояниях 8 и 12 см от центра сфер.

7. Между пластинами плоского конденсатора находится плотно прилегающая стеклянная пластинка ($\epsilon = 7$). Конденсатор заряжен до разности потенциалов $U_1 = 100 \text{ В}$. Какова будет разность потенциалов U_2 , если вытащить стеклянную пластинку из конденсатора?

8. Конденсатор электроемкостью $C_1 = 0,6 \text{ мкФ}$ был заряжен до разности потенциалов $U_1 = 300 \text{ В}$ и соединен со вторым конденсатором электроемкостью $C_2 = 0,4 \text{ мкФ}$, заряженным до разности потенциалов $U_2 = 150 \text{ В}$. Найдите заряд ΔQ , перетекший с пластин первого конденсатора на пластины второго.

9. За одну минуту через поперечное сечение проводника прошел заряд 100 Кл. При этом первые 10 с сила тока равномерно возрастала от нуля до некоторого величины I , а последние 10 с равномерно уменьшалась до нуля. Найдите I .

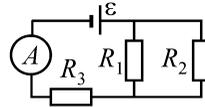
10. Проволоку длиной 1 м растянули так, что ее длина стала равной 110 см. На сколько процентов увеличилось при этом ее сопротивление?



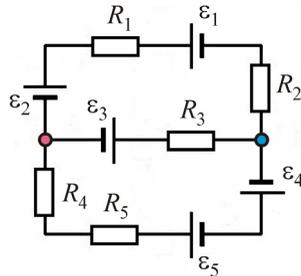
11. Диаметрально расположенные точки кольца, выполненного из проволоки, соединены такой же проволокой (рисунок). К каким точкам кольца – AB или CD – нужно присоединить источник тока, чтобы через кольцо шел максимальный ток?

12. Сила тока I в металлическом проводнике равна $0,8$ А, сечение проводника $S = 4$ мм². Принимая, что в каждом кубическом сантиметре металла содержится $n = 2,5 \cdot 10^{22}$ свободных электронов, определите среднюю скорость их упорядоченного движения.

13. ЭДС батареи $\varepsilon = 100$ В, ее внутреннее сопротивление $r = 2$ Ом, сопротивления $R_1 = 25$ Ом и $R_2 = 78$ Ом. Через сопротивление R_1 течет ток $I_1 = 0,8$ А. Какой ток I показывает амперметр?



14. В схеме, изображенной на рисунке, $\varepsilon_1 = 10$ В, $\varepsilon_2 = 20$ В, $\varepsilon_3 = 30$ В, $\varepsilon_4 = 40$ В, $\varepsilon_5 = 50$ В, $R_1 = 20$ Ом, $R_2 = 50$ Ом, $R_3 = 45$ Ом, $R_4 = 65$ Ом, $R_5 = 85$ Ом. Определите токи во всех участках схемы.



15. В проводнике за время $t = 10$ с при равномерном нарастании силы тока от $I_1 = 1$ А до $I_2 = 2$ А выделилось количество теплоты $Q = 5$ кДж. Найдите сопротивление проводника.

Модуль 4. Электростатика.

Постоянный электрический ток

Вариант 7

1. На расстоянии 20 см находятся два точечных заряда – 50 нКл и 100 нКл. Определите силу, действующую на заряд $q_3 = -10$ нКл, удаленный от обоих зарядов на одинаковое расстояние, равное 20 см.

2. Тонкий, бесконечно длинный в одну сторону стержень равномерно заряжен с линейной плотностью 10 мКл/м. На перпендикуляре к оси стержня, восстановленном из его конца, находится точечный заряд 10 нКл. Расстояние заряда от конца

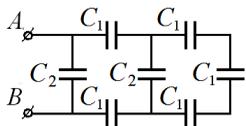
стержня равно $a = 20$ см. Найдите силу взаимодействия стержня и заряда.

3. Электрон, летевший горизонтально со скоростью $1,6$ Мм/с, влетел в однородное электрическое поле с напряженностью $E = 90$ В/см, направленное вертикально вверх. Какова будет по модулю и направлению скорость электрона через 1 нс?

4. Два электрона движутся навстречу друг другу из бесконечности с начальными скоростями $v_1 = v_2 = 10^5$ м/с. Определите наименьшее расстояние, на которое сблизятся электроны.

5. По тонкому кольцу радиусом $R = 10$ см равномерно распределен заряд с линейной плотностью $\tau = 10$ нКл/м. Определите потенциал ϕ в точке, лежащей на оси кольца на расстоянии $a = 5$ см от центра.

6. Полый диэлектрический шар ($\epsilon = 2$) с радиусами внутренней и внешней оболочек $R_1 = 10$ см и $R_2 = 20$ см заряжен по объему с плотностью заряда $\rho = 0,01$ нКл/см³. Определите разность потенциалов между внутренней и внешней поверхностями шара.



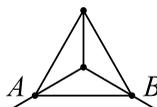
7. Между клеммами A и B включены конденсаторы емкостями $C_1 = 2$ мкФ и $C_2 = 1$ мкФ (рисунок). Вычислите емкость системы.

8. Батарея из трех последовательно соединенных одинаковых конденсаторов подключена к источнику напряжения. К одному из конденсаторов подсоединяют параллельно еще один такой же конденсатор. На сколько процентов возрастет при этом электрическая энергия, запасенная в батарее?

9. Длинный, равномерно заряженный по всей поверхности цилиндрический стержень радиусом $r = 0,1$ м движется с постоянной скоростью $v = 10$ м/с, направленной вдоль его оси. Напряженность электрического поля у поверхности стержня $E = 9 \cdot 10^4$ В/м. Найдите силу тока, обусловленного механическим перемещением зарядов.

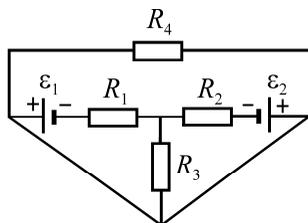
10. Угольный стержень соединен последовательно с железным стержнем такой же толщины. При каком соотношении их длин сопротивление данной комбинации не зависит от температуры? Температурные коэффициенты сопротивления угля и железа соответственно $\alpha_1 = -0,8 \cdot 10^{-3} \text{ град}^{-1}$ и $\alpha_2 = 6 \cdot 10^{-3} \text{ град}^{-1}$, $\rho_1 = 4 \cdot 10^{-5} \text{ Ом} \cdot \text{м}$, $\rho_2 = 1,2 \cdot 10^{-7} \text{ Ом} \cdot \text{м}$.

11. Найдите общее сопротивление контура (рисунок), составленного из проводников одинаковых сопротивлений r и подключенного к электрической цепи в точках A и B .



12. Определите среднюю скорость упорядоченного движения электронов в медном проводнике при силе тока $I = 10 \text{ А}$ и сечении проводника $S = 1 \text{ мм}^2$. Принять, что на каждый атом меди приходится два электрона проводимости. Плотность меди $\rho = 8,9 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$, молярная масса $\mu = 64 \cdot 10^{-3} \text{ кг/моль}$.

13. Внутреннее сопротивление r элемента в 5 раз меньше внешнего сопротивления R , которым замкнут элемент. Найдите, во сколько раз напряжение на зажимах элемента отличается от ЭДС.



14. В электрическую цепь включены 4 сопротивления 1 кОм каждое и источники $\varepsilon_1 = 1,5 \text{ В}$, $\varepsilon_2 = 1,8 \text{ В}$ (рисунок). Определите силу тока во всех сопротивлениях. Внутренними сопротивлениями источников тока пренебречь.

15. За время $t = 8 \text{ с}$ при равномерном возрастании силы тока в проводнике сопротивлением 8 Ом выделилось 500 Дж теплоты. Определите заряд, протекший в проводнике, если сила тока в момент времени $t = 0 \text{ с}$ была равна нулю.

Модуль 4. Электростатика.
Постоянный электрический ток

Вариант 8

1. Два точечных заряда, находясь в воздухе на расстоянии 5 см, взаимодействуют друг с другом с силой 120 мкН, а находясь в некоторой непроводящей жидкости на расстоянии 10 см – с силой 15 мкН. Какова диэлектрическая проницаемость жидкости?

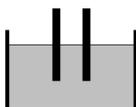
2. Одинаковые по величине, но разные по знаку заряды 18 нКл расположены в двух вершинах равностороннего треугольника, сторона которого равна 2 см. Определите напряженность и потенциал электростатического поля в третьей вершине треугольника.

3. По тонкому закрепленному кольцу радиусом 6 см распределен заряд 40 нКл. В центр кольца помещают частицу с зарядом 12 нКл и массой 9 мг и отпускают. Чему будет равна скорость частицы на большом расстоянии от кольца?

4. Электрическое поле образовано длинной нитью, заряженной с линейной плотностью $\tau = 10^{-10}$ Кл/м. Какую работу совершает поле при перемещении заряда 1 нКл из точки, находящейся на расстоянии 5 см, в точку, находящуюся на расстоянии 10 см от нити?

5. Тонкий стержень длиной $l = 10$ см несет равномерно распределенный заряд $q = 1$ нКл. Определите потенциал электрического поля в точке, лежащей на оси стержня на расстоянии $a = 20$ см от ближайшего его конца.

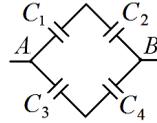
6. Бесконечная плоскость несет заряд, равномерно распределенный с поверхностной плотностью $\sigma = 1$ мкКл/м². На некотором расстоянии от плоскости параллельно ей расположен круг радиусом $r = 10$ см. Вычислите поток вектора напряженности через этот круг.



7. Плоский воздушный конденсатор электроемкостью C с расстоянием между пластинами 4 мм

погружается до середины пластин в диэлектрик с $\epsilon = 3$. Как следует изменить расстояние между пластинами, для того чтобы емкость конденсатора вновь стала прежней?

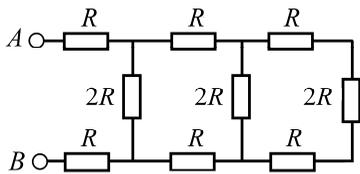
8. Конденсаторы емкостями $C_1 = 0,2$ мкФ, $C_2 = 0,6$ мкФ, $C_3 = 0,3$ мкФ, $C_4 = 0,5$ мкФ соединены так, как это показано на рисунке. Разность потенциалов U между точками A и B равна 320 В.



Определите разность потенциалов U и заряд q на пластинах каждого конденсатора.

9. В синхротроне радиусом $r = 10$ м электроны движутся по круговой траектории со скоростью близкой к скорости света $c = 3 \cdot 10^8$ м/с. Одновременно на орбите находятся $N = 10^{11}$ электронов. Чему равен ток?

10. Какое напряжение можно дать на катушку, имеющую $N = 1000$ витков медного провода ($\rho = 17$ нОм · м) со средним диаметром витков $d = 6$ см, если допустимая плотность тока $j = 2$ А/мм²?

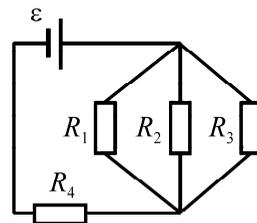


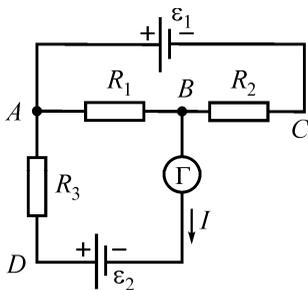
11. Найдите сопротивление между точками A и B цепи, изображенной на рисунке, если $R = 4$ Ом.

12. Плотность тока j в алюминиевом проводе равна 1 А/мм².

Найдите среднюю скорость упорядоченного движения электронов, предполагая, что число свободных электронов в 1 см³ алюминия равно числу атомов.

13. Найдите силу тока в сопротивлении R_2 и падение напряжения на нем, если сопротивления участков цепи равны $R_1 = R_3 = 40$ Ом, $R_2 = 80$ Ом, $R_4 = 34$ Ом, ЭДС генератора 100 В. Внутренним сопротивлением генератора пренебречь (рисунок).





14. Сопротивления участков R_1 , R_2 и R_3 соответственно равны 1000, 500 и 200 Ом. Гальванический элемент имеет ЭДС $\varepsilon_1 = 1,8$ В. Гальванометр регистрирует силу тока 0,5 мА в направлении, указанном стрелкой (рисунок). Определите ЭДС второго гальванического элемента, пренебрегая внутренними сопротивлениями элементов и сопротивлением гальванометра.

15. Определите сопротивление подводящих проводов от источника с напряжением 120 В, если при коротком замыкании предохранители из свинцовой проволоки ($\rho = 210$ нОм \cdot м, $\lambda = 2,5 \cdot 10^4$ Дж/кг) площадью сечения 1 мм² и длиной 2 см плавятся за 0,03 с. Начальная температура предохранителя 27 °С.

Модуль 4. Электростатика.

Постоянный электрический ток

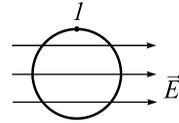
Вариант 9

1. Медная монета массой 5 г обладает положительным зарядом 0,8 мкКл. Какую долю своих электронов потеряла монета? Относительная атомная масса меди 64 а.е.м. Порядковый номер меди в таблице Д.И. Менделеева – 29.

2. Два точечных заряда 6,4 и $-6,4$ мкКл находятся на расстоянии 12 см друг от друга. Найдите напряженность электростатического поля в точке, удаленной на 8 см от первого заряда и на 8 см от второго.

3. Электрон находится в однородном электрическом поле с напряженностью $E = 200$ кВ/м. Какой путь пройдет электрон за время $t = 1$ нс, если его начальная скорость была равна нулю? Какой скоростью будет обладать электрон в конце этого интервала времени?

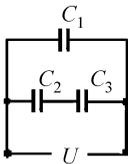
4. Точечный заряд 3 нКл вращается по часовой стрелке по окружности радиусом 20 см в однородном электрическом поле напряженностью 500 В/м из точки I (рисунок) и делает четверть оборота. Определите работу электрического поля.



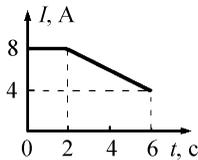
5. Электростатическое поле создается бесконечным цилиндром радиусом 8 мм , равномерно заряженным с линейной плотностью $\tau = 10 \text{ нКл/м}$. Определите разность потенциалов между двумя точками поля, лежащими на расстояниях $r_1 = 2 \text{ мм}$ и $r_2 = 7 \text{ мм}$ от поверхности цилиндра.

6. В центре сферы радиусом $R = 20 \text{ см}$ находится точечный заряд $q = 10 \text{ нКл}$. Определите поток вектора напряженности через часть сферической поверхности площадью $S = 20 \text{ см}^2$.

7. Три конденсатора с емкостями $C_1 = 1 \text{ мкФ}$, $C_2 = 2 \text{ мкФ}$ и $C_3 = 3 \text{ мкФ}$, имеющие максимально допустимые напряжения соответственно $1000, 200$ и 500 В , соединены в батарею. При каком соединении конденсаторов можно получить наибольшее напряжение? Чему равны напряжение и емкость батареи?



8. В схеме, изображенной на рисунке, $U = 120 \text{ В}$, $C_1 = 10 \text{ мкФ}$, $C_2 = 20 \text{ мкФ}$, $C_3 = 30 \text{ мкФ}$. Чему равна энергия, запасенная всеми конденсаторами?



9. Какова величина заряда, прошедшего через поперечное сечение проводника за время от $t_1 = 0$ до $t_2 = 6 \text{ с}$, если сила тока изменяется со временем так, как показано на рисунке?

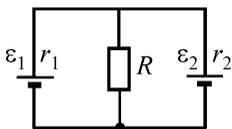
10. Определите сопротивление реостата, если его обмотка состоит из 150 витков никелинового провода ($\rho = 4,2 \cdot 10^{-7} \text{ Ом}\cdot\text{м}$). Диаметр витка 4 см , а длина обмотанной части цилиндра равна 15 см .

11. Из куска проволоки сопротивлением 10 Ом сделано кольцо. Где следует присоединить провода, подводящие ток,

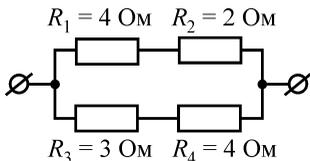
чтобы сопротивление кольца равнялось 1 Ом? Найдите отношение длин дуг.

12. Плотность тока j в медном проводнике равна 3 А/мм^2 . Найдите напряженность E электрического поля в проводнике.

13. Батарея состоит из восьми элементов, соединенных последовательно. ЭДС каждого элемента $1,5 \text{ В}$, внутреннее сопротивление $0,25 \text{ Ом}$. Внешняя цепь представляет соединенные параллельно два проводника сопротивлениями 10 и 50 Ом . Определите напряжение на зажимах батареи.



14. Два элемента с ЭДС $\varepsilon_1 = 6 \text{ В}$ и $\varepsilon_2 = 5 \text{ В}$ и внутренними сопротивлениями $r_1 = 1 \text{ Ом}$ и $r_2 = 2 \text{ Ом}$ соединены по схеме, изображенной на рисунке. Найдите ток, текущий через резистор с сопротивлением $R = 10 \text{ Ом}$.



15. На рисунке представлен участок электрической цепи. Каково отношение количеств теплоты Q_1/Q_3 , выделившихся на резисторах R_1 и R_3 за одно и то же время?

Модуль 4. Электростатика. **Постоянный электрический ток**

Вариант 10

1. Два одинаковых маленьких металлических заряженных шара находятся на расстоянии 60 см . Сила отталкивания шаров $7 \cdot 10^{-5} \text{ Н}$. После того как шары привели в соприкосновение и удалили друг от друга на прежнее расстояние, сила отталкивания стала равной $1,6 \cdot 10^{-4} \text{ Н}$. Вычислите заряды, которые были на шарах до соприкосновения.

2. Тонкий стержень длиной 12 см заряжен с линейной плотностью $\tau = 200 \text{ нКл/м}$. Найдите напряженность электриче-

ского поля в точке, находящейся на расстоянии $r = 5$ см от стержня напротив его середины.

3. Протон, начальная скорость которого равна 100 км/с, влетел в однородное электрическое поле ($E = 300$ В/см) так, что вектор скорости совпал с направлением линий напряженности. Какой путь должен пройти протон в направлении линий поля, чтобы его скорость удвоилась?

4. Точечные заряды $q_1 = 1$ мкКл и $q_2 = 0,1$ мкКл находятся на расстоянии $r = 10$ см друг от друга. Какую работу совершат силы поля, если второй заряд, отталкиваясь от первого, удалится от него на бесконечное расстояние?

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

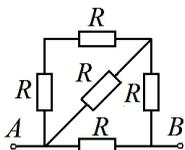
6. Плоская квадратная пластина со стороной $a = 10$ см находится на некотором расстоянии от бесконечной равномерно заряженной ($\sigma = 1$ мкКл/м²) плоскости. Плоскость пластины составляет угол $\beta = 30^\circ$ с линиями поля. Найдите поток вектора напряженности через эту пластину.

7. Внутри конденсатора, расстояние между обкладками которого 1 мм, находится пластина из диэлектрика ($\epsilon = 3$) толщиной также 1 мм. С какой силой давят обкладки на пластину, если заряд конденсатора 2 мкКл, а напряжение на конденсаторе 200 В?

8. Два одинаковых плоских конденсатора соединены параллельно и заряжены до разности потенциалов $U = 150$ В. Определите разность потенциалов на конденсаторах U_1 , если после отключения их от источника тока у одного конденсатора уменьшили расстояние между пластинами в два раза.

9. Сила тока в проводнике меняется со временем по уравнению $I = 7 - 2t$. Какое количество электричества проходит через поперечное сечение проводника за время от $t_1 = 2$ с до $t_2 = 5$ с?

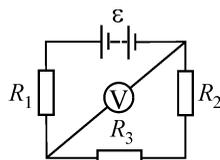
10. На одну из двух одинаковых катушек намотан медный провод, а на другую – алюминиевый. Какой провод и во сколько раз длиннее, если известно, что сопротивления и массы проводников одинаковы?



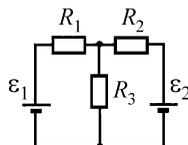
11. Найдите сопротивление между точками A и B цепи, изображенной на рисунке, если $R = 4$ Ом.

12. В медном проводнике длиной $l = 2$ м и площадью поперечного сечения $S = 0,4$ мм² идет ток. При этом каждую секунду выделяется количество теплоты $Q = 0,35$ Дж. Сколько электронов проходит за 1 с через поперечное сечение этого проводника?

13. ЭДС батареи $\varepsilon = 100$ В, сопротивления $R_1 = 100$ Ом, $R_2 = 200$ Ом, $R_3 = 300$ Ом, сопротивление вольтметра $R_V = 2$ кОм (рисунок). Какую разность потенциалов U показывает вольтметр?



14. В схеме, изображенной на рисунке, $\varepsilon_1 = 20$ В, $\varepsilon_3 = 25$ В, $R_1 = 10$ Ом, $R_2 = 15$ Ом, $R_3 = 12$ Ом, внутренние сопротивления источников пренебрежимо малы. Определите ток через сопротивление R_3 .



15. Клеммы источника тока с ЭДС, равной 10 В, замыкают один раз резистором с сопротивлением 4 Ом, второй – резистором с сопротивлением 9 Ом. Найдите мощность, выделяемую во внешней цепи, если она в обоих случаях одинакова.

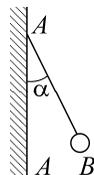
Модуль 4. Электростатика.

Постоянный электрический ток

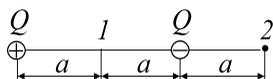
Вариант 11

1. Два отрицательных точечных заряда -9 и -36 нКл расположены на расстоянии 3 м друг от друга. Когда в некоторой точке поместили заряд, то все три заряда оказались в равновесии. Найдите третий заряд и его расстояние от первого заряда.

2. На рисунке AA – заряженная бесконечная плоскость, B – одноименно заряженный шарик массой $4 \cdot 10^{-5}$ г и зарядом $6,67 \cdot 10^{-10}$ Кл. Натяжение нити, на которой висит шарик, равно $4,9 \cdot 10^{-4}$ Н. Найдите поверхностную плотность заряда на плоскости AA .



3. Электрон влетел в пространство между пластинами плоского конденсатора со скоростью 10 Мм/с, направленной параллельно пластинам. На сколько приблизится электрон к положительно заряженной пластине за время движения внутри конденсатора, если расстояние между пластинами равно 10 мм, разность потенциалов $U = 30$ В и длина пластин $l = 6$ см?



4. Электрическое поле создано двумя одинаковыми положительными точечными зарядами Q . Найдите работу A_{12} сил поля по перемещению заряда $Q_1 = 10$ нКл из точки 1 с потенциалом $\phi_1 = 300$ В в точку 2.

5. Тонкое кольцо радиусом R заряжено равномерно с линейной плотностью заряда τ . Определите потенциал электрического поля в центре кольца.

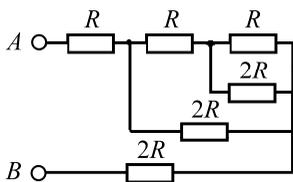
6. Куб со стороной 10 см помещен в однородное электрическое поле напряженностью $8,1 \cdot 10^3$ В/м так, что его ребра параллельны силовым линиям. Чему равен суммарный поток напряженности электрического поля через куб?

7. Конденсатор, заряженный до напряжения 100 В, соединяется с конденсатором такой же емкости, но заряженным до 200 В: один раз – одноименно заряженными обкладками, другой раз – разноименно заряженными обкладками. Какое напряжение установится между обкладками в обоих случаях?

8. Система из двух одинаковых последовательно соединенных конденсаторов подключена к источнику постоянного напряжения U . Емкость каждого конденсатора C . Обкладки одного из конденсаторов закорачивают. Найдите изменение энергии системы конденсаторов.

9. Плотность тока в медном проводнике $j = 3 \text{ А/мм}^2$. Какова напряженность электрического поля в проводнике? Удельное электрическое сопротивление меди $\rho = 1,7 \cdot 10^{-8} \text{ Ом}\cdot\text{м}$.

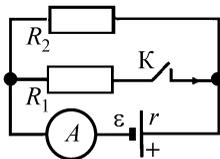
10. По медному проводу ($\rho = 17 \text{ нОм}\cdot\text{м}$) сечением $0,3 \text{ мм}^2$ течет ток $0,3 \text{ А}$. Определите силу, действующую на свободные электроны со стороны электрического поля.



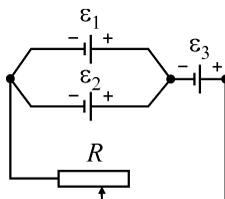
11. Найдите сопротивление между точками A и B цепи, изображенной на рисунке, если $R = 1 \text{ Ом}$.

12. В проводнике объемом $V = 6 \text{ см}^3$ при прохождении по нему постоянного тока за время $t = 1 \text{ мин}$ выделилось количество теплоты $Q = 216 \text{ Дж}$. Вычислите напряженность E электрического поля в проводнике, если его удельное электрическое сопротивление $\rho = 2,7 \cdot 10^{-8} \text{ Ом}\cdot\text{м}$.

13. Электрическая цепь состоит из источника тока и двух сопротивлений, одно из которых может через ключ соединяться параллельно со вторым сопротивлением. Сопротивление R_2 вдвое больше сопротивления R_1 . Внутреннее сопротивление источника тока $r = 0,1R_1$. Определите, во сколько раз изменятся показания амперметра при замыкании ключа.



14. Три источника с ЭДС $\varepsilon_1 = 6 \text{ В}$, $\varepsilon_2 = \varepsilon_3 = 4 \text{ В}$ и внутренними сопротивлениями $r = 0,5 \text{ Ом}$ каждый соединены, как показано на рисунке, и замкнуты на резистор с переменным сопротивлением. Определите ток через источник ε_2 при сопротивлении резистора $R = 4 \text{ Ом}$.



15. Аккумулятор с внутренним сопротивлением $0,08 \text{ Ом}$ при токе 4 А отдает во внешнюю цепь мощность 8 Вт . Какую мощность отдаст он во внешнюю цепь при токе 6 А ?

Модуль 4. Электростатика.
Постоянный электрический ток

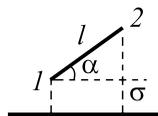
Вариант 12

1. В вершинах квадрата помещены заряды по -10 нКл. Какой заряд нужно поместить в точке пересечения диагоналей, чтобы вся система находилась в равновесии?

2. На отрезке тонкого прямого проводника длиной $l = 10$ см равномерно распределен заряд с линейной плотностью $\tau = 3$ мкКл/м. Вычислите напряженность E , создаваемую этим зарядом в точке, расположенной на оси проводника и удаленной от ближайшего конца отрезка на расстояние, равное длине этого отрезка.

3. Электрон влетел в пространство между пластинами плоского конденсатора, находясь на одинаковом расстоянии от каждой пластины и имея скорость 10 Мм/с, направленную параллельно пластинам, расстояние между которыми $d = 2$ см. Длина пластин по 10 см. Какое наименьшее напряжение нужно приложить к пластинам, чтобы электрон не вылетел из конденсатора?

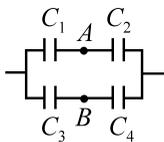
4. Электрическое поле создано бесконечной равномерно заряженной плоскостью с поверхностной плотностью заряда $\sigma = 2$ мкКл/м². В этом поле вдоль прямой, составляющей угол $\alpha = 30^\circ$



с плоскостью, из точки 1 в точку 2 , расстояние l между которыми равно 20 см (рисунок), перемещается точечный электрический заряд $q = 10$ нКл. Определите работу сил поля по перемещению заряда.

5. Заряды $q_1 = 1$ мкКл и $q_2 = -1$ мкКл находятся на расстоянии $d = 10$ см. Определите потенциал поля в точке, удаленной на расстояние $r = 10$ см от первого заряда и лежащей на линии, проходящей через первый заряд перпендикулярно направлению от q_1 к q_2 .

6. Из куба с ребром 18 см выходит поток напряженности электрического поля $\Phi_E = 1,45 \cdot 10^3$ В·м. Какой заряд находится внутри куба?



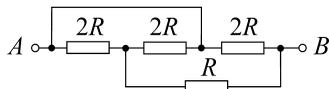
7. Определите разность потенциалов между точками A и B в схеме, изображенной на рисунке, если $C_1 = C_4 = 2$ мкФ, $C_2 = C_3 = 3$ мкФ, а общее напряжение 10 В.

8. Батарея конденсаторов, состоящая из двух последовательно соединенных конденсаторов емкостями $C_1 = 20$ мкФ и $C_2 = 30$ мкФ и присоединенного к ним параллельно конденсатора емкостью $C_3 = 10$ мкФ, подключена к источнику с ЭДС 200 В. Сколько теплоты выделится при пробое конденсатора C_1 ?

9. Определите число электронов, проходящих за 1 с через поперечное сечение проводника площадью 1 мм² железной проволоки ($\rho = 0,98 \cdot 10^{-7}$ Ом \cdot м) длиной 20 м при напряжении на ее концах 16 В.

10. Во сколько раз изменится сила тока, проходящего через платиновую нить, если при постоянном напряжении на зажимах ее температура повышается от 20 до 1200 °С? Температурный коэффициент сопротивления платины принять равным $3,65 \cdot 10^{-3}$ К⁻¹.

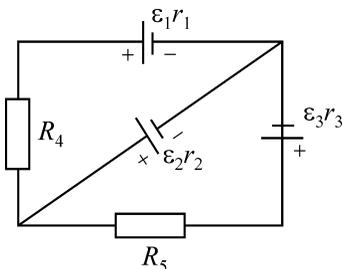
11. Найдите сопротивление между точками A и B цепи, изображенной на рисунке.



12. Металлический проводник движется с ускорением $a = 100$ м/с². Используя модель свободных электронов, определите напряженность E электрического поля в проводнике.

13. Два одинаковых сопротивления по 100 Ом, соединенных параллельно, и последовательно соединенное с ними сопротивление $R = 200$ Ом подключены к источнику постоянного тока. К концам параллельно соединенных сопротивлений подключен конденсатор емкостью $C = 10$ мкФ. Определите ЭДС источника тока, если заряд на конденсаторе $q = 2,2 \cdot 10^{-4}$ Кл. Внутренним сопротивлением источника тока и сопротивлением проводов можно пренебречь.

14. Определите силу тока через элемент ε_2 , если $\varepsilon_1 = 1$ В, $\varepsilon_2 = 2$ В, $\varepsilon_3 = 3$ В, $r_1 = 1$ Ом, $r_2 = 0,5$ Ом, $r_3 = 0,3$ Ом, $R_4 = 1$ Ом, $R_5 = 0,3$ Ом (рисунок).



15. Сила тока в проводнике сопротивлением 12 Ом равномерно убывает от 5 А до нуля в течение 10 с. Какое количество теплоты выделяется в этом проводнике за указанный промежуток времени?

Модуль 4. Электростатика.
Постоянный электрический ток

Вариант 13

1. Два одинаковых шарика подвешены в воздухе на нитях так, что их поверхности соприкасаются. После того как каждому шарiku был сообщен заряд 0,4 мкКл, шарики разошлись на угол $2\alpha = 60^\circ$. Найдите массу шариков, если расстояние от центров шариков до точки подвеса 0,2 м.

2. Электрическое поле создано двумя бесконечными параллельными пластинами, несущими равномерно распределенный по площади заряд с поверхностными плотностями $\sigma_1 = 2$ нКл/м² и $\sigma_2 = -5$ нКл/м². Определите напряженность поля между пластинами и вне пластин.

3. Электрон влетел в пространство между пластинами плоского конденсатора, имея скорость 10 Мм/с, направленную параллельно пластинам, расстояние между которыми $d = 2$ см. Длина каждой пластины равна 10 см. В момент вылета из конденсатора направление скорости электрона составляло угол 35° с первоначальным направлением скорости. Определите разность потенциалов между пластинами.

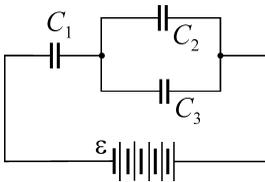
4. Тонкий стержень согнут в полукольцо. Стержень заряжен с линейной плотностью $\tau = 133$ нКл/м. Какую работу надо

совершить, чтобы перевести заряд $q = 6,7$ нКл из центра полукольца в бесконечность?

5. По тонкому кольцу радиусом $R = 10$ см равномерно распределен заряд с линейной плотностью $\tau = 10$ нКл/м. Определите потенциал ϕ в точке, лежащей на оси кольца, на расстоянии $a = 5$ см от центра.

6. Длинный парафиновый цилиндр ($\epsilon = 2$) радиусом $R = 2$ см несет заряд, равномерно распределенный по объему с объемной плотностью $\rho = 10$ нКл/м². Определите напряженность электрического поля в точках, находящихся от оси цилиндра на расстояниях $r_1 = 1$ см и $r_2 = 3$ см. Постройте график зависимости $E(r)$.

7. Конденсатор с воздушным зазором емкостью $4,5$ нФ подключен к батарее напряжением 12 В. Какой заряд перейдет от батареи на конденсатор, если воздух заменить слюдой ($\epsilon = 7$)?

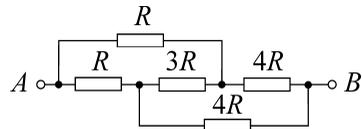


8. Даны три конденсатора с емкостью $C_1 = 1$ мкФ, $C_2 = 2$ мкФ и $C_3 = 3$ мкФ, соединенных, как показано на рисунке, и подключенных к источнику тока с ЭДС $\epsilon = 12$ В. Определите заряды на каждом из них.

9. Сила тока в проводнике равномерно нарастает от 0 до 3 А в течение времени $t = 10$ с. Определите заряд, прошедший в проводнике.

10. Для измерения температуры применили железную проволочку, имеющую при температуре $t_1 = 10$ °С сопротивление $R_1 = 15$ Ом. При некоторой температуре t_2 она имела сопротивление $R_2 = 18,25$ Ом. Найдите эту температуру, если температурный коэффициент сопротивления железа $\alpha = 6 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$.

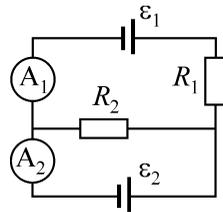
11. Найдите сопротивление между точками A и B цепи, изображенной на рисунке.



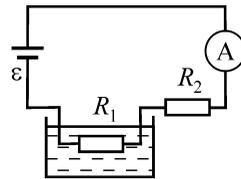
12. Микроамперметр имеет шкалу из $N = 100$ делений. Цена деления $I_0 = 1$ мкА. Сопротивление микроамперметра $r = 200$ Ом. Какой величины шунт нужно присоединить к этому прибору, чтобы им можно было измерять ток до $I = 1$ мА?

13. Конденсатор подключен к зажимам батареи. Когда параллельно конденсатору подключили сопротивление 15 Ом, заряд на конденсаторе уменьшился в 1,2 раза. Найдите внутреннее сопротивление батареи.

14. Сила тока через сопротивление $R_1 = 10$ Ом (рисунок) равна 0,01 А. Определите ЭДС источников ε_1 и ε_2 , если амперметр A_2 показывает силу тока, равную нулю. Сопротивлениями источников и амперметров пренебречь, $R_1 = R_2$.



15. Нагреватель электрического чайника сопротивлением R_1 включен в цепь, как показано на рисунке. ЭДС батареи 120 В, сопротивление $R_2 = 10$ Ом. Амперметр показывает ток $I = 2$ А. Через какое время закипит объем $V = 5$ л воды? Начальная температура воды $t_0 = 4$ °С, КПД нагревателя $\eta = 76$ %.



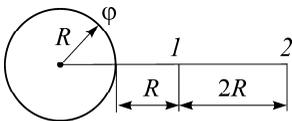
Модуль 4. Электростатика. Постоянный электрический ток

Вариант 14

1. Три одинаковых точечных заряда по 20 нКл расположены в вершинах равностороннего треугольника. На каждый заряд действует сила 10 мН. Найдите длину стороны треугольника.

2. Между пластинами плоского конденсатора находится точечный заряд $q = 30$ нКл. Поле конденсатора действует на заряд с силой $F_1 = 10$ мН. Определите силу F_2 взаимного притяжения пластин, если площадь каждой пластины равна 100 см².

3. Электрон влетел в пространство между пластинами плоского конденсатора, находясь на одинаковом расстоянии от каждой пластины и имея скорость, направленную параллельно пластинам, расстояние между которыми $d = 4$ см. Напряженность поля в конденсаторе $E = 100$ В/м. Через какое время после того, как электрон влетел в конденсатор, он попадет на одну из пластин? На каком расстоянии от начала конденсатора электрон попадет на пластину, если он ускорен разностью потенциалов $U = 60$ В?

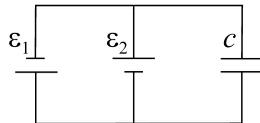


4. Определите работу A_{12} сил поля по перемещению заряда $q = 1$ мкКл из точки 1 в точку 2 поля, созданного заряженным проводящим шаром (рисунок). Потенциал ϕ шара равен 1 кВ.

5. Металлический шарик диаметром $d = 2$ см заряжен отрицательно до потенциала $\phi = 150$ В. Сколько электронов находится на поверхности шарика?

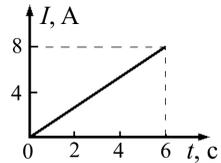
6. Большая плоская пластина толщиной $d = 1$ см несет заряд, равномерно распределенный по объему с объемной плотностью $\rho = 100$ нКл/м³. Найдите напряженность электрического поля на малом расстоянии от поверхности пластины вблизи ее центральной части.

7. Конденсатор включен в схему, показанную на рисунке. ЭДС элементов $\varepsilon_1 = 2$ В и $\varepsilon_2 = 6$ В. Заряд на пластинах конденсатора равен 10^{-8} Кл. Найдите емкость конденсатора.



8. Прессшпан пробивается при напряженности поля в 1800 В/мм. Два плоских конденсатора с емкостями $C_1 = 600$ мкФ и $C_2 = 1500$ мкФ с изолирующим слоем из прессшпана толщиной 2 мм соединены последовательно. При каком напряжении будет пробита эта система?

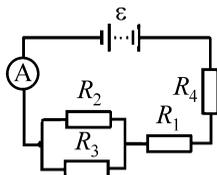
9. Какова величина заряда, прошедшего через поперечное сечение проводника за время от $t_1 = 0$ до $t_2 = 6$ с, если сила тока изменяется со временем так, как показано на рисунке?



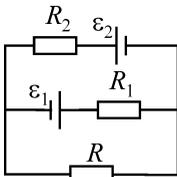
10. Удельное сопротивление графитового стержня от карандаша $\rho = 400$ мкОм·м. Какой ток пройдет по стержню, если на него подать напряжение $U = 6$ В? Длина стержня $l = 20$ см, его диаметр $D = 2$ мм.

11. Общее сопротивление двух проводников при последовательном соединении 50 Ом, а при параллельном 12 Ом. Найдите сопротивление каждого проводника.

12. Металлический стержень движется вдоль своей оси со скоростью $v = 200$ м/с. Определите заряд, который протечет через гальванометр, подключаемый к концам стержня, при резком его торможении, если длина стержня равна 10 м, а сопротивление R всей цепи (включая цепь гальванометра) равно 10 мОм.



13. Батарея с ЭДС $\varepsilon = 10$ В и внутренним сопротивлением $r = 1$ Ом имеет КПД $\eta = 0,8$ (рисунок). Падения напряжения на сопротивлениях R_1 и R_4 равны $U_1 = 4$ В и $U_4 = 2$ В. Какой ток показывает амперметр?



14. Найдите значение и направление тока через сопротивление R в цепи, изображенной на рисунке, если $\varepsilon_1 = 1,5$ В, $\varepsilon_2 = 3,7$ В, $R_1 = 10$ Ом, $R_2 = 20$ Ом, $R = 5$ Ом. Внутренние сопротивления источников пренебрежимо малы.

15. Сколько витков никелиновой проволоки ($\rho = 4,2 \cdot 10^{-7}$ Ом·м) надо намотать на фарфоровый цилиндр диаметром 1,5 см, чтобы сделать кипятильник, в котором за 10 мин закипает 1,2 л воды, взятой при

начальной температуре $10\text{ }^{\circ}\text{C}$? КПД установки 60% , диаметр проволоки $0,2\text{ мм}$, напряжение на ней 100 В .

