Министерство образования Российской Федерации
НОВОСИБИРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

53
Э 454
№ 2425

ЭЛЕКТРИЧЕСТВО, МАГНЕТИЗМ

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

НОВОСИБИРСК
2003

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

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	$\varepsilon_0 = 8{,}85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м
	$\dfrac{1}{4\pi\varepsilon_0} = 9 \cdot 10^9$ 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

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

В системе СИ $k = \dfrac{1}{4\pi\varepsilon_0}$, 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 ($\varepsilon = 1$),

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

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

$$\oint_S (\vec{E} \cdot d\vec{S}) = \oint_S E_n \cdot dS = \frac{q}{\varepsilon_0} ,$$

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:

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

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

Проекция вектора $\vec{E}$ на выделенное направление l

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

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

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

7. Условия на границе раздела двух диэлектрических сред

$$D_{1n} = D_{2n} , \; E_{1n} / E_{2n} = \varepsilon_2 / \varepsilon_1 ,$$

$$D_{1\tau} / D_{2\tau} = \varepsilon_1 / \varepsilon_2 , \; E_{1\tau} = E_{2\tau} ,$$

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

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

10. Энергия заряженного конденсатора

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

11. Объемная плотность энергии электростатического поля

$$w = \frac{\varepsilon\varepsilon_0 E^2}{2} = \frac{(\vec{E}\cdot\vec{D})}{2} \ .$$

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,

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

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

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

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

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

17. Магнитная индукция поля в центре кругового витка с током

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

18. Закон Ампера

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

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 $\vec{V}$

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

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 $\vec{V}$

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

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

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

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 = 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 условие

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

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

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

приводящее к уравнению

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

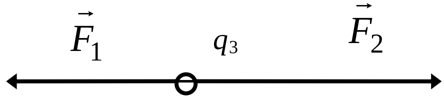
Из этого уравнения находим, что точка равновесия находится на 5 см правее заряда q_2.

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.

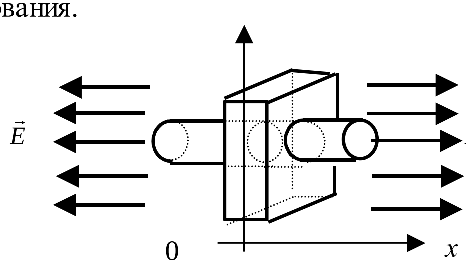
Решение. Для решения этой задачи воспользуемся теоремой Гаусса. Из соображений симметрии можно сделать следующий вывод:

а) $\left|\vec{E}(x)\right| = \left|\vec{E}(-x)\right|$;

б) напряженность поля Е 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

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

В соответствии с теоремой Гаусса

$$2Es = \frac{q}{\varepsilon_0}\ ,$$

где q – заряд внутри выбранной поверхности.

Рассмотрим 2 случая:

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

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

$$q = \rho V = 2\rho s x.$$

Тогда можно записать

$$2Es = \frac{2\rho s x}{\varepsilon_0}\ .$$

Из этого выражения следует, что

$$E(x) = \frac{\rho x}{\varepsilon_0}\ .$$

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

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

Тогда

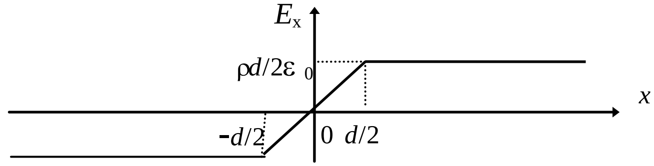
$$2Es = \frac{\rho s d}{\varepsilon_0},$$

$$E(x) = \frac{\rho d}{2\varepsilon_0}\ .$$

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

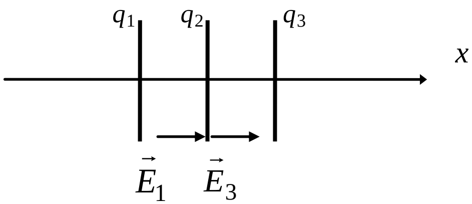
$$E(x) = \begin{cases} \dfrac{\rho d}{2\varepsilon_0}, & |x| \geq \dfrac{d}{2} \\ \dfrac{\rho x}{\varepsilon_0}, & |x| \leq \dfrac{d}{2} \end{cases}.$$

