

Электродинамика

Электрическое поле

Магнитное поле

созда

Неподвижные заряды



Элементарный заряд –
 $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл

1. Закон сохранения
электрического заряда:

$$q = \sum_{i=1}^N q_i = const$$

Движущиеся заряды,
проводники с током,
пост. магниты

Равномерно распределенный заряд

а) линейное распределение



$$\tau = \frac{dq}{d\ell}$$

$$q = \int_{\ell} \tau \cdot d\ell$$

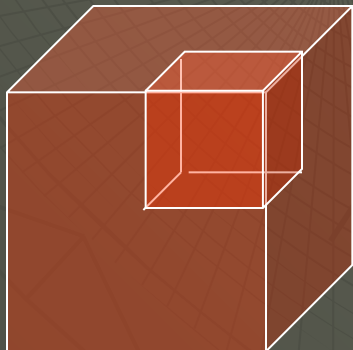
б) распределение по поверхности



$$\sigma = \frac{dq}{dS}$$

$$q = \int_S \sigma \cdot dS$$

в) распределение по объему



$$\rho = \frac{dq}{dV}$$

$$q = \int_V \rho \cdot dV$$

обнаруживают по действию на

заряженные тела

Закон Кулона:

В векторной форме:

$$\vec{F} = k \frac{|q_1| \cdot |q_2|}{\epsilon r^2} \cdot \vec{r}$$

В скалярной форме:

$$F = k \frac{|q_1| \cdot |q_2|}{\epsilon r^2}$$

$$k = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} = 9 \cdot 10^9 \frac{\text{Н} \cdot \text{м}^2}{\text{Кл}^2}$$

$$\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \frac{\text{Ф}}{\text{м}}$$

проводники с током,
рамки с током или
магнитные стрелки

$$F_{\boxtimes} = \frac{\mu\mu_0}{2\pi} \frac{I_1 I_2}{r} \text{ —}$$

*сила, действующая на
единицу длины двух
взаимодействующих
параллельных проводников
с током*

$$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{Гн/м}$$

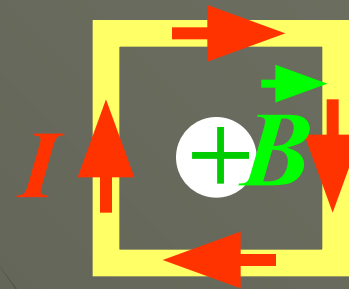
Силовые характеристики

Вектор напряженности

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

$$E = k \frac{|q_0|}{r^2}$$

Вектор магнитной индукции



$$B \sim \frac{M_{\max}}{I \cdot S}$$

Характеризуют поле в веществе

Вектор
электрической индукции

\vec{D}

Характеризуют поле в вакууме

$$D = \epsilon\epsilon_0 E$$

Вектор напряженности

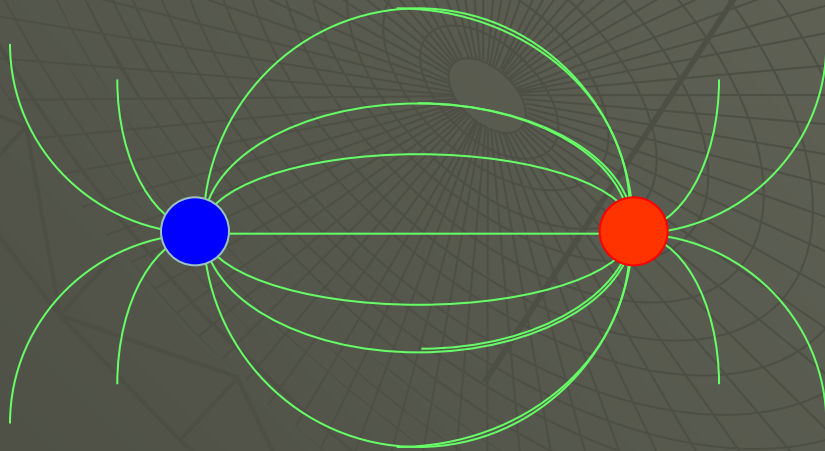
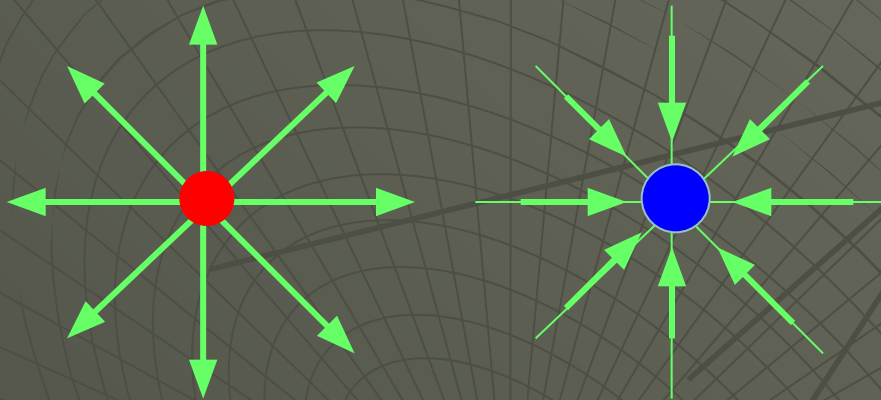
\vec{H}

