

Магнетизм и оптика

Методические указания и контрольные задания для студентов заочного обучения

Дарибазарон Э.Ч., Чагдурова Е.С., Ваганова Т.Г.

Методические указания и контрольные задания студентов заочного обучения инженерно-технических и технологических специальностей. Содержит разделы программ "Магнетизм", "Оптика" примеры решения типовых задач и варианты контрольных заданий.

Ключевые слова: Магнитное поле, закон Био-Савара-Лапласа, закон Ампера, магнитная индукция, магнитный поток, потокосцепление, индуктивность, энергия магнитного поля, сила Лоренца. Интерференция, дифракция, поляризация, дисперсия, кольца Ньютона, условия максимума, условия минимума, зона Френеля, дифракционная решетка.

Редактор Т.Ю.Артюнина

Подготовлено в печать 1.12. 2004 г. Формат 60×80 1/16
Усл.п.л. 3,3; уч.-изд.л. 3,0; Тираж 150 экз. Заказ 173.

РИО ВСГТУ, Улан-Удэ, Ключевская, 40а
Отпечатано на ротапринте ВСГТУ, Улан-Удэ,
Ключевская, 42.

Министерство образования Российской Федерации

Восточно-Сибирский государственный
технологический университет

ФИЗИКА
(Магнетизм и оптика)

Методические указания и контрольные задания
для студентов заочного обучения

Составитель: Дарибазарон Э.Ч.
Чагдурова Е.С.
Ваганова Т.Г.

Улан-Удэ, 2004

ЭЛЕКТРОМАГНЕТИЗМ

Основные формулы

Связь магнитной индукции B с напряженностью H магнитного поля:

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

где μ - магнитная проницаемость изотропной среды; μ_0 - магнитная постоянная.

В вакууме $\mu = 1$, и тогда магнитная индукция в вакууме

$$B = \mu_0 H.$$

Закон Био-Савара-Лапласа:

$$d\vec{B} = \frac{\mu\mu_0}{4\pi} [d\vec{l} \vec{r}] \frac{I}{r^3} \quad \text{или} \quad dB = \frac{\mu\mu_0}{4\pi} \frac{I \sin \alpha}{r^2} dl,$$

где $d\vec{B}$ - магнитная индукция поля, создаваемого элементом проводника длиной dl с током I ; \vec{r} - радиус-вектор, направленный от элемента проводника к точке, в которой определяется магнитная индукция; α - угол между радиусом-вектором и направлением тока в элементе проводника.

Магнитная индукция в центре кругового тока:

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

где R - радиус кругового витка.

Магнитная индукция на оси кругового тока:

$$B = \frac{\mu\mu_0}{4\pi} \frac{2\pi R^2 I}{(R^2 + h^2)^{3/2}},$$

где h - расстояние от центра витка до точки, в которой определяется магнитная индукция.

Магнитная индукция поля прямого тока

$$B = \frac{\mu\mu_0 I}{(2\pi r_0)},$$

где r_0 - расстояние от оси проводника до точки, в которой определяется магнитная индукция.

Магнитная индукция поля, создаваемого отрезком провода с током (рис.1,а):

$$B = \frac{\mu\mu_0 I}{4\pi r_0} (\cos \alpha_1 - \cos \alpha_2).$$

Обозначения ясны из рисунка. Направление вектора магнитной индукции \vec{B} обозначено точкой - это значит, что \vec{B} направлен перпендикулярно плоскости чертежа к нам.

При симметричном расположении концов провода относительно точки, в которой определяется магнитная индукция (рис.1,б):

$$-\cos \alpha_2 = \cos \alpha_1 = \cos \alpha,$$

тогда

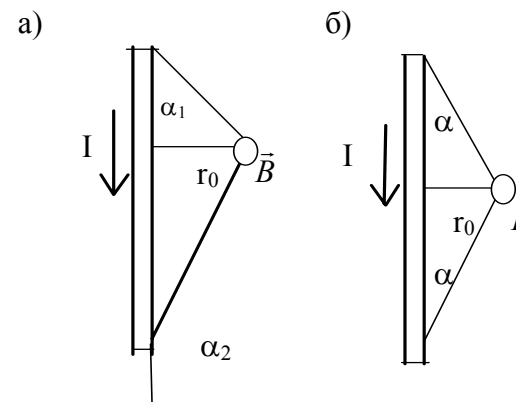


Рис.1

$$B = \frac{\mu\mu_0}{2\pi} \frac{I}{r_0} \cos \alpha.$$

Магнитная индукция поля соленооида

$$B = \mu\mu_0 n I,$$

где n - отношение числа витков соленооида к его длине.

Сила, действующая на проводник с током в магнитном поле (закон Ампера):

$$F = I B l \sin \alpha,$$

где l - длина проводника; α - угол между направлением тока в проводнике и вектором магнитной индукции \vec{B} . Это выражение справедливо для однородного магнитного поля и прямого отрезка проводника. Если поле неоднородно и проводник не является прямым, то закон Ампера можно применить к каждому элементу проводника в отдельности:

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

Магнитный момент плоского контура с током:

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

где \vec{n} - единичный вектор нормали (положительный) к плоскости контура; I - сила тока, протекающего по контуру; S - площадь контура.

Механический (вращательный) момент, действующий на контур с током, помещенный в однородное магнитное поле:

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

где α - угол между векторами \vec{p}_m и \vec{B} .

Потенциальная энергия (механическая) контура с током в магнитном поле:

$$\Pi_{\text{мех}} = -p_m B, \text{ или } \Pi_{\text{мех}} = -p_m B \cos \alpha.$$

Отношение магнитного момента \vec{p}_m к механическому \vec{L}_v (моменту импульса) заряженной частицы, движущейся по круговой орбите:

$$\frac{p_m}{L} = \frac{1}{2} \frac{Q}{m}$$

где Q - заряд частицы; m - масса частицы.

Сила Лоренца:

$$\vec{F} = Q[\vec{v} \cdot \vec{B}], \text{ или } F = QvB \sin \alpha,$$

где \vec{v} - скорость заряженной частицы; α - угол между векторами \vec{v} и \vec{B} .

Магнитный поток:

а) в случае однородного магнитного поля и плоской поверхности

$$\Phi = BS \cos \alpha \text{ или } \Phi = B_n S,$$

где S - площадь контура; α - угол между нормалью к плоскости контура и вектором магнитной индукции;

б) в случае неоднородного поля и произвольной поверхности

$$\Phi = \int_S B_n dS$$

(интегрирование ведется по всей поверхности).

Потокосцепление (полный поток):

$$\psi = N\Phi.$$

Эта формула верна для соленоида и тороида с равномерной намоткой плотно прилегающих друг к другу N витков.

Работа по перемещению контура в магнитном поле:

$$A = I\Delta\Phi.$$

Э.д.с. индукции:

$$E_i = -\frac{d\Phi}{dt}.$$

Разность потенциалов на концах проводника, движущегося со скоростью \vec{v} в магнитном поле:

$$U = Blv \sin \alpha.$$

где l - длина проводника; α - угол между векторами \vec{v} и \vec{B} .

Заряд, протекающий по замкнутому контуру при изменении магнитного потока, пронизывающего этот контур:

$$Q = \frac{\Delta\Phi}{R} \text{ или } Q = \frac{N\Delta\Phi}{R} = \frac{\Delta\psi}{R},$$

где R - сопротивление контура.

Индуктивность контура:

$$L = \frac{\Phi}{I}.$$

Э.д.с. самоиндукции:

$$E_S = -L \frac{dI}{dt}.$$

Индуктивность соленоида:

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

где n - отношение числа витков соленоида к его длине; V - объем соленоида.

Мгновенное значение силы тока в цепи, обладающей сопротивлением R и индуктивностью L :

$$\text{а) } I = \frac{E}{R} (1 - e^{-Rt/L}) \text{ (при замыкании цепи), где } E \text{ -}$$

э.д.с. источника тока; t - время, прошедшее после замыкания цепи;

$$\text{б) } I = I_0 e^{-Rt/L} \text{ (при размыкании цепи), где } I_0 \text{ - сила}$$

тока в цепи при $t = 0$; t - время, прошедшее с момента размыкания цепи.

Энергия магнитного поля:

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

Объемная плотность энергии магнитного поля (отношение энергии магнитного поля соленоида к его объему):

$$w = \frac{BH}{2}, \text{ или } w = \frac{B^2}{2\mu\mu_0}, \text{ или } w = \frac{\mu\mu_0 H^2}{2},$$

где B - магнитная индукция; H - напряженность магнитного поля.

ОПТИКА

Основные формулы

Оптическая разность хода: $\Delta = s_2 n_2 - s_1 n_1$

Условие интерференционного максимума:

$$\Delta = \pm m \lambda \quad (m=0,1,2,\dots)$$

Условие интерференционного минимума:

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

Ширина интерференционных полос в опыте Юнга: $\Delta x = \frac{\lambda l}{d}$

Оптическая разность хода в тонких пленках в проходящем

и отраженном свете: $\Delta = 2d \sqrt{n^2 - \sin^2 i}$

$$\Delta = 2d \sqrt{n^2 - \sin^2 i} + \frac{\lambda}{2}$$

Радиусы светлых и темных колец Ньютона в проходящем свете (или темных и светлых - в отраженном):

$$r_m = \sqrt{m\lambda R} \quad (m=1,2,\dots), \quad r_m = \sqrt{(2m-1) \frac{R\lambda}{2}} \quad (m=1,2,\dots)$$

Радиусы зон Френеля для сферического и плоского волнового фронта:

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

$$r_m = \sqrt{m\lambda b} \quad (m=1,2,\dots)$$

Направления дифракционных максимумов и минимумов

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

$$a \sin \varphi_m = \pm m \lambda \quad (m=1,2,\dots)$$

Направления главных максимумов дифракционной решетки:

ки: $d \sin \varphi_m = \pm m\lambda$ ($m=0,1,2,\dots$)

Разрешающая способность дифракционной решетки:

$$R = \frac{\lambda}{\Delta\lambda} = mN$$

Формула Вульфа-Брэггов: $2d \sin \theta_m = m\lambda$ ($m=1,2,\dots$)

Степень поляризации: $P = \frac{(I_{\max} - I_{\min})}{(I_{\max} + I_{\min})}$

Закон Брюстера: $\operatorname{tg} i_0 = \frac{n_2}{n_1}$

Закон Малюса: $I = I_0 \cos^2 \alpha$

Угол поворота плоскости и поляризации света в кристаллах и растворах: $\varphi = [\alpha] \cdot c \cdot \ell$ $\varphi = [\alpha] \cdot \ell$

Фазовая скорость света: $v = \frac{c}{n}$

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

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

Примеры решения задач. Электромагнетизм.