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

$$E_1 = \frac{\sigma_1}{2\varepsilon_0} = \frac{q_1}{2\varepsilon_0 s} \quad .$$

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

$$E_3 = \frac{\sigma_3}{2\varepsilon_0} = \frac{|q_3|}{2\varepsilon_0 s} = \frac{3q}{2\varepsilon_0 s} \quad .$$

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

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

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

$$|E| = |E_1 + E_3| = \frac{2q}{\varepsilon_0 s} \quad .$$

Сила, действующая на среднюю пластину, несущую заряд q_2 равна

$$F = q_2 E = 4q^2/\varepsilon_0 s \ .$$

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 $\varepsilon_1 = 2$ и диэлектрик *2* с диэлектрической проницаемостью $\varepsilon_2 = 5$ 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

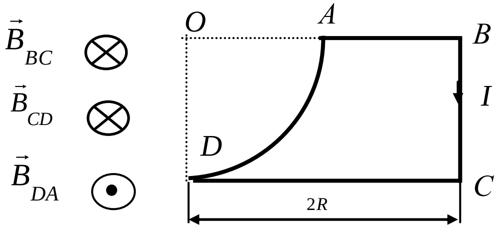
$$E_1 \,/\, E_2 = \varepsilon_2 / \varepsilon_1 \ ,$$

откуда $E_2 = E_1 \varepsilon_1 / \varepsilon_2$.

Плотность энергии электрического поля в диэлектрике *2*

$$w = \varepsilon_0\varepsilon_2 E_2^2/2 = \varepsilon_0\varepsilon_2(\varepsilon_1/\varepsilon_2)^2 E_1^2/2 = \varepsilon_0\varepsilon_1^2 E_1^2/2\varepsilon_2 =$$
$$= 3{,}54\cdot 10^{-6}\ \text{Дж/м}^3.$$

Пример 5. По контуру, изображенному на рисунке, течет ток силой I = 20 А. Радиус изогнутой части R = 0,4 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.

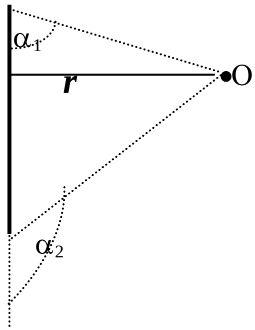
$\vec{B}_{AB} = 0$ в точке O, так как точка O лежит на продолжении отрезка AB (угол между векторами $d\vec{l}$ и $\vec{r}$ равен 180°), что дает нулевой результат векторного произведения в законе Био – Савара – Лапласа.

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

учитывая направления векторов, изображенные на рисунке,

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

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



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

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

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

Для участка CD : $\alpha_2=\pi/2$, $\operatorname{tg}\left(\alpha_1\right)=\frac{OD}{DC}=\frac{R}{2R}=0.5$, $\alpha_1=26^\circ$.

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

Для криволинейного участка AD:

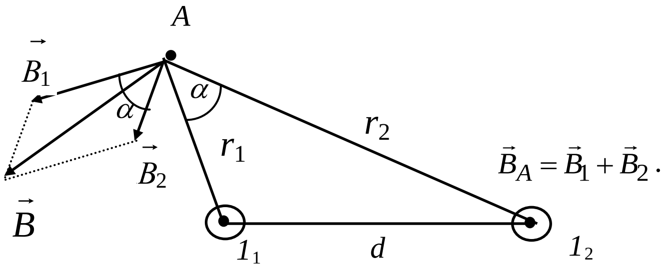
$$B_{DA}=\frac{\mu_0 I}{4\pi R}\int\limits_0^{\pi/2} d\alpha=\frac{\mu_0 I}{4\pi R}\cdot\frac{\pi}{2}=\frac{\mu_0 I}{8R}.$$

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

Знак «–» 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

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

где $B_1 = \dfrac{\mu_0 I_1}{2\pi r_1}$, $\quad B_2 = \dfrac{\mu_0 I}{2\pi r_2}$, $\quad \cos\alpha = (r_1^2 + r_2^2 - d^2)/(2r_1r_2)$.

