МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
«МИСиС»
НОВОТРОИЦКИЙ ФИЛИАЛ

Кафедра математики и естествознания

С.М. Ожегова

ЭЛЕКТРОМАГНЕТИЗМ. ОПТИКА.
КВАНТОВАЯ ФИЗИКА

Методические указания
для выполнения контрольной работы № 2 по физике
студентами заочной формы обучения направлений подготовки
09.03.03 Прикладная информатика,
13.03.02 Электроэнергетика и электротехника
15.03.02 Технологические машины и оборудование
13.03.01 Теплоэнергетика и теплотехника
22.03.02 Металлургия
18.03.01 Химическая технология

Новотроицк, 2021

УДК 53
ББК 22.3
О 45

Рецензенты:

Доцент кафедры математики и естествознания Новотроицкого филиала ФГАОУ ВО НИТУ «МИСиС», к.ф.-м.н.,
Гюнтер Д.А.

Доцент кафедры математики, информатики и физики Орского гуманитарно-технологического института (филиала) ОГУ, к.п.н.
Ткачева И.А.

Ожегова С.М. Электромагнетизм. Оптика. Квантовая физика: методические указания для выполнения контрольной работы № 2 по физике студентами заочной формы обучения.- Новотроицк: НФ НИТУ МИСиС, 2021. – 60 с.

Методические указания предназначены для студентов направлений подготовки 09.03.03 Прикладная информатика, 13.03.02 Электроэнергетика и электротехника, 15.03.02 Технологические машины и оборудование, 13.03.01 Теплоэнергетика и теплотехника, 22.03.02 Металлургия, 18.03.01 Химическая технология заочной формы обучения. Методические указания составлены в соответствии с программой курса «Физика» для студентов технических направлений и предназначены для выполнения контрольной работы № 2.

В методических указаниях приведены основные понятия, законы, формулы, примеры решения задач, текст контрольной работы № 2.

Рекомендовано Методическим советом НФ НИТУ «МИСиС»

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ

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.

Самостоятельная работа по учебным пособиям. Самостоятельная работа по учебным пособиям является главным видом работы студента-заочника. Студентам рекомендуется следующее.

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, придерживайтесь 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 составляйте конспекты, в которых записывайте законы и формулы, выражающие эти законы, определения физических величин и их единиц, делайте чертежи и решайте типовые задачи. При решении задач следует пользоваться Международной системой единиц (СИ).

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

5. Прослушать курс лекций по физике, организуемый для студентов-заочников. Пользуйтесь очными консультациями преподавателей.

При изучении физики студент встречается со многими единицами физических величин. Без основательного знания единиц, без умения пользоваться ими при решении физических задач, невозможно усвоить курс физики и тем более применять физические значения на практике.

Решение задач. Систематическое решение задач – необходимое условие успешного изучения курса физики. Решение задач помогает уяснить физический смысл явлений, закрепляет в памяти формулы, прививает навыки практического применения теоретических знаний.

При решении задач необходимо выполнять следующее:

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 частно-

го 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. Решение задачи сопроводить краткими, но исчерпывающими пояснениями.

4. Решить задачу в общем виде, т. е. выразить искомую величину в буквенных обозначениях величин, заданных в условии задачи и взятых из таблицы. Физические задачи весьма разнообразны, и дать единый рецепт их решения невозможно. Однако, как правило, их следует решать в общем виде - при этом способе решения не производятся вычисления промежуточных величин, числовые значения подставляются только в окончательную (рабочую) формулу, выражающую искомую величину.

5. Подставить в рабочую формулу размерности или обозначения единиц и убедиться в правильности размерности искомой величины или её единицы.

6. Выразить все величины, входящие в рабочую формулу, в единицах СИ и выписать их для наглядности столбиком.

7. Подставить в окончательную формулу, полученную в результате решения задачи в общем виде, численные значения величин, выраженные в единицах одной системы. Несоблюдение этого правила приведёт к неверному результату. Исключения из этого правила допускаются лишь для тех однородных величин, которые входят в виде сомножителей 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.

8. Произвести вычисление величин, подставленных в формулу, руководствуясь правилами приближённых вычислений, запишите в ответе численное значение и сокращённое наименование единицы искомой величины.

Выполнение контрольных работ студентом и рецензирование их преподавателем преследуют две цели: во-первых, осуществление вузом контроля работы студентов; во-вторых, оказание им помощи в вопросах слабо усвоенных или непонятных.

К выполнению контрольных работ по каждому разделу физики студент-заочник приступает только после изучения материала, соответствующего данному разделу программы, внимательного ознакомления с примерами, помещёнными в данном пособии.

При выполнении контрольных работ студенту необходимо руководствоваться следующим:

1. Контрольные работы выполняются в обычной школьной тетради.

2. Контрольная работа выполняется чернилами. Для замечаний преподавателя на страницах оставляются поля. Каждая следующая задача должна начинаться с новой страницы. Условия задач переписываются полностью без сокращений.

3. Решения задач должны сопровождаться исчерпывающими, но краткими объяснениями, раскрывающими физический смысл употребляемых формул, и выполняться в соответствии с правилами, изложенными в параграфе «Решение задач».

4. 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.

5. 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. 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 незачтенной работой.

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

Контрольные работы по содержанию распределяются следующим образом: 1 – физические основы механики; молекулярная физика, термодинамика; 2– электростатика, постоянный ток; электромагнетизм, электромагнитные колебания и волны, оптика, квантово-оптические явления; элементы атомной физики.

Каждая контрольная работа для студентов-заочников включает 10 задач из соответствующего варианта. Определение варианта задания проводится по единой для всех двух контрольных работ таблице вариантов в соответствии с последней цифрой шифра (таблица №1).

Таблица 1 – Таблица вариантов

№ варианта	№ задачи									
1	201	211	221	231	241	251	261	271	281	291
2	202	212	222	232	242	252	262	272	282	292
3	203	213	223	233	243	253	263	273	283	293
4	204	214	224	234	244	254	264	274	284	294

5	205	215	225	235	245	255	265	275	285	295
6	206	216	226	236	246	256	266	276	286	296
7	207	217	227	237	247	257	267	277	287	297
8	208	218	228	238	248	258	268	278	288	298
9	209	219	229	239	249	259	269	279	289	299
10	210	220	230	240	250	260	270	280	290	300

Раздел 1. Электромагнетизм

Тема 1.1: Электростатика

1.1.1 ОСНОВНЫЕ ФОРМУЛЫ

Закон Кулона

$$\vec{F} = \frac{q_1 q_2}{4\pi \cdot \varepsilon_0 \cdot \varepsilon \cdot r^2} \cdot \frac{\vec{r}}{r},$$

где q_1 и q_2 – величины точечных зарядов,
ε_0 – электрическая постоянная,
ε – диэлектрическая проницаемость среды,
r – расстояние между зарядами.

Напряженность электрического поля

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q}$$

Напряженность поля:

точечного заряда

$$E = \frac{q}{4\pi \cdot \varepsilon_0 \cdot \varepsilon \cdot r^2};$$

бесконечно длинной заряженной нити

$$E = \frac{\tau}{2\pi \cdot \varepsilon_0 \cdot \varepsilon \cdot r};$$

равномерно заряженной бесконечной плоскости

$$E = \frac{\sigma}{2\varepsilon_0 \cdot \varepsilon};$$

между двумя разноименно заряженными бесконечными плоскостями

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon_0 \cdot \varepsilon},$$

где τ – линейная плотность заряда,
σ – поверхностная плотность заряда,
r – расстояние до источника поля

Электростатическое смещение

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

Работа перемещения заряда в электростатическом поле

$$A = q\int_1^2 E_1 dl = q(\varphi_1 - \varphi_2),$$

где φ_1 и φ_2 – потенциалы начальной и конечной точек.

Потенциал поля точечного заряда

$$\varphi = \frac{q}{4\varepsilon_0 \cdot \varepsilon \cdot r}$$

Связь между потенциалом и напряженностью

$$E_l = -\frac{d\varphi}{dr}$$

Сила притяжения между двумя разноименно заряженными обкладками конденсатора

$$F = \frac{\varepsilon_0 \cdot \varepsilon \cdot E^2 S}{2} = \frac{q^2}{2\varepsilon_0 \varepsilon \cdot S},$$

где S – площадь пластин.

Электроемкость:

уединенного проводника

$$C = \frac{q}{\varphi};$$

плоского конденсатора

$$C = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon \cdot S}{d};$$

слоистого конденсатора

$$C = \frac{\varepsilon_0 \cdot S}{\sum d_i / \varepsilon_i},$$

где d – расстояние между пластинами конденсатора,

d_i – толщина i–го слоя диэлектрика,

ε_i – его диэлектрическая проницаемость.

Электроемкость батареи конденсаторов, соединенных:

параллельно

$$C = \sum C_i$$

последовательно

$$\frac{1}{C} = \sum \frac{1}{C_i}.$$

Энергия поля:

заряженного проводника

$$W_э = \frac{C \cdot \varphi^2}{2} = \frac{q^2}{2C} = \frac{q \cdot \varphi}{2};$$

заряженного конденсатора

$$W_э = \frac{1}{2}\varepsilon_0 \cdot \varepsilon \cdot E^2 V,$$

где V – объем конденсатора.

Объемная плотность энергии электрического поля

$$W_э = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon \cdot E^2}{2} = \frac{D^2}{2\varepsilon_0 \varepsilon} = \frac{ED}{2}$$

1.1.2 ПРИМЕРЫ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ

Пример 1.

В углах при основании равнобедренного треугольника с боковой стороной 8 см расположены заряды Q_1 и Q_2. Определить силу, действующую на заряд 1 нКл, помещенный в вершине треугольника. Угол при вершине 120°. Рассмотреть случаи:

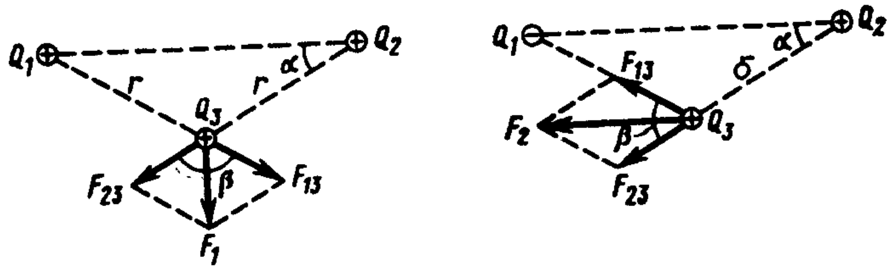
а) $Q_1 = Q_2 = 2$ *нКл; б)* $Q_1 = -Q_2 = 2$ *нКл.*

Дано: $|Q_1| = |Q_2| = 2 \cdot 10^{-9}$ Кл; $Q_3 = 10^{-9}$ Кл; $r = 0{,}08$ м; $\alpha = 30^{\mathrm{o}}$; $\varepsilon = 1$.

Найти: F_1; F_2.

Решение. В соответствии с принципом суперпозиции поле каждого из зарядов Q_1 и Q_2 действует на заряд Q_1 независимо. Это значит, что на заряд Q_3 действуют силы (рис. 1, а)

$$F_{13} = \frac{Q_1 \cdot Q_3}{4 \cdot \pi \cdot \varepsilon \cdot \varepsilon_0 \cdot r^2}, \quad F_{23} = \frac{Q_2 \cdot Q_3}{4 \cdot \pi \cdot \varepsilon \cdot \varepsilon_0 \cdot r^2}.$$



а) б)

Рисунок 1 – Определение равнодействующей силы

Так как $|Q_1| = |Q_2|$, то $|F_{13}| = |F_{23}|$. Векторная сумма $\vec{F} = \vec{F}_1 + \vec{F}_2$ является искомой величиной. Модуль силы определяется по теореме косинусов $F = \sqrt{F_{13}^2 + F_{23}^2 + 2F_{13} \cdot F_{23} \cdot \cos\beta}$. В случае одноименных зарядов Q_1 и Q_2 из рис.1, а видно, что угол $\beta = 120^{\mathrm{o}}$, поэтому $F_1 = F_{13} = F_{23}$:

$$F_1 = \frac{Q_1 \cdot Q_2}{4\pi\varepsilon\varepsilon_0 r^2};$$

$$F_1 = \frac{2 \cdot 10^{-9}\ \text{Кл} \cdot 1 \cdot 10^{-9}\ \text{Кл}}{4 \cdot 3{,}14 \cdot 1 \cdot 8{,}85 \cdot 10^{-12}\ \text{Ф/м} \cdot 64 \cdot 10^{-4}\ \text{м}^2} = 2{,}8 \cdot 10^{-6}\ \text{Н} = 2{,}8\ \text{мкН}.$$

В случае разноименных зарядов Q_1 и Q_2 из рис. 1, б видно, что угол $\beta = 60^{\mathrm{o}}$ и, следовательно,

$$F_2 = \sqrt{F_{13}^2 + F_{23}^2 + 2F_{13} \cdot F_{23} \cdot \cos\beta} = F_1 \cdot \sqrt{3};$$

$$F_2 = 2{,}8 \cdot 10^{-6}\ \text{Н} \cdot \sqrt{3} = 4{,}8 \cdot 10^{-6}\ \text{Н} = 4{,}8\ \text{мкН}.$$

Ответ: $F_1 = 2{,}8 \cdot 10^{-6}$ мкН; $F_2 = 4{,}8$ мкН.

Пример 2.

Два разных отрицательных заряда по 9 нКл находятся в воде на расстоянии

18 см друг от друга. Определить напряженность и потенциал поля в точке, расположенной на расстоянии 5 см от зарядов.

Дано: $Q_1 = Q_2 = -9 \cdot 10^{-9}$ Кл; $\varepsilon = 81$; $r_0 = 0{,}08$ *м*; $r_1 = r_2 = 0{,}05$ *м*.

Найти: *E, φ*.