$$B = \mu\mu_0 H$$

Изображают с помощью

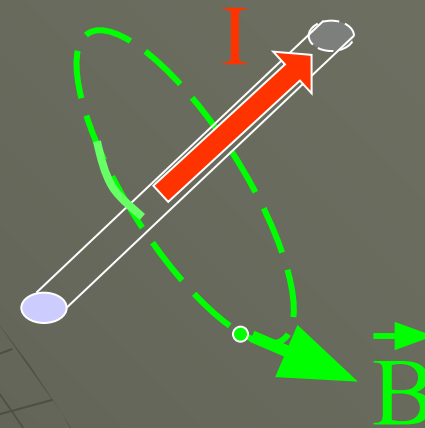
линий

напряженности



линий

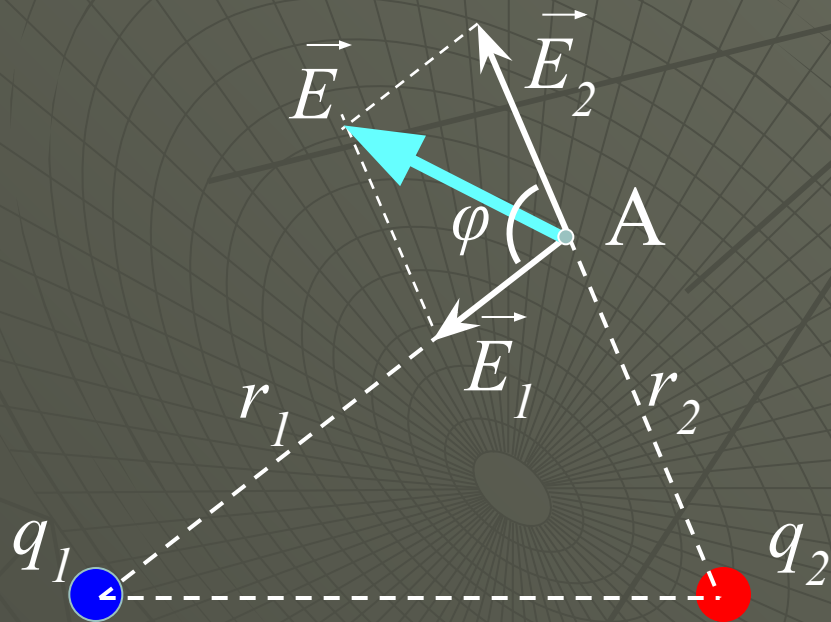
магнитной индукции



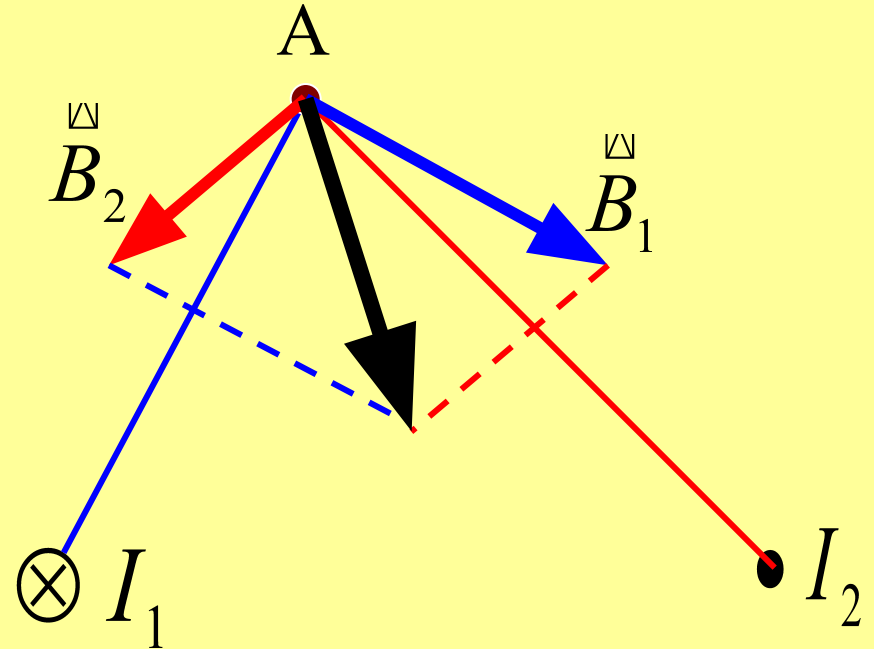
Принцип суперпозиции

$$\vec{E} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2 + \dots + \vec{E}_i + \dots + \vec{E}_n = \sum_{i=1}^n \vec{E}_i$$

$$\vec{B} = \vec{B}_1 + \vec{B}_2 + \dots + \vec{B}_i + \dots + \vec{B}_n = \sum_{i=1}^n \vec{B}_i$$



