

ЭЛЕКТРИЧЕСТВО, МАГНЕТИЗМ

Методические указания к выполнению
расчетно-графических заданий для студентов
I-II курсов РЭФ, ФЭН и ФТФ
дневного отделения

УДК 537 (076.5)
Э 454

Составители: *Ю.Е. Невский*, канд. физ.- мат. наук, доц.,
М.П. Сарина, канд. техн. наук, доц.,
О.А. Шегай, канд. физ.- мат. наук, доц.

Рецензент *В.Н. Холявко*, канд. физ.- мат. наук, доц.

Работа подготовлена на кафедре прикладной
и теоретической физики

© Новосибирский государственный
технический университет, 2003 г.

1. ОСНОВНЫЕ ФИЗИЧЕСКИЕ ПОСТОЯННЫЕ

Элементарный заряд	$e = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл
Масса покоя электрона	$m_e = 9,11 \cdot 10^{-31}$ кг
Масса покоя протона	$m_p = 1,67 \cdot 10^{-27}$ кг
Электрическая постоянная	$\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м
	$\frac{1}{4\pi\epsilon_0} = 9 \cdot 10^9$ м / Ф
Магнитная постоянная	$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м

2. ОСНОВНЫЕ ФОРМУЛЫ

Электростатика

1. Закон Кулона, описывающий взаимодействие между двумя точечными зарядами

$$F = \frac{kq_1q_2}{\epsilon r^2} .$$

В системе СИ $k = \frac{1}{4\pi\epsilon_0}$, где ϵ_0 – электрическая постоянная, ϵ – диэлектрическая проницаемость среды.

2. Напряженность электрического поля в точке, удаленной от точечного заряда q на расстояние r в вакууме ($\epsilon = 1$),

$$E = \frac{kq}{r^2} .$$

3. Потенциал электрического поля в точке, удаленной от точечного заряда q на расстояние r ,

$$\varphi = \frac{kq}{r} .$$

4. Теорема Гаусса для потока вектора \vec{E} через замкнутую поверхность S

$$\oint_S \vec{E} \cdot d\vec{S} = \oint_S E_n \cdot dS = \frac{q}{\epsilon_0},$$

где q – суммарный заряд, находящийся внутри объема, ограниченного замкнутой поверхностью S , E_n – проекция вектора напряженности на нормаль к поверхности.

5. Напряженность электрического поля и потенциал связаны соотношением:

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

причем $E_x = -\frac{\partial\varphi}{\partial x}$, $E_y = -\frac{\partial\varphi}{\partial y}$, $E_z = -\frac{\partial\varphi}{\partial z}$.

Проекция вектора \vec{E} на выделенное направление l

$$E_l = -\frac{\partial\varphi}{\partial l}$$

6. Соотношение между напряженностью \vec{E} и электрическим смещением \vec{D}

$$\vec{D} = \epsilon\epsilon_0\vec{E}.$$

7. Условия на границе раздела двух диэлектрических сред

$$D_{1n} = D_{2n}, \quad E_{1n}/E_{2n} = \epsilon_2/\epsilon_1,$$

$$D_{1\tau}/D_{2\tau} = \epsilon_1/\epsilon_2, \quad E_{1\tau} = E_{2\tau},$$

где D_{1n} , D_{2n} , E_{1n} , E_{2n} – нормальные к границе раздела составляющие векторов \vec{E} и \vec{D} ; $D_{1\tau}$, $D_{2\tau}$, $E_{1\tau}$, $E_{2\tau}$ – тангенциальные составляющие этих векторов.

8. Энергия системы неподвижных точечных зарядов

$$W = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^N q_i \varphi_i,$$

где φ_i – потенциал, создаваемый в той точке, где находится заряд q_i всеми зарядами, кроме i -го.

9. Энергия заряженного уединенного проводника

$$W = \frac{q\Phi}{2} .$$

10. Энергия заряженного конденсатора

$$W = \frac{C(\Delta\Phi)^2}{2} = \frac{q\Delta\Phi}{2} = \frac{q^2}{2C} .$$

11. Объемная плотность энергии электростатического поля

$$w = \frac{\epsilon\epsilon_0 E^2}{2} = \frac{(\vec{E} \cdot \vec{D})}{2} .$$

МАГНИТНОЕ ПОЛЕ

12. Связь между вектором магнитной индукции \vec{B} и вектором напряженности \vec{H} магнитного поля

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

где μ – магнитная проницаемость среды, μ_0 – магнитная постоянная.

13. Магнитный момент плоского контура с током:

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

где S – площадь поверхности контура, \vec{n} – единичный вектор нормали к поверхности контура.

14. Вращающий момент сил, действующий на контур с током,

$$\vec{M} = [\vec{p}_m \times \vec{B}] .$$

15. Закон Био – Савара-Лапласа для проводника с током I , элемент которого dl создает в некоторой точке поля индукцию $d\vec{B}$, записывается в виде

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

где $d\vec{l}$ – вектор, по модулю равный длине dl элемента проводника и совпадающий по направлению с током, \vec{r} – радиус-вектор, проведенный от элемента dl проводника в точку, где ищется поле, α – угол между векторами $d\vec{l}$ и \vec{r} .

16. Магнитная индукция поля прямого тока

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

17. Магнитная индукция поля в центре кругового витка с током

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

18. Закон Ампера

$$d\vec{F} = I [d\vec{l} \times \vec{B}], \quad dF = IBdl \sin \alpha,$$

где $d\vec{F}$ – сила, с которой магнитное поле \vec{B} действует на элемент проводника с током $d\vec{l}$, α – угол между вектором $d\vec{l}$ и вектором \vec{B} .

19. Магнитное поле, создаваемое зарядом Q , движущимся с нерелятивистской скоростью \vec{V}

$$d\vec{B} = \frac{\mu\mu_0 Q}{4\pi} \frac{[\vec{V} \times \vec{r}]}{r^3}, \quad dB = \frac{\mu\mu_0 QV \sin \alpha}{4\pi r^2},$$

где \vec{r} – радиус-вектор, проведенный от заряда Q в точку наблюдения, α – угол между вектором скорости \vec{V} и радиусом-вектором \vec{r} .

20. Сила, действующая на электрический заряд Q , движущийся в магнитном поле \vec{B} со скоростью \vec{V}

$$\vec{F} = Q[\vec{V} \times \vec{B}], \quad F = QVB \sin \alpha,$$

где α – угол между вектором скорости \vec{V} и вектором магнитной индукции \vec{B} .

21. Магнитное поле бесконечно длинного соленоида

$$B = \mu\mu_0 \frac{NI}{l},$$

где N – число витков в соленоиде, l – его длина.

22. Магнитное поле тороида

$$B = \mu\mu_0 \frac{NI}{2\pi r},$$

где N – число витков в тороиде, r – его радиус.

23. Поток вектора магнитной индукции через площадку dS

$$d\Phi = (\vec{B} \cdot d\vec{S}) = |\vec{B}| \cdot |d\vec{S}| \cos \alpha,$$

где $d\vec{S}$ – вектор, направленный по направлению нормали к площадке, а его модуль равен площади площадки, α – угол между нормалью к площадке и вектором магнитной индукции.

24. Работа по перемещению проводника с током в магнитном поле

$$dA = Id\Phi,$$

где $d\Phi$ – магнитный поток, пересеченный движущимся проводником.

25. Работа по перемещению замкнутого контура с током в магнитном поле

$$A = I\Delta\Phi,$$

где $\Delta\Phi$ – изменение магнитного потока, сцепленного с контуром.

26. Закон Фарадея: ЭДС электромагнитной индукции в контуре численно равна и противоположна по знаку скорости изменения магнитного потока через поверхность, ограниченную контуром,

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

Если контур состоит из N витков, то

$$\varepsilon_i = -\frac{d\Psi}{dt},$$

где $\Psi = \Phi N$ – потокосцепление; Φ – поток через один виток.

27. Индуктивность контура

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

где Φ – магнитный поток, сцепленный с контуром, I – ток в контуре.

28. Индуктивность соленоида

$$L = \mu\mu_0 \frac{N^2 S}{l},$$

где N – число витков в соленоиде; S – площадь; l – длина соленоида.

29. ЭДС самоиндукции при $L = \text{const}$:

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

30. Энергия магнитного поля, связанного с контуром,

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

31. Объемная плотность энергии

$$w = \frac{(\vec{B} \cdot \vec{H})}{2} = \frac{B^2}{2\mu\mu_0} .$$

3. ПРИМЕРЫ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ

Пример 1. Два заряда $q_1 = +4,5 q$ и $q_2 = -0,5 q$ находятся на расстоянии $l = 10$ см. Третий заряд, модуль которого $|q_3| = q$, может перемещаться вдоль прямой, проходящей через заряды q_1 и q_2 . Определите положение заряда q_3 , при котором он будет находиться в равновесии.

Решение. Заряд q_3 будет находиться в положении равновесия в точке пространства, где суммарная напряженность поля $\vec{E} = 0$. На отрезке, лежащем между зарядами q_1 и q_2 , такой точки нет, так как векторы напряженности \vec{E}_1 и \vec{E}_2 электрических полей, создаваемых соответственно зарядами q_1 и q_2 , направлены в одну сторону, и их сумма не может быть равной нулю.

В точках прямой, расположенных слева и справа от рассмотренного отрезка, векторы напряженности \vec{E}_1 и \vec{E}_2 направлены в противоположные стороны. Для того чтобы их сумма равнялась нулю, модули этих векторов должны быть равны, т. е. $E_1 = E_2$.

Учитывая, что $E_1 = \frac{kq_1q_2}{r_1^2}$, а $E_2 = \frac{kq_1q_2}{r_2^2}$, должно выполняться ус-

ловие

$$\frac{|q_1|}{r_1^2} = \frac{|q_2|}{r_2^2} .$$

Для любой точки, лежащей левее заряда q_1 , расстояние r_1 меньше расстояния r_2 . Поскольку по условию $|q_1| > |q_2|$, то E_1 всегда больше, чем E_2 . Точки с $E = 0$ в этой части прямой нет.

Рассмотрим точки на прямой, расположенные правее заряда q_2 . В этом случае $r_1 = r_2 + l$. В точке равновесия должно выполняться условие

$$\frac{|q_1|}{(r_2 + l)^2} = \frac{|q_2|}{r_2^2},$$

приводящее к уравнению

$$\left(\frac{q_1}{q_2} - 1 \right) r_2^2 - 2lr_2 - l^2 = 0.$$

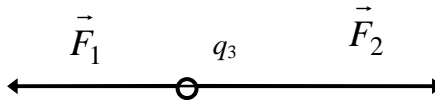
Из этого уравнения находим, что точка равновесия находится на 5 см правее заряда q_2 .

Равновесие заряда q_3 будет устойчивым, если при смещении этого заряда вправо возникает сила, направленная влево, стремящаяся вернуть заряд в прежнее положение. При перемещении заряда влево должна возникать сила, направленная вправо.

Предположим, что заряд q_3 положительный. Тогда в найденной нами точке равновесия сила F_1 , действующая на заряд q_3 со стороны положительного заряда q_1 , направлена вправо, а сила F_2 , действующая со стороны отрицательного заряда q_2 , направлена влево.