Подставив все в формулу для магнитной индукции в точке А, 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 с $^{-1}$. Сторона рамки α = 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

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

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

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

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

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

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

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

Пример 8. Протон, прошедший ускоряющую разность потенциалов U = 0,5 кВ, влетел в однородное магнитное поле с индукцией B = 2 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 $a_n = \dfrac{V^2}{R}$, где R – радиус окружности.

Приравнивая силу Лоренца и центростремительную силу, можно вычислить радиус окружности

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

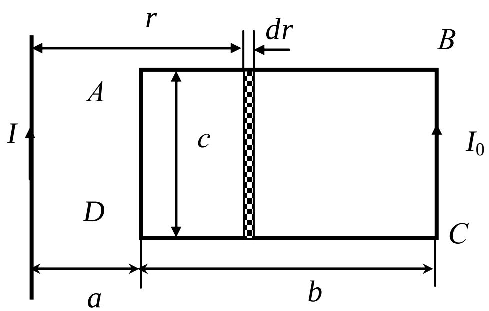
В этом выражении нам неизвестна скорость протона. Чтобы ее найти, надо воспользоваться законом сохранения энергии: кинетическая энергия протона равна изменению потенциальной энергии протона, прошедшего ускоряющую разность потенциалов U,

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

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 = 1А, расположена прямоугольная рамка (рисунок). Расстояние a = 2 см, b = 5 см, c = 4 см. Найти работу, которую надо совершить, чтобы удалить рамку за пределы магнитного поля. По рамке течет ток I_0 = 2 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 (Φ_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

$$d\Phi_1 = (\vec{B}\cdot d\vec{S}) = BdS\cos 180° = -BdS = -\frac{\mu_0 I}{2\pi r}cdr\ .$$

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

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

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

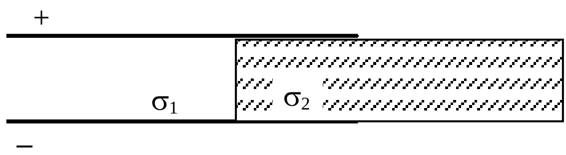
1. Расстояние a между двумя точечными положительными зарядами $q_1 = 20\cdot 10^{-8}$ Кл и $q_2 = 5\cdot 10^{-8}$ Кл равно a = 3 см. На каком расстоянии от первого заряда находится точка, в которой напряженность E поля зарядов равна нулю?

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 $\sigma = 8{,}85\cdot10^{-12}$ Кл/м^2. 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/м^2 и $\sigma_2 = -0{,}3$ мкКл/м^2. Определите E (X) и φ (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. Внутрь конденсатора частично вставлена стеклянная пластина ($\varepsilon = 7$). 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.

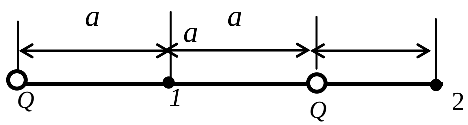
7. Найти объемную плотность энергии w электрического поля в точке, находящейся на расстоянии $l = 2$ см от поверхности заряженного шара радиуса $R = 1$ см, если поверхностная плотность заряда на шаре $\sigma = 1{,}75\cdot 10^{-5}$ Кл/м^2.

8. Потенциал некоторого поля имеет вид $\varphi = ay(\frac{y^2}{3} - x^2)$, 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.

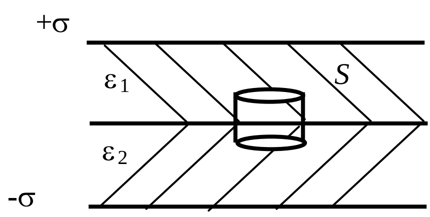
2. Электрическое поле создано двумя одинаковыми положительными зарядами Q. Найти работу A сил поля по перемещению заряда $q = 10$ нКл из точки *1* с потенциалом $\varphi = 300$ В в точку *2*.



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/м^2 и $\sigma_2 = 3$ нКл/м^2. 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/м^2. Пространство между пластинами заполнено двумя слоями диэлектрика с относительными диэлектрическими проницаемостями $\varepsilon_1 = 3$ и $\varepsilon_2 = 5$ соответственно. Найти поток вектора $\vec{D}$ и поток вектора $\vec{E}$ через цилиндр с площадью основания $S = 10$ см^2.



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/м^2.