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



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

$$n \rightarrow \infty \quad \Delta \bar{E}_i \rightarrow 0$$

$$\bar{E} = \lim \sum \Delta \bar{E}_i$$

$$n \rightarrow \infty \\ \Delta \bar{E}_i \rightarrow 0$$

$$\bar{E} = \int d\bar{E}$$

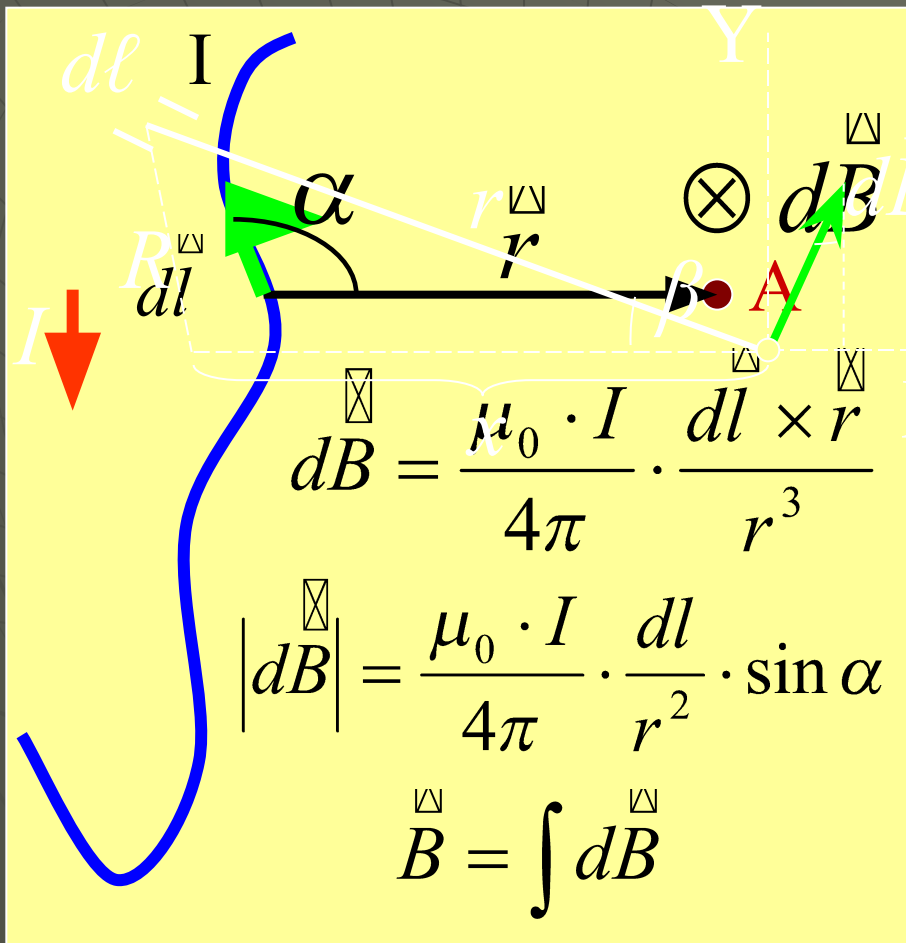
$$n \rightarrow \infty \quad \Delta \bar{B}_i \rightarrow 0$$

$$\bar{B} = \lim \sum \Delta \bar{B}_i$$

$$n \rightarrow \infty \\ \Delta \bar{B}_i \rightarrow 0$$

$$\bar{B} = \int d\bar{B}$$

Закон Био-Савара-Лапласа (БСЛ)



$$\sin \alpha = 1$$

$$dB_x = dB \cdot \sin \beta = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{I \cdot d\vec{r}}{r^2} \cdot \sin \beta ;$$

$$B = \int \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{I \cdot d\vec{r}}{r^2} \cdot \sin \beta = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{I \cdot \sin \beta}{r^2} \int d\vec{r} =$$

$$= \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{2\pi R \cdot I \cdot \sin \beta}{r^2} = \frac{\mu_0 I}{2} \frac{R}{(R^2 + x^2)} \cdot \sin \beta =$$

$$= \frac{\mu_0}{2} \frac{IR^2}{(R^2 + x^2)^{3/2}}$$

Задания

2. Определите направление вектора индукции магнитного поля, созданного током, в указанных на рисунке точках

A •



• B

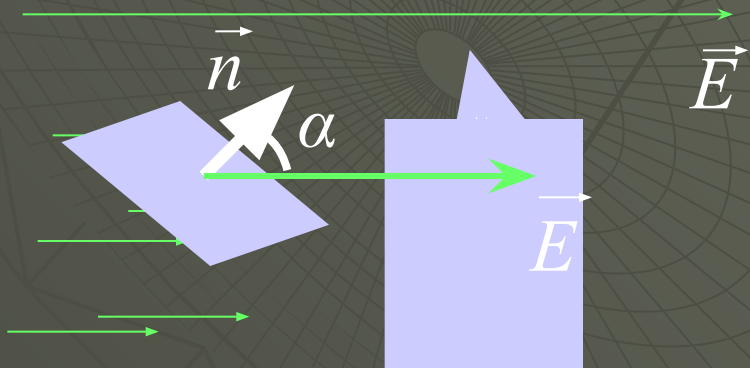
C •

Методы расчета

Теорема Гаусса

$$\oint_S \vec{E} \cdot d\vec{S} = \frac{1}{\epsilon_0} (\sum q_i)_{\text{внутр.}}$$