При смещении заряда q_3 вправо увеличивается расстояние как r_2 , так и $r_1 = l + r_2$. В результате уменьшаются обе силы. Учитывая, что $F_1 \sim 1/(l + r_2)^2$, а $F_2 \sim 1/r_2^2$, можно сделать вывод: с ростом r_2 сила F_1 убывает медленнее, чем сила F_2 . В результате результирующая сила направлена вправо и стремится удалить заряд q_3 еще дальше от точки равновесия. Равновесие неустойчивое.

Предположим теперь, что заряд q_3 – отрицательный. Теперь сила F_1 будет направлена влево, а сила F_2 – вправо.



В этом случае при смещении заряда q_3 вправо, как и в предыдущем случае, F_1 убывает медленнее, чем F_2 . Результирующая сила направлена влево и стремится вернуть заряд q_3 на прежнее место.

Рассмотрение смещения заряда q_3 влево приводит к тем же выводам. Таким образом, если заряд q_3 отрицательный, то положение равновесия является устойчивым.

Пример 2. Внутри плоскопараллельной непроводящей пластины толщиной d равномерно распределен положительный заряд с объемной плотностью ρ . Пластина расположена перпендикулярно оси x . Плоскость симметрии пластины проходит через начало отсчета на оси x . Определить зависимость напряженности E от x как внутри, так и вне пластины. Построить графики зависимости E_x (проекции вектора \vec{E} на ось x) от x .

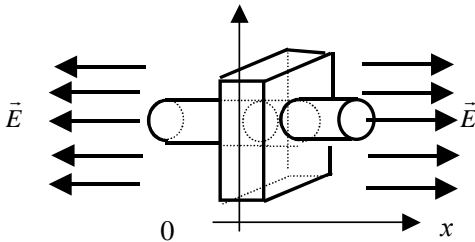
Решение. Для решения этой задачи воспользуемся теоремой Гаусса. Из соображений симметрии можно сделать следующий вывод:

а) $|\vec{E}(x)| = |\vec{E}(-x)|$;

б) напряженность поля E одинакова во всех точках плоскости, перпендикулярной оси x ;

в) силовые линии электрического поля параллельны оси x .

Полученные выводы позволяют выбрать форму замкнутой поверхности так, чтобы расчет потока вектора \vec{E} через нее осуществлялся наиболее просто. Такая поверхность может иметь, например, форму цилиндра. Основания цилиндра должны быть параллельны поверхности пластины. Образующие цилиндра должны быть параллельны оси x . Цилиндр должен быть расположен симметрично относительно пластины. В этом случае поток вектора \vec{E} через каждое из оснований цилиндра равен $(E \cdot s)$, где E – напряженность поля в точках, лежащих на основании, s – площадь основания.



Поток вектора \vec{E} через боковую поверхность цилиндра равен нулю, так как нормальная составляющая E_n к этой поверхности равна нулю. Таким образом, поток через всю замкнутую поверхность

$$\Phi_E = \int E_n ds = 2Es.$$

В соответствии с теоремой Гаусса

$$2Es = \frac{q}{\epsilon_0},$$

где q – заряд внутри выбранной поверхности.

Рассмотрим 2 случая:

1) $|x| \leq d/2$.

В этом случае объем V , ограниченный выбранной замкнутой поверхностью, равен $s2x$. Весь этот объем заполнен зарядом с объемной плотностью ρ . Следовательно, заряд внутри поверхности

$$q = \rho V = 2\rho sx.$$

Тогда можно записать

$$2Es = \frac{2\rho sx}{\epsilon_0}.$$

Из этого выражения следует, что

$$E(x) = \frac{\rho x}{\epsilon_0}.$$

2) $|x| \geq d/2$.

В этом случае заполнен зарядом не весь объем цилиндра, а только его часть, вырезающая из пластины объем $V = sd$.

Тогда

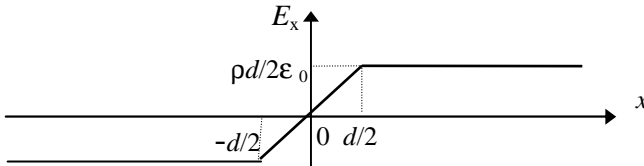
$$2Es = \frac{\rho sd}{\epsilon_0},$$

$$E(x) = \frac{\rho d}{2\epsilon_0}.$$

Таким образом, зависимость $E(x)$ имеет вид

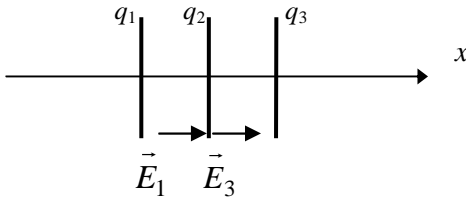
$$E(x) = \begin{cases} \frac{\rho d}{2\epsilon_0}, & |x| \geq \frac{d}{2} \\ \frac{\rho x}{\epsilon_0}, & |x| \leq \frac{d}{2} \end{cases}.$$

График зависимости E_x от x имеет вид



Внутри пластины напряженность возрастает пропорционально x , а вне пластины от x не зависит.

Пример 3. Три тонкие металлические пластины расположены параллельно друг другу, как показано на рисунке. Площадь каждой из пластин равна s . Заряд первой пластины $q_1 = q$. Заряд второй пластины $q_2 = 2q$. Третья пластина имеет заряд $q_3 = -3q$. Расстояние между пластинами во много раз меньше линейных размеров пластин. Определить величину и направление силы, действующей на среднюю пластину.



Решение. Средняя пластина, несущая заряд q_2 , находится в электростатическом поле, созданном внешними пластинами с зарядами q_1 и q_3 .

Первая пластина, с зарядом q_1 , в месте расположения средней пластины создает поле с напряженностью

$$E_1 = \frac{\sigma_1}{2\epsilon_0} = \frac{q_1}{2\epsilon_0 s} .$$

Направление вектора \vec{E}_1 совпадает с положительным направлением оси x .

Третья пластина, с зарядом q_3 , создает в том же месте поле с напряженностью

$$E_3 = \frac{\sigma_3}{2\epsilon_0} = \frac{|q_3|}{2\epsilon_0 s} = \frac{3q}{2\epsilon_0 s} .$$

Направление вектора \vec{E}_3 совпадает с направлением вектора \vec{E}_1 . В соответствии с принципом суперпозиции вектор напряженности результирующего поля равен сумме векторов напряженности каждого из полей

$$\vec{E} = \vec{E}_1 + \vec{E}_3 .$$

Поскольку векторы \vec{E}_1 и \vec{E}_3 имеют одинаковое направление, то

$$|E| = |E_1 + E_3| = \frac{2q}{\epsilon_0 s} .$$

Сила, действующая на среднюю пластину, несущую заряд q_2 равна

$$F = q_2 E = 4q^2/\epsilon_0 s .$$

Поскольку заряд q_2 положительный, направление вектора \vec{F} совпадает с направлением вектора напряженности \vec{E} . Следовательно, вектор \vec{F} направлен вдоль оси x .

Пример 4. Диэлектрик 1 с диэлектрической проницаемостью $\epsilon_1 = 2$ и диэлектрик 2 с диэлектрической проницаемостью $\epsilon_2 = 5$ имеют общую границу раздела. Силовые линии электрического поля перпендикулярны границе раздела. Напряженность поля E_1 в диэлектрике 1 равна 1000 В/м. Найти плотность энергии электрического поля в диэлектрике 2.

Решение. На границе раздела двух диэлектриков для нормальных составляющих векторов напряженности выполняется условие

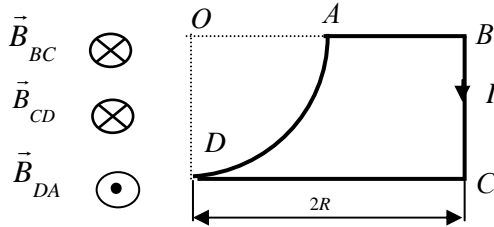
$$E_1 / E_2 = \epsilon_2 / \epsilon_1 ,$$

откуда $E_2 = E_1 \epsilon_1 / \epsilon_2$.

Плотность энергии электрического поля в диэлектрике 2

$$w = \epsilon_0 \epsilon_2 E_2^2 / 2 = \epsilon_0 \epsilon_2 (\epsilon_1 / \epsilon_2)^2 E_1^2 / 2 = \epsilon_0 \epsilon_1^2 E_1^2 / 2 \epsilon_2 = 3,54 \cdot 10^{-6} \text{ Дж/м}^3.$$

Пример 5. По контуру, изображенному на рисунке, течет ток силой $I = 20 \text{ А}$. Радиус изогнутой части $R = 0,4 \text{ м}$. Найти магнитную индукцию в точке O .



Решение. По принципу суперпозиции полей магнитная индукция в точке O равна векторной сумме магнитных индукций, создаваемых отдельными участками контура.

Решение задачи нужно начинать с определения направления векторов магнитной индукции от участков контура, пользуясь законом Био–Савара–Лапласа.

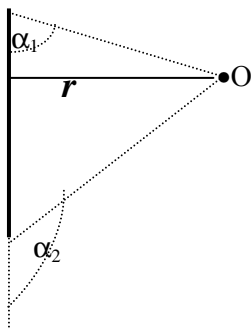
$\vec{B}_{AB} = 0$ в точке O , так как точка O лежит на продолжении отрезка AB (угол между векторами $d\vec{l}$ и \vec{r} равен 180°), что дает нулевой результат векторного произведения в законе Био – Савара – Лапласа.

$$\vec{B}_O = \vec{B}_{BC} + \vec{B}_{CD} + \vec{B}_{DA} ,$$

учитывая направления векторов, изображенные на рисунке,

$$|B_O| = |B_{BC} + B_{CD} - B_{DA}| .$$

В общем случае магнитная индукция, создаваемая отрезком провода с током, в точке, удаленной от проводника на расстояние r ,



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

Тогда для участка BC $\alpha_1 = \pi/2$, $\operatorname{tg}(180^\circ - \alpha_2) = \frac{OB}{BC} = \frac{2R}{R} = 2$,
 $\alpha_2 = 117^\circ$.

$$B_{BC} = \frac{\mu_0 I}{4\pi \cdot 2R} \left(\cos \frac{\pi}{2} - \cos 117^\circ \right) = \frac{0,45\mu_0 I}{8\pi R}.$$

Для участка CD : $\alpha_2 = \pi/2$, $\operatorname{tg}(\alpha_1) = \frac{OD}{DC} = \frac{R}{2R} = 0,5$, $\alpha_1 = 26^\circ$.

$$B_{CD} = \frac{\mu_0 I}{4\pi R} \cos 26^\circ = \frac{0,89\mu_0 I}{4\pi R}.$$

Для криволинейного участка AD :

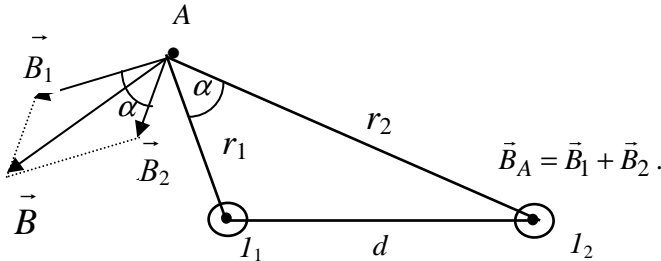
$$B_{DA} = \frac{\mu_0 I}{4\pi R} \int_0^{\pi/2} d\alpha = \frac{\mu_0 I}{4\pi R} \cdot \frac{\pi}{2} = \frac{\mu_0 I}{8R}.$$

$$B_O = \frac{\mu_0 I}{4R} \left(\frac{0,5}{2\pi} + \frac{0,89}{\pi} - 0,5 \right) = -2,3 \cdot 10^{-6} \text{ Тл.}$$

Знак « \leftarrow » указывает, что магнитная индукция направлена вдоль вектора \vec{B}_{DA} , т. е. из плоскости чертежа.

