

Министерство образования и науки Российской Федерации  
Федеральное государственное бюджетное образовательное  
учреждение высшего образования  
РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ  
ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ  
(РГГМУ)

Кафедра физики

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ  
И КОНТРОЛЬНАЯ РАБОТА № 4

по дисциплине

**«ФИЗИКА»**

Раздел

**«Магнетизм и электромагнитные явления»**

Курс 2

Для направлений: 05.03.05 – Прикладная гидрометеорология  
05.03.06 – Экология и природопользование

Заочная форма обучения



Санкт-Петербург, 2018

Утверждено Редакционно-издательским советом РГГМУ

**Методические указания и контрольная работа № 4 по дисциплине «Физика».** Раздел «Магнетизм и электромагнитные явления». – СПб.: Изд. РГГМУ, 2018. – 49 с.

*Составители:* Т.Ю. Яковлева, А.В. Бармасов, А.М. Бармасова, В.В. Косцов, Н.В. Дьяченко.

*Ответственный редактор:* А.П. Бобровский

Настоящее учебно-методическое пособие содержит методические указания и контрольную работу по разделу «Магнетизм и электромагнитные явления».

Цель данного учебно-методического пособия – оказать помощь студентам-заочникам в изучении курса физики.

В пособии даны основные формулы и контрольная работа. Кроме того, в пособии даны общие методические указания и некоторые справочные таблицы.

Учебно-методическое пособие может быть использовано как для аудиторных занятий, так и для самостоятельной работы студентов факультетов: метеорологического, гидрологического, экологического, океанологического.

© Авторы, 2018,

© Российский государственный гидрометеорологический университет (РГГМУ), 2018

## ОБЩИЕ МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

Учебная работа студента-заочника по изучению физики складывается из следующих основных элементов: самостоятельного изучения физики по учебным пособиям, решения задач, выполнения контрольных и лабораторных работ, сдачи зачётов и экзаменов.

### *1. Указания к самостоятельной работе по учебным пособиям*

1. Изучать курс систематически в течение всего учебного процесса. Изучение физики в сжатые сроки перед экзаменом не даст глубоких и прочных знаний.

2. Выбрав какое-либо учебное пособие в качестве основного для определённой части курса, придерживаться данного пособия при изучении всей части или, по крайней мере, её раздела. Замена одного пособия другим в процессе изучения может привести к утрате логической связи между отдельными вопросами. Но если основное пособие не даёт полного и ясного ответа на некоторые вопросы программы, необходимо обращаться к другим учебным пособиям.

3. При чтении учебного пособия составлять конспекты, в которых записывать законы и формулы, выражающие эти законы, определение физических величин и их единиц, делать чертежи и решать типовые задачи. При решении задач следует пользоваться Международной системой единиц (СИ).

4. Самостоятельную работу по изучению физики подвергать систематическому контролю. Для этого после изучения очередного раздела следует ставить вопросы и отвечать на них. При этом надо использовать рабочую программу физики.

5. Прослушать курс лекций по физике, организуемый для студентов-заочников. Пользоваться очными консультациями преподавателей, а также задавать вопросы в письменном виде.

### *2. Указания к решению задач*

1. Указать основные законы и формулы, на которых базируется решение, и дать словесную формулировку этих законов, разъяснить буквенные обозначения формул. Если при решении задач применяется формула, полученная для частного случая, не выражающая какой-нибудь физический закон, или не являющаяся определением какой-нибудь физической величины, то её следует вывести.

2. Дать чертёж, поясняющий содержание задачи (в тех случаях, когда это возможно); выполнять его надо аккуратно с помощью чертёжных принадлежностей.

3. Сопровождать решение задачи краткими, но исчерпывающими пояснениями.

4. Получить решение задачи в общем виде, т. е. выразить искомую величину в буквенных обозначениях величин, заданных в условии задачи. При этом способе решения не производятся вычисления промежуточных величин.

5. Подставить в правую часть полученной рабочей формулы вместо символов величин обозначения единиц, произвести с ними необходимые действия и убедиться в том, что полученная при этом единица соответствует искомой величине.

6. Подставить в рабочую формулу числовые значения величин, выраженные в единицах одной системы. Несоблюдение этого правила приводит к неверному результату. Исключение из этого правила допускается лишь для тех однородных величин, которые входят в виде множителей в числитель и знаменатель формулы с одинаковыми показателями степени. Такие величины не обязательно выражать в единицах той системы, в которой ведётся решение задачи. Их можно выразить в любых, но только одинаковых единицах.

7. Произвести вычисление величин, подставленных в формулу, руководствуясь правилами приближенных вычислений записать в ответе числовое значение и сокращённое наименование единицы искомой величины.

8. При подстановке в рабочую формулу, а также при записи ответа числовые значения величин записать как произведение десятичной дроби с одной значащей цифрой перед запятой на соответствующую степень десяти. Например, вместо 7460 надо записать  $7,46 \cdot 10^3$ , вместо 0,00000298 записать  $2,98 \cdot 10^{-6}$  и т.д.

9. Оценить, где это целесообразно, правдоподобность числового ответа. В ряде случаев такая оценка поможет обнаружить ошибочность полученного результата. Например, коэффициент полезного действия тепловой машины не может быть больше единицы, электрический заряд не может быть меньше элементарного заряда  $|e| = 1,6 \cdot 10^{-19}$  Кл, скорость тела не может быть больше скорости света в вакууме  $c_0 = 3 \cdot 10^8$  м/с и т.д.

### 3. Указания к выполнению контрольных работ

К выполнению контрольных работ по каждому разделу физики студент-заочник приступает только после изучения материала, соответствующего данному разделу программы.

При выполнении контрольных работ студенту необходимо руководствоваться следующим:

10. Контрольные работы выполняются чернилами в обычной школьной тетради, на обложке которой приводятся сведения по следующему образцу:

Контрольная работа № 4 по физике  
(вариант 4, номер зачётки 09134)  
студента 2 курса гидрологического факультета РГГМУ  
Пушкина Александра Сергеевича.

Адрес: индекс 190000, г. С.-Петербург, Невский пр., д. 77, кв. 1.

2. Условия задач к контрольной работе переписываются полностью без сокращений. Для замечаний преподавателя на страницах тетради оставляются поля.

3. В конце контрольной работы указывается, каким учебником или учебным пособием студент пользовался при изучении физики (название учебника, автор, год издания). Это делается для того, чтобы рецензент в случае необходимости мог указать, что следует студенту изучить для завершения контрольной работы.

4. Высылать на рецензию следует одновременно не более одной работы. Во избежание одних и тех же ошибок очередную работу следует высылать только после получения рецензии на предыдущую.

5. Если контрольная работа при рецензировании не зачтена, студент обязан представить её на повторную рецензию, включив в неё те задачи, решения которых оказались неверными. Повторная работа представляется вместе с незачтённой.

6. В контрольной работе студент должен решить 8-9 задач того варианта, номер которого совпадает с последней цифрой его зачётки. Номера задач, которые студент должен включить в контрольную работу, определяются по таблицам вариантов.

7. Зачтённые контрольные работы предъявляются экзаменатору. Студент должен быть готов во время экзамена дать пояснения по существу решения задач, входящих в контрольные работы.

## МАГНЕТИЗМ И ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ЯВЛЕНИЯ

**Теорема о циркуляции вектора магнитной индукции** утверждает, что циркуляция вектора  $\mathbf{B}$  магнитного поля постоянных токов по любому замкнутому контуру  $l$  пропорциональна сумме всех токов, пронизывающих контур<sup>1</sup>:

$$\oint_l \mathbf{B} d\mathbf{l} \sim \sum_i I_i. \quad (4.1.1)$$

**Магнитный поток (поток вектора магнитной индукции)**  $\Phi_B$  сквозь замкнутый контур  $S$  – вся совокупность *линий магнитной индукции*, пронизывающих этот контур, т. е. поток вектора магнитной индукции через поверхность:

$$\Phi_B = \oint_S \mathbf{B}_n dS, \quad (4.1.2)$$

где  $\oint_S$  – интеграл по замкнутой поверхности  $S$ ;  $dS$  – элемент площади;

$\mathbf{n}$  – единичный вектор нормали к  $S$ .

**Теорема Остроградского–Гаусса для магнитного поля:**

$$\oint_S \mathbf{B}_n dS = 0. \quad (4.1.3)$$

Если  $\mathbf{B}$  – магнитная индукция в какой-либо точке поля в вакууме, то **напряжённостью магнитного поля (силой магнитного поля)** в той же точке поля называют векторную величину  $\mathbf{H}$ :

$$\mathbf{H} \equiv \frac{\mathbf{B}}{\mu_0}, \quad (4.1.4)$$

где  $\mu_0$  – магнитная постоянная.

В изотропной среде индукция  $\mathbf{B}$  связана с напряжённостью  $\mathbf{H}$  равенством:

$$\mathbf{B} = \mu_0 \mu \mathbf{H}, \quad (4.1.5)$$

---

<sup>1</sup> Строго говоря, циркуляция вектора  $\mathbf{B}$  магнитного поля постоянных токов по любому контуру  $l$  всегда равна произведению *магнитной постоянной*  $\mu_0$  на сумму всех токов, пронизывающих контур. Теорема о циркуляции в общем виде следует из *закона Био–Савара–Лапласа* и *принципа суперпозиции*.

где  $\mu$  – магнитная проницаемость ( $\mu$  в изотропной магнитной среде представляет собой безразмерный числовой множитель во всех системах единиц, в анизотропных средах проницаемость  $\mu$  описывается уже набором девяти чисел и представляет собой матрицу третьего порядка (**тензор магнитной проницаемости**)).

По аналогии с электрическим напряжением вдоль контура в электростатическом поле можно ввести **магнитное напряжение**  $U_m$  вдоль контура  $l$  в магнитном поле напряжённостью  $\mathbf{H}$ :

$$U_m \equiv \int_l \mathbf{H}_l d\mathbf{l}, \quad (4.1.6)$$

где  $d\mathbf{l}$  – элемент длины контура  $l$ ;  $\mathbf{H}_l$  – проекция напряжённости магнитного поля на направление  $d\mathbf{l}$ .

**Закон Максвелла–Ампера:** Магнитное напряжение  $U_m$  вдоль замкнутого контура в магнитном поле равно полной силе тока  $I$ , протекающего сквозь поверхность, ограниченную рассматриваемым контуром:

$$U_m = \oint_l \mathbf{H} d\mathbf{l} = I. \quad (4.1.7)$$

**Магнитодвижущая сила (намагничивающая сила)  $F$**  – величина, характеризующая намагничивающее действие электрического тока и равная циркуляции вектора напряжённости магнитного поля  $\mathbf{H}$  по замкнутому контуру  $l$ , охватывающему электрические токи, которые создают это магнитное поле:

$$F = \oint_l \mathbf{H} d\mathbf{l} = \int_l \mathbf{H}_l d\mathbf{l} = \sum_{i=1}^n I_i \quad (\text{СИ}), \quad (4.1.8)$$

где  $\mathbf{H}_l$  – проекция  $\mathbf{H}$  на направление элемента контура интегрирования  $d\mathbf{l}$ ;  $n$  – число проводников (витков) с током  $I_i$ , охватываемых контуром.