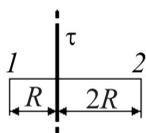
Модуль 4. Электростатика.
Постоянный электрический ток

Вариант 15

1. Два заряженных шарика, подвешенных на нитях одинаковой длины, опускаются в керосин. Какова должна быть плотность материалов шариков, чтобы угол расхождения нитей в воздухе и в керосине был один и тот же? Диэлектрическая проницаемость керосина равна 2 , плотность керосина 800 кг/м^3 .

2. Соосно с бесконечной прямой равномерно заряженной линией ($\tau_1 = 0,5\text{ мкКл/м}$) расположено полукольцо с равномерно распределенным зарядом ($\tau_2 = 20\text{ нКл/м}$). Определите силу взаимодействия нити с полукольцом.

3. Электрон влетает параллельно пластинам в плоский конденсатор, поле в котором 60 В/см . Найдите изменение модуля скорости электрона к моменту вылета его из конденсатора, если начальная скорость $2 \cdot 10^7\text{ м/с}$, а длина пластины конденсатора 6 см .



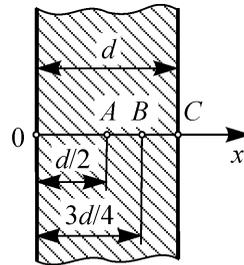
4. Бесконечная нить несет равномерно распределенный заряд ($\tau = 0,1\text{ мкКл/м}$). Определите работу A_{12} сил поля по перемещению заряда $q = 50\text{ нКл}$ из точки 1 в точку 2 (рисунок).

5. Две круглые металлические пластины радиусом $R = 10\text{ см}$ каждая, заряженные разноименно с поверхностной плотностью заряда $\sigma = 1\text{ мКл}$, расположены одна против другой параллельно друг другу и притягиваются с силой $F = 2\text{ мН}$. Расстояние между пластинами $d = 1\text{ см}$. Определите разность потенциалов U между пластинами.

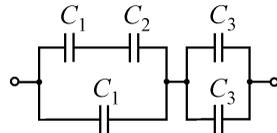
6. Лист стекла толщиной $d = 2\text{ см}$ равномерно заряжен с объемной плотностью $\rho = 1\text{ мкКл/м}^3$. Определите напряженность E электрического поля в точках A, B, C (рисунок). По-

стройте график зависимости $E(x)$ (ось x координат перпендикулярна поверхности листа стекла).

7. Площадь пластин плоского воздушного конденсатора $S = 200 \text{ см}^2$, расстояние между ними $d = 5 \text{ мм}$, заряд пластин $q = 50 \text{ нКл}$. От отрицательно заряженной пластины отрывается электрон. Определите скорость падения электрона на положительно заряженную пластину.

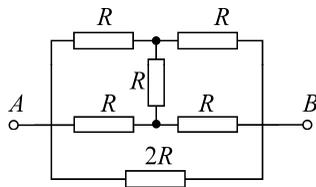


8. Определите емкость батареи конденсаторов, представленной на рисунке, где $C_1 = 5 \text{ мкФ}$, $C_2 = 10 \text{ мкФ}$, $C_3 = 15 \text{ мкФ}$.



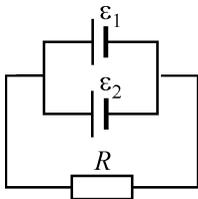
9. Ток в проводнике меняется со временем по закону $I = 2 + 3t^3$. Какое количество электричества проходит через поперечное сечение проводника за время от 1 до 3 с?

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

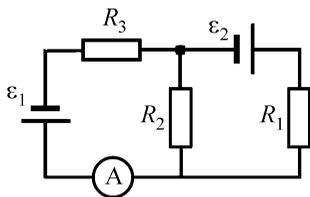


11. Найдите сопротивление между точками A и B цепи, изображенной на рисунке, если $R = 3 \text{ Ом}$.

12. Удельная проводимость металла равна 10 МСм/м . Вычислите среднюю длину свободного пробега электронов в металле, если концентрация n свободных электронов равна 10^{28} м^{-3} . Среднюю скорость хаотического движения электронов принять равной 1 Мм/с .



13. Два параллельно соединенных элемента с одинаковыми ЭДС $\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = 2$ В и внутренними сопротивлениями $r_1 = 1$ Ом и $r_2 = 1,5$ Ом замкнуты на внешнее сопротивление $R = 1,4$ Ом (рисунок). Найдите токи в каждом из элементов и во всей цепи.



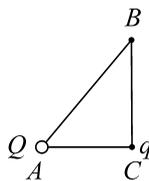
14. Какой ток протекает через амперметр в цепи, изображенной на рисунке, если $\varepsilon_1 = 4$ В, $\varepsilon_2 = 3$ В, $R_1 = 2$ Ом, $R_2 = 1$ Ом, $R_3 = 6$ Ом? Внутренними сопротивлениями источников и амперметра пренебречь.

15. Лампочки, сопротивления которых 3 и 12 Ом, поочередно подключенные к источнику тока, потребляют одинаковую мощность. Во сколько раз КПД источника тока во втором случае больше, чем в первом?

Модуль 4. Электростатика. Постоянный электрический ток

Вариант 16

1. В треугольнике ABC угол C – прямой, $AC = 0,6$ м, $BC = 0,8$ м. В вершине A находится точечный заряд Q . Он действует с силой $2,5 \cdot 10^{-8}$ Н на точечный заряд q , помещенный в вершину C . С какой силой будут взаимодействовать эти заряды, если заряд q перенести в вершину B ?



2. В вершинах квадрата со стороной 5 см находятся одинаковые положительные заряды $q = 2$ нКл. Определите напряженность электростатического поля в середине одной из сторон квадрата.

3. В плоский конденсатор влетает электрон со скоростью $2 \cdot 10^7$ м/с, направленной параллельно пластинам конденсатора.

На какое расстояние от своего первоначального направления движения сместится электрон за время пролета конденсатора? Расстояние между пластинами 2 см, их длина 5 см, разность потенциалов между пластинами 200 В.

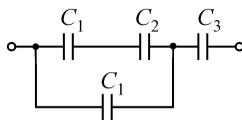
4. Под действием электростатического поля равномерно заряженной бесконечной плоскости точечный заряд $q = 1$ нКл переместился вдоль силовой линии на расстояние $r = 1$ см. При этом была совершена работа 5 мкДж. Определите поверхностную плотность заряда на плоскости.

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

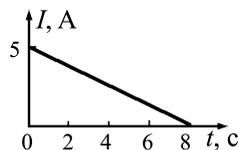
6. Электрическое поле создано точечным зарядом $q = 0,1$ мкКл. Определите поток вектора напряженности через круглую площадку радиусом $R = 30$ см. Заряд равноудален от краев площадки и находится на расстоянии $a = 40$ см от ее центра.

7. Пространство между пластинами плоского конденсатора заполнено двумя слоями диэлектриков: слоем стекла толщиной 1 см ($\epsilon = 7$) и слоем парафина толщиной 2 см ($\epsilon = 2$). Напряженность электрического поля в первом слое 140 В/м. Определите разность потенциалов между пластинами.

8. Определите емкость батареи конденсаторов, представленной на рисунке, где $C_1 = 2$ мкФ, $C_2 = 5$ мкФ, $C_3 = 8$ мкФ.



9. Какова величина заряда, прошедшего через поперечное сечение проводника за время от $t_1 = 0$ до $t_2 = 8$ с, если сила тока изменяется со временем так, как показано на рисунке?



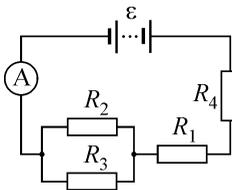
10. Определите удельное сопротивление проводника, если его длина 42 см, диа-

метр 0,7 мм, по нему течет ток 0,5 А, а разность потенциалов на его концах 0,6 В.

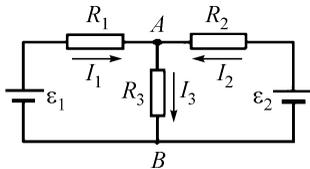
11. На сколько равных частей нужно разрезать проводник, имеющий сопротивление 36 Ом, чтобы сопротивление его частей, соединенных параллельно, было 1 Ом?

12. Исходя из модели свободных электронов определите число z соударений, которые испытывает электрон за время $t = 1$ с, находясь в металле, если концентрация свободных электронов равна 10^{29} м⁻³. Удельную проводимость металла γ принять равной 10 МСм/м.

13. Напряжение на зажимах элемента в замкнутой цепи $U = 2,1$ В, сопротивления $R_1 = 5$ Ом, $R_2 = 6$ Ом и $R_3 = 3$ Ом. Какой ток I показывает амперметр?



14. ЭДС батареи $\varepsilon = 120$ В, сопротивления $R_3 = 20$ Ом, $R_4 = 25$ Ом (рисунок). Падение напряжения на сопротивлении R_1 равно $U_1 = 40$ В. Амперметр показывает ток $I = 2$ А. Найдите сопротивление R_2 .



15. Определите силу тока через сопротивление R_2 и напряжение между точками A и B в цепи, представленной на рисунке. ЭДС источников равны $\varepsilon_1 = 4$ В и $\varepsilon_2 = 3$ В, сопротивления $R_1 = 2$ Ом, $R_2 = 1$ Ом, $R_3 = 6$ Ом. Внутренними сопротивлениями источников пренебречь.

8. Лампочка и реостат, соединенные последовательно, присоединены к источнику тока. Напряжение U на зажимах лампочки равно 40 В, сопротивление R реостата равно 10 Ом. Внешняя цепь потребляет мощность $P = 120$ Вт. Найдите силу тока I в цепи.

Модуль 4. Электростатика.
Постоянный электрический ток

Вариант 17

1. Шарик массой 2 г, имеющий заряд 20 нКл, подвешен в воздухе на тонкой изолирующей нити. Определите натяжение нити, если снизу на расстоянии 5 см расположен одноименный заряд 120 нКл.

2. Медный шар радиусом $R = 0,5$ см помещен в масло. Плотность масла $\rho_m = 800$ кг/м³. Найдите заряд шара, если в однородном электрическом поле шар оказался взвешенным в масле. Электрическое поле направлено вертикально вверх и его напряженность $E = 3,6$ МВ/м.

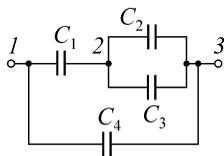
3. Площадь пластин плоского воздушного конденсатора $S = 200$ см², расстояние между ними $d = 5$ мм, заряды пластин $q_1 = 50$ нКл и $q_2 = -70$ нКл. От отрицательно заряженной пластины отрывается электрон. Определите скорость падения электрона на положительно заряженную пластину.

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

5. Между пластинами плоского конденсатора, расположенного горизонтально, на расстоянии 10 см от нижней пластины висит заряженный шарик. Разность потенциалов между пластинами равна 400 В. Через какое время шарик упадет на нижнюю пластину, если разность потенциалов мгновенно уменьшить до 200 В?

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

7. К пластинам плоского воздушного конденсатора емкостью $C = 100$ пФ подключена батарея с ЭДС $\varepsilon = 10$ В. Как изменится напряженность поля между пластинами, если расстояние между ними уменьшить в 2 раза?

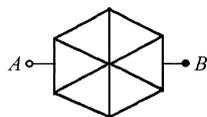


8. Определите емкость батареи конденсаторов, представленной на рисунке, где $C_1 = 6$ мкФ, $C_2 = 9$ мкФ, $C_3 = 3$ мкФ, $C_4 = 1$ мкФ.

9. В электростатическом генераторе Ван де Граафа прорезиненная лента шириной 0,3 м движется со скоростью 20 м/с. Около нижнего шкива ленте сообщается такой поверхностный заряд, что по обеим сторонам ленты образуется электрическое поле с напряженностью 1,2 МВ/м. Чему равна сила тока, обусловленного механическим перемещением ленты?

10. Разность потенциалов на концах проволоки длиной 5 м равна 4,2 В. Определите плотность тока в проволоке при температуре 120 °С, если ее удельное сопротивление и температурный коэффициент сопротивления равны соответственно $2 \cdot 10^{-7}$ Ом·м и $6 \cdot 10^{-3}$ К⁻¹.

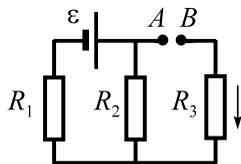
11. Найдите сопротивление между точками A и B проволочного каркаса, изображенного на рисунке. Сопротивление каждого звена равно R .



12. Определите объемную плотность тепловой мощности тока в металлическом проводнике, если плотность тока $j = 10$ А/мм². Напряженность электрического поля в проводнике равна 1 мВ/м.

13. В цепь, состоящую из аккумулятора и сопротивления 20 Ом, подключают вольтметр, сначала последовательно, а потом параллельно сопротивлению. Показания вольтметра в обоих случаях одинаковы. Каково сопротивление вольтметра, если внутреннее сопротивление аккумулятора 0,1 Ом?

14. Три сопротивления $R_1 = 5 \text{ Ом}$, $R_2 = 1 \text{ Ом}$ и $R_3 = 3 \text{ Ом}$, а также источник тока с ЭДС $1,4 \text{ В}$ соединены, как показано на рисунке. Определите ЭДС источника тока, который надо подключить в цепь между точками A и B , чтобы в сопротивлении R_3 шел ток силой $I_3 = 1 \text{ А}$ в направлении, указанном стрелкой. Сопротивлением источника тока пренебречь.



15. Сила тока в проводнике сопротивлением 10 Ом за время 50 с равномерно нарастает от 5 до 10 А . Определите количество теплоты, выделившееся за это время в проводнике.

Модуль 4. Электростатика. **Постоянный электрический ток**

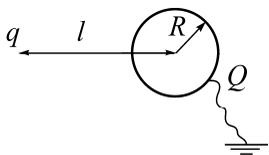
Вариант 18

1. Даны два одинаковых шарика массой $m = 1 \text{ г}$ каждый. Какой заряд q нужно сообщить каждому шару, чтобы сила взаимного отталкивания зарядов уравновесила силу взаимного притяжения шариков по закону тяготения Ньютона? Рассматривать шарики как материальные точки.

2. Две одинаковые разноименно заряженные параллельные пластины находятся на небольшом расстоянии друг от друга. Напряженность электрического поля между пластинами $E_1 = 100 \text{ В/м}$, напряженность поля слева и справа от пластин $E_2 = 50 \text{ В/м}$. Определите силу взаимодействия между пластинами, если их площадь $S = 100 \text{ см}^2$.

3. От поверхности металлического шара радиусом 10 см и зарядом $q = -1 \text{ нКл}$ отрывается электрон. Определите скорость электрона вдали от шара.

4. Определите линейную плотность бесконечно длинной заряженной нити, если работа сил поля по перемещению заряда $Q = 1 \text{ нКл}$ с расстояния $r_1 = 5 \text{ см}$ до $r_2 = 2 \text{ см}$ в направлении, перпендикулярном нити, равна 50 мкДж .

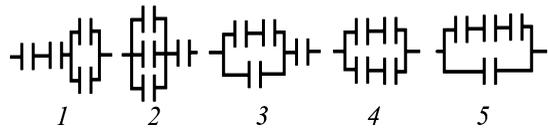


5. Какой заряд появится на заземленной проводящей сфере радиусом $R = 3$ см, если на расстоянии $l = 10$ см от ее центра поместить точечный заряд $q = -20$ мкКл?

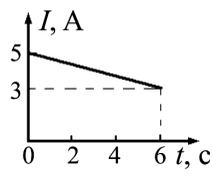
6. Длинный диэлектрический цилиндр ($\epsilon = 5$) радиусом 10 см заряжен с объемной плотностью $\rho = 10$ нКл/м³. Определите разность потенциалов между точками на оси цилиндра и точками на его поверхности.

7. В плоский конденсатор вдвинули плитку парафина ($\epsilon = 2$) толщиной $d = 1$ см, которая вплотную прилегает к его пластинам. На сколько нужно увеличить расстояние между пластинами, чтобы получить прежнюю емкость?

8. Имеется четыре одинаковых конденсатора электроемкостью C каждый. По какой схеме нужно их соединить, чтобы общая емкость была равна $4C/3$?



9. Какова величина заряда, прошедшего через поперечное сечение проводника за время от $t_1 = 0$ с до $t_2 = 6$ с, если сила тока изменяется со временем так, как показано на рисунке?



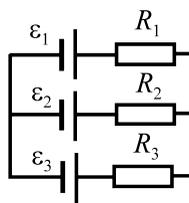
10. Имеется катушка медной проволоки с площадью поперечного сечения $0,1$ мм². Масса всей проволоки $0,3$ кг. Определите сопротивление проволоки. Удельное сопротивление меди 17 нОм·м, плотность 8900 кг/м³.

11. Имеется достаточное количество одинаковых сопротивлений по 5 Ом. Требуется, соединяя их, получить эквивалентное сопротивление 3 Ом. Как их следует соединить для того, чтобы обойтись наименьшим числом сопротивлений?

12. По прямому медному проводу длиной $l = 1000$ м и сечением $S = 1 \text{ мм}^2$ течет ток $I = 4,5$ А. Считая, что на каждый атом меди приходится один свободный электрон, найдите время, за которое электрон переместится от одного конца провода до другого.

13. Источник тока питает 100 ламп, рассчитанных на напряжение 220 В и соединенных параллельно. Сопротивление каждой лампы 1,2 кОм, сопротивление подводящих проводов 4 Ом, внутреннее сопротивление источника 0,8 Ом. Найдите ЭДС источника.

14. Три источника тока с ЭДС $\varepsilon_1 = 11$ В, $\varepsilon_2 = 4$ В и $\varepsilon_3 = 6$ В и три сопротивления $R_1 = 5$ Ом, $R_2 = 10$ Ом и $R_3 = 2$ Ом соединены, как показано на рисунке. Определите силы токов через сопротивления. Внутреннее сопротивление источников тока пренебрежимо мало.



15. ЭДС батареи аккумуляторов $\varepsilon = 12$ В, сила тока короткого замыкания равна 5 А. Какую наибольшую мощность P_{\max} можно получить во внешней цепи, соединенной с такой батареей?

Модуль 4. Электростатика. **Постоянный электрический ток**

Вариант 19

1. Два одинаковых маленьких шарика массой 80 г каждый подвешены к одной точке на нитях длиной 30 см. Какой заряд надо сообщить каждому шару, чтобы нити разошлись под прямым углом друг к другу?

2. В двух вершинах при основании равнобедренного треугольника закреплены одинаковые положительные заряды. Углы при основании треугольника 30° , а длина его боковой стороны равна 6 см. Модуль вектора напряженности электрического поля в третьей вершине треугольника равен 20 кВ/м. Чему равна величина каждого заряда?

3. Электрон отрывается от поверхности длинной металлической нити диаметром 1 мм, заряженной с линейной плотностью заряда $\tau = 0,1$ мКл/м. Определите скорость электрона на расстоянии 1 см от нити.

4. Электрон в однородном электрическом поле получает ускорение $a = 10^{12}$ м/с². Найдите напряженность E электрического поля, скорость, которую получит электрон за время $t = 1$ мкс своего движения, а также работу A сил электрического поля за это время.

5. Четыре заряда величиной $q = 1$ нКл каждый находятся в вершинах квадрата со стороной $l = 10$ см. Найдите разность потенциалов в поле этих зарядов между центром квадрата и серединой одной из его сторон.

6. Уединенный металлический шар радиусом 20 см имеет заряд 10 нКл. Его окружают концентрической металлической сферой радиусом 40 см с зарядом 5 нКл. На сколько при этом изменится потенциал шара? Чему будет равен потенциал сферы?

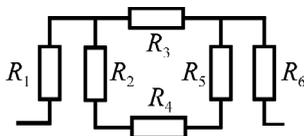
7. Плоский воздушный конденсатор заряжен до разности потенциалов $U = 60$ В и отключен от источника тока. После этого внутрь конденсатора, вплотную к одной из обкладок, вводится пластинка из диэлектрика с диэлектрической проницаемостью $\epsilon = 2$. Толщина пластинки в 2 раза меньше величины зазора между обкладками конденсатора. Чему равна разность потенциалов после введения диэлектрика?

8. Конденсатор емкостью 5 мкФ и воздушный конденсатор емкостью 30 нФ соединены последовательно и подключены к источнику тока с напряжением 200 В. Затем воздушный конденсатор заливается керосином ($\epsilon = 2$). Какой заряд протечет при этом по цепи?

9. Сила тока в проводнике меняется со временем по уравнению $I = 5 + 2t - 3t^2$. Какое количество электричества проходит через поперечное сечение проводника за время от $t_1 = 3$ с до $t_2 = 5$ с?

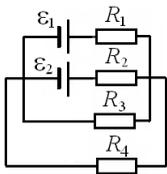
10. Сопротивление вольфрамовой нити ($\alpha = 5,2 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$) электрической лампочки при 20°C равно $35,8 \text{ Ом}$. Какова будет температура нити лампочки, если при включении в сеть напряжением 120 В по нити идет ток $0,33 \text{ А}$?

11. Найдите общее сопротивление резисторов (рисунок), если $R_1 = R_2 = R_5 = R_6 = 1 \text{ Ом}$, $R_3 = 10 \text{ Ом}$, $R_4 = 8 \text{ Ом}$.



12. В стальном проводнике ($\rho = 10^{-7} \text{ Ом}\cdot\text{м}$) длиной $l = 100 \text{ м}$ свободные электроны под действием электрического поля движутся со средней скоростью $\langle v \rangle = 5 \cdot 10^{-4} \text{ м/с}$. Определите концентрацию носителей заряда, если разность потенциалов на концах провода $U = 200 \text{ В}$.

13. Аккумулятор дает на внешнее сопротивление 4 Ом ток $0,2 \text{ А}$. Если же внешнее сопротивление равно 7 Ом , то аккумулятор дает ток $0,14 \text{ А}$. Какой ток он даст, если его замкнуть на коротко?



14. Источники тока с электродвижущими силами ϵ_1 и ϵ_2 включены в цепь, как показано на рисунке. Определите силы токов, текущих в сопротивлениях R_2 и R_3 , если $\epsilon_1 = 10 \text{ В}$ и $\epsilon_2 = 4 \text{ В}$, а $R_1 = R_4 = 2 \text{ Ом}$ и $R_2 = R_3 = 4 \text{ Ом}$. Сопротивлениями источников тока пренебречь.

15. К источнику с ЭДС 20 В и внутренним сопротивлением $2,4 \text{ Ом}$ подключено сопротивление 6 Ом . Какое сопротивление и как следует подключить дополнительно, чтобы полезная мощность была максимальной? Сравните ее с полезной мощностью, выделяемой в первом сопротивлении, когда второе не подключено.

Модуль 4. Электростатика.
Постоянный электрический ток

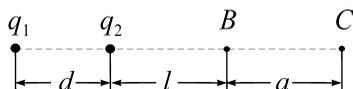
Вариант 20

1. Какой заряд q приобрел бы медный шар радиусом $R = 10$ см, если бы удалось удалить из него все электроны проводимости? Атомная масса меди $A = 64$, плотность $\rho_m = 8,9$ г/см³. Считать, что на каждый атом меди приходится один электрон проводимости.

2. Какой угол с вертикалью составит нить, на которой висит шарик массой 25 мг, если поместить шарик в горизонтальное однородное электрическое поле с напряженностью 35 В/м, сообщив ему заряд 7 мкКл?

3. Пучок электронов, направленный параллельно обкладкам плоского конденсатора на пути $L = 4$ см, отклоняется на расстояние $h = 2$ мм по вертикали. Какую кинетическую энергию имеют электроны в момент влета в конденсатор? Напряженность поля внутри конденсатора $E = 22,5$ кВ/м.

4. Какую работу нужно совершить, чтобы переместить заряд $q_0 = 1$ нКл из точки C в точку B в поле двух точечных зарядов $q_1 = q_2 = 1$ мкКл? Расстояния: $d = 10$ см, $l = 15$ см, $a = 20$ см (рисунок).

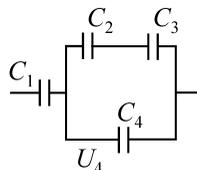


5. На расстоянии $a = 5$ см от поверхности металлического шара потенциал $\varphi_1 = 1,2$ кВ, а на расстоянии $b = 10$ см — $\varphi_2 = 900$ В. Определите радиус шара и его заряд.

6. Уединенный металлический шар радиусом 20 см имеет заряд 10 нКл. Его окружают концентрической металлической сферой радиусом 40 см. При этом потенциал шара стал равен нулю. Чему будет равен потенциал сферы?

7. Конденсаторы емкостями $C_1 = 2$ мкФ, $C_2 = 2$ мкФ, $C_3 = 3$ мкФ, $C_4 = 1$ мкФ соединены так, как указано на рисунке.

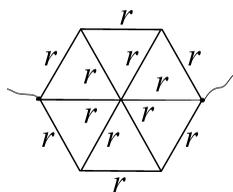
Разность потенциалов на обкладках четвертого конденсатора $U_4 = 100$ В. Найдите заряды и разности потенциалов на обкладках каждого конденсатора, а также общий заряд и разность потенциалов батареи конденсаторов.



8. Электроемкость C плоского конденсатора равна 111 пФ. Диэлектрик – фарфор ($\epsilon = 5$). Конденсатор зарядили до разности потенциалов $U = 600$ В и отключили от источника напряжения. Какую работу A нужно совершить, чтобы вынуть диэлектрик из конденсатора? Трение пренебрежимо мало.

9. При какой постоянной силе тока через поперечное сечение проводника пройдет заряд 50 Кл за промежуток времени от 5 до 10 с от момента включения тока? Какой заряд пройдет через поперечное сечение проводника за то же время, если сила тока в проводнике изменяется со временем по закону $I = 6 + 3t$?

10. При какой температуре сопротивление серебряного проводника станет в $n = 2$ раза больше, чем при $t_0 = 0$ °С? Температурный коэффициент сопротивления серебра $\alpha = 4,1 \cdot 10^{-3}$ град $^{-1}$. Тепловым расширением проводника пренебречь.

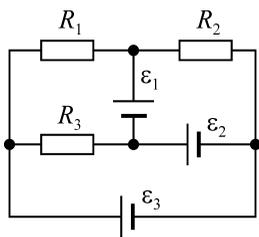


11. В каждую из сторон правильного шестиугольника включено сопротивление 5 Ом. Кроме того, каждая из вершин соединена с центром шестиугольника таким же сопротивлением. Чему равно сопротивление получившейся системы при подключении противоположными вершинами?

12. Никелиновый стержень ($\rho_0 = 4 \cdot 10^{-7}$ Ом·м, $\alpha = 10^{-4}$ К $^{-1}$) длиной $L = 5$ м подключен к источнику постоянного тока с ЭДС $\epsilon = 12$ В. Температура проводника $T = 813$ К. Определите плотность тока в проводнике.

13. К источнику тока с ЭДС $\epsilon = 1,5$ В присоединили катушку с сопротивлением $R = 0,1$ Ом. Амперметр показал силу тока $I_1 = 0,5$ А. Когда к источнику тока присоединили последовательно еще один источник тока с такой же ЭДС, сила тока

в той же катушке оказалась равной $I_2 = 0,4$ А. Определите внутренние сопротивления r_1 и r_2 первого и второго источников тока.



14. На рисунке $\varepsilon_1 = 10$ В, $\varepsilon_2 = 20$ В, $\varepsilon_3 = 40$ В, а сопротивления $R_1 = R_2 = R_3 = 10$ Ом. Определите силу токов, протекающих через сопротивления и через источники ЭДС. Внутреннее сопротивление источников ЭДС не учитывать.

15. Три одинаковых источника питания, соединенных параллельно, замыкают на внешнее сопротивление $0,3$ Ом. При этом на нем выделяется такая же мощность, как и в случае последовательного соединения девяти таких же источников. Определите внутреннее сопротивление одного источника.

Модуль 4. Электростатика. **Постоянный электрический ток**

Вариант 21

1. В элементарной теории атома водорода принимают, что электрон вращается вокруг ядра по круговой орбите. Определите скорость электрона, если радиус орбиты $r = 53$ пм, а также частоту ν вращения электрона.

2. Полый металлический шарик массой 2 г подвешен на шелковой нити и помещен над положительно заряженной плоскостью, создающей однородное вертикальное электрическое поле напряженностью 10^6 В/м. Шарик имеет положительный заряд 10^{-8} Кл. Период малых колебаний шарика 1 с. Какова длина нити?

3. Две частицы имеют массу 1 г каждая и заряды 1 мкКл и -1 мкКл. В начальный момент расстояние между частицами $3,2$ м, одна из частиц покоится, а другая удаляется от нее со скоростью 3 м/с. Найдите максимальное расстояние между частицами в процессе движения.

4. Точечные заряды $q_1 = -0,17$ нКл и $q_2 = 0,2$ нКл находятся от точечного заряда $q_0 = 0,3$ нКл на расстояниях $l_1 = 2$ см и $l_2 = 5$ см соответственно. Какую минимальную работу нужно совершить, чтобы поменять местами заряды q_1 и q_2 ?

5. Две концентрические металлические сферы радиусами $R_1 = 15$ см и $R_2 = 30$ см имеют заряды соответственно $q_1 = -2 \cdot 10^{-8}$ Кл и $q_2 = 4 \cdot 10^{-8}$ Кл. Вычислите потенциал электрического поля в точках, удаленных от центра сфер на расстояния $l_1 = 10$ см, $l_2 = 20$ см и $l_3 = 40$ см.

6. Плотность объемного заряда диэлектрического шара радиусом R зависит от расстояния r до центра шара по закону $\rho = \rho_0 \left(1 - \frac{r}{R}\right)$. Определите зависимость напряженности электрического поля от r внутри и вне шара. Чему равно максимальное значение напряженности? Диэлектрическая проницаемость вещества шара равна ϵ .

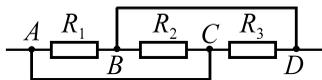
7. Конденсатор электроемкостью $C_1 = 0,2$ мкФ был заряжен до разности потенциалов $U_1 = 320$ В. После того как его соединили параллельно со вторым конденсатором, заряженным до разности потенциалов $U_2 = 450$ В, напряжение U на нем изменилось до 400 В. Вычислите емкость C_2 второго конденсатора.

8. Сила притяжения между пластинами плоского воздушного конденсатора равна 50 нН. Площадь каждой пластины $S = 200$ см². Найдите объемную плотность w_3 энергии поля конденсатора.

9. Из вертикально расположенного конденсатора с начальной емкостью 12 мкФ равномерно вытекает заполнявший его керосин ($\epsilon = 2$). В цепи, соединяющей конденсатор с батареей напряжением 24 В, протекает при этом ток силой 1 мкА. За сколько секунд вытечет весь керосин? Внутренним сопротивлением источника тока и сопротивлением проводов пренебречь.

10. Медная ($\rho_1 = 17$ нОм·м) и железная ($\rho_2 = 0,98 \cdot 10^{-7}$ Ом·м) проволоки одинаковой длины включены параллельно в цепь,

причем железная проволока имеет вдвое больший диаметр. Сила тока в медной проволоке 60 мА. Какова сила тока в железной проволоке?

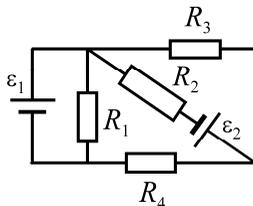


11. Найдите сопротивление между точками A и D (рисунок), если каждое из трех сопротивлений равно 1 Ом.

12. По медному и золотому проводникам одинаковых размеров пропускают равные токи. Во сколько раз будут отличаться средние скорости упорядоченного движения электронов, если на каждый атом приходится по три свободных электрона? Плотности металлов: $\rho_{\text{Cu}} = 9 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$, $\rho_{\text{Au}} = 19 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$; молярные массы: $\mu_{\text{Cu}} = 63 \cdot 10^{-3} \text{ кг/моль}$, $\mu_{\text{Au}} = 197 \cdot 10^{-3} \text{ кг/моль}$.

13. Две группы из трех последовательно соединенных элементов соединены параллельно. ЭДС каждого элемента равна 1,2 В, внутреннее сопротивление $r = 0,2$ Ом. Полученная батарея замкнута на внешнее сопротивление $R = 1,5$ Ом. Найдите силу тока во внешней цепи.

14. Определите ток, проходящий через резистор R_2 в схеме (рисунок), если $R_2 = 5$ Ом, $R_1 = R_3 = R_4 = 10$ Ом, $\varepsilon_1 = 10$ В, $\varepsilon_2 = 25$ В.



8. Батарея состоит из $n = 5$ последовательно соединенных источников с ЭДС $\varepsilon = 1,4$ В и внутренним сопротивлением $r = 0,3$ Ом каждого. Чему равна наибольшая мощность, которую можно получить от батареи?

Модуль 4. Электростатика.

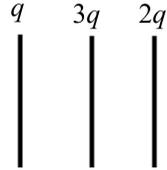
Постоянный электрический ток

Вариант 22

1. Два одинаковых отрицательных точечных заряда по 100 нКл и массой 0,3 г каждый движутся по окружности радиу-

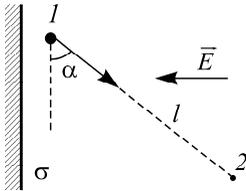
сом 10 см вокруг положительного заряда 100 нКл. При этом отрицательные заряды находятся на концах одного диаметра. Найдите угловую скорость вращения зарядов.

2. Три тонкие металлические пластины, имеющие заряды q , $3q$ и $2q$, расположены параллельно друг другу так, как показано на рисунке. Площадь каждой пластины S . Найдите силу, действующую на среднюю пластину.



Электрическое поле, создаваемое каждой пластиной, считать однородным.

3. Протон влетает в плоский конденсатор параллельно его пластинам со скоростью $v_0 = 1,2 \cdot 10^5$ м/с. Напряженность поля внутри конденсатора $E = 3$ кВ/м, длина пластин $l = 10$ см. Во сколько раз скорость протона при вылете из конденсатора будет больше начальной скорости?



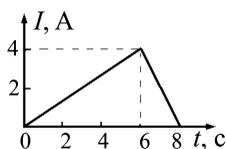
4. Точечный заряд $q = 0,2$ мкКл расположен вблизи бесконечной равномерно заряженной пластины с поверхностной плотностью заряда $\sigma = -50$ нКл/м². Заряд перемещают из точки 1 в точку 2 под углом $\alpha = 60^\circ$ к пластине (рисунок). Определите работу, которую необходимо совершить при таком перемещении. Расстояние l между точками 1 и 2 равно 5 м.

5. Два металлических шара, находящихся на большом расстоянии, один диаметром $d_1 = 10$ см и зарядом $q_1 = 0,6$ нКл, другой диаметром $d_2 = 30$ см и $q_2 = -2$ нКл, соединяются тонким проводом. Какой заряд переместится по проводу?

6. Полый диэлектрический шар ($\epsilon = 2$) с радиусами внутренней и внешней оболочек $R_1 = 10$ см и $R_2 = 20$ см заряжен по объему с плотностью заряда $\rho = 0,01$ нКл/см³. Определите разность потенциалов между внутренней и внешней поверхностями шара.

7. Найдите силу взаимодействия пластин плоского воздушного конденсатора емкостью C , имеющего заряд Q , при расстоянии между пластинами d .

8. К воздушному конденсатору, заряженному до разности потенциалов $U = 600$ В и отключенному от источника напряжения, присоединили параллельно второй незаряженный конденсатор таких же размеров и формы, но с диэлектриком (фарфор). Определите диэлектрическую проницаемость ϵ фарфора, если после присоединения второго конденсатора разность потенциалов уменьшилась до $U_1 = 100$ В.



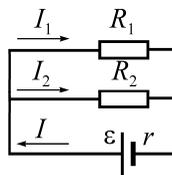
9. Какова величина заряда, прошедшего через поперечное сечение проводника за время от $t_1 = 0$ с до $t_2 = 8$ с, если сила тока изменяется со временем так, как показано на рисунке?

10. Нихромовая спираль нагревательного элемента при температуре накала $t = 900$ °С должна иметь сопротивление $R = 30$ Ом. Какой длины надо взять проволоку поперечным сечением $S = 0,6$ мм², чтобы сделать эту спираль? Удельное сопротивление нихрома при $t_0 = 0$ °С $\rho_0 = 1,1 \cdot 10^{-6}$ Ом · м, температурный коэффициент сопротивления нихрома $\alpha = 10^{-4}$ град⁻¹. Тепловым расширением проволоки пренебречь.

11. Однородный провод сопротивлением 100 Ом надо разрезать на два отрезка так, чтобы при соединении их параллельно можно было получить сопротивление 20 Ом. Каково отношение длин отрезков провода?

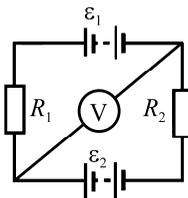
12. Никелиновый стержень ($\rho_0 = 4 \cdot 10^{-7}$ Ом · м, $\alpha = 10^{-4}$ К⁻¹) длиной $L = 5$ м подключен к источнику постоянного тока с ЭДС $\epsilon = 12$ В. Температура проводника $T = 813$ К. Определите объемную плотность тепловой мощности тока.

13. В цепи (рисунок) ЭДС источника равна 5 В, внутреннее сопротивление $r = 0,1$ Ом.



Найдите токи I_1 и I_2 , текущие через сопротивления $R_1 = 4$ Ом и $R_2 = 6$ Ом.

14. Батареи имеют ЭДС $\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = 110$ В, сопротивления $R_1 = R_2 = 0,2$ кОм, сопротивление вольтметра $R_V = 1$ кОм (рисунок). Найдите показание вольтметра.



15. КПД источника тока с ЭДС 100 В, к которому подключено сопротивление $R = 10$ Ом, $\eta = 25$ %. Определите мощность, выделяемую на сопротивлении.

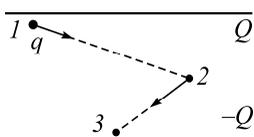
Модуль 4. Электростатика. **Постоянный электрический ток**

Вариант 23

1. Два шарика одинаковых радиусов и масс подвешены на нитях одинаковой длины $l = 10$ см так, что их поверхности соприкасаются. Какой заряд q нужно сообщить шарикам, чтобы сила натяжения нитей стала равной $F = 98$ мН? Масса каждого шарика $m = 5$ г.

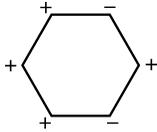
2. Заряженный шарик, подвешенный на невесомой диэлектрической нити, находится во внешнем электрическом поле, силовые линии которого горизонтальны. При этом нить образует угол $\alpha = 45^\circ$ с вертикалью. На сколько изменится угол отклонения нити при уменьшении заряда шарика на 10 %?

3. Поток заряженных частиц, пройдя разность потенциалов 20 В, влетает в пространство между обкладками плоского конденсатора. Длина пластин 5 см, расстояние между ними 4 мм. Какая разность потенциалов приложена к пластинам конденсатора, если на экран попадает только половина пучка?



4. Точечный заряд $q = -70$ нКл расположен между обкладками плоского конденсатора в точке 1 вблизи положительно заряженной пластины (рисунок).

Заряд перемещают из точки 1 в точку 3, расположенную вблизи другой пластины, по ломаной 1–2–3. Определите минимальную работу, которую необходимо совершить при таком перемещении. Емкость конденсатора $C = 0,1$ нФ, его заряд $Q = 500$ мкКл.



5. В вершинах правильного шестиугольника со стороной 10 см расположены равные по модулю заряды (рисунок). Напряженность поля в центре шестиугольника 1000 В/м. Определите потенциал поля в центре фигуры.

6. Плотность объемного заряда диэлектрического цилиндра с проницаемостью вещества ϵ радиусом R зависит от расстояния r до оси цилиндра по закону $\rho = \rho_0 \left(1 - \frac{r}{R}\right)$. Определите зависимость напряженности электрического поля от r внутри и вне цилиндра и максимальное значение напряженности.

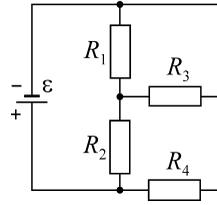
7. Три одинаковых плоских конденсатора соединены последовательно. Емкость C такой батареи конденсаторов равна 89 пФ. Площадь S каждой пластины равна 100 см². Диэлектрик – стекло ($\epsilon = 7$). Какова толщина d стекла?

8. Плоский конденсатор заряжен до разности потенциалов $U = 1$ кВ. Расстояние d между пластинами равно 1 см. Диэлектрик – стекло ($\epsilon = 7$). Определите объемную плотность энергии поля конденсатора.

9. Плоский конденсатор с пластинами квадратной формы размерами 21×21 см и расстоянием между пластинами 2 мм присоединен к полюсам источника напряжением $U = 750$ В. В пространство между пластинами с постоянной скоростью $v = 8$ см/с вдвигают стеклянную пластинку ($\epsilon = 7$) толщиной 2 мм. Какой ток пойдет при этом по цепи?