ВАРИАНТ 3

1. Диполь с электрическим моментом p = 0,12 нКл·м образован двумя точечными зарядами Q = ±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 Δx = 0,2 мм расстояние x между пластинами плоского конденсатора, заряженными зарядами величиной q = 0,2 мкКл. Площадь каждой пластины S = 400 см^2. 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/м^2 и $\sigma_2 = +5$ нКл/ м^2. 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 (ε = 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 $\varphi = \dfrac{\tau R}{2\varepsilon_0\sqrt{R^2 + x^2}}$, 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 ускорялись 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.

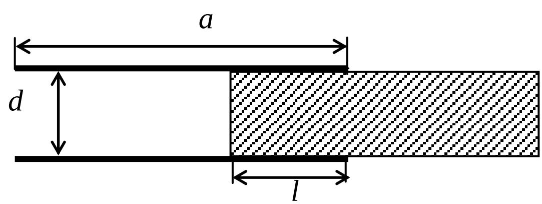
2. На какое расстояние могут сблизиться два электрона, если они движутся навстречу друг другу с относительной скоростью 10^8 м/с ?

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 $\tau_2 = -5\cdot10^{-3}$ 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

$\sigma_1 = +3\cdot10^{-8}$ Кл/м^2, $\sigma_2 = -5\cdot10^{-8}$ Кл/м^2 и $\sigma_3 = +8\cdot10^{-8}$ Кл/м^2. 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 электроемкость 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 $E = \dfrac{\rho r}{3\varepsilon_0}$, где r – расстояние от центра шара. Найти выражение $\varphi(r)$ для потенциала точек внутри шара и вычислить разность потенциалов между центром шара и его поверхностью, если R = 10 см, ρ = 50 нКл/м^3.

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 =1,5·10^{-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 = 1,6·10^{-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 мкКл/м. Какова напряженность поля $\vec{E}$ в точке, удаленной на расстояние a = 10 см как от первой, так и от второй проволок?

4. Три плоскопараллельные пластины, расположенные на малом расстоянии друг от друга, равномерно заряжены с поверхностной плотностью σ = 5·10^{-8} Кл/м^2 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 (ε_1 = 5) и эбонита d_2 = 1,5 мм (ε_2 = 3), если площадь каждой из пластин равна S = 100 см^2, 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 ρ = 2 нКл/м^3 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 $\varepsilon_2 < \varepsilon_1$ 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/м^2 и $\sigma_2 = 3$ нКл/м^2. 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. Электроемкость плоского конденсатора равна $C = 111$ пФ. Диэлектрик – фарфор ($\varepsilon = 5$). 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 $S = 10^{-2}$ м^2 каждая притягиваются силой $F = 1{,}2\cdot10^{-2}$ Н. Пространство между пластинами заполнено диэлектриком с диэлектрической проницаемостью $\varepsilon = 2$. Определить модуль вектора электрического смещения D внутри конденсатора и заряд каждой из пластин.

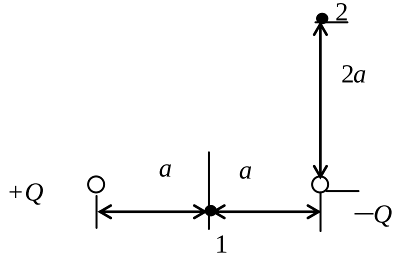
7. Капля массой $m = 5{,}6\cdot10^{-9}$ г поднимается вертикально вверх между пластинами горизонтально расположенного конденсатора с ускорением $a = 1{,}2$ м/с^2. Найти поверхностную плотность заряда σ на пластинах конденсатора, если заряд капли равен 10 зарядам электрона.

8. Два одинаковых плоских воздушных конденсатора соединены последовательно и подключены к источнику ЭДС. Внутрь 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/м^2 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 $\varphi(x)$, если ось x перпендикулярна плоскости пластин.

5. В плоский конденсатор вдвинули плитку парафина ($\varepsilon = 2$) 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 $A = 50\cdot10^{-7}$ Дж. Найти линейную плотность заряда τ нити.

7. Потенциал поля внутри заряженного шара зависит только от расстояния до его центра r по закону $\varphi = ar + b$, 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 $\alpha = 180°$.