Решение:

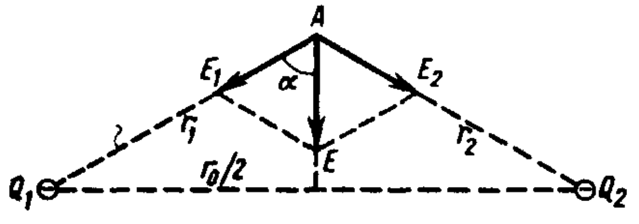


Рисунок 2 – Применение принципа суперпозиции полей

Напряженность поля, создаваемого в точке А (рис. 2) зарядами Q_1 и Q_2 по принципу суперпозиции полей, равна векторной сумме напряженностей, создаваемым каждым из зарядов:

$$\vec{E} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2$$

По теореме косинусов

$$E = \sqrt{E_1^2 + E_2^2 + 2E_1 \cdot E_2 \cdot \cos 2\alpha}.$$

Напряженность поля точечного заряда Q

$$E = \frac{Q}{4\pi\varepsilon\varepsilon_0 r^2};$$

где ε – диэлектрическая проницаемость;

ε_0 – электрическая постоянная;

r – расстояние от заряда до точки поля, в которой определяется его напряженность.

Заряды Q_1 и Q_2 отрицательны, следовательно, векторы его E_1 и E_2 направлены по линиям напряженности к зарядам. По условию заряды $Q_1 = Q_2$ расположены на одинаковом расстоянии от точки A, поэтому $E_1 = E_2$. Следовательно, вторая формула принимает вид $E = 2E_1 \cdot \cos\alpha$, где $\cos\alpha = h / r_1$,

$$h = OA = \sqrt{r_1^2 - r_0^2 / 4};$$

$$h = \sqrt{(5 \cdot 10^{-2}\ м^2)^2 - (4 \cdot 10^{-2}\ м)^2} = 3 \cdot 10^{-2}\ м.$$

Тогда напряженность в точке A

$$E = \frac{2Q_1 \cdot h}{4\pi\varepsilon\varepsilon_0 r_1^3};$$

$$E = \frac{2 \cdot 9 \cdot 10^{-9}\ Кл \cdot 3 \cdot 10^{-2}\ м}{4 \cdot 3{,}14 \cdot 81 \cdot 8{,}85 \cdot 10^{-12}\ Ф/м \cdot (0{,}05)^3\ м^2} = 480\ В/м.$$

Потенциал φ, создаваемый системой точечных зарядов в данной точке поля, равен алгебраической сумме потенциалов, создаваемых каждым из зарядов $\varphi = \sum_{i=1}^{n} \varphi_i$. Потенциал φ результирующего поля в точке A равен $\varphi = \varphi_1 + \varphi_2$. Потенциал поля, создаваемого точечным зарядом, $\varphi = Q/(4\pi\varepsilon\varepsilon_0 r)$. Следовательно,

$$\varphi = \varphi_1 + \varphi_2 = \frac{Q_1}{4\pi\varepsilon\varepsilon_0 r_1} + \frac{Q_2}{4\pi\varepsilon\varepsilon_0 r_2} = \frac{2Q_1}{4\pi\varepsilon\varepsilon_0 r_1};$$

$$\varphi = \frac{-2 \cdot 10^{-9}\ Кл}{4 \cdot 3{,}14 \cdot 81 \cdot 8{,}85 \cdot 10^{-12}\ Ф/м \cdot 5 \cdot 10^{-2}} = -40\ В.$$

Ответ: $E = 480\ В/м;\ \varphi = -40\ В.$

Пример 3.

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

Дано: $r_0 = 0{,}1\ м;\ r_1 = 1\ м;\ r_2 = 0{,}2\ м;\ Q = 1 \cdot 10^{-9}\ Кл;\ \varepsilon = 1;\ \tau = 1 \cdot 10^{-6}\ Кл/м.$

Найти: $A_1;\ A_2$.

Решение: Работа внешней силы по перемещению заряда Q из точки поля с потенциалом φ_I, в точку с потенциалом φ_0, равна

$$A = Q(\varphi_0 - \varphi_i).$$

Бесконечная равномерно заряженная нить с линейной плотностью заряда τ создает аксиально–симметричное поле напряженностью $E = \frac{\tau}{2\pi \cdot \varepsilon \cdot \varepsilon_0 \cdot r}$. Напряженность и потенциал этого поля связаны соотношением $E = -\frac{d\varphi}{dr}$, откуда $d\varphi = -Edr$. Разность потенциалов точек поля на расстоянии r_i и r_0 от нити

$$\varphi_0 - \varphi_i = -\int_{r_i}^{r_0} Edr = -\frac{\tau}{2\pi \cdot \varepsilon \cdot \varepsilon_0} \int_{r_i}^{r_0} \frac{dr}{r} = \frac{\tau}{2\pi \cdot \varepsilon \cdot \varepsilon_0} \ln\frac{r_i}{r_0};$$

$$\varphi_0 - \varphi_1 = \frac{\tau}{2\pi \cdot \varepsilon \cdot \varepsilon_0} \ln\frac{r_1}{r_0};$$

$$\varphi_0 - \varphi_2 = \frac{\tau}{2\pi \cdot \varepsilon \cdot \varepsilon_0} \ln \frac{r_2}{r_0};$$

Подставляя в первую формулу найденное выражение для разности потенциалов из , определим работу, совершаемую внешними силами по перемещению заряда из точки, находящейся на расстоянии 1 м, до точки, расположенной на расстоянии 0,1 м от нити:

$$A_1 = \frac{Q \cdot \tau}{2\pi \cdot \varepsilon \cdot \varepsilon_0} \ln \frac{r_1}{r_0};$$

$$A_1 = \frac{1 \cdot 10^{-9}\ Кл \cdot 1 \cdot 10^{-6}\ Кл/м \cdot \ln 10}{2 \cdot 3{,}14 \cdot 8{,}85 \cdot 10^{-12}\ Ф/м} = 4{,}1 \cdot 10^{-5}\ Дж.$$

Работа по перемещению заряда на последних 10 см пути равна

$$A_1 = \frac{Q \cdot \tau}{2\pi \cdot \varepsilon \cdot \varepsilon_0} \ln \frac{r_2}{r_0};$$

$$A_2 = \frac{1 \cdot 10^{-9}\ Кл \cdot 1 \cdot 10^{-6}\ Кл/м \cdot \ln 2}{2 \cdot 3{,}14 \cdot 8{,}85 \cdot 10^{-12}\ Ф/м} = 1{,}25 \cdot 10^{-5}\ Дж.$$

Ответ: $A_1 = 4{,}1 \cdot 10^{-5}$ *Дж*; $A_2 = 1{,}25 \cdot 10^{-5}$ *Дж.*

Пример 4.

К одной из обкладок плоского конденсатора прилегает стеклянная плоскопараллельная пластинка (ε_1=7) толщиной 9 мм. После того как конденсатор отключили от источника напряжения 220 В и вынули стеклянную пластинку, между обкладками установилась разность потенциалов 967 В. Определить зазор между обкладками и отношение конечной и начальной энергии конденсатора.

Дано: $U_1 = 220\ В; U_2 = 976\ В; d_1 = 9 \cdot 10^{-3}\ м; \varepsilon_1 = 7; \varepsilon_2 = 1.$

Найти: $d_0; \dfrac{W_1}{W_2}.$

Решение. После отключения конденсатора и удаления стеклянной пластинки заряд на его обкладках остается неизменным, т.е. выполняется равенство:

$$C_1 U_1 = C_2 U_2,$$

где C_1 и C_2 – электроемкости конденсатора в начальном и конечном случае.

По условию конденсатор вначале является слоистым и его электроемкость определяется по формуле:

$$C_1 = \frac{\varepsilon_0 \cdot S}{\dfrac{d_1}{\varepsilon_1} + \dfrac{d_0 - d_1}{\varepsilon_2}},$$

где S – площадь обкладок;

d_0 – зазор между ними,

d_1 – толщина стеклянной пластинки;

ε_1; ε_2 – диэлектрические проницаемости стекла и воздуха соответственно.

После удаления стеклянной пластинки электроемкость конденсатора

$$C_2 = \frac{\varepsilon_2 \varepsilon_0 S}{d_0}.$$

Подставляя полученные выражения в первую формулу, получим

$$C_1 = \frac{\varepsilon_0 S U_1}{\dfrac{d_1}{\varepsilon_1} + \dfrac{d_0 - d_1}{\varepsilon_2}} = \frac{\varepsilon_2 \varepsilon_0 S U_2}{d_0},$$

откуда

$$d_0 = \frac{U_2 d_1}{U_2 - U_1}\left(1 - \frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1}\right);\ d_0 = \frac{976\ В \cdot 9 \cdot 10^{-3}\ м}{(976 - 220)\ В}\left(1 - \frac{1}{7}\right) = 1 \cdot 10^{-2}\ м.$$

Начальная и конечная энергии конденсатора

$$W_1 = \frac{C_1 U_1^2}{2};\ W_2 = \frac{C_2 U_2^2}{2}.$$

Тогда отношение этих энергий $\frac{W_2}{W_1} = \frac{C_2 U_2^2}{C_1 U_2^2}$. Учитывая первую формулу получим

$$\frac{W_2}{W_1} = \frac{U_2}{U_1};\ \frac{W_2}{W_1} = \frac{976\ В}{220\ В} = 4{,}44.$$

Ответ: $d_0 = 1 \cdot 10^{-2}\ м;\ \frac{W_2}{W_1} = 4{,}44.$

Пример 5.

Батарею из двух конденсаторов емкостью 400 и 500 пФ соединили последовательно и включили в сеть с напряжением 220 В. Потом батарею отключили от сети, конденсаторы разъединили и соединили параллельно обкладками, имеющими одноименные заряды. Каким будет напряжение на зажимах полученной батареи?

Дано: $U_1 = 220\ В;\ C_1 = 400\ пФ;\ C_2 = 500\ пФ.$

Найти: U_2.

Решение. У последовательно соединенных конденсаторов заряды на обкладках равны по модулю $Q_1 = Q_2 = Q$ и заряд батареи равен заряду одного конденсатора. Емкость батареи последовательно соединенных конденсаторов определяется по формуле:

$$\frac{1}{C} = \sum_{i=1}^{n} \frac{1}{C_i}.$$

Для батареи из двух конденсаторов

$$C = \frac{C_1 \cdot C_2}{C_1 + C_2},$$

а их заряд

$$Q = CU_1 = \frac{C_1 C_2 U_1}{C_1 + C_2}.$$

При отключении конденсаторов их заряд сохраняется. У параллельно соединенных конденсаторов заряд батареи равен сумме зарядов конденсаторов $Q' = Q_1 + Q_2$, а емкость – сумме емкостей $C' = C_1 + C_2$.

Напряжение на зажимах батареи из двух параллельно соединенных конденсаторов

$$U_2 = \frac{Q'}{C} = \frac{Q_1 + Q_2}{C_1 + C_2} = \frac{2Q}{C_1 + C_2}.$$

Подставляя формулу для заряда впоследнюю формулу, получаем

$$U_2 = \frac{2C_1 C_2 U_1}{(C_1 + C_2)^2};$$

$$U_2 = \frac{2 \cdot 4 \cdot 5 \cdot 10^{-20}\ Ф^2 \cdot 220\ В}{9^2 \cdot 10^{-20}\ Ф^2} = 108{,}6\ В.$$

Ответ: $U_2 = 108{,}6\ В.$

Пример 6.

Заряд конденсатора 1 мкКл, площадь пластин 100 см^2, зазор между пластинками заполнен слюдой. Определить объемную плотность энергии поля конденсатора и силу притяжения пластин.

Дано: $Q=10^{-6}\ Кл;\ S=10^{-2}\ м^2;\ \varepsilon=6.$

Найти: $w;\ F.$

Решение: Сила притяжения между двумя разноименно заряженными обкладками конденсатора

$$F = \frac{\varepsilon \cdot \varepsilon_0 \cdot E^2 S}{2},$$

где E – напряженность поля конденсатора;

S – площадь обкладок конденсатора;

E – диэлектрическая проницаемость слюды;

ε_0 – электрическая постоянная.

Напряженность однородного поля плоского конденсатора

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon \cdot \varepsilon_0} = \frac{Q}{\varepsilon \cdot \varepsilon_0 \cdot S},$$

где $\sigma = \frac{Q}{S}$ – поверхностная плотность заряда.

Подставляя последнее выражение в первое, получаем

$$F = \frac{Q^2}{2\varepsilon \cdot \varepsilon_0 S};$$

$$F = \frac{10^{-12}\ Кл^2}{2 \cdot 6 \cdot 8{,}85 \cdot 10^{-12}\ Ф/м \cdot 10^{-2}\ м^2} = 0{,}94\ Н.$$

Объемная плотность энергии электрического поля

$$w = \frac{\varepsilon \cdot \varepsilon_0 \cdot E^2}{2}.$$

Подставляя ранее полученные выражения, получаем

$$w = \frac{Q^2}{2 \cdot \varepsilon \cdot \varepsilon_0 \cdot S^2};$$

$$w = \frac{10^{-12}\ Кл^2}{2 \cdot 6 \cdot 8{,}85 \cdot 10^{-12}\ Ф/м \cdot 10^{-4}\ м^4} = 94{,}2\ Дж/м^2.$$

Ответ: $F = 0{,}94\ Н,\ w = 94{,}2\ Дж/м^2$.

Тема 1.2: Основы теории проводимости

1.2.1 ОСНОВНЫЕ ФОРМУЛЫ

Сила тока $$I = \frac{dq}{dt}.$$

Закон Ома:

в дифференциальной форме $$\vec{j} = \gamma \cdot \vec{E} = \frac{\vec{E}}{\rho};$$

в интегральной форме $$I = \frac{U}{R},$$

где γ – удельная проводимость,

ρ – удельное сопротивление,

U – напряжение на концах цепи,

j – плотность тока.

Закон Джоуля–Ленца:

в дифференциальной форме $$\frac{dw}{dt} = \vec{j} \cdot \vec{E} = \gamma \cdot E^2 = \frac{E^2}{\rho};$$

либо $$dQ = J \cdot U \cdot dt = \frac{U^2}{R} dt = J^2 R \cdot dt.$$

Сопротивление однородного проводника $$R = \frac{\rho \cdot \ell}{S},$$

где ℓ – длина проводника,

S – площадь его поперечного сечения.

Зависимость удельного сопротивления проводника от температуры $$\rho = \rho_0 (1 + \alpha \cdot t),$$

где α – температурный коэффициент сопротивления,

t – температура по шкале Цельсия.