**Закон Ампера:** Циркуляция вектора магнитной индукции по замкнутому контуру вокруг проводника с током прямо пропорциональна силе тока в проводнике.

$$\oint_l \mathbf{B}_n d\mathbf{l} = B_n \oint_l d\mathbf{l} = k_0 \frac{2I}{r} 2\pi r = k_0 4\pi I, \quad (4.1.9)$$

где  $k_0$  – коэффициент, равный  $\frac{1}{4\pi}$  в системе СИ и  $\frac{1}{c_0}$  в гауссовой системе.

**Закон Био–Савара–Лапласа** определяет магнитное поле  $d\mathbf{B}$  элемента тока  $I d\mathbf{l}$  на расстоянии  $r$  от него:

$$d\mathbf{B} = \frac{\mu_a I d\mathbf{l} \sin\alpha}{4\pi r^2}, \quad (4.1.10)$$

где  $r$  – расстояние от данного участка  $d\mathbf{l}$  до точки наблюдения;  $\alpha$  – угол между направлением на точку наблюдения и направлением тока на данном участке;  $\mu_a$  – абсолютная магнитная проницаемость.

Магнитное поле на расстоянии  $r$  по нормали от оси прямого длинного проводника с круглым сечением радиуса  $R$ :

$$r \geq R \Rightarrow H = k_0 \frac{2I}{r}, \quad r < R \Rightarrow H = k_0 \frac{2Ir}{R^2}. \quad (4.1.11)$$

Магнитное поле в центре витка радиуса  $R$ :

$$H = k_0 \frac{2\pi I}{R}. \quad (4.1.12)$$

Магнитное поле на оси кругового контура в точке, отстоящей от плоскости контура на расстоянии  $r \ll R$ :

$$H = k_0 \frac{2\pi R^2 I}{r^3}. \quad (4.1.13)$$

Магнитное поле между кольцами Гельмгольца радиуса  $R$ :

$$H = 0,716 k_0 \frac{I}{R}. \quad (4.1.14)$$

Магнитное поле на оси соленоида из  $N$  витков:

$$H = k_0 4\pi N I. \quad (4.1.15)$$

Магнитное поле внутри тороида радиуса  $R$  из  $N$  витков:

$$H \approx k_0 \frac{NI}{2\pi R}. \quad (4.1.16)$$

**Интенсивностью намагничивания вещества** или **вектором намагничивания вещества** или **вектором намагниченности** или просто **намагниченностью**<sup>2</sup>  $\mathbf{J}$  называют характеристику магнитного состояния макроскопического физического тела – суммарный магнитный момент единицы объёма данного вещества, характеризующий степень магнитной поляризации среды. В случае

---

<sup>2</sup> Некоторые современные издания рекомендуют обозначать намагниченность буквой  $\mathbf{M}$ , другие –  $\mathbf{I}$ .

однородно намагниченного тела намагниченность определяют как магнитный момент единицы объёма тела:

$$J \equiv \frac{M}{V} = \frac{\sum_{k=1}^N p_{mi_{\text{мол}}} k}{V} = n \langle p_m \rangle, \quad (4.2.1)$$

где  $M$  – магнитный момент тела;  $V$  – объём изотропного намагниченного тела;  $n$  – объёмная концентрация молекул;  $\langle p_m \rangle$  – среднее значение магнитного момента молекул.

**Магнитная восприимчивость**  $\chi$  – безразмерная скалярная величина, характеризующая связь намагниченности  $J$  вещества с магнитным полем в этом веществе; в статических полях равна отношению намагниченности вещества к напряжённости намагничивающего поля:

$$\chi = \frac{J}{H}, \quad (4.2.2)$$

$$\mu_{\text{СИ}} = 1 + \chi, \quad \mu_{\text{гауссова}} = 1 + 4\pi\chi. \quad (4.2.3)$$

Если во всех токах намагниченного тела вектор  $J$  постоянен по величине и направлению, то тело намагничено однородно, и для него можно ввести понятие **поверхностной плотности магнетизма**  $\sigma_m$ , которая связана с величиной  $J$  соотношением:

$$\sigma_m = J \cos(I, n), \quad (4.2.4)$$

где  $n$  – нормаль к поверхности тела.

**Теорема Лармора:** Движение системы заряженных частиц (как целого), состоящей из частиц с одинаковым удельным зарядом, совершающих нерелятивистское ограниченное в пространстве движение в слабом магнитном поле  $H$  эквивалентно поведению их в системе отсчёта, равномерно вращающейся с угловой скоростью

$$\omega_L = \frac{q \mu_a H}{2m_e}.$$

**Закон Кюри** – зависимость магнитной восприимчивости  $\chi$  от температуры  $T$  для парамагнетиков, в которых магнитные моменты атомов слабо взаимодействуют друг с другом:

$$\chi(T) = \frac{C}{T}, \quad (4.2.5)$$

где  $C$  – постоянная Кюри.

**Закон Кюри–Вейса** – зависимость магнитной восприимчивости  $\chi$  от температуры  $T$  для парамагнетиков:

$$\chi(T) = \frac{C}{T - \Theta}, \quad (4.2.6)$$

где  $C$  – постоянная, зависящая от вещества;  $\Theta$  – точка Кюри (**парамагнитная температура Кюри**) или точка Трег (для антиферромагнетиков).

**Сила Лоренца**  $F_L$  – механическая сила, действующая на одиночный заряд, движущийся в магнитном поле с индукцией  $\mathbf{B}$ , прямо пропорциональная величине заряда  $q$ , его скорости  $u$  и величине магнитного поля  $\mathbf{B}$ :

$$F_L = q[u B]. \quad (4.3.1)$$

**Эффект Холла** – возникновение в твёрдом проводнике с током, помещённом в магнитном поле, разности потенциалов электрического поля в направлении, перпендикулярном направлению тока и вектора  $\mathbf{H}$ :

$$U = RdjB, \quad (4.3.2)$$

где  $R$  – постоянная (коэффициент) Холла.

**Закон электромагнитной индукции Фарадея–Ленца (основной закон электромагнитной индукции)**: В любом замкнутом контуре при изменении магнитного потока через поверхность (площадь), ограниченную этим контуром, возникает ЭДС индукции, пропорциональная скорости изменения магнитного потока:

$$E_{\text{инд}} = -\frac{d\Phi_B}{dt} \text{ (СИ)}, \quad (4.4.1)$$

где  $\Phi_B$  – магнитный поток. Знак «минус» означает, что направление индукционного тока таково, что создаваемое им магнитное поле препятствует изменению первичного магнитного потока.

Изменения тока вызывают изменения создаваемого им магнитного потока, что в свою очередь приводит к появлению ЭДС самоиндукции  $E_{\text{инд}}$ , равной:

$$E_{\text{инд}} = -\frac{d\Phi_B}{dt} = -\frac{d}{dt}(LI) = -L\frac{dI}{dt}, \quad (4.4.2)$$

где  $L$  – коэффициент самоиндукции (индуктивность). Индуктивность  $L$  может быть вынесена из-под знака производной, если она постоянна

(т. е., например, провода не деформировались за время изменения тока).

Цепь, состоящая из резистора и конденсатора. Если конденсатор вначале не был заряжен, то процесс зарядки конденсатора:

$$U(t) = E \left[ 1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) \right], \quad (4.4.3)$$

где  $\tau \equiv RC$  – постоянная времени цепи, состоящей из резистора и конденсатора.

Цепь, состоящая из резистора и индуктивности. Если конденсатор вначале не был заряжен, то процесс зарядки конденсатора:

$$I(t) = \frac{E}{R} \left[ 1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) \right], \quad (4.4.4)$$

где  $\tau \equiv \frac{L}{R}$  – постоянная времени цепи с индуктивностью  $L$  и сопротивлением  $R$ .

**Собственная энергия конденсатора:**

$$W = \frac{1}{2} \frac{q^2}{C}, \quad (4.4.5)$$

где  $q$  – электрический заряд;  $C$  – электрическая ёмкость.

**Собственная энергия электрического тока:**

$$W = \frac{1}{2} I^2 L, \quad (4.4.6)$$

где  $I$  – сила электрического тока;  $L$  – индуктивность.

В случае, если в качестве нагрузки выступает активное (омическое) сопротивление  $R$ , ток в цепи определяется соотношением:

$$I(t) = I_0 \cos \omega t. \quad (4.5.1)$$

Если электрическая цепь состоит только из конденсатора ёмкости  $C$ , то изменение тока со временем определяется скоростью изменения заряда конденсатора  $I = \frac{dq}{dt}$ :

$$I(t) = I_0 \cos\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right), \quad (4.5.2)$$

где  $I_0 = \omega C U_0$ .

**Ёмкостное сопротивление:**

$$X_c = \frac{1}{\omega C}. \quad (4.5.3)$$

Напряжение в цепи с катушкой индуктивности опережает ток на  $\frac{\pi}{2}$ :

$$U(t) = U_0 \cos\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right), \quad (4.5.4)$$

где  $U_0 = \omega L I_0$ .

**Индуктивное сопротивление:**

$$X_L = \omega L. \quad (4.5.5)$$

Если в цепь переменного тока включить катушку индуктивности, то полное сопротивление цепи будет:

$$Z = \sqrt{R^2 + \omega^2 L^2}. \quad (4.5.6)$$

**Эффективные (действующие) значения** величин силы тока  $I_{\text{эф}}$  и напряжения  $U_{\text{эф}}$ :

$$I_{\text{эф}} = \frac{I_0}{\sqrt{2}}, \quad (4.5.7)$$

$$U_{\text{эф}} = \frac{U_0}{\sqrt{2}}. \quad (4.5.8)$$

**Полное сопротивление цепи или импеданс:**

$$Z = \sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2}. \quad (4.5.9)$$

**Обобщённый закон Ома:**

$$I_0 = \frac{U_0}{\sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2}} = \frac{U_0}{Z}. \quad (4.5.10)$$

**Реактивное сопротивление:**

$$X = \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right). \quad (4.5.11)$$

**Резонансная частота электрической цепи:**

$$\omega_0 \equiv \frac{1}{\sqrt{LC}}. \quad (4.5.12)$$

**Добротность  $Q$   $RLC$ -контура:**

$$Q = \frac{1}{R} \sqrt{\frac{L}{C}}. \quad (4.5.13)$$

**Активная мощность:**

$$P = IU \cos \varphi. \quad (4.5.14)$$

**Реактивная мощность:**

$$Q = IU \sin \varphi. \quad (4.5.15)$$

**Полная мощность** является геометрической суммой активной и реактивной мощностей.

**Коэффициент трансформации** трансформатора:

$$K \equiv \frac{E_2}{E_1} = \frac{U_2}{U_1} = \frac{n_2}{n_1}. \quad (4.5.16)$$

**Коэффициентом полезного действия (КПД)  $\eta$**  трансформатора называют отношение мощности, выделяемой на нагрузке, к мощности, потребляемой первичной обмоткой от сети:

$$\eta = \frac{P_2}{P_1}. \quad (4.5.17)$$

**Ток смещения** – скорость изменения во времени электрической индукции:

$$I_c = S \frac{dD}{dt}, \quad (4.6.1)$$

где  $I_c$  – сила тока смещения,  $S$  – площадь.