Пример 6. По двум бесконечно длинным прямым параллельным проводам, расстояние между которыми $d = 15$ см, текут токи $I_1 = 70$ А и $I_2 = 50$ А в одном направлении. Определить магнитную индукцию в точке, удаленной на расстояние $r_1 = 10$ см от первого провода и на расстояние $r_2 = 15$ см от второго.

Решение. По принципу суперпозиции полей магнитная индукция в точке A равна векторной сумме магнитных индукций, создаваемых токами I_1 и I_2 .



Модуль вектора \vec{B} можно найти по теореме косинусов

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

где $B_1 = \frac{\mu_0 I_1}{2\pi r_1}$, $B_2 = \frac{\mu_0 I}{2\pi r_2}$, $\cos \alpha = (r_1^2 + r_2^2 - d^2)/(2r_1 r_2)$.

Подставив все в формулу для магнитной индукции в точке A , найдем

$$B = 178 \text{ мкТл.}$$

Пример 7. В однородном магнитном поле с индукцией $B = 0,2$ Тл равномерно вращается квадратная рамка, состоящая из $N = 100$ витков. Рамка вращается с частотой $n = 5 \text{ с}^{-1}$. Сторона рамки $\alpha = 10$ мм. Ось вращения перпендикулярна оси симметрии рамки и направлению магнитного поля. Определить максимальную ЭДС индукции и ЭДС индукции, возникающую в рамке через $t = 16,6$ мс после начала вращения.

Решение. Мгновенное значение ЭДС индукции определяется законом Фарадея

$$\varepsilon_i = -\frac{d\Psi}{dt},$$

где $\Psi = N\Phi$ – потокосцепление катушки, Φ – поток через один виток.

При вращении рамки магнитный поток в произвольный момент времени определяется

$$\Phi = (\vec{B} \cdot \vec{S}) = BS \cos(\vec{B}, \vec{S}) = BS \cos \omega t, \quad \omega = 2\pi n.$$

Значение ЭДС индукции можно найти, продифференцировав выражение для потокосцепления по времени,

$$\varepsilon_i = -NBS\omega(-\sin \omega t) = 2\pi nNBa^2 \sin 2\pi nt.$$

Максимальное значение ЭДС индукции получается, если $\sin 2\pi nt = 1$

$$\varepsilon_{i \max} = 2\pi nNBa^2 = 0,06 \text{ В}.$$

Значение ЭДС индукции в момент времени $t = 16,6 \text{ мс} = 16,6 \cdot 10^{-3} \text{ с}$.

$$\varepsilon_i = \varepsilon_{i \max} \sin 2\pi nt = 0,06 \cdot 0,5 = 0,03 \text{ В}.$$

Пример 8. Протон, прошедший ускоряющую разность потенциалов $U = 0,5 \text{ кВ}$, влетел в однородное магнитное поле с индукцией $B = 2 \text{ мТл}$ и начал двигаться по окружности. Вычислить радиус окружности.

Решение. На протон действует сила Лоренца

$$\vec{F} = q[\vec{V} \times \vec{B}].$$

В условии задачи сказано, что протон движется по окружности. Из этого следует

1) вектор скорости перпендикулярен вектору магнитной индукции, а значит величина силы Лоренца $F = qVB$;

2) на протон действует нормальное ускорение $a_n = \frac{V^2}{R}$, где R – радиус окружности.

Приравнявая силу Лоренца и центростремительную силу, можно вычислить радиус окружности

$$R = \frac{mV}{qB}.$$

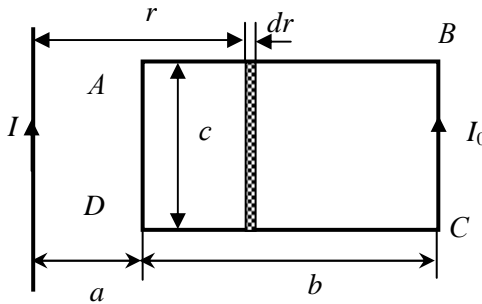
В этом выражении нам неизвестна скорость протона. Чтобы ее найти, надо воспользоваться законом сохранения энергии: кинетическая энергия протона равна изменению потенциальной энергии протона, прошедшего ускоряющую разность потенциалов U ,

$$\frac{mV^2}{2} = qU.$$

Выражая из закона сохранения энергии скорость и подставляя в выражение для радиуса окружности, получим

$$R = \frac{1}{B} \sqrt{\frac{2mU}{q}} = 1,62 \text{ м.}$$

Пример 9. В одной плоскости с бесконечным прямым проводником, по которому течет ток $I = 1 \text{ А}$, расположена прямоугольная рамка (рисунок). Расстояние $a = 2 \text{ см}$, $b = 5 \text{ см}$, $c = 4 \text{ см}$. Найти работу, которую надо совершить, чтобы удалить рамку за пределы магнитного поля. По рамке течет ток $I_0 = 2 \text{ А}$.



Решение. Работа по перемещению рамки с постоянным током в магнитном поле определяется потоком магнитной индукции через рамку в начальном (Φ_1) и конечном (Φ_2) состояниях

$$A = I_0(\Phi_2 - \Phi_1).$$

Когда рамка находится за пределами поля, поток магнитной индукции через нее равен 0 ($\Phi_2 = 0$). Следовательно, работа по перемещению рамки

$$A = -I_0\Phi_1.$$

Магнитное поле в этом примере неоднородно, поскольку оно создается бесконечным прямым током $B = \frac{\mu_0 I}{2\pi r}$, и магнитная индукция зависит от расстояния от провода до точки наблюдения. Чтобы найти поток вектора магнитной индукции через контур

в начальном состоянии, мы должны просуммировать элементарные магнитные потоки от участков контура, где магнитное поле постоянно. В качестве такого участка разумно выбрать прямоугольник бесконечно малой ширины dr , расположенный на расстоянии r от прямого тока. Поскольку мы рассматриваем бесконечно малую ширину, то можно предположить, что на этом участке магнитная индукция постоянна.

Элементарный поток

$$d\Phi_1 = (\vec{B} \cdot d\vec{S}) = B dS \cos 180^\circ = -B dS = -\frac{\mu_0 I}{2\pi r} c dr .$$

Отметим, что вектор магнитной индукции направлен за плоскость рисунка, а вектор $d\vec{S}$, совпадающий с направлением нормали, при заданном направлении тока I_0 направлен из плоскости рисунка. Поэтому угол между вектором магнитной индукции и элементом площади равен 180° .

Чтобы найти полный поток через контур Φ_1 , надо проинтегрировать по всем элементарным участкам

$$\Phi = \int d\Phi = - \int_a^{a+b} \frac{\mu_0 I}{2\pi r} c dr = -\frac{\mu_0 I}{2\pi} c \ln \frac{a+b}{a} .$$

Тогда искомая работа

$$A = -I_0 \left(-\frac{\mu_0 I}{2\pi} c \ln \frac{a+b}{a} \right) = \frac{\mu_0 I_0 I}{2\pi} c \ln \frac{a+b}{a} = 2 \cdot 10^{-8} \text{ Дж} .$$

4. ИНДИВИДУАЛЬНЫЕ КОНТРОЛЬНЫЕ ЗАДАНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ ПОЛЕ

ВАРИАНТ 1

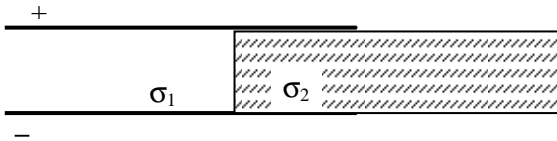
1. Расстояние a между двумя точечными положительными зарядами $q_1 = 20 \cdot 10^{-8}$ Кл и $q_2 = 5 \cdot 10^{-8}$ Кл равно $a = 3$ см. На каком расстоянии от первого заряда находится точка, в которой напряженность E поля зарядов равна нулю?

2. Используя условие задачи 1, рассчитайте, какая работа совершается при перенесении точечного заряда $q_0 = 10^{-8}$ Кл из бесконечности в найденную точку (с нулевой напряженностью).

3. На бесконечном тонкостенном цилиндре диаметром $d = 10$ см равномерно распределен заряд с поверхностной плотностью $\sigma = 8,85 \cdot 10^{-12}$ Кл/м². Определите напряженность поля в точке, отстоящей от поверхности цилиндра на $r = 10$ см. Качественно изобразите изменение потенциала внутри цилиндра и за его пределами.

4. Две бесконечные параллельные плоскости находятся на расстоянии $d = 0,5$ см друг от друга. На плоскостях равномерно распределены заряды с поверхностными плотностями $\sigma_1 = 0,2$ мкКл/м² и $\sigma_2 = -0,3$ мкКл/м². Определите $E(X)$ и $\phi(X)$ и постройте графики соответствующих зависимостей. Ось X считайте перпендикулярной плоскостям.

5. Плоский конденсатор, расстояние между пластинами которого $d = 1$ мм, находится под напряжением $U = 160$ В. Внутри конденсатора частично вставлена стеклянная пластина ($\epsilon = 7$). Определить \vec{D}_2 и \vec{E}_2 в стекле, а также поверхностные плотности зарядов σ_1 и σ_2 .



6. Найти потенциал в центре сферы радиуса R , заряженной с постоянной поверхностной плотностью σ .

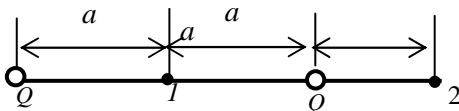
7. Найти объемную плотность энергии w электрического поля в точке, находящейся на расстоянии $l = 2$ см от поверхности заряженного шара радиуса $R = 1$ см, если поверхностная плотность заряда на шаре $\sigma = 1,75 \cdot 10^{-5}$ Кл/м².

8. Потенциал некоторого поля имеет вид $\phi = ay(\frac{y^2}{3} - x^2)$, где a – константа, Найти проекции вектора напряженности электрического поля на оси x и y и его модуль.

ВАРИАНТ 2

1. Электрическое поле создано двумя точечными зарядами $q_1 = 32$ нКл и $q_2 = -18$ нКл, находящимися на расстоянии $d = 50$ мм друг от друга. Определить напряженность \vec{E} и потенциал ϕ поля в точке, удаленной от первого заряда на $r_1 = 40$ мм и от второго на $r_2 = 30$ мм.

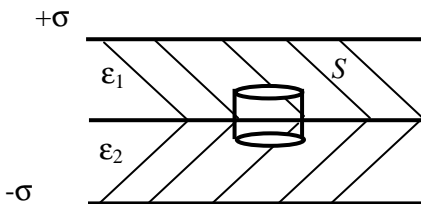
2. Электрическое поле создано двумя одинаковыми положительными зарядами Q . Найти работу A сил поля по перемещению заряда $q = 10$ нКл из точки 1 с потенциалом $\phi = 300$ В в точку 2.



3. Бесконечно длинный цилиндр радиуса R равномерно заряжен по объему с плотностью ρ . Определить напряженность E внутри цилиндра и снаружи. Построить график зависимости напряженности поля от расстояния r до оси цилиндра $E(r)$.