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 $\tau = 6\cdot10^{-4}$ 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, $\varepsilon = 5$), объем V которого равен 100 см^3. Поверхностная плотность заряда $\sigma = 8{,}85$ нКл/м^2. 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 $\Delta\varphi$ 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/м^2, 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 φ (r).

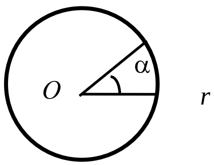
4. Электрическое поле создано двумя металлическими параллельными пластинами, которые подключены к источнику ЭДС $E = 100$ В. Положительная пластина заземлена. Расстояние между пластинами 10 мм. Построить:

а) графики зависимостей напряженности $E(x)$ и потенциала φ (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 $\varphi = \varphi_0(\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2})$, где φ_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 $|q| = 2\cdot10^{-9}$ Кл. Найти напряженность поля E в точке, расположенной на середине одной из сторон треугольника.

2. Какая совершается работа при перенесении точечного заряда $q = 2\cdot10^{-8}$ 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/м^2 ?

3. Шар радиуса R = 1,0 м равномерно заряжен по объему. Потенциал электростатического поля на поверхности шара φ_0 = 1000 В. Зависимость потенциала φ от расстояния до центра шара r имеет вид

$$\varphi(r)=\begin{cases}\frac{2}{3}\varphi_0-\frac{1}{2}\varphi_0\frac{r^2}{R^2}, \text{если } r<R\\ \varphi_0\frac{r^2}{R^2}, \text{ если } r\ge R\end{cases}.$$

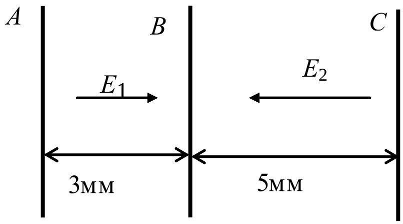
Найти зависимость напряженности поля $E\ (r)$, изобразить ее на графике и вычислить значения E при r_1 = 0,5 м и r_2 = 1,5 м.

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:

а) потенциал φ_B;

б) потенциал φ_C;

в) 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 (ε_1 = 6), второй такой же толщины – стекло (ε_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/м^2; 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.

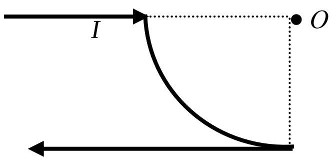
8. Две одинаковые капли воды заряжены одинаковым зарядом $|q| = 1{,}6\cdot10^{-19}$ Кл. Сила кулоновского отталкивания капель уравновешивается силой их взаимного гравитационного притяжения. Найти радиусы капель.

МАГНИТНОЕ ПОЛЕ

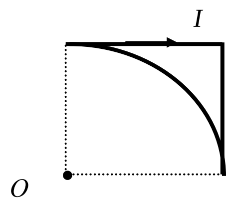
ВАРИАНТ 1

1. Расстояние между двумя длинными параллельными проводами 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.



а



б

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 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 Тл. Построить график зависимости магнитного потока Ф, пронизывающего рамку и ЭДС индукции ε_i от времени. Найти максимальное значение ЭДС индукции $\varepsilon_{i\,max}$.

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

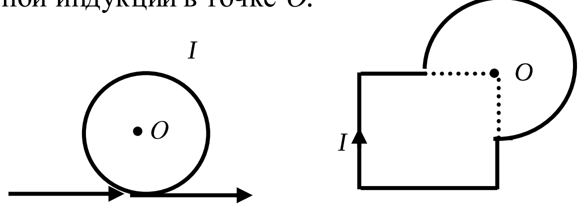
7. Квадратная рамка со стороной a = 10 см находится в однородном магнитном поле с индукцией B = 2 Тл. В рамке течет ток силой I = 2 А. Плоскость рамки расположена перпендикулярно линиям индукции магнитного поля. Найти работу A, которую надо совершить, чтобы повернуть рамку относительно оси, совпадающей 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 мм. По проводам в противоположном направлении текут токи силой I = 40 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 в точке O.



