Задача 1. На тонком стержне длиной L равномерно распределен электрический заряд Q. На продолжении оси стержня на расстоянии а от ближайшего конца расположен точечный заряд q, который взаимодействует с зарядом на стержне с силой F. Линейная плотность заряда на стержне τ. Определите величину, указанную в таблице знаком вопроса.

| № варианта | L, м | а, м | $q \cdot 10^{-9}$ Кл | $F \cdot 10^{-6}$, Н | $\tau \cdot 10^{-9}$ Кл/м | $Q \cdot 10^{-9}$ Кл |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 6 | ∞ | 0,10 | 4,0 | ? | 12,5 | − |

Решение:

Сила взаимодействия $F$ заряженного стержня с точечным зарядом $Q_1$ зависит от линейной плотности $\tau$ заряда на стержне. Зная эту зависимость, можно определить $\tau$. При вычислении силы $F$ следует иметь в виду, что заряд на стержне не является точечным, поэтому закон Кулона непосредственно применить нельзя. В этом случае можно поступить следующим образом. Выделим из стержня (рис. 1) малый участок $dr$ с зарядом $dQ = \tau dr$. Этот заряд можно рассматривать как точечный.

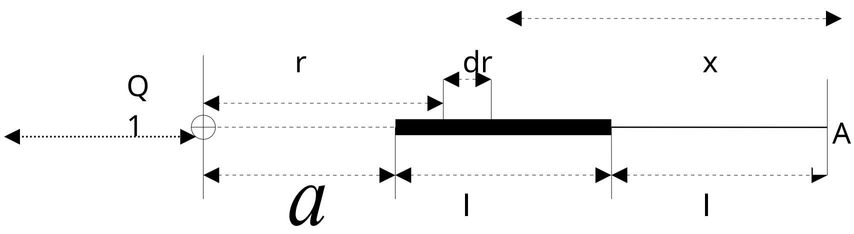



Рис. 1

Тогда, согласно закону Кулона:

$$dF = \frac{Q_1 \tau\, dr}{4\pi\varepsilon_0 r^2}.$$

Интегрируя это выражение в пределах от $a$ до $a+l$, получаем:

$$F = \frac{Q_1 \tau}{4\pi\varepsilon_0} \int_a^{a+l} \frac{dr}{r^2} = \frac{Q_1 \tau}{4\pi\varepsilon_0}\left(\frac{1}{a} - \frac{1}{a+l}\right) = \frac{Q_1 \tau l}{4\pi\varepsilon_0 a(a+l)},$$

$$F = \frac{Q_1 \tau l}{4\pi\varepsilon_0 a(a+l)}.$$

Проверим, дает ли расчетная формула единицу силы. Для этого в правую часть формулы вместо символов величин подставим их единицы:

$$\frac{[Q_1][\tau][l]}{[\varepsilon_0][a][(a+l)]} = \frac{Кл \cdot Кл/м \cdot м}{Ф/м \cdot м \cdot м} = \frac{Кл^2}{Кл/В \cdot м} = \frac{Кл \cdot В}{м} = \frac{Кл \cdot Дж/Кл}{м} = Дж/м = Н$$

Найденная единица является единицей силы.

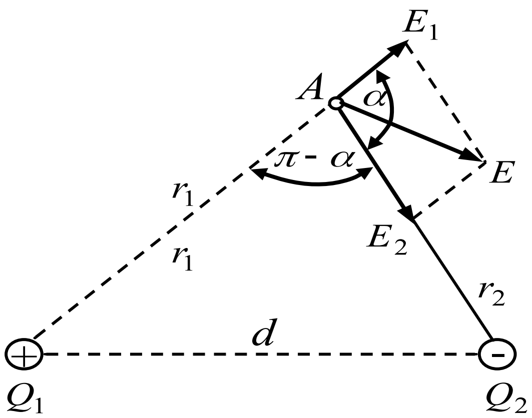
Произведем вычисления:

$$F = \frac{12{,}5 \cdot 10^{-9}}{4 \cdot 3{,}14 \cdot 1 \cdot 0{,}1} = 9{,}55 \cdot 10^{-9}\, Н$$

.