**Плотность тока смещения  $j_c$ :**

$$j_c = \frac{I_c}{S} = \frac{dD}{dt}. \quad (4.6.2)$$

**Первое уравнение Максвелла<sup>3</sup> в интегральной форме:**

$$\oint_l H dl = \frac{4\pi}{c_0} \int_S \left( j_n + \frac{1}{4\pi} \frac{\partial D_n}{\partial t} \right) dS = I + \frac{\partial \Phi_D}{\partial t}, \quad (4.6.3)$$

где  $j_n$  – проекция плотности тока проводимости  $\mathbf{j}$  на нормаль к бесконечно малой площадке  $dS$ , являющейся частью площадки  $S$ ;  $\frac{1}{4\pi} \frac{\partial D_n}{\partial t}$  – проекция плотности тока смещения на ту же нормаль;  $c_0$  – скорость распространения электромагнитных взаимодействий в вакууме;  $I$  – сила тока проводимости;  $\Phi_D$  – поток вектора электрического смещения сквозь площадку  $S$ .

**Второе<sup>4</sup> уравнение Максвелла в интегральной форме в гауссовой системе:**

$$\oint_l E dl = -\frac{1}{c_0} \int_S \frac{\partial B_n}{\partial t} dS = -\frac{\partial \Phi_B}{\partial t}, \quad (4.6.4)$$

где  $B_n$  – проекция на нормаль к бесконечно малой площадке  $dS$  вектора магнитной индукции  $\mathbf{B}$ ;  $\Phi_B$  – поток магнитной индукции через площадку  $S$ , ограниченную контуром  $l$ , причём частная производная по времени означает, что  $\mathbf{B}$ , а, следовательно, и  $\Phi_B$ , могут зависеть не только от времени, а и от координат (от положения площадки  $S$ ), знак «минус» соответствует правилу Ленца для направления индукционного тока.

**Третье уравнение Максвелла в интегральной форме:**

$$\oint_S B_n dS = 0. \quad (4.6.5)$$

**Четвёртое уравнение Максвелла в интегральной форме:**

$$\oint_S D_n dS = 4\pi \int_V \rho dV = q. \quad (4.6.6)$$

Полная система **уравнений Максвелла в дифференциальной форме**, в которых все входящие величины относятся к одной и той же точке поля:

<sup>3</sup> В традиционной нумерации, идущей от Герца и Хевисайда. Часто это уравнение называют «вторым уравнением Максвелла».

<sup>4</sup> С точки зрения логики изложения это уравнение правильнее было бы называть «первым уравнением Максвелла».

$$\begin{aligned}\frac{\partial D_x}{\partial t} + j_x &= \frac{\partial H_z}{\partial y} - \frac{\partial H_y}{\partial z}, \\ \frac{\partial D_y}{\partial t} + j_y &= \frac{\partial H_x}{\partial z} - \frac{\partial H_z}{\partial x}, \\ \frac{\partial D_z}{\partial t} + j_z &= \frac{\partial H_y}{\partial x} - \frac{\partial H_x}{\partial y}.\end{aligned}\tag{4.6.7}$$

$$\begin{aligned}-\frac{\partial B_x}{\partial t} &= \frac{\partial E_z}{\partial y} - \frac{\partial E_y}{\partial z}, \\ -\frac{\partial B_y}{\partial t} &= \frac{\partial E_x}{\partial z} - \frac{\partial E_z}{\partial x}, \\ -\frac{\partial B_z}{\partial t} &= \frac{\partial E_y}{\partial x} - \frac{\partial E_x}{\partial y}.\end{aligned}\tag{4.6.8}$$

$$\frac{\partial B_x}{\partial x} + \frac{\partial B_y}{\partial y} + \frac{\partial B_z}{\partial z} = 0.\tag{4.6.9}$$

$$\frac{\partial D_x}{\partial x} + \frac{\partial D_y}{\partial y} + \frac{\partial D_z}{\partial z} = \rho.\tag{4.6.10}$$

**Период колебаний в колебательном контуре:**

$$T = 2\pi\sqrt{LC},\tag{4.6.11}$$

где  $L$  – индуктивность;  $C$  – электроёмкость.

**Формула Томсона:**

$$v_{\text{рез}} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{1}{LC}}.\tag{4.6.12}$$

**Период свободных электромагнитных колебаний:**

$$T = 2\pi\sqrt{LC}.\tag{4.6.13}$$

Вектор потока  $S$  электромагнитной энергии – **вектор Умова–Пойнтинга (вектор Пойнтинга<sup>5</sup>):**

$$S \equiv [EH].\tag{4.6.14}$$

---

<sup>5</sup> Вектор Пойнтинга иногда обозначают  $P$ .

**Теорема Пойнтинга (теорема Умова–Пойнтинга):**

$$S_n = \frac{\partial W}{\partial t} \frac{1}{S},$$

$$\left| \frac{\partial W}{\partial t} \right| = \int_S S_n dS, \quad (4.6.15)$$

где  $S_n$  – нормальная к поверхности составляющая вектора  $S$ , а интегрирование производится по всей замкнутой поверхности  $S$ , причём за положительное направление принимается направление внешней нормали  $n$ , т. е. поток  $\int_S S_n dS$  будет положительным, если линии вектора  $S$  выходят из рассматриваемого объёма наружу.

**Магнитное сопротивление:**

$$R_m = \frac{1}{\mu_a} \frac{l}{S}, \quad (4.7.1)$$

где  $\Phi_B$  – магнитный поток. Знак «минус» означает, что направление индукционного тока таково, что создаваемое им магнитное поле препятствует изменению первичного магнитного потока.

**«Магнитный» аналог закона Ома:**

$$F = \Phi R_m. \quad (4.7.2)$$

**«Магнитный» аналог первого правила Кирхгофа:**

$$\sum_i \Phi_{Bi} = 0. \quad (4.7.3)$$

**«Магнитный» аналог второго правила Кирхгофа:**

$$\sum_i \Phi_{Bi} R_{m_i} = \sum_k F_k. \quad (4.7.4)$$

Максимальный вес груза, удерживаемого электромагнитом, или **подъёмная сила электромагнита:**

$$F \approx \frac{1}{2} \mu_0 B^2 S, \quad (4.7.5)$$

где  $B$  – значение магнитной индукции внутри сердечника;  $S$  – площадь соприкосновения сердечника и якоря.

**Контактная разность потенциалов  $\Delta\varphi$ :**

$$\varphi_1 - \varphi_2 = \frac{\mu_1 - \mu_2}{e}, \quad (4.8.1)$$

где  $\mu_1, \mu_2$  – начальные химические потенциалы, зависящие от температуры;  $e$  – заряд электрона;  $\phi_1, \phi_2$  – приобретённые потенциалы.

Зависимость термоЭДС от разности температур «горячего» и «холодного» спаев термопары:

$$E = \alpha \Delta T = \alpha (T_2 - T_1), \quad (4.8.2)$$

где  $E$  – термоЭДС;  $\alpha$  – коэффициент термоЭДС (коэффициент Зеебека, термоэлектрическая способность пары, термосила, удельная термоЭДС).

**Эффект Пельтье:** количество выделяющейся или поглощающейся (в зависимости от направления тока) теплоты пропорционально количеству прошедшего через контакт электричества:

$$Q_{\text{П}} = \Pi I t, \quad (4.8.3)$$

где  $Q_{\text{П}}$  – теплота Пельтье;  $\Pi$  – коэффициент Пельтье (зависит от природы материалов и их температуры);  $I$  – сила тока;  $t$  – время наблюдения.

**Соотношение Томсона:**

$$\Pi = \alpha T, \quad (4.8.4)$$

где  $\alpha$  – коэффициент термоЭДС.

## ПРИМЕРЫ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ

Пример 1.

Материальная точка массой  $m = 10$  г совершает гармонические колебания с частотой  $\nu = 0,2$  Гц. Амплитуда колебаний равна 5 см. Определите: 1) максимальную силу, действующую на точку; 2) полную энергию колеблющейся точки.

*Решение:*

Уравнение гармонических колебаний:

$$x = A \cos(\omega t + \varphi_0). \quad (1)$$

Тогда скорость и ускорение колеблющейся точки:

$$\begin{aligned} v &= \frac{dx}{dt} = -A\omega \sin(\omega t + \varphi_0), \\ a &= \frac{dv}{dt} = -A\omega^2 \cos(\omega t + \varphi_0). \end{aligned} \quad (2)$$

Согласно второму закону Ньютона сила, действующая на точку:

$$F = ma = -A\omega_0^2 m \cos(\omega t + \varphi_0). \quad (3)$$

Значение силы максимально, когда:

$$\cos(\omega t + \varphi_0) = \pm 1. \quad (4)$$

Так как  $\omega = 2\pi\nu$ , то искомое значение силы будет равно:

$$F_{\max} = 0,05 \cdot 4 \cdot 3,14^2 \cdot 0,01 \cdot 0,2^2 \approx 0,79 \text{ (мН)}. \quad (5)$$

Проверяем размерность:

$$[F_{\max}] = \left[ \frac{\text{м} \cdot \text{кг}}{\text{с}^2} \right] = [\text{Н}]. \quad (6)$$

Полная энергия колеблющейся точки равна:

$$E = E_{\text{к max}} = \frac{m v_{\max}^2}{2} = \frac{mA^2\omega^2}{2} = \frac{mA^2 4\pi^2\nu^2}{2} = 2\pi^2 A^2 m\nu^2. \quad (7)$$

Подставим численные значения:

$$E = 2 \cdot 3,14^2 \cdot 0,05^2 \cdot 0,01 \cdot 0,2^2 \approx 19,7 \text{ (мкДж)}. \quad (8)$$

Проверяем размерность:

$$[E] = \left[ \frac{\text{М}^2 \cdot \text{кг}}{\text{с}^2} \right] = [\text{Н} \cdot \text{м}] = [\text{Дж}]. \quad (9)$$

Ответ:  $F_{\text{max}} \approx 0,79 \text{ мН}$ ;  $E \approx 19,7 \text{ мкДж}$ .

Пример 2.