4. Электрическое поле создано двумя бесконечными параллельными пластинами, несущими равномерно распределенный по площади заряд с поверхностными плотностями $\sigma_1 = 1$ нКл/м² и $\sigma_2 = 3$ нКл/м². Расстояние между пластинами 1 см. Определить E и ϕ и построить график изменения напряженности и потенциала вдоль линии, перпендикулярной пластинам.

5. Пластины плоского конденсатора заряжены с поверхностной плотностью $\sigma = 200$ нКл/м². Пространство между пластинами заполнено двумя слоями диэлектрика с относительными диэлектрическими проницаемостями $\epsilon_1 = 3$ и $\epsilon_2 = 5$ соответственно. Найти поток вектора \vec{D} и поток вектора \vec{E} через цилиндр с площадью основания $S = 10$ см².



6. Потенциал некоторого электрического поля равен $\varphi = axz$, где a – постоянная. Найти модуль вектора \vec{E} и его проекции на оси x, z .

7. Тонкое полукольцо радиуса R равномерно заряжено с линейной плотностью $+\tau$. Определить напряженность электростатического поля \vec{E} в центре кривизны полукольца.

8. Найти работу, которую необходимо совершить, чтобы перенести точечный заряд $q = 42$ нКл из точки, находящейся на расстоянии $a = 1$ м, в точку, находящуюся на расстоянии $b = 1,5$ см от поверхности сферы радиусом $R = 2,3$ см с поверхностной плотностью заряда $\sigma = 4,3 \cdot 10^{-11}$ Кл/м².

ВАРИАНТ 3

1. Диполь с электрическим моментом $p = 0,12$ нКл·м образован двумя точечными зарядами $Q = \pm 1,0$ нКл. Найти напряженность \vec{E} и потенциал φ электрического поля в точке, находящейся на расстоянии $r = 80$ мм от центра диполя в направлении, перпендикулярном оси диполя.

2. Определить работу A , которую нужно затратить, чтобы увеличить на $\Delta x = 0,2$ мм расстояние x между пластинами плоского конденсатора, заряженными зарядами величиной $q = 0,2$ мкКл. Площадь каждой пластины $S = 400$ см². В зазоре между пластинами – воздух.

3. Две концентрические металлические сферы радиусами $R_1 = 6,0$ см и $R_2 = 15$ см несут соответственно заряды $q_1 = + 8,85 \cdot 10^{-12}$ и $q_2 = - 8,85 \cdot 10^{-12}$ Кл. Найти напряженность поля в точках, отстоящих от центра сферы на расстояниях: 1) $r_1 = 5,0$ см, 2) $r_2 = 10$ см, 3) $r_3 = 25$ см. Качественно изобразить изменение потенциала внутри сфер и за их пределами.

4. Электрическое поле создано двумя бесконечными параллельными пластинами, несущими равномерно распределенный по площади заряд с поверхностными плотностями $\sigma_1 = -2$ нКл/м² и $\sigma_2 = +5$ нКл/м². Расстояние между пластинами $d = 0,8$ см. Определить напряженность E и потенциал φ и построить график их изменения вдоль линии, перпендикулярной пластинам.

5. Между пластинами плоского конденсатора находится плотно прилегающая стеклянная пластина ($\epsilon = 7$). Конденсатор

заряжен до разности потенциалов $U = 100$ В. Какова будет разность потенциалов U_1 , если вытащить стеклянную пластину из конденсатора?

6. В вершинах равностороннего треугольника со стороной a закреплены три одинаковых шарика массой m и зарядом q каждый. Какую максимальную скорость приобретет каждый из шариков, если им предоставить возможность двигаться свободно?

7. Потенциал поля на оси кольца радиусом R , равномерно заряженного с линейной плотностью τ , имеет вид

$$\varphi = \frac{\tau R}{2\varepsilon_0 \sqrt{R^2 + x^2}},$$
 где x – расстояние от плоскости кольца до заданной точки. Найти величину и направление вектора напряженности \vec{E} как функцию расстояния x .

8. Имеется два точечных заряда $-q$ и $+Q$ с массами m и M . На каком расстоянии d друг от друга должны быть расположены заряды, чтобы во внешнем однородном электрическом поле E , направленном вдоль прямой, проходящей через заряды, они ускорились как единое целое, т. е. не меняя взаимного расположения?

ВАРИАНТ 4

1. Расстояние l между двумя зарядами $Q = \pm 3,2$ нКл диполя равно $l = 12$ см. Найти напряженность и потенциал поля, созданного диполем, в точке, удаленной на $r = 8$ см как от первого, так и от второго зарядов.

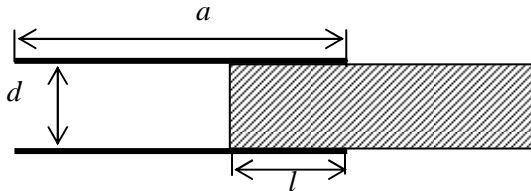
2. На какое расстояние могут сблизиться два электрона, если они движутся навстречу друг другу с относительной скоростью 10^8 м/с ?

3. Две длинные тонкостенные коаксиальные трубки радиусами $R_1 = 2$ см и $R_2 = 4$ см соответственно несут заряды, равномерно распределенные по длине, с линейными плотностями $\tau_1 = 10^{-3}$ мкКл/м и $\tau_2 = -5 \cdot 10^{-3}$ мкКл/м. В пространстве между трубками – воздух. Определить напряженность поля в точках, находящихся на расстоянии $r_1 = 1$ см, $r_2 = 3$ см, $r_3 = 5$ см от оси трубок. Построить график зависимости напряженности от расстояния до оси трубок $E_r(r)$.

4. Три плоскопараллельные пластины, расположенные на малом расстоянии друг от друга, равномерно заряжены. Поверхностные плотности зарядов пластин соответственно равны

$\sigma_1 = +3 \cdot 10^{-8}$ Кл/м², $\sigma_2 = -5 \cdot 10^{-8}$ Кл/м² и $\sigma_3 = +8 \cdot 10^{-8}$ Кл/м². Найти напряженность поля в точках, лежащих между пластинами и с внешней стороны. Построить график зависимости напряженности поля от расстояния, взяв за начало отсчета положение первой пластины.

5. Определить емкость плоского конденсатора с прямоугольными пластинами длины a и ширины b , расстояние между пластинами d , вдоль стороны a , которого на глубину l вставлена диэлектрическая пластина с относительной диэлектрической проницаемостью ϵ .



6. В вершинах квадрата со стороной a закреплены четыре одинаковых шарика массой m и зарядом q каждый. Какую максимальную скорость приобретет каждый из шариков, если им предоставить возможность двигаться свободно?

7. Напряженность электрического поля внутри и на поверхности шара, заряженного с постоянной объемной плотностью ρ ,

выражается формулой $E = \frac{\rho r}{3\epsilon_0}$, где r – расстояние от центра шара,

ра. Найти выражение $\phi(r)$ для потенциала точек внутри шара и вычислить разность потенциалов между центром шара и его поверхностью, если $R = 10$ см, $\rho = 50$ нКл/м³.

8. Как изменится энергия заряженного плоского конденсатора с вакуумным зазором, если заполнить его наполовину жидкостью с диэлектрической проницаемостью ϵ ?

ВАРИАНТ 5

1. Заряды $q_1 = 10$ мкКл и $q_2 = -10$ мкКл находятся на расстоянии $d = 10$ см друг от друга. Определить напряженность \vec{E} и потенциал поля ϕ в точке, удаленной на расстояние $r = 10$ см

от первого заряда и лежащей на линии, проходящей через первый заряд перпендикулярно направлению от q_1 к q_2 .

2. Предположим, что два протона в ядре гелия расположены на расстоянии $d = 1,5 \cdot 10^{-15}$ м друг от друга. Вычислите: а) электростатическую силу между ними; б) работу, которую нужно совершить, чтобы сблизить протоны на указанное расстояние. Заряд протона $q = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл.

3. Расстояние между двумя длинными тонкими проволоками, расположенными параллельно друг другу, равно $d = 16$ см. Проволоки равномерно заряжены разноименными зарядами с линейной плотностью $|\tau| = 150$ мКл/м. Какова напряженность поля \vec{E} в точке, удаленной на расстояние $a = 10$ см как от первой, так и от второй проволоки?

4. Три плоскопараллельные пластины, расположенные на малом расстоянии друг от друга, равномерно заряжены с поверхностной плотностью $\sigma = 5 \cdot 10^{-8}$ Кл/м² каждая. Найти напряженность поля в точках, лежащих между пластинами и с внешней стороны. Построить график зависимости напряженности поля от расстояния, взяв за начало отсчета положение первой пластины.

5. Определить электрическую емкость C плоского конденсатора с двумя слоями диэлектриков фарфора толщиной $d_1 = 2$ мм ($\epsilon_1 = 5$) и эбонита $d_2 = 1,5$ мм ($\epsilon_2 = 3$), если площадь каждой из пластин равна $S = 100$ см², а расстояние между пластинами $d = 3,5$ мм.

6. Два металлических шарика радиусами $R_1 = 5,0$ см и $R_2 = 10$ см имеют заряды $q_1 = 40$ нКл и $q_2 = -20$ нКл, соответственно. Найти энергию W , которая выделится при разряде, если шары соединить проводником.

7. Объемный заряд с плотностью $\rho = 2$ нКл/м³ равномерно распределен между двумя концентрическими сферическими поверхностями, причем радиус внутренней поверхности $R_1 = 10$ см, наружной $R_2 = 50$ см. Найти напряженность поля E в точках, отстоящих от центра сфер на расстояниях $r_1 = 3$ см; $r_2 = 12$ см; $r_3 = 56$ см.

8. Пространство между пластинами плоского конденсатора заполнено диэлектриком, диэлектрическая проницаемость которого линейно изменяется от значения ϵ_1 у одной пластины до значения $\epsilon_2 < \epsilon_1$ у другой. Расстояние между пластинами d , площадь каждой из них равна S . Найти емкость конденсатора.

ВАРИАНТ 6

1. По тонкому кольцу $R = 10$ см равномерно распределен заряд с линейной плотностью $\tau = 10$ нКл/м. Определить напряженность \vec{E} в точке, лежащей на оси кольца на расстоянии $a = 12$ см от центра.

2. Тонкий стержень согнут в кольцо радиусом $R = 10$ см и заряжен с линейной плотностью $\tau = 300$ нКл/м. Какую работу A надо совершить, чтобы перенести заряд $q = 50$ нКл из центра кольца в точку, расположенную на оси кольца на расстоянии $l = 20$ см его центра?

3. На поверхности металлической пластины распределен заряд с поверхностной плотностью $\sigma = 150$ нКл. Пользуясь теоремой Гаусса, определить напряженность поля \vec{E} снаружи пластины вблизи ее поверхности.

4. Электрическое поле создано бесконечными параллельными пластинами, несущими равномерно распределенный по площади заряд с поверхностными плотностями $\sigma_1 = 10$ нКл/м² и $\sigma_2 = 3$ нКл/м². Расстояние между пластинами $d = 6$ мм. Определить напряженность \vec{E} и потенциал ϕ и построить график их изменения вдоль линии, перпендикулярной пластинам. Как изменятся графики, если расстояние между пластинами увеличить в два раза?

5. Емкость плоского конденсатора равна $C = 111$ пФ. Диэлектрик – фарфор ($\epsilon = 5$). Конденсатор зарядили до разности потенциалов $U = 600$ В и отключили от источника напряжения. Какую работу A нужно совершить, чтобы вынуть диэлектрик из конденсатора? Трение пренебрежимо мало.