Задача 2. Два точечных электрических заряда $q_1$ и $q_2$ находятся в воздухе на расстоянии d друг от друга и создают в точке А поле, напряженность которого Е, потенциал φ. Точка удалена от заряда на расстояние $r_1$, от заряда на расстоянии $r_2$. Определить напряженность в точке А.

| № варианта | α, град | $q_1 \cdot 10^{-9}$ Кл | $q_2 \cdot 10^{-9}$ Кл | d, м | $r_1$, м | $r_2$, м | φ, В |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 6 | 45 | − 1,0 | − | 0,12 | 0,12 | − | − 0,9 |




Согласно принципу суперпозиции электрических полей, каждый заряд создает поле независимо от присутствия в пространстве других зарядов. Поэтому напряженность $E$ электрического поля в искомой точке может быть найдена как геометрическая сумма напряженностей $E_1$ и $E_2$ полей, создаваемых каждым зарядом в отдельности: $E = E_1 + E_2$. Напряженности электрического поля, создаваемого в воздухе ($\varepsilon$=1) зарядами $Q_1$ и $Q_2$,

$$E_1 = \frac{|Q_1|}{4\pi\varepsilon_0 r_1^2}; \qquad E_2 = \frac{|Q_2|}{4\pi\varepsilon_0 r_2^2}. \tag{1}$$

Вектор $E_1$ (рис. 1) направлен по силовой линии от заряда $Q_1$, так как этот заряд положителен; вектор $E_2$ направлен также по силовой линии, но к заряду $Q_2$, так как этот заряд отрицателен.

Модуль вектора $E$ найдем по теореме косинусов:

$$E = \sqrt{E_1^2 + E_2^2 - 2E_1E_2\cos\alpha}, \tag{2}$$

где $\beta$ – угол между векторами $E_1$ и $E_2$, $\cos\alpha =$ 0,707,

Подставляя выражение $E_1$ и $E_2$ из (1) в (2) и вынося общий множитель $1/(4\pi\varepsilon_0)$ за знак корня, получаем

$$E = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\sqrt{\frac{Q_1^2}{r_1^4} + \frac{Q_2^2}{r_2^4} + 2\frac{|Q_1||Q_2|}{r_1^2 r_2^2}\cos\alpha}. \tag{3}$$

$$E = \frac{1}{4\cdot 3{,}14\cdot 8{,}85\cdot 10^{-12}}\sqrt{\frac{(-1\cdot 10^{-9})^2}{0{,}12^4} + 2\frac{|-1\cdot 10^{-9}|}{0{,}12^2}\cdot 0{,}707} = 2{,}82\cdot 10^5\, В/м = 282 кВ/м$$

Задача 3. Две равномерно заряженные концентрические сферы с радиусами $R_1$ и $R_2$ имеют заряды соответственно $q_1$ и $q_2$.

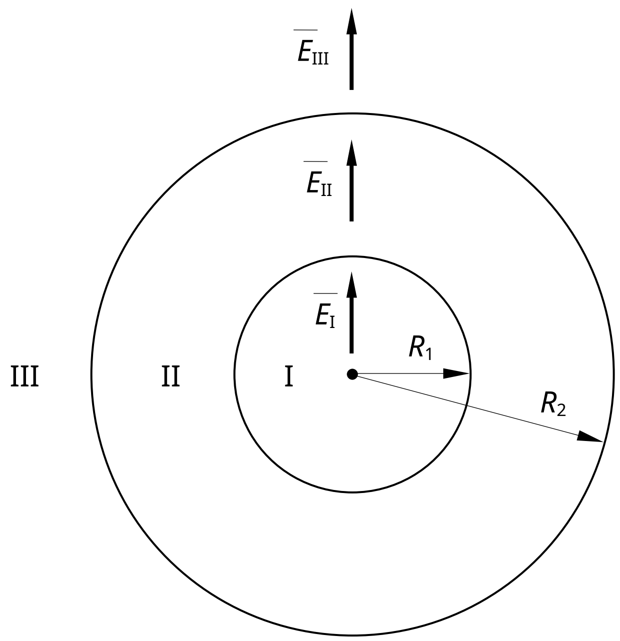
1. Определить напряженность и потенциал, создаваемые заряженными сферами в точках a, b, и c, находящимися на расстоянии соответственно $r_1$, $r_2$ и $r_3$ от центра сфер.