На поверхности Земли находится источник звуковых волн. Определите время, за которое волна достигает высоты  $z = 12,0 \text{ км}$ , если градиент температуры (скорость изменения температуры с высотой)  $\Delta T/\Delta z = -6,5 \cdot 10^{-3} \text{ К} \cdot \text{м}^{-1}$ , а температура на поверхности  $T_0 = 25 \text{ }^\circ\text{C}$ . Для воздуха:  $\mu \approx 0,029 \text{ кг} \cdot \text{моль}^{-1}$ .

Решение:

Чтобы найти время, будем рассматривать движение звуковой волны как переменное. При этом скорость в любой момент времени равна:

$$v = \frac{dh}{dt} \Rightarrow \quad (1)$$

$$\Rightarrow dt = \frac{dh}{v}. \quad (2)$$

Отсюда:

$$t = \int_0^t dt = \int_0^h \frac{dh}{v}. \quad (3)$$

Определим скорость звука в вертикальном направлении. Скорость звука в воздухе:

$$v = \sqrt{\frac{\gamma p}{\rho}} = \sqrt{\frac{\gamma p V}{m}} = \sqrt{\frac{\gamma R T}{\mu}}, \quad (4)$$

где  $\gamma$  – показатель адиабаты, для атмосферного газа при атмосферном давлении  $\gamma \approx 1,4$ ;  $R$  – универсальная газовая постоянная.

Зависимость температуры от высоты можно описать так:

$$T = T_0 + \frac{\Delta T}{\Delta z} z. \quad (5)$$

Отсюда:

$$v = \sqrt{\frac{\gamma P}{\rho}} = \sqrt{\frac{\gamma P V}{m}} = \sqrt{\frac{\gamma R \left( T_0 + \frac{\Delta T}{\Delta z} z \right)}{\mu}}. \quad (6)$$

Подставляя соотношение (5) в формулу для времени (2), получим:

$$t = \int_0^t dt = \int_0^z \frac{dz}{v} = \frac{2}{\Delta T} \sqrt{\frac{\mu}{\gamma R}} \left( \sqrt{\left( T_0 + \frac{\Delta T}{\Delta z} z \right)} - \sqrt{T_0} \right) \approx 37 \text{ (с)} \quad (7)$$

Ответ:  $t \approx 37 \text{ с.}$

**ТАБЛИЦА ВАРИАНТОВ К КОНТРОЛЬНОЙ РАБОТЕ 4**

Вариант	Номера задач							
0	404	411	430	441	449	460	469	473
1	406	413	432	441	451	464	471	475
2	401	414	425	444	449	458	469	479
3	403	409	429	442	450	463	468	476
4	402	412	431	443	451	458	470	480
5	407	409	428	442	452	468	472	476
6	408	416	429	445	454	457	466	480
7	404	410	425	448	456	459	467	478
8	403	415	427	447	455	461	467	474
9	405	412	426	446	453	462	465	477

## КОНТРОЛЬНАЯ РАБОТА 4

### МАГНЕТИЗМ И ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ЯВЛЕНИЯ

401. Проволочный виток радиусом  $R = 25$  см расположен в плоскости магнитного меридиана. В центре установлена небольшая магнитная стрелка, способная вращаться вокруг вертикальной оси. На какой угол  $\alpha$  отклонится стрелка, если по витку пустить ток силой  $I = 15$  А? Горизонтальную составляющую индукции магнитного поля Земли примите равной  $B = 20$  мкТл.

402. Магнитная стрелка помещена в центре кругового витка радиусом  $R = 20$  см., плоскость которого расположена вертикально и составляет угол  $\varphi = 30^\circ$  с плоскостью магнитного меридиана. Определите угол  $\alpha$ , на который повернётся магнитная стрелка, если по проводу пойдёт ток силой  $I = 25$  А (дать два ответа). Горизонтальную составляющую индукции земного магнитного поля примите равной  $B = 20$  мкТл.

403. По двум длинным параллельным проводам, расстояние между которыми  $d = 5$  см, текут одинаковые токи  $I = 10$  А. Определите индукцию  $B$  и напряжённость  $H$  магнитного поля в точке, удалённой от каждого провода на расстояние  $r = 5$  см, если токи текут: а) в одинаковом направлении, б) в противоположных направлениях.

404. Два бесконечно длинных прямых проводника скрещены под прямым углом. По проводникам текут токи силой  $I_1 = 100$  А и  $I_2 = 50$  А. Расстояние между проводниками  $d = 20$  см. Определите индукцию  $B$  магнитного поля в точке, лежащей на середине общего перпендикуляра к проводникам.

405. Ток силой  $I = 50$  А течёт по проводу, согнутому под прямым углом. Найдите напряжённость  $H$  магнитного поля в точке, лежащей на биссектрисе этого угла и отстоящей от вершины угла на расстоянии  $b = 20$  см. Считайте, что оба конца проводника находятся очень далеко от вершины угла.

406. По проводнику, изогнутому в виде окружности, течёт ток. Напряжённость магнитного поля в центре окружности  $H_1 = 50$  А/м. Не изменяя силы тока в проводнике, ему придали форму квадрата. Определите напряжённость  $H_2$  магнитного поля в точке пересечения диагоналей этого квадрата.

407. По контуру в виде равностороннего треугольника течёт ток силой  $I = 50$  А. Сторона треугольника  $a$  равна 20 см. Определите магнитную индукцию  $B$  в точке пересечения высот.

408. По проводнику, согнутому в виде прямоугольника со сторонами  $a = 8$  см и  $b = 12$  см, течёт ток силой  $I = 50$  А. Определите напряжённость  $H$  и индукцию  $B$  магнитного поля в точке пересечения диагоналей прямоугольника.

409. По двум параллельным проводам длиной  $L = 3$  м каждый текут одинаковые токи силой  $I = 500$  А. Расстояние между проводниками  $d = 10$  см. Определите силу  $F$  взаимодействия проводников.

410. По трём параллельным прямым проводам, находящимся на одинаковом расстоянии  $d = 20$  см друг от друга, текут токи одинаковой силы  $I = 400$  А. В двух проводах направления токов совпадают. Вычислите для каждого из проводов отношение силы, действующей на него, к его длине.

411. Квадратная проволочная рамка расположена в одной плоскости с длинным прямым проводом так, что две её стороны параллельны проводу. По рамке и проводу текут одинаковые токи силой  $I = 200$  А. Определите силу  $F$ , действующую на рамку, если ближайшая к проводу сторона рамки находится от него на расстоянии, равном её длине.

412. Прямой провод длиной  $L = 40$  см, по которому течёт ток силой  $I = 100$  А, движется в однородном магнитном поле с индукцией  $B = 0,5$  Тл. Какую работу  $A$  совершат силы, действующие на провод со стороны поля, переместив его на расстояние  $s = 40$  см, если направление перемещения перпендикулярно линиям индукции и проводу?

413. Напряжённость  $H$  магнитного поля в центре круглого витка равна 500 А/м. Магнитный момент витка  $p_m = 6$  А·м<sup>2</sup>. Вычислите силу тока  $i$  в витке и радиус  $R$  витка.

414. Короткая катушка площадью поперечного сечения  $S = 250$  см<sup>2</sup>, содержащая  $N = 500$  витков провода, по которому течёт ток силой  $I = 5$  А, помещена в однородное магнитное поле напряжённостью  $H = 1000$  А/м. Найдите: 1) магнитный момент  $p_m$  катушки; 2) вращающий момент  $M$ , действующий на катушку, если ось катушки составляет угол  $\varphi = 30^\circ$  с линиями поля.

415. Виток диаметром  $d = 10$  см может вращаться около вертикальной оси, совпадающей с одним из диаметров витка. Виток

установили в плоскости магнитного меридиана и пустили по нему ток силой  $I = 40$  А. Какой вращающий момент  $M$  нужно приложить к витку, чтобы удержать его в начальном положении? Горизонтальную составляющую индукции магнитного поля Земли примите равной  $B_{\Gamma} = 200$  мкТл.

416. Виток радиусом  $R = 20$  см, по которому течёт ток силой  $I = 50$  А, свободно установился в однородном магнитном поле напряжённостью  $H = 10^3$  А/м. Виток повернули относительно диаметра на угол  $\varphi = 30^\circ$ . Определите совершённую работу  $A$ .

417. На оси плоского контура с током находится другой такой же контур. Модули магнитных моментов контуров одинаковы ( $p_{m1} = p_{m2} = 1$  А·м<sup>2</sup>). Вычислите механический момент  $M$ , действующий на второй контур, если его магнитный момент перпендикулярен магнитному моменту первого контура. Расстояние  $r$  между контурами равно 100 см. Размеры контуров малы по сравнению с расстоянием между ними.

418. Из тонкой проволоки массой  $m = 4$  г изготовлена квадратная рамка. Рамка свободно подвешена на неупругой нити и по ней пропущен ток силой  $I = 8$  А. Определите частоту  $\nu$  малых колебаний рамки в магнитном поле с индукцией  $B = 20$  мТл.

419. Тонкое кольцо радиусом  $R = 20$  см несёт равномерно распределённый заряд  $Q = 40$  нКл. Кольцо вращается относительно оси, совпадающей с одним из диаметров кольца, с частотой  $\nu = 20$  с<sup>-1</sup>. Определите: 1) магнитный момент  $p_m$ , обусловленный вращением заряженного кольца; 2) отношение магнитного момента к моменту импульса  $p_m/L$ , если кольцо имеет массу  $m = 10$  г.

420. Диск радиусом  $R = 5$  см несёт равномерно распределённый по поверхности заряд  $Q = 0,1$  мкКл. Диск равномерно вращается относительно оси, проходящей через его центр и перпендикулярной плоскости диска. Частота вращения  $\nu = 50$  с<sup>-1</sup>. Определите: 1) магнитный момент  $p_m$  кругового тока, создаваемого диском; 2) отношение магнитного момента к моменту импульса  $p_m/L$ , если масса диска  $m = 100$  г.

421. В однородном магнитном поле с индукцией  $B = 0,5$  Тл находится прямоугольная рамка длиной  $a = 8$  см и шириной  $b = 5$  см, содержащая  $N = 100$  витков тонкой проволоки. Ток в рамке  $I = 1$  А, а плоскость рамки параллельна линиям магнитной индукции.

Определите: 1) магнитный момент рамки; 2) вращающий момент, действующий на рамку.

422. По тонкому стержню длиной  $L = 40$  см равномерно распределён заряд  $Q = 500$  нКл. Масса стержня  $m = 10$  г. Стержень приведён во вращение с постоянной угловой скоростью  $\omega = 20$  рад/с относительно оси, перпендикулярной стержню и проходящей через его середину. Определите: 1) магнитный момент  $p_m$ , обусловленный вращением заряженного стержня; 2) отношение магнитного момента к моменту импульса  $p_m/L$ . Укажите на чертеже направление векторов  $p_m$  и  $L$ .