1.2.2 ПРИМЕРЫ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ

Пример 1.

В медном проводнике сечением 6 мм и длиной 5 м течет ток. За 1 мин в проводнике выделяется 18 Дж теплоты. Определить напряженность поля, плотность и силу электрического тока в проводнике.

Дано: *$S=6\cdot10^{-6}$ м; $\ell=5$ м; $Q=18$ Дж; $\rho=1.7\cdot10^{-8}$ Ом·м; $t=60$ с.*

Найти: *E; j; J.*

Решение: Для решения задачи используем закон Ома и Джоуля–Ленца. Закон Ома в дифференциальной форме имеет вид

$$j = E\gamma,$$

где j – плотность тока;

E – напряженность поля;

γ – удельная проводимость.

Закон Джоуля–Ленца

$$Q = J^2 Rt.$$

где J – сила тока,

t – время.

Сопротивление проводника:

$$R = \rho \frac{\ell}{S}, \qquad (3)$$

где ρ, ℓ, S – удельное сопротивление, длина и площадь поперечного сечения проводника соответственно.

Силу тока J находим с учетом последней формулы:

$$J = \sqrt{\frac{Q}{Rt}} = \sqrt{\frac{Q \cdot S}{\rho \ell t}};\ J = \sqrt{\frac{18\ Дж \cdot 6 \cdot 10^{-6}\ м^2}{1{,}7 \cdot 10^{-8}\ Ом \cdot м \cdot 5\ м \cdot 60\ с}} = 4{,}6\ А.$$

По определению, плотность тока равна $j = \frac{J}{S}$;

$$j = \frac{4{,}6\ А}{6 \cdot 10^{-6}\ м^2} = 7{,}7 \cdot 10^5\ \frac{А}{м^2}.$$

Напряженность поля в проводнике определим из (1), учитывая, что $\gamma = \frac{1}{\rho}$.

$$E = j \cdot \rho;\ E = 7{,}7 \cdot 10^{-5}\ \frac{А}{м^2} \cdot 1{,}7 \cdot 10^{-8}\ Ом \cdot м = 1{,}3 \cdot 10^{-2}\ \frac{В}{м}.$$

Ответ: $E = 1{,}3 \cdot 10^{-2}\ \frac{В}{м};\ J = 4{,}6\ А;\ j = 7{,}7 \cdot 10^5\ \frac{А}{м^2}$.

Пример 2.

Внутреннее сопротивление аккумулятора 2 Ом. При замыкании его одним резистором сила тока равна 4 А, при замыкании другим – 2 А. Во внешней цепи в обоих случаях выделяется одинаковая мощность. Определить электродвижущую силу аккумулятора и внешние сопротивления.

Дано: $r = 2\ Ом;\ J_1 = 4\ А;\ J_2 = 2\ А;\ N_1 = N_2$.

Найти: $\varepsilon;\ R_1, R_2$.

Решение. Закон Ома для замкнутой (полной) цепи имеет вид:

$$J_1 = \frac{\varepsilon}{R_1 + r};\ J_2 = \frac{\varepsilon}{R_2 + r},$$

где r – внутреннее сопротивление источника тока;

ε – э.д.с. аккумулятора;

R_1 и R_2 – внешние сопротивления цепей.

Уравнения представим в виде

$$\varepsilon = J_1(R_1 + r); \quad \varepsilon = J_2(R_2 + r).$$

Из равенства следует, что

$$J_1(R_1 + r) = J_2(R_2 + r).$$

Мощность, выделяемая во внешней цепи в первом и втором случаях, соответственно равна

$$N_1 = J_1^2 R_1; \; N_2 = J_2^2 R_2.$$

Из условия равенства мощностей следует, что

$$J_1^2 R_1 = J_2^2 R_2.$$

Решая совместно уравнения , получаем

$$R_1 = \frac{J_2 r}{J_1}, \; R_2 = \frac{J_1 r}{J_2};$$

$$R_1 = \frac{2\ A \cdot 2\ Ом}{4\ A} = 1\ Ом; \; R_2 = \frac{4\ A \cdot 2\ Ом}{2\ A} = 4\ Ом.$$

Подставляем последние выражения, получаем

$$\varepsilon = J_1 r \left(\frac{J_2}{J_1} + 1 \right);$$

$$\varepsilon = 4\ A \cdot 2\ Ом \left(\frac{2\ A}{4\ A} + 1 \right) = 12\ B.$$

Ответ: $\varepsilon = 12\ B; \; R_1 = 1\ Ом; \; R_2 = 4\ Ом.$

Пример 3.

Электродвижущая сила батареи равна 20 В. Коэффициент полезного действия батареи составляет 0,8 при силе тока 4 А. Чему равно внутреннее сопротивление батареи?

Дано: $\varepsilon = 20\ B; \eta = 0{,}8; \; J = 4\ A.$

Найти: r.

Решение. Коэффициент полезного действия источника тока η равен отношению падения напряжения во внешней цепи к его электродвижущей силе.

$$\eta = \frac{RJ}{\xi},$$

откуда $$R = \frac{\eta\xi}{J}.$$

Используя выражение закона Ома для замкнутой цепи $J = \dfrac{\varepsilon}{R + r}$, получаем

$$\eta = \frac{R}{R + r}.$$

Подставляя и выполняя преобразования, находим

$$r = \frac{\varepsilon(1-\mu)}{J};\ r = \frac{20\ B(1-0{,}8)}{4\ A} = 1\ Ом.$$

Ответ: $r = 1\ Ом.$

Тема 1.3: Магнитное поле постоянного тока

1.3.1 ОСНОВНЫЕ ФОРМУЛЫ

Формула Лоренца $$\vec{F} = q \cdot \vec{E} + q\left[\vec{\upsilon}; \vec{B}\right]$$

где υ – скорость заряда q,

B –индукция магнитного поля,

E – напряженность электрического поля.

Сила Ампера $$d\vec{F} = J\left[d\vec{\ell}, \vec{B}\right]$$

где J – сила тока в проводнике,

$d\ell$ – элемент длины проводника.

Магнитный момент контура с током $$p_m = J \cdot S$$

где S – площадь контура.

Механический момент, действующий на контур с током в магнитном поле $$M = p_m \times B$$

Закон Био–Савара–Лапласа $$d\vec{B} = \frac{\mu_0 \cdot \mu \cdot J\left[d\vec{\ell}, \vec{r}\right]}{4 \cdot \pi \cdot r^3}$$

где μ_0 – магнитная постоянная,

μ – магнитная проницаемость среды

Магнитная индукция:

в центре кругового тока $$B = \frac{\mu_0 \cdot \mu \cdot J}{2R};$$

поля бесконечно длинного прямого тока $$B = \frac{\mu_0 \cdot \mu \cdot J}{2 \cdot \pi \cdot r};$$

поля, созданного отрезком проводника с током $$B = \frac{\mu_0 \cdot \mu \cdot J}{4 \cdot \pi \cdot r}(\cos\alpha_1 + \cos\alpha_2);$$

поля бесконечно длинного соленоида $$B = \mu_0 \cdot \mu \cdot n \cdot J,$$

где R – радиус кругового тока,

r – кратчайшее расстояние до оси проводника,

n – число витков на единицу длины соленоида,

α_1, α_2 – углы между отрезком проводника и линией, соединяющей концы отрезка с точкой поля.

Сила взаимодействия двух прямолинейных бесконечно длинных параллельный токов на единицу их длины

$$F = \frac{\mu_0 \cdot \mu \cdot J_1 \cdot J_2}{2 \cdot \pi \cdot r},$$

где r – расстояние между токами J_1 и J_2.

Работа по перемещению контура с током в магнитном поле

$$A = J \cdot \Delta\Phi,$$

где Φ – магнитный поток через поверхность контура.

Магнитный поток однородного магнитного поля через площадку S

$$\Phi_B = B \cdot S \cdot \cos\alpha.$$

Закон электромагнитной индукции

$$\varepsilon_i = -N\frac{d\Phi}{dt} = -\frac{d\psi}{dt},$$

где N – число витков контура.

Потокосцепление контура с током

$$\psi = L \cdot J,$$

где L – индуктивность контура.

Электродвижущая сила самоиндукции

$$\varepsilon_s = -L \cdot \frac{dJ}{dt}.$$

Индуктивность соленоида

$$L = \mu_0 \cdot \mu \cdot n^2 \cdot V,$$

где V – объем соленоида,

n – число витков на единицу длины соленоида.

Мгновенное значение силы тока в цепи, обладающей сопротивлени-

$$J = J_0 \cdot \exp\left(-\frac{R \cdot t}{L}\right) + \frac{\varepsilon}{R}\left[1 - \exp\left(-\frac{R \cdot t}{L}\right)\right]$$

ем **R и индуктивностью L.**

Энергия магнитного поля

$$W = \frac{L \cdot J^2}{2}.$$

Объемная плотность энергии магнитного поля

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

1.3.2 ПРИМЕРЫ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ

Пример 1.

По двум бесконечно длинным прямолинейным проводникам, находящимся на расстоянии 50 см друг от друга, в одном направлении текут токи J_1 и J_2 силой по 5 А. Между проводниками на расстоянии 30 см от первого расположен кольцевой проводник с током J_3 силой 5 А (рис. 1). Радиус кольца 20 см. Определить индукцию и напряженность магнитного поля, создаваемого токами в центре кольцевого проводника.

Дано: $J_1=J_2=J_3=J=5$ *А*; $r_1=0{,}2$ *м*; $r_3=0{,}2$ *м.*

Найти: B; H.

Решение. В соответствии с принципом суперпозиции индукция результирующего магнитного поля в точке A равна

$$\vec{B} = \vec{B}_1 + \vec{B}_2 + \vec{B}_3$$

где $\vec{B}_1$, и $\vec{B}_2$ – индукции полей, создаваемых соответственно токами J_1 и J_2, направленными за плоскость рисунка;

$\vec{B}_3$ – индукция поля, создаваемая кольцевым током. Как видно из рис. 1,

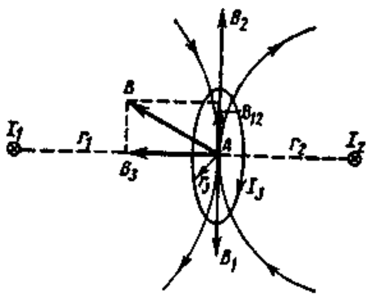


Рисунок 3 – Применение принципа суперпозиции полей для вектора магнитной индукции

Векторы $\vec{B}_1$ и $\vec{B}_2$ направлены по одной прямой в противоположные стороны, поэтому их сумма $\vec{B}_1 + \vec{B}_2 = \vec{B}_{12}$ равна по модулю

$$B_{12} = B_2 - B_1$$

Индукция поля, создаваемого бесконечно длинным проводником с током,

$$B_1 = \frac{\mu \cdot \mu_0 \cdot J}{2 \cdot \pi \cdot r_1}; \quad B_2 = \frac{\mu \cdot \mu_0 \cdot J}{2 \cdot \pi \cdot r_2},$$

где μ_0 – магнитная постоянная;

μ – магнитная проницаемость среды (для воздуха μ=1);

r_2,, r_2 – расстояния от проводников до центра кольца.

Подставляя последние выражения, получаем

$$B_{1,2} = \frac{\mu \cdot \mu_0 \cdot J}{2 \cdot \pi}\left(\frac{1}{r_2} - \frac{1}{r_1}\right) = \frac{\mu \cdot \mu_0 \cdot J(r_1 - r_2)}{2 \cdot \pi \cdot r_1 \cdot r_2}.$$

Индукция поля, создаваемого кольцевым проводником с током,

$$B_3 = \frac{\mu \cdot \mu_0 \cdot J}{2 \cdot \pi \cdot r_3}$$

где r_3 – радиус кольца.

Как видно из рис. 1, векторы $\vec{B}_{12}$ и $\vec{B}_3$ взаимно перпендикулярны, поэтому

$$B = \sqrt{B_{12}^2 + B_3^2}$$

или, учитывая выражения (4) и (5), имеем

$$B = \frac{\mu \cdot \mu_0 \cdot J}{2} \cdot \sqrt{\frac{(r_1 - r_2)^2}{\pi^2 \cdot r_1^2 \cdot r_2^2} + \frac{1}{r_3^2}};$$

$$B = \frac{1 \cdot 12{,}56 \cdot 10^{-7}\ \textit{Гн/м} \cdot 5\ A}{2}\sqrt{\frac{(0{,}3 - 0{,}2)^2\ \textit{м}^2}{3{,}14^2 \cdot 0{,}3^2 \cdot 0{,}2^2\ \textit{м}^4} + \frac{1}{0{,}2^2\ \textit{м}^2}} = 15{,}7 \cdot 10^{-6}\ \textit{Тл} = 15{,}7\ \textit{мкТл}.$$

Ответ: *B=15,7 мкТл; H=12,5 А/м.*

Пример 2.

Электрон, пройдя ускоряющую разность потенциалов 88 кВ, влетает в однородное магнитное поле перпендикулярно его линиям индукции. Индукция поля равна 0,01 Тл. Определить радиус траектории электрона.

Дано: *U=88 кВ; B=0,01 Тл; e=1,6* 10^{-19} *Кл.*

Найти: *r*.

Решение. В магнитном поле с индукцией *B* на электрон, движущийся со скоростью υ перпендикулярно $\vec{B}$, действует сила Лоренца

$$F = e\ \upsilon\ B,$$

которая обусловливает центростремительное ускорение электрона при его движении по окружности:

$$e \cdot \upsilon \cdot B = \frac{m \cdot \upsilon^2}{r},$$

где m – масса электрона;

e – его заряд;

r – радиус траектории его движения.

Пройдя ускоряющую разность потенциалов U, электрон приобретает кинетическую энергию $\frac{m \cdot \upsilon^2}{2}$, равную работе A сил электрического поля $\frac{m \cdot \upsilon^2}{2} = e \cdot U$. Отсюда находим скорость электрона:

$$\upsilon = \sqrt{\frac{2 \cdot e \cdot U}{m}}.$$

Из уравнения с учетом последней формулы найдем радиус траектории:

$$r = \frac{1}{B}\sqrt{\frac{2 \cdot U \cdot m}{e}};$$

$$r = \frac{1}{1 \cdot 10^{-2}\ Тл} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot 88 \cdot 10^3\ В \cdot 9{,}1 \cdot 10^{-31}\ кг}{1{,}6 \cdot 10^{-19}\ Кл}} = 0{,}1\ м$$

Ответ*:* *r=0,1 м.*

Пример 3.