6. Пластины плоского конденсатора площадью $S = 10^{-2}$ м² каждая притягиваются силой $F = 1,2 \cdot 10^{-2}$ Н. Пространство между пластинами заполнено диэлектриком с диэлектрической проницаемостью $\epsilon = 2$. Определить модуль вектора электрического смещения D внутри конденсатора и заряд каждой из пластин.

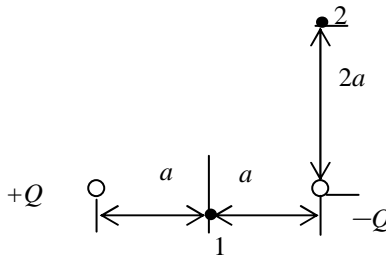
7. Капля массой $m = 5,6 \cdot 10^{-9}$ г поднимается вертикально вверх между пластинами горизонтально расположенного конденсатора с ускорением $a = 1,2$ м/с². Найти поверхностную плотность заряда σ на пластинах конденсатора, если заряд капли равен 10 зарядам электрона.

8. Два одинаковых плоских воздушных конденсатора соединены последовательно и подключены к источнику ЭДС. Внутри одного из них вносят диэлектрик с диэлектрической проницаемостью ϵ , заполняющей все пространство между обкладками. Как изменится напряженность электрического поля в этом конденсаторе?

ВАРИАНТ 7

1. Тонкое кольцо радиусом $R = 16$ см несет заряд, равномерно распределенный с линейной плотностью $\tau = 10$ нКл/м. Какова напряженность \vec{E} электрического поля в точке, равноудаленной от всех точек кольца на расстояние $r = 20$ см ?

2. Определите работу A_{12} по перемещению заряда из точки 1 в точку 2 в поле созданном двумя разноименными зарядами (см. рисунок). $|Q| = 10$ мкКл, $a = 10$ см.



3. Равномерно заряженную с поверхностной плотностью $\sigma = 10$ нКл/м² плоскость пересекает сфера, центр которой лежит на плоскости. Поток вектора \vec{E} через сферу равен $3,2$ В·м. Определить радиус сферы.

4. Электрическое поле создано двумя металлическими параллельными пластинами, которые подключены к источнику тока с ЭДС $= 100$ В. Положительная пластина заземлена. Расстояние между пластинами 5 мм. Построить график зависимости напряженности $E(x)$ и потенциала $\phi(x)$, если ось x перпендикулярна плоскости пластин.

5. В плоский конденсатор вдвинули плитку парафина ($\epsilon = 2$) толщиной $d = 1$ см, которая вплотную прилегает к его пластинам. Насколько нужно увеличить расстояние между пластинами, чтобы получить прежнюю емкость?

6. На расстоянии $r_1 = 4.0$ см от бесконечно длинной прямой заряженной нити находится точечный заряд $q = 0,66$ нКл. Под действием поля заряд приближается к нити до расстояния $r_2 = 2,0$ см. При этом совершается работа $A = 50 \cdot 10^{-7}$ Дж. Найти линейную плотность заряда τ нити.

7. Потенциал поля внутри заряженного шара зависит только от расстояния до его центра r по закону $\phi = ar + b$, где a и b – константы. Найти объемную плотность заряда ρ внутри шара.

8. Тонкая бесконечная нить равномерно заряжена с линейной плотностью τ . Пользуясь принципом суперпозиции, найти напряженность поля E , в точке находящейся на расстоянии r от нити.

ВАРИАНТ 8

1. Три одинаковых одноименных заряда q расположены в вершинах равностороннего треугольника. Какой заряд Q противоположного знака нужно поместить в центре этого треугольника, чтобы результирующая сила, действующая на каждый заряд, была равна нулю?

2. Диполь с электрическим моментом $p = 100$ пКл·м свободно устанавливается в однородном электрическом поле напряженностью $E = 150$ кВ/м. Вычислить работу A , необходимую для того, чтобы повернуть диполь на угол $\alpha = 180^\circ$.

3. Внутри длинного металлического полого толстостенного цилиндра с внутренним радиусом $R_1 = 2$ см и внешним $R_2 = 5$ см вдоль оси расположена тонкая проволока, несущая заряд с линейной плотностью $\tau = 6 \cdot 10^{-4}$ мкКл/м. Проволоку сместили до соприкосновения с внутренней поверхностью цилиндра. Найти распределение напряженности $E(r)$ вдоль оси r , перпендикулярной оси цилиндра с началом отсчета на этой оси.

4. Какое поле создали бы две безграничные взаимно перпендикулярные плоскости, если бы на них были равномерно нанесены электрические заряды одного знака с поверхностной плотностью заряда на одной σ , а на другой 2σ ? Определить эквипотенциальные поверхности и показать их на рисунке.

5. Пространство между пластинами плоского конденсатора заполнено диэлектриком (фарфор, $\epsilon = 5$), объем V которого равен 100 см³. Поверхностная плотность заряда $\sigma = 8,85$ нКл/м². Вычислить работу A , которую необходимо совершить, чтобы уда-

лить диэлектрическую пластину из конденсатора. Трением пренебречь.

6. Найти объемную плотность энергии w электрического поля на расстоянии $r = 2,0$ см от бесконечно длинной нити, заряженной с линейной плотностью $\tau = 4,2$ нКл/м.

7. Две концентрические проводящие сферы радиусами $R_1 = 12$ см и $R_2 = 18$ см заряжены одноименно. Заряд внутренней сферы $q_1 = 1$ мкКл, заряд внешней сферы $q_2 = 2$ мкКл. Найти разность потенциалов $\Delta\phi$ между сферами.

8. По четверти кольца радиусом $r = 6,1$ см равномерно распределен положительный заряд с линейной плотностью $\tau = 64$ нКл/м. Найти силу F , действующую на заряд $q = 12$ нКл, расположенный в центре кольца.

ВАРИАНТ 9

1. В вершинах квадрата со стороной a находятся одинаковые одноименные заряды, равные q . Какой заряд Q противоположного знака необходимо поместить в центре квадрата, чтобы результирующая сила, действующая на каждый заряд, была равна нулю?

2. Параллельно бесконечной пластине, несущей заряд, равномерно распределенный по площади с поверхностной плотностью заряда $\sigma = 20$ нКл/м², расположена тонкая нить с равномерно распределенным по длине зарядом с линейной плотностью $\tau = 0,4$ нКл/м. Определить работу по перемещению (в расчете на 1 м длины проводника нити) при удалении его от плоскости на 3 см.

3. Металлический шар радиусом $R_1 = 3$ см, несущий заряд $q_1 = -20$ нКл, окружен концентрической сферой радиусом $R_2 = 5$ см, равномерно по поверхности заряженной зарядом $q_2 = 40$ нКл. Найти напряженность поля E на расстояниях $r_1 = 2$ см, $r_2 = 4$ см, $r_3 = 5$ см от центра шара. Построить зависимость напряженности $E(r)$ и потенциала $\phi(r)$.

4. Электрическое поле создано двумя металлическими параллельными пластинами, которые подключены к источнику ЭДС $E = 100$ В. Положительная пластина заземлена. Расстояние между пластинами 10 мм. Построить:

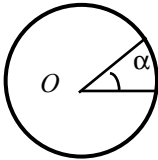
а) графики зависимостей напряженности $E(x)$ и потенциала $\phi(x)$, если ось x перпендикулярна плоскости пластин,

б) графики $E(x)$ и $\varphi(x)$ при условии, что расстояние между пластинами увеличено вдвое.

5. На плоский воздушный конденсатор с толщиной слоя $d = 2,5$ см подается напряжение $U = 50$ кВ. Будет ли пробит конденсатор, если диэлектрическая прочность воздуха $E_B = 30$ кВ/см? Будет ли пробит конденсатор, если между его обкладками (параллельно им) ввести стеклянную пластину толщиной $d_1 = 2,0$ см? Диэлектрическая прочность стекла $E_C = 100$ кВ/см.

6. Потенциал поля, создаваемого некоторой системой зарядов имеет вид $\varphi = \varphi_0 \left(\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} \right)$, где $\varphi_0 = 100$ В; $a = 2$ м; $b = 1$ м. Определить напряженность поля E в точке C с координатами $x_C = 1$ м; $y_C = 2$ м.

7. Сферическая оболочка радиуса $R_1 = 5,0$ см равномерно заряженная зарядом $q = 20$ нКл, расширилась под действием электрических сил до радиуса $R_2 = 10$ см. Определить работу электрических сил в процессе этого расширения.



8. Найти напряженность E электростатического поля в центре окружности радиусом r , по которой распределен заряд с линейной плотностью $\tau = \tau_0 \sin \alpha$, где τ_0 – константа (рисунок).

ВАРИАНТ 10

1. В вершинах равностороннего треугольника со стороной $a = 0,2$ м помещены одноименные заряды, для которых $|q| = 2 \cdot 10^{-9}$ Кл. Найти напряженность поля E в точке, расположенной на середине одной из сторон треугольника.

2. Какая совершается работа при перенесении точечного заряда $q = 2 \cdot 10^{-8}$ Кл из бесконечности в точку, находящуюся на расстоянии $r = 1$ см от поверхности сферы радиусом $R = 2$ см, заряженной с поверхностной плотностью заряда $\sigma = 10^{-5}$ Кл/м²?

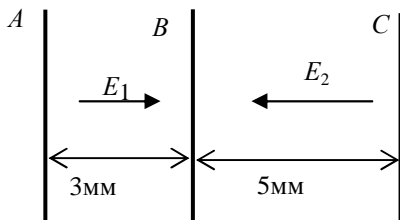
3. Шар радиуса $R = 1,0$ м равномерно заряжен по объему. Потенциал электростатического поля на поверхности шара $\varphi_0 = 1000$ В. Зависимость потенциала φ от расстояния до центра шара r имеет вид

$$\varphi(r) = \left\{ \begin{array}{l} \frac{2}{3}\varphi_0 - \frac{1}{2}\varphi_0 \frac{r^2}{R^2}, \text{ если } r < R \\ \varphi_0 \frac{r^2}{R^2}, \text{ если } r \geq R \end{array} \right\}.$$

Найти зависимость напряженности поля $E(r)$, изобразить ее на графике и вычислить значения E при $r_1 = 0,5$ м и $r_2 = 1,5$ м.

4. Пусть имеются три заряженные пластины, которые расположены так, как показано на рисунке. Потенциал пластины A равен нулю. Слева от A и справа от C $E = 0$, $E_1 = 300$ В/м, $E_2 = = 200$ В/м. Найти:

- потенциал φ_B ;
- потенциал φ_C ;
- плотности зарядов на каждой из пластин, считая их бесконечно большими.



5. Плоский конденсатор заполнен двумя слоями диэлектрика: первый слой толщиной $d = 1,0$ см – слюда ($\epsilon_1 = 6$), второй такой же толщины – стекло ($\epsilon_2 = 10$). При каком напряжении произойдет пробой конденсатора? Диэлектрическая прочность слюды $E_1 = 800$ кВ/см, стекла – $E_2 = 300$ кВ/см.

6. Потенциал поля, создаваемого некоторой системой зарядов, имеет вид $\varphi = A(x^2 + y^2)$, где $A = 100$ В/м²; $a = 2$ м; $b = 1$ м. Найдите напряженность поля E в точке C с координатами $x_C = y_C = 2$ м.