Пример 1. Два параллельных бесконечно длинных провода D и C, по которым текут в одном направлении электрические токи силой $I=60\text{A}$, расположены на расстоянии $d=10\text{ см}$ друг от друга. Определить магнитную индукцию B поля, создаваемого проводниками с током в точке A (рис.1), отстоящей от оси одного проводника на расстоянии $r_1=5\text{ см}$, от другого - $r_2=12\text{ см}$.

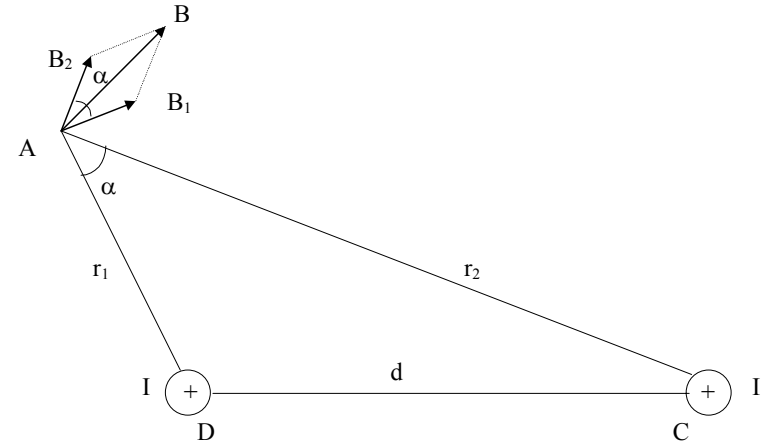


Рис.1

Решение: Для нахождения магнитной индукции B в точке A воспользуемся принципом суперпозиции магнитных полей. Для этого определим направления магнитных индукций B_1 и B_2 полей, создаваемых каждым проводником с током в отдельности, и сложим их векторно:

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

Модуль вектора \vec{B} может быть найден по теореме косинусов:

$$B = \sqrt{B_1^2 + B_2^2 + 2B_1B_2 \cos \alpha}, \quad (1)$$

где α - угол между векторами \vec{B}_1 и \vec{B}_2 .

Магнитные индукции \vec{B}_1 и \vec{B}_2 выражаются соответ-

ственно через силу тока I и расстояния r_1 и r_2 от проводов до точки А:

$$B_1 = \frac{\mu_0 I}{(2\pi r_1)} ; B_2 = \frac{\mu_0 I}{(2\pi r_2)} .$$

Подставляя выражения B_1 и B_2 в формулу (1) и вынося $\frac{\mu_0 I}{(2\pi)}$ за знак корня, получаем

$$B = \frac{\mu_0 I}{2\pi} \sqrt{\frac{1}{r_1^2} + \frac{1}{r_2^2} + \frac{2}{r_1 r_2} \cos \alpha} . \quad (2)$$

Вычислим $\cos \alpha$. Заметив, что $\alpha = \angle DCA$ (как углы соответственно перпендикулярными сторонами), по теореме косинусов запишем

$$d^2 = r_1^2 + r_2^2 - 2r_1 r_2 \cos \alpha ,$$

где d - расстояние между проводами. Отсюда

$$\cos \alpha = \frac{r_1^2 + r_2^2 - d^2}{2r_1 r_2} ; \cos \alpha = \frac{5^2 + 12^2 - 10^2}{2 \cdot 5 \cdot 12} .$$

Подставим в формулу (2) числовые значения физических величин и произведем вычисления:

$$B = \frac{4 \cdot 3,14 \cdot 10^{-7} \cdot 60}{2 \cdot 3,14} \sqrt{\frac{1}{(0,05)^2} + \frac{1}{(0,12)^2} + \frac{2}{0,05 \cdot 0,12} \cdot \frac{23}{40}} T = 3,08 \cdot 10^{-4} T .$$

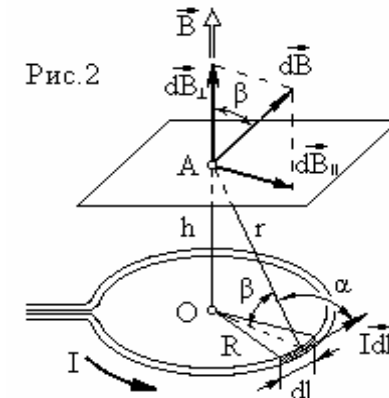
Пример 2. По тонкому проводящему кольцу радиусом $R=10$ см течет ток $I=80$ А. Найти магнитную индукцию \vec{B} в точке А, равноудаленной от всех точек кольца на расстоянии $r=20$ см.

Решение: Для решения задачи воспользуемся законом Био-Савара-Лапласа:

$$d\vec{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{I[d\vec{l} \cdot \vec{r}]}{r^2} ,$$

где $d\vec{B}$ - магнитная индукция поля, создаваемого элементом тока $I d\vec{l}$ в точке, определяемой радиусом-вектором \vec{r} .

Выделим на кольце элемент $d\vec{l}$ и от него в точку А проведем радиус-вектор \vec{r} (рис.2). Вектор \vec{B} направим в соответствии с правилом буравчика.



Согласно принципу суперпозиции магнитных полей, магнитная индукция \vec{B} в точке А определяется интегрированием:

$$\vec{B} = \int_l d\vec{B} ,$$

где интегрирование ведется по всем элементам dl кольца.

Разложим вектор $d\vec{B}$ на две составляющие: $d\vec{B}_\perp$, перпендикулярную плоскости кольца, и $d\vec{B}_\parallel$, параллельную плоскости кольца, т.е.

$$d\vec{B} = d\vec{B}_\perp + d\vec{B}_\parallel$$

Тогда

$$\vec{B} = \int_l d\vec{B}_\perp + \int_l d\vec{B}_\parallel$$

Заметив, что $\int_l d\vec{B}_{||} = 0$ из соображений симметрии и что

векторы $d\vec{B}_{\perp}$ от различных элементов $d\vec{l}$ сонаправлены, заменим векторное суммирование (интегрирование) скалярным:

$$B = \int_l dB_{\perp},$$

где $dB_{\perp} = dB \cos \beta$ и $dB = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{Idl}{r^2}$ (поскольку $d\vec{l}$ перпендикулярен \vec{r} и, следовательно, $\sin \alpha = 1$). Таким образом,

$$B = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{I}{r^2} \cos \beta \int_0^{2\pi R} dl = \frac{\mu_0 I \cos \beta \cdot 2\pi R}{4\pi r^2}.$$

После сокращения на 2π и замены $\cos \beta$ на R/r (рис.2) получим

$$B = \frac{\mu_0 IR^2}{2r^3} \text{ или } B = \frac{\mu_0 JR^2}{2(R^2 + h^2)^{3/2}},$$

где h – расстояние от плоскости кольца до точки А.

Проверим, дает ли правая часть равенства единицу магнитной индукции (Тл):

$$\begin{aligned} \frac{[\mu_0][I][R^2]}{[r^3]} &= \frac{1\text{Гн} \cdot 1\text{А} \cdot 1\text{м}^2}{\text{м} \cdot 1\text{м}^3} = \frac{1\text{Гн} \cdot 1\text{А}^2}{1\text{А} \cdot 1\text{м}^2} = \frac{1\text{Дж}}{1\text{А} \cdot 1\text{м}^2} = \\ &= \frac{1\text{Н} \cdot 1\text{м}}{1\text{А} \cdot 1\text{м}^2} = 1\text{Тл}. \end{aligned}$$

Здесь мы воспользовались определяющей формулой для магнитной индукции:

$$B = \frac{M}{P_m}.$$

Тогда

$$1\text{Тл} = \frac{1\text{Н} \cdot 1\text{м}}{1\text{А} \cdot 1\text{м}^2}.$$

Выразим все величины в единицах СИ и произведем вычисления:

$$B = \frac{4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 80 \cdot (0,1)^2}{2 \cdot (0,2)^3} \text{Тл} = 6,28 \cdot 10^{-5} \text{Тл}, \text{ или } B = 62,8 \text{ мкТл}.$$

Вектор \vec{B} направлен по оси кольца (пунктирная стрелка на рис) в соответствии с правилом буравчика.

Пример 3. Длинный провод с током $I=50$ А изогнут под углом $\alpha=2\pi/3$. Определить магнитную индукцию B в точке А (рис.3). Расстояние $d=5$ см.

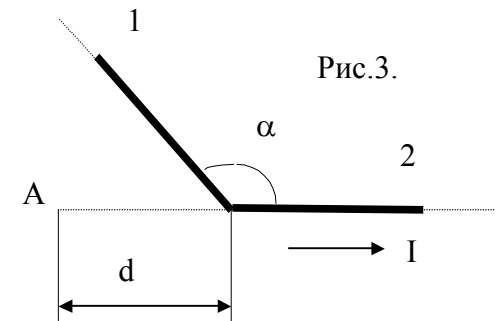


Рис.3.

Решение: Изогнутый провод можно рассматривать как два длинных провода, концы которых соединены в точке О (рис.4). В соответствии с принципом суперпозиции магнитных полей магнитная индукция B в точке А будет равна векторной сумме магнитных индукций \vec{B}_1 и \vec{B}_2 полей, создаваемых отрезками длинных проводов 1 и 2, т.е. $\vec{B} = \vec{B}_1 + \vec{B}_2$. Магнитная индукция B_2 равна нулю. Это следует из закона Био-Савара-Лапласа, согласно которому в точках, лежащих на оси провода, $dB = 0$ ($[d\vec{l}\vec{r}] = 0$).

Магнитную индукцию B_1 найдем, воспользовавшись соотношением (3), найденным в примере 1:

$$B_1 = \frac{\mu_0 I}{4\pi r_0} (\cos \alpha_1 - \cos \alpha_2)$$

где r_0 - кратчайшее расстояние от провода 1 до точки А (рис.4).

В нашем случае $\alpha_1 \rightarrow 0$ (провод длинный), $\alpha_2 = \alpha = 2\pi/3$ ($\cos \alpha_2 = \cos(2\pi/3) = -1/2$). Расстояние $r_0 = d \sin(\pi - \alpha) = d \sin(\pi/3) = d \sqrt{3}/2$. Тогда магнитная индукция

$$B_1 = \frac{\mu_0 I}{4\pi d \sqrt{3}/2} (1 + 1/2).$$

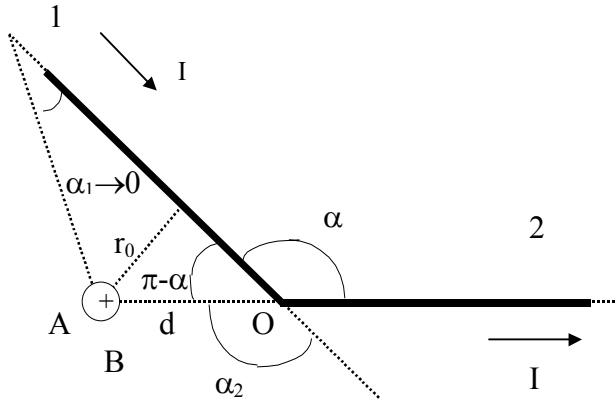


Рис.4.