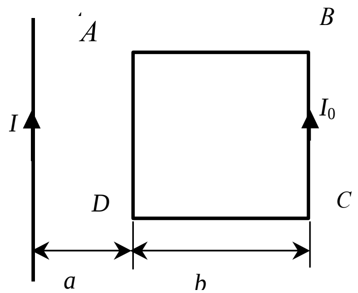
3. Квадратная рамка со стороной a = 10 см находится в однородном магнитном поле с индукцией B = 0,2 Тл. Плоскость рамки составляет угол 30° с направлением поля. По рамке течет ток силой I = 8 А. Найти и изобразить на чертеже магнитный момент витка $\vec{p}_m$ и вращающий момент $\vec{M}$ сил, действующих 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 см ^{2}. Сколько оборотов в минуту делает якорь, если максимальное значение ЭДС индукции $\varepsilon_{i\,max}$ = 200 В.

6. Индуктивность соленоида длиной l = 1м и площадью поперечного сечения S = 20 см ^{2} 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/м^3.

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 = 5м.



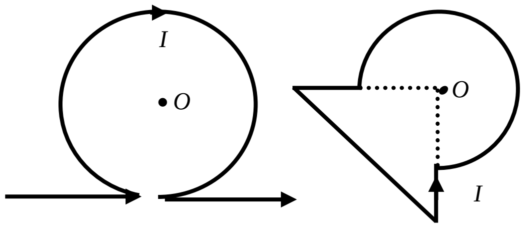
8. Палочка из неизвестного вещества, помещенная между полюсами магнита в вакууме, расположилась вдоль магнитного поля. После заполнения пространства между полюсами магнита некоторой жидкостью ориентация палочки не изменилась. Каковы магнитные свойства вещества палочки и жидкости?

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.



а *б*

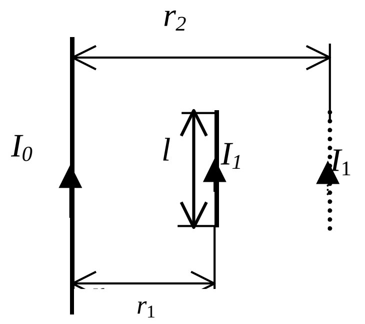
3. Рамка гальванометра длиной a = 4 см и шириной b = 1,5 см, содержащая N = 200 витков тонкой проволоки, находится в магнитном поле с индукцией B = 0,1 Тл. Плоскость рамки параллельна линиям индукции. По виткам течет ток силой I = 2 мА. Найдите и изобразите на чертеже магнитный момент рамки $\vec{p}_m$ 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 см^2, расположенная перпендикулярно магнитному полю Земли, поворачивается за t = 1 с на угол 90°. В катушке наводится ЭДС со средним значением $\varepsilon_{i\text{ ср}}$ = 0,6 мВ. Найти величину магнитного поля Земли.

6. В тороиде сечением S = 8 см^2 создан магнитный поток Ф = 20 мкВб. Определить объемную плотность энергии внутри тороида w. Магнитное поле считать однородным во всем объеме тороида.

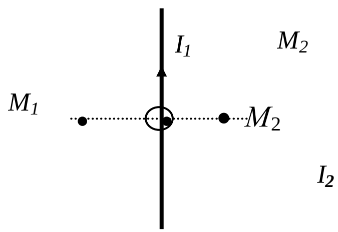
7. Прямой проводник длиной l =10 см, по которому течет ток I_1 = 5 А, находится вблизи бесконечного провода с током I_0 = = 2 А и параллелен ему. Какую работу надо совершить, чтобы переместить проводник длиной l параллельно самому себе с расстояния r_1 = 3 мм от бесконечного проводника на расстояние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



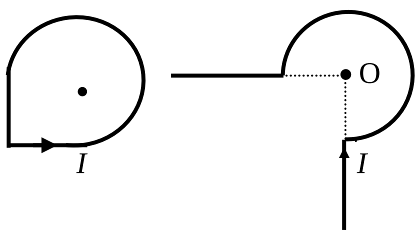
8. Определить намагниченность тела при насыщении, если магнитный момент каждого атома равен магнетону Бора, а концентрация атомов $n = 6{,}0 \cdot 10^{28}$ м$^{-3}$.

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 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 полеq 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.