2. Построить график зависимости напряженности от расстояния E(r), взяв за начало координат центр сферы.

3. Построить график зависимости потенциала от расстояния φ(r), приняв за нулевой потенциал точку, находящуюся очень далеко от центра сфер. Числовые значения заданных величин указаны в таблице.

| № варианта | $q_1 \cdot 10^{-10}$ Кл | $q_2 \cdot 10^{-10}$ Кл | $R_1$, см | $R_2$, см | $r_1$, см | $r_2$, см | $r_3$, см |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 6 | 1 | − 4 | 1 | 4 | 0,5 | 3 | 5 |

Решение:




Напряженность электрического поля, создаваемого металлической сферой радиусом $R_1$, несущей заряд $Q_1$, на расстоянии $r$ от центра сферы:

внутри сферы ($r < R_1$)   $E_1 = 0$;

вне сферы, включая внешнюю поверхность сферы, $r \geq R_1$

$$E_1 = \frac{Q_1}{4\pi\varepsilon_0 \varepsilon r^2}.$$

$\varepsilon = 1$ − диэлектрическая проницаемость среды;

$\varepsilon_0 = 8{,}85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м − электрическая постоянная.

Для сферы радиуса $R_2$: внутри сферы ($r < R_2$)   $E_2 = 0$;

вне сферы, включая внешнюю поверхность сферы, $r \geq R_2$

$$E_2 = \frac{Q_2}{4\pi\varepsilon_0 r^2}.$$

Результирующую напряженность найдем по принципу суперпозиции полей векторным суммированием:

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

$$E = \text{¿}\left\{0 \ \text{при}\ r < R_1 \text{¿}\left\{\frac{Q_1}{4\pi\varepsilon_0 r^2} \ \text{при}\ R_1 \le r < R_2 \text{¿¿¿¿}\right.\right.$$

$$\text{¿}$$

Потенциал электрического поля, создаваемого металлической сферой радиусом $R_1$, несущей заряд $Q_1$, на расстоянии $r$ от центра сферы:

внутри сферы и на поверхности ($r \le R_1$)

$$\phi_1 = \frac{Q_1}{4\pi\varepsilon_0 R_1},$$

вне сферы ($r > R_1$)

$$\phi_1 = \frac{Q_1}{4\pi\varepsilon_0 r}.$$

Для сферы радиуса $R_2$:

внутри сферы и на поверхности ($r \le R_2$)

$$\phi_2 = \frac{Q_2}{4\pi\varepsilon_0 R_2},$$

вне сферы ($r > R_2$)

$$\phi_2 = \frac{Q_2}{4\pi\varepsilon_0 r}.$$

Результирующий потенциал найдем по принципу суперпозиции полей:

$$\phi = \phi_1 + \phi_2;$$

$$\phi = \text{¿}\left\{\frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\left(\frac{Q_1}{R_1} + \frac{Q_2}{R_2}\right) \ \text{при}\ r < R_1 \text{¿}\left\{\frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\left(\frac{Q_1}{r} + \frac{Q_2}{R_2}\right) \ \text{при}\ R_1 \le r < R_2 \text{¿¿¿¿}\right.\right.$$

$$\text{¿}$$

$R_1 = 0{,}01$ м; $R_2 = 0{,}04$ м.

1) $r = 0{,}005\ \text{м} < R_1$;

$$E = 0;$$

$$\varphi = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\left(\frac{Q_1}{R_1} + \frac{Q_2}{R_2}\right) = \frac{1}{4\pi \cdot 8,85 \cdot 10^{-12}} \cdot \left(\frac{1 \cdot 10^{-10}}{0,01} + \frac{-4 \cdot 10^{-10}}{0,04}\right) = -2749417 \text{ В}.$$