Так как $B = B_1$ ($B_2 = 0$), то

$$B = \frac{\sqrt{3}\mu_0 I}{4\pi d}$$

Вектор \vec{B} сонаправлен с вектором \vec{B}_1 и определяется правилом правого винта. На рис.4 это направление отмечено крестиком в кружочке (перпендикулярно плоскости чертежа, от нас).

Проверка размерности аналогична выполненной в примере 2. Произведем вычисления:

$$B = \frac{\sqrt{3} \cdot 4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 50}{4\pi \cdot 5 \cdot 10^{-2}} \text{Тл} = 3,46 \cdot 10^{-5} \text{Тл} = 34,6 \text{мкТл}.$$

Пример 4. Два бесконечно длинных провода скрещены под прямым углом (рис.5). По проводам текут токи $I_1 = 80$ А и $I_2 = 60$ А. Расстояние d между проводами равно 10 см. Определить магнитную индукцию \vec{B} в точке А, одинаково удаленной от обоих проводов.

Решение. В соответствии с принципом суперпозиции магнитных полей магнитная индукция \vec{B} поля, создаваемого токами I_1 и I_2 , определяется выражением

$\vec{B} = \vec{B}_1 + \vec{B}_2$, где \vec{B}_1 - магнитная индукция поля, созданного в точке А током I_1 ; \vec{B}_2 - магнитная индукция поля, созданного в точке А током I_2 . Заметим, что векторы \vec{B}_1 и \vec{B}_2 взаимно перпендикулярны (их направления находятся по правилу буравчика и изображены в двух проекциях на рис.6). Тогда модуль вектора \vec{B} можно определить по теореме Пифагора:

$$B = |\vec{B}| = \sqrt{B_1^2 + B_2^2}$$

где B_1 и B_2 определяются по формулам расчета магнитной индукции для бесконечно длинного прямолинейного провода с током:

$$B_1 = \frac{\mu_0 I_1}{2\pi r_0} \quad \text{и} \quad B_2 = \frac{\mu_0 I_2}{2\pi r_0}$$

В нашем случае $r_0 = d/2$. Тогда

$$B = \frac{\mu_0}{\pi d} \sqrt{I_1^2 + I_2^2}$$

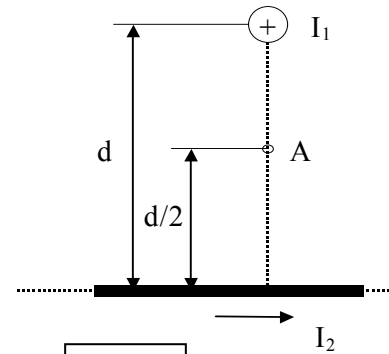


Рис 5

Проверка размерности аналогична выполненной в примере 2. Произведем вычисления:

$$B = \frac{4\pi \cdot 10^{-7}}{\pi \cdot 10^{-1}} \sqrt{80^2 + 60^2} \text{ Тл} = 4 \cdot 10^{-4} \text{ Тл} = 400 \text{ мкТл}$$

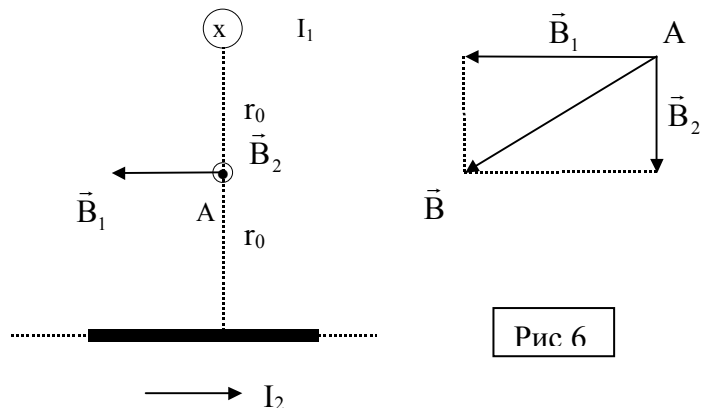


Рис 6

Пример 5. Бесконечно длинный провод изогнут так, как это изображено на рис. 7. Радиус R дуги окружности равен 10 см. Определить магнитную индукцию \vec{B} поля, создаваемого в точке O током $I = 80$ А, текущим по этому проводу.

Решение. Магнитную индукцию \vec{B} в точке O найдем, используя принцип суперпозиции магнитных полей:

$\vec{B} = \sum_{i=1}^N \vec{B}_i$. В нашем случае провод можно разбить на три части (рис.8): два прямолинейных провода (1 и 3), одним концом уходящие в бесконечность, и дугу полуокружности (2) радиуса R . Тогда

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

где $\vec{B}_1, \vec{B}_2, \vec{B}_3$ - магнитные индукции в точке O , создаваемые током, текущим соответственно на первом, втором и треть-

ем участках провода.

Так как точка O лежит на оси провода 1, то $B_1 = 0$ и тогда

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

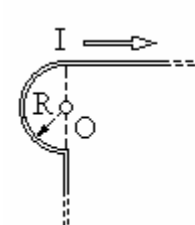


Рис.7.

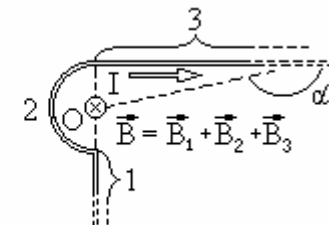


Рис.8.

Учитывая, что векторы \vec{B}_2 и \vec{B}_3 направлены в соответствии с правилом буравчика перпендикулярно плоскости чертежа от нас, то векторное суммирование можно заменить алгебраическим:

$$B = B_2 + B_3$$

Магнитную индукцию B_2 найдем, воспользовавшись выражением для магнитной индукции в центре кругового тока:

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

В нашем случае магнитное поле в точке O создается лишь половиной такого кругового тока, поэтому

$$B_2 = \frac{\mu_0 I}{4R}$$

Магнитную индукцию \vec{B}_3 найдем по формуле:

$$B = \frac{\mu_0 I}{4\pi r_0} (\cos \alpha_1 - \cos \alpha_2)$$

В нашем случае $r_0 = R$, $\alpha_1 = \pi/2$ ($\cos \alpha_1 = 0$), $\alpha_2 \rightarrow \pi$ ($\cos \alpha_2 = -1$). Тогда

$$B_3 = \frac{\mu_0 I}{4\pi R}$$

Используя найденные выражения для B_2 и B_3 , получим

$$B = B_2 + B_3 = \frac{\mu_0 I}{4R} + \frac{\mu_0 I}{4\pi R}$$

или

$$B = \frac{\mu_0 I}{4\pi R}(\pi + 1)$$

Проверка размерности аналогична выполненной в примере 2.

Произведем вычисления:

$$B = \frac{4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 80}{4\pi \cdot 0,1}(\pi + 1)\text{Тл} = 3,31 \cdot 10^{-4}\text{Тл},$$

или

$$B = 331\text{мкТл}$$

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

Решение. Движение заряженной частицы в однородном магнитном поле будет происходить по окружности только в том случае, когда частица влетит в магнитное поле перпендикулярно линиям магнитной индукции $\vec{v} \perp \vec{B}$. Так как сила Лоренца F_L перпендикулярна вектору \vec{v} , то она сообщит частице (протону) нормальное ускорение a_n .

Согласно второму закону Ньютона,

$$\vec{F}_L = m\vec{a}_n \quad (1)$$

где m - масса протона.

На рис. 9 совмещена траектория протона с плоскостью чертежа и дано (произвольно) направление вектора \vec{v} . Силу Лоренца направим перпендикулярно вектору \vec{v} к центру окружности (векторы \vec{a}_n и \vec{F}_L сонаправлены). Используя

правило левой руки, определим направление линий индукции (направление вектора \vec{B}).

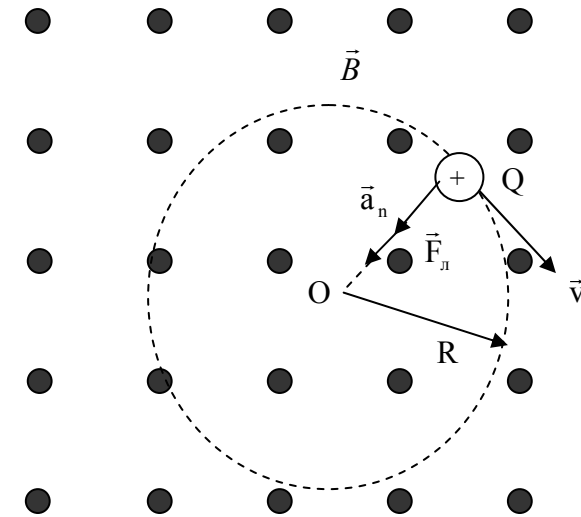


Рис.9.

Перепишем выражение (1) в скалярной форме (в проекции на радиус):

$$F_L = ma_n \quad (2)$$

В скалярной форме $F_L = QvB \sin \alpha$. В нашем случае $\vec{v} \perp \vec{B}$ и $\sin \alpha = 1$, тогда $F_L = QvB$. Так как нормальное ускорение $a_n = v^2/R$, то выражение (2) перепишем следующим образом:

$$QvB = mv^2 / R$$

Отсюда находим радиус окружности:

$$R = mv / (QB)$$

Заметив, что mv есть импульс протона (p), это выражение можно записать в виде

$$R = p / (QB) \quad (3)$$

Импульс протона найдем, воспользовавшись связью между работой сил электрического поля и изменением кинетической энергии протона, т.е. $A = \Delta T$, или

$$Q(\varphi_1 - \varphi_2) = T_2 - T_1$$

где $\phi_1 - \phi_2$ - ускоряющая разность потенциалов (или ускоряющее напряжение U); T_1 и T_2 - начальная и конечная кинетические энергии протона.