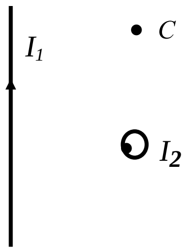
7. Квадратная рамка с током I = 2 А находится в неоднородном магнитном поле, изменяющемся вдоль оси x по закону $B = B_0(1+\alpha x)$, где B_0 =1 мТл, α=10 $^{-3}$ м $^{-1}$. Магнитное поле перпендикулярно плоскости рамки. Длина стороны рамки a = 10 см. Найти магнитный поток Ф, пронизывающий рамку, если 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.

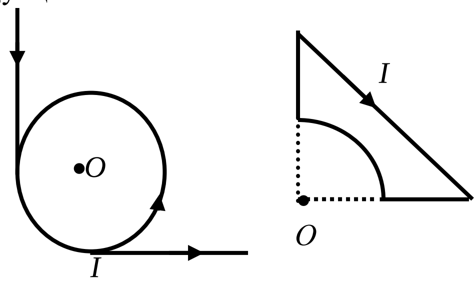
ВАРИАНТ 5

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.



а *б*

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 $S = 200$ см^2 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 $\varepsilon_{ср}$ за время, в течение которого магнитный поток, пронизывающий рамку, изменится от нуля до максимального значения? Каково максимальное значение ЭДС индукции?

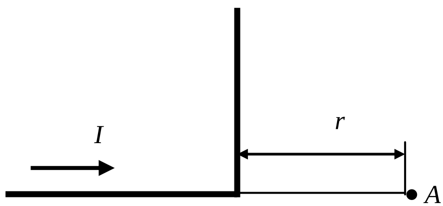
6. Сила тока в соленоиде, содержащем N = 1000 витков, I = 8 А. Магнитный поток через поперечное сечение соленоида Φ = 200 мкВб. Определить энергию магнитного поля в соленоиде W.

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.

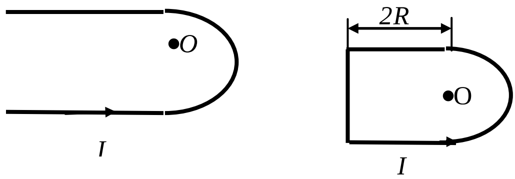
8. Круговой контур с током лежит на плоской границе раздела вакуума и магнетика, проницаемость которого равна μ. Определить индукцию B магнитного поля в произвольной точке на оси контура, если магнитная индукция поля в центре витка при отсутствии магнетика равна B_0.

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.



а *б*

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 $H = 1{,}6\ 10^{4}$ 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 $S = 50$ см^2. Ось вращения лежит в плоскости рамки и перпендикулярна линиям индукции. Определить максимальную ЭДС индукции ε_{max}, возникающую в рамке.

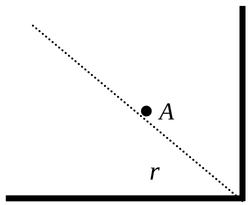
6. Тороид содержит $n = 10$ витков на 1 см. По его обмотке течет ток силой $I = 5$А. Определить объемную плотность энергии в тороиде w .

7. В однородном магнитное 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?

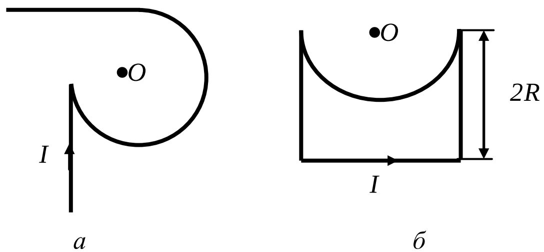
8. Постоянный магнит имеет форму достаточно тонкого диска, намагниченного вдоль его оси. Радиус диска $R = 1$ см. Найти значение молекулярного тока I', проходящего по ободу диска, если магнитная индукция поля на оси диска, в точке, отстоящей на $r = 10$ см от его центра, составляет $B = 30$ мкТл.

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 О.



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:

а) плоскость катушки параллельна направлению магнитного поля;

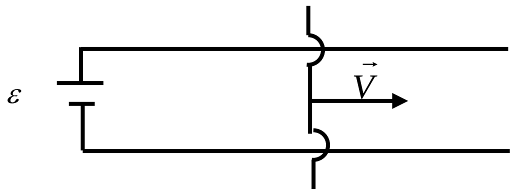
б) плоскость катушки расположена под углом 60° к направлению магнитного поля.