7. Два электрона в состоянии покоя помещены на расстоянии $a = 1,0$ см друг от друга. Затем, под действием сил взаимного отталкивания, они начинают двигаться. Определите максимальную скорость каждого электрона.

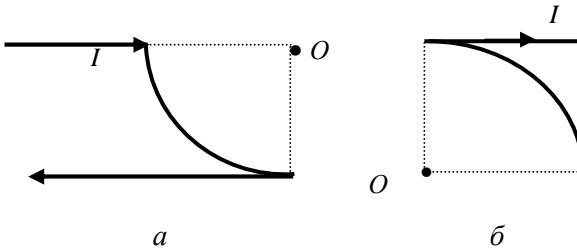
8. Две одинаковые капли воды заряжены одинаковым зарядом $|q| = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл. Сила кулоновского отталкивания капелек уравнивается силой их взаимного гравитационного притяжения. Найти радиусы капелек.

МАГНИТНОЕ ПОЛЕ

ВАРИАНТ 1

1. Расстояние между двумя длинными параллельными проводниками $d = 50$ мм. По проводам в одном направлении текут токи силой $I = 30$ А каждый. Найти индукцию магнитного поля \vec{B} в точке, находящейся на расстоянии $r_1 = 40$ мм от одного и $r_2 = 30$ мм от другого провода.

2. Проводник с током $I = 20$ А лежит в плоскости и изогнут так, как показано на рисунке. Радиус изогнутой части проводника $R = 40$ см. Определите величину и изобразите направление вектора магнитной индукции \vec{B} в точке O .



3. Проволочный виток радиусом $R = 5$ см находится в однородном магнитном поле с индукцией $B = 0,1$ Тл. Плоскость витка образует с направлением поля угол 60° . По витку течет ток силой $I = 4$ А. Найти и изобразить на чертеже магнитный момент витка \vec{p}_m и вращающий момент \vec{M} , действующий на виток.

4. 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 окружности R , магнитный момент возникшего кругового тока \vec{p}_m и момент импульса протона L .

5. Рамка площадью $S = 200 \text{ см}^2$ вращается, делая $n = 10$ оборотов в секунду относительно оси, лежащей в плоскости рамки перпендикулярно линиям индукции однородного магнитного поля с индукцией $B = 0,2 \text{ Тл}$. Построить график зависимости магнитного потока Φ , пронизывающего рамку и ЭДС индукции ε_i от времени. Найти максимальное значение ЭДС индукции $\varepsilon_{i \text{ max}}$.

6. Сопротивление тороида $R = 20 \text{ Ом}$. Найти его индуктивность L , если за время $t = 10 \text{ мс}$ в его обмотке выделяется тепло, равное энергии магнитного поля внутри тороида. Магнитное поле считать однородным.

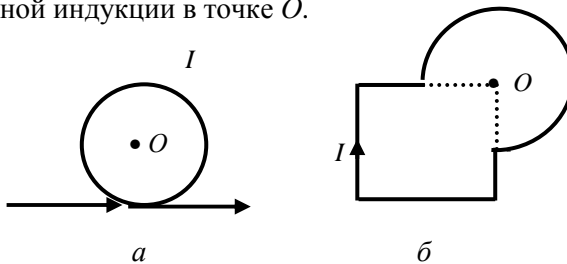
7. Квадратная рамка со стороной $a = 10 \text{ см}$ находится в однородном магнитном поле с индукцией $B = 2 \text{ Тл}$. В рамке течет ток силой $I = 2 \text{ А}$. Плоскость рамки расположена перпендикулярно линиям индукции магнитного поля. Найти работу A , которую надо совершить, чтобы повернуть рамку относительно оси, совпадающей с одной из сторон рамки, на угол: а) 90° ; б) 180° .

8. Палочка из неизвестного вещества, помещенная между полюсами магнита в вакууме, расположилась вдоль магнитного поля. После заполнения пространства между полюсами магнита некоторой жидкостью палочка расположилась поперек поля. Каковы магнитные свойства вещества палочки и жидкости?

ВАРИАНТ 2

1. Расстояние между двумя длинными параллельными проводами $d = 50 \text{ мм}$. По проводам в противоположном направлении текут токи силой $I = 40 \text{ А}$ каждый. Найти индукцию магнитного поля \vec{B} в точке, находящейся на расстоянии $r_1 = 40 \text{ мм}$ от одного и $r_2 = 30 \text{ мм}$ от другого провода.

2. Проводник с током $I = 20 \text{ А}$ лежит в плоскости и изогнут так, как показано на рисунке. Радиус изогнутой части проводника $R = 40 \text{ см}$. Определите величину и изобразите направление вектора магнитной индукции в точке O .



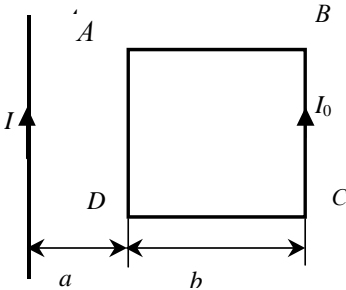
3. Квадратная рамка со стороной $a = 10$ см находится в однородном магнитном поле с индукцией $B = 0,2$ Тл. Плоскость рамки составляет угол 30° с направлением поля. По рамке течет ток силой $I = 8$ А. Найти и изобразить на чертеже магнитный момент витка \vec{p}_m и вращающий момент \vec{M} сил, действующих на рамку.

4. Электрон движется в однородном магнитном поле напряженностью $H = 4000$ А/м со скоростью $V = 10\,000$ км/с, направленной перпендикулярно вектору магнитной индукции. Определить силу F , с которой поле действует на электрон, радиус окружности R , по которой движется электрон, и период его обращения T .

5. Индукция магнитного поля между полюсами двухполюсного генератора $B = 0,8$ Тл. Ротор имеет $N = 100$ витков площадью $S = 400$ см². Сколько оборотов в минуту делает якорь, если максимальное значение ЭДС индукции $\varepsilon_{i\max} = 200$ В.

6. Индуктивность соленоида длиной $l = 1$ м и площадью поперечного сечения $S = 20$ см² равна $L = 0,4$ мГн. Определить силу тока в соленоиде I , при которой объемная плотность энергии магнитного поля внутри соленоида равна $w = 0,1$ Дж/м³.

7. В одной плоскости с бесконечным прямым проводником, по которому течет ток $I = 1$ А, расположена квадратная рамка (рисунок). Расстояние $a = 2$ см, $b = 5$ см. Найти магнитный поток, пронизывающий рамку, если по рамке течет ток $I_0 = 5$ м.



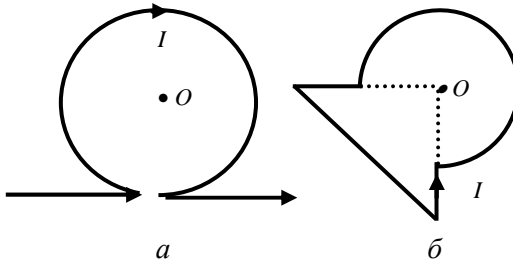
8. Палочка из неизвестного вещества, помещенная между полюсами магнита в вакууме, расположилась вдоль магнитного поля. После заполнения пространства между полюсами магнита некоторой жидкостью ориентация палочки не изменилась. Каковы магнитные свойства вещества палочки и жидкости?

ВАРИАНТ 3

1. Расстояние между двумя длинными параллельными проводниками $d = 10$ см. По проводникам в одном направлении текут токи силой $I = 40$ А каждый. Найти индукцию магнитного поля

в точках A и B , расположенных на линии, соединяющей эти проводники, и отстоящих от первого проводника на $r = 30$ см в одну и в другую сторону.

2. Проводник с током $I = 20$ А лежит в плоскости и изогнут так, как показано на рисунке. Радиус изогнутой части проводника $R = 60$ см. Определите величину и изобразите направление вектора магнитной индукции в точке O .



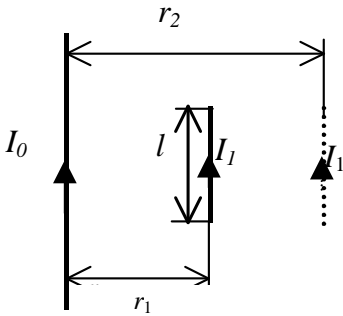
3. Рамка гальванометра длиной $a = 4$ см и шириной $b = 1,5$ см, содержащая $N = 200$ витков тонкой проволоки, находится в магнитном поле с индукцией $B = 0,1$ Тл. Плоскость рамки параллельна линиям индукции. По виткам течет ток силой $I = 2$ мА. Найдите и изобразите на чертеже магнитный момент рамки \vec{p}_m и вращающий момент \vec{M} , действующий на рамку.

4. Два иона, имеющие одинаковый заряд, но различные массы, влетели в однородное магнитное поле. Первый ион начал двигаться по окружности радиусом $R_1 = 5$ см, второй ион – по окружности радиуса $R_2 = 2,5$ см. Определить отношение масс ионов, если они прошли одинаковую ускоряющую разность потенциалов U .

5. Катушка из $N = 1000$ витков с площадью поперечного сечений $S = 100$ см², расположенная перпендикулярно магнитному полю Земли, поворачивается за $t = 1$ с на угол 90° . В катушке наводится ЭДС со средним значением $\epsilon_{i\text{ ср}} = 0,6$ мВ. Найти величину магнитного поля Земли.

6. В тороиде сечением $S = 8$ см² создан магнитный поток $\Phi = 20$ мкВб. Определить объемную плотность энергии внутри тороида w . Магнитное поле считать однородным во всем объеме тороида.

7. Прямой проводник длиной $l = 10$ см, по которому течет ток $I_1 = 5$ А, находится вблизи бесконечного провода с током $I_0 = 2$ А и параллелен ему. Какую работу надо совершить, чтобы переместить проводник длиной l параллельно самому себе с расстояния $r_1 = 3$ мм от бесконечного проводника на расстояние $r_2 = 15$ мм?

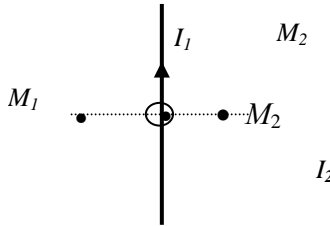


8. Определить намагничённость тела при насыщении, если магнитный момент каждого атома равен магнетону Бора, а концентрация атомов $n = 6,0 \cdot 10^{28} \text{ м}^{-3}$.

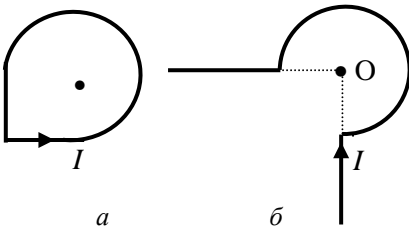
магнетону Бора, а концентрация атомов $n = 6,0 \cdot 10^{28} \text{ м}^{-3}$.

ВАРИАНТ 4

1. По двум бесконечно длинным проводникам текут одинаковые токи $I_1 = I_2 = 20$ А. Расстояние между проводниками $d = 10$ см. Найти индукцию магнитного поля в точках M_1 и M_2 , если расстояние от первого проводника до точек M_1 и M_2 $r = 4$ см.



2. Проводник с током $I = 20$ А лежит в плоскости и изогнут так, как показано на рисунке. Радиус изогнутой части проводника $R = 60$ см. Определите величину и изобразите направление вектора магнитной индукции в точке О.