Соленоид длиной 20 см и диаметром 4 см имеет плотную трехслойную обмотку из провода диаметром 0,1 мм. По обмотке соленоида течет ток 0,1 А. Зависимость *B—f(H)* для материала сердечника приведена на рис. 2. Определить напряженность и индукцию поля в соленоиде, магнитную проницаемость сердечника, индуктивность соленоида, энергию и объемную плотность энергии поля соленоида.

Дано: $\ell=0{,}2$ *м;* $D=0{,}04$ *м;* $N=3$*;* $d=1 \cdot 10^{-4}$ *м;* $J=0{,}1$ *А.*

Найти: H*;* B*,* μ*;* L*;* W*;* w.

Решение. Поле внутри соленоида можно считать однородным. В этом случае напряженность поля

$$H=J \cdot n,$$

где J – сила тока в обмотке;

Число витков, приходящихся на единицу длины соленоида

$$n = \frac{N}{d}$$

где N – число слоев обмотки;

d – диаметр провода.

Тогда $$H = \frac{J \cdot N}{d}; \quad H = \frac{0{,}1\ A \cdot 3}{1 \cdot 10^{-4}\ м} = 3000\ А/м.$$

По графику $B=f(H)$ находим,

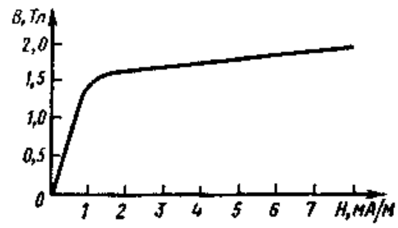


Рисунок 4 – Определение вектора напряженности магнитного поля

что напряженности 3000 А/м соответствует индукция 1,7 Тл. Используя связь между индукцией и напряженностью

$$B = \mu \cdot \mu_0 \cdot H,$$

определим магнитную проницаемость

$$\mu = \frac{B}{\mu_0 \cdot H}; \quad \mu = \frac{1{,}7\ Тл}{12{,}56 \cdot 10^{-7}\ Гн/м \cdot 3000\ А/м} = 450.$$

Индуктивность соленоида

$$L = \mu \cdot \mu_0 \cdot n^2 \cdot \ell \cdot S,$$

где ℓ – длина;

S – площадь поперечного сечения соленоида, $S = \dfrac{\pi \cdot D^2}{4}$.

Учитывая вторую формулу, получаем

$$L = \mu \cdot \mu_0 \frac{N^2}{d^2} \cdot \ell \cdot \frac{\pi \cdot D^2}{4};$$

$$L = \frac{450 \cdot 12{,}56 \cdot 10^{-7}\ Гн/м \cdot 3^2 \cdot 0{,}2\ м \cdot 3{,}14 \cdot 4^2 \cdot 10^{-4}\ м^2}{4 \cdot 1 \cdot 10^{-8}\ м^2} = 128\ Гн.$$

Объемная плотность энергии магнитного поля

$$w = \frac{B \cdot H}{2};$$

$$w = \frac{1{,}7\ Тл \cdot 3000\ А/м}{2} = 2550\ Дж/м^3.$$

Энергия магнитного поля соленоида

$$W = w \cdot S \cdot \ell$$

$$\text{или } W = \frac{L \cdot J^2}{2}.$$

Подставляя числовые данные в (7), получаем *W=128 Гн·10⁻² А²·0,5=0,64 Дж.*

Ответ: *H=3000 А/м; B=1,7 Тл; μ=450; L=128 Гн; w=2,55 кДж/м³; W=0,64 Дж.*

Пример 4.

На соленоид (см. условие и решение задачи 3) надето изолированное кольцо того же диаметра. Определить электродвижущую силу индукции в кольце и электродвижущую силу самоиндукции в соленоиде, если за 0,01 с ток в его обмотке равномерно снижается до нуля.

Дано: *B=1,7 Тл; D=0,04 м; J_1=0,l А; L=128 Гн; Δt=10^{-2} с; J_2=0.*

Найти: ε_j; ε_s

Решение. По условию за время Δt=0,01 с силой тока в обмотке соленоида равномерно уменьшается от 0,1 А до нуля, поэтому магнитный поток, пронизывающий площадь кольца $S = \frac{\pi \cdot D^2}{4}$, уменьшается от $\Phi_1 = B \cdot S$ до $\Phi_2 = 0$.

Электродвижущая сила индукции, возникающая в кольце,

$$\varepsilon_i = -\frac{\Delta \Phi}{\Delta t} = -\frac{\Phi_2 - \Phi_1}{\Delta t} = \frac{\Phi_1}{\Delta t} = \frac{B \cdot \pi \cdot D^2}{4 \cdot \Delta t};$$

$$\varepsilon_i = \frac{1{,}7\,Тл \cdot 3{,}14 \cdot 16 \cdot 10^{-4}\ м^2}{4 \cdot 10^{-2}\ с} = 0{,}2\ В.$$

Электродвижущая сила самоиндукции ε_s, возникающая в соленоиде при выключении тока в нем, $\varepsilon_s = -L\frac{dJ}{dt}$. Так как при выключении сила тока уменьшается до нуля равномерно, то

$$\frac{dJ}{dt} = \frac{\Delta J}{\Delta t} = \frac{J_2 - J_1}{\Delta t} = -\frac{J_1}{\Delta t}.$$

Тогда $\varepsilon_s = \frac{L \cdot J_1}{\Delta t}$; $\varepsilon_s = \frac{128\ Гн \cdot 0{,}1\ А}{0{,}01\ с} = 1280\ В.$

Ответ: ε_i=0,21 В; ε_s=1280 В.

Пример 5.

Виток радиусом 5 см с током 1 А помещен в однородное магнитное поле напряженностью 5000 А/м так, что нормаль к витку составляет угол 60° с направлением поля. Какую работу совершат силы поля при повороте витка в устойчивое положение?

Дано*: r=0,05 м; J=1 A; H=5000 А/м; α=60°.*

Найти: *А.*

Решение. Работа *A* при повороте витка с током *J* в магнитном поле

$$A = J \cdot \Delta \Phi .$$

где $\Delta\Phi = \Phi_2 - \Phi_1$ – изменение магнитного потока сквозь площадь витка $S = \pi \cdot r^2$

$\Phi_1 = B \cdot S \cdot \cos\alpha$ – магнитный поток, пронизывающий виток в начальном положении.

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

Устойчивым положением витка в магнитном поле является такое, при котором направление нормали к нему совпадает с вектором индукции, т. е. *cos α=1.*

Следовательно, $\Phi_2 = B \cdot S$.

Таким образом, $\Delta\Phi = B \cdot \pi \cdot r^2 \cdot (1 - \cos\alpha)$.

Учитывая, что $B = \mu \cdot \mu_0 \cdot H$, имеем

$$\Delta\Phi = \mu \cdot \mu_0 \cdot H \cdot \pi \cdot r^2 (1 - \cos\alpha)$$

получаем

$$A = J \cdot \mu \cdot \mu_0 \cdot H \cdot \pi \cdot r^2 (1 - \cos\alpha);$$

$$A = 1\ A \cdot 1 \cdot 12{,}56 \cdot 10^{-7}\ Гн/м \cdot 5 \cdot 10^3\ А/м \cdot 3{,}14 \cdot 25 \cdot 10^{-4}\ м^2 \cdot (1 - 0{,}5) = 2{,}46 \cdot 10^{-5}\ Дж.$$

Ответ: А=2,46·10-5 Дж

Тема 1.4: Электромагнитное поле. Волны

1.4.1 ОСНОВНЫЕ ФОРМУЛЫ

Релятивистское сокращение длины

$$\ell = \ell_0 \sqrt{1 - \frac{\upsilon^2}{c^2}},$$

где ℓ_0 – длина покоящегося тела,

c – скорость света в вакууме.

Релятивистское замедление времени
где t_0 – собственное время.

$$t=\frac{t_0}{\sqrt{1-\frac{\upsilon^2}{c^2}}},$$

Релятивистская масса
где m_0 – масса покоя.

$$m=\frac{m_0}{\sqrt{1-\frac{\upsilon}{c^2}}},$$

Энергия покоя частицы

$$E_0=m_0c^2.$$

Полная энергия релятивистской частицы

$$E=m\cdot c^2=\frac{m_0c^2}{\sqrt{1-\frac{\upsilon^2}{c^2}}}.$$

Релятивистский импульс

$$\vec{p}=m\cdot\vec{\upsilon}=\frac{m_0\vec{\upsilon}}{\sqrt{1-\frac{\upsilon^2}{c^2}}}.$$

Кинетическая энергия релятивистской частицы

$$T=E-E_0=m_0c^2\left(\frac{1}{\sqrt{1-\frac{\upsilon^2}{c^2}}}-1\right).$$

Релятивистское соотношение между полной энергией и импульсом.

$$E^2=p^2c^2+E_0^2.$$

Скорость распространения электромагнитной волны
где c – скорость света в вакууме,
ε – диэлектрическая проницаемость среды,
μ – магнитная проницаемость.

$$\upsilon=\frac{c}{\sqrt{\varepsilon\cdot\mu}},$$

Скорость распространения звука в газах
где γ – отношение теплоемкостей газа при постоянном давлении и объеме,
R – молярная газовая постоянная,
T – термодинамическая температура,
M – молярная масса газа.

$$\upsilon=\sqrt{\gamma\frac{RT}{M}},$$

Вектор Пойнтинга $\vec{p} = \vec{E} \times \vec{H}$,

где $\vec{E}$ *и* $\vec{H}$ – напряженности электрического и магнитного полей электромагнитной волны.

1.4.2 ПРИМЕРЫ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ

Пример 1.

Стержень длиной 1 м движется мимо наблюдателя со скоростью 0,8 с. Какой покажется наблюдателю его длина?

Дано: $\ell_0=1$ *м*, $\upsilon=0{,}8$ *с*.

Найти: ℓ.

Решение: Зависимость длины тела от скорости в релятивистской механике выражается формулой

$$\ell = \ell_0\sqrt{1-\frac{\upsilon^2}{c^2}},$$

где ℓ_0 – длина покоящегося стержня; с–скорость света в вакууме;

υ – скорость его движения.

Подставляя в формулу (1) числовые значения, имеем

$$\ell = 1\,м\sqrt{1-\frac{(0{,}8\,c)^2}{c^2}} = 1\,м\sqrt{1-0{,}64} = 0{,}6\,м.$$

Ответ: $\ell=0{,}6$ *м*.

Пример 2.

Две частицы движутся навстречу друг другу со скоростями: 1) υ=0,5 с и u=0,75 с; 2) υ=с и u=0,75 с. Найти их относительную скорость в первом и втором случаях.

Дано: *1)* $\upsilon=0{,}5\,c$ и $u=0{,}75\,c$; *2)* $\upsilon=c$ и $u=0{,}75\,c$

Найти: $u_1'; u_2'$.

Решение: Согласно теореме сложения скоростей в теории относительности,

$$u' = \frac{\upsilon+u}{1+\dfrac{\upsilon\, u}{c^2}},$$

где υ, u – скорости соответственно первой и второй частиц;

u' – их относительная скорость;

c – скорость света в вакууме.

Для первого и второго случаев находим:

$$u_1' = \frac{0{,}5\,c + 0{,}75\,c}{1 + \dfrac{0{,}5\,c \cdot 0{,}75\,c}{c^2}} = 0{,}91\,c;$$

$$u_2' = \frac{c + 0{,}75\,c}{1 + \dfrac{0{,}75\,c^2}{c^2}} = \frac{1{,}75\,c}{1{,}75} = c.$$

Это означает, что, во–первых, ни в какой инерциальной системе отсчета скорость процессам не может превзойти скорость света, и, во–вторых, скорость распространения света в вакууме абсолютна.

Ответ: u_1'=0,91 с; u_2'=с.

Пример 3.

Протон движется со скоростью 0,7 с (с–скорость света). Найти количество движения и кинетическую энергию протона.

Дано: υ=0,7 с.

Найти: p; T.

Решение: Количество движения протона определяется по формуле

$$p = m \cdot \upsilon.$$

Так как скорость протона сравнима со скоростью света, то необходимо учесть зависимость массы от скорости, воспользовавшись релятивистским выражением для массы.

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \dfrac{\upsilon^2}{c^2}}} = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \beta^2}},$$

где m–масса движущегося протона;

m_0=1,67·10^{-27}кг – масса покоя протона;

υ – скорость движения протона;

c=3·10^8 м/с – скорость света в вакууме;

$\dfrac{\upsilon}{c} = \beta$ – скорость протона, выраженная в долях скорости света.

Подставляя уравнение второе уравнение в первое и, учитывая, что $\dfrac{\upsilon}{c} = \beta$, получаем

$$p = \frac{m_0 \cdot c \cdot \beta}{\sqrt{1-\beta^2}};$$

$$p = \frac{1{,}67 \cdot 10^{-27}\ кг \cdot 3 \cdot 10^8\ м/с \cdot 0{,}7}{\sqrt{1-0{,}7^2}} = 4{,}91 \cdot 10^{-19}\ кг \cdot м/с.$$

В релятивистской механике кинетическая энергия частицы определяется как разность между полной энергией E и энергией покоя E_0 этой частицы:

$$T = E - E_0$$

где $E = \dfrac{m_0 c^2}{\sqrt{1-\beta^2}}$, $E_0 = m_0\ c^2$.

Вычислим энергию покоя протона:

$$E_0 = 1{,}67 \cdot 10^{-27}\ кг\ (3 \cdot 10^8\ м/с)^2 = 1{,}5 \cdot 10^{-10}\ Дж.$$

Тогда $$T = m_0\ c^2 \left(\frac{1}{\sqrt{1-\beta^2}} - 1 \right);$$

$$T = 1{,}5 \cdot 10^{-19}\ Дж \left(\frac{1}{\sqrt{1-0{,}7^2}} - 1 \right) = 0{,}6 \cdot 10^{-10}\ Дж.$$

Ответ: $p = 4{,}91 \cdot 10^{-19}\ кг \cdot м/с$; $T = 0{,}6 \cdot 10^{-10}\ Дж.$

Пример 4.