2) $r = 0{,}03$ м, $R_1 < r < R_2$;

$$E = \frac{Q_1}{4\pi\varepsilon_0 r^2} = \frac{1 \cdot 10^{-10}}{4\pi \cdot 8,85 \cdot 10^{-12} \cdot 0,03^2} = 7123430 \text{В/м};$$

$$\varphi = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\left(\frac{Q_1}{r} + \frac{Q_2}{R_2}\right) = \frac{1}{4\pi \cdot 8,85 \cdot 10^{-12}} \cdot \left(\frac{1 \cdot 10^{-10}}{0,03} + \frac{-4 \cdot 10^{-6}}{0,04}\right) = -1845454 \text{В}.$$

3) $r = 0{,}05$ м $> R_2$;

$$E = \frac{Q_1 + Q_2}{4\pi\varepsilon_0 r^2} = \frac{1 \cdot 10^{-10} - 4 \cdot 10^{-10}}{4\pi \cdot 8,85 \cdot 10^{-12} \cdot 0,05^2} = -8429817 \text{ В/м};$$

$$\varphi = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0 r}(Q_1 + Q_2) = \frac{1}{4\pi \cdot 8,85 \cdot 10^{-12} \cdot 0,05} \cdot \left(1 \cdot 10^{-10} - 4 \cdot 10^{-10}\right) = -1348771 \text{ В}.$$

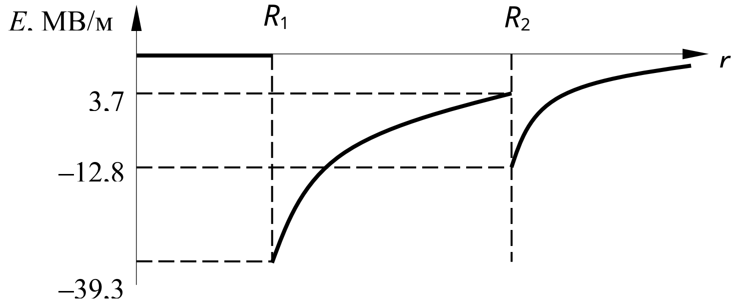
Вычислим значения напряженности на границах областей:

$$E(R_1)_{+0} = \frac{Q_1}{4\pi\varepsilon_0 R_1^2} = \frac{1 \cdot 10^{-10}}{4\pi \cdot 8,85 \cdot 10^{-12} \cdot 0,01^2} = 39,3 \cdot 10^6 \text{ В/м} =$$

$$= -39{,}3 \text{ МВ/м};$$

$$E(R_2)_{-0} = \frac{Q_1}{4\pi\varepsilon_0 R_2^2} = \frac{-7 \cdot 10^{-6}}{4\pi \cdot 8,85 \cdot 10^{-12} \cdot 0,13^2} = -3,7 \cdot 10^6 \text{ В/м} = 3,7 \text{ МВ/м};$$

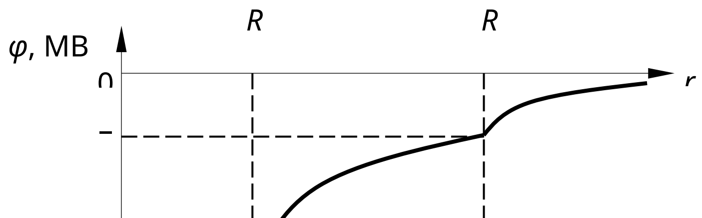
$$E(R_2)_{+0} = \frac{Q_1 + Q_2}{4\pi\varepsilon_0 R_1^2} = \frac{1 \cdot 10^{-10} - 4 \cdot 10^{-10}}{4\pi \cdot 8,85 \cdot 10^{-12} \cdot 0,01^2} = -12,8 \cdot 10^6 \text{ В/м} = -12,8 \text{ МВ/м}.$$




Вычислим значения потенциала на границах областей:

$$\varphi(R_1) = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\left(\frac{Q_1}{R_1} + \frac{Q_2}{R_2}\right) = \frac{1}{4\pi \cdot 8,85 \cdot 10^{-12}} \cdot \left(\frac{1 \cdot 10^{-10}}{0,01} + \frac{-4 \cdot 10^{-10}}{0,04}\right) = -2,75 \cdot 10^6 \text{ В} = -2,75 \text{ МВ};$$

$$\varphi(R_2) = \frac{Q_1 + Q_2}{4\pi\varepsilon_0 R_2} = \frac{1 \cdot 10^{-10} - 4 \cdot 10^{-10}}{4\pi \cdot 8,85 \cdot 10^{-12} \cdot 0,04} = -1,66 \cdot 10^6 \text{ В/м} = -1,66 \text{ МВ}.$$



Ответ: 1) $E = 0$; $\varphi = –2749417$В; 2) $E = –7123430$В/м; $\varphi = –1845454$ В; 3) $E = –8429817$ В/м; $\varphi = –1348771$ В.