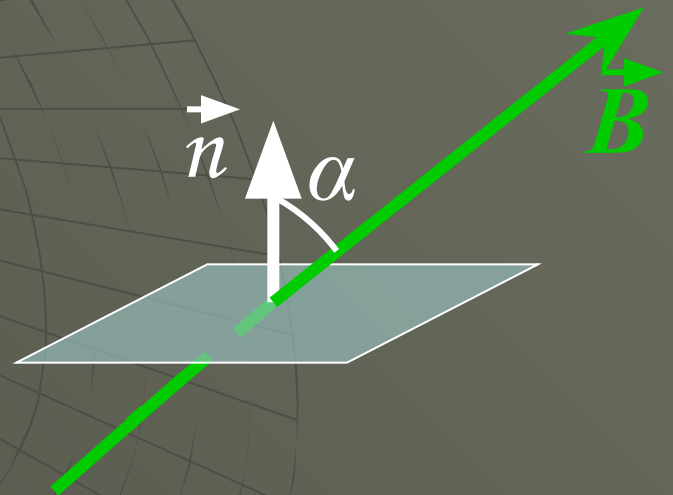
$$\Phi = \int_S \vec{E} \cdot d\vec{S}$$

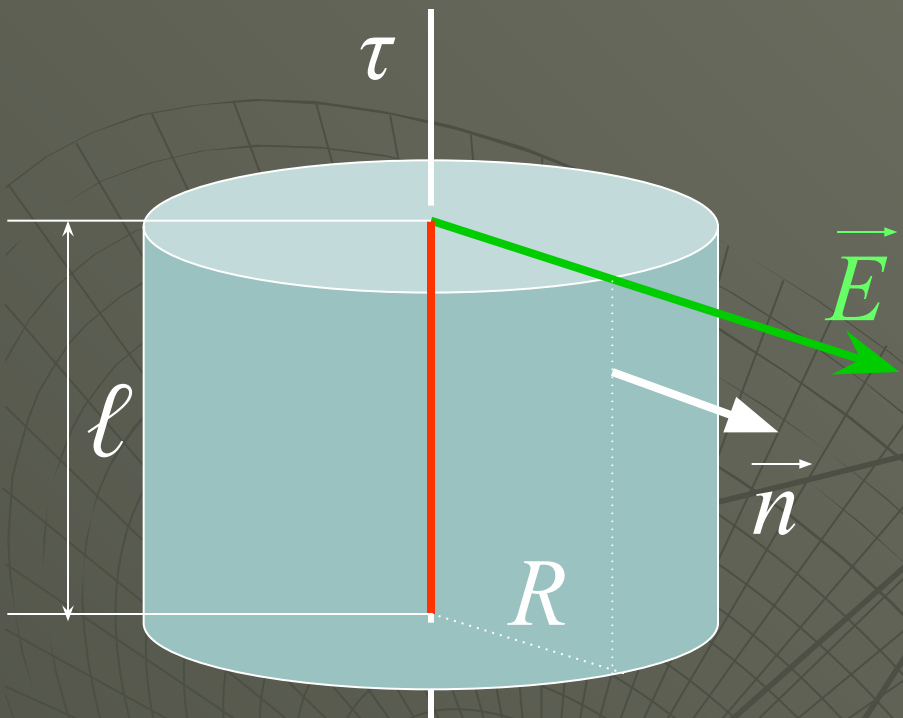


$$d\Phi = \vec{E} \cdot d\vec{S} = E \cdot dS \cdot \cos \alpha$$

$$\oint_S \vec{B} \cdot d\vec{S} = 0$$

$$\Phi = \int_S \vec{B} \cdot d\vec{S} = \int_S B \cdot dS \cdot \cos \alpha$$

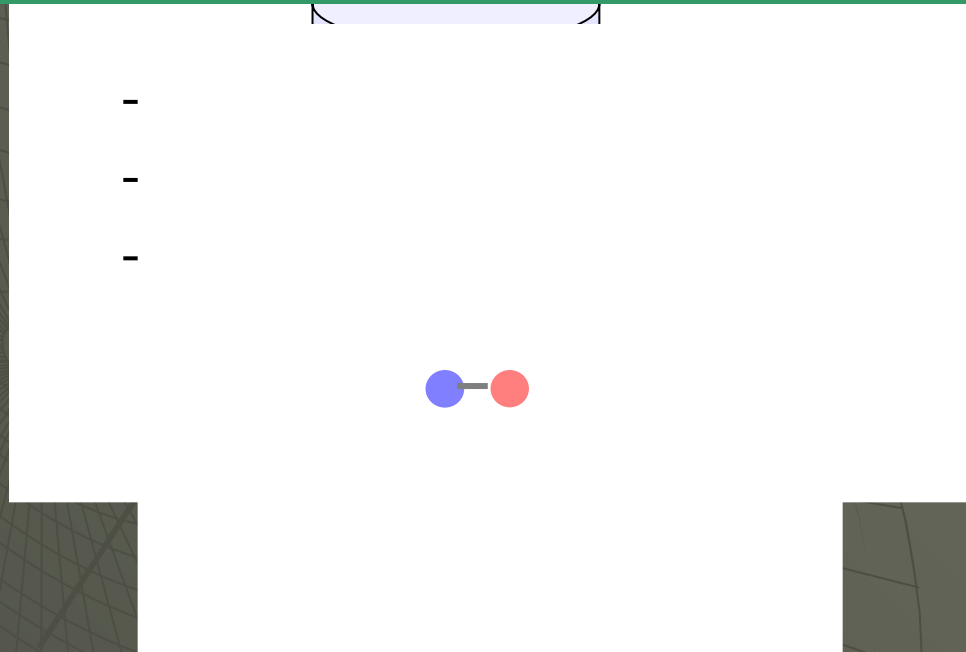




$$2\pi R \ell \cdot E = \frac{1}{\epsilon_0} \tau \cdot \ell$$

$$E = \frac{\tau}{2\pi\epsilon_0 R}$$

1. Определите поток вектора напряженности через замкнутую поверхность для случая изображенного на рисунке.
2. В центре куба находится электрический диполь.
3. Определите поток вектора напряженности через поверхность куба.