Пренебрегая начальной кинетической энергией протона ($T_1 \approx 0$) и выразив кинетическую энергию T_2 через импульс p , получим

$$QU = p^2 / (2m)$$

Найдем из этого выражения импульс $p = \sqrt{2mQU}$ и подставим его формулу (3):

$$R = \frac{\sqrt{2mQU}}{QB},$$

или

$$R = \frac{1}{B} \sqrt{2mU/Q} \quad (4)$$

Убедимся в том, что правая часть равенства дает единицу длины (м):

$$\begin{aligned} \frac{[m^{1/2}][U^{1/2}]}{[B][Q^{1/2}]} &= \frac{1}{1\text{Тл}} \left(\frac{1\text{кг} \cdot 1\text{В}}{1\text{Кл}} \right)^{1/2} = \frac{(1\text{кг})^{1/2} \cdot 1\text{А} \cdot \text{м}^2 (1\text{Дж})^{1/2}}{1\text{Дж} \cdot 1\text{Кл}} = \\ &= \frac{(1\text{кг})^{1/2} \cdot \text{м}^2}{(1\text{Дж})^{1/2} \cdot 1\text{с}} = \frac{(1\text{кг})^{1/2} \cdot \text{м}^2}{(1\text{кг})^{1/2} \cdot \text{м} / \text{с} \cdot \text{с}} = 1\text{м}. \end{aligned}$$

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

$$R = \frac{1}{0,3} \sqrt{\frac{2 \cdot 1,67 \cdot 10^{-27} \cdot 600}{1,6 \cdot 10^{-19}}} \text{м} = 0,0118\text{м} = 11,8\text{мм}$$

Пример 7. Электрон, влетев в однородное магнитное поле ($B = 0,2$ Тл), стал двигаться по окружности радиуса $R = 5$ см. Определить магнитный момент p_m эквивалентного кругового тока.

Решение. Электрон начинает двигаться по окружности, если он влетает в однородное магнитное поле перпен-

дикулярно линиям магнитной индукции. На рис.10 линии магнитной индукции перпендикулярны плоскости чертежа и направлены “от нас” (обозначены крестиками).

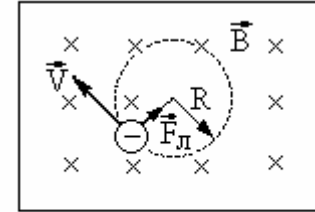


Рис.10.

Движение электрона по окружности эквивалентно круговому току, который в данном случае определяется выражением

$$I_{\text{экр}} = \frac{|e|}{T}$$

где e - заряд электрона; T - период его обращения.

Период обращения можно выразить через скорость электрона v и путь, проходимый электроном за период $T = (2\pi R/v)$. Тогда

$$I_{\text{экр}} = |e| v / (2\pi R) \quad (1)$$

Зная $I_{\text{экр}}$, найдем магнитный момент эквивалентного кругового тока. По определению, магнитный момент контура с током выражается соотношением

$$p_m = I_{\text{экр}} S \quad (2)$$

где S - площадь, ограниченная окружностью, описываемой электроном ($S = \pi R^2$).

Подставив $I_{\text{экр}}$ из (1) в выражение (2), получим

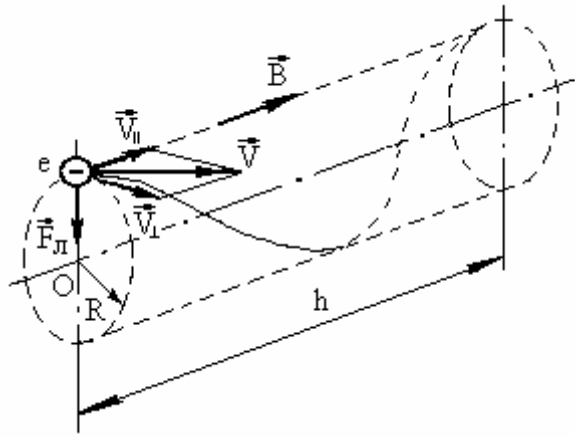


Рис.11.

$$p_m = \frac{|e|v}{2\pi R} \pi R^2$$

Сократим на πR и перепишем это выражение в виде:

$$p_m = \frac{1}{2} |e| v R \quad (3)$$

В полученном выражении известной является скорость электрона, которая связана с радиусом R окружности, по которой он движется, соотношением $R = mv/(QB)$ (см. пример 6). Заменив Q на $|e|$, найдем интересующую нас скорость $v = |e|BR/m$ и подставим ее в формулу (3):

$$p_m = \frac{|e|^2 |BR^2|}{2m}$$

Убедимся в том, что правая часть равенства дает единицу измерения магнитного момента ($A \cdot m^2$):

$$\frac{[e^2][B][R^2]}{[m]} = \frac{(1Кл)^2 \cdot 1Тл \cdot (1м)^2}{1кг} = \frac{(1Кл)^2 \cdot 1Н}{1кг \cdot 1А \cdot м} =$$

$$= \frac{(1А)^2 \cdot c^2 \cdot кг \cdot м \cdot м^2}{1А \cdot м \cdot кг \cdot c^2} = 1А \cdot м^2$$

Произведем вычисления:

$$p_m = \frac{(1,6 \cdot 10^{-19})^2 \cdot 0,2 \cdot (0,05)^2}{2 \cdot 9,1 \cdot 10^{-31}} А \cdot м^2 = 7,03 \cdot 10^{-12} А \cdot м^2 = 7,03 нА \cdot м^2$$

Пример 8. Электрон движется в однородном магнитном поле ($B = 10$ мТл) по винтовой линии, радиус R которой равен 1 см и шаг $h = 6$ см. Определить период T обращения электрона и его скорость v .

Решение. Электрон будет двигаться по винтовой линии, если он влетает в однородное магнитное поле под некоторым углом ($\alpha \neq \pi/2$) к линиям магнитной индукции. Разложим, как это показано на рис.11, скорость v электрона на две составляющие: параллельную вектору, $v_{||}$, и перпендикулярную ему, v_{\perp} . Скорость $v_{||}$ в магнитном поле не изменяется и обеспечивает перемещение электрона вдоль силовой линии. Скорость v_{\perp} в результате действия силы Лоренца будет изменяться только по направлению ($\vec{F}_L \perp \vec{v}_{\perp}$) (в отсутствие параллельной составляющей, $v_{||} = 0$, движение электрона происходило бы по окружности в плоскости, перпендикулярной линиям индукции). Таким образом, электрон будет участвовать одновременно в двух движениях: равномерном перемещении со скоростью $v_{||}$ и равномерном движении по окружности со скоростью v_{\perp} .

Период обращения электрона связан с перпендикулярной составляющей скорости соотношением:

$$T = 2\pi R / v_{\perp} \quad (1)$$

Найдем отношение R/v_{\perp} . Для этого воспользуемся тем, что сила Лоренца сообщает электрону нормальное ускорение $a_n = v_{\perp}^2 / R$. Согласно второму закону Ньютона можно написать

$$F_{Л} = ma_n,$$

или

$$|e|v_{\perp}B = mv_{\perp}^2 / R \quad (2)$$

где $v_{\perp} = v \sin \alpha$.

Сократив (2) на v_{\perp} , выразим соотношение R/v_{\perp} ($R/v_{\perp} = m/|e|B$) и подставим его в формулу (1):

$$T = 2\pi \frac{m}{|e|B}$$

Убедимся в том, что правая часть равенства дает единицу времени (с):

$$\frac{[m]}{[e][B]} = \frac{1\text{кг}}{1\text{Кл} \cdot 1\text{Тл}} = \frac{1\text{кг} \cdot \text{А} \cdot \text{м}^2}{1\text{А} \cdot \text{с} \cdot \text{Н} \cdot \text{м}} = \frac{1\text{кг} \cdot \text{с}^2 \cdot \text{м}^2}{1\text{с} \cdot \text{кг} \cdot \text{м}^2} = 1\text{с}$$

Произведем вычисления:

$$T = \frac{2\pi \cdot 9,1 \cdot 10^{-31}}{1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 10 \cdot 10^{-3}} = 3,57 \cdot 10^{-9} \text{с} = 3,57 \text{нс}$$

Модуль скорости v , как это видно из рис.11, можно выразить через v_{\perp} и v_{\parallel} :

$$v = \sqrt{v_{\perp}^2 + v_{\parallel}^2}$$

Из формулы (2) выразим перпендикулярную составляющую скорости:

$$v_{\perp} = \frac{|e|BR}{m}$$

Параллельную составляющую скорости v_{\parallel} найдем из следующих соображений. За время, равное периоду обращения T , электрон пройдет в направлении магнитного поля расстояние, равное шагу винтовой линии, т.е. $h = Tv_{\parallel}$, откуда

$$v_{\parallel} = h/T$$

Подставив вместо T правую часть выражения (2), получим

$$v_{\parallel} = \frac{|e|Bh}{2\pi m}$$

Таким образом, модуль скорости электрона

$$v = \sqrt{v_{\perp}^2 + v_{\parallel}^2} = \frac{|e|B}{m} \sqrt{R^2 + \left(\frac{h}{2\pi}\right)^2}$$

Убедимся в том, что правая часть равенства дает единицу скорости (м/с). Для этого заметим, что R и h имеют одинаковую единицу измерения - метр (м). Поэтому в квадратных скобках мы поставим только одну из величин (например, R):

$$\begin{aligned} \frac{[e][B]}{[m]} [R^2]^{1/2} &= \frac{1\text{Кл} \cdot 1\text{Тл}}{1\text{кг}} (\text{м}^2)^{1/2} = \frac{1\text{А} \cdot \text{с} \cdot \text{Н} \cdot \text{м} \cdot \text{м}}{\text{кг} \cdot \text{А} \cdot \text{м}^2} = \\ &= \frac{1\text{Н} \cdot \text{с}}{1\text{кг}} = \frac{1\text{кг} \cdot \text{м} \cdot \text{с}}{1\text{кг} \cdot \text{с}^2} = 1\text{м} / \text{с} \end{aligned}$$

Произведем вычисления:

$$\begin{aligned} v &= \frac{1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 10 \cdot 10^{-3}}{9,1 \cdot 10^{-31}} \left[(0,01)^2 + \left(\frac{0,06}{2\pi}\right)^2 \right]^{1/2} \text{ м} / \text{с} = \\ &= 2,46 \cdot 10^7 \text{ м} / \text{с} \end{aligned}$$

или 24,6 Мм/с.

Пример 9. Рамка, содержащая $N = 10^3$ витков, равномерно вращается с частотой $n = 10 \text{ с}^{-1}$ относительно оси АВ, лежащей в плоскости рамки и перпендикулярной линиям однородного магнитного поля ($B = 0,04 \text{ Тл}$). Определить мгновенное значение ЭДС индукции для тех моментов времени, когда плоскость рамки составляет угол $\alpha = 60^\circ$ с линиями поля. Площадь S рамки равна 100 см^2 .