3. Примем, что электрон в невозбужденном атоме водорода движется по окружности радиуса $r = 0,58 \cdot 10^{-8}$ см. Определите магнитный момент эквивалентного кругового тока \vec{p}_m и

Определите магнитный момент эквивалентного кругового тока \vec{p}_m и

механический момент \vec{M} , действующий на круговой ток, если атом помещен в магнитное поле с индукцией $B = 0,2$ Тл, направленное параллельно плоскости орбиты. Изобразите на чертеже векторы механического и магнитного моментов.

4. Перпендикулярно однородному электрическому полю напряженностью $E = 800$ В/м возбуждено однородное магнитное поле напряженностью $H = 40$ А/м. Пучок электронов, движущихся перпендикулярно линиям напряженности того и другого поля, не испытывает никакого отклонения. Определите скорость электронов v .

5. В однородном магнитном поле с индукцией $B = 0,4$ Тл вращается стержень длиной $l = 10$ см. Ось вращения параллельна линиям индукции и проходит через один из концов стержня перпендикулярно его длине. Определить ЭДС индукции ε_i , возникающую на концах стержня, если он делает $n = 16$ об/с.

6. Обмотка электромагнита, находясь под постоянным напряжением, имеет сопротивление $R = 10$ Ом и индуктивность $L = 0,3$ Гн. Определить время t , за которое в обмотке выделится тепло, равное энергии магнитного поля в сердечнике.

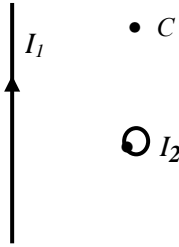
7. Квадратная рамка с током $I = 2$ А находится в неоднородном магнитном поле, изменяющемся вдоль оси x по закону $B = B_0(1 + \alpha x)$, где $B_0 = 1$ мТл, $\alpha = 10^{-3}$ м $^{-1}$. Магнитное поле перпендикулярно плоскости рамки. Длина стороны рамки $a = 10$ см. Найти магнитный поток Φ , пронизывающий рамку, если одна из ее сторон параллельна оси x и имеет координаты $x_1 = 0$, $x_2 = 10$ см.

8. Магнитная индукция поля в вакууме вблизи плоской поверхности однородного изотропного магнетика равна B , причем вектор B составляет угол α с нормалью к поверхности. Определить модуль вектора магнитной индукции B поля в магнетике вблизи его поверхности. Магнитная проницаемость магнетика известна и равна μ .

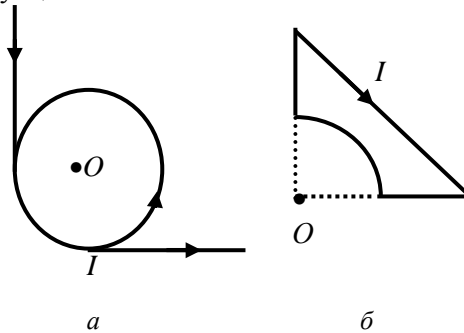
ВАРИАНТ 5

1. По двум бесконечно длинным проводникам, скрещенным под прямым углом, текут токи $I_1 = 30$ А и $I_2 = 40$ А. Расстояние между проводниками $d = 20$ см. Найти индукцию магнитного

поля в точке C , одинаково удаленной от обоих проводников на расстояние $r = 20$ см.



2. Проводник с током $I = 20$ А лежит в плоскости и изогнут так, как показано на рисунке. Радиус изогнутой части проводника $R = 0,4$ м. Определите величину и изобразите направление вектора магнитной индукции в точке O .



3. Примем, что электрон в атоме водорода движется по круговой орбите некоторого радиуса. Чему равно отношение магнитного момента \vec{p}_m эквивалентного кругового тока к величине момента импульса (углового момента) \vec{L} орбитального движения электрона? Изобразите на рисунке направления обоих векторов.

4. Заряженная частица, прошедшая ускоряющую разность потенциалов $U = 2000$ В, движется в однородном магнитном поле напряженностью $H = 12\ 000$ А/м по окружности радиуса $R = 1$ см. Определить удельный заряд частицы q/m и ее скорость V .

5. Рамка площадью $S = 200$ см² равномерно вращается с частотой $n = 10$ об/с, относительно оси, лежащей в плоскости рамки, и перпендикулярно линиям индукции однородного магнитного по-

ля. Величина магнитной индукции $B = 0,2$ Тл. Каково среднее значение ЭДС индукции ε_{cp} за время, в течение которого магнитный поток, пронизывающий рамку, изменится от нуля до максимального значения? Каково максимальное значение ЭДС индукции?

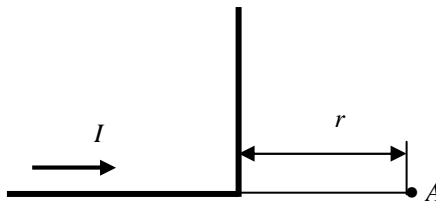
6. Сила тока в соленоиде, содержащем $N = 1000$ витков, $I = 8$ А. Магнитный поток через поперечное сечение соленоида $\Phi = 200$ мкВб. Определить энергию магнитного поля в соленоиде W .

7. Проводящий контур с током $I = 10$ А в форме окружности радиуса $R = 2$ см находится в однородном магнитном поле с индукцией $B = 0,1$ Тл в положении устойчивого равновесия. Найти работу, которую надо совершить, чтобы повернуть контур на 180° вокруг оси перпендикулярной направлению магнитного поля.

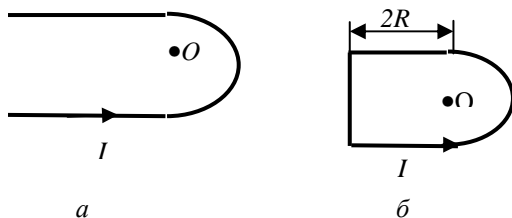
8. Круговой контур с током лежит на плоской границе раздела вакуума и магнетика, проницаемость которого равна μ . Определить индукцию B магнитного поля в произвольной точке на оси контура, если магнитная индукция поля в центре витка при отсутствии магнетика равна B_0 .

ВАРИАНТ 6

1. По бесконечно длинному прямому проводу, согнутому под прямым углом, течет ток $I = 20$ А. Какова магнитная индукция в точке A , если $r = 5$ см?



2. Проводник с током $I = 20$ А лежит в плоскости и изогнут так, как показано на рисунке. Радиус изогнутой части проводника $R = 0,4$ м. Определите величину и изобразите направление вектора магнитной индукции в точке O .



3. Виток, по которому течет ток силой $I = 20$ А, свободно установился в однородном магнитном поле напряженностью $H = 12\,800$ А/м. Диаметр витка $d = 10$ см. Найти магнитный момент витка \vec{p}_m и изобразить его на чертеже. Сделайте рисунок для случая, когда на виток в рассматриваемом магнитном поле действует максимальный вращающий момент. Найдите его и изобразите на рисунке.

4. Электрон влетает в однородное магнитное поле напряженностью $H = 1,6 \cdot 10^4$ А/м со скоростью $V = 8000$ км/с. Направление скорости составляет угол 60° с направлением поля. Определить радиус и шаг винтовой линии, по которой будет двигаться электрон в магнитном поле.

5. В однородном магнитном поле с индукцией $B = 0,35$ Тл равномерно с частотой $n = 480$ об/с вращается рамка, содержащая $N = 1500$ витков площадью $S = 50$ см². Ось вращения лежит в плоскости рамки и перпендикулярна линиям индукции. Определить максимальную ЭДС индукции ϵ_{\max} , возникающую в рамке.

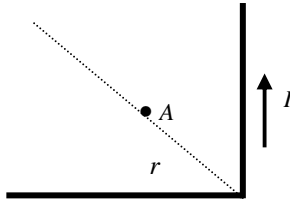
6. Тороид содержит $n = 10$ витков на 1 см. По его обмотке течет ток силой $I = 5$ А. Определить объемную плотность энергии в тороиде w .

7. В однородном магнитном поле с индукцией $B = 1$ Тл находится квадратный проводящий контур со стороной $a = 20$ см и током $I = 5$ А. Плоскость квадрата составляет с направлением вектора магнитной индукции угол 30° . Какую работу A надо совершить, чтобы удалить контур за пределы поля?

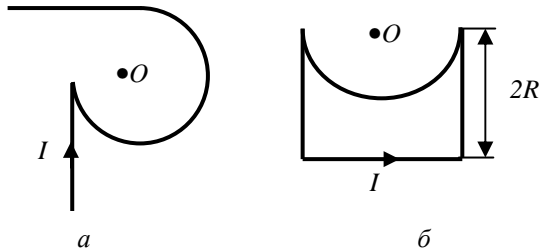
8. Постоянный магнит имеет форму достаточно тонкого диска, намагниченного вдоль его оси. Радиус диска $R = 1$ см. Найти значение молекулярного тока I' , проходящего по ободу диска, если магнитная индукция поля на оси диска, в точке, отстоящей на $r = 10$ см от его центра, составляет $B = 30$ мкТл.

ВАРИАНТ 7

1. По бесконечно длинному прямому проводу, согнутому под прямым углом, течет ток $I = 100$ А. Какова магнитная индукция B в точке A , лежащей на биссектрисе на расстоянии $r = 5$ см от вершины угла?



2. Проводник с током $I = 20$ А лежит в плоскости и изогнут так, как показано на рисунке. Радиус изогнутой части проводника $R = 0,4$ м. Определите величину и изобразите направление вектора магнитной индукции в точке O .



3. Катушка гальванометра, состоящая из $N = 400$ витков тонкой проволоки, намотанной на прямоугольный каркас длиной $a = 3$ см и шириной $b = 2$ см, подвешена на нити в магнитном поле, индукция которого $B = 0,01$ Тл. По катушке течет ток силой $I = 10^{-7}$ А. Найти вращающий момент сил \vec{M} , действующий на рамку гальванометра, если:

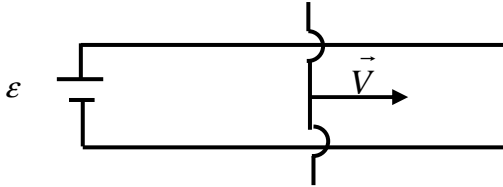
- плоскость катушки параллельна направлению магнитного поля;
- плоскость катушки расположена под углом 60° к направлению магнитного поля.

Найдите магнитный момент контура \vec{p}_m , сделайте чертеж с изображением магнитного и вращающего моментов.

4. Электрон движется в однородном магнитном поле напряженностью $H = 7200 \text{ А/м}$ по винтовой линии, радиус которой $R = 1,1 \text{ см}$ и шаг $h = 7,8 \text{ см}$. Определить период обращения T и его скорость V .

5. К источнику с ЭДС $\varepsilon = 5 \text{ В}$ и ничтожно малым внутренним сопротивлением присоединены два стержня, как показано на рисунке. Расстояние между стержнями $l = 20 \text{ см}$, они находятся в однородном магнитном поле с индукцией $B = 1,5 \text{ Тл}$. По стержням скользит под действием сил поля проводник со скоростью $V = 1 \text{ м/с}$. Сопротивление проводника $R = 0,02 \text{ Ом}$. Определить:

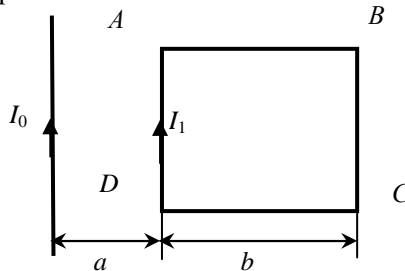
- 1) ЭДС индукции;
- 2) силу, действующую на проводник со стороны поля;
- 3) силу тока в цепи;
- 4) мощность, расходуемую на движение проводника;
- 5) мощность, отдаваемую в цепь источником тока.