В вакууме распространяется плоская электромагнитная волна. Амплитуда напряженности магнитного поля волны 0,1 А/м. Определить энергию, переносимую этой волной через поверхность площадью 1 м^2, расположенную перпендикулярно направлению распространения волны, за время t =1 с. Период волны T<<t.

Дано: *H_m=0,1 А/м; S=1 м^2; t=1 с; T<<t.; ε=1; μ=1.*

Найти: *W*.

Решение: Плотность потока энергии электромагнитной волны определяется вектором Пойнтинга

$$\vec{p} = \vec{E} \times \vec{H}$$

где $\vec{E}$ и $\vec{H}$–векторы напряженности электрического и магнитного полей. Учитывая, что векторы $\vec{E}$ и $\vec{H}$ электромагнитной волны взаимно перпендикулярны, для модуля вектора $\vec{p}$ получим

$$p = E \cdot H.$$

Так как величины E и H в каждой точке волны меняются со временем по гармоническому закону, то мгновенное значение p равно

$$p = E_m \sin \omega t \cdot H_m \sin \omega t =: E_m H_m \sin^2 \omega t$$

Энергия, переносимая через площадку S, перпендикулярную направлению распространения волны, в единицу времени,

$$\frac{dW}{dt} = \int_S \vec{p}\, d\vec{S} = P\, S = S\, E_m H_m \sin^2 \omega t.$$

Учитывая, что в электромагнитной волне

$$\frac{1}{2}\varepsilon_0\, \varepsilon\, E_m^2 = \frac{1}{2}\mu_0\, \mu\, H_m^2$$

найдем: $E_m = H_m \sqrt{\dfrac{\mu_0\, \mu}{\varepsilon_0\, \varepsilon}}.$

Тогда выражение принимает вид

$$\frac{dW}{dt} = \sqrt{\frac{\mu_0\, \mu}{\varepsilon_0\, \varepsilon}} H_m^2\, S \sin^2 \omega t.$$

Энергия, переносимая волной за время t, равна

$$W = \sqrt{\frac{\mu_0\, \mu}{\varepsilon_0\, \varepsilon}}\, H_0^2\, S \int_0^t \sin^2 \omega t\, dt = \sqrt{\frac{\mu_0\, \mu}{\varepsilon_0\, \varepsilon}}\, H_m^2\, S \left(\frac{t}{2} - \frac{\sin 2\omega t}{4\omega} \right)$$

По условию T<<t, поэтому $\left(\dfrac{t}{2} \gg \dfrac{\sin 2\omega t}{4\omega} \right)$; тогда

$$W = \frac{1}{2}\sqrt{\frac{\mu_0\, \mu}{\varepsilon_0\, \varepsilon}}\, H_m^2\, S\, t.$$

Подставляя числовые значения, получим

$$W = \frac{1}{2}\sqrt{\frac{8{,}85 \cdot 10^{-12}\ \text{Ф}/\text{м} \cdot 1}{12{,}6 \cdot 10^{-7}\ \text{Гн}/\text{м} \cdot 1}} \cdot (0{,}1\ \text{А}/\text{м})^2 \cdot 1\ \text{м}^2 \cdot 1\ \text{с} = 1{,}88\ \text{Дж}.$$

Ответ: $W = 1{,}88$ *Дж.*

Раздел 2. Оптика

Тема 2.1: Волновая оптика. Интерференция света

2.1.1 ОСНОВНЫЕ ФОРМУЛЫ

Оптическая длина пути в однородной среде

$$L = n \cdot s,$$

где s – геометрическая длина пути световой волны,

n – показатель преломления среды.

Оптическая разность хода

$$\Delta = L_2 - L_1,$$

где L_1 и L_2 – оптические пути двух световых волн

Условие интерференционного максимума

$$\Delta = \pm\, m\, \lambda_0, \quad m = 0, 1, 2, \ldots;$$

и интерференционного минимума

$$\Delta = \pm\left(2\,m - 1\right)\frac{\lambda_0}{2}, \quad m = 1, 2, \ldots,$$

где λ_0 – длина световой волны в вакууме.

Ширина интерференционных полос в опыте Юнга

$$\Delta x = \frac{\lambda_0 \cdot \ell}{d},$$

где d – расстояние между когерентными источниками света,

ℓ – расстояние от источников до экрана.

Оптическая разность хода в тонких пленках:

в проходящем свете

$$\Delta = 2\,d\,\sqrt{n^2 - \sin^2 i};$$

в отраженном свете

$$\Delta = 2\,d\,\sqrt{n^2 - \sin^2 i} - \frac{\lambda_0}{2},$$

где d–толщина пленки,

n–показатель преломления пленки,

i–угол падения света.

Радиусы светлых колец Ньютона в проходящем свете или темных в отраженном

$$r_m = \sqrt{m\,\lambda\,R}, \quad m = 1, 2, \ldots;$$

и темных колец в проходящем свете или светлых в отраженном

$$r_m = \sqrt{(2m-1)\lambda R/2}, \quad m = 1, 2, \ldots;$$

где R–радиус кривизны линзы,

λ–длина световой волны в среде.

2.1.2 ПРИМЕРЫ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ

Пример 1.

Для устранения отражения света от поверхности линзы на нее наносится тонкая пленка вещества с показателем преломления 1,25, меньшим, чем у стекла (просветление оптики). При какой наименьшей толщине пленки отражение света с длиной волны 0,72 мкм не будет наблюдаться, если угол падения лучей 60^0?

Дано: *n=1,25; λ=0,72 мкм;* $i=60^{0.}$

Найти: d_{min}.

Решение: Оптическая разность хода лучей, отраженных от нижней и верхней поверхности пленки, равна

$$\Delta = 2d\sqrt{n^2 - \sin^2 i},$$

где d – толщина пленки,

n – показатель преломления пленки,

i – угол падения лучей.

В первом выражении учтено, что отражение лучей на обеих поверхностях происходит от оптически более плотной среды, и поэтому потери полуволны в обоих случаях компенсируют друг друга. Условие интерференционного минимума имеет вид

$$\Delta = \pm\frac{(2m-1)\lambda}{2}, \text{ m=1, 2,…},$$

где λ – длина волны света.

Подставляя второе выражение в первое и ,учитывая, что выражение первое положительно, получим

$$2d\sqrt{n^2 - \sin^2 i} = (2m-1)\frac{\lambda}{2}$$

Из этого выражения найдем возможные значения толщины пленки:

$$d = \frac{(2m-1)\lambda}{4\sqrt{n^2 - \sin^2 i}}.$$

Наименьшее значение толщины пленки будет при m=1:

$$d_{\min} = \frac{\lambda}{4\sqrt{n^2 - \sin^2 i}}.$$

Подставляя числовые значения, получим

$$d_{\min} = \frac{0{,}72 \cdot 10^{-6}\ м}{4\sqrt{(1{,}25)^2 - \sin^2 60^0}} = 0{,}2 \cdot 10^{-6}\ м = 0{,}2\ мкм.$$

Ответ: $d_{\min} = 0{,}2 \cdot 10^{-6}\ м = 0{,}2\ мкм.$

Тема 2.2: Волновая оптика. Дифракция и поляризация света

2.2.1 ОСНОВНЫЕ ФОРМУЛЫ

Радиусы зон Френеля

для сферической волновой поверхности

$$r_m = \sqrt{\frac{m\,\lambda\,a\,b}{(a+b)}}, \quad m = 1, 2, ...;$$

для плоской волновой поверхности

$$r_m = \sqrt{m\,\lambda\,b}, \quad m = 1, 2, ...;$$

где a – радиус волновой поверхности,

b – кратчайшее расстояние от волновой поверхности до точки наблюдения.

Направление дифракционных максимумом от одной щели

$$\varphi_0 = 0, \ a \sin\varphi_m = \pm(2\,m+1)\frac{\lambda}{2}, \quad m = 1, 2, ...,$$

и дифракционных минимумов

$$a \sin\varphi_m = \pm\, m\,\lambda, \quad m = 1, 2, ...,$$

где a – ширина щели.

Направление главных максимумов дифракционной решетки

$$c \sin\varphi_m = \pm\, m\,\lambda, \quad m = 0, 1, 2, ...,$$

Разрешающая способность дифракционной решетки

$$R = \frac{\lambda}{\Delta\lambda} = m\,N,$$

где $\Delta\lambda$ – минимальная разность длин волн двух спектральных линий, разрешаемых решеткой,

m – порядок спектра,

N – общее число щелей решетки.

Формула Вульфа–Брэгга

$$2\,d\ \sin\theta_m = m\,\lambda,\quad m = 1, 2, \ldots,$$

где d – расстояние между атомными плоскостями кристалла,

Θ_m – угол скольжения рентгеновских лучей.

Степень поляризации

$$p = \frac{J_{\max} - J_{\min}}{J_{\max} + J_{\min}},$$

где J_{max} и J_{min} – максимальная и минимальная интенсивность света.

Закон Брюстера

$$tg\ i_0 = \frac{n_2}{n_1},$$

где i_0 – угол Брюстера,

n_1 и n_2 – показатели преломления первой и второй среды.

Закон Малюса

$$J = J_0 \cos^2 \alpha,$$

где J_0 и J – интенсивность плоско–поляризованного света, падающего и прошедшего через поляризатор,

α – угол между плоскостью поляризации и главной плоскостью поляризатора.

Угол поворота плоскости поляризации света

в кристаллах и чистых жидкостях

$$\varphi = \varphi_0\,\ell;$$

в растворах

$$\varphi = [\varphi_0]\,c\,\ell,$$

где φ_0 – постоянная вращения,

$[\varphi_0]$ – удельная постоянная вращения,

c – концентрация оптически активного вещества в растворе,

ℓ – расстояние, пройденное светом в оптически активном веществе.

Фазовая скорость света

$$\upsilon = \frac{c}{n},$$

где c – скорость света в вакууме,

n – показатель преломления среды

Дисперсия вещества $D = \frac{dn}{d\lambda}$.

Групповая скорость света $u = \frac{c}{n}\left(1 + \frac{\lambda}{n}\frac{dn}{d\lambda}\right)$.

Направление излучения Вавилова–Черенкова $\cos\Theta = \frac{c}{n\upsilon}$,
где υ–скорость заряженной частицы

2.2.2 ПРИМЕРЫ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ

Пример 1.

Постоянная дифракционной решетки 10 мкм, ее ширина 2 см. В спектре какого порядка эта решетка может разрешить дублет λ_1=486,0 нм и λ_2=486,1 нм?

Дано: *d=10 мкм; ℓ=2 см;* λ_1*=486,0 нм;* λ_2*=486,1 нм.*

Найти: *m.*

Решение: Разрешающая способность дифракционной решетки

$$R = \frac{\lambda}{\Delta\lambda} = m\,N,$$

где $\Delta\lambda$ – минимальная разность волн двух спектральных линий λ и λ+Δλ, разрешаемых решеткой;

m – порядок спектра;

N – число щелей решетки.

Поскольку постоянная решетки *d* есть расстояние между серединами соседних щелей, общее число щелей можно найти как

$$N = \frac{\ell}{d},$$

где ℓ – ширина решетки.

Из первой формулы с учетом второй находим:

$$\Delta\lambda = \frac{\lambda}{m\,N} = \frac{d\,\lambda}{m\,\ell}$$

Дуплет спектральных линий λ_1 и λ_2 будет разрешен, если

$$\Delta\lambda \le \lambda_2 - \lambda_1.$$

Подставляя все в последнее выражение и учитывая, что $\lambda=\lambda_1$, получим

$$\frac{d\,\lambda_1}{m\,\ell} \le \lambda_2 - \lambda_1.$$

Из этого выражения выражения следует, что дуплет λ_1 и λ_2 будет разрешен во всех спектрах с порядком

$$m \ge \frac{d\,\lambda_1}{\ell\,(\lambda_2 - \lambda_1)}$$

Подставляя числовые значения, получим

$$\frac{d\,\lambda_1}{\ell\,(\lambda_2 - \lambda_1)} = \frac{10\cdot 10^{-6}\ м \cdot 486{,}0\cdot 10^{-9}\ м}{2\cdot 10^{-2}\ м\,(486{,}1 - 486{,}0)\cdot 10^{-9}\ м} = 2{,}43\,.$$

Так как m – целое число, то $m \ge 3$.

Ответ: $m \ge 3$.

Пример 2.

Естественный свет падает на поверхность диэлектрика под углом полной поляризации. Степень поляризации преломленного луча составляет 0,124. Найти коэффициент пропускания света.

Дано: $p'' = 0{,}124$.

Найти: τ.

Решение: Естественный свет можно представить как наложение двух некогерентных волн, поляризованных во взаимно перпендикулярных плоскостях и имеющих одинаковую интенсивность,

$$J_{ii} = J_{\perp}$$

где II и $\perp$ обозначают колебания, параллельные и перпендикулярные плоскости падения света на поверхность диэлектрика, причем интенсивность падающего света

$$J = J_{ii} + J_{\perp}$$

При падении света под углом полной поляризации отражаются только волны, поляризованные в плоскости, перпендикулярной плоскости падения. В преломленной волне преобладают колебания, параллельные плоскости падения. Интенсивность преломленной волны можно записать как

$$J'' = J''_{ii} + J''_{\perp}.$$

Составляющие J''_{ii} и $J''_{\perp}$ интенсивности преломленной волны равны

$$J''_{ii} = J_{ii} \text{ и } J''_{\perp} = J_{\perp} - J',$$

где J' –интенсивность отраженного света.

Степень поляризации преломленного луча

$$p'' = \frac{J''_{ii} - J''_{\perp}}{J''_{ii} + J''_{\perp}} = \frac{J''_{ii} - J''_{\perp}}{J''}$$

Учитывая предыдущие равенства последнее выражение можно представить в виде

$$p'' = \frac{J'}{J''}.$$

Коэффициент пропускания света

$$\tau = \frac{J''}{J} = \frac{J''}{J' + J''}$$

или $$\tau = \frac{1}{1 + p''}$$

Подставляя числовые значения, получим

$$\tau = \frac{1}{1 + 0{,}124} = 0{,}89.$$

Ответ: $\tau = 0{,}89$.