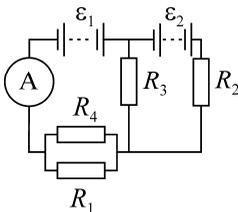
10. Сколько витков проволоки следует вплотную намотать на фарфоровую трубку радиусом 10 см, чтобы изготовить реостат сопротивлением 50 Ом? Удельное сопротивление проволоки $5 \cdot 10^{-6}$ Ом · м, ее диаметр 2 мм.

11. Найдите полное сопротивление электрической цепи (рисунок), если внутреннее сопротивление источника 1 Ом, а $R_1 = 4$ Ом, $R_2 = 3$ Ом, $R_3 = 12$ Ом и $R_4 = 6$ Ом.



12. Какое напряжение приложено к отрезку медной проволоки диаметром $d = 0,8$ мм, если в ней содержится $N = 10^{25}$ свободных электронов, имеющих среднюю скорость направленного движения $\langle v \rangle = 3,14$ мм/с? Удельное сопротивление меди $\rho = 1,7 \cdot 10^{-8}$ Ом · м.

13. Две батареи соединили последовательно и замкнули на сопротивление $R = 4$ Ом. При этом ток в цепи оказался равным $I_1 = 1,83$ А. Затем одни из источников перевернули, включив навстречу другому источнику. Ток в цепи стал равным $I_2 = 0,34$ А. Найдите ЭДС и внутренние сопротивления батарей, если при замыкании каждой из них на сопротивление R через него идут токи $I_3 = 1$ А и $I_4 = 1,3$ А соответственно.



14. Батареи имеют ЭДС $\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = 100$ В, сопротивления $R_1 = 20$ Ом, $R_2 = 20$ Ом, $R_3 = 40$ Ом, $R_4 = 30$ Ом (рисунок). Найдите показание амперметра.

15. N источников тока с одинаковыми ЭДС соединены последовательно. Внутреннее сопротивление одного из них в 10 раз больше каждого из остальных, внутренние сопротивления которых одинаковы и равны r . При каком внешнем сопротивлении полезная мощность не изменится при отключении источника тока с большим сопротивлением?

Модуль 4. Электростатика.

Постоянный электрический ток

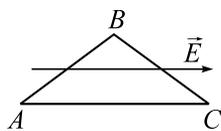
Вариант 24

1. Если расстояние между двумя зарядами уменьшается на 50 см, то сила взаимодействия увеличивается в два раза. Найдите исходное расстояние.

2. Имеются два разноименных точечных заряда, причем величина положительного в 2,25 раза больше величины отрицательного. Во сколько раз расстояние между зарядами меньше, чем расстояние от отрицательного заряда до той точки, где напряженность поля равна нулю?

3. Частица с зарядом $5 \cdot 10^{-10}$ Кл влетает в пространство между обкладками конденсатора. Скорость частицы при вылете из пластин остается прежней. При какой разности потенциалов, приложенной к пластинам, это возможно? Масса частицы 10^{-10} кг, расстояние между пластинами 1 см.

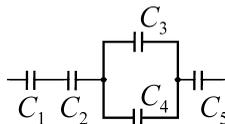
4. На сколько изменится кинетическая энергия заряда $q_1 = 1$ нКл при его движении под действием поля точечного заряда $q_2 = 1$ мкКл из точки, удаленной на 3 см от этого заряда, в точку, отстоящую на 10 см от него? Начальная скорость заряда q_1 равна нулю.



5. Точки A , B и C – вершины равнобедренного треугольника – расположены в области однородного электрического поля (рисунок), длины сторон треугольника $AB = BC = 5$ см, $AC = 8$ см. Напряженность поля 500 В/м. Определите разности потенциалов между точками A и B , B и C , A и C .

6. Бесконечная диэлектрическая пластина ($\epsilon = 5$) толщиной $h = 1$ см заряжена равномерно по объему с плотностью $\rho = 0,1$ нКл/см³. Определите разность потенциалов между некоторой точкой A из срединного слоя пластины и точкой B , принадлежащей одной из граней пластины.

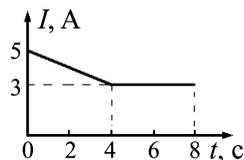
7. Определите емкость батареи конденсаторов, изображенной на рисунке. Емкость каждого конденсатора $C_0 = 1$ мкФ.



8. Плоский воздушный конденсатор с площадью пластины, равной 500 см², подключен к источнику тока, ЭДС которого равна 300 В. Определите работу A внешних сил по раздвижению пластин от расстоя-

ния $d_1 = 1$ см до расстояния $d_2 = 3$ см, если пластины перед раздвижением отключаются от источника тока.

9. Какова величина заряда, прошедшего через поперечное сечение проводника за время от $t_1 = 0$ с до $t_2 = 8$ с, если сила тока изменяется со временем так, как показано на рисунке?

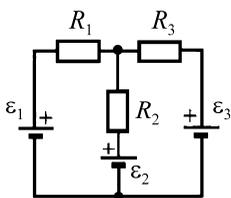


10. До какой температуры нагревался электромагнит во время работы, если известно, что его обмотка из медного провода ($\alpha = 4,2 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$) при температуре 20°C имеет сопротивление $50,2$ Ом, а во время работы оно повышается до $61,4$ Ом?

11. Два проводника, соединенные последовательно, имеют сопротивление в $6,25$ раза больше, чем при их параллельном соединении. Определите, во сколько раз сопротивление одного проводника больше сопротивления другого.

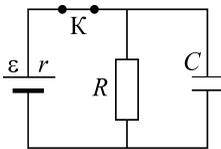
12. В медном проводнике длиной $l = 2$ м и площадью поперечного сечения, равной $0,4 \text{ мм}^2$, идет ток. При этом каждую секунду выделяется количество теплоты $Q = 0,35$ Дж. Сколько электронов N проходит за 1 с через поперечное сечение этого проводника?

13. Есть две батареи: одна составлена из нескольких одинаковых гальванических элементов, соединенных параллельно, другая – из того же числа таких же элементов, соединенных последовательно. На какие одинаковые сопротивления R нужно замкнуть каждую из батарей, чтобы токи через эти сопротивления были равны? Внутреннее сопротивление каждого элемента равно r . Сопротивлением подводящих проводов пренебречь.



14. Батареи имеют ЭДС $\varepsilon_1 = 2$ В и $\varepsilon_2 = 4$ В, $\varepsilon_3 = 6$ В, сопротивления $R_1 = 4$ Ом, $R_2 = 6$ Ом, $R_3 = 8$ Ом (рисунок). Найдите токи во всех участках цепи.

15. В электрической схеме, показанной на рисунке, ключ K замкнут. ЭДС бата-



R .

режки $\varepsilon = 24$ В, ее внутреннее сопротивление $r = 5$ Ом, заряд конденсатора 2 мкКл. После размыкания ключа в результате разряда конденсатора на резисторе выделяется 20 мкДж теплоты. Найдите сопротивление резистора

Модуль 4. Электростатика.

Постоянный электрический ток

Вариант 25

1. Четыре заряда по 10 нКл расположены в вершинах квадрата со стороной 10 см. Найдите силу, действующую со стороны трех зарядов на четвертый.

2. Расстояние между двумя положительными точечными зарядами 8 см. На расстоянии 6 см от первого заряда на прямой, соединяющей заряды, напряженность поля равна нулю. Найдите отношение величины первого заряда к величине второго.

3. В плоский конденсатор длиной $l = 5$ см влетает электрон под углом 15° к пластинам. Определите разность потенциалов между пластинами конденсатора, при которой электрон на выходе из него будет двигаться параллельно пластинам. Расстояние между пластинами $d = 1$ см, начальная энергия электрона 1500 эВ.

4. Электрон вылетает из точки, потенциал которой 600 В, со скоростью $1,2 \cdot 10^7$ м/с в направлении линий напряженности электрического поля. Определите потенциал точки поля, в которой скорость электрона будет равна нулю.

5. На каком расстоянии друг от друга будут находиться эквипотенциальные поверхности, проведенные через 1 В вблизи большой однородно заряженной плоскости с поверхностной плотностью заряда $0,55$ мкКл/м²?

6. Пространство между двумя концентрическими сферами, радиусы которых R_1 и R_2 ($R_2 > R_1$), заряжено с объемной плотностью

стью $\rho = \beta/r^2$, где β – постоянная величина. Найдите напряженность электростатического поля в пространстве между сферами.

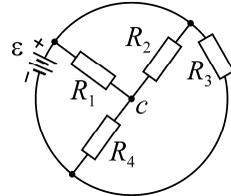
7. Емкость батареи конденсаторов, образованной двумя последовательно соединенными конденсаторами, $C = 100$ пФ, а заряд $Q = 20$ нКл. Определите емкость второго конденсатора, а также разность потенциалов на обкладках второго конденсатора, если $C_1 = 200$ пФ.

8. Конденсатор электроемкостью $C_1 = 3$ мкФ был заряжен до разности потенциалов $U_1 = 40$ В. После отключения от источника тока конденсатор был соединен параллельно с другим незаряженным конденсатором электроемкостью $C_2 = 5$ мкФ. Определите энергию ΔW , израсходованную на образование искры в момент присоединения второго конденсатора.

9. В двухэлектродной лампе с плоскими электродами напряжение составляет 22 кВ. Электроны ударяют об анод с силой 1 мкН. Какой силы ток течет через лампу?

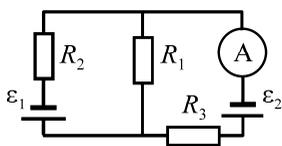
10. Чему равно сопротивление алюминиевого провода ($\rho = 26$ нОм·м) диаметром 2 мм, если масса его равна 10 кг?

11. Найдите силу тока, получаемую от батареи с ЭДС 6 В, если сопротивления равны $R_1 = 2$ Ом, $R_2 = 6$ Ом, $R_3 = 3$ Ом и $R_4 = 1,5$ Ом (рисунок). Внутренним сопротивлением батареи пренебречь.



12. Определите сопротивление стального ($\rho = 10^{-7}$ Ом·м) проводника сечением 5 мм^2 , если к нему приложено напряжение 64 В. Средняя скорость упорядоченного движения электронов в проводнике $2 \cdot 10^{-4}$ м/с, а их концентрация $4 \cdot 10^{28} \text{ м}^{-3}$.

13. Два последовательно соединенных вольтметра подсоединены к источнику тока с некоторым внутренним сопротивлением. Показания вольтметров равны 12 и 4 В. Если подключить к источнику только первый вольтметр, то он покажет 15 В. Чему равна ЭДС источника?



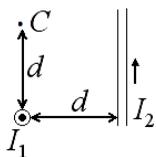
14. Батареи имеют ЭДС $\varepsilon_1 = 2$ В и $\varepsilon_2 = 1$ В, сопротивления $R_1 = 1$ кОм, $R_2 = 0,5$ кОм, $R_3 = 0,2$ кОм, сопротивление амперметра $R_A = 0,2$ кОм (рисунок). Найдите показание амперметра.

15. В проводнике за время $t = 10$ с при равномерном нарастании силы тока от $I_1 = 1$ А до $I_2 = 2$ А выделилось количество теплоты $Q = 5$ кДж. Найдите сопротивление проводника.

Модуль 5. МАГНИТНОЕ ПОЛЕ. ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ КОЛЕБАНИЯ И ВОЛНЫ

Модуль 5. Магнитное поле. Электромагнитные колебания и волны

Вариант 1



1. Два бесконечно длинных провода скрещены под прямым углом. Расстояние между ними $d = 20$ см (рисунок). По проводам текут токи $I_1 = 30$ А и $I_2 = 40$ А. Определите магнитную индукцию в точке С, одинаково удаленной от обоих проводников.

2. Квадратная проволочная рамка расположена в одной плоскости с длинным прямым проводом так, что ее стороны параллельны проводу. По рамке и проводу текут одинаковые токи силой 100 А. Определите силу, действующую на рамку, если ближайшая к проводу сторона рамки находится от него на расстоянии, равном ее длине.

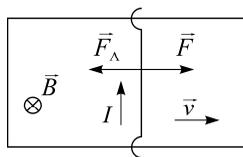
3. Альфа-частица прошла ускоряющую разность потенциалов $U = 104$ В и влетела в скрещенные под прямым углом электрическое ($E = 10$ кВ/м) и магнитное ($B = 0,1$ Тл) поля. Найдите отношение заряда q α -частицы к ее массе m , если, двигаясь перпендикулярно обоим полям, частица не испытывает отклонений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

4. Прямоугольный контур площадью 150 см^2 с током силой 4 А находится в магнитном поле с индукцией $B = 0,1 \text{ Тл}$ и занимает положение устойчивого равновесия. Какую надо совершить работу, чтобы медленно повернуть его на 90° вокруг оси, проходящей через середины противоположных сторон?

5. Определите циркуляцию вектора магнитной индукции по окружности, через центр которой перпендикулярно ее плоскости проходит бесконечно длинный прямой провод, по которому течет ток $I = 5 \text{ А}$.

6. В железном сердечнике соленоида индукция $B = 1,3 \text{ Тл}$. Железный сердечник заменили стальным. Определите, во сколько раз следует изменить силу тока в обмотке соленоида, чтобы индукция в сердечнике осталась неизменной.

7. По П-образной рамке, помещенной в однородное магнитное поле, перпендикулярное плоскости рамки, движется без трения с постоянной скоростью 2 м/с перемычка, сопротивление которой 2 Ом (рисунок). К перемычке приложена сила 4 Н . Найдите силу тока в перемычке. Сопротивлением рамки пренебречь. Силу тяжести не учитывать.



8. Соленоид диаметром 10 см и длиной 60 см имеет 1000 витков. Сила тока в нем равномерно возрастает на $0,2 \text{ А}$ за 1 с . На соленоид надето кольцо из медной проволоки, имеющей площадь поперечного сечения 2 мм^2 . Найдите силу индукционного тока, возникающего в кольце.

9. Соленоид длиной 50 см и диаметром $0,8 \text{ см}$ имеет $20\,000$ витков медного провода ($\rho = 17 \text{ нОм} \cdot \text{м}$) сечением 1 мм^2 и находится под постоянным напряжением. Определите время, в течение которого в обмотке соленоида выделится количество теплоты, равное энергии в соленоиде.

10. Конденсатор емкостью $C = 2 \text{ мкФ}$, заряженный до разности потенциалов $U = 2 \cdot 10^3 \text{ В}$, разряжается через катушку индуктивностью $L = 100 \text{ мГн}$. Каково максимальное значение силы

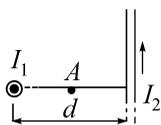
тока в катушке? В какой момент времени после начала разряда достигается максимальное значение тока?

11. Радиостанция настроена на частоту 102,7 МГц. Определите длину волны, на которой работает радиостанция.

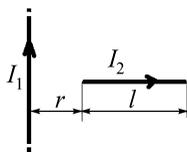
Модуль 5. Магнитное поле.

Электромагнитные колебания и волны

Вариант 2



1. Два бесконечно длинных прямых провода скрещены под прямым углом. По проводам текут токи $I_1 = 80$ А и $I_2 = 60$ А. Расстояние d между проводами равно 10 см (рисунок). Определите магнитную индукцию в точке A , одинаково удаленной от обоих проводников.

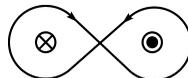


2. Металлический стержень длиной $l = 15$ см расположен перпендикулярно бесконечно длинному прямому проводу, по которому течет ток $I_1 = 2$ А (рисунок). Найдите силу, действующую на стержень со стороны магнитного поля, создаваемого проводом, если по стержню течет ток $I_2 = 0,5$ А, а расстояние от провода до ближайшего конца стержня $r = 5$ см.

3. Магнитное ($B = 2$ мТл) и электрическое ($E = 1,6$ кВ/м) поля сонаправлены. Перпендикулярно векторам \vec{B} и \vec{E} влетает электрон со скоростью $v = 0,8$ Мм/с. Определите ускорение электрона.

4. Магнитный момент витка равен 0,2 Дж/Тл. Определите силу тока в витке, если его диаметр $d = 10$ см.

5. Определите циркуляцию вектора магнитной индукции для замкнутого контура, изображенного на рисунке, если сила тока в обоих проводниках $I = 2$ А.



6. Чугунное кольцо имеет воздушный зазор длиной $l_0 = 5$ мм. Длина l средней линии кольца равна 1 м. Сколько витков содер-

340

жит обмотка на кольце, если при силе тока $I = 4$ А индукция магнитного поля в зазоре равна 0,5 Тл?

7. Квадратную рамку со стороной $a = 3$ м поместили в однородное магнитное поле с индукцией $B = 1$ Тл перпендикулярно линиям индукции. Затем, не вынимая проволоку из поля и не изменяя ее ориентации, деформировали ее в прямоугольник с отношением сторон 1:2. Какой заряд прошел при этом по ее контуру? Сопротивление рамки $R = 1$ Ом.

8. Сколько витков проволоки диаметром $d = 0,6$ см имеет однослойная обмотка катушки, индуктивность которой $L = 1$ мГн и диаметр $D = 4$ см? Витки плотно прилегают друг к другу.

9. Соленоид без сердечника с однослойной обмоткой из проволоки диаметром $d = 0,5$ мм имеет длину $l = 0,4$ м и поперечное сечение $S = 50$ см². Какой ток течет по обмотке при напряжении $U = 10$ В, если за время $t = 0,5$ мс в обмотке выделяется количество теплоты, равное энергии поля внутри соленоида? Поле считайте однородным.

10. Определите длину волны, на которую настроен колебательный контур Томсона, если максимальный ток в контуре $I_{\max} = 1$ А, а максимальный заряд конденсатора $q_{\max} = 2 \cdot 10^{-8}$ Кл. Какова емкость конденсатора, если индуктивность контура $L = 20$ мкГн?

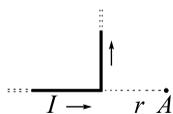
11. Электромагнитная волна частотой $\nu = 3$ МГц переходит из вакуума в диэлектрик проницаемостью $\epsilon = 4$. Насколько изменится длина волны?

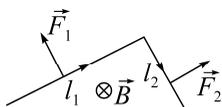
Модуль 5. Магнитное поле.

Электромагнитные колебания и волны

Вариант 3

1. Бесконечно длинный провод согнут под прямым углом. По проводу течет ток $I = 20$ А (рисунок). Какова магнитная индукция в точке А, если $r = 5$ см?



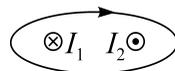


2. Проводник длиной 140 см согнули под прямым углом так, что одна из сторон угла равна 60 см, и поместили в однородное магнитное поле с индукцией 2 мТл обеими сторонами перпендикулярно линиям индукции. Какая сила будет действовать на этот проводник, если по нему пропустить ток силой 10 А?

3. Протон с кинетической энергией $W = 1$ МэВ влетел в однородное магнитное поле перпендикулярно линиям индукции ($B = 1$ Тл). Какова должна быть минимальная протяженность поля в направлении, по которому летел протон, когда он находился вне поля, чтобы оно изменило направление движения протона на противоположное?

4. Очень короткая катушка содержит $N = 1000$ витков тонкого провода. Катушка имеет квадратное сечение со стороной $a = 10$ см. Найдите магнитный момент катушки при силе тока $I = 1$ А.

5. Определите циркуляцию вектора магнитной индукции для замкнутого контура, изображенного на рисунке, если сила тока в проводниках $I_1 = 2$ А, $I_2 = 5$ А.



6. Соленоид намотан на чугунное кольцо сечением $S = 5$ см². При силе тока $I = 1$ А магнитный поток $\Phi = 250$ мкВб. Определите число n витков соленоида, приходящихся на отрезок длиной 1 см средней линии кольца.

7. В однородном магнитном поле с индукцией 0,2 Тл расположен проволочный виток так, что его плоскость перпендикулярна линиям магнитной индукции. Виток замкнут на гальванометр. При повороте витка на некоторый угол заряд, прошедший через гальванометр, равен 0,08 Кл. На какой угол повернули виток, если его площадь $4 \cdot 10^3$ см², а сопротивление витка вместе с гальванометром равно 1,5 Ом?

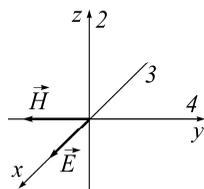
8. Катушка с железным сердечником имеет площадь поперечного сечения $S = 20$ см² и число витков $N = 500$. Индуктив-

ность катушки с сердечником $L = 0,28$ Гн при токе через обмотку $I = 5$ А. Найдите магнитную проницаемость μ железного сердечника.

9. Соленоид длиной 50 см и площадью поперечного сечения 2 см^2 имеет индуктивность $0,2$ мкГн. При каком токе объемная плотность энергии магнитного поля внутри соленоида $w_M = 1$ мДж/м³?

10. Входной контур радиоприемника состоит из катушки с индуктивностью $L = 2$ мГн и плоского конденсатора с площадью пластин $S = 10 \text{ см}^2$ и расстоянием между ними $d = 2$ мм. Пространство между пластинами заполнено слюдой с диэлектрической проницаемостью $\epsilon = 7,5$. На какую длину волны настроен радиоприемник?

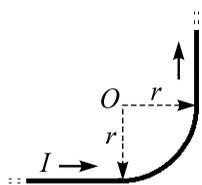
11. На рисунке показана ориентация векторов напряженности электрического и магнитного полей в электромагнитной волне. Как направлен вектор плотности потока энергии электромагнитного поля?



Модуль 5. Магнитное поле.

Электромагнитные колебания и волны

Вариант 4



1. По бесконечно длинному прямому проводу, изогнутому так, как показано на рисунке, течет ток $I = 100$ А. Определите магнитную индукцию в точке O , если $r = 10$ см.

2. По двум тонким проводам, изогнутым в виде кольца радиусом $R = 10$ см, текут одинаковые токи $I = 10$ А в каждом. Найдите силу взаимодействия этих колец, если плоскости, в которых лежат кольца, параллельны, а расстояние d между центрами колец равно 1 мм.

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

4. Плоская рамка, состоящая из $n = 50$ витков тонкой проволоки, подвешена на ленточке между полюсами электромагнита. При силе тока в рамке $I = 1$ А рамка повернулась на угол $\alpha_1 = 15^\circ$. Определите модуль вектора индукции магнитного поля в том месте, где находится рамка, если известно, что при закручивании ленточки на угол $\varphi_0 = 1^\circ$ возникает момент сил упругости $M_0 = 9,8 \cdot 10^{-6}$ Н · м. При отсутствии тока плоскость рамки составляла с направлением поля угол $\alpha_0 = 30^\circ$, площадь рамки $S = 10$ см².

5. По прямому бесконечно длинному проводнику течет ток $I = 10$ А. Определите, пользуясь теоремой о циркуляции вектора B , магнитную индукцию в точке, расположенной на расстоянии $r = 10$ см от проводника.

6. Замкнутый соленоид (тороид) со стальным сердечником имеет $n = 10$ витков на каждый сантиметр длины. По соленоиду течет ток $I = 2$ А. Вычислить магнитный поток Φ в сердечнике, если его сечение $S = 4$ см².

7. В однородном магнитном поле с индукцией $B = 6 \cdot 10^{-2}$ Тл находится соленоид диаметром $d = 8$ см, имеющий $N = 80$ витков проволоки. Соленоид поворачивают на угол $\alpha = 180^\circ$ за время $\Delta t = 0,2$ с так, что его ось остается направленной вдоль линий индукции поля. Определите среднее значение ЭДС, возникающей в соленоиде.

8. Площадь поперечного сечения соленоида с железным сердечником $S = 10$ см², длина соленоида $l = 1$ м. Найдите магнитную проницаемость μ материала сердечника, если магнитный поток, пронизывающий поперечное сечение соленоида, $\Phi = 1,4$ мВб. Какому току I соответствует этот магнитный поток, если индуктивность соленоида при этих условиях $L = 0,44$ Гн?

9. Сила тока в обмотке соленоида, содержащего 1500 витков, равна 5 А. Магнитный поток через поперечное сечение соленоида составляет 200 мкВб. Определите энергию магнитного поля в соленоиде.

10. Колебательный контур состоит из двух соединенных последовательно одинаковых конденсаторов емкостями $C_1 = C_2 = 4$ мкФ и катушки индуктивностью $L = 0,2$ мГн. Определите период свободных колебаний в контуре и максимальное напряжение на каждом конденсаторе. Максимальный ток в цепи $I_{\max} = 0,1$ А.

11. В вакууме распространяется плоская электромагнитная волна. Поверхность площадью 50 см^2 перпендикулярна скорости волны. За 2 с через поверхность переносится энергия 10 мкДж. Найдите интенсивность волны.

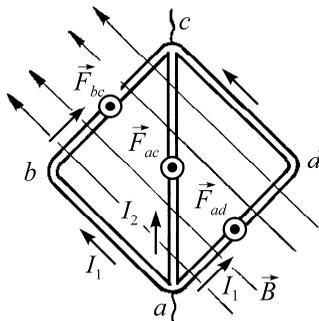
Модуль 5. Магнитное поле.

Электромагнитные колебания и волны

Вариант 5

1. Бесконечно длинный прямой провод согнут под прямым углом. По проводу течет ток $I = 100$ А. Вычислите магнитную индукцию в точках, лежащих на биссектрисе угла и удаленных от вершины угла на 10 см.

2. Контур в виде квадрата с диагональю, изготовленный из медной проволоки ($\rho = 17$ нОм · м) сечением $S = 1 \text{ мм}^2$, подключен к источнику постоянного напряжения $U = 110$ В (рисунок). Плоскость квадрата расположена параллельно линиям индукции магнитного поля; $B = 1,7 \cdot 10^{-2}$ Тл. Определите модуль и направление силы, действующей на контур со стороны поля.



3. Два однозарядных иона, пройдя одинаковую ускоряющую разность потенциалов, влетели в однородное магнитное поле перпендикулярно линиям индукции. Один ион массы $m_1 = 12$ а.е.м. описал дугу окружности радиусом $R_1 = 4$ см. Определите массу m_2 другого иона, описавшего дугу окружности радиусом $R_2 = 6$ см.

4. Из проволоки длиной $l = 20$ см сделаны квадратный и круговой контуры и помещены в однородное магнитное поле с индукцией $B = 0,1$ Тл. Найдите вращающие моменты, действующие на каждый контур, если по ним течет ток силой 2 А. Плоскости контуров составляет угол $\alpha = 45^\circ$ с направлением \vec{B} .

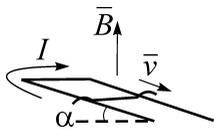
5. Соленоид длиной $l = 0,5$ м содержит $N = 1000$ витков. Определите, пользуясь теоремой о циркуляции вектора \vec{B} , магнитную индукцию поля внутри соленоида, если сопротивление его обмотки $R = 120$ Ом, а напряжение на ее концах $U = 60$ В.

6. На железное кольцо намотано в один слой $N = 500$ витков провода. Средний диаметр d кольца равен 25 см. Определите магнитную индукцию B в железе и магнитную проницаемость железа, если сила тока в обмотке 2,5 А.

7. По П-образной рамке, наклоненной под углом $\alpha = 30^\circ$ к горизонту и помещенной в однородное вертикальное магнитное поле, начинает соскальзывать без трения перемычка массой 30 г. Длина перемычки 10 см, ее сопротивление 1 мОм, индукция поля 0,1 Тл. Найдите установившуюся скорость движения перемычки. Сопротивлением рамки пренебречь.

8. Обмотка соленоида состоит из N витков медной проволоки, поперечное сечение которой $S = 1$ мм². Длина соленоида $L = 25$ см, сопротивление его $R = 0,2$ Ом. Найдите индуктивность соленоида.

9. Тороид с воздушным сердечником содержит 20 витков на 1 см. Определите объемную плотность энергии в тороиде, если по его обмотке протекает ток 3 А.



10. Колебательный контур содержит конденсатор емкостью $C = 8$ пФ и катушку индуктивностью $L = 0,5$ мГн. Каково максимальное напряжение U_{\max} на обкладках конденсатора, если максимальная сила тока $I_{\max} = 40$ мА?

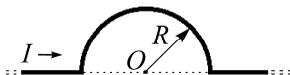
11. В вакууме распространяется плоская электромагнитная волна, у которой амплитуда электрической составляющей $E_m = 50$ мВ/м. Чему равно среднее за период колебания значение плотности потока энергии?

Модуль 5. Магнитное поле.

Электромагнитные колебания и волны

Вариант 6

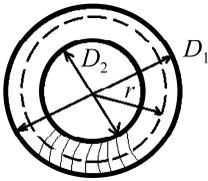
1. Бесконечно длинный прямой провод с током $I = 50$ А имеет изгиб (плоскую петлю) радиусом $R = 10$ см (рисунок). Определите в точке O магнитную индукцию поля, создаваемого этим током.



2. Провод в виде тонкого полукольца радиусом $R = 10$ см находится в однородном магнитном поле ($B = 50$ мТл). По нему течет ток $I = 10$ А. Найдите силу, действующую на провод, если плоскость полукольца перпендикулярна линиям магнитной индукции, а подводящие провода находятся вне поля.

3. Заряженная частица движется по окружности радиусом $R = 1$ см в однородном магнитном поле с индукцией $B = 0,1$ Тл. Параллельно магнитному полю возбуждено электрическое поле напряженностью $E = 100$ В/м. Вычислите промежуток времени Δt , в течение которого должно действовать электрическое поле для того, чтобы кинетическая энергия частицы возросла вдвое.

4. Тонкое кольцо массой 10 г и радиусом $R = 8$ см несет заряд, равномерно распределенный с линейной плотностью $\tau = 10$ нКл/м. Кольцо равномерно вращается с частотой $\nu = 15$ с⁻¹ относительно оси, перпендикулярной плоскости кольца и проходящей через ее центр. Определите магнитный момент кругового тока, создаваемого кольцом.



5. Определите, пользуясь теоремой о циркуляции вектора \vec{B} , индукцию и напряженность магнитного поля на оси тороида без сердечника, по обмотке которого, содержащей 200 витков, протекает ток 2 А. Внешний диаметр тороида равен 60 см, внутренний – 40 см.

6. Железный сердечник находится в однородном магнитном поле напряженностью $H = 1$ кА/м. Определите, пользуясь графиком зависимости $B = f(H)$, индукцию магнитного поля в сердечнике и магнитную проницаемость железа.

7. Квадратная рамка из медной проволоки сечением 1 мм^2 помещена в магнитное поле, индукция которого меняется по закону $B = B_0 \sin \omega t$, где $B_0 = 0,01$ Тл, $\omega = 2\pi/T$ и $T = 0,02$ с. Площадь рамки 25 см^2 . Плоскость рамки перпендикулярна направлению магнитного поля. Найдите зависимость от времени и наибольшее значение: 1) магнитного потока, пронизывающего рамку; 2) ЭДС индукции, возникшей в рамке; 3) силы тока, текущего по рамке.

8. Определите, через сколько времени сила тока замыкания достигнет 0,95 предельного значения, если источник тока замыкают на катушку сопротивлением $R = 12$ Ом и индуктивностью $L = 0,5$ Гн.

9. По обмотке длинного соленоида со стальным сердечником течет ток $I = 2$ А. Определите объемную плотность энергии магнитного поля в сердечнике, если число витков на единицу длины соленоида $n = 7 \text{ см}^{-1}$.

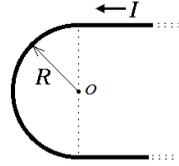
10. Катушка индуктивностью $L = 1$ мГн и воздушный конденсатор, состоящий из двух круглых пластин диаметром $D = 20$ см каждая, соединены параллельно. Расстояние d между пластинами равно 1 см. Определите период колебаний T .

11. В вакууме распространяется плоская электромагнитная волна, у которой амплитуда магнитной составляющей $H_m = 0,1$ мА/м. Определите среднее за период колебания значение плотности потока энергии.

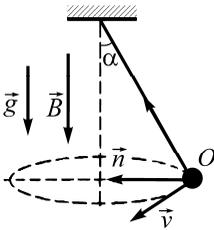
Модуль 5. Магнитное поле.
Электромагнитные колебания и волны

Вариант 7

1. Бесконечно длинный прямой провод с током $I = 50$ А имеет изгиб (плоскую петлю) радиусом $R = 10$ см (рисунок). Определите в точке O магнитную индукцию поля, создаваемого этим током.



2. По прямому горизонтально расположенному проводу пропускают ток $I_1 = 10$ А. Под ним на расстоянии $R = 1,5$ см находится параллельный ему алюминиевый провод, по которому пропускают ток $I_2 = 1,5$ А. Определите, какой должна быть площадь поперечного сечения алюминиевого провода ($\rho_a = 2,7$ г/см³), чтобы он удерживался незакрепленным.



3. Шарик массой $m = 10$ г и зарядом $q = 10^{-6}$ Кл вращается в горизонтальной плоскости на невесомой диэлектрической нити длиной $l = 50$ см. В пространстве создано однородное магнитное поле с индукцией $B = 0,1$ Тл, силовые линии которого направлены вдоль силы тяжести вниз (рисунок).

При движении нить образует с вертикалью угол $\alpha = 30^\circ$. Найдите период обращения шарика.

4. В однородном магнитном поле с магнитной индукцией $B = 0,2$ Тл находится квадратный проводящий контур со стороной $l = 20$ см и током $I = 10$ А. Плоскость квадрата составляет с направлением поля угол в 30° . Определите работу удаления контура за пределы поля.

5. По сечению проводника равномерно распределен ток плотностью $j = 2$ МА/м². Найдите циркуляцию вектора напряженности вдоль окружности радиусом $R = 5$ мм, проходящей внутри проводника и ориентированной так, что ее плоскость составляет угол $\alpha = 30^\circ$ с вектором плотности тока.

6. Имеется соленоид с железным сердечником длиной 50 см, площадью поперечного сечения 10 см^2 и числом витков 1000. Найдите индуктивность этого соленоида, если по обмотке соленоида течет ток $I = 0,2 \text{ А}$.

7. В магнитном поле, индукция которого $0,5 \text{ Тл}$, вращается стержень длиной 1 м с постоянной угловой скоростью 20 рад/с . Ось вращения проходит через конец стержня и параллельна силовым линиям магнитного поля. Найдите ЭДС индукции, возникающую на концах стержня.

8. Трансформатор, понижающий напряжение с 220 до 12 В , содержит в первичной обмотке $N_1 = 2000$ витков. Сопротивление вторичной обмотки $R_2 = 0,15 \text{ Ом}$. Пренебрегая сопротивлением первичной обмотки, определите число витков во вторичной обмотке, если во внешнюю цепь (в сети пониженного напряжения) передают мощность $P = 20 \text{ Вт}$.

9. При индукции поля $B = 1 \text{ Тл}$ плотность энергии магнитного поля в железе равна 200 Дж/м^3 . Определите магнитную проницаемость μ железа в этих условиях.

10. Колебательный контур состоит из катушки индуктивностью $L = 0,1 \text{ Гн}$ и конденсатора емкостью $C = 39,5 \text{ мкФ}$. Заряд конденсатора $Q_m = 3 \text{ мкКл}$. Пренебрегая сопротивлением контура, запишите уравнение изменения силы тока в зависимости от времени.

11. В вакууме распространяется плоская электромагнитная волна, у которой амплитуда магнитной составляющей $H_m = 0,5 \text{ мА/м}$. Найдите интенсивность волны.

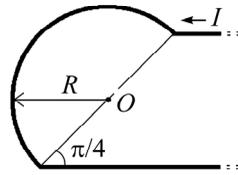
Модуль 5. Магнитное поле.

Электромагнитные колебания и волны

Вариант 8

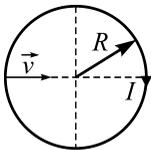
1. Бесконечно длинный прямой провод с током $I = 50 \text{ А}$ имеет изгиб (плоскую петлю) радиусом $R = 10 \text{ см}$ (рисунок).

Определите в точке O магнитную индукцию поля, создаваемого этим током.



2. Два бесконечных прямолинейных параллельных проводника с одинаковыми токами, текущими в одном направлении, находятся друг от друга на расстоянии R .

Чтобы их раздвинуть до расстояния $2R$, на каждый сантиметр длины проводника затрачивается работа $A = 138$ нДж. Определите силу тока в проводниках.



3. Электрон со скоростью v влетает в однородное магнитное поле с индукцией B , создаваемое длинным соленоидом радиусом R , перпендикулярно оси соленоида (рисунок). Какой угол с первоначальным направлением будет составлять скорость электрона после прохождения соленоида? Масса электрона m , его заряд $|e|$.

4. В однородном магнитном поле с магнитной индукцией $B = 1$ Тл находится плоская катушка из 100 витков радиусом $r = 10$ см, плоскость которой с направлением поля составляет угол $\beta = 60^\circ$. По катушке течет ток $I = 10$ А. Определите: 1) вращающий момент, действующий на катушку; 2) работу для удаления этой катушки из магнитного поля.

5. Вычислите циркуляцию вектора магнитной индукции вдоль контура, охватывающего токи $I_1 = 10$ А, $I_2 = 15$ А, текущие в одном направлении, и ток $I_3 = 20$ А, текущий в противоположном направлении.

6. Сколько ампер-витков потребуется для создания магнитного потока в $42 \cdot 10^{-5}$ Вб в соленоиде с железным сердечником длиной 120 см и площадью поперечного сечения 3 см²?

7. Скорость самолета равна 960 км/ч. Найдите ЭДС индукции, возникающую на концах крыльев самолета, если вертикальная составляющая напряженности магнитного поля Земли равна 25 А/м, размах крыльев – 12,5 м.

8. Определите индуктивность L соленоида из 1200 витков, площадь сечения которого равна 5 см^2 . Индукция B магнитного поля внутри соленоида при силе тока $I = 2 \text{ А}$ равна $0,01 \text{ Тл}$.

9. По обмотке тороида течет ток силой $I = 0,6 \text{ А}$. Витки провода диаметром $d = 0,4 \text{ мм}$ плотно прилегают друг к другу (толщиной изоляции пренебречь). Найдите энергию W магнитного поля в стальном сердечнике тороида, если площадь S его сечения равна 4 см^2 , диаметр D средней линии равен 30 см .

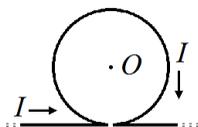
10. Энергия свободных незатухающих колебаний, происходящих в колебательном контуре, составляет $0,2 \text{ мДж}$. При медленном раздвижении пластин конденсатора частота колебаний увеличилась в 2 раза. Определите работу, совершенную против сил электрического поля.

11. Определите период колебаний в колебательном контуре, излучающем электромагнитные волны длиной 450 м .

Модуль 5. Магнитное поле.

Электромагнитные колебания и волны

Вариант 9

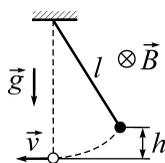


1. Бесконечно длинный прямой провод с током $I = 50 \text{ А}$ имеет изгиб (плоскую петлю) радиусом $R = 10 \text{ см}$ (рисунок). Определите в точке O магнитную индукцию поля, создаваемого этим током.

2. Тонкий провод в виде дуги, составляющей треть кольца радиусом $R = 15 \text{ см}$, находится в однородном магнитном поле ($B = 20 \text{ мТл}$). По проводу течет ток $I = 30 \text{ А}$. Плоскость, в которой лежит дуга, перпендикулярна линиям магнитной индукции, а подводящие провода находятся вне поля. Определите силу F , действующую на провод.

3. Шарик массой $m = 20 \text{ г}$ и зарядом $q = 10^{-6} \text{ Кл}$ подвешен на невесомой диэлектрической нити длиной $l = 50 \text{ см}$ и помещен в однородное магнитное поле с индукцией $B = 0,1 \text{ Тл}$, силовые

линии которого перпендикулярны силе тяжести (рисунок). Шарик отклонили от положения равновесия в плоскости, перпендикулярной вектору B , до высоты $h = 10$ см и отпустили. Найдите натяжение нити при прохождении шариком положения равновесия.



4. Круглая рамка с током ($S = 15$ см²) закреплена параллельно магнитному полю ($B = 0,1$ Тл), и на нее действует вращающий момент $M = 0,45$ мН · м. Определите силу тока, текущего по рамке.

5. По сплошному бесконечному цилиндрическому проводнику радиусом R течет ток плотности j . Определите и изобразите графически магнитную индукцию поля внутри и вне проводника.