Решение. Мгновенное значение ЭДС индукции ε_i определяется основным уравнением электромагнитной индукции Фарадея-Максвелла:

$$\varepsilon_i = -\frac{d\psi}{dt} \quad (1)$$

Потокоцепление $\Psi = N\Phi$, где N - число витков рам-

ки, пронизываемых магнитным потоком Φ . Подставив выражение Ψ в формулу (1), получим

$$\varepsilon_i = -N \frac{d\Phi}{dt} \quad (2)$$

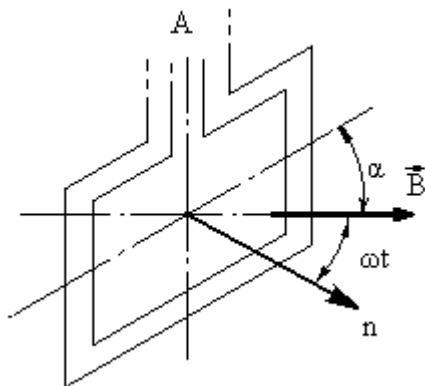


Рис.12

При вращении рамки магнитный поток Φ , пронизывающий рамку в момент времени t , изменяется по закону $\Phi = BS \cos \omega t$, где B - магнитная индукция; S - площадь рамки; ω - угловая скорость рамки. Подставив в формулу (2) выражение магнитного потока Φ и продифференцировав по времени, найдем мгновенное значение ЭДС индукции:

$$\varepsilon_i = NBS\omega \sin \omega t$$

Заметив, что угловая скорость ω связана с частотой вращения n рамки соотношением $\omega = 2\pi n$ и что угол $\omega t = \pi/2 - \alpha$ (рис.11), получим (учтено, что $\sin(\pi/2 - \alpha) = \cos \alpha$)

$$\varepsilon_i = 2\pi n NBS \cos \alpha$$

Убедимся в том, что правая часть этого равенства дает единицу ЭДС (В):

$$[n][B][S] = \frac{1 \text{ Гл} \cdot 1 \text{ м}^2}{1 \text{ с}} = \frac{1 \text{ Н} \cdot \text{м}^2}{1 \text{ А} \cdot \text{м} \cdot \text{с}} = \frac{1 \text{ Дж}}{1 \text{ Кл}} = 1 \text{ В}$$

Произведем вычисления:

$$\varepsilon_i = 2 \cdot 3,14 \cdot 10 \cdot 10^3 \cdot 0,04 \cdot 10^{-2} \cdot 0,5 \text{ В} = 25,1 \text{ В}$$

Пример 10. Квадратная проволочная рамка со стороной $a = 5$ см и сопротивлением $R = 10$ мОм находится в однородном магнитном поле ($B = 40$ мТл). Нормаль к плоскости рамки составляет угол $\alpha = 30^\circ$ с линиями магнитной индукции. Определить заряд Q , который пройдет по рамке, если магнитное поле выключить.

Решение. При выключении магнитного поля произойдет изменение магнитного потока. Вследствие этого в рамке возникнет ЭДС индукции, определяемая основным законом электромагнитной индукции

$$E_i = - \frac{d\Phi}{dt}$$

Возникшая ЭДС индукции вызовет в рамке индукционный ток, мгновенное значение которого можно определить воспользовавшись законом Ома для полной цепи $I_i = \varepsilon_i/R$, где R - сопротивление рамки. Тогда

$$I_i R = - \frac{d\Phi}{dt}$$

Так как мгновенное значение силы индукционного тока

$$I_i = \frac{dQ}{dt}, \text{ то выражение можно переписать в виде}$$

$$\frac{dQ}{dt} R = - \frac{d\Phi}{dt}, \text{ откуда } dQ = - \frac{d\Phi}{R} \quad (1)$$

Проинтегрировав выражение (1), найдем

$$\int_0^Q dQ = - \frac{1}{R} \int_{\Phi_1}^{\Phi_2} d\Phi, \text{ или } Q = \frac{\Phi_1 - \Phi_2}{R}$$

Заметим, что при выключенном поле (конечное состояние) $\Phi_2 = 0$, последнее равенство переписывается в виде

$$Q = \Phi_1 / R \quad (2)$$

Найдем магнитный поток Φ_1 . По определению магнитного потока имеем

$$\Phi_1 = BS \cos \alpha$$

где S - площадь рамки.

В нашем случае (рамка квадратная) $S = a^2$. Тогда

$$\Phi_1 = Ba^2 \cos \alpha \quad (3)$$

Подставив (3) в (2), получим

$$Q = \frac{Ba^2}{R} \cos \alpha$$

Убедимся в том, что правая часть этого равенства дает единицу заряда (Кл):

$$\frac{[B][a^2]}{[R]} = \frac{1\text{Тл} \cdot (1\text{м}^2)}{1\text{Ом}} = \frac{1\text{Н} \cdot \text{м}^2}{1\text{А} \cdot \text{м} \cdot \text{Ом}} = \frac{1\text{Дж}}{1\text{В}} = 1\text{Кл}$$

Произведем вычисления:

$$Q = \frac{0,04 \cdot 25 \cdot 10^{-4} \cdot \sqrt{3}/2}{0,01} \text{Кл} = 8,67 \cdot 10^{-3} \text{Кл} = 8,67 \text{мКл}$$

Пример 11. Плоский квадратный контур со стороной $a = 10$ см, по которому течет ток $I = 100$ А, свободно установился в однородном магнитном поле ($B = 1$ Тл). Определить работу A , совершаемую внешними силами при повороте контура относительно оси, проходящей через середину его противоположных сторон, на угол: 1) $\varphi = 90^\circ$; 2) $\varphi = 3^\circ$. При повороте контура сила тока в нем поддерживается неизменной.

Решение. Как известно, на контур с током в магнитном поле действует момент силы.

$$M = p_m B \sin \varphi \quad (1)$$

где $p_m = IS = Ia^2$ - магнитный момент контура; B - магнитная индукция; φ - угол между векторами \vec{p}_m (направлен по нормали к контуру) и \vec{B} .

По условию задачи в начальном положении контур свободно установился в магнитное поле. При этом момент силы равен нулю ($M = 0$), а значит, $\varphi = 0$, т.е. векторы \vec{p}_m и

\vec{B} сонаправлены. Если внешние силы выведут контур из положения равновесия, то возникший момент сил будет стремиться вернуть контур в исходное положение. Против этого момента и будет совершаться работа внешними силами. Так как момент сил переменный (зависит от угла поворота φ), то для подсчета работы применим формулу работы в дифференциальной форме $dA = Md\varphi$. Учитывая формулу (1), получаем

$$dA = IBa^2 \sin \varphi d\varphi$$

Взяв интеграл от этого выражения, найдем работу при повороте на конечный угол:

$$A = IBa^2 \int_0^{\varphi} \sin \varphi d\varphi \quad (2)$$

Работа при повороте на угол $\varphi_1 = 90^\circ$

$$A_1 = IBa^2 \int_0^{\pi/2} \sin \varphi d\varphi = IBa^2 |(-\cos \varphi)|_0^{\pi/2} = IBa^2 \quad (3)$$

Выразим числовые значения величин в единицах СИ ($I = 100$ А, $B = 1$ Тл, $a = 10$ см = $0,1$ м) и подставим в (3):

$$A_1 = 100 \cdot 1 \cdot (0,1)^2 \text{ Дж} = 1 \text{ Дж}$$

Работа при повороте на угол $\varphi_2 = 3^\circ$. В этом случае, учитывая, что угол φ_2 мал, заменим в выражении (2) $\sin \varphi \approx \varphi$:

$$A_2 = IBa^2 \int_0^{\varphi_2} \varphi d\varphi = \frac{1}{2} IBa^2 \varphi_2^2 \quad (4)$$

Выразим угол φ_2 в радианах. После подстановки числовых значений величин в (4) найдем

$$A_2 = \frac{1}{2} 100 \cdot 1 \cdot (0,1)^2 \cdot (0,0523)^2 \text{ Дж} = 1,37 \cdot 10^{-3} \text{ Дж} = 1,37 \text{ мДж}$$

Задачу можно решить и другими способами:

1. Работа внешних сил по перемещению контура с током в магнитном поле равна произведению силы тока в контуре на изменение магнитного потока, пронизывающего контур:

$$A = -I\Delta\Phi = I(\Phi_1 - \Phi_2)$$

где Φ_1 - магнитный поток, пронизывающий контур до перемещения; Φ_2 - то же, после перемещения.

Если $\varphi = 90^\circ$, то $\Phi_1 = BS$, $\Phi_2 = 0$. Следовательно,

$$A = IBS = Iba^2$$

что совпадает с (3).

2. Воспользуемся выражением для механической потенциальной энергии контура с током в магнитном поле

$$\Pi(\varphi) = -p_m B \cos\varphi$$

Тогда работа внешних сил

$$A = \Delta\Pi = \Pi_2 - \Pi_1 \text{ или } A = p_m B (\cos\varphi_1 - \cos\varphi_2)$$

Так как $p_m = Ia^2$, $\cos\varphi_1 = 1$ и $\cos\varphi_2 = 0$, то

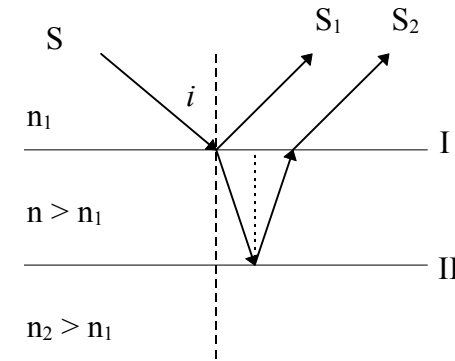
$$A = Iba^2$$

что также совпадает с (3).

Примеры решения задач. Оптика.

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° ?

Решение. Оптическая разность хода лучей, отраженных от нижней и верхней поверхностей пленки (рис.1),



$$\Delta = 2d\sqrt{n^2 - \sin^2 i}, \quad (1)$$

где d - толщина пленки; n - показатель преломления пленки; i - угол падения лучей. В 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 максимума

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

где λ - длина волны света. Подставляя (1) в (2) и учитывая, что выражение (1) положительно, получаем

$$1d\sqrt{n^2 - \sin^2 i} = (2m-1)\frac{\lambda}{2} \quad (3)$$

Из (3) найдем возможные значения толщины пленки:

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

Наименьшая толщина пленки наблюдается при $m=1$:

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

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

Пример 2. Постоянная дифракционная решетки 10 мкм, ее ширина 2 см. В спектре какого порядка эта решетка может разрешить дуплет $\lambda_1=486,0$ нм и $\lambda_2=486,1$ нм?