423. Электрон в атоме водорода движется вокруг ядра по круговой орбите некоторого радиуса. Найдите отношение магнитного момента эквивалентного кругового тока к моменту импульса орбитального движения электрона  $p_m/L$ . Заряд электрона и его массу считайте известными. Укажите на чертеже направление векторов  $p_m$  и  $L$ .

424. Электрон в невозбуждённом атоме водорода движется вокруг ядра по окружности радиусом  $R = 0,53 \cdot 10^{-8}$  см. Вычислите магнитный момент  $p_m$  эквивалентного кругового тока и механический момент  $M$ , действующий на круговой ток, если атом помещён в магнитное поле с индукцией  $B = 0,4$  Тл, направленной параллельно плоскости орбиты электрона.

425. Частица, несущая один элементарный заряд, влетела в однородное магнитное поле с индукцией  $B = 0,2$  Тл под углом  $\alpha = 30^\circ$  к направлению линий индукции. Определите силу Лоренца  $F_L$ , если скорость частицы  $v = 10,5$  м/с.

426. Частица, несущая один элементарный заряд, влетела в однородное магнитное поле с индукцией  $B = 0,01$  Тл. Определите момент импульса  $L$ , которым обладала частица при движении в магнитном поле, если радиус траектории частицы равен  $R = 0,5$  мм.

427. Электрон движется в однородном магнитном поле перпендикулярно линиям индукции. Определите силу  $F$ , действующую на электрон со стороны поля, если индукция поля  $B = 0,2$  Тл, а радиус кривизны траектории  $R = 0,2$  см.

428. Заряженная частица с кинетической энергией  $E_k = 2$  кэВ движется в однородном магнитном поле по окружности радиусом  $R = 4$  мм. Определите силу Лоренца  $F_L$ , действующую на частицу со стороны поля.

429. Электрон движется по окружности в однородном магнитном поле с напряжённостью  $H = 5 \cdot 10^3$  А/м. Определите частоту обращения  $\nu$  электрона.

430. Электрон движется в магнитном поле с индукцией  $B = 4$  мТл по окружности радиусом  $R = 0,8$  см. Какова кинетическая энергия  $E_k$  электрона?

431. Протон влетает в однородное магнитное поле под углом  $\alpha = 60^\circ$  к направлению линий поля и движется по спирали, радиус которой  $R = 2,5$  см. Индукция магнитного поля  $B = 0,05$  Тл. Найдите кинетическую энергию  $E_k$  протона.

432. Протон и  $\alpha$ -частица, ускоренные одинаковой разностью потенциалов, влетают в однородное магнитное поле. Во сколько раз радиус  $R_1$  кривизны траектории протона больше радиуса  $R_2$  кривизны траектории  $\alpha$ -частицы?

433. Два иона с одинаковыми зарядами, пройдя одну и ту же ускоряющую разность потенциалов, влетели в однородное магнитное поле перпендикулярно линиям индукции. Один ион, масса которого  $m_1 = 12$  а.е.м., описал дугу окружности радиусом  $R_1 = 2$  см. Определите массу  $m_2$  (в а.е.м.) другого иона, который описал дугу окружности радиусом  $R_2 = 2,31$  см.

434. Протон движется по окружности в однородном магнитном поле ( $B = 2$  Тл). Определите силу эквивалентного кругового тока  $I$ , создаваемого движением протона.

435. Электрон движется в однородном магнитном поле с индукцией  $B = 10$  мТл по винтовой линии, радиус которой  $R = 1,5$  см и шаг  $h = 10$  см. Определите период  $T$  обращения электрона и его скорость  $v$ .

436. В однородном магнитном поле с индукцией  $B = 2$  Тл движется  $\alpha$ -частица. Траектория её движения представляет собой винтовую линию с радиусом  $R = 1$  см и шагом  $h = 6$  см. Определите кинетическую энергию  $E_k$  протона.

437. Перпендикулярно магнитному полю ( $H = 1$  кА/м) возбуждено электрическое поле ( $E = 200$  В/см). Перпендикулярно полям движется, не отклоняясь от прямолинейной траектории, заряженная частица. Определите скорость  $v$  частицы.

438. Заряженная частица прошла ускоряющую разность потенциалов и влетела в скрещённые под прямым углом электрическое ( $E = 400$  В/м) и магнитное ( $B = 0,2$  Тл) поля. Определите ускоряющую

разность потенциалов  $\Delta\phi$ , если, двигаясь перпендикулярно полям, частица не испытывает отклонений от прямолинейной траектории. Отношение заряда к массе частицы  $e/m = 9,64 \cdot 10^7$  Кл/кг.

439. Плоский конденсатор, между пластинами которого создано электрическое поле ( $E = 100$  В/м), помещён в магнитное поле так, что силовые линии полей взаимно перпендикулярны. Какова должна быть индукция  $B$  магнитного поля, чтобы электрон с начальной энергией  $E_k = 4$  кэВ, влетевший в пространство между пластинами конденсатора перпендикулярно силовым линиям магнитного поля, не изменил направления скорости?

440. Перпендикулярно однородному магнитному полю с индукцией  $B = 1$  мТл возбуждено однородное электрическое поле с напряжённостью  $E = 1$  кВ/м. Перпендикулярно полям влетает  $\alpha$ -частица со скоростью  $v = 1$  Мм/с. Определите нормальное  $a_n$  и тангенциальное  $a_t$  ускорения  $\alpha$ -частицы в момент вхождения ее в поле.

441. Плоский контур площадью  $S = 20$  см<sup>2</sup> находится в однородном магнитном поле с индукцией  $B = 0,03$  Тл. Определите магнитный поток  $\Phi_B$ , пронизывающий контур, если плоскость его составляет угол  $\varphi = 60^\circ$  с направлением линий индукции.

442. Магнитный поток  $\Phi_B$  сквозь сечение соленоида равен 50 мкВб. Длина соленоида  $l = 50$  см. Найдите магнитный момент  $p_m$  соленоида, если его витки плотно прилегают друг к другу.

443. В средней части соленоида, содержащего  $n = 8$  витков/см, помещён круговой виток диаметром  $d = 4$  см. Плоскость витка расположена под углом  $\varphi = 60^\circ$  к оси соленоида. По обмотке соленоида течёт ток силой  $I = 1$  А. Определите магнитный поток  $\Phi_B$ , пронизывающий виток.

444. На длинный картонный каркас диаметром  $d_1 = 5$  см уложена однослойная обмотка (виток к витку) из проволоки диаметром  $d_2 = 0,2$  мм. Определите магнитный поток  $\Phi$ , создаваемый таким соленоидом при силе тока  $I = 0,5$  А.

445. Квадратный контур со стороной  $a = 10$  см, в котором течёт ток силой  $I = 6$  А, находится в магнитном поле с индукцией  $B = 0,8$  Тл под углом  $\alpha = 50^\circ$  к линиям индукции. Какую работу  $A$  нужно совершить, чтобы при неизменной силе тока в контуре изменить его форму на окружность?

446. Плоский контур с током силой  $I = 5$  А свободно установился в однородном магнитном поле с индукцией  $B = 0,4$  Тл. Площадь контура  $S = 200$  см<sup>2</sup>. Поддерживая ток в контуре неизменным, его повернули относительно оси, лежащей в плоскости контура, на угол  $\alpha = 40^\circ$ . Определите совершённую при этом работу  $A$ .

447. Виток, в котором поддерживается постоянная 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  $\alpha = \pi/3$ ?

448. В однородном магнитном поле перпендикулярно линиям индукции расположен плоский контур площадью  $S = 100$  см<sup>2</sup>. Поддерживая в контуре постоянную силу тока  $I = 50$  А, его переместили из поля в область пространства, где поле отсутствует. Определите индукцию  $B$  магнитного поля, если при перемещении контура была совершена работа  $A = 0,4$  Дж.

449. Рамка площадью  $S = 100$  см<sup>2</sup> равномерно вращается с частотой  $\nu = 5$  с<sup>-1</sup> относительно оси, лежащей в плоскости рамки и перпендикулярной линиям индукции однородного магнитного поля ( $B = 0,5$  Тл). Определите среднее значение ЭДС индукции  $\langle E_{\text{инд}} \rangle$  за время, в течение которого магнитный поток, пронизывающий рамку, изменится от нуля до максимального значения.

450. Рамка, содержащая  $N = 1000$  витков площадью  $S = 100$  см<sup>2</sup>, равномерно вращается с частотой  $\nu = 10$  с<sup>-1</sup> в магнитном поле напряжённостью  $H = 10^4$  А/м. Ось вращения лежит в плоскости рамки и перпендикулярна линиям напряжённости. Определите максимальную ЭДС индукции  $E_{\text{инд max}}$ , возникающую в рамке.

451. В однородном магнитном поле ( $B = 0,1$  Тл) равномерно с частотой  $\nu = 5$  с<sup>-1</sup> вращается стержень длиной  $l = 50$  см так, что плоскость его вращения перпендикулярна линиям напряжённости, а ось вращения проходит через один из его концов. Определите индуцируемую на концах стержня разность потенциалов  $\Delta\phi$ .

452. В однородном магнитном поле с индукцией  $B = 0,5$  Тл вращается с частотой  $\nu = 10$  с<sup>-1</sup> стержень длиной  $l = 20$  см. Ось вращения параллельна линиям индукции и проходит через один из концов стержня, перпендикулярно его оси. Определите на концах стержня разность потенциалов  $\Delta\phi$ .

453. В проволочное кольцо, присоединённое к баллистическому гальванометру, вставили прямой магнит. При этом по цепи прошёл заряд  $Q = 50$  мкКл. Определите изменение магнитного потока  $\Phi_B$  через кольцо, если сопротивление цепи гальванометра  $R = 10$  Ом.

454. Тонкий медный провод массой  $m = 5$  г согнут в виде квадрата и концы его загнуты. Квадрат помещён в однородное магнитное поле ( $B = 0,2$  Тл) так, что его плоскость перпендикулярна линиям поля. Определите заряд  $Q$ , который потечёт по проводнику, если квадрат, потянув за противоположные вершины, вытянуть в линию.

455. Рамка из провода сопротивлением  $R = 0,04$  Ом равномерно вращается в однородном магнитном поле ( $B = 0,6$  Тл). Ось вращения лежит в плоскости рамки и перпендикулярна линиям индукции. Площадь рамки  $S = 200$  см<sup>2</sup>. Определите заряд  $Q$ , который потечёт по рамке при изменении угла между нормалью к рамке и линиями индукции: 1) от  $0^\circ$  до  $45^\circ$ ; 2) от  $45^\circ$  до  $90^\circ$ .

456. Проволочный виток диаметром  $D = 5$  см и сопротивлением  $R = 0,02$  Ом находится в однородном магнитном поле ( $B = 0,3$  Тл). Плоскость витка составляет угол  $\varphi = 40^\circ$  с линиями индукции. Какой заряд  $Q$  потечёт по витку при выключении магнитного поля?