6. В соленоид длиной 50 см вставлен сердечник из такого сорта железа, для которого зависимость $B = f(H)$ неизвестна. Число витков на единицу длины соленоида равно 400, площадь поперечного сечения соленоида 10 см². Найдите магнитную проницаемость сердечника при силе тока через обмотку 5 А, если известно, что при этих условиях магнитный поток, пронизывающий площадь поперечного сечения соленоида с сердечником, равен $1,6 \cdot 10^{-3}$ Вб.

7. Круговой проволочный виток площадью 100 см² находится в однородном магнитном поле, индукция которого 1 Тл. Плоскость витка перпендикулярна направлению магнитного поля. Чему равно значение ЭДС индукции, возникшей в витке при выключении поля в течение 0,01 с?

8. Обмотка соленоида с железным сердечником содержит $N = 500$ витков. Длина сердечника равна 50 см. Как и во сколько раз изменится индуктивность соленоида L , если сила тока, протекающего по обмотке, возрастет от $I_1 = 0,3$ А до $I_2 = 1$ А?

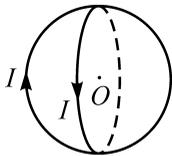
9. Индукция магнитного поля тороида со стальным сердечником возросла от $B_1 = 0,5$ Тл до $B_2 = 1$ Тл. Найдите, во сколько раз изменилась объемная плотность энергии магнитного поля.

10. Колебательный контур, состоящий из катушки индуктивности и воздушного конденсатора, настроен на длину волны 300 м. При этом расстояние между пластинами конденсатора 6,4 мм. Каким должно быть это расстояние, чтобы контур был настроен на длину волны 240 м?

11. Какую длину волны электромагнитных колебаний будет принимать радиоприемник, колебательный контур которого имеет конденсатор с емкостью 750 пФ и катушку с индуктивностью 1,34 мГн?

Модуль 5. Магнитное поле.
Электромагнитные колебания и волны

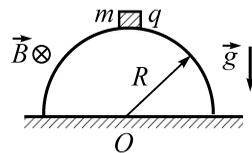
Вариант 10



1. По двум одинаковым круговым виткам радиусом 5 см, плоскости которых взаимно перпендикулярны, а центры совпадают, текут одинаковые токи $I = 2$ А (рисунок). Найдите индукцию магнитного поля в центре витков.

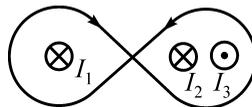
2. Проводник длиной 24 см и сопротивлением 36 Ом согнут в форме квадрата и помещен в однородное магнитное поле с индукцией 0,1 Тл, перпендикулярное плоскости квадрата. Какая результирующая сила будет действовать на проводник, если на две соседние вершины образованной фигуры подать напряжение 5,4 В?

3. Небольшое тело массой $m = 50$ г и зарядом $q = 10^{-7}$ Кл начинает соскальзывать без начальной скорости с вершины гладкой полусферы радиусом $R = 50$ см (рисунок). На какой высоте над центром полусферы тело оторвется от ее поверхности, если в пространстве создано однородное магнитное поле с индукцией $B = 0,1$ Тл? Магнитное поле направлено перпендикулярно плоскости, в которой происходит движение тела.



4. Напряженность H магнитного поля в центре кругового витка равна 200 А/м . Магнитный момент p_m витка равен $1 \text{ А}\cdot\text{м}^2$. Вычислите силу тока I в витке и радиус витка R .

5. Определите циркуляцию вектора магнитной индукции для замкнутого контура, изображенного на рисунке, если сила тока в проводниках $I_1 = 2 \text{ А}$, $I_2 = 4 \text{ А}$, $I_3 = 6 \text{ А}$.



6. Катушка длиной 20 см и диаметром 3 см имеет 400 витков. По катушке идет ток силой 2 А . Найдите: 1) индуктивность катушки; 2) поток магнитной индукции, пронизывающий площадь ее поперечного сечения.

7. В однородном магнитном поле, индукция которого равна $0,1 \text{ Тл}$, равномерно вращается катушка, состоящая из 100 витков проволоки. Катушка делает 5 об/с. Площадь поперечного сечения катушки 100 см^2 . Ось вращения перпендикулярна оси катушки и направлению магнитного поля. Найдите максимальную ЭДС индукции во вращающейся катушке.

8. Трансформатор, имеющий во вторичной обмотке в 24 раза меньше витков, чем в первичной, включен в сеть с напряжением 120 В . Вторичная обмотка подключена к амперметру, показывающему ток $0,5 \text{ А}$. Найдите сопротивление амперметра, если сопротивление вторичной обмотки 2 Ом , а КПД трансформатора 95% .

9. При некоторой силе тока плотность энергии магнитного поля соленоида (без сердечника) равна $0,2 \text{ Дж/м}^3$. Во сколько раз увеличится плотность энергии поля при той же силе тока, если соленоид будет иметь железный сердечник?

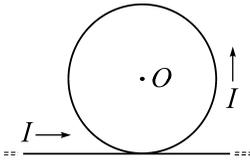
10. К конденсатору, заряд которого 250 пКл , подключили катушку индуктивности. Определите максимальную силу тока, протекающего через катушку, если циклическая частота свободных колебаний в контуре равна $8 \cdot 10^7 \text{ рад/с}$.

11. При изменении тока в катушке индуктивности на величину 1 А за время $0,6 \text{ с}$ в ней индуцируется ЭДС $0,2 \text{ мВ}$. Какую

длину будет иметь радиоволна, излучаемая генератором, колебательный контур которого состоит из этой катушки и конденсатора емкостью 14 нФ?

Модуль 5. Магнитное поле.
Электромагнитные колебания и волны

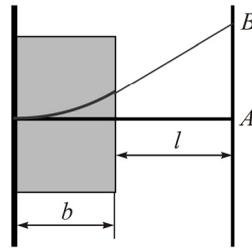
Вариант 11



1. Бесконечно длинный прямой провод с током $I = 50$ А имеет изгиб (плоскую петлю) радиусом $R = 10$ см (рисунок). Определите в точке O магнитную индукцию поля, создаваемого этим током.

2. На двух легких проводящих нитях горизонтально висит металлический стержень длиной 0,25 м и массой 15 г. Стержень находится в вертикальном однородном магнитном поле с индукцией 0,3 Тл, силовые линии которого направлены вертикально вниз. Определите угол отклонения нитей, если по стержню пропустить ток 0,2 А.

3. Пучок электронов, ускоренных разностью потенциалов $U = 300$ В, влетает в однородное магнитное поле, направленное от чертежа к нам (рисунок). Ширина поля $b = 2,5$ см. При отсутствии магнитного поля пучок электронов дает пятно в точке A флуоресцирующего экрана, расположенного на расстоянии $l = 5$ см от края полюсов магнита. При включении магнитного поля пятно смещается в точку B . Найдите смещение AB пучка электронов, если известно, что индукция магнитного поля $B = 14,6$ мкТл.



4. По кольцу радиусом R течет ток. На оси кольца на расстоянии $d = 1$ м от его плоскости магнитная индукция $B = 10$ нТл. Определите магнитный момент p_m кольца с током. Считать R намного меньшим d .

5. По сплошному бесконечному цилиндрическому проводнику радиусом $R = 5$ см течет ток плотностью $j = 2$ МА/м². Определите магнитную индукцию в точке, удаленной от оси проводника на $r = 3$ см.

6. Имеется соленоид с железным сердечником длиной 50 см, площадью поперечного сечения 10 см² и числом витков 1000. Найдите индуктивность этого соленоида, если по обмотке течет ток $I = 0,1$ А.

7. Алюминиевое кольцо ($\rho = 0,26 \cdot 10^{-7}$ Ом · м) расположено в однородном магнитном поле так, что его плоскость перпендикулярна вектору магнитной индукции поля. Диаметр кольца 25 см, толщина провода кольца 2 мм. Определите скорость изменения магнитной индукции поля со временем, если при этом в кольце возникает индукционный ток 12 А.

8. Соленоид содержит $N = 1000$ витков. Площадь сечения сердечника S равна 10 см². По обмотке течет ток, создающий поле с индукцией $B = 1,5$ Тл. Найдите среднюю ЭДС индукции, возникающей в соленоиде, если ток уменьшится до нуля за время $t = 500$ мкс.

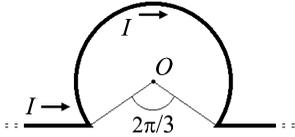
9. Определите объемную плотность энергии магнитного поля в стальном сердечнике, если индукция магнитного поля $B = 0,5$ Тл.

10. Заряженный конденсатор емкостью 2 мкФ подключен к катушке с индуктивностью 80 мГн. Через какое время от момента подключения энергия электрического поля станет равной энергии магнитного поля?

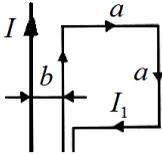
11. Радиосигнал, посланный на Луну, отразился и был принят на Земле через 2,5 с после посылки. Определите расстояния от Земли до Луны.

Модуль 5. Магнитное поле.
Электромагнитные колебания и волны

Вариант 12



1. Бесконечно длинный прямой провод с током $I = 50$ А имеет изгиб (плоскую петлю) радиусом $R = 10$ см (рисунок). Определите в точке O магнитную индукцию поля, создаваемого этим током.

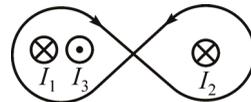


2. Контур из провода, изогнутого в форме квадрата со стороной $a = 0,5$ м, расположен в одной плоскости с бесконечным прямолинейным проводом с током $I = 5$ А так, что две его стороны параллельны проводу. Сила тока в контуре $I_1 = 1$ А. Определите силу, действующую на контур, если ближайшая к проводу сторона контура находится на расстоянии $b = 10$ см.

3. Электрон, обладая скоростью $v = 10$ Мм/с, влетел в однородное магнитное поле перпендикулярно линиям магнитной индукции. Индукция магнитного поля $B = 0,1$ мТл. Определите нормальное и тангенциальное ускорения электрона.

4. Электрон в атоме водорода движется вокруг ядра по окружности радиусом $r = 53$ пм. Вычислите магнитный момент p_m эквивалентного кругового тока и механический момент M , действующий на круговой ток, если атом помещен в магнитное поле, линии индукции которого параллельны плоскости орбиты электрона. Магнитная индукция поля $B = 0,1$ Тл.

5. Определите циркуляцию вектора магнитной индукции для замкнутого контура, изображенного на рисунке, если сила тока в проводниках $I_1 = 3$ А, $I_2 = 4$ А, $I_3 = 5$ А.



6. Площадь поперечного сечения соленоида с железным сердечником 10 см^2 . Найдите: 1) магнитную проницаемость материала сердечника при условии, когда магнитный поток, пронизывающий площадь поперечного сечения соленоида, равен $1,4 \cdot 10^{-3} \text{ Вб}$; 2) какой силе тока, текущего через соленоид, соответствует этот магнитный поток, если известно, что индуктивность соленоида равна $0,44 \text{ Гн}$? Длина соленоида 1 м .

7. Катушка диаметром 5 см помещена в однородное магнитное поле, параллельное ее оси. Индукция поля равномерно изменяется со скоростью $\Delta B/\Delta t = 0,01 \text{ Тл/с}$. Катушка содержит 1000 витков медной проволоки ($\rho = 1,75 \cdot 10^{-8} \text{ Ом} \cdot \text{м}$) сечением $0,2 \text{ мм}^2$. Концы катушки замкнуты накоротко. Определите тепловую мощность, выделяющуюся в катушке.

8. Индуктивность соленоида длиной $l = 1 \text{ м}$, намотанного в один слой на немагнитный каркас, равна $1,6 \text{ мГн}$. Площадь сечения соленоида равна 20 см^2 . Определите число n витков на каждом сантиметре длины соленоида.

9. На катушке с сопротивлением 10 Ом поддерживается напряжение 50 В . Чему равна энергия магнитного поля, запасенная в катушке, если ее индуктивность 20 мГн ?

10. Колебательный контур, состоящий из катушки индуктивности и конденсатора, настроен на длину волны 3 м . В момент, когда мгновенное значение силы тока в контуре 10 мА , мгновенное значение заряда на конденсаторе $2 \cdot 10^{-11} \text{ Кл}$. Определите максимальное значение тока в цепи.

11. Определите возможную дальность действия радиолокатора, если время развертки в электронно-лучевой трубке составляет 1000 мкс .

Модуль 5. Магнитное поле.

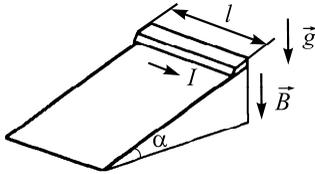
Электромагнитные колебания и волны

Вариант 13

1. По двум длинным параллельным проводам текут токи 20 и 30 А . Расстояние между ними 10 см . Вычислите магнитную

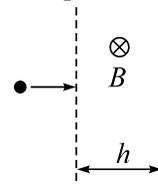
индукцию в точке, удаленной от обоих проводников на 10 см. Задачу решите для двух случаев: 1) токи текут в одном направлении; 2) токи текут в разных направлениях.

2. Металлический стержень массой $m = 0,5$ кг и длиной $l = 1$ м соскальзывает с наклонной плоскости, составляющей

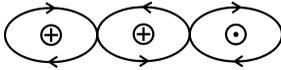


угол $\alpha = 30^\circ$ с горизонтом. В пространстве создано однородное магнитное поле с индукцией $B = 0,1$ Тл, силовые линии которого направлены вертикально вверх. Определите ускорение стержня, если по нему пропустить ток силой $I = 5$ А в направлении, показанном на рисунке. Коэффициент трения между стержнем и поверхностью наклонной плоскости $\mu = 0,2$.

3. Электрон влетает в плоский слой однородного магнитного поля. Минимальная величина начальной скорости, при которой электрон преодолевает слой, равна 10^7 м/с. Определите индукцию магнитного поля, если толщина слоя $h = 2$ см. Начальная скорость электрона перпендикулярна линиям индукции и слою (рисунок).



4. По тонкому стержню длиной $l = 20$ см равномерно распределен заряд $q = 240$ нКл. Стержень приведен во вращение с постоянной угловой скоростью $\omega = 10$ рад/с относительно оси, перпендикулярной стержню и проходящей через его середину. Определите магнитный момент p_m , обусловленный вращением заряженного стержня.



5. Определите циркуляцию вектора магнитной индукции для замкнутого контура, изображенного на рисунке, если сила тока во всех проводниках $I = 2$ А.

6. На железный стержень длиной 50 см и сечением 2 см^2 намотан в один слой провод так, что на каждый сантиметр длины стержня приходится 20 витков. Определите энергию магнитного поля в сердечнике соленоида, если сила тока в обмотке 0,5 А.

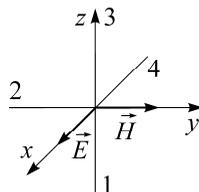
7. В проволочной рамке площадью 100 см^2 возбуждается ЭДС индукции с амплитудой $1,4 \text{ В}$. Число витков в рамке 200 . Рамка вращается с постоянной частотой в однородном магнитном поле, индукция которого $B = 0,15 \text{ Тл}$. В начальный момент времени плоскость рамки перпендикулярна вектору \vec{B} . Определите ЭДС индукции в рамке спустя $0,1 \text{ с}$.

8. Определите число витков соленоида, если при скорости изменения силы тока $0,02 \text{ А/с}$ между его концами возникает разность потенциалов 2 В . Площадь поперечного сечения соленоида 5 см^2 , его длина 40 см .

9. Обмотка тороида содержит $n = 10$ витков на каждый сантиметр длины. Сердечник немагнитный. При какой силе тока в обмотке плотность энергии магнитного поля равна 1 Дж/м^3 ?

10. В колебательном контуре зависимость напряжения на обкладках конденсатора от времени представлена уравнением $U = 10\cos(2000\pi t)$. Емкость конденсатора 26 мкФ . Найдите зависимость силы тока от времени.

11. На рисунке показана ориентация векторов напряженности электрического и магнитного полей в электромагнитной волне в заданный момент времени. Определите ориентацию вектора скорости.

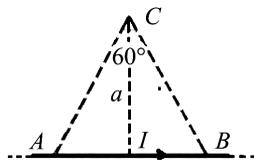


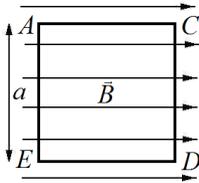
Модуль 5. Магнитное поле.

Электромагнитные колебания и волны

Вариант 14

1. Найдите индукцию магнитного поля, создаваемого отрезком AB прямолинейного проводника с током, в точке C , расположенной на перпендикуляре к середине этого отрезка на расстоянии $a = 5 \text{ см}$ от него. По проводнику течет ток $I = 20 \text{ А}$. Отрезок AB проводника виден из точки C под углом 60° .



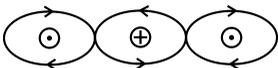


2. На горизонтальной поверхности стола лежит проводящая рамка из однородной тонкой проволоки, согнутая в виде квадрата $ACDE$ со стороной a (рисунок). Рамка находится в однородном горизонтальном магнитном поле, вектор индукции B которого перпендикулярен сторонам AE и CD и равен по модулю B . По рамке против часовой стрелки протекает ток I . При каком значении массы рамки она начнет поворачиваться вокруг стороны CD ?

3. Протон влетел перпендикулярно линиям индукции в однородное магнитное поле. В результате взаимодействия с веществом протон, находясь в поле, потерял половину своей первоначальной энергии. Во сколько раз будут отличаться радиусы кривизны траектории начала и конца пути?

4. Диск радиусом $R = 10$ см несет равномерно распределенный по поверхности заряд $q = 0,2$ мкКл. Диск вращается с частотой $\nu = 20$ с⁻¹ относительно оси, проходящей через его центр. Определите отношение магнитного момента к моменту импульса (p_m/L), если масса диска равна 100 г.

5. Определите циркуляцию вектора магнитной индукции для замкнутого контура, изображенного на рисунке, если сила тока во всех проводниках $I = 2$ А.



6. Катушка с железным сердечником имеет площадь поперечного сечения 20 см² и число витков 500. Индуктивность катушки с сердечником $0,28$ Гн при силе тока через обмотку 5 А. Найдите магнитную проницаемость железного сердечника в этих условиях.

7. Замкнутая квадратная рамка из гибкой проволоки расположена в магнитном поле с индукцией $0,1$ Тл, силовые линии которого направлены перпендикулярно плоскости рамки. Какой заряд протечет в рамке, если, не меняя плоскости расположения, придать ей форму окружности? Длина проволоки 1 м, ее сопротивление 100 Ом.

8. На «воздушный» соленоид длиной $l = 10$ см и площадью поперечного сечения $S = 5$ см² надет проволочный виток. Соленоид имеет 100 витков и по нему течет ток $I = 1$ А. Какая средняя ЭДС индуцируется в надетом на соленоид витке, если ток в соленоиде выключается за время $t = 1$ мс?

9. При увеличении силы тока, проходящего через катушку индуктивностью 0,5 Гн, в 2 раза энергия магнитного поля возросла на 3 Дж. Найдите конечное значение силы тока.

10. В колебательном контуре сила тока с течением времени изменяется по закону $I = 0,01 \cos 1000t$. Емкость конденсатора в контуре 10 мкФ. Найдите индуктивность контура.

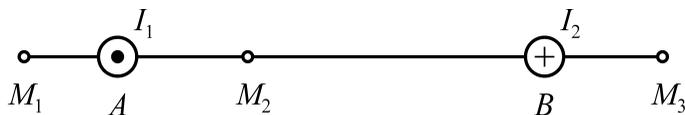
11. Сила тока в вибраторе Герца изменяется в зависимости от времени по закону $I = 0,1 \cos(6 \cdot 10^5 \pi t)$. Найдите длину излучаемой волны.

Модуль 5. Магнитное поле.

Электромагнитные колебания и волны

Вариант 15

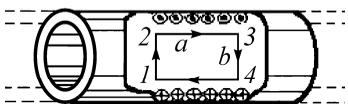
1. На рисунке изображены сечения двух прямолинейных бесконечно длинных проводников с токами. Расстояние между проводниками $AB = 10$ см, токи $I_1 = 20$ А и $I_2 = 30$ А. Найдите индукцию магнитного поля в точках M_1 , M_2 и M_3 . Расстояния $M_1A = 2$ см, $AM_2 = 4$ см и $BM_3 = 3$ см.



2. Проводник длиной 24 см и сопротивлением 36 Ом согнут в форме равностороннего треугольника и помещен в однородное магнитное поле с индукцией 0,1 Тл, перпендикулярное плоскости треугольника. Какая результирующая сила будет действовать на проводник, если на две соседние вершины образованной фигуры подать напряжение 5,4 В?

3. Электрон влетает в область магнитного поля с индукцией $0,002$ Тл, где движется по дуге окружности радиусом $0,2$ м. Затем электрон попадает в электрическое поле, где пролетает участок с разностью потенциалов 600 В, и его скорость уменьшается в 2 раза. Определите конечную скорость электрона.

4. Виток диаметром $d = 20$ см может вращаться около вертикальной оси, совпадающей с одним из диаметров витка. Виток установили в плоскости магнитного меридиана и пустили по нему ток $I = 10$ А. Найдите механический момент M , который нужно приложить к витку, чтобы удержать его в начальном положении. Горизонтальную составляющую $B_{\text{г}}$ магнитной индукции поля Земли принять равной 20 мкТл.



5. По соленоиду длиной $l = 1$ м без сердечника, имеющему $N = 10^3$ витков, течет ток $I = 20$ А. Определите циркуляцию вектора магнитной индукции вдоль контура, изображенного на рисунке.

6. Обмотка тороида с железным сердечником имеет $N = 151$ виток. Средний радиус r тороида составляет 3 см. Сила тока через обмотку равна 1 А. Определите для этих условий, пользуясь графиком зависимости $B = f(H)$: 1) индукцию магнитного поля внутри тороида; 2) намагниченность сердечника; 3) магнитную проницаемость сердечника.

7. Катушка диаметром 5 см, содержащая 1000 витков, помещена в однородное магнитное поле, параллельное ее оси. Индукция поля равномерно изменяется со скоростью $\Delta B/\Delta t = 0,01$ Тл/с. К концам катушки подключен конденсатор емкостью 10 мкФ. Определите заряд на нем.

8. По соленоиду течет ток 2 А. Магнитный поток, пронизывающий поперечное сечение соленоида, равен 4 мкВб. Определите индуктивность соленоида, если он имеет $N = 800$ витков.

9. Напряженность магнитного поля тороида со стальным сердечником возросла от $H_1 = 200$ А/м до $H_2 = 800$ А/м. Опреде-

лите, во сколько раз изменилась объемная плотность энергии магнитного поля.

10. Колебательный контур, состоящий из катушки индуктивности и конденсатора, настроен на длину волны 100 м. Зная, что максимальный заряд на конденсаторе достигает величины $8 \cdot 10^{-9}$ Кл, определите максимально возможный ток в цепи контура.

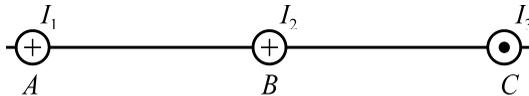
11. Сколько колебаний происходит в электромагнитной волне (длина волны 300 м) за время, равное периоду колебаний с частотой 2 кГц?

Модуль 5. Магнитное поле.

Электромагнитные колебания и волны

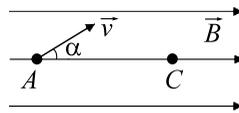
Вариант 16

1. На рисунке изображены сечения трех прямолинейных бесконечно длинных проводников с токами. Расстояния $AB = BC = 5$ см, токи $I_1 = I_2 = I$ и $I_3 = 2I$. Найдите точку на прямой AC , в которой индукция магнитного поля, вызванного токами, равна нулю.



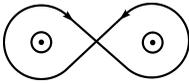
2. Проводящее кольцо радиусом $R = 1,5$ м поместили в однородное магнитное поле, перпендикулярное плоскости кольца. По кольцу пропустили ток $I = 10$ А. При какой величине индукции магнитного поля кольцо разорвется, если проволока, из которой оно изготовлено, выдерживает максимальное натяжение $T_{\max} = 2,5$ Н?

3. Электрон влетает в однородное магнитное поле. В точке A он имеет скорость $v = 10^6$ м/с (рисунок), которая составляет с направлением поля угол $\alpha = 30^\circ$. При ка-



кой индукции магнитного поля B электрон окажется в точке C , если $AC = 0,31$ мм?

4. Рамка гальванометра длиной $a = 4$ см и шириной $b = 1,5$ см, содержащая $N = 200$ витков тонкой проволоки, находится в магнитном поле с индукцией $B = 0,1$ Тл. Плоскость рамки параллельна линиям индукции. Найдите: 1) механический момент M , действующий на рамку, когда по витку течет ток $I = 1$ мА; 2) магнитный момент p_m рамки при этом токе.



5. Определите циркуляцию вектора магнитной индукции для замкнутого контура, изображенного на рисунке, если сила тока в обоих проводниках $I = 2$ А.

6. По обмотке соленоида с железным сердечником течет ток $I = 4$ А. Соленоид имеет длину $l = 1$ м, площадь поперечного сечения $S = 20$ см² и число витков $N = 400$. Определите энергию магнитного поля соленоида.

7. В одной плоскости с бесконечным прямолинейным проводом с током $I = 20$ А расположена квадратная рамка со стороной, длина которой $a = 10$ см, причем две стороны рамки параллельны проводу, а расстояние d от провода до ближайшей стороны рамки равно 5 см. Определите магнитный поток Φ , пронизывающий рамку.

8. Определите разность потенциалов между точками A и B (рисунок) в тот момент времени, когда через сопротивление $R = 2$ Ом течет ток 1 А, а скорость изменения силы тока 4 А/с. Индуктивность катушки $L = 0,2$ Гн.



9. В катушке без сердечника за время $\Delta t = 0,01$ с сила тока увеличивается равномерно от $I_1 = 1$ А до $I_2 = 2$ А. При этом в катушке возникает ЭДС самоиндукции $\varepsilon_c = 20$ В. Найдите изменение энергии магнитного поля катушки.

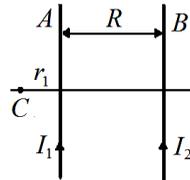
10. Колебательный контур состоит из катушки индуктивности 59 мкГн и конденсатора емкостью 40 пФ . Энергия, запасенная в контуре, равна $3,2 \cdot 10^{-6} \text{ Дж}$. Чему равен заряд на конденсаторе в тот момент, когда ток в цепи контура равен 160 мА ?

11. На каком расстоянии от радиолокатора находится самолет, если отраженный от него сигнал принят через 30 мс после излучения импульса?

Модуль 5. Магнитное поле.
Электромагнитные колебания и волны

Вариант 17

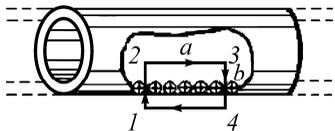
1. По двум бесконечно длинным прямым параллельным проводам, находящимся на расстоянии $R = 10 \text{ см}$ друг от друга в вакуум текут токи $I_1 = 20 \text{ А}$ и $I_2 = 30 \text{ А}$ одинакового направления (рисунок). Определите магнитную индукцию B поля, создаваемого токами в точке C , если расстояние $r_1 = 2 \text{ см}$.



2. В однородном магнитном поле, индукция которого равна 2 Тл и направлена под углом 30° к вертикали, вертикально вверх движется прямой проводник массой 2 кг , по которому течет ток 4 А . Через 3 с после начала движения проводник имеет скорость 10 м/с . Определите длину проводника.

3. Протон и электрон, ускоренные одинаковой разностью потенциалов, влетают в однородное магнитное поле. Во сколько раз радиус кривизны R_1 траектории протона больше радиуса кривизны R_2 траектории электрона?

4. Короткая катушка с площадью поперечного сечения S , равной 150 см^2 , содержит $N = 200$ витков провода, по которому течет ток $I = 4 \text{ А}$. Катушка помещена в однородное магнитное поле напряженностью $H = 8 \text{ кА/м}$. Определите магнитный момент p_m катушки, а также вращающий момент M , действующий на нее со стороны поля, если ось катушки составляет угол $\alpha = 60^\circ$ с линиями индукции.



5. По соленоиду длиной $l = 1$ м без сердечника, имеющему $N = 10^3$ витков, течет ток $I = 20$ А. Определите циркуляцию вектора магнитной индукции вдоль контура, изображенного на рисунке.

6. Железный сердечник длиной $l = 0,5$ м малого сечения ($d \ll l$) содержит 400 витков. Определите, пользуясь графиком зависимости $B = f(H)$, магнитную проницаемость железа при силе тока $I = 1$ А.

7. В однородном магнитном поле ($B = 0,2$ Тл) равномерно с частотой $n = 600$ мин⁻¹ вращается рамка, содержащая $N = 1200$ витков. Площадь рамки $S = 100$ см². Ось вращения лежит в плоскости рамки и перпендикулярна линиям магнитной индукции. Определите максимальную ЭДС, индуцируемую в рамке.

8. Катушка длиной $l = 20$ см и диаметром $D = 3$ см имеет $N = 400$ витков. По катушке идет ток $I = 2$ А. Найдите индуктивность катушки и магнитный поток, пронизывающий площадь ее поперечного сечения.

9. Сила тока в катушке уменьшилась с 12 до 8 А. При этом энергия магнитного поля катушки уменьшилась на 2 Дж. Какова индуктивность катушки?

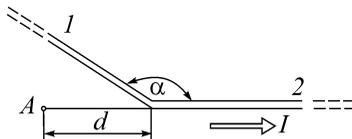
10. При изменении тока в катушке индуктивности на величину 1 А за время 0,6 с в ней индуцируется ЭДС 0,2 мВ. Какую длину будет иметь радиоволна, излучаемая генератором, колебательный контур которого состоит из этой катушки и конденсатора емкости 14 нФ?

11. Наименьшее расстояние от Земли до Сатурна 1,2 Тм. Через какое минимальное время может быть получена ответная информация с космического корабля, находящегося в районе Сатурна, на радиосигнал, посланный с Земли?

Модуль 5. Магнитное поле.
Электромагнитные колебания и волны

Вариант 18

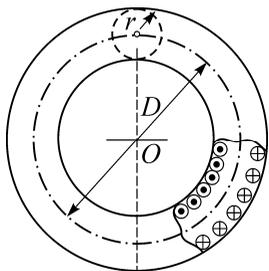
1. Длинный провод с током $I = 50$ А изогнут под углом $\alpha = 2\pi/3$. Определите магнитную индукцию \vec{B} в точке A (рисунок). Расстояние $d = 5$ см.



2. Медный провод сечением S , согнутый в виде трех сторон квадрата, прикреплен своими концами к горизонтальной оси, вокруг которой он может свободно вращаться в однородном магнитном поле с индукцией B , направленной вертикально вверх. На какой угол от вертикали отклонится плоскость контура при прохождении по нему тока I ?

3. Протон влетает в однородное магнитное поле под углом 30° к силовым линиям и начинает двигаться по винтовой линии радиусом $1,5$ см. Индукция магнитного поля $0,1$ Тл. Найдите кинетическую энергию протона.

4. Рамка гальванометра, содержащая $N = 200$ витков тонкого провода, подвешена на упругой нити. Площадь S рамки равна 1 см². Нормаль к плоскости рамки перпендикулярна линиям магнитной индукции ($B = 5$ мТл). Когда через гальванометр был пропущен ток $I = 2$ мкА, рамка повернулась на угол $\alpha = 30^\circ$. Найдите постоянную кручения C нити.

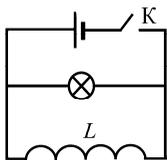


5. Диаметр D тороида без сердечника по средней линии равен 30 см. В сечении тороид имеет круг радиусом $r = 5$ см. По обмотке тороида, содержащей $N = 2000$ витков, течет ток $I = 5$ А (рисунок). Пользуясь законом полного тока, определите максимальное и минимальное значения магнитной индукции B в тороиде.

6. Индукция магнитного поля в железном стержне $B = 1,2$ Тл. Определите, пользуясь графиком зависимости $B = f(H)$, намагниченность стержня.

7. Проволочный контур в форме равностороннего треугольника со стороной $l = 1$ м расположен в магнитном поле с индукцией $B = 0,1$ Тл так, что силовые линии поля перпендикулярны плоскости контура. Определите, как изменится магнитный поток через контур, если, не меняя плоскости расположения, преобразовать его в квадрат.

8. Катушка имеет индуктивность $L = 0,144$ Гн и сопротивление $R = 10$ Ом. Через какое время после включения в катушке потечет ток, равный половине установившегося?



9. В цепь источника тока, ЭДС которого 8 В, подключены катушка индуктивности и электролампа, как показано на рисунке. Сопротивление электролампы во много раз больше сопротивления катушки, равного 2 Ом. Индуктивность катушки $5 \cdot 10^{-2}$ Гн. Какое количество теплоты выделится в электролампе при размыкании ключа К?

10. Резонанс в колебательном контуре, содержащем конденсатор емкости 1 мкФ, наступает при частоте колебаний 400 Гц. Когда параллельно конденсатору подключается другой конденсатор, резонансная частота становится равной 100 Гц. Найдите емкость другого конденсатора.

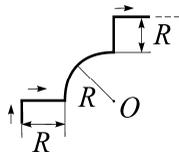
11. На какой частоте передаются сигналы SOS, если по международному соглашению длина радиоволн равна 600 м?

Модуль 5. Магнитное поле.

Электромагнитные колебания и волны

Вариант 19

1. По бесконечно длинному проводу, изогнутому, как показано на рисунке, течет ток $I = 200$ А. Определите магнитную индукцию B в точке O . Радиус дуги $R = 10$ см.

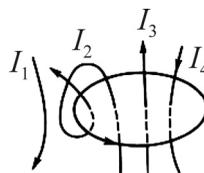


2. На горизонтальных рельсах, расстояние между которыми $l = 60$ см, перпендикулярно им лежит стержень. Определите силу тока, который необходимо пропустить по стержню, чтобы стержень начал двигаться. Рельсы и стержень находятся в однородном магнитном поле с индукцией 60 мТл. Линии магнитной индукции направлены вертикально. Масса стержня $m = 0,5$ кг. Коэффициент трения стержня о рельсы $\mu = 0,1$.

3. Частица с элементарным зарядом начинает двигаться из состояния покоя и проходит ускоряющую разность потенциалов 500 В. Попав затем в однородное магнитное поле с индукцией $0,4$ Тл, частица описывает окружность радиусом 5 мм. Найдите массу частицы.

4. На наклонной плоскости, составляющей с горизонтом угол 30° , лежит квадратная проволочная рамка со стороной 15 см. Рамка находится в вертикальном магнитном поле с индукцией 15 Тл. Масса рамки 40 г. Какой минимальный ток нужно пропустить по рамке, чтобы она перевернулась? Считать, что трение не позволяет рамке скользить по плоскости.

5. Определите циркуляцию вектора магнитной индукции для замкнутого контура (рисунок), если сила тока в проводниках $I_1 = 2$ А, $I_2 = 3$ А, $I_3 = 4$ А, $I_4 = 5$ А.



6. По обмотке соленоида индуктивностью $L = 3$ мГн, находящегося в диамагнитной среде, течет ток $I = 0,4$ А. Соленоид имеет длину $l = 45$ см, площадь поперечного сечения $S = 10$ см² и число витков $N = 1000$. Найдите внутри соленоида магнитную индукцию и намагниченность.

7. Из проволоки сопротивлением $R = 20$ Ом и длиной $l = 0,5$ м сделали кольцо и поместили в магнитное поле, индукция которого меняется по закону $B = \alpha t$, где $\alpha = 10^{-4}$ Тл/с, t – время в секундах. Какая мощность выделяется в проволоке, если плоскость кольца перпендикулярна линиям индукции магнитного поля?

8. Индуктивность катушки равна 2 мГн. Ток частотой $\nu = 50$ Гц, протекающий по катушке, изменяется по синусоидальному закону. Определите среднюю ЭДС самоиндукции, возникающую за интервал времени, в течение которого ток в катушке изменяется от минимального до максимального значения. Амплитудное значение силы тока $I_0 = 10$ А.

9. На железный стержень длиной 50 см и сечением 2 см^2 намотан в один слой провод так, что на каждый сантиметр длины стержня приходится 20 витков. Определите энергию магнитного поля в сердечнике соленоида, если сила тока в обмотке 0,5 А.

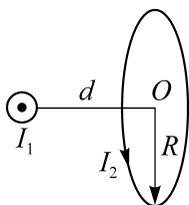
10. На какую длину волны настроен колебательный контур, состоящий из катушки индуктивности и конденсатора, если максимальный ток в цепи 0,3 А, а максимальный заряд на конденсаторе равен $2 \cdot 10^{-8}$ Кл?

11. Радиолокационная станция посылает в некоторую среду электромагнитные волны длиной 10 см при частоте 2,25 ГГц. Чему равна скорость волн в этой среде и какую будут иметь длину электромагнитные волны в вакууме?

Модуль 5. Магнитное поле.

Электромагнитные колебания и волны

Вариант 20



1. Круговой виток радиусом $R = 15$ см расположен относительно бесконечно длинного провода так, что его плоскость параллельна проводу. Перпендикуляр, восставленный на провод из центра витка, является нормалью к плоскости витка. Сила тока в проводе $I_1 = 1$ А, сила тока в витке $I_2 = 5$ А. Расстояние от центра витка до провода $d = 20$ см. Определите магнитную индукцию в центре витка.

2. Тонкий провод в виде дуги, составляющей четверть кольца радиусом $R = 15$ см, находится в однородном магнитном по-

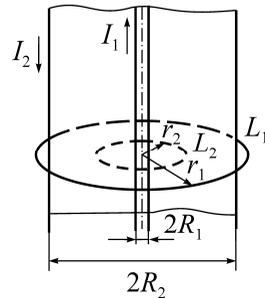
ле ($B = 20$ мТл). По проводу течет ток $I = 30$ А. Плоскость, в которой лежит дуга, перпендикулярна линиям магнитной индукции, а подводящие провода находятся вне поля. Определите силу F , действующую на провод.

3. Частица, имеющая заряд электрона, влетает в однородное магнитное поле под углом 45° к линиям индукции и движется по винтовой линии с шагом 2 см. Определите импульс частицы, если индукция поля равна 10^{-2} Тл.

4. Виток, в котором поддерживается сила тока $I = 60$ А, свободно установился в однородном магнитном поле ($B = 20$ мТл). Диаметр витка $d = 10$ см. Какую работу A нужно совершить для того, чтобы повернуть виток относительно оси, совпадающей с диаметром, на угол $\alpha = \pi/3$?

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

6. Двухпроводная система состоит из коаксиально расположенных проводника (радиус $R_1 = 2$ мм) с током $I_1 = 5$ А и тонкостенной цилиндрической трубы (радиус $R_2 = 2$ см), по которой течет ток $I_2 = 10$ А (рисунок). Найдите индукцию магнитного поля в точках, лежащих на расстояниях $r_1 = 3$ см, $r_2 = 1$ см от оси системы. Всю систему считать бесконечно длинной.



7. Тонкий медный провод массой $m = 1$ г согнут в виде квадрата и помещен в однородное магнитное поле ($B = 0,1$ Тл) так, что плоскость его перпендикулярна линиям индукции. Определите количество электричества Q , которое протечет по проводнику, если квадрат, потянув за противоположные вершины, вытянуть в линию.

8. При равномерном изменении силы тока в катушке индуктивностью 6 мГн в ней возникает ЭДС самоиндукции 8 мВ . На какую величину изменяется сила тока за 5 с ?

9. На железное кольцо намотано в один слой $N = 200$ витков. Определите энергию W магнитного поля, если при токе $I = 2,5 \text{ А}$ магнитный поток Φ в железе равен $0,5 \text{ мВб}$.

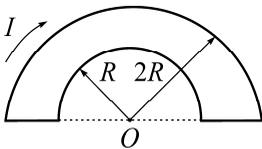
10. Колебательный контур, состоящий из катушки индуктивности и конденсатора, настроен на длину волны $\lambda = 14 \text{ м}$. Зная, что максимальный ток в цепи $I = 0,02 \text{ А}$, определите максимальный заряд конденсатора.

11. Электромагнитные волны из вакуума попадают в диэлектрик с диэлектрической проницаемостью ϵ на частоте волны. Какие характеристики волны изменяются при этом и каким образом?

Модуль 5. Магнитное поле.

Электромагнитные колебания и волны

Вариант 21



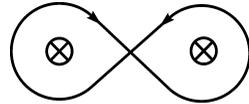
1. По плоскому контуру из тонкого провода течет ток $I = 100 \text{ А}$. Определите магнитную индукцию B поля, созданного этим током в точке O (рисунок). Радиус изогнутой части контура $R = 20 \text{ см}$.