Задача 4. Плоский конденсатор заполнен полностью двумя слоями диэлектрика с диэлектрическими проницаемостями $\varepsilon_1$ и $\varepsilon_2$. Толщина слоев $d_1$ и $d_2$. На конденсатор подано напряжение U. Граница раздела диэлектриков параллельна обкладкам конденсатора. Возможны случаи, когда: а) конденсатор предварительно отключен от батареи: б) конденсатор все время соединен с батареей. Найти величину, указанную в таблице знаком вопроса.

| № варианта | $\varepsilon_1$ | $\varepsilon_2$ | $\varepsilon_1/\varepsilon_2$ | $d_1$, см | $d_2$, см | U, В | $E_1 \cdot 10^5$, В/м | $E_2 \cdot 10^5$, В/м |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| б) конденсатор все время соединен с батареей | | | | | | | | |
| 6 | 2,0 | 6,0 | | 2,0 | 4,0 | – | – | ? |

Если конденсатор заполнен диэлектриком с относительной диэлектрической проницаемостью ε, то напряжённость в ε раз меньше и равна $E=\sigma/\varepsilon\varepsilon_0$

Для нескольких параллельных пластинам слоёв диэлектриков эта формула также справедлива (поскольку линии напряжённости перпендикулярны поверхности диэлектрика), в результате чего получаем следующее выражение для напряжения $U=E_1d_1+E_2d_2=\sigma/\varepsilon_0\cdot(d_1/\varepsilon_1+d_2/\varepsilon_2)$

Выражаем напряжённость

$E_2=\sigma/\varepsilon_2\varepsilon_0=U/(\varepsilon_2(d_1/\varepsilon_1+d_2/\varepsilon_2)) = U/(d_2+d_1\varepsilon_2/\varepsilon_1) \approx 3{,}7 \cdot 10^3$ В/м $= 3{,}7$ кВ/м

$[E] = [U] /(d_2 + d_1 \cdot \varepsilon_2/\varepsilon_1) =$ В/м

Задача 5. Из микроамперметра с пределом измерения силы тока $I_0$ и сопротивлением катушки $R_0$ изготовляют амперметр с пределом измерения силы тока I или вольтметр с пределом измерения напряжения U путем подключения шунта сопротивлением или добавочного сопротивления Определите величину, указанную в таблице знаком вопроса.

| № варианта | $I_0$, мА | $R_0$, Ом | I, А | U, В | $R_ш$, Ом | $R_Д$, Ом |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 6 | 1 | 0,1 | 1 | ? | ? | 9,9 |

Решение:

У вольтметра добавочное сопротивление подключается последовательно с катушкой, так что по ним протекает один и тот же ток $I_0$. По закону Ома:

$U = I_0 \cdot (R_0 + R_д)$ (1),

$U = 0{,}001 \cdot (0{,}1 + 9{,}9) = 0{,}0001$В

Падение напряжения на катушке микроамперметра при токе $I_0 = 1{,}0 \cdot 10^{-3}$ А:

$U_к = I_0 \cdot R_0 = 1{,}0 \cdot 10^{-3} \cdot 0{,}1 = 1{,}0 \cdot 10^{-4}$ В.

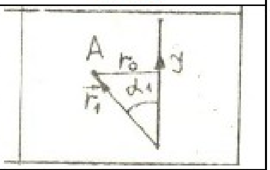
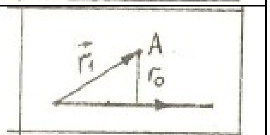
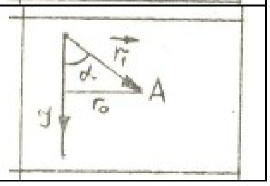
На подключённом параллельно с катушкой шунте напряжение

$U_ш = U$, поэтому ток через шунт:

$I_ш = U_ш/R_щ$

$R_щ = 1 \cdot 1{,}0 \cdot 10^{-4} = 1{,}0 \cdot 10^{-4}$ Ом.