457. Соленоид сечением  $S = 10$  см<sup>2</sup> содержит  $N = 1000$  витков. Индукция  $B$  магнитного поля внутри соленоида при силе тока  $I = 5$  А равна  $0,1$  Тл. Определите индукцию  $L$  соленоида.

458. На картонный каркас длиной  $l = 0,8$  м и диаметром  $D = 4$  см намотан в один слой провод диаметром  $d = 0,25$  мм так, что витки плотно прилегают друг к другу. Вычислите индуктивность  $L$  получившегося соленоида.

459. Катушка, намотанная на немагнитный цилиндрический квадрат, имеет  $N_1 = 250$  витков и индуктивность  $L_1 = 36$  мГн. Чтобы увеличить индуктивность катушки до  $L_2 = 100$  мГн, обмотку катушки сняли и заменили обмоткой из более тонкой проволоки с таким расчётом, чтобы длина катушки осталась прежней. Сколько витков  $N_2$  оказалось в катушке после перемотки?

460. Индуктивность соленоида, намотанного в один слой на немагнитный каркас,  $L = 0,5$  мГн. Длина соленоида  $l = 0,6$  м, диаметр  $D = 2$  см. Определите отношение  $n$  числа витков соленоида к его длине.

461. Соленоид содержит  $N = 600$  витков. При силе тока  $I = 10$  А магнитный поток  $\Phi = 80$  мкВб. Определите индуктивность  $L$  соленоида.

462. Соленоид имеет стальной полностью размагниченный сердечник объёмом  $V = 500$  см<sup>3</sup>. Напряжённость  $H$  магнитного поля соленоида при силе тока  $I = 0,6$  А равна  $1000$  А/м (рис. 6). Определите индуктивность  $L$  соленоида.

463. Обмотка соленоида с железным сердечником содержит  $N = 600$  витков. Длина сердечника  $l = 40$  см. Как и во сколько раз изменится индуктивность  $L$  соленоида, если сила тока, протекающего в обмотке, возрастает от  $I_1 = 0,2$  А до  $I_2 = 1$  А (рис. 6)?

464. На железный полностью размагниченный сердечник диаметром  $D = 5$  см и длиной  $l = 80$  см намотано в один слой  $N = 240$  витков провода. Вычислите индуктивность  $L$  получившегося соленоида при силе тока  $I = 0,6$  А (рис. 6).

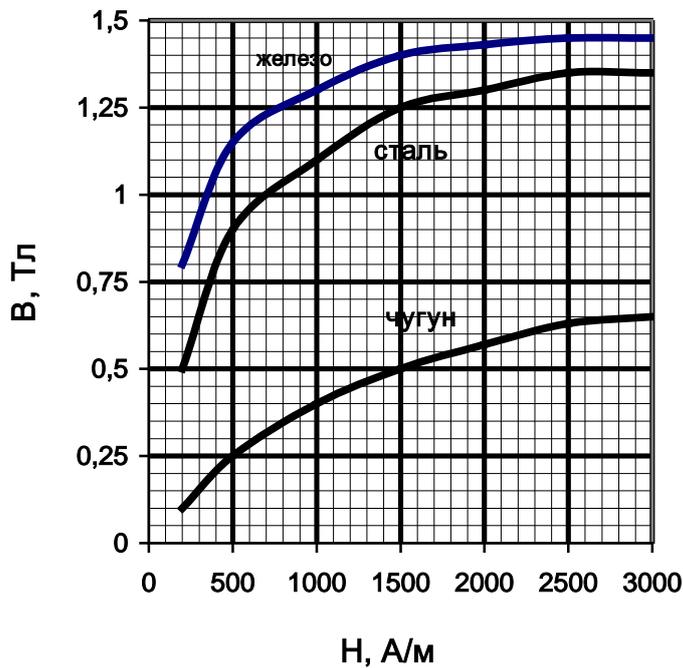


Рис. 6.

465. Силу тока в катушке равномерно увеличивают с помощью реостата на  $\Delta I = 0,6$  А в секунду. Найдите среднее значение ЭДС самоиндукции  $\langle E_{\text{инд}} \rangle$ , если индуктивность катушки  $L = 5$  мГн.

466. Соленоид содержит  $N = 800$  витков. Сечение сердечника (из немагнитного материала)  $S = 10$  см<sup>2</sup>. По обмотке течёт ток, создающий поле с индукцией  $B = 8$  мТл. Определите среднее значение ЭДС самоиндукции  $\langle E_{\text{инд}} \rangle$ , которая возникает на зажимах соленоида, если сила тока уменьшается практически до нуля за время  $\Delta t = 0,8$  мс.

467. По катушке индуктивностью  $L = 8$  мкГн течёт ток силой  $I = 6$  А. При выключении тока его сила изменяется практически до нуля за время  $\Delta t = 5$  мс. Определите среднее значение ЭДС самоиндукции  $\langle E_{\text{инд}} \rangle$ , возникающей в контуре.

468. В электрической цепи, содержащей сопротивление  $R = 20$  Ом и индуктивность  $L = 0,06$  Гн, течёт ток силой  $I = 20$  А. Определите силу тока в цепи через  $\Delta t = 0,2$  мс после её размыкания.

469. По замкнутой цепи с сопротивлением  $R = 20$  Ом течёт ток. Через время  $t = 8$  мс после размыкания цепи сила тока в ней уменьшилась в 20 раз. Определите индуктивность  $L$  цепи.

470. Цепь состоит из катушки индуктивностью  $L = 0,1$  Гн и источника тока. Источник тока отключили, не разрывая цепь. Время, через которое сила тока уменьшится до 0,001 первоначального значения, равно  $t = 0,07$  с. Определите сопротивление  $R$  катушки.

471. Источник тока замкнули на катушку с сопротивлением  $R = 10$  Ом и индуктивностью  $L = 0,2$  Гн. Через какое время сила тока в цепи достигнет 50% максимального значения?

472. Источник тока замкнули на катушку с сопротивлением  $R = 20$  Ом. Через время  $t = 0,1$  с сила тока  $I$  замыкания достигла 0,95 предельного значения. Определите индуктивность  $L$  катушки.

473. В соленоиде сечением  $S = 5$  см<sup>2</sup> создан магнитный поток  $\Phi = 20$  мкВб. Определите объёмную плотность  $w$  энергии магнитного поля соленоида. Сердечник отсутствует. Магнитное поле во всём объёме соленоида считать однородным.

474. Магнитный поток  $\Phi$  в соленоиде, содержащем  $N = 1000$  витков, равен 0,2 мВб. Определите энергию  $W$  магнитного поля соленоида, если сила тока, протекающего по виткам соленоида,  $I = 1$  А. Сердечник

отсутствует. Магнитное поле во всём объёме соленоида считать однородным.

475. Диаметр тороида (по средней линии)  $D = 50$  см. Тороид содержит  $N = 2000$  витков и имеет площадь сечения  $S = 20$  см<sup>2</sup>. Вычислить энергию  $W$  магнитного поля тороида при силе тока  $I = 5$  А. Считайте магнитное поле тороида однородным. Сердечник выполнен из немагнитного материала.

476. По проводнику, изогнутому в виде кольца радиусом  $R = 20$  см, содержащему  $N = 500$  витков, течёт ток силой  $I = 1$  А. Определите объёмную плотность  $w_m$  энергии магнитного поля в центре кольца.

477. При какой силе тока  $I$  в прямолинейном проводе бесконечной длины на расстоянии  $r = 5$  см от него объёмная плотность энергии магнитного поля будет  $w_m = 1$  мДж/м<sup>3</sup>?

478. Обмотка тороида имеет  $n = 10$  витков на каждый сантиметр длины (по средней линии тороида). Вычислите объёмную плотность энергии  $w_m$  магнитного поля при силе тока  $I = 10$  А. Сердечник выполнен из немагнитного материала, магнитное поле во всём объёме однородно.

479. Обмотка соленоида содержит  $n = 20$  витков на каждый сантиметр длины. При какой силе тока  $I$  объёмная плотность энергии магнитного поля будет  $w_m = 0,1$  Дж/м<sup>3</sup>? Сердечник выполнен из немагнитного материала, магнитное поле во всём объёме однородно.

480. Соленоид имеет длину  $l = 0,6$  м и сечение  $S = 10$  см<sup>2</sup>. При некоторой силе тока, протекающего по обмотке, в соленоиде создаётся магнитный поток  $\Phi = 0,1$  мВб. Чему равна энергия  $W$  магнитного поля соленоида? Сердечник выполнен из немагнитного материала, и магнитное поле во всём объёме однородно.

## ПРИЛОЖЕНИЯ

### 10. Основные физические постоянные (округлённые значения)

Величина	Обозначение	Значение
Нормальное ускорение свободного падения	$g$	9,81 м/с <sup>2</sup>
Газовая (универсальная) постоянная	$R$	8,314 Дж·К <sup>-1</sup> моль <sup>-1</sup>
Гравитационная постоянная	$G$	$6,672 \cdot 10^{-11}$ м <sup>3</sup> ·кг <sup>-1</sup> ·с <sup>-2</sup>
Масса покоя электрона	$m_e$	$9,109 \cdot 10^{-31}$ кг
Объём 1 моля газа при нормальных условиях	$V_0$	$22,41 \cdot 10^{-3}$ м <sup>3</sup> ·моль <sup>-1</sup>
Постоянная (число) Авогадро	$N_A$	$6,022 \cdot 10^{23}$ моль <sup>-1</sup>
Постоянная Больцмана	$k$	$1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж·К <sup>-1</sup>
Постоянная Вина	$b$	$2,9 \cdot 10^{-3}$ м·К
Постоянная Планка	$h$	$6,626 \cdot 10^{-34}$ Дж·с
Постоянная Планка универсальная	$\hbar$	$1,054 \cdot 10^{-34}$ Дж·с
Постоянная Стефана–Больцмана	$\sigma$	$5,67 \cdot 10^{-8}$ Вт·м <sup>-2</sup> ·К <sup>-4</sup>
Скорость света в вакууме	$c_0$	$3 \cdot 10^8$ м·с <sup>-1</sup>
Температура, соответствующая 1 эВ	$T$	11 606 К
Электронвольт	эВ	$1,6 \cdot 10^{-19}$ Дж
Элементарный заряд (заряд протона)	$e$	$1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл
Электрическая постоянная	$\epsilon_0$	$8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м
Магнитная постоянная	$\mu_0$	$4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м
Атомная единица массы	а.е.м.	$1,66 \cdot 10^{-27}$ кг
Радиус Бора	$a_0$	$0,529 \cdot 10^{-10}$ м