2. Квадратная проволочная рамка расположена в одной плоскости с длинным прямым проводом так, что две ее стороны параллельны проводу. Результирующая сила, действующая на рамку со стороны магнитного поля прямолинейного проводника, равна $4 \cdot 10^{-3} \text{ Н}$. Ближайшая к проводу сторона рамки находится на расстоянии, равном ее длине. По рамке и проводу текут одинаковые токи I . Найдите силу тока I .

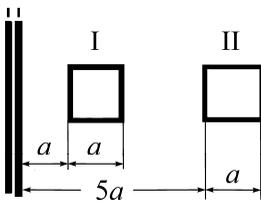
3. Протон влетает в однородное магнитное поле с индукцией $2 \cdot 10^{-5} \text{ Тл}$ перпендикулярно линиям индукции магнитного поля. Сколько оборотов будет делать в магнитном поле протон за 1 с ?

4. Вращающий момент, действующий на квадратную рамку, помещенную в однородное магнитное поле, $M = 2,5 \cdot 10^{-4}$ Н·м. Длина стороны рамки 2 см, сила тока, текущего по рамке, 5 А. Найдите индукцию магнитного поля, если плоскость рамки составляет угол 60° с направлением вектора \vec{B} .

5. Определите циркуляцию вектора магнитной индукции для замкнутого контура, изображенного на рисунке, если сила тока в обоих проводниках $I = 2$ А.



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



7. Определите, во сколько раз отличаются магнитные потоки, пронизывающие рамку при двух ее положениях относительно прямого проводника с током, представленных на рисунке.

8. Электрическая лампочка, сопротивление которой в горячем состоянии $R = 10$ Ом, подключается через катушку к 12-вольтовому аккумулятору. Индуктивность катушки $L = 2$ Гн, сопротивление $r = 1$ Ом. Через какое время после включения лампочка загорится, если она начинает светиться при напряжении на ней $U = 6$ В?

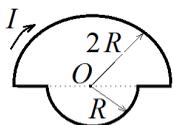
9. Соленоид с железным сердечником длиной 150 см и сечением 20 см^2 содержит 1200 витков. Определите энергию магнитного поля соленоида, если по нему проходит ток 1 А. Магнитная проницаемость железа 1400.

10. Колебательный контур состоит из катушки индуктивностью 57 мкГн и конденсатора емкостью 40 пФ. В тот момент, когда ток в цепи равен 420 мА, на конденсаторе был накоплен заряд 20 нКл. Найдите энергию, запасенную в контуре.

11. Как изменится плотность потока электромагнитной энергии при увеличении в волне напряженностей обоих полей в k раз?

Модуль 5. Магнитное поле.
Электромагнитные колебания и волны

Вариант 22



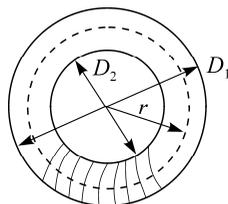
1. По плоскому контуру из тонкого провода течет ток $I = 100$ А. Определите магнитную индукцию B поля, созданного этим током в точке O (рисунок). Радиус изогнутой части контура $R = 20$ см.

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

3. Протон влетает со скоростью $v = 10^3$ м/с в однородное магнитное поле под углом $\alpha = 60^\circ$ к линиям индукции. Определите радиус и шаг спирали, по которой будет двигаться электрон, если модуль вектора магнитной индукции $B = 1$ мТл.

4. На расстоянии $a = 20$ см от прямолинейного вертикального провода на нити длиной $l = 0,1$ м и диаметром $d = 0,1$ мм висит короткая магнитная стрелка, магнитный момент которой $p_m = 0,01$ А·м². Стрелка находится в плоскости, проходящей через провод и нить. На какой угол повернется стрелка, если по проводу пустить ток $I = 30$ А? Постоянная кручения нити $C = 332$ пН·м/рад. Система экранирована от магнитного поля Земли.

5. Напряженность магнитного поля на оси тороида без сердечника, по которому идет ток 5 А, $H = 1,37$ кА/м. Внешний диаметр тороида $D_1 = 30$ см, внутренний $D_2 = 20$ см. Сколько витков содержит обмотка тороида?



6. В однородное магнитное поле вносится длинный вольфрамовый стержень (магнитная проницаемость вольфрама

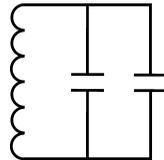
$\mu = 1,0176$). Определите, какая доля суммарного магнитного поля в этом стержне определяется молекулярными токами.

7. На расстоянии $a = 1$ м от длинного прямого провода с током $I = 3$ А находится кольцо радиусом $r = 1$ см. Кольцо расположено так, что поток, пронизывающий его, максимален. Определите количество электричества q , которое протечет по кольцу, когда ток в проводнике будет выключен. Сопротивление кольца $R = 10$ Ом.

8. Катушка имеет индуктивность $L = 0,2$ Гн и сопротивление $R = 1,64$ Ом. Во сколько раз уменьшится ток в катушке через $t = 0,05$ с после того, как ЭДС выключена и катушка замкнута накоротко?

9. Сила тока в катушке с индуктивностью 100 Гн равна 10 кА. Сколько льда, взятого при температуре 0 °С, можно превратить в воду и нагреть до 100 °С за счет энергии магнитного поля этой катушки?

10. Колебательный контур состоит из катушки индуктивности и двух одинаковых конденсаторов, включенных параллельно. Период собственных колебаний контура $T_1 = 20$ мкс. Чему будет равен период колебаний T_2 , если конденсаторы включить последовательно?

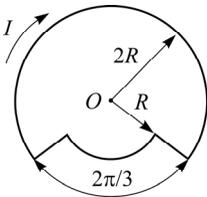


11. Колебательный контур радиоприемника настроен на частоту $\nu = 6$ МГц. Во сколько раз нужно изменить емкость конденсатора контура, чтобы настроиться на длину волны $\lambda = 150$ м?

Модуль 5. Магнитное поле.

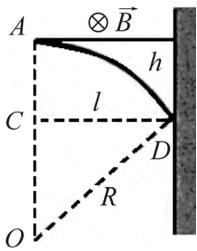
Электромагнитные колебания и волны

Вариант 23



1. По плоскому контуру из тонкого провода течет ток $I = 100$ А. Определите магнитную индукцию B поля, созданного этим током в точке O (рисунок). Радиус изогнутой части контура $R = 20$ см.

2. В магнитном поле с индукцией $B = 0,01$ Тл находится проводник, расположенный горизонтально. Линии индукции поля также горизонтальны и перпендикулярны проводнику. Какой ток должен протекать через проводник, чтобы он завис? Масса единицы длины проводника $0,01$ кг/м.

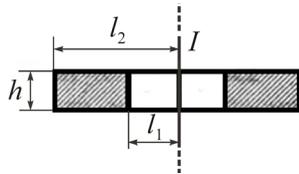


3. Электронно-лучевую трубку помещают в однородное магнитное поле, перпендикулярное скорости движения электронов. При этом след пучка электронов на экране, удаленном на $l = 14$ см от места вылета электронов, смещается на $h = 2$ см. Какова скорость электронов, если индукция поля 25 мкТл, а удельный заряд электрона $1,8 \cdot 10^{11}$ Кл/кг?

4. Катушка гальванометра, состоящая из $N = 600$ витков проволоки, подвешена на нити длиной $l = 10$ см и диаметром $d = 0,1$ мм в магнитном поле напряженностью $H = 160$ кА/м так, что ее плоскость параллельна направлению магнитного поля. Длина рамки катушки $a = 2,2$ см и ширина $b = 1,9$ см. Какой ток I течет по обмотке катушки, если катушка повернулась на угол $\varphi = 0,5^\circ$? Постоянная кручения нити $C = 332$ пН·м/рад.

5. По сплошному бесконечному цилиндрическому проводнику радиусом $R = 5$ см течет ток. Магнитная индукция в точке, удаленной от оси проводника на $r = 3$ см, $B = 65$ мТл. Определите плотность тока в проводнике.

6. Через центр железного кольца перпендикулярно его плоскости проходит длинный прямолинейный провод, по которому течет ток $I = 25$ А. Кольцо имеет четырехугольное сечение, размеры которого $l_1 = 18$ мм, $l_2 = 22$ мм и $h = 5$ мм. Считая приближенно, что в любой точке сечения кольца индукция одинакова и равна индукции на средней линии кольца, найдите магнитный поток Φ , пронизывающий площадь сечения кольца.



7. Лежащее на столе металлическое кольцо перевернули. Радиус кольца $r = 10$ см, его сопротивление $R = 2$ Ом. Какой величины заряд протек при этом через кольцо, если вертикальная составляющая магнитного поля Земли $B = 5 \cdot 10^{-5}$ Тл? Поле в пределах кольца считать однородным.

8. Катушку индуктивностью $L = 0,6$ Гн подключают к источнику тока. Определите сопротивление катушки, если за время $t = 3$ с сила тока через катушку достигает 80 % предельного значения.

9. Найдите энергию магнитного поля соленоида, в котором при силе тока 10 А возникает магнитный поток 0,6 Вб.

10. Определите длину волны, излучаемую электрическим контуром, содержащим катушку с индуктивностью 30 мГн и два конденсатора, соединенных параллельно, с емкостями 850 и 50 пФ.

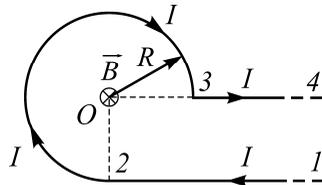
11. При неизменной амплитуде колебаний частота колебаний электрона увеличилась в n раз. Как это изменит интенсивность излучения волн и их характеристики?

Модуль 5. Магнитное поле.

Электромагнитные колебания и волны

Вариант 24

1. Найдите величину индукции магнитного поля в точке O , если бесконечно длинный тонкий проводник с током $I = 20$ А изогнут так, как показано на рисунке. Радиус изгиба закругленной части $R = 50$ см.



2. Проводник длиной 110 см согнули под углом 60° так, что одна из сторон угла равна 30 см, и поместили в однородное магнитное поле с индукцией 2 мТл обеими сторонами перпендикулярно линиям индукции. Какая сила будет действовать на проводник, если по нему пропустить ток силой 10 А?

3. Электрон движется в магнитном поле, индукция которого 2 мТл , по винтовой линии радиусом 2 см и шагом винта 5 см . Определите скорость электрона.

4. Круговой контур помещен в однородное магнитное поле так, что плоскость контура перпендикулярна направлению магнитного поля. Напряженность магнитного поля $H = 150 \text{ кА/м}$. По контуру течет ток $I = 2 \text{ А}$. Радиус контура $R = 2 \text{ см}$. Какую работу A надо совершить, чтобы повернуть контур на угол $\varphi = 90^\circ$ вокруг оси, совпадающей с диаметром контура?

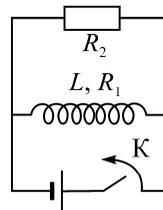


5. По бесконечной проводящей плоскости течет ток одного направления. На рисунке показан срез такой плоскости с током, текущим за плоскость рисунка. Используя понятие линейной плотности тока i (ток, приходящийся на единицу длины), определите магнитную индукцию поля, создаваемого такой плоскостью.

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

7. По длинному прямому проводу течет ток. Вблизи провода расположена квадратная рамка из тонкого провода сопротивлением $R = 0,02 \text{ Ом}$. Провод лежит в плоскости рамки и параллелен двум ее сторонам, расстояния до которых от провода соответственно равны $a_1 = 10 \text{ см}$, $a_2 = 20 \text{ см}$. Найдите силу тока в проводе, если при его включении через рамку протекло количество электричества $Q = 693 \text{ мкКл}$.

8. Катушка индуктивностью $L = 1,5 \text{ Гн}$ и сопротивлением $R_1 = 15 \text{ Ом}$ и резистор сопротивлением $R_2 = 150 \text{ Ом}$ соединены параллельно и подключены к источнику, электродвижущая сила которого $\varepsilon = 60 \text{ В}$, через ключ K . Определите напряжение на зажимах катушки через $0,01 \text{ с}$ после размыкания цепи.



9. При изменении силы тока в соленоиде, имеющем 800 витков, от 2,5 до 14,5 А его магнитный поток увеличился на $\Delta\Phi = 2,4$ мВб. Определите изменение энергии магнитного поля в соленоиде.

10. Колебательный контур состоит из конденсатора с емкостью $C = 10$ мкф и катушки с $L = 0,2$ Гн. Конденсатор зарядили до напряжения 2 В, после чего он начал разряжаться. Чему будет равно мгновенное значение силы тока в контуре в момент, когда энергия магнитного поля в катушке и энергия электрического поля в конденсаторе сравниваются?

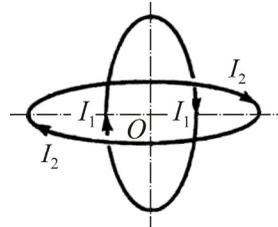
11. Что нужно делать для приема более коротких волн: сближать или раздвигать пластины конденсатора, включенного в колебательный контур приемника?

Модуль 5. Магнитное поле.

Электромагнитные колебания и волны

Вариант 25

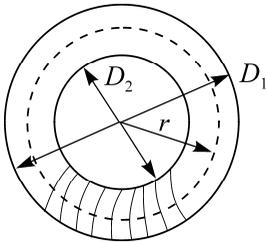
1. Два круговых проводника одинакового радиуса с общим центром O расположены во взаимно перпендикулярных плоскостях (рисунок). Индукция магнитного поля в точке O $B_0 = 0,2$ мТл. Индукция магнитного поля первого проводника с током $I_1 = 8$ А в этой же точке $B_1 = 0,16$ мТл. Найдите индукцию B_2 магнитного поля второго проводника и силу тока I_2 в нем.



2. Проводник длиной 10 см располагается горизонтально и перпендикулярно линиям индукции однородного магнитного поля. При напряжении на проводнике 100 В магнитная сила уравновешивает силу тяжести. Чему равна плотность проводника, если его удельное сопротивление 10^{-5} Ом·м, а индукция магнитного поля $B = 1$ мТл?

3. Электрон, ускоренный разностью потенциалов 300 В, движется параллельно прямолинейному проводнику на расстоянии 4 мм от него. Какая сила будет действовать на электрон, если по проводнику пустить ток 5 А?

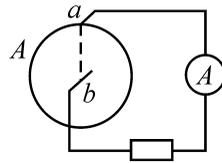
4. Квадратная рамка подвешена на нити так, что направление магнитного поля составляет угол $\alpha = 90^\circ$ с ее нормалью. Сторона рамки $a = 1$ см. Магнитная индукция поля $B = 13,7$ мТл. Если по рамке пропустить ток $I = 1$ А, то она поворачивается на угол $\phi = 1^\circ$. Найдите постоянную кручения нити.



5. Определите, пользуясь теоремой о циркуляции вектора \vec{B} , напряженность магнитного поля на расстоянии $r = 55$ см от центра тороида без сердечника, по обмотке которого, содержащей 100 витков, протекает ток 5 А. Внешний диаметр тороида равен 60 см, внутренний – 40 см.

6. Найдите магнитную индукцию B в замкнутом железном сердечнике тороида длиной $l = 20,9$ см, если число ампер-витков обмотки тороида $IN = 1500$ А·в. Какова магнитная проницаемость μ материала сердечника при этих условиях?

7. Однородный медный диск A радиусом $R = 5$ см помещен в магнитное поле с индукцией $B = 0,2$ Тл так, что плоскость диска перпендикулярна направлению магнитного поля. По цепи aba может идти ток (a и b – скользящие контакты). Диск вращается с частотой $\nu = 3$ с⁻¹. Найдите ЭДС такого генератора.



8. Катушка, намотанная на немагнитный цилиндрический каркас, имеет $N_1 = 750$ витков и индуктивность $L_1 = 25$ мГн. Чтобы увеличить индуктивность катушки до $L_2 = 36$ мГн, обмотку с катушки сняли и заменили обмоткой из более тонкой проволоки с таким расчетом, чтобы длина катушки осталась прежней. Определите число N_2 витков катушки после перемотки.

9. При силе тока в катушке 0,1 А энергия магнитного поля в ней равна 100 мДж. Чему равен магнитный поток, идущий через катушку?

10. Разность потенциалов на обкладках конденсатора в колебательном контуре изменяется по закону $U = 50\cos(10^4\pi t)$. Емкость конденсатора 0,9 мкФ. Найдите индуктивность контура, а также длину волны, соответствующую этому контуру.

11. Передатчик излучает электромагнитную волну ($\lambda = 300$ м). Сколько электромагнитных колебаний происходит в течение одного периода звуковых колебаний с частотой $\nu = 500$ Гц?

Модуль 6. ГЕОМЕТРИЧЕСКАЯ И ВОЛНОВАЯ ОПТИКА

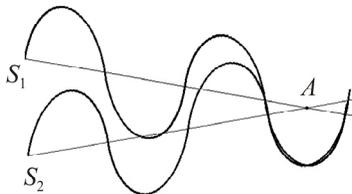
Модуль 6. Геометрическая и волновая оптика

Вариант 1

1. С повышением температуры показатель преломления воды уменьшается. Что при этом происходит с предельным углом полного отражения света для пары вода – воздух?

2. Световой луч падает нормально на поверхность пластинки толщиной 50 мкм, имеющей показатель преломления 1,2. Чему равно время распространения луча в пластинке?

3. На рисунке изображены две световые волны от источников S_1 и S_2 , приходящие в точку A экрана. Каков результат интерференции этих волн в точке A ? Дайте письменное пояснение ответу.



4. Мыльная пленка толщиной 0,3 мкм освещается белым светом, падающим нормально, и рассматривается в проходящем свете. В какой цвет будет окрашена пленка, если показатель преломления 1,33?

5. В интерферометре Жамена две одинаковые трубки длиной 15 см были заполнены воздухом. Показатель преломления воздуха $n_1 = 1,000292$. Когда в одной из трубок воздух заменили ацетоном, интерференционная картина сместилась на $m = 80$ полос. Определите показатель преломления ацетона n_2 , если в интерферометре использовался источник света с длиной волны $\lambda = 0,590$ мкм.

6. На зонную пластинку падает свет с интенсивностью I_0 . Зонная пластинка открывает первые три нечетные зоны Френеля. Во сколько раз интенсивность I в центре дифракционной картины отличается от I_0 ?

7. Чему равна угловая дисперсия для решетки с $d = 5$ мкм в третьем порядке спектра, если на нее падает нормально свет с $\lambda = 500$ нм?

8. Естественный свет проходит через поляризатор и анализатор, поставленные так, что угол между их главными плоскостями равен α . Как поляризатор, так и анализатор поглощают 8 % падающего на них света. Интенсивность луча, вышедшего из анализатора, равна 9 % интенсивности естественного света, падающего на поляризатор. Найдите угол α .

9. Пучок плоскополяризованного света с длиной волны $\lambda = 450$ нм падает нормально на пластинку из исландского шпата, вырезанную параллельно его оптической оси. Показатели преломления для обыкновенного и необыкновенного лучей в кристалле $n_o = 1,66$ и $n_e = 1,49$ соответственно. Определите длины волн обыкновенного и необыкновенного лучей.

Модуль 6. Геометрическая и волновая оптика

Вариант 2

1. Предельный угол полного отражения для пары веществ стекло – воздух равен 45° . Чему равен показатель преломления этого сорта стекла?

2. Световой луч распространяется вдоль оси OX от точки $x = 0$ м до точки $x = 0,6$ м. Показатель преломления среды изменяется по закону $n(x) = 1 + x$, где координата x выражена в метрах. Определите оптическую длину пути светового луча.

3. Если m – целое число, то при какой разности фаз колебаний вектора \vec{E} наблюдается интерференционный максимум двух когерентных волн, пришедших в некоторую точку пространства? Ответ пояснить.

4. На поверхность стеклянного объектива ($n_1 = 1,51$) нанесена тонкая пленка, показатель преломления которой $n_2 = 1,2$ («просветляющая пленка»). При какой наименьшей толщине этой пленки произойдет максимальное ослабление отраженного света в средней части видимого спектра?

5. Расстояние между первым и вторым темными кольцами Ньютона в отраженном свете равно 1 мм. Определите расстояние между 9-м и 10-м кольцами.

6. На зонную пластинку падает свет с интенсивностью I_0 . Зонная пластинка открывает первые четыре четные зоны Френеля. Во сколько раз интенсивность I в центре дифракционной картины отличается от I_0 ?

7. Дифракционная решетка содержит 400 штрихов на 1 мм. На нее падает красный свет с длиной волны $\lambda = 650$ нм. Под каким углом виден 1-й максимум? Сколько всего максимумов дает эта решетка?

8. Анализатор в 4 раза уменьшает интенсивность света, проходящего к нему от поляризатора. Определить угол между плоскостями пропускания поляризатора и анализатора. Потери света в анализаторе пренебречь.

9. Кварцевую пластинку поместили между скрещенными николями. При какой наименьшей толщине d_{\min} кварцевой пластинки поле зрения между николями будет максимально просветлено? Постоянная вращения кварца $[\varphi_0] = 27$ град/мм.

Модуль 6. Геометрическая и волновая оптика

Вариант 3

1. Предельный угол полного отражения для пары веществ стекло – воздух равен 45° . Определите скорость света в этом сорте стекла.

2. Закончите фразы:

А. Луч, падающий на собирающую линзу параллельно главной оптической оси, идет за линзой...

Б. Луч, проходящий через оптический центр линзы, идет за линзой...

В. Луч, идущий к собирающей линзе через ее фокус, идет за линзой...

3. Разность хода лучей от двух когерентных источников света до некоторой точки на экране равна $4,36$ мкм. Каков результат интерференции света в этой точке экрана, если длина волны света $670,9$ нм?

4. Между краями двух хорошо отшлифованных плоских пластин помещена тонкая проволочка диаметром $0,05$ мм; противоположные концы пластинок плотно прижаты друг к другу. Свет падает по нормали к поверхности. На пластинке длиной 10 см наблюдатель видит интерференционные полосы, расстояние между которыми равно $0,6$ мм. Определите длину волны света.

5. Установка для получения колец Ньютона освещается белым светом, падающим нормально. Найдите радиус 4-го синего кольца ($\lambda = 400$ нм). Наблюдение производится в проходящем свете. Радиус кривизны линзы равен 5 м.

6. Свет с интенсивностью I_0 падает на непрозрачный диск, перекрывающий одну зону Френеля. Найдите отношение интенсивности I в центре дифракционной картины и I_0 .

7. Дифракционная решетка содержит 400 штрихов на 1 мм. На нее падает красный свет с длиной волны $\lambda = 650$ нм. Под ка-

ким углом виден 1-й максимум? Сколько всего максимумов дает эта решетка?

8. Угол максимальной поляризации при отражении света от кристалла каменной соли равен $57^{\circ}05'$. Определите скорость света в кристалле каменной соли.

9. Пластинку кварца толщиной $d = 2$ мм, вырезанную перпендикулярно оптической оси, поместили между параллельными николями, в результате чего плоскость поляризации света повернулась на угол $\varphi = 53^{\circ}$. Какова должна быть толщина пластинки, чтобы свет, с которым проводился опыт, не прошел через анализатор?

Модуль 6. Геометрическая и волновая оптика

Вариант 4

1. Определите показатель преломления вещества, если скорость распространения света в веществе составляет $2 \cdot 10^8$ м/с.

2. Определите фокусное расстояние линзы, если при расстоянии 40 см от линзы до предмета действительное изображение получается на расстоянии 120 см от линзы.

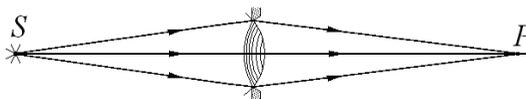
3. В некоторую точку пространства приходят волны видимого света с оптической разностью хода 2 мкм. Определите, усилится или ослабнет свет в этой точке для длин волн 760 нм (красный свет).

4. Мыльная пленка толщиной 0,275 мкм освещается белым светом, падающим нормально, и рассматривается в проходящем свете. В какой цвет будет окрашена пленка, если показатель преломления 1,33?

5. На мыльную пленку ($n = 1,33$) падает белый свет под углом 45° . При какой наименьшей толщине пленки отраженные лучи будут окрашены в желтый цвет ($\lambda = 600$ нм)?

6. В открытой части волнового фронта, выделенного круглым отверстием в экране, для некоторой точки наблюдения P (рисунок) уложилось пять зон Френеля (амплитуды волн от всех

зон считать одинаковыми). Если перекрыть вторую зону, то какой будет интенсивность света в точке P ?



7. Период дифракционной решетки $0,01$ мм, общее число штрихов равно 990 . Увидим ли мы раздельно в спектре 1-го порядка обе компоненты дублета желтой линии натрия с длинами волн $589,0$ и $589,6$ нм? Каково угловое расстояние между этими максимумами в спектре 2-го порядка?

8. Анализатор в 2 раза уменьшает интенсивность света, приходящего к нему от поляризатора. Определите угол между главными плоскостями поляризатора и анализатора. Потери света в анализаторе можно пренебречь.

9. Пластинку определенной толщины d вырезали из двоякопреломляющего вещества параллельно оптической оси, n_o , n_e – показатели преломления обыкновенного и необыкновенного лучей. Напишите условие, которому должна удовлетворять толщина пластинки, чтобы она могла называться «пластинкой в полволны».

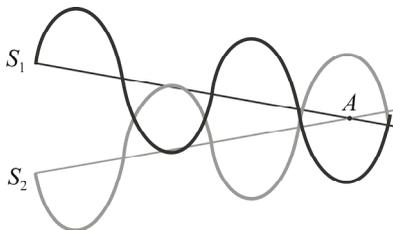
Модуль 6. Геометрическая и волновая оптика

Вариант 5

1. Угол преломления светового луча, падающего из воздуха на поверхность вещества с показателем преломления $1,732$, в 2 раза меньше угла падения α . Найдите угол α .

2. С помощью линзы получено мнимое увеличенное изображение предмета. Пусть a – расстояние от линзы до предмета; b – расстояние от линзы до изображения; f – расстояние до фокуса линзы. Запишите формулу тонкой линзы для данного случая. Сделайте чертеж.

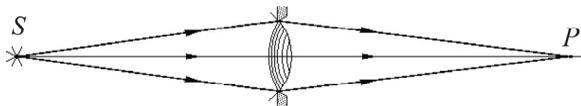
3. На рисунке изображены две световые волны от источников S_1 и S_2 , приходящие в точку A экрана. Каков результат интерференции этих волн в точке A ? Дайте письменное пояснение ответу.



4. Свет с длиной волны $\lambda = 0,55$ мкм падает нормально на поверхность стеклянного клина ($n = 1,5$). В проходящем свете наблюдают систему интерференционных полос, расстояние между соседними максимумами которых $\Delta x = 0,21$ мм. Найдите угол между гранями клина.

5. В опыте с зеркалами Френеля расстояние d между мнимыми изображениями источника света равно 0,5 мм, расстояние l от них до экрана равно 3 м. Длина волны $\lambda = 0,6$ мкм. Определите ширину b полос интерференции на экране.

6. В открытой части волнового фронта, выделенного круглым отверстием в экране, для некоторой точки наблюдения P (рисунок) уложилось пять зон Френеля (амплитуды волн от всех зон считать одинаковыми). Если перекрыть пятую зону, то какой станет интенсивность света в точке P ?



7. При нормальном падении света на дифракционную решетку максимум 2-го порядка для $\lambda_1 = 0,65$ мкм наблюдается под углом 45° . Найдите угол дифракции для $\lambda_2 = 0,5$ мкм в 3-м порядке.

8. Свет падает из стекла ($n = 1,5$) в жидкость, частично отражается, частично преломляется. Найдите показатель преломления жидкости, если отраженный луч полностью поляризован, когда угол преломления равен $42^\circ 30'$. Какова скорость света в жидкости?

9. Никотин (чистая жидкость), содержащийся в стеклянной трубке длиной 8 см, поворачивает плоскость поляризации желтого света натрия на угол $\varphi = 136,6^\circ$. Плотность никотина $\rho = 1,01 \text{ г/см}^3$. Определите удельное вращение $[\varphi_0]$ никотина.

Модуль 6. Геометрическая и волновая оптика

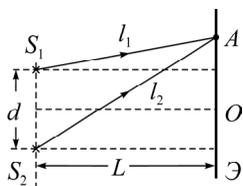
Вариант 6

1. Луч света падает на стекло (показатель преломления 1,5). Преломленный луч перпендикулярен отраженному лучу. Чему равен угол падения?

2. Световой луч прошел расстояние 1,2 км в однородной среде с показателем преломления $n = 1,5$. Определить разницу между оптической и геометрической длинами пути этого луча.

3. Если k – целое число, то при какой разности фаз колебаний вектора \vec{E} наблюдается интерференционный минимум двух когерентных волн, пришедших в некоторую точку пространства? Ответ поясните.

4. Мыльную пленку, расположенную вертикально, наблюдают в проходящем свете через красное стекло ($\lambda = 6,31 \cdot 10^{-7} \text{ м}$). Расстояние между соседними темными полосами получилось равным 3 мм. Затем эту же пленку наблюдают через синее стекло ($\lambda = 4 \cdot 10^{-7} \text{ м}$). Найдите новое расстояние между соседними темными полосами.



5. Найдите длину волны монохроматического излучения, если в опыте Юнга расстояние 1-го интерференционного максимума от центральной полосы $y = 0,05 \text{ см}$. Данные установки: $L = 5 \text{ м}$; $d = 0,5 \text{ см}$ (рисунок).

6. Пучок монохроматического света падает нормально на диафрагму с круглым отверстием. На экране, расположенном за диафрагмой, наблюдается дифракционная картина в виде темных и светлых колец со светлым пятном в центре. Свет в центре обусловлен тем, что в открытой диафрагмой части волнового

фронта уложилось пять зон Френеля (амплитуды колебаний от всех зон считать одинаковыми). С помощью зонной пластинки перекрыли вторую и четвертую зоны Френеля. Как изменилась интенсивность света в центре?

7. Период дифракционной решетки 0,01 мм, общее число штрихов равно 990. Увидим ли мы отдельно в спектре 1-го порядка обе компоненты дублета желтой линии натрия с длинами волн 589,0 и 589,6 нм? Каково угловое расстояние между этими максимумами в спектре 2-го порядка?

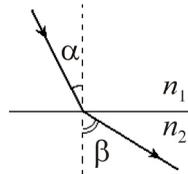
8. Чему равен показатель преломления стекла, если при отражении от него света отраженный луч будет полностью поляризован при угле преломления 30° ?

9. Во сколько раз ослабляется свет, проходя через два николя, плоскости поляризации которых составляют угол 30° , если в каждом из николей теряется 10 % падающего на него светового потока?

Модуль 6. Геометрическая и волновая оптика

Вариант 7

1. Какой из абсолютных показателей преломления сред, изображенных на рисунке, больше и как относительный показатель преломления n связан с n_1 и n_2 ?



2. Оптическая разность хода двух световых волн в среде с показателем преломления

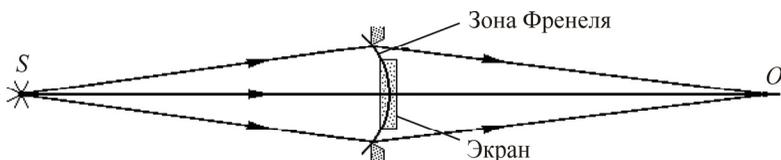
1,5 равна 1,2 мкм. Чему равна оптическая разность хода этих волн в вакууме?

3. Пучок белого света падает нормально на стеклянную пластинку, толщина которой $d = 0,4$ мкм. Показатель преломления стекла $n = 1,5$. Какие длины волн, лежащие в пределах видимого спектра (400–700 нм), усиливаются в отраженном пучке?

4. Между краями двух стеклянных пластин помещена тонкая проволочка диаметром 0,04 мм; противоположные концы пла-

стинок плотно прижаты друг к другу. Свет падает по нормали к поверхности. На пластинке длиной 8 см наблюдатель видит интерференционные полосы, расстояние между которыми равно 0,6 мм. Определите длину волны света.

5. Интерферометр Майкельсона был применен для определения длины световой волны. Для этой цели измерялось расстояние, на которое необходимо передвинуть одно из зеркал, чтобы сместить интерференционную картину на 100 полос. Это расстояние оказалось равным $2,94 \cdot 10^{-2}$ мм. Определите длину световой волны.



6. На пути сферической световой волны поставлен круглый экран малого диаметра (рисунок), при этом интенсивность света в точке O равна I . Если перекрыть весь оставшийся фронт волны, кроме одной зоны Френеля, то какой будет интенсивность света в точке O ?

7. При нормальном падении света на дифракционную решетку максимум 2-го порядка для $\lambda_1 = 0,65$ мкм наблюдается под углом 45° . Найдите угол дифракции для $\lambda_2 = 0,5$ мкм в 3-м порядке.

8. Угол максимальной поляризации при отражении света от поверхности алмаза равен $67^\circ 30'$. Определите скорость света в алмазе.

9. Раствор глюкозы с концентрацией $C_1 = 0,28$ г/см³, налитый в стеклянную трубку, поворачивает плоскость поляризации света, проходящего через этот раствор, на угол $\varphi_1 = 32^\circ$. Определите концентрацию с раствора в другой трубке такой же длины, если он поворачивает плоскость поляризации на угол $\varphi_2 = 24^\circ$.

Модуль 6. Геометрическая и волновая оптика

Вариант 8

1. Человек, рост которого 1,7 м, идет со скоростью 1 м/с по направлению к уличному фонарю. В некоторый момент времени длина тени человека была 1,8 м, а спустя 2 с длина тени стала 1,3 м. На какой высоте висит фонарь?

2. С помощью линзы получено мнимое уменьшенное изображение предмета. Пусть a – расстояние от линзы до предмета; b – расстояние от линзы до изображения; f – расстояние до фокуса линзы. Запишите формулу тонкой линзы для данного случая. Сделайте чертеж.

3. Оптическая разность хода двух лучей монохроматического света равна $0,4\lambda$. Определите разность фаз $\Delta\phi$.

4. Мыльная пленка, расположенная вертикально, образует клин. Интерференция наблюдается в отраженном свете через красное стекло ($\lambda = 631$ нм). Расстояние между соседними красными полосами при этом равно 3 мм. Затем эта же пленка наблюдается через синее стекло ($\lambda = 400$ нм). Найдите расстояние между соседними синими полосами. Считать, что за время измерений форма пленки не изменяется и свет падает на пленку нормально.

5. Установка получения колец Ньютона освещается монохроматическим светом. Наблюдение ведется в отраженном свете. Радиусы двух соседних темных колец равны 4,0 и 4,38 мм. Радиус кривизны линзы 6,4 м. Найдите порядковые номера колец и длину волны падающего света.

6. На экран с отверстием диаметром $d = 1$ мм, расположенный посередине между источником света и точкой наблюдения, падает монохроматический свет с длиной волны $\lambda = 500$ нм. Какое количество зон Френеля укладывается в отверстие при расстоянии от источника света до точки наблюдения 2 м?

7. На экране за щелью наблюдается 13 полос. Длина волны падающего света $\lambda = 500$ нм. Чему равна ширина щели?

8. Определите показатель преломления вещества, если известно, что отраженный луч максимально поляризован, угол преломления $\beta = 22,5^\circ$, а естественный свет падает на вещество из воздуха.

9. Угол поворота плоскости поляризации желтого света натрия при прохождении через трубку с раствором сахара $\varphi = 40^\circ$. Длина трубки $l = 15$ см. Удельное вращение сахара $[\varphi_0] = 66,5$ град/(дм·г/см³). Определите концентрацию C сахара в растворе.

Модуль 6. Геометрическая и волновая оптика

Вариант 9

1. Плоское зеркало поворачивают на угол равный 27° . На какой угол повернется отраженный от зеркала луч?

2. Световой луч распространяется вдоль оси OX от точки $x = 0$ м до точки $x = 0,6$ м. Показатель преломления среды изменяется по закону $n(x) = 1 + x$, где координата x выражена в метрах. Определите, на сколько оптическая длина пути светового луча превышает его геометрическую длину пути.

3. На мыльную пленку с показателем преломления $n = 1,33$ падает по нормали монохроматический свет с длиной волны $\lambda = 0,6$ мкм. Отраженный свет в результате интерференции имеет наибольшую яркость. Какова наименьшая возможная толщина пленки d_{\min} ?

4. Две плоскопараллельные стеклянные пластинки приложены одна к другой так, что между ними образовался воздушный клин с углом α , равным $10''$. На одну из пластинок падает нормально монохроматический свет ($\lambda = 0,5$ мкм). На каком расстоянии l_1 от линии соприкосновения пластинок будет наблюдаться в отраженном свете 1-я светлая полоса?

5. В установке для наблюдения колец Ньютона пространство между линзой и стеклянной пластинкой заполнено жидкостью. Определите показатель преломления жидкости, если ра-

диус 3-го светлого кольца равен 3,65 мм. Наблюдение ведется в проходящем свете. Радиус кривизны линзы 10 м. Длина волны света 589 нм.

6. 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.

7. Какое наименьшее число штрихов должна содержать решетка, чтобы в спектре 2-го порядка можно было видеть раздельно две желтые линии натрия с длинами волн 589,0 и 589,6 нм? Какова длина такой решетки, если расстояние между штрихами $d = 5$ мкм?

8. Определите угол Брюстера при отражении света от диэлектрика, для которого предельный угол полного отражения равен 34° . Сделайте чертеж.

9. Пластинку кварца толщиной $d = 3$ мм поместили между параллельными николями, в результате чего плоскость поляризации монохроматического света повернулась на угол $\varphi = 79,5^\circ$. Какой наименьшей толщины d_{\min} следует взять пластинку, чтобы поле зрения поляриметра стало совершенно темным?

Модуль 6. Геометрическая и волновая оптика

Вариант 10

1. Солнечные лучи составляют с горизонтом угол 40° . Под каким углом к горизонту надо расположить плоское зеркало, чтобы направить лучи горизонтально? Угол отсчитывается от отражающей поверхности.

2. С помощью собирающей линзы получено мнимое изображение предмета. Пусть a – расстояние от линзы до предмета; f – расстояние до фокуса линзы. Укажите интервал на оптиче-

ской оси линзы, где может располагаться предмет. Сделайте чертеж.

3. Найдите все длины волн видимого света (от 0,76 до 0,38 мкм), которые будут максимально ослаблены при оптической разности хода интерферирующих волн 1,8 мкм.

4. Две плоскопараллельные стеклянные пластинки приложены одна к другой так, что между ними образовался воздушный клин с углом $\alpha = 30'$. На одну из пластинок падает нормально монохроматический свет ($\lambda = 0,6$ мкм). На каком расстоянии l от линии соприкосновения пластинок будет наблюдаться в отраженном свете вторая светлая полоса?

5. Зеркала Френеля, угол между которыми $\varphi = 1^\circ$, расположены так, что ребро между ними находится на расстоянии $r = 20$ см от параллельной ему щели и на расстоянии $L = 180$ см от экрана. Каким будет расстояние между соседними светлыми полосами, если экран освещать светом с $\lambda = 600$ нм?

6. На плоскость с круглым отверстием падает плоская световая волна ($\lambda = 400$ нм). Диаметр отверстия 0,2 см. Что будет наблюдаться в центре дифракционной картины на экране, расположенном на расстоянии 5 м от преграды?

7. Монохроматический свет с $\lambda = 589$ нм падает нормально на дифракционную решетку с периодом $d = 2,5$ мкм, содержащую $N = 10^4$ штрихов. Определите угловую ширину дифракционного максимума 2-го порядка.

8. В начальном положении плоскости пропускания поляризатора и анализатора совпадают. На какой угол следует повернуть анализатор, чтобы в три раза уменьшить интенсивность света, проходящего к нему от поляризатора? Потерями света в анализаторе пренебречь.

9. На сколько процентов уменьшается интенсивность света после прохождения через призму Николя, если потери света составляют 10 %?

Модуль 6. Геометрическая и волновая оптика

Вариант 11

1. Танцовщица в репетиционном классе движется со скоростью 1,5 м/с под углом 30° к зеркальной стене. С какой скоростью она приближается к своему изображению?

2. Определите фокусное расстояние линзы, если при расстоянии 20 см от линзы до предмета мнимое изображение получается на расстоянии 10 см от линзы.

3. Если k – целое число, то при какой оптической разности хода наблюдается интерференционный максимум двух когерентных волн, пришедших в некоторую точку пространства? Ответ поясните.