Теорема о циркуляции

$$\oint \vec{E} \cdot d\vec{r} = 0$$

Поле потенциально

$$A = -\Delta W$$

$$W = k \frac{q \cdot q_0}{r}$$

$$B = \frac{Дж}{Кл}$$

$$A = -q \cdot (\varphi_2 - \varphi_1) =$$

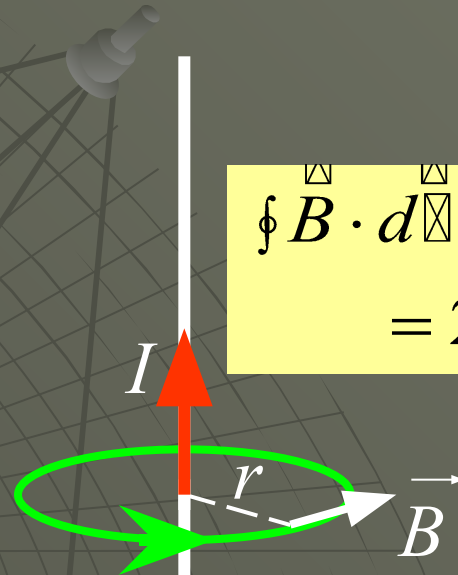
$$= -q \cdot \Delta\varphi = q \cdot U$$

$$\Delta\varphi = -\oint \vec{E} \cdot d\vec{r}$$

$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{l} = \mu_0 \Sigma I_{внутр}$$

Поле непотенциально

$$\begin{aligned} \oint \vec{B} \cdot d\vec{l} &= \oint \vec{B} \cdot d\vec{l} \cdot \cos 0^\circ \\ &= 2\pi r B \end{aligned}$$



$$2\pi r \cdot B = \mu_0 I$$

$$B = \frac{\mu_0 I}{2\pi r}$$

Поле в

Диэлектрики



Эл. диполи



поляризация

$$\varepsilon = \frac{E_0}{E}$$

Магнетики



магн. диполи



намагничивание

$$\mu = \frac{B}{B_0}$$

Энергия поля

$$W = \frac{q\varphi}{2} = \frac{C\varphi^2}{2} = \frac{q^2}{2C}$$

$$W = \frac{qU}{2} = \frac{q^2}{2C} = \frac{CU^2}{2}$$

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

$$W = \int \frac{\varepsilon\varepsilon_0 E^2}{2} dV$$

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

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

$$W = \int \frac{B^2}{2\mu\mu_0} dV$$

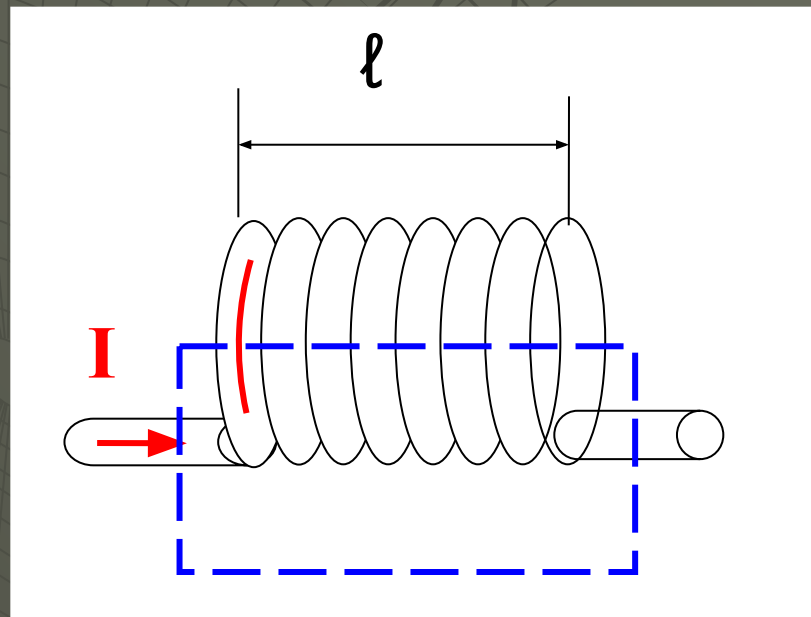
1. Какая из формул позволяет определить циркуляцию

В

2. Соленоид длиной ℓ имеет n витков на единице длины. По соленоиду течет ток I . Определите