## 2. Плотность твёрдых тел

Твёрдое тело	Плотность, кг/м <sup>3</sup>	Твёрдое тело	Плотность, кг/м <sup>3</sup>
Алюминий	$2,7 \cdot 10^3$	Литий	$0,53 \cdot 10^3$
Барий	$3,5 \cdot 10^3$	Медь	$8,93 \cdot 10^3$
Ванадий	$6,02 \cdot 10^3$	Мрамор	$2,7 \cdot 10^3$
Висмут	$9,8 \cdot 10^3$	Никель	$8,9 \cdot 10^3$
Вольфрам	$19,3 \cdot 10^3$	Платина	$21,4 \cdot 10^3$
Гранит	$2,6 \cdot 10^3$	Плексиглас (оргстекло)	$1,2 \cdot 10^3$
Древесина сухая, сосна	$0,5 \cdot 10^3$	Пробка	$0,2 \cdot 10^3$
Железо, сталь	$7,88 \cdot 10^3$	Свинец	$11,3 \cdot 10^3$
Золото	$19,3 \cdot 10^3$	Серебро	$10,5 \cdot 10^3$
Каменная соль	$2,2 \cdot 10^3$	Стекло (оконное)	$2,5 \cdot 10^3$
Кобальт	$8,8 \cdot 10^3$	Цезий	$1,9 \cdot 10^3$
Латунь	$8,55 \cdot 10^3$	Цинк	$7,15 \cdot 10^3$

## 3. Плотность жидкостей

Жидкость	Плотность, кг/м <sup>3</sup>	Жидкость	Плотность, кг/м <sup>3</sup>
Бензин (20 °С)	$0,7 \cdot 10^3$	Нефть	$0,8 \cdot 10^3$
Вода при 4 °С	$1,0 \cdot 10^3$	Ртуть	$13,6 \cdot 10^3$
Глицерин	$1,26 \cdot 10^3$	Сероуглерод	$1,26 \cdot 10^3$
Молоко	$1,03 \cdot 10^3$	Спирт	$0,8 \cdot 10^3$

## 4. Плотность газов (при нормальных условиях)

Газ	Плотность, кг/м <sup>3</sup>	Газ	Плотность, кг/м <sup>3</sup>
Азот	1,25	Воздух	1,29
Аргон	1,78	Гелий	0,18
Водород	0,09	Кислород	1,43

### 5. Коэффициент поверхностного натяжения жидкостей при 20 °С

Жидкость	Коэффициент, мН/м	Жидкость	Коэффициент, мН/м
Вода	73	Ртуть	500
Глицерин	62	Спирт	22
Мыльная вода	40		

### 6. Эффективный диаметр молекулы

Газ	Диаметр, м	Газ	Диаметр, м
Азот	$3,0 \cdot 10^{-10}$	Гелий	$1,9 \cdot 10^{-10}$
Водород	$2,3 \cdot 10^{-10}$	Кислород	$2,7 \cdot 10^{-10}$

### 7. Некоторые астрономические величины

Наименование	Значение	Наименование	Значение
Радиус Земли	$6,37 \cdot 10^6$ м	Расстояние от центра Земли до центра Солнца	$1,49 \cdot 10^{11}$ м
Масса Земли	$5,98 \cdot 10^{24}$ кг		
Радиус Солнца	$6,95 \cdot 10^8$ м	Расстояние от центра Земли до центра Луны	$3,84 \cdot 10^8$ 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		

### 8. Диэлектрическая проницаемость

Вещество	Проницаемость	Вещество	Проницаемость
Вода	81	Парафин	2
Масло трансформаторное	2,2	Стекло	7

### 9. Удельное сопротивление металлов

Металл	Удельное сопротивление, Ом·м	Металл	Удельное сопротивление, Ом·м
Железо	$9,8 \cdot 10^{-8}$	Нихром	$1,1 \cdot 10^{-6}$
Медь	$1,7 \cdot 10^{-8}$	Серебро	$1,6 \cdot 10^{-8}$

### 10. Подвижность ионов в газах, $\text{м}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$

Газ	Положительные ионы	Отрицательные ионы
Азот	$1,27 \cdot 10^{-4}$	$1,81 \cdot 10^{-4}$
Водород	$5,4 \cdot 10^{-4}$	$7,4 \cdot 10^{-4}$
Воздух	$1,4 \cdot 10^{-4}$	$1,9 \cdot 10^{-4}$

### 11. Показатель преломления

Вещество	Показатель	Вещество	Показатель
Алмаз	2,42	Глицерин	1,47
Вода	1,33	Стекло	1,5

### 12. Энергия ионизации

Вещество	$E_i$ , Дж	$E_i$ , эВ
Водород	$2,18 \cdot 10^{-18}$	13,6
Гелий	$3,94 \cdot 10^{-18}$	24,6
Литий	$1,21 \cdot 10^{-17}$	75,6
Ртуть	$1,66 \cdot 10^{-18}$	10,4

### 13. Работа выхода электронов

Металл	A, Дж	A, эВ
Калий	$3,5 \cdot 10^{-19}$	2,2
Литий	$3,7 \cdot 10^{-19}$	2,3
Платина	$10 \cdot 10^{-19}$	6,3
Рубидий	$3,4 \cdot 10^{-19}$	2,1
Серебро	$7,5 \cdot 10^{-19}$	4,7
Цезий	$3,2 \cdot 10^{-19}$	2,0
Цинк	$6,4 \cdot 10^{-19}$	4,0

### 14. Период полураспада радиоактивных изотопов

Изотоп	Символ	Период полураспада	Изотоп	Символ	Период полураспада
Актиний	${}_{89}\text{Ac}^{225}$	10 сут.	Йод	${}_{53}\text{I}^{131}$	8 сут.
Кобальт	${}_{27}\text{Co}^{60}$	5,3 года	Стронций	${}_{38}\text{Sr}^{90}$	27 лет
Магний	${}_{12}\text{Mg}^{27}$	10 мин.	Фосфор	${}_{15}\text{P}^{32}$	14,3 сут.
Радий	${}_{88}\text{Ra}^{226}$	1620 лет	Церий	${}_{58}\text{Ce}^{144}$	285 сут.
Радон	${}_{86}\text{Rn}^{222}$	3,8 сут.	Кальций	${}_{20}\text{Ca}^{45}$	165 сут.

**15. Относительная атомная масса  $A$  (округлённые значения) и порядковый номер  $Z$  некоторых элементов**

Элемент	Символ	$A$	$Z$	Элемент	Символ	$A$	$Z$
Азот	N	14	7	Марганец	Mn	55	25
Алюминий	Al	27	13	Медь	Cu	64	29
Аргон	Ar	40	18	Молибден	Mo	96	42
Барий	Ba	137	56	Натрий	Na	23	11
Ванадий	V	60	23	Неон	Ne	20	10
Водород	H	1	1	Никель	Ni	59	28
Вольфрам	W	184	74	Олово	Sn	119	50
Гелий	He	4	2	Платина	Pt	195	78
Железо	Fe	56	26	Ртуть	Hg	201	80
Золото	Au	197	79	Сера	S	32	16
Калий	K	39	19	Серебро	Ag	108	47
Кальций	Ca	40	20	Уран	U	238	92
Кислород	O	16	8	Углерод	C	12	6
Магний	Mg	24	12	Хлор	Cl	35	17

**16. Масса покоя  $m_0$  и энергия покоя  $E_0$  некоторых частиц**

Частица	$m_0$		$E_0$	
	кг	а.е.м.	Дж	МэВ
Электрон	$9,11 \cdot 10^{-31}$	0,00055	$8,16 \cdot 10^{-14}$	0,511
Протон	$1,672 \cdot 10^{-27}$	1,00728	$11,5 \cdot 10^{-10}$	938
Нейтрон	$1,675 \cdot 10^{-27}$	1,00867	$1,51 \cdot 10^{-10}$	939
Дейтрон	$3,35 \cdot 10^{-27}$	2,01355	$3 \cdot 10^{-10}$	1876
$\alpha$ -частица	$6,64 \cdot 10^{-27}$	5,00149	$5,96 \cdot 10^{-10}$	3733
Нейтральный $\pi$ -мезон	$2,41 \cdot 10^{-28}$	0,14498	$2,16 \cdot 10^{-11}$	135

### 17. Массы атомов лёгких изотопов

Изотоп	Символ	Масса, а.е.м.	Изотоп	Символ	Масса, а.е.м.
Нейтрон	${}^0n^1$	1,00867	Бор	${}^5B^{10}$	10,01294
Водород	${}^1H^1$	1,00783		${}^5B^{11}$	11,0093
	${}^1H^2$	2,0141	Углерод	${}^6C^{12}$	12,0000
Гелий	${}^2He^3$	3,01605		${}^6C^{13}$	13,00335
	${}^2He^4$	3,01603		${}^6C^{14}$	14,00324
Литий	${}^3Li^6$	6,01513	Азот	${}^7N^{14}$	14,00307
	${}^3Li^7$	7,01601	Кислород	${}^8O^{16}$	15,99491
Бериллий	${}^4Be^7$	7,01693		${}^8O^{17}$	16,99913
	${}^4Be^9$	9,01219			

### 18. 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	$10^{-18}$

## РАБОЧАЯ ПРОГРАММА 2 КУРСА ФЗО

### *Раздел 1. Электричество и магнетизм (Контрольная работа № 3)*

#### *Тема 1.1. Электростатика.*

Электрический заряд. Закон сохранения и инвариантности электрического заряда. Квантование заряда. Закон Кулона. Природа электрического поля. Напряжённость электрического поля. Принцип суперпозиции полей. Графическое изображение полей. Поток напряжённости, теорема Остроградского–Гаусса. Электростатические поля заряженных тел: бесконечно протяженной плоскости, плоского конденсатора, равномерно заряженного по объёму шара, цилиндрического конденсатора. Циркуляция вектора напряжённости электростатического поля. Работа сил электрического поля по перемещению заряда. Потенциал, разность потенциалов. Эквипотенциальные поверхности. Связь напряжённости и потенциала.

Проводники в электрическом поле. Распределение зарядов на проводниках. Электрическое поле внутри проводника. Электростатическая защита. Электрическая ёмкость. Конденсаторы. Соединение конденсаторов в батареи.

Электрическое поле внутри диэлектрика. Поляризация диэлектриков и её типы. Вектор поляризации. Диэлектрическая восприимчивость и диэлектрическая проницаемость среды. Связанные заряды на границах диэлектрика. Вектор электрического смещения. Сегнетоэлектрики. Энергия заряженного проводника и конденсатора. Энергия электрического поля, объёмная плотность энергии.

#### *Тема 1.2. Постоянный ток.*

Теория Друде–Лоренца (классическая теория проводимости металлов). Вектор плотности тока. Законы Ома и Джоуля–Ленца в интегральной и дифференциальной форме. Закон Видемана–Франца. Затруднения классической теории проводимости. Законы Кирхгофа.

#### *Тема 1.3. Магнитное поле.*

Вектор магнитной индукции и вектор напряжённости магнитного поля. Закон Био–Савара–Лапласа. Принцип суперпозиции магнитных полей. Магнитное поле элемента проводника с током, прямого тока,

кругового тока. Вихревой характер магнитного поля. Закон полного тока. Магнитное поле соленоида и тороида.