4. Между двумя плоскопараллельными стеклянными пластинками заключен тонкий воздушный клин. На пластинки нормально падает монохроматический свет ($\lambda = 0,7$ мкм). Определите угол клина α , если в отраженном свете на протяжении $l = 1$ см наблюдается $N = 10$ интерференционных полос.

5. Во сколько раз в опыте Юнга нужно изменить расстояние до экрана, чтобы 3-я темная полоса оказалась на том же расстоянии от нулевой, что и 7-я темная в прежней интерференционной картине?

6. Точка наблюдения находится на расстоянии 5 м от волновой поверхности. Радиус 5-й зоны Френеля равен 1 см. Какой длине волны соответствует это построение?

7. Зеленый свет ($\lambda = 500$ нм) падает на щель шириной 8 мкм. Определите, под каким углом наблюдаются 1-й и 2-й максимумы.

8. Естественный луч света падает на полированную поверхность пластины, погруженной в жидкость. Отраженный от пластины плоскополяризованный луч составляет угол φ с падающим лучом. Определите: 1) показатель преломления жидкости, если $n_{\text{пл}} = 1,5$, $\varphi = 97^\circ$; 2) показатель преломления пластины,

если $n_{\text{ж}} = 1,6$, $\varphi = 113^\circ$; 3) угол падения света, если $n_{\text{ж}} = 1,33$, $n_{\text{пл}} = 1,63$.

9. Пучок плоскополяризованного света с длиной волны $\lambda = 589$ нм падает нормально на пластинку из исландского шпата, вырезанную параллельно его оптической оси. Показатели преломления для обыкновенного и необыкновенного лучей в кристалле $n_o = 1,66$ и $n_e = 1,49$ соответственно. Найдите длины волн обыкновенного и необыкновенного лучей.

Модуль 6. Геометрическая и волновая оптика

Вариант 12

1. Найти показатель преломления света в скипидаре, если при угле падения 45° угол преломления равен 30° .

2. Определите оптическую силу линзы, если при расстоянии 40 см от линзы до предмета действительное изображение получается на расстоянии 120 см от линзы.

3. Лучи белого света под углом $i = 45^\circ$ падают на тонкую прозрачную пластинку, которая при этом окрашена в зеленый цвет. Покажите, что при уменьшении угла i цвет пластинки должен измениться, переходя к красному концу спектра, а при увеличении угла – к фиолетовому.

4. Между двумя плоскопараллельными стеклянными пластинками заключен очень тонкий воздушный клин. На пластинки нормально падает монохроматический свет ($\lambda = 0,5$ мкм). Определите угол клина α , если в отраженном свете на протяжении $l = 1$ см наблюдается $N = 20$ интерференционных полос.

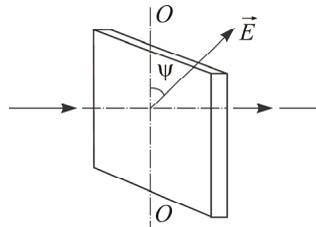
5. В интерферометре на пути одного из пучков ($\lambda = 480$ нм) поместили тонкую пластинку из плавленого кварца с показателем преломления $n = 1,46$. При этом интерференционная картина сместилась на $m = 69$ полос. Определите толщину d кварцевой пластинки.

6. На плоскость с круглым отверстием радиусом 1 мм падает плоская волна ($\lambda = 600$ нм). Где нужно поставить экран, чтобы в отверстии укладывалось четыре зоны Френеля?

7. На сколько изменится угловое расстояние между первыми дифракционными минимумами, если ширину щели $a = 0,01$ мм увеличить в 2 раза? Длина волны падающего света $\lambda = 700$ нм.

8. Угол преломления луча в жидкости $\beta = 35^\circ$. Определите показатель преломления n жидкости, если известно, что отраженный пучок света максимально поляризован.

9. Плоскополяризованный луч падает на двоякопреломляющую пластинку, вырезанную параллельно оптической оси OO (рисунок). Плоскость поляризации падающего луча составляет с оптической осью угол $\psi = 30^\circ$. Толщина пластинки такова, что разность фаз колебаний вектора \vec{E} в обыкновенном и необыкновенном лучах на выходе из пластинки составляет $\pi/2$. Каким будет свет после прохождения пластинки?



Модуль 6. Геометрическая и волновая оптика

Вариант 13

1. Под каким углом должен падать луч на поверхность стекла ($n = 1,5$), чтобы угол преломления был в 2 раза меньше угла падения?

2. На каком расстоянии от линзы с фокусным расстоянием 30 см надо поставить экран, чтобы получить четкое изображение свечи? Расстояние от свечи до линзы 40 см.

3. Плоская световая волна длиной λ_0 в вакууме падает по нормали на прозрачную пластинку с показателем преломления n . При каких толщинах b пластинки отраженная волна будет иметь максимальную интенсивность?

4. На тонкий стеклянный клин ($n = 1,55$) падает нормально монохроматический свет. Двугранный угол α между поверхностями клина равен $2'$. Определите длину световой волны λ , если

расстояние Δx между соседними интерференционными максимумами в отраженном свете равно 0,33 мм.

5. Кольца Ньютона наблюдают в отраженном свете. Они формируются в тонком воздушном слое между плоской поверхностью и сферической радиусом 50 см. Определите длину волны света, если радиус 3-го светлого кольца равен 0,09 см, а 23-го – 0,25 см.

6. Радиус 5-й зоны Френеля равен 0,5 мм. Расстояние от точки наблюдения до фронта сферической волны 2 м. На каком расстоянии от точки наблюдения находится источник, если $\lambda = 0,5$ мкм?

7. На щель шириной $2 \cdot 10^{-3}$ см падает нормально параллельный пучок монохроматического света с длиной $\lambda = 5 \cdot 10^{-5}$ см. Найдите ширину изображения 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.

8. Предельный угол полного внутреннего отражения для некоторого вещества равен 45° . Чему равен для этого вещества угол полной поляризации?

9. Естественный свет падает на систему из двух скрещенных николей, между которыми находится кварцевая пластинка. Определите минимальную толщину пластинки, при которой эта система будет пропускать $\eta = 0,3$ светового потока, если постоянная вращения кварца $[\varphi_0] = 17$ град/мм.

Модуль 6. Геометрическая и волновая оптика

Вариант 14

1. Луч падает на поверхность воды ($n = 1,33$) под углом 40° . Под каким углом должен упасть луч на поверхность стекла ($n = 1,5$), чтобы угол преломления оказался таким же?

2. С помощью линзы получено действительное увеличенное изображение предмета. Пусть a – расстояние от линзы до

предмета; f – расстояние до фокуса линзы. Укажите на оптической оси область расположения предмета. Сделайте чертеж.

3. Найдите минимальную толщину пленки с показателем преломления 1,33, при которой свет с длиной волны 0,64 мкм испытывает максимальное отражение, а свет с длиной волны 0,4 мкм не отражается совсем. Угол падения света равен 30° .

4. Известно, что свет излучается атомами при переходе из возбужденного состояния в нормальное. Процесс излучения отдельного атома длится конечное время. За это время атом излучает «оборванную синусоиду» (цуг волн). Определите время излучения отдельного атома, если пространственная протяженность цуга порядка 1,5 м.

5. Установка для наблюдения колец Ньютона освещается монохроматическим светом с длиной волны 600 нм, падающим нормально. Найдите толщину воздушного слоя между линзой и стеклянной пластинкой в том месте, где наблюдается 4-е темное кольцо в отраженном свете.

6. Дифракционная картина наблюдается на расстоянии 6 м от точечного источника монохроматического света ($\lambda = 4,5 \cdot 10^{-7}$ м). Где находится диафрагма с круглым отверстием, диаметр которого 0,5 см, если в отверстии укладывается 10 зон Френеля?

7. Чему равна постоянная дифракционной решетки, если для того, чтобы увидеть красную линию ($\lambda = 700$ нм) в спектре 2-го порядка, зрительную трубу пришлось установить под углом 30° к оси коллиматора? Какое число штрихов нанесено на 1 см длины этой решетки? Свет падает на решетку нормально.

8. Луч света проходит через жидкость, налитую в стеклянный сосуд ($n = 1,5$), и отражается от дна. Отраженный луч полностью поляризован при падении его на дно сосуда под углом $42^\circ 37'$. Найдите показатель преломления жидкости и определите, под каким углом должен падать на дно сосуда луч света, идущий в этой жидкости, чтобы наступило полное внутреннее отражение.

9. Пучок света последовательно проходит через два николя, плоскости пропускания которых образуют между собой угол $\alpha = 40^\circ$. Коэффициент поглощения k каждого николя равен 0,15. Найдите, во сколько раз пучок света, выходящий из второго николя, ослаблен по сравнению с пучком, падающим на первый николю.

Модуль 6. Геометрическая и волновая оптика

Вариант 15

1. Солнечный свет падает на поверхность воды ($n = 1,33$) в сосуде. Каковы углы падения и преломления, если угол отражения 30° ?

2. Какое должно быть расстояние между объективом фотоаппарата и фотопластинкой при съемке объекта, расположенного на расстоянии, равном 2 м от объектива, с фокусным расстоянием 13,5 см?

3. На тонкую пленку воды под углом $\alpha = 52^\circ$ падает параллельный пучок белого света. При какой толщине пленки зеркально отраженный свет окрашен в желтый цвет ($\lambda = 0,6$ мкм) наиболее сильно?

4. Между двумя плоскопараллельными стеклянными пластинками положили очень тонкую проволочку, расположенную параллельно линии соприкосновения пластинок и находящуюся на расстоянии $l = 75$ мм от нее. В отраженном свете ($\lambda = 0,5$ мкм) на верхней пластинке видны интерференционные полосы. Определите диаметр d проволочки, если на протяжении $a = 30$ мм насчитывается $m = 16$ светлых полос.

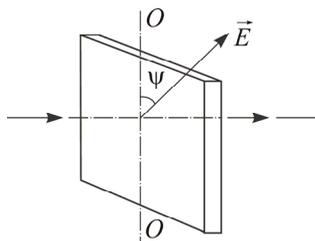
5. Как изменится расстояние между соседними интерференционными максимумами в опыте с зеркалами Френеля, если вместо красного света ($\lambda = 650$ нм) взять зеленый ($\lambda = 500$ нм)?

6. Вычислите площадь трех зон Френеля для случая плоской волны. Расстояние от точки наблюдения до фронта волны 10 м. Длина волны 600 нм.

7. На щель падает нормально параллельный пучок света с длиной волны λ . Ширина щели равна b . Под каким углом будет наблюдаться 3-й дифракционный максимум света?

8. Естественный свет проходит через поляризатор и анализатор, поставленные так, что угол между их главными плоскостями равен α . Как поляризатор, так и анализатор поглощают 8 % падающего на них света. Интенсивность луча, вышедшего из анализатора, равна 9 % интенсивности естественного света, падающего на поляризатор. Найдите угол α .

9. Плоскополяризованный свет падает на двоякопреломляющую пластинку, вырезанную параллельно оптической оси OO (рисунок). В общем случае за пластинкой образуется луч, поляризованный по эллипсу. Если угол ψ между оптической осью и плоскостью поляризации падающего луча равен $\pi/2$, то каким будет луч за пластинкой?



Модуль 6. Геометрическая и волновая оптика

Вариант 16

1. На горизонтальном дне водоема, имеющего глубину 1,2 м, лежит плоское зеркало. Луч света, преломившись на поверхности воды, отражается от зеркала и выходит в воздух. Расстояние от места вхождения луча в воду до места выхода отраженного луча из воды равно 1,5 м. Найдите угол падения луча. Показатель преломления воды 1,33.

2. Расстояние между свечой и стенкой 1 м. На каком расстоянии от свечи нужно поместить линзу с фокусным расстоянием 9 см, чтобы на стене получилось резкое уменьшенное изображение свечи?

3. Если k – целое число, то при какой оптической разности хода наблюдается интерференционный минимум двух когерент-

ных волн, пришедших в некоторую точку пространства? Ответ поясните.

4. На очень тонкий стеклянный клин нормально к поверхности падает пучок белого света. Угол между поверхностями клина $9''$. Найдите расстояние между фиолетовыми ($\lambda_1 = 0,4$ мкм) и красными ($\lambda_2 = 0,78$ мкм) краями максимума 1-го порядка в отраженном свете, если показатели преломления стекла для фиолетовых и красных лучей равны 1,53 и 1,51 соответственно.

5. Расстояние между щелями в опыте Юнга $d = 0,5$ мм, $\lambda = 550$ нм. Каково расстояние от щелей до экрана L , если расстояние между соседними темными полосами на нем равно 1 мм?

6. Дифракционная картина наблюдается на расстоянии l от точечного источника света ($\lambda = 500$ нм). На расстоянии $0,4l$ от источника помещена круглая непрозрачная преграда диаметром 0,5 см. Чему равно расстояние l , если преграда занимает только две первые зоны Френеля?

7. Чему равна постоянная дифракционной решетки, если эта решетка может разрешить в 1-м порядке линии спектра калия $\lambda_1 = 404,4$ нм и $\lambda_2 = 404,7$ нм? Ширина решетки 3 см.

8. Предельный угол полного отражения пучка света на границе жидкости с воздухом равен 43° . Определите угол Брюстера для падения луча из воздуха на поверхность этой жидкости.

9. Кварцевую пластинку поместили между скрещенными николями. При какой наименьшей толщине d_{\min} кварцевой пластинки поле зрения между николями будет максимально просветлено? Постоянная вращения кварца $[\varphi_0] = 27$ град/мм.

Модуль 6. Геометрическая и волновая оптика

Вариант 17

1. Вычислите предельный угол полного отражения для оргстекла ($n = 1,4$).

2. На всю поверхность собирающей линзы, имеющей диаметр 10 см и оптическую силу 5 дптр, направлен пучок лучей,

параллельных главной оптической оси. На каких расстояниях от линзы надо поставить экран, чтобы на нем получился светлый круг диаметром 5 см?

3. Разность хода лучей от двух когерентных источников света до некоторой точки на экране равна 4,36 мкм. Каков будет результат интерференции света в этой точке, если длина волны света 435,8 нм?

4. Известно, что свет излучается атомами при переходе из возбужденного состояния в нормальное. Процесс излучения отдельного атома длится конечное время. За это время атом излучает «оборванную синусоиду» (цуг волн). Определите время излучения отдельного атома, если пространственная протяженность цуга порядка 3 м.

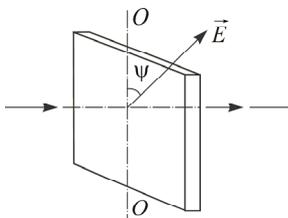
5. От двух точечных когерентных источников, находящихся на одной прямой на расстоянии 0,5 мм друг от друга, наблюдается интерференционная картина на экране, удаленном от источников на расстояние 5 м. Найдите ширину интерференционной полосы, если $\lambda = 600$ нм.

6. Точечный источник света с длиной волны $\lambda = 0,5$ мкм расположен на расстоянии $a = 100$ см перед диафрагмой с круглым отверстием радиусом 1 мм. Найдите расстояние b от диафрагмы до точки наблюдения, для которой число зон Френеля в отверстии равно трем.

7. На дифракционную решетку нормально падает пучок света. Максимум 3-го порядка наблюдается под углом $36^\circ 48'$ к нормали. Найдите постоянную дифракционной решетки, выраженную в длинах волн падающего света.

8. Чему равен угол между главными плоскостями поляризатора и анализатора, если интенсивность естественного света, прошедшего через анализатор, уменьшается в 4 раза? Поглощением света пренебречь.

9. Плоскополяризованный свет падает на двоякопреломляющую пластинку, вырезанную параллельно оптической оси OO (рисунок). В общем случае за пластинкой образуется



луч, поляризованный по эллипсу. Если угол ψ между оптической осью и плоскостью поляризации падающего луча равен нулю, то каким будет луч за пластинкой?

Модуль 6. Геометрическая и волновая оптика

Вариант 18

1. Водолаз, стоя на дне, видит отраженными от поверхности воды те части горизонтального дна, которые расположены от него на расстоянии 15 м и больше. Рост водолаза 1,8 м. Показатель преломления воды 1,33. Найдите глубину водоема.

2. Найдите увеличение линзы, если расстояние от линзы до предмета 40 см, а фокусное расстояние линзы 30 см.

3. Оптическая разность хода Δ двух интерферирующих волн монохроматического света равна $0,3\lambda$. Определите разность фаз $\Delta\phi$.

4. Поверхности стеклянного клина образуют между собой угол $\alpha = 0,2'$. На клин нормально к его поверхности падает пучок лучей монохроматического света с длиной волны $\lambda = 0,55$ мкм. Определите ширину b интерференционной полосы.

5. Кольца Ньютона образуются между плоским стеклом и линзой с радиусом кривизны 8,6 м. Монохроматический свет падает нормально. Диаметр 4-го темного кольца равен 9 мм. Найдите длину волны света.

6. Свет монохроматического источника падает нормально на диафрагму с круглым отверстием, диаметр которого 3 мм. За диафрагмой на расстоянии 2 м находится экран, в центре которого темное пятно. Определите длину волны падающего света.

7. Сколько полос будет видно на экране за щелью, если на нее падает плоская монохроматическая волна ($\lambda = 600$ нм)? Ширина щели $a = 0,24 \cdot 10^{-5}$ м.

8. Угол между главными плоскостями поляризатора и анализатора равен 45° . Во сколько раз уменьшится интенсивность света, выходящего из анализатора, если угол увеличить до 60° ?

9. Пластинку кварца толщиной $d = 2$ мм, вырезанную перпендикулярно оптической оси, поместили между параллельными николями, в результате чего плоскость поляризации света повернулась на угол $\varphi = 53^\circ$. Какова должна быть толщина пластинки, чтобы свет, с которым проводился опыт, не прошел через анализатор?

Модуль 6. Геометрическая и волновая оптика

Вариант 19

1. Чему равен абсолютный показатель преломления среды, скорость света в которой $200\,000$ км/с?

2. На каком расстоянии от двояковыпуклой линзы, фокусное расстояние которой 40 см, надо поместить предмет, чтобы его действительное изображение получилось в натуральную величину?

3. Стеклянная пластинка покрыта с обеих сторон пленкой прозрачного вещества. Для света с длиной волны $\lambda = 480$ нм показатель преломления пластинки $n = 1,44$, показатель преломления пленки $n' = 1,20$. При какой минимальной толщине пленки d свет указанной длины волны будет проходить через пластинку без потерь на отражение?

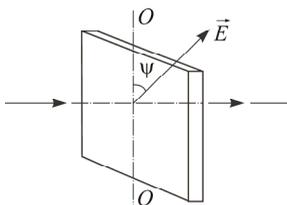
4. На тонкий стеклянный клин в направлении нормали к его поверхности падает монохроматический свет ($\lambda = 600$ нм). Определите угол α между поверхностями клина, если расстояние b между смежными интерференционными минимумами в отраженном свете равно 4 мм.

5. На какую величину a изменится оптическая разность хода интерферирующих лучей в опыте Юнга при переходе от середины одной интерференционной полосы к середине другой полосы?

6. Дифракционная картина наблюдается на расстоянии l от точечного источника света ($\lambda = 6 \cdot 10^{-5}$ см). На расстоянии $0,5l$ от источника помещена круглая непрозрачная преграда диаметром 1 см. Чему равно расстояние l , если преграда закрывает только центральную зону Френеля?

7. Постоянная дифракционной решетки в 4 раза больше длины световой волны, нормально падающей на ее поверхность. Определите угол между двумя первыми симметричными дифракционными максимумами.

8. Пучок естественного света, идущий в воде, отражается от грани алмаза, погруженного в воду. При каком угле падения отраженный свет полностью поляризован?



9. Плоскополяризованный свет падает на «пластинку в полволны» так, что ее оптическая ось составляет с плоскостью поляризации падающего луча угол $\psi = 45^\circ$ (рисунок). Каким будет свет после прохождения пластинки?

Модуль 6. Геометрическая и волновая оптика

Вариант 20

1. Найдите скорость распространения света в скипидаре, если при угле падения 45° угол преломления 30° .

2. Собирающая линза дает на экране изображение предмета с увеличением, равным 2. Расстояние от предмета до линзы превышает ее фокусное расстояние на величину 6 см. Найдите расстояние от линзы до экрана.

3. В некоторую точку пространства приходят волны видимого света с оптической разностью хода 2 мкм. Определите,

усилится или ослабнет в этой точке свет, если длина волны 600 нм.

4. Свет излучается отдельным атомом в результате перехода из возбужденного состояния в нормальное. Этот процесс продолжается около 10^{-8} с. За это время атом излучает «оборотную синусоиду» (цуг волн). Найдите пространственную протяженность цуга.

5. Определите расстояние между мнимыми источниками в опытах с зеркалами Френеля, если расстояние между темными полосами на экране равно 3 мм, а расстояние от мнимых источников до экрана 2 м. Длина световой волны $\lambda = 0,6$ мкм.

6. Вычислите радиусы первых пяти зон Френеля для случая плоской волны. Расстояние от волновой поверхности до точки наблюдения равно 1 м. Длина волны $\lambda = 5 \cdot 10^{-7}$ м.

7. На дифракционную решетку нормально падает пучок света. Красная линия ($\lambda = 630$ нм) видна в спектре 3-го порядка под углом $\gamma = 60^\circ$. Найдите: 1) какая спектральная линия видна под этим же углом в спектре 4-го порядка; 2) какое число штрихов на 1 мм длины имеет решетка; 3) чему равна угловая дисперсия этой решетки для линии $\lambda = 630$ нм в спектре 4-го порядка.

8. Анализатор в 2 раза уменьшает интенсивность света, проходящего к нему от поляризатора. Определите угол между главными плоскостями поляризатора и анализатора. Потерями света в анализаторе можно пренебречь.

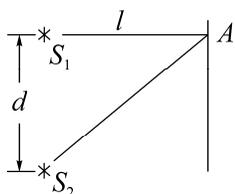
9. При прохождении света через трубку длиной $l_1 = 20$ см, содержащую раствор сахара с концентрацией $C_1 = 10\%$, плоскость поляризации повернулась на угол $\varphi_1 = 13,3^\circ$. В другом растворе сахара, налитом в трубку длиной $l_2 = 15$ см, плоскость поляризации повернулась на угол $\varphi_2 = 5,2^\circ$. Определите концентрацию C_2 второго раствора.

Модуль 6. Геометрическая и волновая оптика

Вариант 21

1. Алмазная пластина освещается фиолетовым светом частотой $0,75 \cdot 10^{15}$ Гц. Найдите длины волн фиолетового света в вакууме и в алмазе, если показатель преломления алмаза для этих волн 2,465.

2. Предмет находится на расстоянии 8 см от переднего фокуса линзы, а его изображение – на экране на расстоянии 18 см от заднего фокуса линзы. Найдите фокусное расстояние линзы.



3. Два когерентных источника света S_1 и S_2 с длиной волны 0,5 мкм находятся на расстоянии $d = 2$ мм друг от друга. Параллельно линии, соединяющей источники, расположен экран на расстоянии $l = 2$ м от них. Что будет наблюдаться в т. A : свет или темнота?

4. Мыльная пленка, расположенная вертикально, образует клин вследствие стекания жидкости. Наблюдая интерференционные полосы в отраженном свете ($\lambda = 546,1$ нм), находим, что расстояние между пятью полосами равно 2 см. Найдите угол клина в секундах. Свет падает перпендикулярно поверхности пленки. Показатель преломления мыльной воды 1,33.

5. В опыте Юнга сначала берется свет с длиной волны $\lambda_1 = 600$ нм, а затем λ_2 . Какова длина волны во втором случае, если 7-я светлая полоса в первом случае совпадает с 10-й темной во втором?

6. На пути плоской волны ($\lambda = 600$ нм) расположен непрозрачный экран. Какое минимальное круглое отверстие нужно сделать в преграде, чтобы в центре дифракционной картины, получаемой на экране, за преградой был минимум? Экран расположен на расстоянии 2 м от преграды.

7. На дифракционную решетку нормально падает пучок света от разрядной трубки. Чему должна быть равна постоянная

дифракционной решетки, чтобы в направлении $\gamma = 41^\circ$ совпадали максимумы двух линий: $\lambda_1 = 656,3$ нм и $\lambda_2 = 410,2$ нм?

8. Пучок света, идущий в воздухе, падает на поверхность жидкости под углом $\alpha = 54^\circ$. Определите угол преломления пучка, если отраженный пучок полностью поляризован.

9. Угол между плоскостями поляризации двух призм Николя равен 60° . При прохождении света в каждом из николей теряется 10 % падающего на него света. Во сколько раз изменится интенсивность света, прошедшего через николи, если угол между плоскостями поляризации уменьшить до 45° ?

Модуль 6. Геометрическая и волновая оптика

Вариант 22

1. Длина световой волны в воде 435 нм. Какова длина волны в воздухе, если $n_{\text{воды}} = 1,33$?

2. Рассеивающая линза с фокусным расстоянием -10 см дает мнимое изображение предмета, уменьшенное в 2 раза. На каком расстоянии от линзы находится предмет? Постройте ход лучей и изображение предмета.

3. Свет от источника S приходит в точку P , отразившись от дна стеклянного сосуда ($n_{\text{ст}} = 1,5$) и от границы раздела воздуха с водой ($n_{\text{воды}} = 1,33$). С какой оптической разностью хода приходят лучи в точку P ?

4. Мыльная пленка, расположенная вертикально, освещается светом с длиной волны $\lambda = 546$ нм. При наблюдении в отраженном свете на поверхности пленки видны темные и светлые полосы, причем на протяжении $l = 2$ см насчитывается пять темных полос. Считая, что свет падает на поверхность пленки нормально, определите угол между поверхностями пленки. Показатель преломления воды $n = 1,33$.

5. Кольца Ньютона получают с помощью плосковыпуклой линзы с радиусом R_1 , положенной на сферическую вогнутую поверхность с радиусом $R_2 > R_1$. Определите радиус m -го темного кольца в проходящем свете, если длина волны равна λ .

6. Между источником света ($\lambda = 6 \cdot 10^{-5}$ см) и экраном расположена круглая непрозрачная преграда диаметром 0,2 см. Чему равно расстояние между преградой и экраном, если преграда перекрывает две первые зоны Френеля?

7. На непрозрачную пластину с узкой щелью падает нормально плоская световая волна ($\lambda = 600$ нм). Угол φ отклонения лучей, соответствующих 2-му дифракционному максимуму, равен 20° . Определите ширину щели.

8. Угол Брюстера α_B при падении света из воздуха на кристалл каменной соли равен 57° . Если скорость света в вакууме $c = 3 \cdot 10^8$ м/с, то чему равна скорость света в этом кристалле?

9. Пластинку определенной толщины d вырезали из двоякопреломляющего вещества параллельно оптической оси, n_o , n_e – показатели преломления обыкновенного и необыкновенного лучей. Напишите условие, которому должна удовлетворять толщина пластинки, чтобы она могла называться «пластинкой в четверть волны».

Модуль 6. Геометрическая и волновая оптика

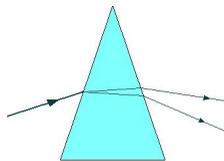
Вариант 23

1. У призмы с показателем преломления 1,4142 и преломляющим углом 30° одна грань посеребрена. Луч света падает на непосеребренную грань под углом 45° и после отражения выходит из призмы через эту же грань. Найдите угол между падающим и выходящим лучами.

2. Найдите оптическую силу рассеивающей линзы, дающей изображение предмета на расстоянии 6 см от самого предмета. Высота предмета 8 см, высота изображения 4 см.

3. Найдите все длины волн видимого света (от 0,76 до 0,38 мкм), которые будут максимально усилены при оптической разности хода интерферирующих волн $\Delta = 1,8$ мкм.

4. Естественный свет проходит через стеклянную призму и разлагается в спектр (рисунок). Опишите получившийся спектр и укажите длины волн, соответствующие цветам спектра.



5. В интерферометре Майкельсона на пути одного из интерферирующих пучков света ($\lambda = 590$ нм) поместили закрытую с обеих сторон стеклянную трубку длиной $l = 10$ см, откачанную до высокого вакуума. При заполнении трубки хлористым водородом произошло смещение интерференционной картины. Когда хлористый водород был заменен бромистым водородом, смещение интерференционной картины возросло на $m = 42$ полосы. Определите разность Δn показателей преломления бромистого и хлористого водорода.

6. Вычислите суммарную площадь первых десяти зон Френеля для случая плоской волны. Расстояние от волновой поверхности до экрана 2 м. Длина волны $\lambda = 6 \cdot 10^{-7}$ м.

7. Свет с длиной волны 530 нм падает на решетку, период которой равен 1,5 мкм, а общая длина 12 мм. Определите угловую ширину главного максимума и разрешающую способность решетки.

8. Солнечный свет, отраженный от поверхности воды ($n = 1,33$), полностью поляризован. Определить угловую высоту φ Солнца над горизонтом.

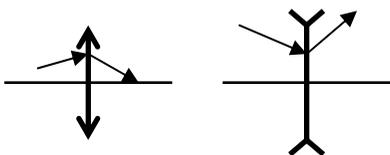
9. Раствор глюкозы с концентрацией $C_1 = 0,28$ г/см³, налитый в стеклянную трубку, поворачивает плоскость поляризации света, проходящего через этот раствор, на угол $\varphi_1 = 32^\circ$. Определить концентрацию C_2 раствора в другой трубке такой же длины, если он поворачивает плоскость поляризации на угол $\varphi_2 = 24^\circ$.

Модуль 6. Геометрическая и волновая оптика

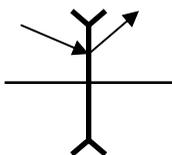
Вариант 24

1. Световой луч падает на стеклянную плоскопараллельную пластину толщиной 6 см. Угол падения 60° . Показатель прелом-

ления стекла 1,5. Вычислите смещение луча при его прохождении сквозь пластину.



2. На рисунках задана главная оптическая ось собирающей и рассеивающей линз и ход одного из лучей. Найдите построением положение фокусов линзы.



3. В некоторую точку пространства приходят волны с оптической разностью хода 2 мкм. Определите, усилится или ослабнет свет в этой точке для волн длиной 400 нм (фиолетовый свет).

4. Две плоскопараллельные стеклянные пластинки приложены одна к другой так, что между ними образовался воздушный клин с углом α , равным $30''$. На одну из пластинок падает нормально монохроматический свет ($\lambda = 0,6$ мкм). На каком расстоянии l_1 от линии соприкосновения пластинок будет наблюдаться в отраженном свете 1-я светлая полоса?

5. Определите радиус кривизны плосковыпуклой линзы, которая вместе с пластинкой позволяет наблюдать кольца Ньютона при освещении желтой линией натрия ($\lambda = 589$ нм), причем в отраженном свете расстояние между 1-м и 2-м светлыми кольцами равно 0,5 мм.

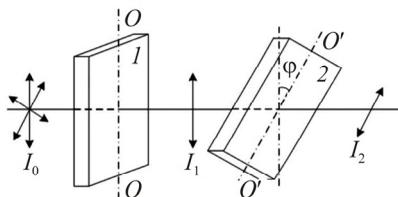
6. На пути плоской волны ($\lambda = 600$ нм) поставлена преграда с круглым отверстием диаметром 0,4 см. На каком расстоянии от отверстия должна находиться точка, по отношению к которой в отверстии должно уложиться 10 зон Френеля?

7. Дифракционная решетка содержит 600 штрихов на 1 мм. На нее падает свет с длиной волны 609 нм. Чему равен угол между вторыми максимумами?

8. На пути естественного света помещены две пластинки турмалина. После прохождения пластинки l свет полностью поляризован. Пусть I_1 и I_2 – интенсивности света, прошедшего со-

ответственно пластинки 1 и 2, и $I_2 = 0$. Чему равен угол между направлениями OO и $O'O'$?

9. Никотин (чистая жидкость), содержащийся в стеклянной трубке длиной $l = 8$ см, поворачивает плоскость поляризации желтого света натрия на угол $\varphi = 136,6^\circ$. Плотность никотина $\rho = 1,01$ г/см³. Определите удельное вращение $[\varphi_0]$ никотина.

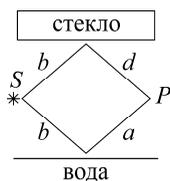


Модуль 6. Геометрическая и волновая оптика

Вариант 25

1. Какова должна быть минимальная высота вертикального зеркала, чтобы человек ростом H мог видеть в нем свое изображение во весь рост? На какой высоте должен находиться нижний край этого зеркала?

2. Световой луч распространяется вдоль оси OX от точки $x_0 = 0$ м до точки $x_1 = 0,6$ м. Показатель преломления среды изменяется по закону $n(x) = 1 + x$, где координата x выражена в метрах. Определите время пути светового луча между точками.



3. Чему равна оптическая разность хода лучей, сходящихся в точке P (рисунок)?

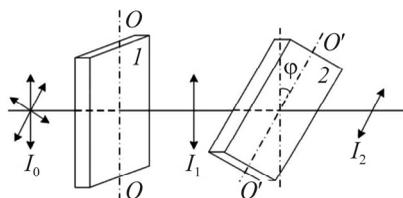
4. Мыльная пленка, расположенная вертикально, освещается светом с длиной волны $\lambda = 532$ нм. При наблюдении в проходящем свете на поверхности пленки видны темные и светлые полосы, причем на протяжении $l = 1$ см насчитывается три темных полосы. Считая, что свет падает на поверхность пленки нормально, определите угол между поверхностями пленки. Показатель преломления воды $n = 1,33$.

5. В опыте Юнга экран был удален от отверстия на расстоянии 5 м. Расстояние между отверстиями 0,5 см, расстояние от 3-го интерференционного максимума до центральной полосы

0,15 см. Определите расстояние между соседними светлыми полосами.

6. Дифракционная картина наблюдается на расстоянии 4 м от точечного источника света ($\lambda = 5 \cdot 10^{-7}$ м). Посередине между экраном и источником света помещена диафрагма с круглым отверстием. При каком радиусе отверстия центр дифракционных колец, наблюдаемых на экране, будет наиболее темным?

7. На щель нормально падает параллельный пучок света с длиной волны λ . Ширина щели равна b . Под каким углом будет наблюдаться 3-й дифракционный минимум?



8. На пути естественного света помещены две пластинки турмалина. После прохождения пластинки 1 свет полностью поляризован. Пусть I_1 и I_2 – интенсивности света, прошедшего соответственно пластинки 1 и 2, и $I_2 = I_1/4$. Чему равен угол ϕ между направлениями OO' и $O'O''$?

9. Угол поворота плоскости поляризации желтого света натрия при прохождении через трубку с раствором сахара $\phi = 40^\circ$. Длина трубки $l = 15$ см. Удельное вращение сахара $[\phi_0] = 66,5$ град/(дм·г/см³). Определите концентрацию C сахара в растворе.

**Модуль 7. КВАНТОВАЯ ОПТИКА.
ОСНОВЫ КВАНТОВОЙ МЕХАНИКИ
И АТОМНОЙ ФИЗИКИ**

*Модуль 7. Квантовая оптика.
Основы квантовой механики и атомной физики*

Вариант 1

1. Какова температура печи, если известно, что из отверстия в ней площадью 4 см^2 излучается за 1 с энергия $22,7 \text{ Дж}$? Излучение считать излучением абсолютно черного тела.

2. Какова должна быть длина волны лучей, падающих на цинковую пластинку ($A_{\text{вых}} = 4,0 \text{ эВ}$), чтобы максимальная скорость фотоэлектронов была равна 10^6 м/с ?

3. На грань кристалла никеля падает параллельный пучок электронов. Когда угол между гранью кристалла и пучком составляет 64° , наблюдается максимальное отражение электронов, соответствующее дифракционному максимуму первого порядка. Принимая расстояние между атомными плоскостями кристалла равным 200 пм , определите длину волны де Бройля электронов и их скорость.

4. Пучок электронов с энергией $W = 10 \text{ эВ}$ падает на щель шириной $a = 0,1 \text{ нм}$. Если электрон прошел через щель, то его координата известна с неопределенностью $\Delta x = a$. Оцените получаемую при этом относительную неопределенность в определении импульса $\Delta p/p$.

5. Напишите уравнение Шредингера для электрона, находящегося в водородоподобном атоме.

6. На какое минимальное расстояние приблизится α -частица с кинетической энергией $K = 40 \text{ кэВ}$ (при лобовом столкновении) к покоящемуся ядру атома свинца?

7. Сколько квантов различных энергий может испускать атом водорода, если его электрон находится на 3-й орбите? Изобразите схему переходов.

8. Что характеризуют квантовые числа: главное, орбитальное и магнитное? Какие значения они могут принимать?

9. Атом какого элемента имеет электронную конфигурацию вида $1s^2 2s^2 2p^6 3s^?$? Ответ поясните.

10. Какой процесс в оптическом квантовом генераторе называется спонтанным (самопроизвольным) излучением.

***Модуль 7. Квантовая оптика.
Основы квантовой механики и атомной физики***

Вариант 2

1. В излучении абсолютно черного тела максимум спектральной плотности энергетической светимости падает на длину волны 680 нм. Сколько энергии излучает это тело площадью 1 см^2 за 1 с и какова потеря его массы за 1 с вследствие излучения?

2. Найдите частоту света, вырывающего с поверхности металла электроны, полностью задерживающиеся обратным потенциалом 3 В. Фотоэффект у этого металла начинается при частоте падающего света $6 \cdot 10^{14}$ Гц. Найдите работу выхода электрона из металла.

3. На узкую щель шириной $a = 1$ мкм направлен параллельный пучок электронов, имеющих скорость $v = 3,65 \cdot 10^6$ м/с. Учитывая волновые свойства электронов, определите расстояние x между двумя максимумами интенсивности первого порядка в дифракционной картине, полученной на экране, отстоящем на $L = 10$ см от щели.

4. Оцените относительную ширину $\Delta\omega/\omega$ спектральной линии, если время жизни атома в возбужденном состоянии $\tau \approx 10$ нс, а длина волны излучаемого фотона $\lambda = 500$ нм.

5. Напишите уравнение Шредингера для линейного гармонического осциллятора. Учтите, что сила, возвращающая частицу в положение равновесия, $f = -kx$, где k – коэффициент пропорциональности; x – смещение частицы.

6. Напишите обобщенную формулу Пашена и назовите все величины, входящие в нее.

7. Вычислите энергию фотона, испускаемого при переходе электрона в атоме водорода с 4-го энергетического уровня на 2-й.

8. Каковы возможные значения орбитального и магнитного квантовых чисел для главного квантового числа $n = 5$? Ответ поясните.

9. Атом какого элемента имеет электронную конфигурацию вида $1s^2 2s^2 2p$? Ответ поясните.

10. Какой процесс в оптическом квантовом генераторе называется вынужденным излучением.

Модуль 7. Квантовая оптика.

Основы квантовой механики и атомной физики

Вариант 3

1. Вычислите энергию, излучаемую за время $t = 1$ мин с площади $S = 1 \text{ см}^2$ абсолютно черного тела, температура которого $T = 1000 \text{ К}$.

2. Монохроматический пучок света ($\lambda = 490 \text{ нм}$), падая нормально на поверхность, производит давление $p = 5 \text{ мкПа}$. Сколько квантов света падает каждую секунду на единицу площади этой поверхности? Коэффициент отражения света $\rho = 0,25$.

3. Электрон движется со скоростью $v = 2 \cdot 10^8 \text{ м/с}$. Определите длину волны де Бройля, учитывая изменение импульса электрона в зависимости от скорости.

4. Пучок электронов с энергией $W = 1 \text{ кэВ}$ падает на щель шириной $a = 1 \text{ нм}$. Если электрон прошел через щель, то его координата известна с неопределенностью $\Delta x = a$. Оцените получаемую при этом относительную неопределенность в определенности импульса $\Delta p/p$.

5. Напишите уравнение Шредингера для свободного электрона, движущегося в положительном направлении оси x со скоростью v . Найдите решение этого уравнения.

6. Определите наименьшее и наибольшее значения частоты излучения в ультрафиолетовой серии Лаймана спектра атома водорода.

7. Пользуясь теорией Бора, определите для однократно ионизированного атома гелия длину волны в спектре, соответствующую переходу со 2-й орбиты на 1-ю.

8. Сколько различных состояний соответствует главному квантовому числу $n = 4$? Ответ поясните.

9. Запишите электронную конфигурацию для атома Ca.

10. Какой процесс в оптическом квантовом генераторе называется накачкой?

Модуль 7. Квантовая оптика.