Решение. Разрешающая способность дифракционной решетки

$$R = \frac{\lambda}{\Delta\lambda} = mN, \quad (1)$$

где $\Delta\lambda$ - минимальная разность длин волн двух спектральных линий λ и $\lambda+\Delta\lambda$, разрешаемых решеткой; m - порядок спектра; N - число щелей решетки. Так как постоянная решетки d есть расстояние между серединами соседних щелей, то

$$N = \frac{l}{d}, \quad (2)$$

где l - ширина решетки. Из формулы (1) с учетом (2) находим

$$\Delta\lambda = \frac{\lambda}{mN} = \frac{c\lambda}{ml}. \quad (3)$$

Дуплет спектральных линий λ_1 и λ_2 будет разрешен, если

$$\Delta\lambda \leq \lambda_2 - \lambda_1. \quad (4)$$

Подставляя (3) в (4), с учетом того, что $\lambda = \lambda_1$

$$\frac{c\lambda_1}{ml} \leq \lambda_2 - \lambda_1. \quad (5)$$

Из выражения (5) следует, что дуплет λ_1 и λ_2 будет разрешен во всех спектрах с порядком

$$m \geq \frac{c\lambda_1}{l(\lambda_2 - \lambda_1)}.$$

Проводя вычисления, получаем

$$\frac{c\lambda_1}{l(\lambda_2 - \lambda_1)} = \frac{10 \cdot 10^{-6} \text{ м} \cdot 486,0 \cdot 10^{-9}}{2 \cdot 10^{-2} \text{ м} \cdot (486,1 - 486,0) \cdot 10^{-9} \text{ м}} = 2,43$$

Так как m - целое число, то $m \geq 3$.

Пример 3. Естественный свет падает на поверхность диэлектрика под углом полной поляризации. Степень поляризации преломленного луча составляет 0,124. Найти коэффициент пропускания света.

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

$$I_{\parallel} = I_{\perp}, \quad (1)$$

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

$$I = I_{\parallel} + I_{\perp}. \quad (2)$$

При падении света под углом полной поляризации отражаются только волны, поляризованные в плоскости, перпендикулярной плоскости падения. Интенсивность преломленной волны

$$I'' = I''_{\parallel} + I''_{\perp}. \quad (3)$$

Составляющие интенсивности преломленной волны

$$I''_{\parallel} = I, \quad I''_{\perp} = I - I'', \quad (4)$$

где I' - интенсивность отраженного света. Степень поляризации преломленного луча

$$p'' = \frac{I''_{\max} - I''_{\min}}{I''_{\max} + I''_{\min}} = \frac{I''_{\parallel} - I''_{\perp}}{I''_{\parallel} + I''_{\perp}} = \frac{I''_{\parallel} - I''_{\perp}}{I''} \quad (5)$$

С учетом равенств (4) и (1) выражение (5) можно представить в виде

$$p'' = \frac{I'}{I''}. \quad (6)$$

Коэффициент пропускания света

$$\tau = \frac{I''}{I} = \frac{I''}{(I' + I'')} \quad (7)$$

или с учетом выражения (6)

$$\tau = \frac{1}{(1 + p'')}$$

Проводя вычисления, получаем

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

Пример 4. 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° ?

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 с учетом потерь на отражение и поглощение света поляризаторов равна

$$I_1 = \frac{1}{2} I_0 (1 - k), \quad (1)$$

где I_0 - интенсивность естественного света; k - коэффициент, учитывающий на потери на отражение и поглощение. После 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 и с учетом потерь на отражение и поглощение света эта интенсивность равна

$$I_2 = I_1 (1 - k) \cos^2 \alpha, \quad (2)$$

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:

$$\frac{I_0}{I_2} = \frac{I_0}{\left(I_1 (1 - k) \cos^2 \alpha \right)}. \quad (3)$$

Из выражения (1) найдем

$$(1 - k) = \frac{2I_1}{I_0}. \quad (4)$$

Подставляя (4) в (3), получаем

$$\frac{I_0}{I_2} = \frac{1}{(2 \cos^2 \alpha) \cdot (I_0 / I_1)^2};$$

$$\frac{I_0}{I_2} = \frac{1}{(2 \cos^2 60^{\circ}) (2,3)^2} = 10,6.$$

Пример 5. Измерение показателя преломления оптического стекла дало $n_1=1,528$ для $\lambda_1=0,434$ мкм и $n_2=1,523$ для $\lambda_2=0,486$ мкм. Вычислить отношение групповой скорости к фазовой для света с длиной волны 0,434 мкм.

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

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

где c - скорость света в вакууме.

$$\text{Фазовая скорость } v = c / n. \quad (2)$$

Разделив выражение (1) на (2), получим

$$\frac{u}{v} = 1 + \frac{\lambda}{n} \cdot \frac{dn}{d\lambda}. \quad (3)$$

Для длины волны λ_1 и средней дисперсии $\frac{dn}{d\lambda} = \frac{\Delta n}{\Delta \lambda}$ имеем

$$\frac{u_1}{v_1} = 1 + \frac{\lambda_1}{n_1} \left[\frac{(n_2 - n_1)}{(\lambda_2 - \lambda_1)} \right].$$

Проводя вычисления, получаем

$$\frac{u_1}{v_1} = 0,973.$$

Электромагнетизм

1. По проводнику, согнутому в виде прямоугольника со сторонами $a=10$ см и $b=20$ см, течет ток силой $I=40$ А. Определить напряженность H и индукцию B магнитного поля в точке пересечения диагоналей прямоугольника.

2. По двум длинным параллельным проводам, расстояние между которыми $d=6$ см, текут одинаковые токи $I=1$ А. Определить индукцию B и напряженность H магнитного поля в точке, удаленной от каждого провода на расстояние $r=6$ см, если токи текут: а) в одинаковом, б) в противоположных направлениях.

3. По двум скрещенным под прямым углом (см. рис. 1) бесконечно длинным проводам текут токи $I_1=10$ А и $I_2=20$ А. Определить индукцию B в точке А. Расстояние $d=1$ см.

4. По проводнику, изогнутому в виде окружности, течет ток. Напряженность магнитного поля в центре окружности $H_1=100$ А/м. Не изменяя силы тока в проводнике, ему придали форму квадрата. Определить напряженность H_2 магнитного поля в точке пересечения диагоналей этого квадрата.

5. По бесконечно длинному проводу, изогнутому так, как показано на рисунке 3, течет ток $I=100$ А. Определить магнитную индукцию и напряженность магнитного поля в точке О. Радиус дуги $R=10$ см.

6. Ток силой $I=10$ А течет по проводнику, согнутому под прямым углом. Найти напряженность H магнитного поля в точке, лежащей на биссектрисе этого угла и отстоящей от вершины угла на расстоянии $b=10$ см. Считать, что оба конца проводника находятся очень далеко от вершины угла.

7. По тонкому кольцу радиусом $R=10$ см течет ток $I=50$ А. Определить магнитную индукцию B на оси кольца в точке А. Угол $\beta=\pi/3$.

8. По двум бесконечно длинным проводам, скрещенным под прямым углом, текут токи $I_1=10$ А и $I_2=20$ А. Оп-

ределить магнитную индукцию B в точке A , равноудаленной от проводов на расстояние $d=20$ см.

9. По тонкому кольцу течет ток $I=40$ А (рис.4). Определить магнитную индукцию B в точке A , равноудаленной от точек кольца на расстоянии $r=20$ см. Угол $\alpha=\pi/6$.

10. Два параллельных бесконечно длинных провода (рис.2), по которым текут в одном направлении электрические токи силой $I=60$ А, расположены на расстоянии $d=10$ см друг от друга. Определить магнитную индукцию B поля, создаваемого проводниками с током в точке A , отстоящей от оси одного проводника на расстоянии $r_1=5$ см, от другого – $r_2=12$ см.

11. Электрон движется в магнитном поле с индукцией $B=2$ мТл по окружности радиусом $R=0,6$ см. Какова кинетическая энергия электрона?

12. Два иона разных масс с одинаковыми зарядами влетели в однородное магнитное поле, стали двигаться по окружностям радиуса $R_1=6$ см и $R_2=3,46$ см. Определить отношение масс ионов, если они прошли одинаковую ускоряющую разность потенциалов.

13. Электрон прошел ускоряющую разность потенциалов $U=400$ В и влетел в однородное магнитное поле перпендикулярно линиям магнитной индукции ($B=1$ Тл). Определите радиус окружности, по которой стал вращаться электрон.

14. Электрон влетел в однородное магнитное поле перпендикулярно линиям магнитной индукции ($B=100$ Тл). Определите силу эквивалентного кругового тока $I_{\text{эkv}}$, создаваемого движением электрона в магнитном поле.

15. Электрон прошел ускоряющую разность потенциалов $U=200$ В и, попав в однородное магнитное поле, стал двигаться по винтовой линии с радиусом $R=1$ см и шагом $h=4$ см. Определите магнитную индукцию B поля.

16. Заряженная частица прошла ускоряющую разность потенциалов $U=100$ В и, влетев в однородное магнит-

ное поле ($B=0,1$ Тл), стала двигаться по винтовой линии с шагом $h=6,5$ см и радиусом $R=1$ см. Определите отношение заряда к ее массе.

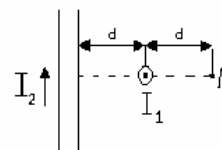


Рис. 1.

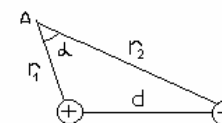


Рис. 2

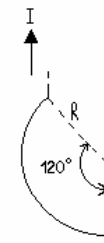


Рис. 3

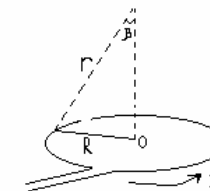


Рис. 4

17. Протон прошел ускоряющую разность потенциалов U и стал двигаться в однородном магнитном поле ($B=0,5$ Тл) по винтовой линии с шагом $h=5$ см и радиусом $R=0,5$ см. Определите ускоряющую разность потенциалов, которую прошел протон.

18. Электрон движется в однородном магнитном поле с индукцией $B=0,015$ Тл по окружности радиусом $R=10$ см. Определите импульс электрона.

19. Определите частоту обращения электрона по круговой орбите в магнитном поле, индукция которого $0,2$ Тл.

20. Протон влетел в однородное магнитное поле под углом $\alpha=60^\circ$ к направлению линии поля и движется по спирали, радиус которого $R=2,5$ см. Индукция магнитного поля $B=0,05$ Тл. Найти кинетическую энергию протона.

21. Прямолинейный проводник длиной $l=1,5$ м находится в однородном магнитном поле с индукцией $B=2$ Тл. Сила тока в проводнике $I=3$ А. Направление тока составляет угол $\alpha=45^\circ$ с вектором магнитной индукции. Найти силу, действующую на проводник.

22. Прямолинейный проводник длиной $l=2$ м находится в однородном магнитном поле с индукцией $B=0,25$ Тл. Сила тока в проводнике $I=0,5$ А. Проводник перпендикуля-

рен магнитной индукции. Найти модуль и направление силы, действующей на проводник.

23. Прямолинейный проводник длиной $l=5$ м находится в однородном магнитном поле. На проводник со стороны поля действует сила $F=2$ Н. Сила тока в проводнике $I=1$ А. Найти модуль и направление индукции магнитного поля, если она перпендикулярна проводнику.

24. На прямой проводник длиной $l=0,5$ м, расположенный под углом $\alpha=30^\circ$ к силовым линиям поля с индукцией $B=2 \cdot 10^{-2}$ Тл, действует сила $F=0,15$ Н. Найти силу тока в проводнике.