6. Определить объемную плотность энергии магнитного поля w тонкого кольца радиуса $R = 10 \text{ мм}$ в точке, расположенной на оси кольца, на высоте $h = 2 \text{ см}$ от его центра. По кольцу течет ток $I = 5 \text{ А}$.

7. В одной плоскости с бесконечным прямым проводником, по которому течет ток $I_0 = 1 \text{ А}$. Расположена квадратная рамка (рисунок). Расстояние $a = 2 \text{ см}$, $b = 5 \text{ см}$. В рамке течет ток $I_1 = 2 \text{ А}$, найти работу, затрачиваемую на поворот рамки:

- 1) вокруг стороны BC на 180° ;
- 2) вокруг стороны AB на 180° .

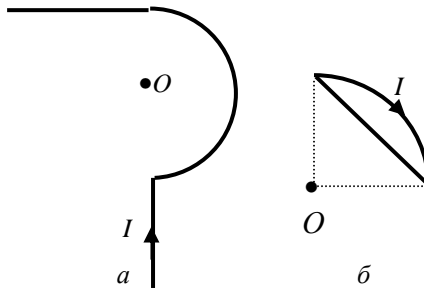


8. В стальном стержне при напряженности магнитного поля $H = 1,6 \text{ кА/м}$ магнитная индукция $B = 1,26 \text{ Тл}$. Найти намагниченность J и магнитную восприимчивость χ материала стержня.

ВАРИАНТ 8

1. По проводнику, изогнутому в виде прямоугольника со сторонами $a = 2 \text{ см}$ и $b = 4 \text{ см}$, течет ток $I = 5 \text{ А}$. Найти магнитную индукцию в точке пересечения диагоналей прямоугольника.

2. Проводник с током $I = 20 \text{ А}$ лежит в плоскости и изогнут так, как показано на рисунке. Радиус изогнутой части проводника $R = 0,4 \text{ м}$. Определите величину и изобразите направление вектора магнитной индукции в точке O .



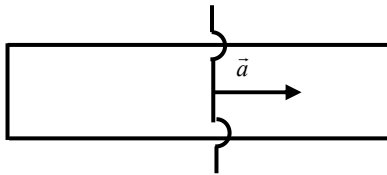
3. Из проволоки длиной $l = 20 \text{ см}$ сделаны контуры: 1) квадратный и 2) круговой. Найдите вращающий момент сил \vec{M} , действующих на каждый контур, помещенный в однородное магнитное поле с индукцией $B = 0,01 \text{ Тл}$. По контурам течет ток силой $I = 2 \text{ А}$. Плоскость контура составляет угол 45° с направлением индукции магнитного поля. Найдите магнитный момент контуров \vec{p}_m . Сделайте чертеж с изображением магнитного и вращающего моментов.

4. Заряженная частица прошла разность потенциалов $U = 104 \text{ В}$ и влетела в скрещенные под прямым углом электрическое и магнитное поля. Напряженность электрического поля $E = 10 \text{ кВ/м}$, магнитная индукция $B = 0,1 \text{ Тл}$. Найти удельный заряд частицы q/m , если она, двигаясь перпендикулярно обоим полям, не испытывает отклонения от прямолинейной траектории.

5. Рамка площадью $S = 100 \text{ см}^2$ содержит $N = 10^3$ витков провода сопротивлением $R = 12 \text{ Ом}$. К концам обмотки подключено внешнее сопротивление $R_1 = 20 \text{ Ом}$. Рамка равномерно вращается в однородном магнитном поле с индукцией $B = 0,1 \text{ Тл}$, делая $n = 8 \text{ об/с}$. Чему равно максимальное значение мощности переменного тока в цепи?

6. Соленоид длиной $l = 50 \text{ мм}$ и площадью поперечного сечения $S = 60 \text{ см}^2$ выполнен из проволоки диаметром $d = 0,4 \text{ мм}$. За какое время при напряжении $U = 10 \text{ В}$ и силе тока $I = 2 \text{ А}$ в нем выделится количество тепла Q , равное энергии поля внутри соленоида W ? Поле внутри соленоида считать однородным.

7. Подвижная перемычка длиной $l = 50 \text{ см}$ перемещается с ускорением $a = 2 \text{ см/с}^2$ по двум параллельным проводникам П-образного контура. В контуре течет ток $I = 2 \text{ А}$. Контур помещен в однородное магнитное поле с индукцией $B = 3 \text{ Тл}$, перпендикулярное его плоскости. Найти работу A , затраченную на перемещение перемычки в течение $t = 10 \text{ с}$ от начала движения.

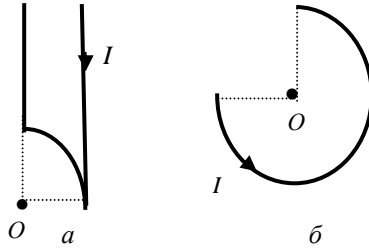


8. В соленоид длиной $l = 40 \text{ см}$, имеющий $N = 200$ витков, ввели ферромагнитный сердечник. При прохождении по виткам тока $I = 1,2 \text{ А}$ магнитная индукция в сердечнике оказалась равной $B = 1,4 \text{ Тл}$. Найти магнитную проницаемость ферромагнетика.

ВАРИАНТ 9

1. Найти магнитную индукцию в центре кругового витка с током и на оси витка на расстоянии $h = 10 \text{ см}$ от его центра. Радиус витка $R = 100 \text{ мм}$, ток $I = 50 \text{ мА}$.

2. Проводник с током $I = 20 \text{ А}$ лежит в плоскости и изогнут так, как показано на рисунке. Радиус изогнутой части проводника $R = 0,4 \text{ м}$. Определите величину и изобразите направление вектора магнитной индукции в точке O .



3. Коаксиальный кабель состоит из внутреннего и внешнего цилиндров радиусами соответственно R_1 и R_2 . Вдоль поверхностей этих цилиндров в противоположных направлениях течет ток I . Найдите напряженность магнитного поля на расстоянии r от центра кабеля в случаях, когда: а) $R_1 < r < R_2$, б) $r > R_2$.

4. Электрон и протон, удаленные друг от друга на значительное расстояние, находятся в однородном магнитном поле. Зная, что каждый из них движется по окружности, найти отношение их угловых скоростей. Масса протона в 1836 раз больше массы электрона. (Никакие силы, кроме сил Лоренца на протон и электрон не действуют.)

5. В однородном магнитном поле с индукцией $B = 0,84$ Тл вращается квадратная рамка со стороной $a = 5$ см, состоящая из небольшого числа витков медной проволоки сечением $S = 0,5$ мм². Концы рамки соединены накоротко. Максимальное значение силы тока, индуцируемого в рамке $I_{\max} = 1,9$ А. Определить число оборотов рамки в секунду n . Как нужно изменить скорость вращения рамки, чтобы при замене медной проволоки железной сила тока в цепи осталась неизменной ($\rho_{\text{меди}} = 16$ кОм·м, $\rho_{\text{железа}} = 90$ кОм·м).

6. Соленоид длиной $l = 20$ см состоит из $N = 100$ витков. Сила тока в соленоиде $I = 1$ А. Определить объемную плотность энергии w внутри соленоида. Поле считать однородным.

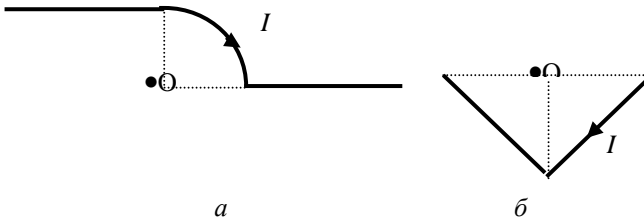
7. В магнитном поле с индукцией $B = 0,2$ Тл находится круглый виток с током $I = 0,2$ А. Радиус витка $R = 20$ см. Плоскость витка составляет угол 30° с вектором магнитной индукции. Найти работу, которую надо затратить, чтобы повернуть виток в положение, когда его плоскость перпендикулярна магнитному полю.

8. Стальной тороид, площадь поперечного сечения которого $S = 4,0 \text{ см}^2$, имеет 10 витков на каждый сантиметр длины. По виткам проходит ток $I = 2,0 \text{ А}$. В этих условиях магнитная проницаемость стали $\mu = 520$. Найти магнитный поток Φ через сечение тороида. Магнитное поле в поперечном сечении тороида считать однородным.

ВАРИАНТ 10

1. Коаксиальный кабель состоит из внутреннего и внешнего цилиндров радиусами соответственно $R_1 = 0,4 \text{ см}$ и $R_2 = 3 \text{ см}$. Вдоль поверхности внутреннего цилиндра течет ток силой $I_1 = 3 \text{ А}$, а вдоль поверхности внешнего цилиндра в противоположном направлении течет ток $I_2 = 2 \text{ А}$. Найдите напряженность магнитного поля на расстоянии $r_1 = 0,5 \text{ см}$ и $r_2 = 5 \text{ см}$ от оси кабеля.

2. Проводник с током $I = 20 \text{ А}$ лежит в плоскости и изогнут так, как показано на рисунке. Радиус изогнутой части проводника $R = 0,4 \text{ м}$. Определите величину и изобразите направление вектора магнитной индукции в точке O .



3. Однородное электрическое и магнитное поля направлены взаимно перпендикулярно. Напряженность электрического поля $E = 3 \text{ В/см}$. Индукция магнитного поля $B = 10^{-4} \text{ Тл}$. Каковы должны быть направление и модуль скорости электрона, чтобы его траектория была прямолинейна?

4. Найти магнитный момент \vec{p}_m тонкого круглого витка с током, если радиус витка $R = 100 \text{ мм}$, а индукция магнитного поля в его центре $B = 6 \text{ мкТл}$.

5. Медный диск радиуса $R = 10 \text{ см}$ вращается в однородном магнитном поле, делая $n = 100 \text{ об/с}$. Магнитное поле направлено перпендикулярно плоскости диска и имеет напряженность

$H = 10^4$ А/м. Две щетки – одна на оси диска, другая на периметре – соединяют диск с внешней цепью, в которую включены реостат с сопротивлением $r = 10$ Ом и амперметр, сопротивлением которого можно пренебречь. Что показывает амперметр?

6. По проводнику, изогнутому в виде кольца радиусом $R = 10$ см, содержащему $N = 200$ витков, течет ток силой $I = 5$ А. Определить плотность энергии w магнитного поля в центре кольца.

7. Прямоугольная магнитная рамка с током $I = 2$ А находится в однородном магнитном поле с индукцией $B = 0,8$ Тл. Магнитное поле направлено перпендикулярно плоскости рамки. Стороны рамки $a = 2$ см и $b = 5$ см. Найти работу, затраченную на перемещение рамки параллельно самой себе вдоль длинной стороны на расстояние $l = 20$ см. Чему будет равна работа, если удалить рамку за пределы поля?

8. Постоянный магнит изготовлен в виде кольца с узким зазором между полюсами. Средний диаметр кольца D , ширина зазора b ($b \ll \pi D$), индукция магнитного поля в зазоре B . Пренебрегая рассеянием магнитного потока на краях зазора, определить напряженность магнитного поля H внутри магнита.