Основы квантовой механики и атомной физики

Вариант 4

1. Температура абсолютно черного тела изменилась при нагревании от 1327 до 1727 °С. На сколько изменилась при этом длина волны, на которую приходится максимум спектральной плотности излучательности и во сколько раз увеличилась максимальная спектральная плотность излучательности?

2. На металл падают рентгеновские лучи с длиной волны $\lambda = 1$ нм. Пренебрегая работой выхода, определите максимальную скорость фотоэлектронов.

3. Протон движется со скоростью $v = 1 \cdot 10^8$ м/с. Определите длину волны де Бройля, учитывая изменение импульса протона в зависимости от скорости.

4. Определите неопределенность Δx в определении координаты электрона, движущегося в атоме со скоростью $v = 1,5$ Мм/с, если неопределенность в определении скорости составляет $\Delta v = 0,1v$.

5. Почему при физической интерпретации волновой функции говорят не о самой ψ -функции, а о квадрате ее модуля $|\psi|^2$?

6. Вычислите для атомарного водорода длины волн первых трех спектральных линий серии Лаймана.

7. Фотон с энергией 16,5 эВ выбил электрон из невозбужденного атома водорода. Какую скорость будет иметь электрон вдали от ядра атома?

8. Запишите и поясните стационарное уравнение Шредингера для водородоподобной системы.

9. Какие квантовые числа имеет внешний валентный электрон Ca?

10. Назовите основные компоненты лазера.

Модуль 7. Квантовая оптика.

Основы квантовой механики и атомной физики

Вариант 5

1. Мощность потока энергии, излучаемой из смотрового окна мартеновской печи, $P = 2,17$ кВт. Площадь смотрового окошка $S = 6$ см². Определите температуру печи.

2. Красная граница фотоэффекта для платины лежит около 198 нм. Если платину прокалить при высокой температуре, то «красная граница» фотоэффекта станет равной 220 нм. На сколько электрон-вольт-прокаливание уменьшает работу выхода электронов?

3. Какую ускоряющую разность потенциалов U должен пройти электрон, чтобы длина волны де Бройля была равна 0,1 нм?

4. Электрон с кинетической энергией $W = 0,15$ кэВ находится в металлической пылинке диаметром $d = 10$ мкм. Оцените относительную неопределенность $\Delta v/v$, с которой может быть определена скорость электрона.

5. Электрон находится в бесконечно глубоком прямоугольном одномерном потенциальном ящике шириной l . Напишите уравнение Шредингера, описывающее состояние электрона, и решение этого уравнения.

6. Вычислите для атомарного водорода длины волн первых трех спектральных линий серии Пашена.

7. Какую наименьшую скорость должен иметь электрон, чтобы при соударении с невозбужденным атомом водорода вызвать излучение хотя бы одной линии спектра водорода? Вычислите длину волны этой линии.

8. Каков квантово-механический смысл первого боровского радиуса?

9. Сформулируйте квантово-механический принцип Паули. Объясните с помощью принципа Паули периодическую систему Менделеева.

10. Назовите основные типы лазеров.

Модуль 7. Квантовая оптика.

Основы квантовой механики и атомной физики

Вариант 6

1. Мощность потока энергии, излучаемой из смотрового окна мартеновской печи, $P = 2,17$ кВт. Площадь смотрового окошка $S = 6$ см². Определите температуру печи.

2. Давление излучения на плоское зеркало $p = 0,2$ Па. Определите поверхностную плотность потока световой энергии, падающей нормально на поверхность зеркала с коэффициентом отражения 0,6.

3. Какую ускоряющую разность потенциалов U должен пройти протон, чтобы длина волны де Бройля была равна 0,5 нм?

4. Во сколько раз длина волны де Бройля частицы меньше неопределенности ее координаты Δx , которая соответствует относительной неопределенности импульса в 10 %?

5. Электрону в потенциальной яме шириной l отвечает волновое число $k = \pi n/l$ ($n = 1, 2, 3, \dots$). Используя связь энергии электрона с волновым числом k , получите выражение для собственных значений энергии E_n .

6. У какого водородоподобного иона разность длин волн головных линий серии Бальмера и Лаймана равна 59,3 нм?

7. Определите энергию фотона, испускаемого атомом водорода при переходе электрона с 3-й орбиты на основную.

8. Сравните плотность вероятности обнаружения электрона в основном состоянии атома водорода согласно теории Бора и квантовой механики.

9. Атом какого элемента имеет электронную конфигурацию вида $1s^2 2s$? Ответ поясните.

10. Что такое оптический резонатор лазера?

Модуль 7. Квантовая оптика.

Основы квантовой механики и атомной физики

Вариант 7

1. Максимальная спектральная плотность излучательности абсолютно черного тела $r_{\max}^* = 4,16 \cdot 10^{11} \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-3}$. На какую длину волны она приходится?

2. Красная граница фотоэффекта рубидия 0,81 мкм. Определите скорость фотоэлектронов при облучении рубидия светом с длиной волны 0,40 мкм. Какую задерживающую разность потенциалов нужно приложить к фотоэлектрону, чтобы прекратился фототок?

3. Определите длину волны де Бройля электрона, если его кинетическая энергия $W = 1 \text{ кэВ}$.

4. Оцените наименьшую погрешность, с которой можно определить скорость электрона, локализованного в области пространства размером 1 мкм.

5. Частица находится в потенциальном ящике. Найдите отношение $(E_{n+1} - E_n)/E_n$ для двух случаев: 1) $n = 3$; 2) $n = 10$. Поясните полученные результаты.

6. Вычислите для атомарного водорода минимальную разрешающую способность $\lambda/\Delta\lambda$ спектрального прибора, при которой можно разрешить первые 20 линий серии Бальмера.

7. Вычислите энергию фотона, испускаемого при переходе электрона в атоме водорода с 3-го энергетического уровня на 1-й.

8. Каковы правила квантования орбитального и собственного механического моментов импульса электрона и их проекций на направление внешнего магнитного поля?

9. Запишите электронную конфигурацию для атома Ag.

10. Опишите механизмы ионной и ковалентной химических связей, возникающих при образовании молекул. Какой из указанных механизмов имеет чисто квантовую природу?

Модуль 7. Квантовая оптика.

Основы квантовой механики и атомной физики

Вариант 8

1. Определите энергетическую светимость зеркальной поверхности, если давление, производимое излучением, $p = 40$ мкПа. Лучи падают нормально к поверхности.

2. Квант света с длиной волны $\lambda = 232$ нм освобождает с поверхности платинового электрода ($A_{\text{вых}} = 6,3$ эВ) фотоэлектрон. Определите импульс, сообщаемый при этом электроду, если известно, что фотоэлектрон вылетает навстречу летящему кванту.

3. Определите длину волны де Бройля протона, если его кинетическая энергия $W = 1$ МэВ.

4. Оцените наименьшую погрешность, с которой можно определить скорость протона, локализованного в области пространства размером 10 мкм.

5. Электрон находится в потенциальной яме шириной $l = 0,5$ нм. Определите наименьшую разность ΔW энергетических уровней электрона. Ответ выразите в электрон-вольтах.

6. Вычислите для атомарного водорода длины волн первых трех спектральных линий серии Бальмера.

7. Вычислите длину волны, которую испускает ион атома лития (Li^{++}) при переходе со 2-го энергетического уровня на 1-й.

8. В чем суть принципа неразличимости тождественных частиц?
9. Какие квантовые числа имеет внешний валентный электрон Ag?
10. Каковы свойства лазерного излучения.

Модуль 7. Квантовая оптика.
Основы квантовой механики и атомной физики

Вариант 9

1. Из смотрового окошка излучается поток $\Phi_0 = 4$ кДж/мин. Определите температуру печи, если площадь окошка $S = 8$ см².
2. С какой скоростью должен двигаться электрон, чтобы его импульс был равен импульсу фотона с длиной волны $\lambda = 520$ нм?
3. Найдите длину волны де Бройля протона, прошедшего ускоряющую разность потенциалов $U = 1$ кВ.
4. Оцените минимальную кинетическую энергию электрона, локализованного в области пространства размером $l = 0,1$ нм.
5. Частица в потенциальном ящике шириной l находится в возбужденном состоянии ($n = 2$). Определите, в каких точках интервала ($0 < x < l$) плотность вероятности $|\psi_2(x)|^2$ нахождения частицы максимальна.
6. Вычислите длину волны спектральной линии атомарного водорода, частота которой равна разности частот следующих двух линий серии Лаймана: 102,6 и 97,27 нм. Какой серии принадлежит данная линия?
7. Атом водорода в основном состоянии поглотил квант света с длиной волны 121,5 нм. Определите номер энергетического уровня возбужденного атома водорода.
8. Какие частицы являются бозонами, а какие фермионами?
9. Запишите электронную конфигурацию для атома Na.
10. Какое условие необходимо для возникновения вынужденного излучения в веществе?

Модуль 7. Квантовая оптика.
Основы квантовой механики и атомной физики

Вариант 10

1. Температура абсолютно черного тела $T = 2000$ К. Определите длину волны, на которую приходится максимум энергии излучения, и спектральную плотность энергетической светимости, рассчитанную на интервал длин волн $\Delta\lambda = 1$ нм вблизи λ_{max} .

2. Катод фотоэлемента освещается светом с длиной волны λ . При отрицательном потенциале на аноде $-1,6$ В ток в цепи прекратится. При изменении длины волны света в 1,5 раза для прекращения тока потребовалось подать на анод отрицательный потенциал $-1,8$ В. Определите работу выхода материала катода.

3. Найдите длину волны де Бройля электрона, прошедшего ускоряющую разность потенциалов $U = 1$ МВ.

4. Электрон с кинетической энергией 10 эВ локализован в области пространства размером 1,0 мкм. Оцените относительную неопределенность скорости электрона.

5. Частица в потенциальном ящике шириной l находится в возбужденном состоянии ($n = 3$). Определите, в каких точках интервала ($0 < x < l$) плотность вероятности $|\psi_3(x)|^2$ нахождения частицы минимальна.

6. В спектре водородоподобного иона известны длины волн трех линий, принадлежащих одной и той же серии: 99,2; 108,5; 121,5 нм. Какие спектральные линии можно предсказать с помощью этих линий?

7. Электрон, пройдя разность потенциалов 4,9 В, сталкивается с атомом ртути и переводит его в 1-е возбужденное состояние. Какую длину волны имеет фотон, соответствующий переходу атома ртути в нормальное состояние?

8. Почему атом водорода может иметь одну и ту же энергию, находясь в различных состояниях?

9. Какие квантовые числа имеет внешний валентный электрон Na?

10. Какое излучение называется спонтанным, а какое вынужденным? Опишите процесс возникновения вынужденного излучения.

Модуль 7. Квантовая оптика.
Основы квантовой механики и атомной физики

Вариант 11

1. Абсолютно черное тело имеет температуру $T_1 = 500$ К. Какова будет температура T_2 тела, если в результате нагревания поток излучения увеличится в 5 раз?

2. На поверхность металла падают монохроматические лучи с длиной волны $\lambda = 0,1$ мкм. Красная граница фотоэффекта $\lambda_{кр} = 0,3$ мкм. Какая доля энергии фотона расходуется на сообщение электрону кинетической энергии?

3. Найдите длину волны де Бройля для электрона, движущегося по круговой орбите атома водорода, находящегося в основном состоянии.

4. Протон с кинетической энергией 0,1 кэВ локализован в области пространства размером 10 мкм. Оцените относительную неопределенность скорости протона.

5. Электрон находится в потенциальном ящике шириной l . В каких точках в интервале $(0 < x < l)$ плотность вероятности нахождения электрона на первом и втором энергетических уровнях одинакова. Решение поясните графически.

6. Разница между первыми линиями серий Лаймана и Бальмера в длинах волн в спектре атома водорода $\Delta\lambda = 534,7$ нм. Определите по этим данным постоянную Планка.

7. Определите энергию фотона, испускаемого при переходе электрона в атоме водорода с 5-го энергетического уровня на 2-й.

8. Определите, сколько различных волновых функций соответствует главному квантовому числу $n = 5$.

9. Запишите электронную конфигурацию для атома Ne.

10. Возможно ли было возникновение вынужденного излучения, если бы фотоны были фермионами? Ответ обосновать.

Модуль 7. Квантовая оптика.
Основы квантовой механики и атомной физики

Вариант 12

1. В какой области спектра лежит длина волны, соответствующая максимуму излучательной способности Солнца, если температура его поверхности 5800 К?

2. Давление света длиной волны $\lambda = 400$ нм, падающего нормально на черную поверхность, равно 2 нПа. Определите число N фотонов, падающих за время $t = 10$ с на площадь $S = 1$ мм² этой поверхности.

3. Найдите длину волны де Бройля для электрона, находящегося на второй круговой орбите атома водорода.

4. Оцените минимальную кинетическую энергию протона, локализованного в области пространства размером $l = 1$ нм.

5. Частица в потенциальной яме бесконечной глубины находится в основном энергетическом состоянии. Какова вероятность w нахождения частицы в средней трети ямы?

6. Наибольшая длина волны спектральной водородной линии серии Бальмера равна 656,3 нм. Определите по этой длине волны наибольшую длину волны в серии Лаймана.

7. В однократно ионизированном атоме гелия электрон перешел со 2-го энергетического уровня на 1-й. Определите длину волны излучения.

8. Постройте и объясните диаграмму, иллюстрирующую расщепление энергетических уровней и спектральных линий (с учетом правил отбора) при переходах между состояниями с $l = 2$ и $l = 1$.

9. Какие квантовые числа имеет внешний валентный электрон Ne?

10. Как получают состояния с инверсией населенностей?

Модуль 7. Квантовая оптика.
Основы квантовой механики и атомной физики

Вариант 13

1. Температура абсолютно черного тела 127°C . После повышения температуры суммарная мощность излучения увеличилась в 3 раза. На сколько повысилась при этом температура?

2. На фотоэлемент с катодом из рубидия ($A_{\text{вых}} = 1,53$ эВ) падают лучи с длиной волны 100 нм. Найдите наименьшее значение задерживающей разности потенциалов, которую нужно приложить к фотоэлементу, чтобы прекратить эмиссию электронов.

3. С какой скоростью движется электрон, если длина волны де Бройля равна его комптоновской длине волны?

4. Предполагая, что неопределенность координаты движущейся частицы равна длине волны де Бройля, определите относительную неопределенность $\Delta p/p$ импульса этой частицы.

5. Частица в потенциальной яме бесконечной глубины находится в основном энергетическом состоянии. Какова вероятность w нахождения частицы в крайней трети ямы?

6. Определите наименьшую и наибольшую энергии фотона в инфракрасной серии Пашена спектра водорода.

7. Нарисуйте схему энергетических уровней атома водорода. Какой из переходов электронов соответствует испусканию квантов с наименьшей длиной волны? Почему?

8. Принимая, что уравнению Шредингера для $1s$ -состояния электрона в атоме водорода удовлетворяет функция $\psi = Ce^{-\frac{r}{a}}$

(C – некоторая постоянная), покажите, что $a = \frac{\hbar^2 4\pi\epsilon_0}{me^2}$ – первый боровский радиус. Учтите, что $1s$ – состояние сферически-симметрично.

9. Запишите электронную конфигурацию для атома Li.

10. Какое условие необходимо для возникновения вынужденного излучения в веществе?

Модуль 7. Квантовая оптика.
Основы квантовой механики и атомной физики

Вариант 14

1. Определите спектральную плотность излучательности, рассчитанную на 1 нм для λ_{\max} в спектре абсолютно черного тела. Температура тела $T = 1$ К.

2. Давление света, производимое на зеркальную поверхность, $p = 4$ мПа. Определите концентрацию n фотонов вблизи поверхности, если длина волны света, падающего на поверхность, $\lambda = 0,5$ мкм.

3. С какой скоростью движется протон, если длина волны де Бройля равна его комптоновской длине волны?

4. Какой физический смысл вкладывается в соотношение неопределенностей $\Delta p_x \Delta x \geq \hbar$?

5. В одномерном потенциальном ящике бесконечной глубины шириной l находится электрон. Вычислите вероятность w нахождения электрона на первом энергетическом уровне в интервале, равноудаленном от стенок ящика на $0,25l$.

6. Определите длину волны, соответствующую 2-й спектральной линии в серии Бальмера.

7. Атомарный водород, возбужденный светом определенной длины волны, при переходе в основное состояние испускает только три спектральные линии. Определите длины волн этих линий и укажите, каким сериям они принадлежат.

8. Что представляют собой боровские орбиты с точки зрения квантовой механики?

9. Какие квантовые числа имеет внешний валентный электрон Li?

10. Что можно сказать о фазе, поляризации и направлении испускаемых электромагнитных волн в случае спонтанного и вынужденного излучения?

Модуль 7. Квантовая оптика.
Основы квантовой механики и атомной физики

Вариант 15

1. Температура абсолютно черного тела изменяется от 727 до 1727 °С. Во сколько раз изменится при этом энергия, излучаемая телом?

2. На поверхность никеля падает монохроматический свет с длиной волны $\lambda = 200$ нм. Красная граница фотоэффекта для никеля 248 нм. Определите энергию падающих фотонов, работу выхода электронов, максимальную кинетическую энергию электронов и их скорость.

3. Определите длину волны де Бройля электронов, бомбардирующих антикатод рентгеновской трубки, если граница сплошного рентгеновского спектра приходится на длину волны $\lambda = 3$ нм.

4. Оцените относительную ширину $\Delta\omega/\omega$ спектральной линии, если время жизни атома в возбужденном состоянии $\tau = 10^{-8}$ с, а длина волны излучаемого фотона $\lambda = 0,6$ мкм.

5. В одномерном потенциальном ящике бесконечной глубины шириной l находится электрон. Вычислите вероятность w нахождения электрона на втором энергетическом уровне в интервале, равноудаленном от стенок ящика на $0,2l$.

6. Нарисуйте схему и опишите опыты Резерфорда по исследованию строения атома.

7. Фотон с энергией 18 эВ выбил электрон из невозбужденного атома водорода. Какую скорость будет иметь электрон вдали от ядра атома?

8. Запишите выражение для энергии атома водорода и получите значение энергии ионизации.

9. Назовите атом, у которого в основном состоянии заполнены K -, L -, M -, N -оболочки и $5s$ - и $5p$ -подоболочки. Сколько электронов в этом атоме?

10. Возможна ли работа лазера по двухуровневой схеме активной среды? Почему?

Модуль 7. Квантовая оптика.
Основы квантовой механики и атомной физики

Вариант 16

1. Из отверстия в печи площадью 10 см^2 излучается 250 кДж энергии за 1 мин. В какой области спектра лежит длина волны, на которую приходится максимум излучательной способности?

2. Параллельный пучок монохроматических лучей с длиной волны $\lambda = 0,55 \text{ мкм}$ падает нормально на зеркальную поверхность и производит давление 10 мкПа . Определите концентрацию фотонов в потоке и его интенсивность.

3. Электрон движется по окружности радиусом $r = 0,5 \text{ см}$ в однородном магнитном поле с индукцией $B = 8 \text{ мТл}$. Определите длину волны де Бройля электрона.

4. Какой физический смысл вкладывается в соотношение неопределенностей $\Delta \vec{p} \Delta \vec{r} \geq \hbar$?

5. Вычислите отношение вероятностей w_1/w_2 нахождения электрона на первом и втором энергетических уровнях в интервале $0,25l$, равноудаленном от стенок бесконечно глубокой потенциальной ямы шириной l .

6. Определите максимальную энергию фотона серии Пашена в спектре излучения атома водорода.

7. Вычислите длину волны, которую испускает ион лития Li^{++} при переходе с третьего энергетического уровня на основной.

8. Как квантовые числа определяют размер, форму и ориентацию электронных облаков?

9. Сколько электронов может быть в атоме, у которого в основном состоянии заполнены K -, L -, M -, N -оболочки и $5s$ -подоболочка? Что это за атом?

10. Можно ли создать лазер на фермионах? Ответ поясните.

Модуль 7. Квантовая оптика.
Основы квантовой механики и атомной физики

Вариант 17

1. Найдите мощность, излучаемую абсолютно черным телом, представляющим собой шар радиусом 10 см, который находится в комнате при температуре 20 °С.

2. Определите энергию и импульс одного фотона для рентгеновских лучей ($\lambda = 10$ пм).

3. Протон движется по окружности радиусом $r = 0,1$ см в однородном магнитном поле с индукцией $B = 4$ мТл. Определите длину волны де Бройля протона.

4. Какой физический смысл вкладывается в соотношение неопределенностей $\Delta W \Delta t \geq \hbar$?

5. Электрон находится в одномерном бесконечно глубоком потенциальном ящике шириной l . Определите среднее значение координаты $\langle x \rangle$ электрона ($0 < x < l$).

6. Опишите модели атома Томсона и Резерфорда, укажите принципиальные отличия.

7. Вычислите полную энергию электрона в атоме водорода, если он находится на 3-м энергетическом уровне.

8. Что называется спином электрона и каковы правила квантования спина?

9. Электрон в атоме находится в f -состоянии. Определите орбитальный момент импульса электрона.

10. Минимальная длина волны рентгеновского излучения, полученного от трубки, работающей при напряжении 50 кВ, равна 24,8 пм. Определите по этим данным постоянную Планка.

Модуль 7. Квантовая оптика.
Основы квантовой механики и атомной физики

Вариант 18

1. Как и во сколько раз изменится поток излучения абсолютно черного тела, если максимум спектральной плотности энергетической светимости переместится с красной линии видимого спектра ($\lambda_{\max 1} = 780$ нм) на фиолетовую ($\lambda_{\max 2} = 390$ нм)?

2. Красная граница фотоэффекта рубидия 810 нм. Какое задерживающее напряжение нужно приложить к фотоэлементу, чтобы электронам, испускаемым рубидием под действием ультрафиолетовых лучей ($\lambda = 100$ нм), не удалось преодолеть задерживающее поле?

3. На грань некоторого кристалла под углом $\alpha = 60^\circ$ к ее поверхности падает параллельный пучок электронов, движущихся с одинаковой скоростью. Определите скорость электронов, если они испытывают интерференционное отражение первого порядка. Расстояние между атомными плоскостями кристалла равно 0,2 нм.

4. Пучок электронов с энергией $W = 10$ эВ падает на щель шириной $a = 10$ нм. Если электрон прошел через щель, то его координата известна с неопределенностью $\Delta x = a$. Оцените получаемую при этом относительную неопределенность в определении импульса $\Delta p/p$.

5. Используя выражение энергии $E_n = \pi^2 \hbar^2 n^2 / (2ml^2)$ частицы, находящейся в потенциальном ящике, получите приближенное выражение энергии гармонического осциллятора.

6. Найдите наибольшую и наименьшую длины волн в ультрафиолетовой серии спектра водорода.

7. Определите скорость электрона на 2-й орбите атома водорода.

8. Определите, сколько различных волновых функций соответствует главному квантовому числу $n = 3$.

9. Сколько электронов может быть в атоме, у которого в основном состоянии заполнены K -, L -, M -оболочки и $4s$ -подоболочка? Что это за атом?

10. Опишите свойства лазерного излучения.

Модуль 7. Квантовая оптика.
Основы квантовой механики и атомной физики

Вариант 19

1. Вычислите энергию, излучаемую с поверхности Солнца площадью 1 м^2 за 1 мин, приняв температуру его поверхности равной 5800 К . Считать Солнце абсолютно черным телом.

2. Определите максимальную скорость фотоэлектронов, вырываемых с поверхности цинка ($A_{\text{вых}} = 4,0 \text{ эВ}$) светом с длиной волны $0,25 \text{ мкм}$. Чему равна красная граница фотоэффекта?

3. Параллельный пучок электронов, движущихся со скоростью 10^6 м/с , падает нормально на диафрагму с длиной щелью шириной $a = 1 \text{ мкм}$. При прохождении электронов через щель на экране, расположенном на расстоянии 50 см от щели и параллельном плоскости диафрагмы, наблюдается дифракционная картина. Определите линейное расстояние x между первыми дифракционными минимумами.

4. Покажите, используя соотношение неопределенностей, что в ядре не могут находиться электроны. Линейные размеры ядра принять равными $5 \cdot 10^{-15} \text{ м}$.

5. Используя выражение энергии $E_n = \pi^2 \hbar^2 n^2 / (2ml^2)$ частицы, находящейся в потенциальном ящике, получите приближенное выражение энергии гармонического осциллятора.

6. Запишите сериальную формулу для линий серии Лаймана в спектре излучения атома водорода.

7. Атом водорода, находящийся в нормальном состоянии, переведен в возбужденное, характеризующееся квантовым числом 3. Определите энергию возбуждения атома и длины волн

линий, которые могут возникнуть в спектре водорода при переходе из возбужденного состояния в нормальное.

8. Постройте и объясните диаграмму, иллюстрирующую расщепление энергетических уровней и спектральных линий (с учетом правил отбора) при переходах между состояниями с $l = 3$ и $l = 2$.

9. Назовите атом, у которого в основном состоянии заполнены K - и L -оболочки и $3s$ - и $3p$ -подоболочки. Сколько электронов в этом атоме?

10. Опишите принципиальную схему оптического квантового генератора. Почему одним из обязательных элементов лазера является оптический резонатор?

Модуль 7. Квантовая оптика.
Основы квантовой механики и атомной физики

Вариант 20

1. Мощность излучения абсолютно черного тела $\Phi_0 = 10$ кВт, максимум спектральной плотности излучательности приходится на длину волны $0,8$ мкм. Определите площадь излучающей поверхности.

2. Монохроматическое излучение с длиной волны $\lambda = 500$ нм падает нормально на плоскую зеркальную поверхность и давит на нее с силой $F = 10$ мН. Определите число N фотонов, ежесекундно падающих на эту поверхность.

3. α -частица движется со скоростью $v = 2 \cdot 10^8$ м/с. Определите длину волны де Бройля, учитывая изменение импульса α -частицы в зависимости от скорости.

4. Приняв, что минимальная энергия E нуклона в ядре равна 10 МэВ, оцените, исходя из соотношения неопределенностей, линейные размеры ядра.

5. Какие решения временного уравнения Шредингера называются стационарными? Покажите, что такие решения получаются в том случае, когда U не зависит явно от времени.

6. Найдите наибольшую и наименьшую длины волн в инфракрасной серии Пашена спектра излучения атома водорода.

7. Что такое «потенциал ионизации» и «энергия ионизации» атома водорода? Напишите соответствующие формулы и поясните их.

8. Определите, сколько различных волновых функций соответствует главному квантовому числу $n = 4$.

9. Сколько электронов может быть в атоме, у которого в основном состоянии заполнены K - и L -оболочки и $3s$ -подоболочка? Что это за атом?

10. При работе лазера в процессе вынужденного излучения возникают вторичные фотоны. Чем они отличаются от первичных?

Модуль 7. Квантовая оптика.

Основы квантовой механики и атомной физики

Вариант 21

1. Земля вследствие излучения в среднем ежеминутно теряет с поверхности 1 м^2 энергию $5,4 \text{ Дж}$. При какой температуре абсолютно черное тело излучало бы такую же энергию?

2. Изолированная металлическая пластинка освещается светом с длиной волны 450 нм . Работа выхода электронов из металла равна 2 эВ . До какого потенциала зарядится пластинка?

3. Какую ускоряющую разность потенциалов U должна пройти α -частица, чтобы длина волны де Бройля была равна $0,1 \text{ нм}$?

4. Используя соотношение неопределенностей $\Delta x \Delta p_x \geq \hbar$, оцените минимальное значение энергии электрона в атоме водорода. Принять линейные размеры атома $l \approx 0,1 \text{ нм}$.

5. Как изменится полная волновая функция $\psi(x, t)$, описывающая стационарные состояния, если изменить начало отсчета потенциальной энергии на некоторую величину ΔU ?

6. В спектре излучения водорода интервал между двумя первыми линиями, принадлежащими серии Бальмера, составляет $\Delta\lambda = 171$ нм. Определите постоянную Ридберга.

7. Фотон с энергией 15 эВ выбил электрон из невозбужденного атома водорода. Какую скорость будет иметь электрон вдали от ядра атома?

8. Каков квантово-механический смысл второго боровского радиуса?

9. Электрон в атоме находится в f -состоянии. Определите максимальное значение проекции орбитального момента импульса электрона на направление внешнего магнитного поля.

10. Какой процесс в оптическом квантовом генераторе называется спонтанным (самопроизвольным) излучением.

Модуль 7. Квантовая оптика.

Основы квантовой механики и атомной физики

Вариант 22

1. Во сколько раз увеличится мощность излучения абсолютно черного тела, если максимум спектральной плотности излучательности его переместится от 700 до 600 нм?

2. Какой длины электромагнитную волну следует направить на поверхность цинка ($A_{\text{вых}} = 4,0$ эВ), чтобы максимальная скорость фотоэлектронов была равна 0,8 Мм/с?

3. Определите длину волны де Бройля α -частицы, если его кинетическая энергия $W = 1$ МэВ.

4. Предполагая, что неопределенность координаты движущейся частицы равна дебройлевской длине волны, определите относительную неопределенность $\Delta p/p$ импульса этой частицы.

5. Найдите решение временного уравнения Шредингера для свободной частицы, движущейся с импульсом p в положительном направлении оси X .

6. Определите длину волны, соответствующую 2-й спектральной линии в серии Лаймана.

7. Вычислите полную энергию электрона в атоме водорода, если он находится на 3-м энергетическом уровне.

8. Запишите и поясните выражения потенциальной энергии взаимодействия и полной энергии электрона для водородоподобной системы.

9. Сколько электронов может быть в атоме, у которого в основном состоянии заполнены K -оболочка и $2s$ - и $2p$ -подоболочки? Что это за атом?

10. Какой процесс в оптическом квантовом генераторе называется вынужденным излучением.

Модуль 7. Квантовая оптика.

Основы квантовой механики и атомной физики

Вариант 23

1. Абсолютно черное тело имеет температуру $t_1 = 100^\circ\text{C}$. Какова будет температура t_2 тела, если в результате нагревания мощность излучения увеличилась в 4 раза?

2. Красная граница фотоэффекта для калия $\lambda_{\text{кр}} = 577$ нм. Вычислите минимальную энергию кванта, необходимую для освобождения фотоэлектрона из данного металла.

3. α -частица движется по окружности радиусом 8,3 мм в однородном магнитном поле, напряженность которого $H = 18,9$ кА/м. Найдите длину волны де Бройля для α -частицы.

4. Во сколько раз дебройлевская длина волны частицы меньше неопределенности Δx ее координаты, которая соответствует относительной неопределенности импульса в 1 %?

5. Частица массы m находится в одномерной прямоугольной потенциальной яме с бесконечно высокими стенками. Найдите энергию частицы в стационарном состоянии, описываемом волновой функцией $\psi = \psi_0 \sin kx$, где k – заданная постоянная; x – расстояние от края ямы.

6. Напишите обобщенную формулу Бальмера и назовите все величины, входящие в нее.

7. Электрон, имеющий вдали от покоящегося протона скорость $1,87 \cdot 10^6$ м/с, захватывается им, в результате чего образуется возбужденный атом водорода. Определите длину волны фотона, который испускается при переходе атома в нормальное состояние.

8. Сколько различных состояний соответствует главному квантовому числу $n = 2$? Ответ поясните.

9. Сколько электронов может быть в атоме, у которого в основном состоянии заполнены K -оболочка и $2s$ -подоболочка? Что это за атом?

10. Опишите трехуровневую энергетическую схему генерации лазерного излучения.

Модуль 7. Квантовая оптика.

Основы квантовой механики и атомной физики

Вариант 24

1. Сколько энергии излучает абсолютно черное тело за 1 с со светящейся поверхности площадью 1 см^2 , если максимум спектральной плотности энергетической светимости приходится на длину волны 725 нм ?

2. Плотность потока световой энергии на поверхность 7 кВт/м^2 . Найдите световое давление для случаев, когда поверхность: а) полностью отражает все лучи; б) полностью поглощает все падающие лучи.

3. Определите длину волны де Бройля λ , характеризующую волновые свойства протона, если его скорость $v = 10^7$ м/с.

4. Электрон с кинетической энергией $W = 15$ эВ находится в металлической пылинке диаметром $d = 1$ мкм. Оцените относительную неопределенность $\frac{\Delta v}{v}$, с которой может быть определена скорость электрона.

5. Частица массой m находится в одномерной прямоугольной потенциальной яме с бесконечно высокими стенками. Най-

дите энергию частицы в стационарном состоянии, описываемом волновой функцией $\psi = \psi_0 \sin\left(\frac{2\pi}{\lambda}x\right)$, где x – расстояние от края ямы; λ – длина волны волновой функции, если ширина ямы l и число узлов волновой функции равно N .

6. На какое минимальное расстояние приблизится α -частица с кинетической энергией $W = 50$ кэВ (при лобовом столкновении) к покоящемуся ядру атома лития?

7. Атом водорода освещается ультрафиолетовым излучением с длиной волны 100 нм. Определите, какие спектральные линии появятся в спектре излучения водорода.

8. Каковы возможные значения орбитального и магнитного квантовых чисел для главного квантового числа $n = 3$? Ответ поясните.

9. Заполненной электронной оболочке соответствует главное квантовое число $n = 3$. Определите число электронов в этой оболочке, которые имеют следующие одинаковые квантовые числа: $m_s = 1/2$ и $l = 2$.

10. Перечислите основные типы лазеров. Опишите основные компоненты, входящие в состав любого лазера.

Модуль 7. Квантовая оптика.

Основы квантовой механики и атомной физики

Вариант 25

1. Мощность излучения абсолютно черного тела $P = 10^5$ Вт. Чему равна площадь излучающей поверхности тела, если длина волны, на которую приходится максимум излучения, равна $7 \cdot 10^{-7}$ м?

2. При облучении некоторого металла излучением с длиной волны $\lambda_1 = 279$ нм задерживающий потенциал равен 0,66 В, при длине волны $\lambda_2 = 245$ нм задерживающий потенциал становится равным 1,26 В. Считая заряд электрона и скорость света извест-

ными, определите постоянную Планка и работу выхода электрона из данного металла.

3. Определите длину волны де Бройля λ , характеризующую волновые свойства электрона, если его скорость $v = 10^6$ м/с.

4. Оцените неопределенность Δx в определении координаты электрона, движущегося в атоме со скоростью $v = 1,5 \cdot 10^6$ м/с, если допускаемая неопределенность Δv в определении скорости составляет 10 % от ее величины.

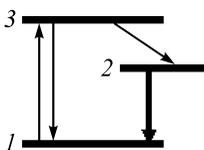
5. Частица массой m находится в одномерной прямоугольной потенциальной яме шириной l с бесконечно высокими стенками ($0 < x < l$). Найдите выражение для собственных значений энергии частицы.

6. На какое минимальное расстояние приблизится α -частица с кинетической энергией $W = 40$ кэВ (при лобовом столкновении) к покоящемуся ядру атома свинца?

7. Определите первый потенциал возбуждения иона Be^{+++} .

8. Что характеризуют квантовые числа: главное, орбитальное и магнитное? Какие значения они могут принимать?

9. Как изменилась бы структура электронных оболочек атома, если бы электроны были не фермионами, а бозонами?



10. На рисунке изображен процесс создания среды с инверсией населенностей. Какой уровень (1–3) называется метастабильным и почему?

Модуль 8. ОСНОВЫ ФИЗИКИ АТОМНОГО ЯДРА. ЭЛЕМЕНТАРНЫЕ ЧАСТИЦЫ

Модуль 8. Основы физики атомного ядра. Элементарные частицы

Вариант 1

1. Что такое α -излучение? Почему в магнитном поле оно отклоняется слабее, чем β -излучение?

2. За 8 сут распалось 75 % начального количества радиоактивного изотопа. Определить период полураспада.

3. Определите дефект массы, энергию связи и удельную энергию связи для ядра ${}^7_3\text{Li}$.

4. Вычислите энергию ядерной реакции ${}^{16}_8\text{O} + {}^2_1\text{H} \rightarrow {}^{14}_7\text{N} + {}^4_2\text{He}$. Освобождается или поглощается энергия?

5. Напишите недостающие обозначения в ядерной реакции $X + p \rightarrow \alpha + {}^{22}_{11}\text{Na}$.

6. Верно ли записана следующая реакция: $n \rightarrow p + e^+ + \nu_e$?

Ответ пояснить.

7. Что такое сильное взаимодействие? Какие элементарные частицы участвуют в сильном взаимодействии? Объясните механизм осуществления сильного взаимодействия.

8. При реакции ${}^6_3\text{Li} + \alpha \rightarrow {}^9_4\text{Be} + p$ освобождается энергия 5,028 МэВ. Определите массу изотопа ${}^6_3\text{Li}$. Массы остальных ядер взять из таблиц (приложение).

Модуль 8. Основы физики атомного ядра. Элементарные частицы

Вариант 2

1. Из каких частиц состоят атомные ядра? Сколько их в ядре любого элемента?

2. Определите период полураспада радона, если за одни сутки из 10^6 атомов распадается $1,75 \cdot 10^5$. Чему равна постоянная распада?

3. Найдите энергию связи и удельную энергию связи ядра атома ${}^{27}_{13}\text{Al}$.

4. Определите, освобождается или поглощается энергия в ядерной реакции ${}^{44}_{20}\text{Ca} + p \rightarrow {}^{41}_{19}\text{K} + \alpha$.

5. Напишите недостающие обозначения в следующей ядерной реакции: ${}^{19}_9\text{Fe} + p \rightarrow {}^{16}_8\text{O} + X$.

6. Какие законы сохранения выполняются при ядерных реакциях и взаимных превращениях элементарных частиц?

7. Что такое античастицы? Назовите известные вам античастицы.

8. Сколько α - и β^- -распадов должно произойти, чтобы уран ${}^{235}_{92}\text{U}$ превратился в стабильный изотоп свинца ${}^{207}_{82}\text{Pb}$? Напишите уравнения реакций.

Модуль 8. Основы физики атомного ядра. Элементарные частицы

Вариант 3

1. Что такое γ -излучение? Какова его природа?

2. Некоторый радиоактивный изотоп имеет постоянную распада $1,44 \cdot 10^{-3} \text{ ч}^{-1}$. Через сколько времени распадается 75 % от первоначальной массы атомов?

3. Найдите энергию связи ядер ${}^3_1\text{H}$ и ${}^4_2\text{He}$. Какое из этих ядер более устойчиво?

4. Найдите энергию, выделяющуюся при следующей реакции: ${}^2_1\text{H} + {}^3_2\text{He} \rightarrow {}^4_1\text{H} + {}^4_2\text{He}$.

5. При бомбардировке изотопа азота ${}^{14}_7\text{N}$ нейтронами получается изотоп углерода ${}^{14}_6\text{C}$, который оказывается β -радиоактивным. Напишите уравнения обеих реакций.

6. Исправьте ошибку в записи следующей реакции: $\tilde{\nu}_e + \tilde{p} \rightarrow n + e^+$.

7. Что такое слабое взаимодействие? Какие элементарные частицы участвуют в слабом взаимодействии? Объясните механизм осуществления слабого взаимодействия.

8. Приведите схемы распада заряженных K -мезонов.

**Модуль 8. Основы физики атомного ядра.
Элементарные частицы**

Вариант 4

1. Что такое «дефект массы» атомных ядер? Чему он равен?

2. При распаде изотопа ^{24}Na распадается $9,3 \cdot 10^{18}$ из $2,52 \cdot 10^{19}$ атомов. Период полураспада 14,8 ч. Определить время и постоянную распада.

3. Во сколько раз отличается удельная энергия связи ядер ^7_3Li и ^4_2He ?

4. Освобождается или поглощается энергия в следующей ядерной реакции: $^{14}_7\text{N} + ^1_0n \rightarrow ^1_1\text{H} + ^{14}_6\text{C}$?

5. Назовите пропущенную частицу в ядерной реакции $^7_3\text{Li} + X \rightarrow ^{10}_5\text{B} + n$.

6. Исправьте ошибку в записи реакции $\tilde{\nu} + n \rightarrow p + e^-$.

7. Приведите схемы распадов нейтральных короткоживущих K_s^0 -мезонов.

8. Установите соответствие процессов взаимопревращения частиц:

1	β^- -распад
2	K -захват
3	β^+ -распад
4	аннигиляция

А	$^0_{-1}e + ^0_{+1}e \rightarrow 2\gamma$
Б	$^1_1p \rightarrow ^1_0n + ^0_{+1}e + \nu_e$
В	$^1_1p + ^0_{-1}e \rightarrow ^1_0n + \nu_e$
Г	$^1_0n \rightarrow ^1_1p + ^0_{-1}e + \tilde{\nu}_e$
Д	$^1_0n + ^0_{-1}e \rightarrow ^1_1p + \nu_e$

**Модуль 8. Основы физики атомного ядра.
Элементарные частицы**

Вариант 5

1. Ядра атомов любых химических элементов состоят из протонов и нейтронов. Как объяснить возникновение β^+ - и β^- -излучений?