Силовое действие магнитного поля на заряды и проводники с током. Взаимодействие токов. Магнитный поток. Контур с током в магнитном поле. Работа перемещения проводника с током и контура в магнитном поле. Движение заряженных частиц в магнитном поле Земли. Полярные сияния. Эффект Холла. Магнитные свойства вещества. Магнитный момент электронов и атомов. Типы магнетиков. Намагниченность. Магнитное поле в веществе. Ферромагнетики и их свойства. Домены. Магнитный гистерезис.

#### ***Тема 1.4. Электромагнитное поле.***

Явление электромагнитной индукции. Закон электромагнитной индукции Фарадея. Вихревые токи. Самоиндукция. Индуктивность. Энергия и плотность энергии магнитного поля.

Основы теории Максвелла для электромагнитного поля. Вихревое электрическое поле. Ток смещения. Полная система уравнений Максвелла в интегральной и дифференциальной формах. Электромагнитное поле.

### ***Раздел 2. Механические и электромагнитные колебания и волны (Контрольная работа № 4)***

#### ***Тема 2.1. Механические и электромагнитные колебания.***

Понятия о колебательных процессах. Механические и электрические колебания. Гармонические колебания и их характеристики. Дифференциальное уравнение гармонических колебаний. Гармонические осцилляторы: маятники, колебательный контур. Скорость и ускорение гармонического осциллятора. Энергия гармонических колебаний.

Сложение гармонических колебаний одинакового направления. Метод векторных диаграмм. Биения. Сложение взаимно перпендикулярных колебаний. Фигуры Лиссажу.

Затухающие колебания. Дифференциальные уравнения колебаний при наличии силы трения, омического сопротивления. Коэффициент затухания, логарифмический декремент. Вынужденные колебания. Дифференциальное уравнение колебаний при наличии вынуждающей силы. Резонанс.

Переменный ток. Закон Ома для цепи переменного тока. Сопротивление цепи переменного тока. Мощность в цепи переменного тока. Векторные диаграммы тока и напряжений. Резонанс токов и напряжений.

### ***Тема 2.2. Упругие и электромагнитные волны.***

Понятие волновых процессов. Волны в упругой среде. Уравнение плоской волны и ее характеристики: длина волны, волновой вектор, скорость. Волновое уравнение. Энергия упругой волны. Плотность потока энергии волны (вектор Умова). Интенсивность волны.

Акустические (звуковые) волны. Характеристики звуковых волн. Эффект Доплера. Сложение упругих волн. Интерференция волн. Стоячие волны.

Электромагнитные волны. Волновое уравнение электромагнитной волны. Плоская электромагнитная волна, её свойства. Излучение и распространение электромагнитных волн. Энергия электромагнитных волн. Вектор Пойнтинга. Шкала электромагнитных волн. Эффект Доплера для электромагнитных волн. Красное смещение.

## ***Раздел 3. Волновая оптика. Основы квантовой физики (Контрольная работа № 5)***

### ***Тема 3.1 Волновая оптика.***

Интерференция света. Когерентность световых волн. Разность хода. Разность фаз. Опыт получения когерентных световых пучков. Интерференция света в тонких плёнках. Клиновидная интерференция Ньютона.

Дифракция света. Принцип Гюйгенса-Френеля. Метод зон Френеля. Дифракция на одной щели. Дифракционная решётка. Разрешающая способность оптических приборов. Дифракция на объемной решетке (формула Вульфа-Регга).

Поляризация света. Естественный свет. Поляризованный свет. Поляризация при отражении. Закон Брюстера. Явление двойного лучепреломления. Закон Малюса.

Дисперсия света. Нормальная и аномальная дисперсия.

Поглощение света. Закон Бугера-Ламберта-Бера.

Рассеяние света.

Метод получения объемного изображения предметов, основанный на явлении интерференции и дифракции света. Голография.

### **Тема 3.2. Квантовая природа электромагнитного излучения.**

#### *Тепловое излучение*

Тепловое излучение, его характеристики. Закон Кирхгофа. Абсолютно «чёрное» тело. Законы теплового излучения абсолютно «чёрного» тела. Закон Стефана–Больцмана. Закон спектрального смещения Вина. УФ-катастрофа. Квантование излучения. Формула Планка.

#### *Квантовая природа электромагнитного излучения*

Квантовая природа света. Энергия, масса, импульс фотона. Давление света. Фотоэлектрический эффект, его законы. Эффект Комптона. Корпускулярно-волновой дуализм электромагнитного излучения.

Оптические квантовые генераторы (лазеры).

### **Тема 3.3. Элементы квантовой механики.**

Корпускулярно-волновой дуализм материи. Волны де Бройля. Экспериментальное подтверждение волновой природы электронов. Опыты Девисона и Джермера. Эффект Вавилова–Черенкова.

Соотношение неопределённостей Гейзенберга для координат и импульса. Соотношение неопределённостей для энергии и времени.

Уравнение Шрёдингера. Движение свободной частицы. Волновая функция и её физический смысл. Частица в прямоугольной потенциальной яме (одномерный случай). Квантовый гармонический осциллятор. Туннельный эффект.

### **Раздел 4. Физика атома. Элементы ядерной физики и физики элементарных частиц (Контрольная работа № 6)**

#### **Тема 4.1. Физика атома.**

Постулаты Бора. Экспериментальное подтверждение дискретности энергетических уровней. Опыт Франка и Герца. Модель атома водорода по Бору.

Строение атома. Квантово-механическое описание атома водорода. Квантовые числа. Спин электрона. Пространственное распределение электронной плотности в атоме водорода в различных состояниях. Энергетический и оптический спектры атома водорода.

Многоэлектронный атом. Эффект Зеемана. Заполнение электронных оболочек. Принцип Паули. Квантово-механическое

обоснование периодичности химических свойств элементов. Рентгеновское излучение. Молекулярные спектры.

***Тема 4.2. Элементы ядерной физики и физики элементарных частиц.***

Состав ядра. Естественная радиоактивность. Энергия связи. Дефект массы. Капельная модель ядра. Закон радиоактивного смещения. Закон радиоактивного распада. Объяснение  $\alpha$ -излучения,  $\gamma$ -излучения. Поле ядерных сил.

Реакции превращения нуклонов. Открытие протона. Открытие нейтрона. Открытие нейтрино. Объяснение  $\beta$ -излучения.

Ядерные реакции синтеза. Ядерные реакции деления. Цепная реакция деления урана.

Элементарные частицы. Их классификация. Виды взаимодействия элементарных частиц. Космические лучи. Мезоны. Частицы и античастицы. Образование и уничтожение электронно-позитронных пар. Кварки и глюоны.

## ЛИТЕРАТУРА

### Задачники

1. *Волькенштейн В.С.* Сборник задач по общему курсу физики. – 3-е изд., испр. и доп. – СПб.: 2006. – 328 с.
2. *Яковлева Т.Ю., Белов М.М., Скобликова А.Л., Бармасова А.М., Недзвецкая И.В., Бодунов Е.Н.* Контрольные работы № 3, 4, 5, 6 по дисциплине «Физика». Разделы «Электростатика. Постоянный ток», «Электромагнетизм. Электромагнитные колебания и волны», «Оптика. Квантовая природа света», «Физика атомов и атомных ядер. Элементарные частицы. Основы квантовой механики» – СПб.: РГГМУ, 2001. – 52 с.

### Учебники

3. *Бармасов А.В., Холмогоров В.Е.* Курс общей физики для природопользователей. Колебания и волны / Под ред. *А.П. Бобровского.* – СПб.: БХВ-Петербург, 2012. – 256 с. – Серия «Учебная литература для вузов». – ISBN 978-5-94157-730-9.
4. *Трофимова Т.И.* Курс физики: Учеб. пособие для вузов. – Изд. 9-е, перераб. и доп. – М.: Издательский центр «Академия», 2004. – 560 с. – ISBN 5-7695-1670-4.

### Справочник

5. *Нордлинг К., Остерман Дж.* Справочник по физике для учёного и инженера / Перевод с англ. и научное редактирование *А.В. Бармасова.* – СПб.: БХВ-Петербург, 2011. – 528 с. – ISBN 978-5-9775-0312-9.

### Описания лабораторных работ

6. *Белов М.М., Косцов В.В., Яковлева Т.Ю., Хлябич П.П.* Лабораторный практикум по дисциплине «Физика». I и II курс заочного обучения. СПб.: Изд-во РГГМУ, 2010. – 58 с.

## Методическая литература

7. Бармасов А.В., Бармасова А.М., Яковлева Т.Ю. Строгость определений в курсе общей физики. 2. Математический и физический маятники / В кн.: «Тезисы докладов Совещания заведующих кафедрами физики вузов России» (Москва, 2009 г.) / Под ред. проф. Г.Г. Спирина. – М.: АПР, 2009. – 344 с. – С. 55-56. – ISBN 978-5-903111-40-6.
8. Бармасов А.В., Бармасова А.М., Яковлева Т.Ю. Строгость определений в курсе общей физики. 8. Эффект Доплера / В кн.: Актуальные проблемы преподавания физики в ВУЗах и школах стран постсоветского пространства. Материалы Международной школы-семинара «Физика в системе высшего и среднего образования» (Москва, июнь 2011 г.) / Под ред. проф. Г.Г. Спирина. – М.: АПР, 2011. – 280 с. – С. 47-49. – ISBN 978-5-904761-19-6.
9. Яковлева Т.Ю., Белов М.М., Скобликова А.Л., Бармасова А.М., Бобровский А.П. Учебно-методическое пособие по выполнению контрольных работ по дисциплине «Физика». Разделы «Электростатика. Постоянный ток», «Электромагнетизм. Электромагнитные колебания и волны», «Оптика. Квантовая природа света», «Физика атомов и атомных ядер. Элементарные частицы. Основы квантовой механики». – СПб.: РГГМУ, 2001.

## СОДЕРЖАНИЕ

Общие методические указания	3
Теория: Магнетизм и электромагнитные явления	6
Примеры решения задач	17
Таблица вариантов к контрольной работе 4	21
Контрольная работа 4: Магнетизм и электромагнитные явления	22
Приложения	33
Рабочая программа 2 курса ФЗО	40
Литература	45

*Учебное издание*

Методические указания и  
контрольная работа № 4  
по дисциплине «Физика».

Разделы  
«Магнетизм и электромагнитные явления»  
Курс 2

*Составители:*  
Татьяна Юрьевна Яковлева и др.

*Ответственный редактор*  
Анатолий Петрович Бобровский

Редактор  
*ЛР № 020309 от 30.12.96*

---

Подписано в печать 07.03.18. Формат 60×90 1/16.  
Гарнитура Times New Roman.  
Печать цифровая. Усл. печ. л. 3. Тираж 70 экз. Заказ № 652/2.  
РГГМУ, 195196, Санкт-Петербург, Малоохтинский пр., 98.

---