Пример 3.

Интенсивность естественного света, прошедшего через поляризатор, уменьшилась в 2,3 раза. Во сколько раз она уменьшится, если за первым поставить второй такой же поляризатор так, чтобы угол между их главными плоскостями был равен 60^0?

Дано: $\frac{J_0}{J_1} = 2{,}3$**;** $\alpha=60^0$.

Найти: $\frac{J_0}{J_2}$**.**

Решение: Естественный свет можно представить как наложение двух некогерентных волн, поляризованных во взаимно перпендикулярных плоскостях и имеющих одинаковую интенсивность. Идеальный поляризатор пропускает колебания, параллельные его главной плоскости, и полностью задерживает колебания, перпендикулярные этой плоскости. На выходе из первого поляризатора получается плоскополяризованный свет, интенсивность которого J_1, с учетом потерь на отражение и поглощение света поляризатором, равна

$$J_1 = \frac{J_0}{2}(1 - k),$$

где J_0 – интенсивность естественного света;

k – коэффициент, учитывающий потери на отражение и поглощение.

Посте прохождения второго поляризатора интенсивность света уменьшается как за счет отражения и поглощения света поляризатором, так и из–за несовпадения плоскости поляризации света с главной плоскостью поляризатора. В соответствии с законом Малюса, учитывая потери на отражение и поглощение света, имеем

$$J_2 = J_1\,(1-k)\cos^2\alpha\,,$$

где α – угол между плоскостью поляризации света, которая параллельна главной плоскости первого поляризатора, и главной плоскостью второго поляризатора.

Найдем, во сколько раз уменьшилась интенсивность света

$$\frac{J_0}{J_2} = \frac{J_0}{J_1\,(1-k)\cos^2\alpha}$$

Из вервого равенства имеем

$$(1-k) = \frac{2\,J_1}{J_0}\,.$$

Подставляя все в последнее равенство, получим

$$\frac{J_0}{J_2} = \frac{1}{2\cos^2 60^0}(2{,}3)^2 = 10{,}6\,.$$

Ответ: $\frac{J_0}{J_2} = 10{,}6$

Пример 4.

Измерение дисперсии показателя преломления оптического стекла дало n_1=1,528 для λ_1=0,434 мкм и n_2=1,523 для λ_2=0,486 мкм. Вычислить отношение групповой скорости к фазовой для света с длиной волны 0,434 мкм.

Дано: n_1=1,528; λ_1=0,434 мкм; n_2=1,523; λ_2=0,486 мкм.

Найти: $\frac{u_1}{\upsilon_1}$.

Решение: Зависимость групповой скорости u от показателя преломления n и длины волны λ имеет вид

$$u = \frac{c}{n}\left(1 + \frac{\lambda}{n}\frac{d\,n}{d\,\lambda}\right),$$

где c – скорость света в вакууме.

Фазовая скорость υ определяется как

$$\upsilon = \frac{c}{n}\,.$$

Разделив выражение (1) на (2), получим

$$\frac{u}{\upsilon}=1+\frac{\lambda}{n}\frac{d\,n}{d\,\lambda}.$$

Для длины волны λ_1 и средней дисперсии $\left\langle\frac{d\,n}{d\,\lambda}\right\rangle=\frac{\Delta\,n}{\Delta\,\lambda}$ имеем

$$\frac{u_1}{\upsilon_1}=1+\frac{\lambda_1}{n_1}\left(\frac{n_2-n_1}{\lambda_2-\lambda_1}\right).$$

Подставляя числовые значения, получим

$$\frac{u_1}{\upsilon_1}=1+\frac{0{,}434\cdot 10^{-6}\ м\cdot(1{,}523-1{,}528)}{1{,}528\cdot(0{,}486-0{,}434)\cdot 10^{-6}\ м}=0{,}973.$$

Ответ: $\frac{u_1}{\upsilon_1}=0{,}973$.

Пример 5.

В черенковском счетчике из каменной соли релятивистские протоны излучают в конусе с раствором 82^0. Определить кинетическую энергию протонов. Показатель преломления каменной соли 1,54.

Дано: $2\,\Theta=82^0$; n=1,54.

Найти: Т.

Решение: Излучение Вавилова–Черенкова возникает, когда скорость движения υ заряженной частицы в среде больше фазовой скорости света $\frac{c}{n}$ в этой среде (c–скорость света в вакууме, n–показатель преломления среды). Излучение направлено вдоль образующих конуса, ось которого совпадает с направлением движения частицы. Угол Θ между направлением излучения и направлением движения частицы определяется формулой

$$\cos\Theta=\frac{c}{n\,\upsilon}.$$

Кинетическая энергия релятивистской частицы определяется как

$$T=E_0\left(\frac{1}{\sqrt{1-\left(\frac{\upsilon}{c}\right)^2}}-1\right),$$

где $E_0=m_0\,c^2$–энергия покоя частицы;

m_0–масса покоя.

Для протона E_0=989 МэВ. Отношение $\frac{\upsilon}{c}$ определим

$$\frac{\upsilon}{c} = \frac{1}{n\cos\Theta}.$$

Подставляя , получим

$$T = E_0\left(\frac{n\cos\Theta}{\sqrt{n^2\cos^2\Theta - 1}} - 1\right).$$

Проводя вычисления, найдем

$$T = 938\ МэВ\left(\frac{1{,}54\ cos\ 41^0}{\sqrt{(1{,}54\cos 41^0)^2 - 1}} - 1\right) = 900\ МэВ.$$

Ответ: $T = 900\ МэВ$.

Раздел 3. Квантовая физика

Тема 3.1: Квантово-оптические явления

3.1.1 ОСНОВНЫЕ ФОРМУЛЫ

Закон Стефана–Больцмана

$$R = \sigma T^4,$$

где R–энергетическая светимость черного тела,

T–термодинамическая температура тела,

σ–постоянная Стефана–Больцмана.

Закон смещения Вина

$$\lambda_{\max} = \frac{b}{T},$$

где λ_{max}–длина волна, на которую приходится максимум энергии излучения черного тела,

b–постоянная Вина.

Давление света при нормальном падании на поверхность

$$p = \frac{J}{c}(1+\rho) = w(1+\rho),$$

где J–интенсивность света,

ρ–коэффициент отражения,

w–объемная плотность энергии излучения.

Энергия фотона

$$\varepsilon = h\nu = \frac{hc}{\lambda},$$

где h–постоянная Планка

ν–частота света.

Уравнение Эйнштейна для внешнего фотоэффекта

$$\varepsilon = A + T_{\max},$$

где A–работа выхода электронов из металла,

T_{max}–максимальная кинетическая энергия фотоэлектронов

Комптоновская длина волны частицы

$$\lambda_c = \frac{h}{m_0 c} = \frac{hc}{E_0},$$

где m_0–масса покоя частицы,

E_0–энергия покоя частицы.

Изменение длины волны рентгеновского излучения при эффекте Комптона

$$\Delta\lambda = \lambda' - \lambda = \lambda_C (1 - \cos\Theta) = 2\,\lambda_C \sin^2\left(\frac{\Theta}{2}\right),$$

где λ и λ'–длина волны падающего и рассеянного излучения,

Θ–угол рассеяния.

3.1.2 ПРИМЕРЫ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ

Пример 1.

Во сколько раз увеличится мощность излучения черного тела, если максимум энергии излучения сместится от красной границы видимого спектра к его фиолетовой границе?

Дано: $\lambda_K = 0{,}76$ мкм; $\lambda_\Phi = 0{,}38$ мкм.

Найти: $\frac{N_\phi}{N_к}$**.**

Решение: Длина волны λ_{max}, на которую приходится максимум энергии излучения черного тела, согласно закону смещения Вина, равна

$$\lambda_{max} = \frac{b}{T},$$

где T – термодинамическая температура тела;

b – постоянная Вина.

Из первой формулы определяем температуру, при которой максимум энергии излучения приходится на красную $\lambda_к$ и фиолетовую $\lambda_ф$ границы видимого спектра:

$$T_к = \frac{b}{\lambda_к}; \quad T_ф = \frac{b}{\lambda_ф}$$

Мощность излучения равна

$$N = R\,S,$$

где R – энергетическая светимость тела;

S – площадь его поверхности.

В соответствии с законом Стефана–Больцмана

$$R = \delta\,T^4,$$

где σ – постоянная Стефана–Больцмана.

Для температур $T_к$ и $T_ф$ имеем

$$N_к = \delta T_к^4 S \quad и \quad N_ф = \delta T_ф^4 S$$

Из последней формулы находим

$$\frac{N_ф}{N_к} = \left(\frac{T_ф}{T_к}\right)^4,$$

или, учитывая предыдущие равенства, имеем

$$\frac{N_ф}{N_к} = \left(\frac{\lambda_к}{\lambda_ф}\right)^4,$$

Подставляя числовые значения, получим

$$\frac{N_ф}{N_к} = \left(\frac{0{,}76\ мкм}{0{,}38\ мкм}\right)^4 = 16$$

Ответ: $\frac{N_ф}{N_к} = 16$.

Пример 2.

Давление света с длиной волны 0,55 мкм нормально падающего на зеркальную поверхность равно 9 мкПа. Определить концентрацию фотонов вблизи поверхности.

Дано*:* λ=0,55 мкм; p=9 мкПа; ρ=1.

Найти: n.

Решение: Давление света при нормальном падении на поверхность с коэффициентом отражения ρ определяется по формуле

$$p = \frac{J}{c}(1+\rho) = w\,(1+\rho),$$

где J – интенсивность света;

c – скорость света в вакууме;

w – объемная плотность энергии излучения, $w = \frac{J}{c}$.

Объемная плотность энергии w равна произведению концентрации фотонов n (числа фотонов в единице объема) на энергию одного фотона

$$\varepsilon = \frac{h\,c}{\lambda},\ \text{т.е.}\ w = \frac{n\,h\,c}{\lambda},$$

где h – постоянная Планка;

λ – длина волны света.

Подставляя второе выражение в первое, получим

$$p = \frac{n\,h\,c}{\lambda}(1+\rho),$$

Откуда
$$n = \frac{\lambda\; p}{h\,c\,(1+\rho)}$$

Проводя вычисления, найдем

$$n = \frac{0{,}55\cdot 10^{-6}\,м\cdot 9\cdot 10^{-6}\,Па}{6{,}62\cdot 10^{-34}(Дж\cdot с)\cdot 3\cdot 10^{8}\,м/с\,(1+1)} = 1{,}25\cdot 10^{13}\,м^{-3}.$$

Ответ: $n = 1{,}25\cdot 10^{13}\,м^{-3}$

Пример 3.

Красная граница фотоэффекта для никеля равна 0,257 мкм. Найти длину волны света, падающего на никелевый электрод, если фототок прекращается при задерживающей разности потенциалов, равной 1,5 В.

Дано: $\lambda_к$*=0,257 мкм; U=1,5 В*.

Найти: λ.

Решение: Согласно уравнению Эйнштейна для внешнего фотоэффекта

$$\frac{h\,c}{\lambda} = A + T_{\max},$$

где h – постоянная Планка;

c – скорость света в вакууме;

λ – длина волны света;

A – работа выхода электронов из металла;

T_{max} – максимальная кинетическая энергия фотоэлектронов.

Красная граница фотоэффекта определяется из условия равенства энергии фотона $\varepsilon = \frac{h\,c}{\lambda}$ работе выхода электронов A, т. е.

$$A = \frac{h\,c}{\lambda_к}$$

Максимальная кинетическая энергия фотоэлектронов может быть определена через задерживающую разность потенциалов U.

$$T_{\max} = e\,U,$$

где e–элементарный заряд (заряд электрона).

Подставляя выражение (2) и (3) в (1), получим

$$\frac{h\,c}{\lambda} = \frac{h\,c}{\lambda_r} + e\,U\ .$$

Из уравнения (4) найдем длину волны света:

$$\lambda = \left(\frac{1}{\lambda_к} + \frac{e\,U}{h\,c} \right)^{-1}.$$

Подставляя числовые значения, получим

$$\lambda = \left(\frac{1}{0{,}257 \cdot 10^{-6}\ м} + \frac{1{,}6 \cdot 10^{-19}\ Кл \cdot 1{,}5\ В}{6{,}62 \cdot 10^{-34}\ (Дж \cdot с) \cdot 3 \cdot 10^{8}\ м/с} \right)^{-1} = 1{,}96 \cdot 10^{-7}\ м = 0{,}196\ мкм.$$

Ответ: $\lambda = 0{,}196\,мкм.$

Пример 4.

Гамма–фотон с длиной волны 1,2 пм в результате комптоновского рассеяния на свободном электроне отклонился от первоначального направления на угол 60^0. Определить кинетическую энергию и импульс электрона отдачи. До столкновения электрон покоился.

Дано: λ_1=1,2 *пм;* $\Theta=60^0$; λ_c=2,43 *пм;* E_0=0,511 *МэВ*=$0{,}818 \cdot 10^{-13}$ *Дж.*

Найти: Т.

Решение: Изменение длины волны фотона при комптоновском рассеянии на неподвижном свободном электроне равно

$$\Delta\,\lambda = \lambda_2 - \lambda_1 = \lambda_c\,(1 - \cos\Theta)\,,$$

где λ_1 и λ_2 – длины волн падающего и рассеянного фотона;

Θ – угол рассеяния фотона;

$\lambda_c = \dfrac{h}{m_0\,c} = \dfrac{h\,c}{E_0}$ – комптоновская длина волны электрона;

h – постоянная Планка;

c – скорость света в вакууме;

m_0 и E_0 – масса электрона и энергия покоя электрона.