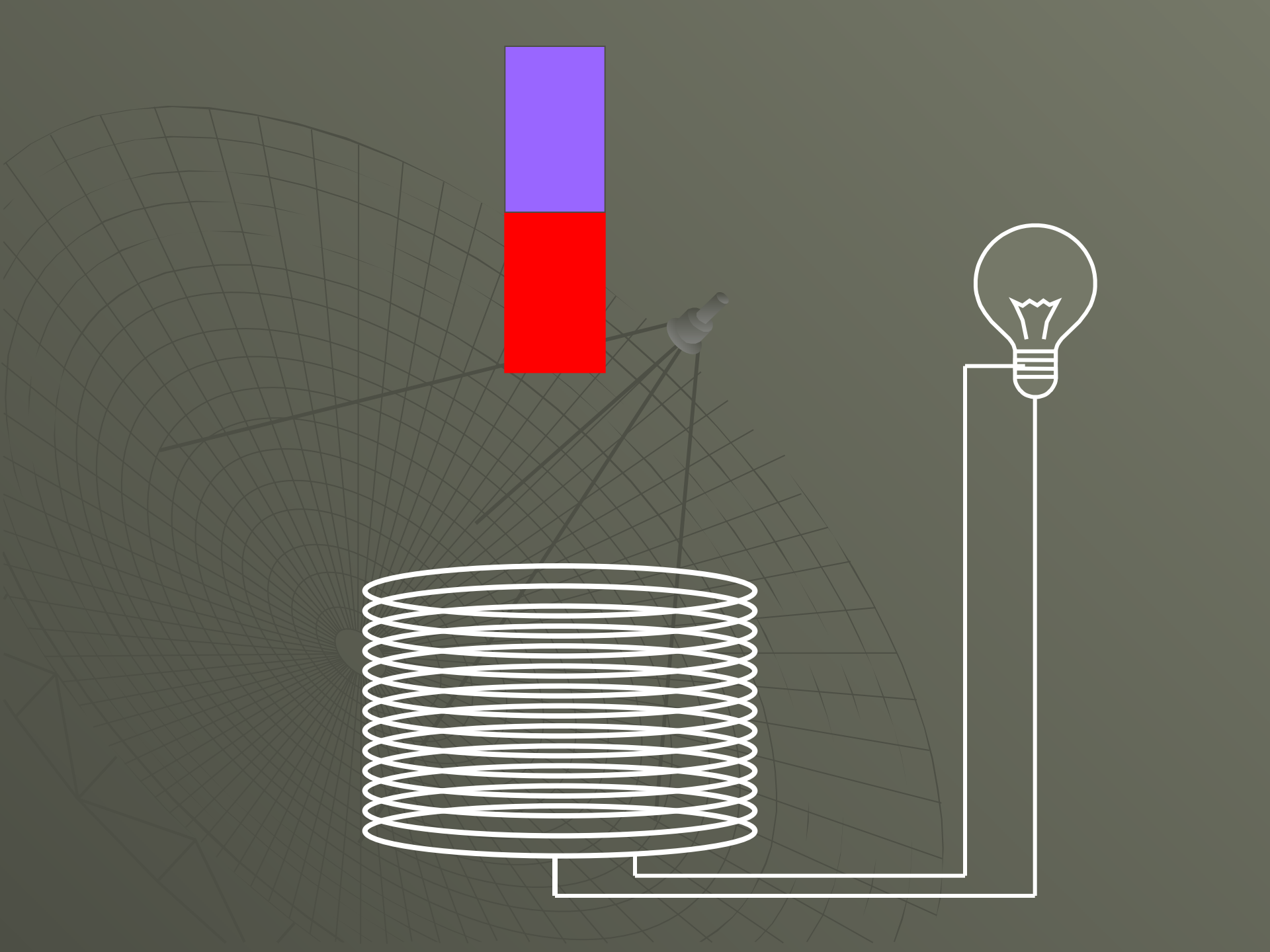
1

циркуляцию вектора индукции по замкнутому контуру, изображенному на рисунке.





Явление электромагнитной индукции



Среднее значение э.д.с. в интервале времени $\Delta t = t_2 - t_1$

Закон электромагнитной индукции Фарадея.

Для простого контура:

$$\langle \varepsilon_i \rangle = - \frac{\Delta \Phi}{\Delta t} = - \frac{\Phi_2 - \Phi_1}{t_2 - t_1} =$$

$$= - \frac{B_2 \cdot S_2 \cdot \cos \alpha_2 - B_1 \cdot S_1 \cdot \cos \alpha_1}{t_2 - t_1}$$

Для сложного контура:

$$\langle \varepsilon_i \rangle = - \frac{\Delta \Psi}{\Delta t} = - \frac{\Psi_2 - \Psi_1}{t_2 - t_1}$$

Мгновенное значение э.д.с. индукции в момент времени t :

Для простого контура:

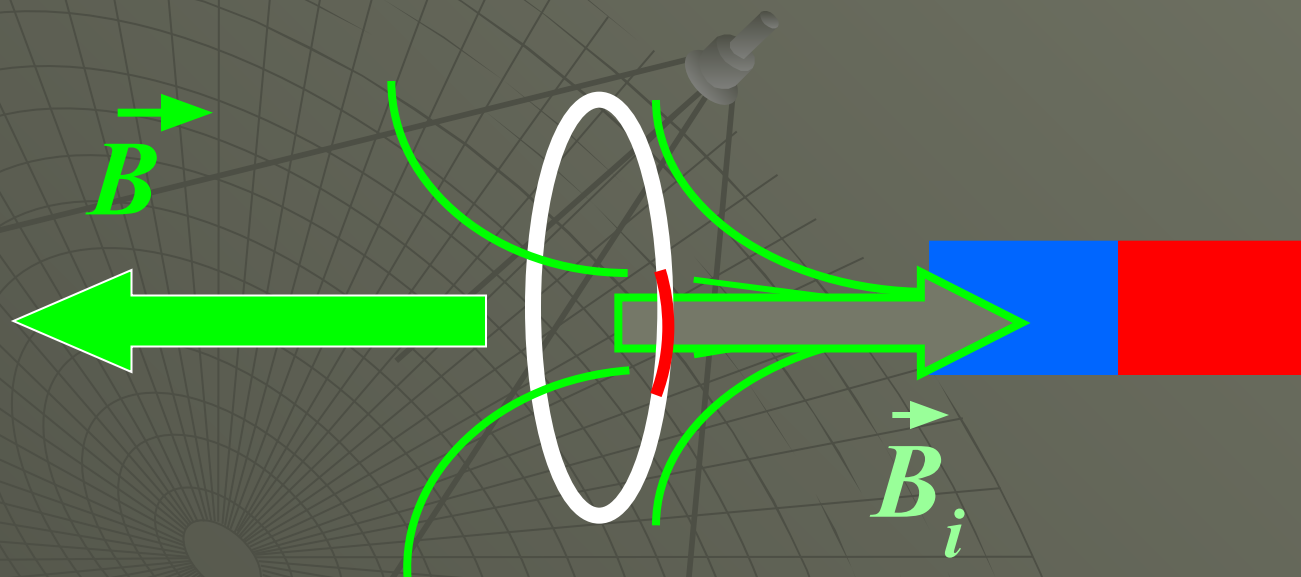
$$\mathcal{E}_i = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \left(-\frac{\Delta \Phi}{\Delta t} \right) = -\frac{d\Phi}{dt}$$

Для сложного контура:

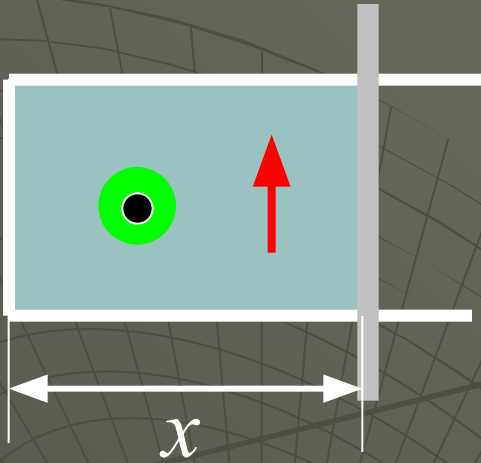
$$\mathcal{E}_i = -\frac{d\Psi}{dt}$$

$$\Psi = \Phi \cdot N$$

$$\Phi_1 \sim N_1 \quad \Phi_2 \sim N_2 \quad N_2 > N_1$$



1.

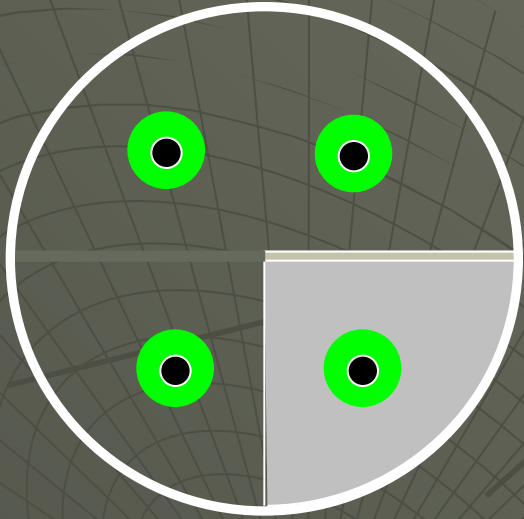


$$\Phi = B \cdot S$$

$$S = \boxtimes \cdot x$$

$$\mathcal{E}_i = \left| -\frac{d\Phi}{dt} \right| = \frac{d(B \cdot \boxtimes \cdot x)}{dt} = B \cdot \boxtimes \cdot \frac{dx}{dt} = B \cdot \boxtimes \cdot v$$

2.

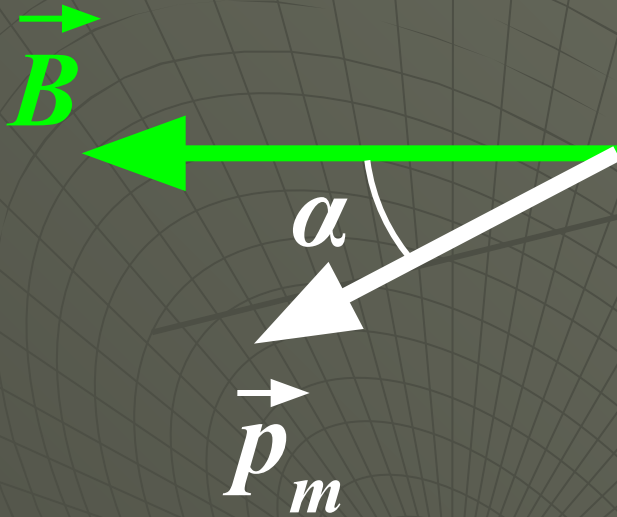


$$S = \frac{\pi \boxtimes^2}{2\pi} \cdot \varphi = \frac{1}{2} \boxtimes^2 \varphi$$

$$\varepsilon_i = \frac{d\left(B \cdot \frac{1}{2} \boxtimes^2 \varphi\right)}{dt} = \frac{1}{2} B \cdot \boxtimes^2 \cdot \frac{d\varphi}{dt} = \frac{1}{2} B \boxtimes^2 \omega$$