25. прямой провод длиной $l=10$ см находится в однородном магнитном поле с индукцией $B=0,01$ Тл. Сила тока в проводнике $I=20$ А. Найти угол α между направлением магнитной индукции и направлением тока, если на провод действует сила $F=10^{-2}$ Н.

26. Проводник находится в равновесии в горизонтальном магнитном поле с индукцией $B=48$ мТл. Сила тока в проводнике $I=23$ А. Угол между направлением тока и вектором магнитной индукции $\alpha=60^\circ$. Определить длину проводника, если его масса $m=0,0237$ кг.

27. Проводник длиной $l=1$ м расположен перпендикулярно силовым линиям горизонтального магнитного поля с индукцией $B=8$ мТл. Какой должна быть сила тока в проводнике, чтобы он находился в равновесии в магнитном поле? Масса проводника $m=8 \cdot 10^{-3}$ кг.

28. Прямой провод расположен между полюсами электромагнита перпендикулярно силовым линиям магнитного поля. Сила тока в проводе $I=1000$ А. С какой силой действует поле на единицу длины провода, если индукция поля электромагнита $B=1$ Тл?

29. Сила тока в двух параллельных проводниках $I_1=20$ А и $I_2=30$ А соответственно, длина каждого проводника $l=1$ м. Определить расстояние между проводниками R , если они взаимодействуют друг с другом с силой $F=4 \cdot 10^{-3}$ Н.

30. Два параллельных проводника, сила тока в которых одинакова, находятся на расстоянии $b=8,7$ см друг от друга и притягиваются с силой $F=2,5 \cdot 10^{-2}$ Н. Определить силу тока в проводнике, если длина каждого проводника $l=320$ см.

31. Соленоид с индуктивностью $L=4$ мГн содержит $N=600$ витков. Определить магнитный поток, возникающий в соленоиде, если сила тока, протекающего по обмотке, $I=12$ А.

32. Катушка, состоящая из $N=1000$ витков, создает магнитный поток $\Phi=3$ мВб, если сила тока в ней $I=0,6$ А. Найти индуктивность катушки.

33. Соленоид содержит $N=1000$ витков. Площадь сечения сердечника $S=10$ см², по обмотке течет ток, создающий поле с индукцией $B=1,5$ Тл. Найти среднюю ЭДС самоиндукции, возникающую в соленоиде, если силу тока уменьшить до нуля за время $t=500$ мкс.

34. В катушке с индуктивностью $L=0,2$ Гн сила тока $I=10$ А. Какова энергия магнитного поля этой катушки? Как изменится энергия поля, если сила тока увеличится вдвое?

35. В катушке протекает ток, создающий магнитное поле, энергия которого $W=0,5$ Дж. Магнитный поток через катушку $\Phi=0,1$ Вб. Найти силу тока.

36. Индуктивность катушки без сердечника $L=0,1$ мГн. При какой силе тока энергия магнитного поля $W=100$ мкДж?

37. Определить индуктивность соленоида, в котором при равномерном увеличении тока на $\Delta I=2$ А энергия магнитного поля увеличится на $\Delta W=10^{-2}$ Дж. Средняя сила тока в цепи $I=5$ А.

38. Соленоид имеет $N=1000$ витков на длину $l=0,5$ м. Площадь поперечного сечения соленоида $S=10$ см². Определить магнитный поток внутри соленоида и энергию магнитного поля, если сила тока в соленоиде $I=10$ А.

39. При изменении силы тока в соленоиде от $I_1=2,5$ А

до $I_2=14,5$ А его магнитный поток увеличился на $\Delta\Phi=2,4$ мВб. Соленоид имеет $N=800$ витков. Найти среднюю ЭДС самоиндукции, которая возникает в нем, если изменение силы тока происходит в течении времени $\Delta t=0,15$ с. Найти изменение энергии магнитного поля в соленоиде.

40. На катушке с сопротивлением $R=8,2$ Ом и индуктивностью $L=25$ мГн поддерживают постоянное напряжение $U=55$ В. Определить энергию магнитного поля. Какое количество теплоты выделится в катушке при размыкании цепи?

41. Рамка, содержащая $N=1000$ витков площадью $S=100$ см², равномерно вращается с частотой $n=10$ с⁻¹ в магнитном поле напряженностью $H=10^4$ А/м. Ось вращения лежит в плоскости рамки и перпендикулярна линиям напряженности. Определить максимальную э.д.с. индукции \mathcal{E}_{\max} , возникающую в рамке.

42. Рамка площадью $S=100$ см² равномерно вращается с частотой $n=5$ с⁻¹ относительно оси, лежащей в плоскости рамки и перпендикулярной линиям индукции однородного магнитного поля ($B=0,5$ Тл). Определить среднее значение э.д.с. индукции $\langle \mathcal{E}_i \rangle$ за время, в течении которого магнитный поток, пронизывающий рамку, изменится от нуля до максимального значения.

43. 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 перпендикулярно линиям индукции. Площадь рамки $S=200$ см². Определить заряд Q , который потечет по рамке при изменении угла между нормалью к рамке и линиям индукции: 1) от 0 до 45°; 2) от 45 до 90°.

44. В проволочное кольцо, присоединенное к баллистическому гальванометру, вставили прямой магнит. При этом по цепи прошел заряд $Q=50$ мкКл. Определить изменение магнитного потока $\Delta\Phi$ через кольцо, если сопротивление цепи гальванометра $R=10$ Ом.

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

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

47. Кольцо из медного провода массой $m=20$ г помещено в однородное магнитное поле ($B=0,5$ Тл) так, что плоскость кольца составляет угол $\alpha=30^\circ$ с линиями магнитной индукции. Определить заряд Q , который пройдет по кольцу, если снять магнитное поле.

48. Рамка, содержащая $N=100$ витков тонкого провода, может свободно вращаться относительно оси, лежащей в плоскости рамки. Площадь рамки $S=50$ см². Ось рамки перпендикулярна линиям индукции однородного магнитного поля ($B=0,05$ Тл). Определить максимальную э.д.с. \mathcal{E}_{\max} , которое индуцируется в рамке при ее вращении с частотой $n=40$ с⁻¹.

49. В однородном магнитном поле ($B=0,1$ Тл) равномерно с частотой $n=5$ с⁻¹ вращается стержень $l=50$ см так, что плоскость его вращения перпендикулярно линиям напряженности, а ось вращения проходит через один его концов. Определить индуцируемую на концах стержня разность потенциалов равно U .

50. В однородном магнитном поле с индукцией $B=0,5$ Тл вращается с частотой $n=10$ с⁻¹ стержень длиной $l=20$ см. Ось вращения параллельна линиям индукции и проходит через один из концов стержня, перпендикулярной его оси. Определить разность потенциалов U на концах стержня.

Оптика

51. Зная формулу радиуса k -й зоны Френеля для сферической волны ($\rho_k = \sqrt{abk\lambda/(a+b)}$), вывести соответствующую формулу для плоской волны.

52. Вычислить радиус ρ_5 пятой зоны Френеля для плоского волнового фронта ($\lambda = 0,5$ мкм), если построение делается для точки наблюдения, находящейся на расстоянии $b=1$ м от фронта волны.

53. Радиус ρ_4 четвертой зоны Френеля для плоского волнового фронта равен 3 мм. Определить радиус ρ_6 шестой зоны Френеля.

54. На диафрагму с круглым отверстием диаметром $d = 4$ мм падает нормально параллельный пучок лучей монохроматического света ($\lambda = 0,5$ мкм). Точка наблюдения находится на оси отверстия на расстоянии $b = 1$ м от него. Сколько зон Френеля укладывается в отверстии? Темное или светлое пятно получится в центре дифракционной картины, если в месте наблюдений поместить экран?

55. Плоская световая волна ($\lambda = 0,5$ мкм) падает нормально на диафрагму с круглым отверстием диаметром $d = 1$ см. На каком расстоянии b от отверстия должна находиться точка наблюдения, чтобы отверстие открывало: 1) одну зону Френеля; 2) две зоны Френеля?

56. Плоская световая волна ($\lambda = 0,5$ мкм) падает нормально на диафрагму с круглым отверстием диаметром $d = 1$ м. На каком расстоянии b от отверстия должна находиться точка наблюдения, чтобы отверстия, находящиеся на расстоянии b_i от его центра, наблюдаются максимумы интенсивности. 1. Получить вид функции $b = f(r, \lambda, n)$, где r – радиус отверстия; λ – длина волны; n – число зон Френеля, открываемых для данной точки оси отверстием. 2. Сделать то же самое для точек оси отверстия, в которых наблюдаются минимумы интенсивности.

57. Плоская световая волна ($\lambda = 0,7$ мкм) падает нормально на диафрагму с круглым отверстием радиусом r

$= 1,4$ мм. Определить расстояния b_1, b_2, b_3 от диафрагмы до трех наиболее удаленных от нее точек, в которых наблюдаются минимумы интенсивности.

58. Анализатор в $k = 2$ раза уменьшает интенсивность света, приходящегося к нему от поляризации. Определить угол α между плоскостями пропускающей поляризатора и анализатора. Потерями интенсивности света в анализаторе пренебречь.

59. Угол α между плоскостями пропускающей поляризатора и анализатора равен 45° . Во сколько раз уменьшится интенсивность света, выходящего из анализатора, если угол увеличить до 60° ?

60. Во сколько раз ослабляется интенсивность света, проходящего через два николя, плоскости пропускания которых образует угол $\alpha = 30^\circ$, если в каждом из николей в отдельности теряется 10 % интенсивности падающего на него света?

61. В частично-поляризованном свете амплитуда светового вектора, соответствующая максимальной интенсивности света, в $n = 2$ раза больше амплитуды, соответствующей минимальной интенсивности. Определить степень поляризации P света.

62. Степень поляризации P частично-поляризованного света равна 0,5. Во сколько раз отличается максимальная интенсивность света, пропускаемого через анализатор, от минимальной?

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

64. На николь падает пучок частично-поляризованного света. При некотором положении николя интенсивность света, прошедшего через него, стала мини-

мальной. Когда плоскость пропускания николя повернули на угол $\beta = 45^0$, интенсивность света возросла в $k = 1,5$ раза. Определить степень поляризации P света.

65. Пластину кварца толщиной $d_1 = 2$ мм, вырезанную перпендикулярно оптической оси, поместили между параллельными николями, в результате чего плоскость поляризации света повернулась на угол $\varphi = 53^0$. Определить толщину d_2 пластинки, при которой данный монохроматический свет не проходит через анализатор.

66. Никотин (читая жидкость), содержащийся в стеклянной трубке длиной $d = 8$ см, поворачивает плоскость поляризации желтого света натрия на угол $\varphi = 137^0$. Плотность никотина $\rho = 1,01 \times 10^3 \text{ кг/м}^3$. Определить удельное вращение $[\alpha]$ никотина.