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 А/м по винтовой линии, радиус которой R = 1,1 см и шаг h = 7,8 см. Определить период обращения T и его скорость V.

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

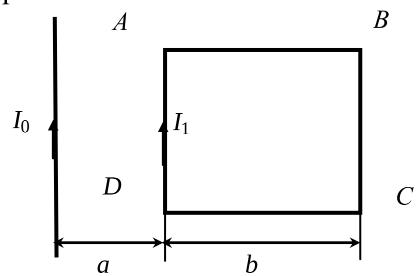
1) ЭДС индукции;
2) силу, действующую на проводник со стороны поля;
3) силу тока в цепи;
4) мощность, расходуемую на движение проводника;
5) мощность, отдаваемую в цепь источником тока.



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

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

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

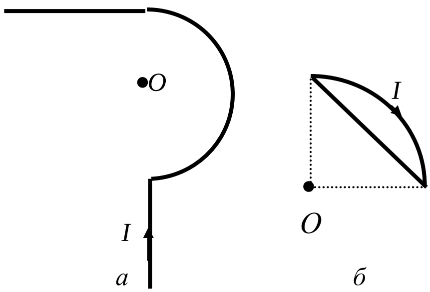


8. В стальном стержне при напряженности магнитного поля H = 1,6 кА/м магнитная индукция B = 1,26 Тл. Найти намагниченность J и магнитную восприимчивость χ материала стержня.

ВАРИАНТ 8

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

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.



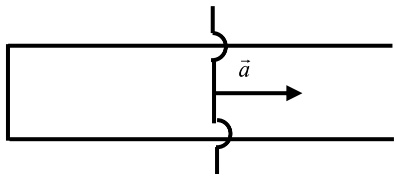
3. Из проволоки длиной l = 20 см сделаны контуры: 1) квадратный и 2) круговой. Найдите вращающий момент сил $\vec{M}$, действующих на каждый контур, помещенный в однородное магнитное поле с индукцией B = 0,01 Тл. По контурам течет ток силой I = 2 А. Плоскость контура составляет угол 45° с направлением 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 В и влетела в скрещенные под прямым углом электрическое и магнитное поля. Напряженность электрического поля E = = 10 кВ/м, магнитная индукция B = 0,1 Тл. Найти удельный заряд частицы q/m, если она, двигаясь перпендикулярно обоим полям, не испытывает отклонения от прямолинейной траектории.

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

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

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

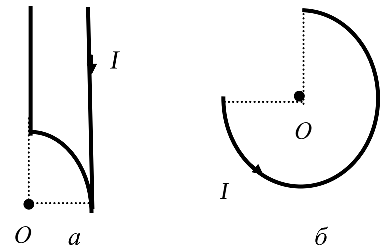


8. В соленоид длиной l = 40 см, имеющий N = 200 витков, ввели ферромагнитный сердечник. При прохождении по виткам тока I = 1.2 А магнитная индукция в сердечнике оказалась равной B = = 1,4 Тл. Найти магнитную проницаемость ферромагнетика.

ВАРИАНТ 9

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

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. 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 мм ^{2}. 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.

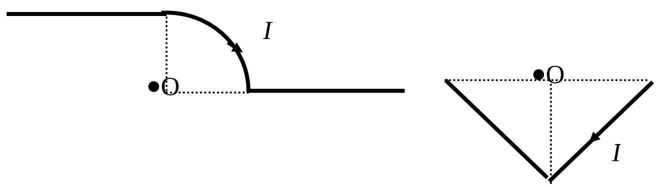
7. В магнитном поле с индукцией B = 0,2 Тл находится круглый виток с током I = 0.2 А. Радиус витка R = 20 см. Плоскость витка составляет угол 30° с вектором магнитной индукции. Найти работу, которую надо затратить, чтобы повернуть виток в положение, когда его плоскость перпендикулярна магнитному полю.

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

ВАРИАНТ 10

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

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 О.



а *б*

3. Однородное электрическое и магнитное поля направлены взаимно перпендикулярно. Напряженность электрического поля $E = 3$ В/см. Индукция магнитного поля $B = 10^{-4}$ 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 $R = 100$ мм, а индукция магнитного поля в его центре $B = 6$ мкТл.

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

$H = 10^4$ 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.