Задача 6. По отрезку прямого провода длиной L течет ток I. Точка равноудалена от концов отрезка провода и находится на расстоянии $r_0$ от его середины. B – индукция магнитного поля, создаваемая этим током в точке A. α– угол между радиусом –вектором r , проведенным от начала провода к точке A и направлением тока в проводе. Определить величины указанные в таблице знаком вопроса.

| № | I, A | L, м | $r_0$, м | α, град | $B \cdot 10^{-5}$, Тл | Направление тока |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 0 | 50 | 0,80 | 0,30 | - | ? |  |
| 1 | ? | 0,80 | 0.30 | - | 2,7 | |
| 2 | 50 | - | 0,30 | ? | 2,9 | |
| 3 | 50 | - | ? | 30 | 2,9 | |
| 4 | 50 | ? | 30 | 30 | 2,9 |  |
| 5 | ? | 1.0 | - | 30 | 2,9 | |
| 6 | 100 | 2,0 | 1,00 | - | ? | |
| 7 | ? | 2,0 | 1,0 | - | 1,4 |  |
| 8 | 100 | - | 1,0 | ? | 1,4 | |
| 9 | 100 | - | ? | 45 | 1,4 | |

Воспользуемся законом Био-Савара-Лапласа, который позволяет найти магнитную индукцию $d\overline{B}$, создаваемую элементом тока *Idx*. Выделим элемент проводника с током длиной dx. Он создает вектор магнитной индукции $d\overline{B}$, значение которого

$$dB = \frac{\mu\mu_0}{4\pi} \cdot \frac{I \sin\alpha}{r^2} dx ,$$

где α — угол между векторами $d\,\overline{x}$ и $\overline{r}$; *I* — сила тока в проводнике; *r* — расстояние до элемента *dx* проводника; μ — магнитная проницаемость среды; для воздуха μ = 1; $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м — магнитная постоянная.

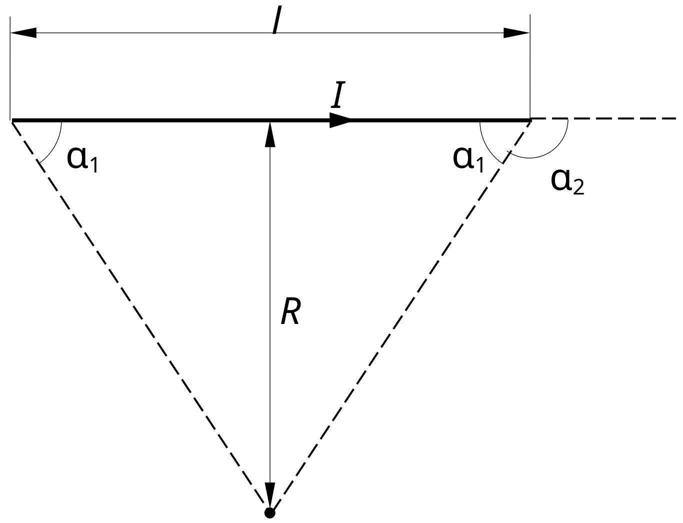
Из рисунка:

$$r = \frac{a}{\sin\alpha}, \quad r d\alpha = \sin\alpha \; dx .$$

Тогда

$$dB = \frac{\mu\mu_0}{4\pi} \cdot \frac{I \sin\alpha}{r^2} \frac{rd\alpha}{\sin\alpha} = \frac{\mu\mu_0}{4\pi} \cdot \frac{Id\alpha}{r} = \frac{\mu\mu_0}{4\pi} \cdot \frac{I \sin\alpha \; d\alpha}{a},$$

$$B = \frac{\mu\mu_0 I}{4\pi a} \cdot \int_{\alpha_1}^{\alpha_2} \sin\alpha \; d\alpha = -\frac{\mu\mu_0 I}{4\pi a} \cdot \cos\alpha \Big|_{\alpha_1}^{\alpha_2} = \frac{\mu\mu_0 I}{4\pi a} \cdot (\cos\alpha_1 - \cos\alpha_2).$$