2. Какая доля радиоактивных ядер изотопа $^{14}_6\text{C}$ распадается за 100 лет, если его период полураспада 5370 лет.

3. Найдите энергию связи ядра дейтерия ^2_1H .

4. Вычислите энергию ядерной реакции $^7_3\text{Li} + ^1_1\text{H} \rightarrow ^4_2\text{He} + ^4_2\text{He}$.

5. Напишите недостающие обозначения в следующей ядерной реакции: $^{19}_9\text{F} + p \rightarrow ^{16}_8\text{O} + X$.

6. Какая из приведенных ниже реакций запрещена законом сохранения электрического заряда: $\mu^- \rightarrow e^- + \tilde{\nu}_e + \nu_\mu$; $n + \tilde{\nu} \rightarrow e^- + \tilde{\nu}_e$; $\nu_\mu + n \rightarrow p + \mu^-$; $n + \nu_e \rightarrow p + e^+$.

7. Как изменяется значение зарядового числа Z при β -распаде?

8. Какая из представленных схем соответствует взаимодействию нуклонов в ядре:

1) $n \xleftrightarrow{\leftarrow} n + \pi^+$; 2) $p \xleftrightarrow{\leftarrow} n + \pi^+$; 3) $p \xleftrightarrow{\leftarrow} n + \pi^-$; 4) $p \xleftrightarrow{\leftarrow} p + \pi^-$.

**Модуль 8. Основы физики атомного ядра.
Элементарные частицы**

Вариант 6

1. Что называется удельной энергией связи атомных ядер? Что она характеризует?

2. Постоянная распада рубидия $^{89}_{37}\text{Rb}$ равна $7,7 \cdot 10^{-4} \text{ с}^{-1}$. Определить период полураспада рубидия.

3. Вычислите дефект массы и энергию связи изотопов кислорода $^{16}_8\text{O}$ и $^{17}_8\text{O}$.

4. Определите энергию, освобождающуюся в следующей ядерной реакции: $^{44}_{20}\text{Ca} + p \rightarrow ^{41}_{19}\text{K} + \text{He}$.

5. В ядро какого атома превратится ксенон $^{131}_{54}\text{X}$ после одного α - и одного β -распада?

6. Как изменяется значение зарядового числа Z при α -распаде.

7. Нуклоны в ядре взаимодействуют посредством обмена виртуальными частицами. Напишите схемы взаимодействия нуклонов.

8. Приведите схемы распадов нейтральных долгоживущих K_L^0 -мезонов.

Модуль 8. Основы физики атомного ядра.

Элементарные частицы

Вариант 7

1. Сформулируйте правило смещения для β -распада ядер. Напишите уравнение β -распада.

2. Изотоп урана $^{238}_{92}\text{U}$ массой 1 г излучает $1,24 \cdot 10^4$ α -частиц в секунду. Определить период полураспада и постоянную распада данного изотопа.

3. Определите дефект массы и энергию связи атома бора $^{10}_5\text{B}$.

4. Освобождается или поглощается энергия в ядерной реакции $^3_1\text{H} + ^2_1\text{H} \rightarrow ^4_2\text{He} + n$?

5. Какая частица участвует в ядерной реакции $^{14}_7\text{N} + \text{X} \rightarrow ^{17}_8\text{O} + ^1_1\text{H}$?

6. Какие законы сохранения выполняются для всех типов взаимодействий элементарных частиц.

7. Позитрон является античастицей по отношению ...

1) к фотону; 2) электрону; 3) протону; 4) нейтрону; 5) нейтрину.

8. Перечислите типы фундаментальных взаимодействий. Какие частицы участвуют в процессе электромагнитного взаимодействия?

Модуль 8. Основы физики атомного ядра. Элементарные частицы

Вариант 8

1. Какой процесс называется ядерной реакцией? Какие физические законы выполняются во всех ядерных реакциях?

2. Какая доля начального количества атомов распадается за 1 год в радиоактивном изотопе тория ${}_{90}^{229}\text{Th}$?

3. Вычислить дефект массы, энергию связи и удельную энергию связи для ядра атома фтора ${}_{9}^{19}\text{F}$?

4. Освобождается или поглощается энергия в следующей ядерной реакции: ${}_{4}^9\text{Be} + {}_{1}^2\text{H} \rightarrow {}_{5}^{10}\text{B} + n$?

5. Назовите элемент X по ядерной реакции ${}_{7}^{14}\text{N} + n \rightarrow X + p$.

6. Какова природа первичного и вторичного космических излучений? Опишите их свойства.

7. Напишите реакцию распада свободного антинейтрона.

8. Принимая, что энергия релятивистских мюонов в космическом излучении составляет 3 ГэВ, определите расстояние, проходимое мюонами за время их жизни, если собственное время жизни мюона 2,2 мкс, а энергия покоя 100 МэВ.

**Модуль 8. Основы физики атомного ядра.
Элементарные частицы**

Вариант 9

1. Каков физический смысл λ – постоянной распада радиоактивных ядер?
2. За 1 год начальное количество радиоактивного изотопа уменьшилось в 3 раза. Во сколько раз оно уменьшится за 2 года?
3. Определите энергию связи, приходящуюся на один нуклон в ядре атома кислорода $^{16}_8\text{O}$.
4. Вычислите энергию ядерной реакции $^7_3\text{Li} + ^1_1\text{H} \rightarrow ^7_4\text{Be} + n$. Освобождается или поглощается эта энергия?
5. Какой изотоп образуется из $^{239}_{92}\text{U}$ после двух β -распадов и одного α -распада?
6. Перечислите типы фундаментальных взаимодействий. Какие частицы участвуют в сильном, или ядерном, взаимодействии?
7. Приведите схемы распадов мюонов. Объясните причину выброса мюонного нейтрино (антинейтрино).
8. Что объясняет гипотеза о существовании кварков? Какие типы кварков вы знаете, опишите их свойства.

**Модуль 8. Основы физики атомного ядра.
Элементарные частицы**

Вариант 10

1. Напишите закон радиоактивного распада ядер и назовите величины, входящие в него.
2. Найдите постоянную радиоактивного распада радона, если известно, что число атомов радона уменьшается за сутки на 18,2 %.
3. Определите энергию связи нуклонов в ядре дейтерия и у α -частицы.

4. Найдите энергию, поглощенную при реакции ${}^{14}_7\text{N} + {}^4_2\text{He} \rightarrow {}^2_1\text{H} + {}^{16}_8\text{O}$.

5. Какой изотоп образуется из радиоактивного изотопа ${}^7_3\text{Li}$ после одного β -распада и одного α -распада?

6. Нейтральный пион распадается на два гамма-кванта. Принимая массу покоя пиона равной $264,1m_e$, определите энергию каждого гамма-кванта.

7. Для чего потребовалось введение таких квантовых характеристик кварков, как *цвет* и *очарование*?

8. Приведите схемы распада пионов. Дайте характеристику известным пионам.

Модуль 8. Основы физики атомного ядра. Элементарные частицы

Вариант 11

1. Перечислите основные характеристики атомных ядер.

2. Сколько ядер распадается в радиоактивном изотопе за 1 с, если его активность 2,71 мкКю.

3. Определите дефект массы, энергию связи и удельную энергию связи для изотопов гелия ${}^3_2\text{He}$ и ${}^4_2\text{He}$.

4. Определите энергию, которая освобождается при делении всех ядер, содержащихся в уране-235 массой $m = 1$ г.

5. Назовите пропущенную частицу в ядерной реакции ${}^{27}_{13}\text{Al} + X \rightarrow {}^1_1\text{H} + {}^{26}_{12}\text{Mg}$.

6. Перечислите типы фундаментальных взаимодействий. Какие частицы участвуют в слабом взаимодействии?

7. В 1956 г. американские физики Ф. Рейнес и К. Коуэн зафиксировали реакцию захвата электронного антинейтрино протоном. Приведите схему этой реакции.

8. Что такое странность и четность элементарных частиц? Для чего введены эти квантовые характеристики? Всегда ли выполняются законы их сохранения?

**Модуль 8. Основы физики атомного ядра.
Элементарные частицы**

Вариант 12

1. Что такое период полураспада ядер? Чему он равен?
2. Вычислите удельную активность a кобальта ^{60}Co .
3. Энергия связи ядра, состоящего из двух протонов и одного нейтрона, равна 7,72 МэВ. Определите массу нейтрального атома, имеющего это ядро.
4. Освобождается или поглощается энергия в следующей ядерной реакции: ${}^9_4\text{Be} + {}^2_1\text{H} \rightarrow {}^{10}_5\text{B} + n$?
5. Написать недостающие обозначения в следующей ядерной реакции: ${}^9_4\text{Be} + \alpha \rightarrow X + n$.
6. Почему магнитный момент протона имеет то же направление, что и спин, а у электрона направления этих векторов противоположны?
7. Определите, какие из приведенных ниже процессов запрещены законом сохранения лептонного числа: $K^- \rightarrow \mu^- + \tilde{\nu}_\mu$; $K^+ \rightarrow e^+ + \pi^0 + \nu_e$.
8. Напишите реакцию захвата электронного нейтрино нейтроном.

**Модуль 8. Основы физики атомного ядра.
Элементарные частицы**

Вариант 13

1. Что называется «активностью ядер»? Чему она равна? В каких единицах измеряется?
2. За какое время распадается 1/4 начального количества ядер радиоактивного изотопа с периодом полураспада 24 ч.
3. Определите массу нейтрального атома, если ядро этого атома состоит из трех протонов и двух нейтронов и энергия связи ядра равна 26,3 МэВ.

4. При реакции ${}^6_3\text{Li} + \alpha \rightarrow {}^9_4\text{Be} + p$ освобождается энергия 5,028 МэВ. Определите массу изотопа ${}^6_3\text{Li}$. Массы остальных ядер взять из таблиц.

5. Ядро ${}^{235}_{92}\text{U}$, захватив один нейтрон, разделилось на два осколка, причем освободилось два нейтрона. Одним из осколков оказалось ядро ксенона ${}^{140}_{54}\text{Xe}$. Определите Z и A второго осколка.

6. Напишите реакцию захвата мюонного нейтрино нейтроном.

7. Укажите законы сохранения, которые выполняются при сильном взаимодействии элементарных частиц.

8. Опишите классификацию элементарных частиц. Укажите критерии разделения элементарных частиц на различные группы.

Модуль 8. Основы физики атомного ядра. Элементарные частицы

Вариант 14

1. Дайте определение периода полураспада ядер.

2. Какая доля атомов радиоактивного изотопа тория ${}^{234}_{90}\text{Th}$, имеющего период полураспада $T_{1/2} = 24,1$ сут, распадается за сутки?

3. Найдите удельную энергию связи ядра ${}^{11}_5\text{B}$.

4. Освобождается или поглощается энергия в ядерной реакции ${}^7_3\text{Li} + {}^4_2\text{He} \rightarrow {}^{10}_5\text{B} + n$?

5. В ядерной реакции определить Z и A частицы X :
 ${}^{14}_6\text{C} + {}^4_2\text{He} = {}^{17}_8\text{O} + X$.

6. При аннигиляции нейтрона и антинейтрона происходит рождение двух γ -квантов. Определите энергию каждого из возникших γ -квантов, принимая, что кинетическая энергия частиц до столкновения пренебрежимо мала.

7. Перечислите все квантовые характеристики u -, d -, s - и c -кварков.

8. Назовите квантовые свойства нейтрино и антинейтрино. В чем сходство и различие этих частиц?

**Модуль 8. Основы физики атомного ядра.
Элементарные частицы**

Вариант 15

1. Что такое «дефект массы» атомных ядер? Чему он равен?
2. Период полураспада радия $T_{1/2} = 1620$ лет. Найти число распадов, происходящих в 1 г радия за 1 с.
3. Какова наименьшая энергия, которая нужна для расщепления ядра ${}^9_4\text{Be}$ на отдельные нуклоны?
4. Найдите энергию ядерной реакции ${}^{19}_9\text{F} + p \rightarrow {}^{16}_8\text{O} + \alpha$.
5. Определите X в следующей реакции: ${}^{14}_7\text{N} + X \rightarrow {}^{14}_6\text{C} + p$.
6. Укажите одинаковые характеристики для известных вам частиц и античастиц. В чем их различие?
7. Какие законы сохранения выполняются при слабых взаимодействиях?
8. Определите, какие из приведенных процессов разрешены законом сохранения странности: $p + \pi^- \rightarrow \Sigma + K^-$; $p + \pi^- \rightarrow K^+ + K^- + n$.

**Модуль 8. Основы физики атомного ядра.
Элементарные частицы**

Вариант 16

1. Что такое γ -излучение? Какова его природа?
2. Определите массу изотопа ${}^{60}\text{Co}$, имеющего активность 1 кюри.
3. Определите дефект массы и энергию связи ядра атома ${}^2_1\text{H}$.
4. Вычислите энергию ядерной реакции ${}^7_3\text{Li} + {}^1_1\text{H} \rightarrow {}^4_2\text{He} + {}^4_2\text{He}$.

5. Определите X в следующей реакции: ${}^9_4\text{Be} + X \rightarrow {}^{12}_6\text{C} + n$.

6. Укажите, какие законы сохранения нарушаются в приведенных ниже запрещенных способах распада: $\pi^- + n \rightarrow \Lambda^0 + K^-$; $p + p \rightarrow p + \pi^+$.

7. Перечислите все квантовые характеристики антикварков $\tilde{u}, \tilde{d}, \tilde{s}, \tilde{c}$.

8. Каким элементарным частицам приписывают лептонное квантовое число? В чем заключается закон сохранения лептонного числа?

Модуль 8. Основы физики атомного ядра. Элементарные частицы

Вариант 17

1. Чем определяется устойчивость атомных ядер?

2. Определите число ядер, распадающихся в течение суток в радиоактивном препарате церия ${}^{144}_{58}\text{Ce}$ массой $m = 1$ г.

3. Определите энергию связи $W_{\text{св}}$, которая выделится при образовании из протонов и нейтронов ядер гелия ${}^4_2\text{He}$ массой $m = 1$ г.

4. Освобождается или поглощается энергия в ядерной реакции ${}^9_4\text{Be} + {}^2_1\text{H} \rightarrow {}^{10}_5\text{B} + n$?

5. Определите X в следующей реакции: ${}^2_1\text{H} + X \rightarrow p + {}^3_1\text{H}$.

6. Каким элементарным частицам приписывают барионное квантовое число? В чем заключается закон сохранения барионного числа?

7. Перечислите элементарные частицы, входящие в группу лептонов. Укажите свойства этих частиц.

8. Что объясняет гипотеза о существовании кварков? Какие типы кварков вы знаете, опишите их свойства.

**Модуль 8. Основы физики атомного ядра.
Элементарные частицы**

Вариант 18

1. Что такое α -излучение? Почему в магнитном поле оно отклоняется слабее, чем β -излучение?

2. За 8 сут распалось 75 % начального количества радиоактивного изотопа. Определите период полураспада.

3. Определите дефект массы, энергию связи и удельную энергию связи для ядра ${}^7_3\text{Li}$.

4. Вычислите энергию ядерной реакции ${}^{16}_8\text{O} + {}^2_1\text{H} \rightarrow {}^{14}_7\text{N} + {}^4_2\text{He}$. Освобождается или поглощается энергия?

5. Напишите недостающие обозначения в ядерной реакции $X + p \rightarrow \alpha + {}^{22}_{11}\text{Na}$.

6. Какие законы сохранения выполняются при ядерных реакциях и взаимных превращениях элементарных частиц.

7. Что такое античастицы? Назовите известные вам античастицы.

8. Сколько α - и β^- -распадов должно произойти, чтобы уран ${}^{235}_{92}\text{U}$ превратился в стабильный изотоп свинца ${}^{207}_{82}\text{Pb}$? Напишите уравнения реакций.

**Модуль 8. Основы физики атомного ядра.
Элементарные частицы**

Вариант 19

1. При бомбардировке изотопа азота ${}^{14}_7\text{N}$ нейтронами получается изотоп углерода ${}^{14}_6\text{C}$, который оказывается β -радиоактивным. Напишите уравнения обеих реакций.

2. Исправьте ошибку в записи следующей реакции:
 $\tilde{\nu}_e + \tilde{p} \rightarrow n + e^+$.

3. Что такое слабое взаимодействие? Какие элементарные частицы участвуют в слабом взаимодействии? Объясните механизм осуществления слабого взаимодействия.

4. Освобождается или поглощается энергия в следующей ядерной реакции: ${}^{14}_7\text{N} + {}^1_0n \rightarrow {}^1_1\text{H} + {}^{14}_6\text{C}$.

5. Что такое «дефект массы» атомных ядер? Чему он равен?

6. При распаде изотопа ${}^{24}\text{Na}$ распадается $9,3 \cdot 10^{18}$ из $2,52 \cdot 10^{19}$ атомов. Период полураспада 14,8 ч. Определить время и постоянную распада.

7. Во сколько раз отличается удельная энергия связи ядер ${}^7_3\text{Li}$ и ${}^7_4\text{Be}$?

8. Приведите схемы распада заряженных K -мезонов.

Модуль 8. Основы физики атомного ядра. Элементарные частицы

Вариант 20

1. Ядра атомов любых химических элементов состоят из протонов и нейтронов. Как объяснить возникновение β^+ - и β^- -излучений?

2. Какая доля радиоактивных ядер изотопа ${}^{14}_6\text{C}$ распадается за 100 лет, если его период полураспада 5370 лет?

3. Найдите энергию связи ядра дейтерия ${}^2_1\text{H}$.

4. Вычислите энергию ядерной реакции ${}^7_3\text{Li} + {}^1_1\text{H} \rightarrow {}^4_2\text{He} + {}^4_2\text{He}$.

5. Назовите пропущенную частицу в ядерной реакции ${}^7_3\text{Li} + X \rightarrow {}^{10}_5\text{B} + n$.

6. Исправьте ошибку в записи реакции $\tilde{\nu} + n \rightarrow p + e^-$.

7. Приведите схемы распадов нейтральных короткоживущих K_s^0 -мезонов.

8. Установите соответствие процессов взаимопревращения частиц

1	β^- -распад
2	K -захват
3	β^+ -распад
4	аннигиляция

А	${}^0_{-1}e + {}^0_{+1}e \rightarrow 2\gamma$
Б	${}^1_1p \rightarrow {}^1_0n + {}^0_{+1}e + \nu_e$
В	${}^1_1p + {}^0_{-1}e \rightarrow {}^1_0n + \nu_e$
Г	${}^1_0n \rightarrow {}^1_1p + {}^0_{-1}e + \bar{\nu}_e$
Д	${}^1_0n + {}^0_{-1}e \rightarrow {}^1_1p + \nu_e$

**Модуль 8. Основы физики атомного ядра.
Элементарные частицы**

Вариант 21

1. Что называется удельной энергией связи атомных ядер? Что она характеризует?

2. Постоянная распада рубидия ${}^{89}_{37}\text{Rb}$ равна $7,7 \cdot 10^{-4} \text{ с}^{-1}$. Определите период полураспада рубидия.

3. Вычислите дефект массы и энергию связи изотопов кислорода ${}^{16}_8\text{O}$ и ${}^{17}_8\text{O}$.

4. Определите энергию, освобождающуюся в следующей ядерной реакции: ${}^{44}_{20}\text{Ca} + p \rightarrow {}^{41}_{19}\text{K} + \text{He}$.

5. Напишите недостающие обозначения в следующей ядерной реакции: ${}^{19}_9\text{F} + p \rightarrow {}^{16}_8\text{O} + X$.

6. Какая из приведенных ниже реакций запрещена законом сохранения электрического заряда:

1) $\mu^- \rightarrow e^- + \bar{\nu}_e + \nu_\mu$; 2) $n + \bar{p} \rightarrow e^- + \bar{\nu}_e$;

3) $\nu_\mu + n \rightarrow p + \mu^-$; 4) $n + \nu_e \rightarrow p + e^+$.

7. Как изменяется значение зарядового числа Z при β -распаде?

8. Какая из представленных схем соответствует взаимодействию нуклонов в ядре:

- 1) $n \leftrightarrow n + \pi^+$; 2) $p \leftrightarrow n + \pi^+$; 3) $p \leftrightarrow n + \pi^-$; 4) $p \leftrightarrow p + \pi^-$?

**Модуль 8. Основы физики атомного ядра.
Элементарные частицы**

Вариант 22

1. Какой процесс называется ядерной реакцией? Какие физические законы выполняются во всех ядерных реакциях?

2. Какая доля начального количества атомов распадается за 1 год в радиоактивном изотопе тория ${}_{90}^{229}\text{Th}$?

3. Вычислить дефект массы, энергию связи и удельную энергию связи для ядра атома фтора ${}_{9}^{20}\text{F}$.

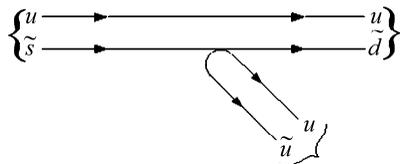
4. Освобождается или поглощается энергия в следующей ядерной реакции: ${}_{4}^9\text{Be} + {}_{1}^2\text{H} \rightarrow {}_{5}^{10}\text{B} + n$?

5. Какой изотоп образуется из ${}_{92}^{239}\text{U}$ после двух β -распадов и одного α -распада?

6. Перечислите типы фундаментальных взаимодействий. Какие частицы участвуют в сильном, или ядерном, взаимодействии?

7. Приведите схемы распадов мюонов. Объясните причину выброса мюонного нейтрино (антинейтрино).

8. На рисунке показана кварковая диаграмма распада K^+ -мезона. Напишите реакцию, соответствующую этой диаграмме.



**Модуль 8. Основы физики атомного ядра.
Элементарные частицы**

Вариант 23

1. Напишите закон радиоактивного распада ядер и назовите величины, входящие в него.

2. Найдите постоянную радиоактивного распада радона, если известно, что число атомов радона уменьшается за сутки на 18,2 %.

3. Определите энергию связи нуклонов в ядре дейтерия и у α -частицы.

4. Найдите энергию, поглощенную при реакции
 ${}^{14}_7\text{N} + {}^4_2\text{He} \rightarrow {}^2_1\text{H} + {}^{16}_8\text{O}$.

5. Назовите пропущенную частицу в ядерной реакции
 ${}^{27}_{13}\text{Al} + X \rightarrow {}^1_1\text{H} + {}^{26}_{12}\text{Mg}$.

6. Перечислите типы фундаментальных взаимодействий. Какие частицы участвуют в слабом взаимодействии?

7. В 1956 г. американские физики Ф. Рейнес и К. Коуэн зафиксировали реакцию захвата электронного антинейтрино протоном. Приведите схему этой реакции.

8. Что такое странность и четность элементарных частиц? Для чего введены эти квантовые характеристики? Всегда ли выполняются законы их сохранения?

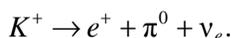
**Модуль 8. Основы физики атомного ядра.
Элементарные частицы**

Вариант 24

1. Напишите недостающие обозначения в следующей ядерной реакции: ${}^9_4\text{Be} + \alpha \rightarrow X + n$.

2. Почему магнитный момент протона имеет то же направление, что и спин, а у электрона направления этих векторов противоположны?

3. Определите, какие из приведенных ниже процессов запрещены законом сохранения лептонного числа: $K^- \rightarrow \mu^- + \tilde{\nu}_\mu$;



4. Напишите реакцию захвата электронного нейтрино нейтроном.

5. Что называется «активностью ядер»? Чему она равна? В каких единицах измеряется?

6. За какое время распадается 1/4 начального количества ядер радиоактивного изотопа с периодом полураспада 24 ч.

7. Определите массу нейтрального атома, если ядро этого атома состоит из трех протонов и двух нейтронов и энергия связи ядра равна 26,3 МэВ.

8. Определите, какие из приведенных процессов разрешены законом сохранения странности: $p + \pi^- \rightarrow \Sigma + K^-$; $p + \pi^- \rightarrow K^+ + K^- + n$.

Модуль 8. Основы физики атомного ядра. Элементарные частицы

Вариант 25

1. Дайте определение периода полураспада ядер.

2. Какая доля атомов радиоактивного изотопа тория ${}_{90}^{234}\text{Th}$, имеющего период полураспада $T_{1/2} = 24,1$ сут, распадается за сутки?

3. Найдите удельную энергию связи ядра ${}^1_3\text{B}$.

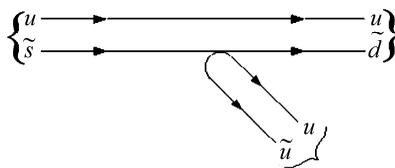
4. Освобождается или поглощается энергия в ядерной реакции ${}^7_3\text{Li} + {}^4_2\text{He} \rightarrow {}^{10}_5\text{B} + n$?

5. Определите X в следующей реакции: ${}^{14}_7\text{N} + X \rightarrow {}^{14}_6\text{C} + p$.

6. Укажите одинаковые характеристики для известных вам частиц и античастиц. В чем их различие?

7. Какие законы сохранения выполняются при слабых взаимодействиях?

8. На рисунке показана кварковая диаграмма распада K^+ -мезона. Напишите реакцию, соответствующую этой диаграмме.



СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Трофимова Т.И. Курс физики: учеб. пособие для вузов. – М.: Академия, 2012. – 542 с.
2. Детлаф А.А., Яворский Б.М. Курс физики: учеб. пособие для вузов. – М.: Академия, 2015. – 718 с.
3. Савельев И.В. Курс общей физики: учеб. пособие для студентов вузов: в 5 т. – 5-е изд., стер. – СПб.: Лань, 2011. Т. 1–5.
4. Краткий курс общей физики: учеб. пособие / Ю.А. Барков, Г.Н. Вотинов, О.М. Зверев, А.В. Перминов. – Пермь: Изд-во Перм. нац. исслед. политехн. ун-та, 2015. – 407 с.
5. Чертов А.Г., Воробьев А.А. Задачник по физике: учеб. пособие для вузов. – 8-е изд., перераб. и доп. – М.: Физматлит, 2006. – 640 с.
7. Волькенштейн В.С. Сборник задач по общему курсу физики: учеб. пособие. – 11-е изд., перераб. – М.: Наука: Физматлит, 2003. – 328 с.

ПРИЛОЖЕНИЕ

СПРАВОЧНЫЕ ДАННЫЕ И ТАБЛИЦЫ

Таблица П.1

Основные физические постоянные (округленные значения)

Физическая постоянная	Обозначение	Значение
Ускорение свободного падения	g	9,81 м/с ²
Гравитационная постоянная	G	$6,67 \cdot 10^{-11}$ м ³ /(кг · с ²)
Число Авогадро	N_A	$6,02 \cdot 10^{23}$ моль ⁻¹
Универсальная газовая постоянная	R	8,31 Дж/(моль · К)
Постоянная Больцмана	k	$1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К
Скорость света в вакууме	c	$3 \cdot 10^8$ м/с
Элементарный заряд	e	$1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл
Электрическая постоянная	ϵ_0	$8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м
Магнитная постоянная	μ_0	$4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м
Постоянная Планка	h	$6,63 \cdot 10^{-34}$ Дж · с
Приведенная постоянная Планка	\hbar	$1,05 \cdot 10^{-34}$ Дж · с
Постоянная Ридберга	R	$3,29 \cdot 10^{15}$ с ⁻¹
	R'	$1,1 \cdot 10^7$ м ⁻¹
Постоянная Стефана–Больцмана	σ	$5,67 \cdot 10^{-8}$ Вт/(м ² · К ⁴)
Постоянная закона смещения Вина	b	$2,9 \cdot 10^{-3}$ м · К

Таблица П.2

Некоторые внесистемные единицы измерения

Название	Обозначение	Значение в СИ
Калория	кал	4,19 Дж
Киловатт · час	кВт · ч	$3,6 \cdot 10^6$ Дж
Миллиметр ртутного столба	мм рт. ст.	133 Па
Ангстрем	Å	10^{-10} м
Атомная единица массы	а.е.м.	$1,66 \cdot 10^{-27}$ кг
Электрон-вольт	эВ	$1,6 \cdot 10^{-19}$ Дж

Таблица П.3

Некоторые астрономические величины

Наименование	Значение
Радиус Земли	$6,37 \cdot 10^6$ м
Масса Земли	$5,98 \cdot 10^{24}$ кг
Радиус Солнца	$6,95 \cdot 10^8$ м
Масса Солнца	$1,98 \cdot 10^{30}$ кг
Радиус Луны	$1,74 \cdot 10^6$ м
Масса Луны	$7,33 \cdot 10^{22}$ кг
Расстояние от центра Земли до центра Солнца	$1,49 \cdot 10^{11}$ м
Расстояние от центра Земли до центра Луны	$3,84 \cdot 10^8$ м

Таблица П.4

Свойства некоторых твердых тел

Вещество	Плотность, 10^3 кг/м ³	Температура плавления, °С	Удельная теплоемкость, Дж/(кг · К)	Удельная теплота плавления, 10^5 Дж/кг
Алюминий	2,6	659	896	3,22
Железо	7,9	1530	500	2,72
Латунь	8,4	900	386	–
Лед	0,9	0	2100	3,35
Медь	8,6	1100	395	1,76
Олово	7,2	232	230	0,586
Платина	21,4	1770	117	1,13
Пробка	0,2	–	2050	–
Свинец	11,3	327	126	0,226
Серебро	10,5	960	234	0,88
Сталь	7,7	1300	460	–
Цинк	7,0	420	391	1,17

Таблица П.5

Свойства некоторых жидкостей

Жидкость	Плотность, 10^3 кг/м^3	Удельная теплоемкость при 20°C , Дж/(кг · К)
Бензол	0,88	1720
Вода	1	4190
Глицерин	1,2	2430
Касторовое масло	0,9	1800
Керосин	0,8	2140
Ртуть	13,6	138
Спирт	0,9	2510

Таблица П.6

Свойства некоторых газов

Газ	Молярная масса, 10^{-3} кг/моль	Плотность, кг/м^3	Эффективный диаметр молекулы, нм
Азот	28	1,25	0,38
Аргон	40	1,78	0,35
Водород	2	0,09	0,28
Воздух	29	1,29	0,35
Гелий	4	0,18	0,22
Кислород	32	1,43	0,36
Углекислый газ	44	1,98	0,4

Таблица П.7

Диэлектрическая проницаемость диэлектриков

Вода	81	Парафин	2	Стекло	6
Воск	7,8	Плексиглас	3,5	Фарфор	6
Керосин	2	Полиэтилен	2,3	Эбонит	2,6
Масло	5	Слюда	6		

Таблица П.8

Удельное сопротивление проводников (при 0 °С), мкОм·м

Алюминий	0,025	Нихром	1,1
Графит	0,039	Ртуть	0,94
Железо	0,087	Свинец	0,22
Медь	0,017	Сталь	0,1

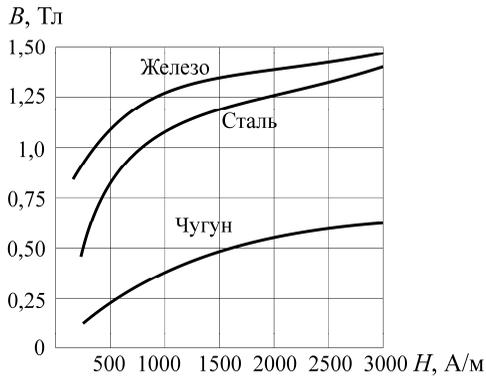
График зависимости магнитной индукции B от напряженности H 

Таблица П.9

Показатели преломления

Алмаз	2,42	Лед	1,31
Вода	1,33	Скипидар	1,47
Глицерин	1,47	Спирт	1,36
Кварц	1,54	Стекло	1,50

Таблица П.10

Работа выхода электронов

Металл	Работа выхода	
	10^{-19} Дж	эВ
Вольфрам	7,2	4,5
Железо	6,9	4,3
Золото	7,4	4,6
Калий	3,5	2,2
Литий	3,7	2,3
Натрий	4,0	2,5
Серебро	7,5	4,7
Цинк	6,4	4,0

Таблица П.11

Масса и энергия покоя некоторых частиц

Частица	Масса		Энергия	
	кг	а.е.м	Дж	МэВ
α -частица	$6,64 \cdot 10^{-27}$	4,00149	$5,96 \cdot 10^{-10}$	3733
Дейтрон	$3,35 \cdot 10^{-27}$	2,01355	$3,00 \cdot 10^{-10}$	1876
Нейтрон	$1,67 \cdot 10^{-27}$	1,00867	$1,51 \cdot 10^{-10}$	939
Протон	$1,67 \cdot 10^{-27}$	1,00728	$1,50 \cdot 10^{-10}$	938
Электрон	$9,11 \cdot 10^{-31}$	0,00055	$8,16 \cdot 10^{-14}$	0,511

Таблица П.12

Периоды полураспада радиоактивных изотопов

Изотоп	Символ	Период полураспада
Актиний	${}_{89}\text{Ac}^{225}$	10 сут
Йод	${}_{53}\text{I}^{131}$	8 сут
Кальций	${}_{20}\text{Ca}^{45}$	164 сут
Кобальт	${}_{27}\text{Co}^{60}$	5,3 года
Полоний	${}_{84}\text{Po}^{210}$	138 сут
Радий	${}_{88}\text{Ra}^{226}$	1620 лет
Радон	${}_{86}\text{Rn}^{222}$	3,8 сут
Стронций	${}_{38}\text{Sr}^{90}$	28 лет
Торий	${}_{90}\text{Th}^{229}$	7000 лет
Уран	${}_{92}\text{U}^{238}$	$4,5 \cdot 10^9$ лет
Фосфор	${}_{15}\text{P}^{32}$	14,3 сут

Таблица П.13

Массы изотопов, а.е.м.

Изотоп	Масса	Изотоп	Масса	Изотоп	Масса
1_0n	1,00867	${}^{14}_6\text{C}$	14,00324	${}^{41}_{16}\text{K}$	40,96184
${}^1_1\text{H}$	1,00783	${}^{13}_7\text{N}$	13,00574	${}^{40}_{20}\text{Ca}$	39,97542
${}^2_1\text{H}$	2,01410	${}^{14}_7\text{N}$	14,00307	${}^{44}_{20}\text{Ca}$	43,95549
${}^3_1\text{H}$	3,01605	${}^{15}_7\text{N}$	15,00011	${}^{54}_{26}\text{Fe}$	53,95600
${}^3_2\text{He}$	3,01602	${}^{16}_8\text{O}$	15,99491	${}^{56}_{27}\text{Co}$	55,95769
${}^4_2\text{He}$	4,00260	${}^{17}_8\text{O}$	16,99913	${}^{63}_{29}\text{Cu}$	62,94962
${}^6_3\text{Li}$	6,01513	${}^{18}_8\text{O}$	17,99916	${}^{113}_{48}\text{Cd}$	112,94206
${}^7_3\text{Li}$	7,01601	${}^{20}_{10}\text{Ne}$	20,18300	${}^{127}_{53}\text{J}$	126,90435
${}^7_4\text{Be}$	7,01693	${}^{22}_{10}\text{Na}$	21,99444	${}^{137}_{55}\text{Cs}$	136,90682
${}^8_4\text{Be}$	8,00531	${}^{23}_{10}\text{Na}$	22,98977	${}^{200}_{80}\text{Hg}$	200,02800
${}^9_4\text{Be}$	9,01218	${}^{23}_{12}\text{Mg}$	22,99414	${}^{206}_{82}\text{Pb}$	205,97446
${}^{10}_4\text{Be}$	10,01354	${}^{27}_{13}\text{Al}$	26,98154	${}^{210}_{84}\text{Po}$	209,98297
${}^{10}_5\text{B}$	10,01294	${}^{30}_{13}\text{Al}$	29,99817	${}^{235}_{92}\text{U}$	235,11750
${}^{11}_5\text{B}$	11,00931	${}^{30}_{14}\text{Si}$	29,98325	${}^{238}_{92}\text{U}$	238,12376
${}^{12}_6\text{C}$	12,00000	${}^{31}_{14}\text{Si}$	30,97535		
${}^{13}_6\text{C}$	13,00335	${}^{31}_{15}\text{P}$	30,97376		

Таблица П.14

Классификация элементарных частиц

Группа	Название частицы	Символ		Заряд, в ед. e	Масса покоя, в ед. m_e	Спин, в ед. \hbar	Изоспин I	Лептонное число L	Барионное число B	Странность S	Время жизни в секундах		
		частица	античастица										
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12		
Фотон	фотон	γ		0	0	1	-	0	0	0	стабилен		
Лептоны	электрон	e^-	e^+	1	1	1/2	-	+1	0	0	стабилен		
	электронное нейтрино	ν_e	$\bar{\nu}_e$	0	0	1/2	-	+1	0	0	стабильно		
	мюон	μ^-	μ^+	1	206,8	1/2	-	+1	0	0	$\approx 10^{-6}$		
	мюонное нейтрино	ν_μ	$\bar{\nu}_\mu$	0	0	1/2	-	+1	0	0	стабильно		
	таон	τ^-	τ^+	1	3487	1/2	-	+1	0	0	$\approx 10^{-12}$		
	таонное нейтрино	ν_τ	$\bar{\nu}_\tau$	0	0	1/2	-	+1	0	0	?		
Адроны	Мезоны	пионы	π^0		0	264,1	0	1	0	0	0	$\approx 10^{-16}$	
			π^+	π^-	1	273,1	0	1	0	0	0	$\approx 10^{-8}$	
		каоны	K^0	\bar{K}^0	0	974,0	0	1/2	0	0	+1	$10^{-10} \div 10^{-8}$	
			K^+	K^-	1	966,2	0	1/2	0	0	+1	$\approx 10^{-8}$	
		эта-мезон	η^0		1	1074	0	-	0	0	0	$\approx 10^{-19}$	
	Барионы	Гипероны	лямбда	Λ^0	$\bar{\Lambda}^0$	0	2183	1/2	0	0	+1	-1	$\approx 10^{-10}$
				Σ^0	$\bar{\Sigma}^0$	0	2334	1/2	1	0	+1	-1	$\approx 10^{-20}$
		сигма	Σ^+	$\bar{\Sigma}^+$	1	2328	1/2	1	0	+1	-1	$\approx 10^{-10}$	
			Σ^-	$\bar{\Sigma}^-$	1	2343	1/2	1	0	+1	-1	$\approx 10^{-10}$	
			Ξ^0	$\bar{\Xi}^0$	0	2573	1/2	1/2	0	+1	-2	$\approx 10^{-10}$	
		кси	Ξ^-	$\bar{\Xi}^-$	1	2586	1/2	1/2	0	+1	-2	$\approx 10^{-10}$	
			Ω^-	$\bar{\Omega}^-$	1	3273	3/2	0	0	+1	-3	$\approx 10^{-10}$	
протон	P	\bar{p}	1	1836,2	1/2	1/2	0	+1	0	стабилен			
нейтрон	n	\bar{n}	0	1838,7	1/2	1/2	0	+1	0	$\approx 10^3$			

Таблица 15

Множители и приставки для образования
десятичных кратных и дольных единиц и их наименования

Приставка			Приставка		
Наименование	Обозначение	Множитель	Наименование	Обозначение	Множитель
экса	Э	10^{18}	деци	д	10^{-1}
пэта	П	10^{15}	санتي	с	10^{-2}
тера	Т	10^{12}	милли	м	10^{-3}
гига	Г	10^9	микро	мк	10^{-6}
мега	М	10^6	нано	н	10^{-9}
кило	к	10^3	пико	п	10^{-12}
гекто	г	10^2	фемто	ф	10^{-15}
дека	да	10^1	атто	а	10^{-18}

Учебное издание

ЗВЕРЕВ Олег Михайлович,
ПЕРМИНОВ Анатолий Викторович

СБОРНИК ЗАДАЧ ПО ФИЗИКЕ

Учебное пособие

Корректор *В.В. Мальцева*

Подписано в печать 4.08.2017. Формат 60×90/16.
Усл. печ. л. 29,5. Тираж 54 экз. Заказ № 185/2017.

Издательство
Пермского национального исследовательского
политехнического университета.
Адрес: 614990, г. Пермь, Комсомольский проспект, 29, к. 113.
Тел. (342) 219-80-33.