Из уравнения (1) найдем

$$\lambda_2 = \lambda_1 + \lambda_c\,(1 - \cos\theta).$$

Выразим энергию падающего и рассеянного фотона через его длину волны:

$$\varepsilon_1 = \frac{h\,c}{\lambda_1},\ \ \varepsilon_2 = \frac{h\,c}{\lambda_2} = \frac{h\,c}{\lambda_1 + \lambda_c\,(1 - \cos\Theta)}.$$

Кинетическая энергия электрона отдачи согласно закону сохранения энергии равна

$$T = \varepsilon_1 - \varepsilon_2 .$$

Подставляя выражения , найдем

$$T = \left(\frac{h\,c}{\lambda_1}\right)\frac{\lambda_c(1-\cos\Theta)}{\lambda_1+\lambda_c(1-\cos\Theta)} = E_0\left(\frac{\lambda_c}{\lambda_1}\right)\frac{\lambda_c\;(1-\cos\Theta)}{\lambda_1+\lambda_c(1-\cos\Theta)} .$$

Проводя вычисления, получим

$$T\;=0{,}511\,\text{МэВ}\left(\frac{2{,}43\cdot10^{-12}\,м}{1{,}2\cdot10^{-12}\,м}\right)\frac{2{,}43\cdot10^{-12}\,м\;(1-\cos 60^0)}{1{,}2\cdot10^{-12}\,м+2{,}43\cdot10^{-12}\,м\;(1-60^0)} = 0{,}492\;\text{МэВ} = 0{,}787\cdot10^{-13}\;\text{Дж}$$

Зная кинетическую энергию электрона, найдем его импульс. Поскольку кинетическая энергия электрона сравнима с его энергией покоя, импульс и кинетическая энергия связаны релятивистским соотношением

$$p = \frac{1}{c}\sqrt{T(T+2\,E_0)}$$

Подставляя числовые данные, получим

$$p = \frac{1}{3\cdot10^8\,м/с}\sqrt{0{,}787\cdot10^{-13}\,\text{Дж}\;(0{,}787\cdot10^{-13}\,\text{Дж}+2\cdot0{,}818\cdot10^{-13}\;\text{Дж})} = 4{,}6\cdot10^{-22}\,кг\cdot м/с.$$

Ответ: $T = 0{,}787\cdot10^{-13}\;\text{Дж} = 0{,}492\;\text{МэВ};\;\; p = 4{,}6\cdot10^{-22}\,кг\cdot м/с.$

Контрольная работа № 2

201. Расстояние между двумя точечными зарядами Q_1=1 мкКл и Q_2=-Q_1 равно 10 см. Определить силу F, действующую на точечный заряд Q=0,1 мкКл, удаленный на r_1=6 см от первого и на r_2=8 см от второго зарядов.
202. Три одинаковых заряда Q=1 нКл каждый расположены по вершинам равностороннего треугольника. Какой отрицательный заряд Q_1 нужно поместить в центре треугольника, чтобы его притяжение уравновесило силы взаимного отталкивания зарядов? Будет ли это равновесие устойчивым?
203. Точечные заряды Q_1=20 мкКл, Q_2=-10 мкКл находятся на расстоянии d=5 см друг от друга. Определить напряженность поля в точке, удаленной на r_1=3 см от первого и r_2=4 см от второго заряда .Определить также силу F, действующую в этой точке на точечный заряд Q=1 мкКл.
204. Три одинаковых точечных заряда Q_1=Q_2=Q_3=2 нКл находятся в вершинах равностороннего треугольника со стороной a=10 см. Определить модуль и направление силы F, действующей на один из зарядов со стороны двух других.
205. На расстоянии d=20 см находятся два точечных заряда Q_1=-50 нКл и Q_2=100 нКл . Определить силу F, действующую на заряд Q_3=-10 нКл, удаленный от обоих зарядов на одинаковое расстояние, равное d.
206. В вершинах квадрата со стороной 0,1 м расположены равные одноименные заряды. Потенциал, создаваемого ими поля в центре квадрата, равен 500 В. Определить заряд.
207. В вершинах квадрата со стороной 0,1 м помещены заряды по 0,1 нКл. Определите напряженность и потенциал поля в центре квадрата, если один из зарядов отличается по знаку от остальных.
208. Электрическое поле создано двумя точечными зарядами Q_1=40 нКл и Q_2=-10 нКл, находящимися на расстоянии d=10 см друг от друга. Определить напряженность E поля в точке, удаленной от первого заряда на r_1=12 см и от второго на r_2=6 см.
209. В вершинах квадрата со стороной 0,5 м расположены заряды одинаковой величины. В случае, когда два соседних заряда положительные, а два других — отрицательные, напряженность поля в центре квадрата равна 144 В/м. Определить заряд.
210. Заряды по 1 нКл помещены в вершинах равностороннего треугольника со стороной 0,2 м. Равнодействующая сил, действующих на четвертый заряд, помещенный на середине одной из сторон треугольника, равна 0,6 мкН. Определить этот заряд, напряженность и потенциал поля в точке его расположения.

211. Сила тока в проводнике сопротивлением r=100 Ом равномерно нарастает от J_0=0 до J_{max}=10 А в течение времени t=30 с. Определить количество теплоты Q, выделившееся за это время в проводнике.

212. Сила тока в проводнике сопротивлением R=12 Ом равномерно убывает от J_0=5 А до J=0 в течение времени t=10 с. Какое количество теплоты Q выделяется в этом проводнике за указанный промежуток времени?

213. По проводнику сопротивлением R=3 Ом течет ток, сила которого возрастает. Количество теплоты Q, выделившееся в проводнике за время t=8 с, равно 200 Дж. Определить количество электричества q, протекшее за это время по проводнику. В момент времени, принятый за начальный, сила тока в проводнике равна нулю.

214. Сила тока в проводнике сопротивлением R=15 Ом равномерно возрастает от J_0=0 до некоторого максимального значения в течение времени t=5 с. За это время в проводнике выделилось количество теплоты Q=10 кДж. Найти среднюю силу тока <J> в проводнике за этот промежуток времени.

215. За время t=20 с при равномерно возраставшей силе тока от нуля до некоторого максимума в проводнике сопротивлением R=5 Ом выделилось количество теплоты Q=4 кДж. Определить скорость нарастания силы тока, если сопротивление проводника R=5 Ом.

216. Сила тока в проводнике сопротивлением R=10 Ом за время t=50 с равномерно нарастает от J_1=5 А до J_2=10 А. Определить количество теплоты Q, выделившееся за это время в проводнике.

217. В проводнике за время t=10 с при равномерном возрастании силы тока от J_1=1 А до J_2=2 А выделилось количество теплоты Q=5 кДж. Найти сопротивление проводника R.

218. За время t=10 с при равномерно возраставшей силе тока от нуля до некоторого максимума в проводнике выделилось количество теплоты Q=40 кДж. Определить среднюю силу тока <J> в проводнике, если его сопротивление R=25 Ом.

219. За время t=8 с при равномерно возраставшей силе тока в проводнике сопротивлением R=8 Ом выделилось количество теплоты Q=500 кДж. Определить заряд q , протекший в проводнике, если сила тока в момент времени t=0 равна нулю.

220. Определить количество теплоты Q, выделившееся за время t=10 с в проводнике сопротивлением R=10 Ом, если сила тока в нем, равномерно уменьшаясь, изменилась от J_1=10 А до J_2=0 А.

221. Каковы внутренние сопротивления гальванических элементов с ЭДС 1,6 В; 1,3 В; 1,1 В, если будучи соединены параллельно? При внешнем сопротивлении 1 Ом, они дают токи 0,8 А; 0,6 А; 0,2 А.

222. тОпределить силу тока в каждом элементе и напряжение на зажимах реостата (рис 1), если ε_1=12 В, R_1=1 Ом, ε_2=6 В, R_2=1,5 Ом и R=20 Ом.

223. Определить силы токов на всех участках электрической цепи (рис. 2), если ε_1=8 В, ε_2=12 В, R_1=1 Ом, R_2=1 Ом, R_3=4 Ом, R_4=2 Ом. Внутренними сопротивлениями источников тока пренебречь.

224. Два источника тока с электродвижущими силами ε_1=12 В и ε_2=8 В и внутренними сопротивлениями R_1=4 Ом и R_2=2 Ом, а также проводник сопротивлением R=20 Ом соединены, как показано на рис. 3 Определить силы тока в реостате и источниках тока.

225. Две батареи (ε_1=12 В, R_1=2 Ом, ε_2=24 В, R_2=6 Ом) и проводник сопротивлением R=16 Ом соединены, как показано на рис. 3. Определить силу тока в каждом элементе и напряжение на зажимах реостата

226. Три резистора с сопротивлениями R_1=6 Ом, R_2=3 Ом и R_3=2 Ом, а также источник тока ε_1=2,2 В соединены, как показано на рис. 4. Определить э.д.с. ε источника, который надо подключить в цепь между точками А и В так, чтобы в проводнике сопротивлением R_3 шел ток силой J_3=1 А в направлении, указанном стрелкой. Внутренними сопротивлениями источников тока пренебречь.

227. Определить разность потенциалов между точками А и В (рис. 4), если ε_1=8 В, ε_2=6 В, R_1=4 Ом, R_2=6 Ом, R_3=8 Ом. Внутренними сопротивлениями источников тока пренебречь.

228. Определить силу тока J_3 в проводнике сопротивлением R_3 (рис. 5) и напряжением U_3 на концах этого проводника, если ε_1=6 В, ε_2=8 В, R_1=4 Ом, R_2=8 Ом, R_3=6 Ом. Внутренними сопротивлениями источников тока пренебречь.

229. Определить разность потенциалов между точками А и В (рис. 4), если ε_1=10 В, ε_2=8 В, R_1=6 Ом, R_2=8 Ом, R_3=10 Ом. Внутренними сопротивлениями источников тока пренебречь.

230. Две батареи (ε_1=10 В, R_1=2 Ом, ε_2=20 В, R_2=8 Ом) и проводник сопротивлением R=18 Ом соединены, как показано на рис. 3. Определить силу тока в каждом элементе и напряжение на зажимах реостата.

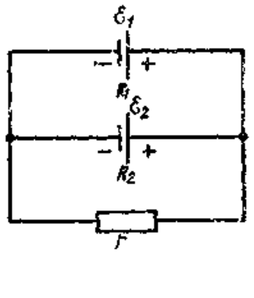


Рис 1

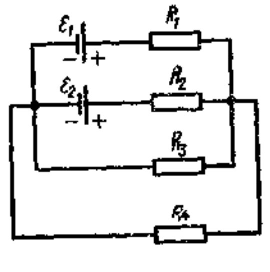


Рис 2

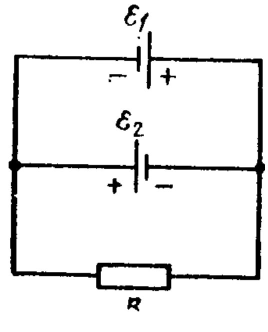
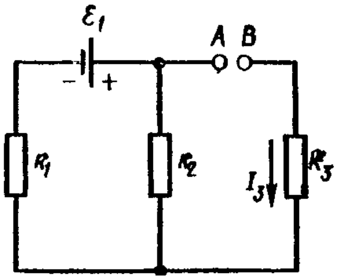


Рис 3



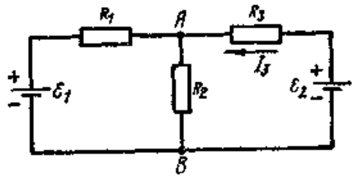


Рис 4 Рис 5

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

232. 232 Частица, несущая один элементарный заряд, влетела в однородное магнитное поле с индукцией B=0,2 Тл под углом α=30° к направлению линий индукции. Определить силу Лоренца $F_Л$, если скорость частицы v=10,5 м/с.

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

234. 234. Заряженная частица с кинетической энергией T=2 кэВ движется в однородном магнитном поле по окружности радиусом R=4 мм. Определить силу Лоренца $F_Л$, действующую на частицу со стороны поля.

235. 235. Электрон движется по окружности в однородном магнитном поле с напряженностью $H=5 \cdot 10^3$ А/м. Определить частоту обращения n электрона.

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

237. Заряженная частица с кинетической энергией T=2 кэВ движется в однородном магнитном поле по окружности радиусом R=4 мм. Определить силу Лоренца $F_Л$, действующую на частицу со стороны поля.

238. Протон влетел в однородное магнитное поле под углом α=60° к направлению линий поля и движется по спирали, радиус которой R=2,5 см. Индукция магнитного поля B=0,05 Тл. Найти кинетическую энергию T протона.

239. Электрон движется в однородном магнитном поле с индукцией B=10 мТл по винтовой плинии, радиус которой R=1,5 см и шаг h=10 см. Определить период T обращения электрона и его скорость υ.

240. В однородном магнитном поле с индукцией B=2 Тл движется α-частица. Траектория ее движения представляет собой винтовую линию с радиусом R=1 см и шагом h=6 см. Определить кинетическую энергию Т протона.
241. Уравнение изменения со временем разности потенциалов на обкладках конденсатора в колебательном контуре имеет вид $u = 20\sin 10^3\pi t$,В. Емкость конденсатора С=0,3мкФ. Найдите период колебаний и индуктивность контура.
242. Катушка индуктивности L=1,2 мГн и воздушный конденсатор, состоящий из двух круглых ластин диаметром 15см каждая, соединены параллельно. Расстояние между пластинами d=0,8см. Определите период колебаний.
243. Конденсатор электроемкостью С=400 пФ соединен параллельно с катушкой длиной 50 см и площадью сечения S, равной 4,6 $см^2$. Катушка содержит 850 витков. Сердечник немагнитный. Найдите период колебаний.
244. Колебательный контур, состоящий из воздушного конденсатора с двумя пластинами площадью S=80 $см^2$ каждая и катушки с индуктивностью 1,2 мкГн, резонирует на волну длиной λ=25м. Определите расстояние между пластинами конденсатора.
245. Уравнение изменения со временем тока в колебательном контуре имеет вид $i = 0{,}03\sin 150\pi t$, А.Емкость контура равна 6мкФ. Найдите частоту ν колебаний и индуктивность L контура.
246. Уравнение изменения со временем напряжения на обкладках конденсатора в колебательном контуре имеет вид $u = 14\cos 10^2\pi t$,В. Индуктивность катушки равна 4мГн. Найдите частоту ν колебаний и емкость контура.
247. Уравнение изменения со временем тока в колебательном контуре имеет вид $i = -0{,}05\cos 500\pi t$, А.Емкость контура равна 5мкФ. Найдите период колебаний и индуктивность L контура.
248. Максимальная сила тока в колебательном контуре 0,3 А, а максимальное напряжение на обкладках конденсатора 260 В. Найдите циклическую частоту колебаний, если энергия контура 0,5 мДж.
249. Конденсатору емкостью 200 мФ сообщается заряд 7 мкКл, после чего он замыкается на катушку с индуктивностью 1,4 мГн. Чему равна максимальная сила тока в катушке.
250. В колебательном контуре максимальная сила тока 0,1 А, а максимальное напряжение на обкладках конденсатора 36 В. Найдите энергию колебательного контура. Если период колебаний 14,4мкс.
251. В опыте Юнга щели освещаются монохроматическим светом с длиной волны λ=400 нм. Расстояние между щелями равно 1,3мм, а расстояние от щели до экрана 1,4м. Определите: 1)положение второй темной полосы; 2) положение четвертой светлой полосы.