В нашем случае $a = R$;

$$\cos\alpha_1 = \frac{l/2}{\sqrt{R^2 + l^2/4}}.$$

Так как $\alpha_1 + \alpha_2 = 180°$, то

$$\cos\alpha_2 = -\cos\alpha_1.$$

Таким образом,

$$B = \frac{\mu\mu_0 I}{4\pi R} \cdot 2\cos\alpha_1 = \frac{\mu\mu_0 I}{4\pi R} \cdot \frac{l}{\sqrt{R^2 + l^2/4}} = \frac{\mu\mu_0 I}{2\pi R} \cdot \frac{l}{\sqrt{4R^2 + l^2}};$$

$$B = \frac{1 \cdot 4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 100}{2\pi \cdot 1{,}0} \cdot \frac{2}{\sqrt{4 \cdot 1^2 + 2^2}} = 46{,}4 \cdot 10^{-6} \text{ Тл} = 46{,}4 \text{ мкТл}.$$

Ответ: $B$ = 46,4 мкТл.

Задача 7. Два длинных прямолинейных проводника, по которым текут токи $I_1$ и $I_2$ по указанным в таблице направлениям, расположены в плоскости чертежа на расстоянии $a_1$ друг от друга. Через некоторое время расстояние между проводниками изменяется до значения $a_2$. Определить совершенную при этом работу сил поля на единицу длины проводника.

| № | $I_1$, A | $I_2$, A | Направление токов | | $a_1$, м | $a_2$, м |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | $I_1$ | $I_2$ | | |
| 0 | 20 | 10 | вверх | Вверх | 0,1 | 0,2 |
| 1 | 50 | 4 | Вверх | Вверх | 0,2 | 0,4 |
| 2 | 100 | 2 | Вверх | Вверх | 0,4 | 0.2 |
| 3 | 25 | 8 | Вверх | Вверх | 0,2 | 0,1 |
| 4 | 8 | 20 | Вверх | Вниз | 1,0 | 0,5 |
| 5 | 10 | 50 | Вверх | Вниз | 0,8 | 0,4 |
| 6 | 4 | 100 | Вверх | Вниз | 1,0 | 2,0 |
| 7 | 2 | 1 | вверх | Вниз | 2,0 | 4,0 |
| 8 | 20 | 4 | вниз | Вниз | 0.1 | 0.2 |
| 9 | 50 | 8 | Вниз | Вниз | 0.2 | 0.4 |

Напряженности, создаваемые первым и вторым проводником в точке А, соответственно равны

$$H_1 = \frac{I_1}{2\pi \cdot d/2} = \frac{I_1}{\pi d}$$

$$H_2 = \frac{I_2}{\pi d}$$

Векторы $\bar{H}_1$ и $\bar{H}_2$ направлены в одну сторону. Суммарная напряженность равна

$$H = H_1 + H_2 = \frac{I_1 + I_2}{\pi d} = \frac{5+10}{3,14 \cdot 1} = 4,78 \text{ А/м}$$

$$H' = \frac{5+10}{3,14 \cdot 2} = 2,39 A/м$$

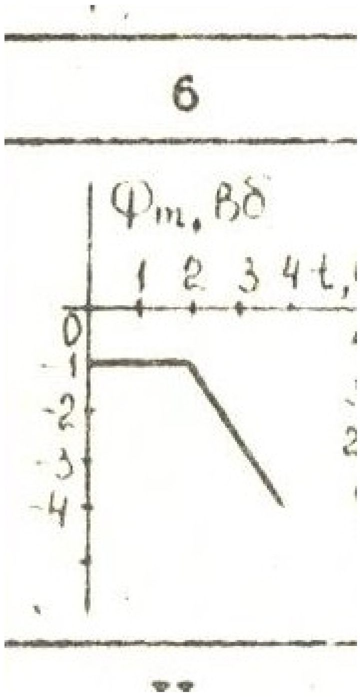
Искомая магнитная индукция

$$B = \mu_0 H = 4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 4,78 = 6 \cdot 10^{-6} \text{ Тл} = 6 \text{ мкТл}$$

$$B' = 4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 2,39 = 3 \cdot 10^{-6} \text{ Тл} = 3 \text{мкТл}$$

Работа: А = (В − В$'$) = 6 – 3 = 3 мкТл

Задача 8. По графику зависимости магнитного потока от времени Ф= f(t) построить график зависимости ЭДС индукции от времени ε = f(t).