67. Раствор глюкозы с массовой концентрацией $C_1 = 280 \text{ кг/м}^3$, содержащийся в стеклянной трубке, поворачивает плоскость поляризации монохроматического света, проходящего через этот раствор, на угол $\varphi_1 = 32^0$. Определить массовую концентрацию C_2 глюкозы в другом растворе, налитом в трубку такой же длины, если он поворачивает плоскость поляризации на угол $\varphi_2 = 24^0$.

68. Угол φ поворота плоскости поляризации желтого света натрия при прохождении через трубку с раствором сахара равен 40^0 . Длина трубки $d = 15$ см. Удельное вращение $[\alpha]$ сахара равно $1,17 \times 10^{-2} \text{ рад} \cdot \text{м}^3 / (\text{м} \cdot \text{кг})$. Определить плотность ρ раствора.

69. На узкую щель падает нормально монохроматический свет. Угол φ отклонения пучков света, соответствующих второй светлой дифракции полос, равен 1^0 . Сколько длинам волн падающего света равна ширина щели?

70. На щель шириной $a = 0,1$ мм падает нормально монохроматический свет ($\lambda = 0,5$ мкм). За щелью помещена собирающая линза, в фокальной плоскости которой находится экран. Что будет наблюдаться на экране, если

угол φ дифракции равен: 1) $17'$; 2) $43'$.

71. Сколько штрихов на каждый миллиметр содержит дифракционная решетка, если при наблюдении в монохроматическом свете ($\lambda = 0,6$ мкм) максимум пятого порядка отклонен на угол $\varphi = 18^0$?

72. На дифракционную решетку, содержащую $n = 100$ штрихов на 1 мм, падает нормально монохроматический свет. Зрительная труба спектрометра наведена на максимум третьего порядка. Чтобы навести трубу на другой максимум того же порядка, ее нужно повернуть на угол $\Delta\varphi = 20^0$. Определить длину волны λ света.

73. Дифракционная решетка освещена нормально падающим монохроматическим светом. В дифракционной картине максимум второго порядка отклонения на угол $\varphi_1 = 14^0$. На какой угол φ_2 отклонен максимум третьего порядка?

74. Дифракционная решетка содержит $n = 200$ штрихов на 1 мм. На решетку падает нормально монохроматический свет ($\lambda = 0,6$ мкм). Максимум какого наибольшего порядка дает эта решетка?

75. На дифракционную решетку, содержащую $n = 400$ штрихов на 1 мм, падает нормально монохроматический свет ($\lambda = 0,6$ мкм). Найти общее число дифракционных максимумов, которые дает эта решетка. Определить угол φ дифракции, соответствующий последнему максимуму.

76. При освещении дифракционной решетки белым светом спектры второго и третьего порядков отчасти перекрывают друг друга. На какую длину волны в спектре второго порядка накладывается фиолетовая граница ($\lambda = 0,4$ мкм) спектра третьего порядка?

77. На дифракционную решетку, содержащую $n = 500$ штрихов на 1 мм, падает в направлении нормали к ее поверхности белый свет. Спектр проецируется помещенной вблизи решетки линзой на экран. Определить шири-

ну b спектра первого порядка на экране, если расстояние L линзы до экрана равно 3 м. Границы видимости спектра $\lambda_{кр} = 780$ нм, $\lambda_{ф} = 400$ нм.

78. Расстояние между двумя когерентными источниками света ($\lambda = 0,5$ мкм) равно 0,1 мм. Расстояние между интерференционными максимумами в средней части интерференционной картины равно 1 см. Определить расстояние от источников до экрана.

79. На бипризму Френеля падает свет ($\lambda = 600$ нм) от источника. Найти расстояние между соседними интерференционными максимумами, образующимися на экране в результате интерференции, если расстояние от источника до призмы 1 м, а от призмы до экрана 4 м. Преломляющий угол призмы $2 \cdot 10^{-3}$ рад, показатель преломления ее $n = 1,5$.

80. Найти число N полос интерференции, образованных бипризмой с показателем преломления n и преломляющим углом φ , если длина волны источника λ . Расстояние от источника света до бипризмы a , а от бипризмы до экрана b .

81. На зеркалах Френеля, поставленные под углом $\alpha = 10^\circ$, падает свет от щели, находящейся на расстоянии $r = 10$ см от линии пересечения зеркал. Длина волны источника $\lambda = 600$ нм. Отраженный от зеркал свет дает интерференционную картину на экране, расположенном на расстоянии $L = 270$ см от линии пересечения зеркал. Определить расстояние между интерференционными полосами на экране и наибольшую ширину щели, при которой интерференционная картина может наблюдаться.

82. Определить угол α между зеркалами Френеля, если расстояние x между максимумами интерференции на экране равно 1 мм, расстояние a от линии пересечения зеркал до экрана 1 м, а до источника $r = 10$ см. Длина волны монохроматического света $\lambda = 0,496$ мкм. Интерферирующие лучи падают на экран нормально.

83. Интерференционная картина на экране M полу-

чается с помощью схемы, изображенной на рис. Источник S_1 , находящийся на расстоянии $l_1 = 1$ м от экрана, изучает монохроматический свет ($\lambda = 0,5$ мкм). Плоскость зеркала Z параллельна лучу S_1A и удалена от него на расстоянии $h = 2$ мм. Определить, что будет наблюдаться в точке A (усиление или гашение). Как изменится освещенность в этой точке, если на пути луча S_1A , перпендикулярно к нему поместить плоскопараллельную стеклянную пластинку ($n = 1,55$) толщиной $d = 6$ мкм?

84. На диафрагму с двумя узкими щелями, находящимися на расстоянии $d = 2,2$ мм, падает нормально монохроматический свет. Интерференционная картина образуется на экране, отстоящем от диафрагмы на расстоянии $l = 100$ см. Куда и на какое расстояние сместятся интерференционные полосы, если одну из щелей закрыть стеклянной пластиной толщиной $h = 1$ мкм и с показателем преломления $n = 1,5$?

85. Два когерентных источника света с длиной волны $\lambda = 480$ нм создают на экране интерференционную картину. Если на пути одного из пучков поместить тонкую кварцевую пластину с показателем преломления $n = 1,46$, то интерференционная картина смещается на $m = 69$ полос. Определить толщину d пластины.

86. Тонкая пленка с показателем преломления $n = 1,5$ освещается рассеянным светом с длиной волны $\lambda = 600$ нм. При какой минимальной толщине пленки исчезнут интерференционные полосы?

87. Какова толщина мыльной пленки, если при наблюдении ее в отраженном свете она представляется зеленой ($\lambda = 0,5$ мкм). Когда угол между нормалью и лучом зрения равен 35° ? Показатель преломления мыльной воды принять 1,33.

88. На плоской прозрачной поверхности образована тонкая прозрачная пленка толщиной 0,396 мкм. Какую окраску примет пленка при освещении ее белым светом, падающим под углом 30° ?

дающим под углом 30° ?

Показатель преломления стекла 1,5, а материала пленки 1,4.

89. На стеклянную пластинку ($n_1 = 1,5$) нанесена прозрачная пленка ($n_2 = 1,4$). На пленку нормально к поверхности падает монохроматический свет ($\lambda = 600$ нм). Какова наименьшая толщина пленки, если в результате интерференции отраженные лучи максимально ослаблены?

90. Определите толщину слоя масла на поверхности воды, если при наблюдении под углом 60° к нормали в спектре отраженного света видна значительно усиленная желтая линия с длиной волны $\lambda = 0,589$ мкм.

91. Каковы должны быть пределы изменения толщины пластинки с показателем преломления $n = 1,6$, чтобы можно было наблюдать интерференционный максимум 10-го порядка для света с длиной волны $\lambda = 500$ нм?

92. Плосковыпуклая стеклянная линза с $R = 1$ м лежит выпуклой стороной на стеклянной пластинке. Радиус шестого темного кольца Ньютона в отраженном свете $r_6 = 2$ мм. Определите длину световой волны.

93. Установка для наблюдения кольца Ньютона освещается нормально падающим монохроматическим светом ($\lambda = 600$ нм). Радиус кривизны R линзы равен 1 м. Определить толщину d воздушного промежутка в том месте, где в отраженном свете наблюдается третье светлое кольцо.

94. Между стеклянной пластиной и лежащей на ней плосковыпуклой линзой находится жидкость. Найти показатель преломления жидкости, если радиус r_3 третьего темного кольца Ньютона при наблюдении в отраженном свете с длиной волны $\lambda = 0,443$ мкм равен 1 мм. Радиус кривизны линзы 1 м.

95. Между стеклянной пластинкой и лежащей на ней плосковыпуклой линзой налита жидкость. Радиус 8-го темного кольца Ньютона при наблюдении в отраженном свете ($\lambda = 700$ нм) равен 2 мм. Радиус кривизны выпуклой поверх-

ности линзы $R = 1$ м. Найти показатель преломления жидкости.

96. Наблюдатель отсчитывает ширину 10 колец Ньютона вдали от их центра. Она оказывается равной 0,7 мм. Ширина следующих 10 колец оказывается равной 0,4 мм. Наблюдение производится в отраженном свете и при длине волны 589 нм. Определить радиус кривизны поверхности линзы.

97. Определить удельное вращение мятного масла, плотность которого $0,905$ г/см³ в трубке длиной 10 см, если угол вращения равен 22° .

98. Пластинку кварца толщиной $d = 1,5$ мм поместил между параллельными николями, в результате чего плоскость поляризации монохроматического света повернулась на угол $\varphi = 39,75^\circ$. Какой наименьшей толщины d_{min} следует взять пластинку, чтобы поле зрения поляриметра стало совершенно темноты?

99. При прохождении света через трубку длиной $d_1 = 15$ см, содержащую раствор сахара концентрацией $C_1 = 5,2\%$, плоскость поляризации света повернулась на угол $\varphi_1 = 5,2^\circ$. В другом растворе сахара, налитом в трубку длиной $d_2 = 20$ см, плоскость поляризации повернулась на угол $\varphi_2 = 13,3^\circ$. Определить концентрацию C_2 второго раствора.

100. Определить угол полной поляризации при падении света на поверхность стеклянной пластинки и скорость света в ней, если $n = 1,52$.

Варианты

№	Номера вариантов									
0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
1	1	11	21	31	41	51	61	71	81	91
2	2	12	22	32	42	52	62	72	82	92
3	3	13	23	33	43	53	63	73	83	93
4	4	14	24	34	44	54	64	74	84	94
5	5	15	25	35	45	55	65	75	85	95
6	6	16	26	36	46	56	66	76	86	96
7	7	17	27	37	47	57	67	77	87	97
8	8	18	28	38	48	58	68	78	88	98
9	9	19	29	39	49	59	69	79	89	99