252. Если в опыте Юнга на пути одного из интерферирующих лучей поместить перпендикулярно этому лучу тонкую стеклянную пластинку ($n=1,3$), то центральная светлая полоса смещается в положение, первоначально занимаемое четвертой светлой полосой. Длина волны $\lambda=0,6$мкм.Определите толщину пластинки.

253. На экране наблюдается интерференционная картина в результате наложения лучей от двух когерентных источников ($\lambda=450$нм). На пути одного из лучей перпендикулярно ему поместили стеклянную пластинку ($n=1,45$) толщиной 7мкм. Определите, на сколько полос сместится при этом интерференционная картина.

254. На плоскопараллельную прозрачную пластинку с показателем преломления $n=1,6$ под углом 45^{o} падает параллельный пучок белого света. Определите. При какой наименьшей толщине пленки зеркально отраженный свет наиболее сильно окрасится в желтый цвет.

255. Плосковыпуклая линза радиусом кривизны 6м выпуклой стороной лежит на стеклянной пластинке. Определите длину волны падающего монохроматического света. Если радиус третьего светлого кольца в отраженном свете равен 2,4мм.

256. На стеклянный клин($n=1,6$) нормально к его грани падает монохроматический свет с длиной волны $\lambda=400$нм. Определите преломляющий угол клина, если в отраженном свете на 1 см укладывается 8 темных интерференционных полос.

257. Когерентные лучи, длины волн которых в вакууме $\lambda=$ 700 нм, приходят в некоторую точку с геометрической разностью хода 1,1мкм. Определите. Максимум или минимум наблюдается в этой точке, если лучи проходят в воздухе(показатель преломления $n=1$), алмазе($n=2,42$), воде($n=1,33$).

258. На стеклянный клин($n=1,6$) нормально падает монохроматический свет с длиной волны 580нм. Определите угол между поверхностями клина если расстояние между соседними интерференционными минимумами в отраженном свете равно 1,4мм.

259. Установка для наблюдения колец Ньютона освещается монохроматическим светом, падающим нормально. При заполнении пространства между линзой и стеклянной пластинкой прозрачной жидкостью радиусы темных колец в отраженном свете уменьшились в 1,18 раза. Определите показатель преломления жидкости.

260. Плоская электромагнитная волна падает нормально на границу раздела воздух-вода, воздух-глицерин. Определите длины волн в воде и глицерине, если длина волны в воздухе равна 720 нм, показатель преломления в воде - 1,33,показатель преломления в глицерине - 1,47.

261. На экран с круглым отверстием радиусом 1,2 мм нормально падает параллельный пучок монохроматического света с длиной волны 0,7мкм. Точка наблюдения находится на оси отверстия на расстоянии 1,8 м от него. Определите: 1) число зон Френеля, укладывающихся в отверстии; 2) темное или светлое кольцо наблюдается в центре дифракционной картины, если в месте наблюдения помещен экран.

262. При освещении дифракционной решетки белым светом спектры третьего и четвертого порядка частично перекрывают друг друга. На какую длину волны в спектре третьего порядка накладывается фиолетовая граница (λ_4 =0,45 мкм) спектра четвертого порядка?

263. Определите длину волны монохроматического света, падающего нормально на дифракционную решетку, имеющую 500 штрихов на 1 мм, если угол между направлениями на максимумы первого и второго порядка составляет 9^o.

264. На дифракционную решетку, содержащую n=1000 штрихов на 1 мм, падает нормально монохроматический свет (λ=0,45 мкм). Найдите общее число N дифракционных максимумов, которое дает эта решетка.

265. На дифракционную решетку нормально падает монохроматический свет с длиной волны λ=0,7 мкм. На экран, находящийся от решетки на расстоянии 1,6 м. с помощью линзы, расположенной вблизи решетки, проецируется дифракционная картина, причем первый дифракционный максимум наблюдается на расстоянии 5см от центрального. Определите число штрихов на 1мм дифракционной решетки.

266. На дифракционную решетку падает нормально монохроматический свет с длиной волны λ=440 нм. Определите наибольший порядок спектра, полученный с помощью этой решетки, если ее постоянная равна 1мкм.

267. На дифракционную решетку, содержащую 600 штрихов на 1 мм, падает в направлении нормали к ее поверхности белый свет. Спектр проектируется помещенной вблизи решетки линзой на экран. Определите длину спектра первого порядка на экране, если расстояние от линзы до экрана 2,5м. Границы видимого спектра $\lambda_{кр}$=800 нм, $\lambda_ф$=420 нм.

268. Сколько штрихов на каждый миллиметр содержит дифракционная решетка, если при наблюдении в монохроматическом свете (λ=0,4мкм) максимум третьего порядка отклонен на угол12^o.

269. Радиус третьей зоны Френеля для плоского волнового фронта равен 2,6мм. Определите радиус двадцатой зоны.

270. На дифракционную решетку падает нормально параллельный пучок белого света. Спектры четвертого и пятого порядка частично накладываются друг на

друга. На какую длину волны в спектре пятого порядка накладывается граница (λ=750нм) спектра четвертого порядка.

271. Температура внутренней поверхности муфельной печи при открытом отверстии площадью 25 см^2 равна 1200 К. Принимая, что отверстие излучает как черное тело, определите, какая часть мощности рассеивается стенками, если потребляемая печью мощность составляет 1,3 кВт.

272. Принимая Солнце за черное тело и учитывая, что его максимальной спектральной плотности энергетической светимости соответствует длина волны 420 нм, определите: 1) температуру поверхности Солнца; 2) энергию, излучаемую Солнцем в виде в виде электромагнитных волн за 6 минут; массу, теряемую Солнцем за это время за счет излучения.

273. Металлическая поверхность площадью 20 см^2. Нагретая до температуры 2,2 кК, излучает в одну минуту100 кДж. Определите: 1) энергию, излучаемую этой поверхностью, считая ее черной; 2) отношение энергетических светимостей этой поверхности и черного тела при данной температуре.

274. В результате нагревания черного тела длина волны, соответствующая максимуму спектральной плотности энергетической светимости, сместилась с λ_1=3,2мкм до λ_2=1,4 мкм. Определите, во сколько раз увеличилась: 1) энергетическая светимость тела; 2) максимальная спектральная плотность энергетической светимости тела.

275. Из смотрового окошечка печи излучается поток Ф=6 кДж/мин. Определите температуру печи, если площадь окошечка 10см^2.

276. Температура внутренней поверхности муфельной печи при открытом отверстии диаметром 5 см равна 1000 К. Принимая, что отверстие излучает как черное тело, определите, какая часть мощности рассеивается стенками, если потребляемая печью мощность составляет 1,1 кВт.

277. Считая, что тепловые потери обусловлены только излучением, определите, какую мощность необходимо подводить к медному шарику диаметром 2,5см, чтобы при температуре окружающей среды t_o=-20^{o}C поддерживать его температуру равной 25^{o}C. Примите поглощательную способность меди равной 0,6.

278. Максимум спектральной плотности потока энергии излучения яркой звезды Арктур приходится на длину волны 450 нм. Принимая, что звезда излучает как абсолютно черное тело, определите температуру поверхности звезды и энергию, излучаемую с площади 1,6 км^2 за 2с.

279. Определите температуру тела, при которой оно при температуре окружающей среды 25^{o}C излучало энергии в 15 раз больше, чем поглощало.

280. Определите какая длина волны соответствует максимальной спектральной плотности энергетической светимости, равной1,6x10^{10} Вт/м^3.

281. Задерживающее напряжение для платиновой пластинки составляет 4В. При тех же условиях для другой пластинки задерживающее напряжение равно 5,6 В. Определите работу выхода электронов для этой пластинки, если работа выхода электронов из платины равна 6,3 эВ.
282. Красная граница фотоэффекта для цинка $\lambda_{кр}$=310нм. Определите максимальную кинетическую энергию фотоэлектронов и максимальную скорость фотоэлектронов, если на цинк падает свет с длиной волны λ=250 нм.
283. «Красная граница» для цезия равна 660 нм. Найдите : 1) работу выхода электронов из цезия; 2) максимальную скорость электронов, вырываемых из цезия излучением с длиной волны 400нм.
284. На металлическую пластину направлен пучок ультрафиолетового излучения (λ=0,32 мкм). Фототок прекращается при минимальной задерживающей разности потенциалов $U_з$=0,8 В. Определите работу выхода электронов из металла.
285. На поверхность металла падает монохроматический свет с длиной волны λ=0,15 мкм. Красная граница фотоэффекта $\lambda_{кр}$=0,35 мкм. Какая доля энергии фотона расходуется на сообщение электрону кинетической энергии.
286. При освещении некоторого металла излучением с длиной волны λ_1=245 нм задерживающий потенциал равен 1,4 В, при длине волны λ_2=225 нм задерживающий потенциал становится равным 2,1 В. Считая заряд электрона и скорость света известными, определите постоянную планка и работу выхода электрона из данного металла.
287. Какова должна быть длина волны γ-излучения, падающего на серебряную пластину, если максимальная скорость фотоэлектронов равна 2 Мм/с. Работа выхода электронов из серебра равна 4,7 эВ.
288. На фотоэлемент с катодом из натрия падает свет с длиной волны λ=230 нм. Найдите наименьшее значение задерживающей разности потенциалов, которую нужно приложить к фотоэлементу, чтобы прекратить фототок. Работа выхода электронов из натрия равна2,5 эВ.
289. Плоский серебряный электрод освещается монохроматическим излучением с длиной волны 150нм. Определите на какое максимальное расстояние от поверхности электрода может удалиться фотоэлектрон, если вне электрода имеется задерживающее электрическое поле напряженностью Е=13 В/см. Красная граница фотоэффекта для серебра $\lambda_{кр}$=264 нм.
290. Фотоэффект у некоторого металла начинается при частоте падающего света $\nu_{кр}=5{,}5\text{x}10^{14}$ Гц. Определите частоту света . при которой освобождаемые им с поверхности данного металла электроны полностью задерживаются разностью потенциалов 2,5 В.Найдите работу выхода для данного металла.

291. Определите длину волны де Бройля для нейтрона, движущегося со средней квадратичной скоростью при Т=320 К.

292. Определите. Какую ускоряющую разность потенциалов должен пройти протон, чтобы длина волны де Бройля для него была равна 20нм.

293. Кинетическая энергия электрона равна 1,5 кэВ. Определите длину волны де Бройля.

294. Определите, при каком числовом значении скорости длина волны де Бройля для электрона равна его комптоновской длине волны.

295. Фотон с энергией E_1, равной энергии покоя электрона (m_oc^2),рассеялся на свободном электроне на угол 60^o. определите энергию E_2, рассеянного фотона и кинетическую энергию электрона отдачи(в единицах m_oc^2).

296. Какая доля энергии фотона приходится на электрон отдачи в эффекте Комптона, если фотон претерпел рассеяние на угол120^o?Энергия фотона до рассеяния равна 0,2МэВ.

297. Фотон с длиной волны 19 пм рассеялся на свободном электроне. Длина волны рассеянного фотона равна 20 пм. Определите угол рассеяния.

298. Рентгеновское излучение с длиной волны λ=5 нм рассеивается электронами, которые можно считать практически свободными. Определите максимальную длину волны рентгеновского излучения в рассеянном пучке.

299. Фотон при эффекте Комптона на свободном электроне был рассеян на угол $\Theta=\pi/2$. Определите импульс р (в МэВ/с),приобретенный электроном, если энергия фотона до рассеяния была 1,1МэВ.

300. Определить максимальное изменение длины волны при комптоновском рассеянии света λ=12 пм на свободных электронах.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1 Трофимова Т.И. Курс физики: учебное пособие. – Изд. 4-е, испр. - М.: «Высшая школа», 2007. – 542 с.

2 Дмитриева В.Ф. Основы физики: учебное пособие. – М.: Высшая школа, 2001.

3 Чертов А.Г., Воробьев А.А. Задачник по физике: учебное пособие. - М. Высшая школа, 2007. – 640 с.

4 Трофимова Т.И. Сборник задач по физике с решениями: учебное пособие. – Изд. 4-е, испр. - М.: Высшая школа, 2001. – 542 с.

5 Волькенштейн Э. Сборник задач по физике: учебное пособие. - М. Высшая школа, 1975.

ОЖЕГОВА СВЕТЛАНА МИХАЙЛОВНА

ЭЛЕКТРОМАГНЕТИЗМ. ОПТИКА. КВАНТОВАЯ ФИЗИКА

Методические указания для выполнения контрольной работы № 2 по физике студентами заочной формы обучения направлений подготовки
09.03.03 Прикладная информатика,
13.03.02 Электроэнергетика и электротехника,
15.03.02 Технологические машины и оборудование,
13.03.01 Теплоэнергетика и теплотехника,
22.03.02 Металлургия,
18.03.01 Химическая технология

Подписано в печать 28.12.2021 г.		
Формат 60x90 1/16 Рег. № 232	Печать цифровая Тираж 10 экз.	Уч.-изд.л. 3,75

ФГАОУ ВО
«Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»
Новотроицкий филиал
462 359, Оренбургская область, г. Новотроицк, ул. Фрунзе, 8.
E-mail: nf@misis.ru
Контактный тел. 8 (3537) 67-97-29