Решение

Основной закон электромагнитной индукции

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

где $\varepsilon_i$ — электродвижущая сила индукции;

$N$ — число витков контура;

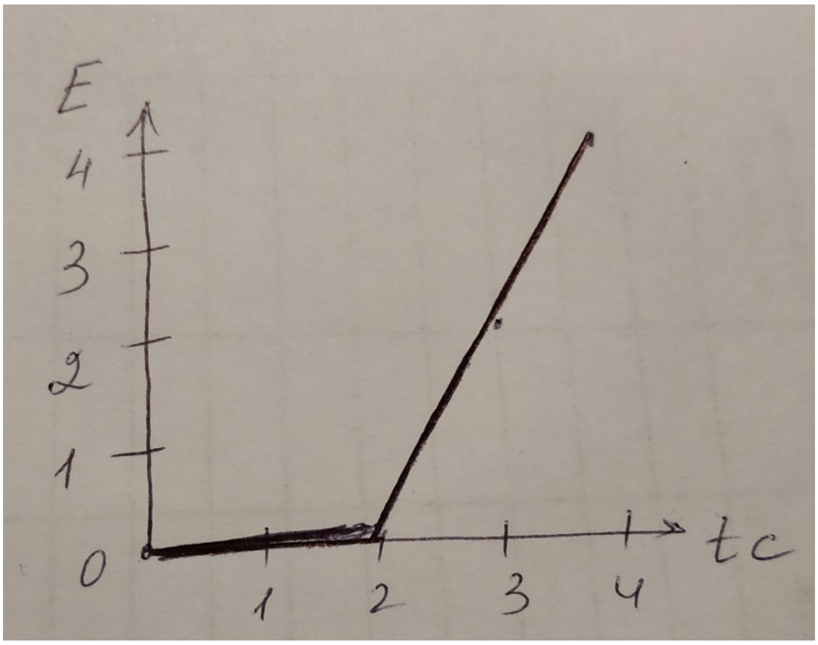
$\Phi$ — магнитный поток.

ЭДС индукции — это производная магнитного потока по времени.

Знак «минус» перед скоростью изменения магнитного потока в формуле отражает правило Ленца: индуцированный ток всегда направлен так, чтобы магнитное поле, которое он создает, препятствовало изменению магнитного потока.

Если магнитный поток, проходящий через площадь контура, уменьшается, то магнитное поле индуцированных токов будет стремиться его увеличить.

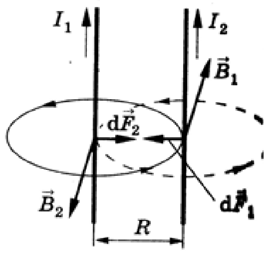
Если поток увеличивается — магнитное поле индуцированных токов будет стремиться его уменьшить.


E
4
3
2
1
0
1
2
3
4
tc

**№1-2 246.** По прямолинейным длинным параллельным проводникам, находящимся на расстоянии 1 см, в одном направлении текут токи по 2 А. Какую работу на единицу длины проводников нужно совершить, чтобы раздвинуть их до расстояния 4 см?

| Дано: |
|---|
| $r_1 = 1$ см |
| $I_1 = I_2 = I = 2$ А |
| $r_2 = 4$ см |
| А – ? |

**Решение.**




$r$

Магнитное поле проводника 1 на расстоянии $r$ :

$$B_1 = \frac{\mu_0}{4\pi}\frac{2I_1}{r} = \frac{\mu_0}{4\pi}\frac{2I}{r}.$$

Сила Ампера, с которой проводник 1 действует на элемент длиной $dl$ проводника 2 (направление определяется по правилу левой руки):

$$dF_1 = I_2 B_1 dl = I\frac{\mu_0}{4\pi}\frac{2I}{r}dl = \frac{\mu_0}{2\pi}\frac{I^2}{r}dl.$$

Аналогично можно получить, что сила, с которой проводник 2 действует на элемент длиной