3.

$$\Phi = B \cdot S \cdot \cos \alpha$$



$$S = \text{const}$$

$$\varepsilon_i = - \frac{d(B S \cos \alpha)}{dt} = B S \sin \alpha \cdot \frac{d\alpha}{dt} = B S \omega \sin \alpha$$

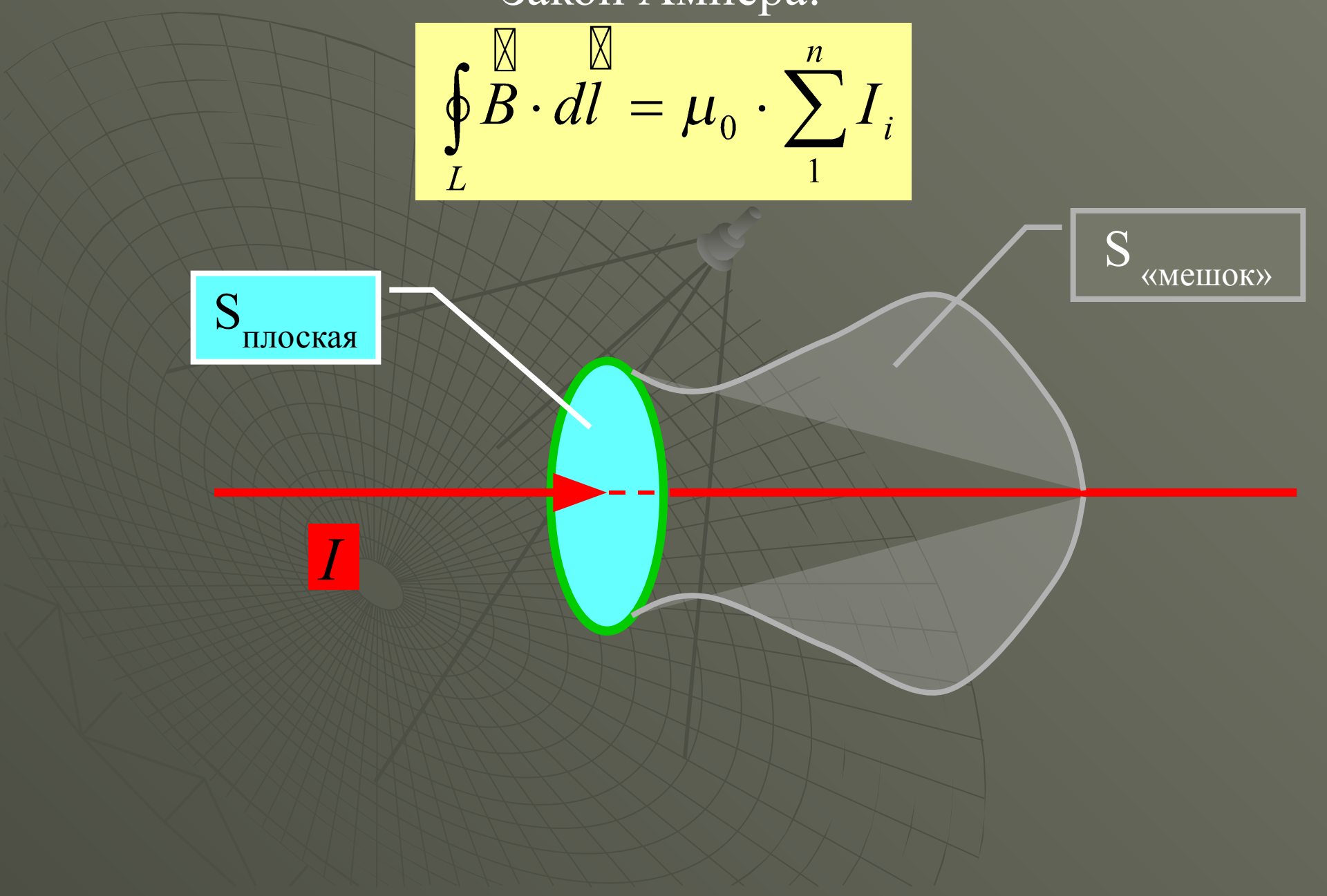
Закон Ампера:

$$\oint_L \vec{B} \cdot d\vec{l} = \mu_0 \cdot \sum_1^n I_i$$

S
плоская

S
«мешок»

I



Плоская
поверхность

Заряд конденсатора:

$$q = C \cdot U = \varepsilon_0 \cdot \frac{S}{d} \cdot E \cdot d = \varepsilon_0 \cdot E \cdot S$$

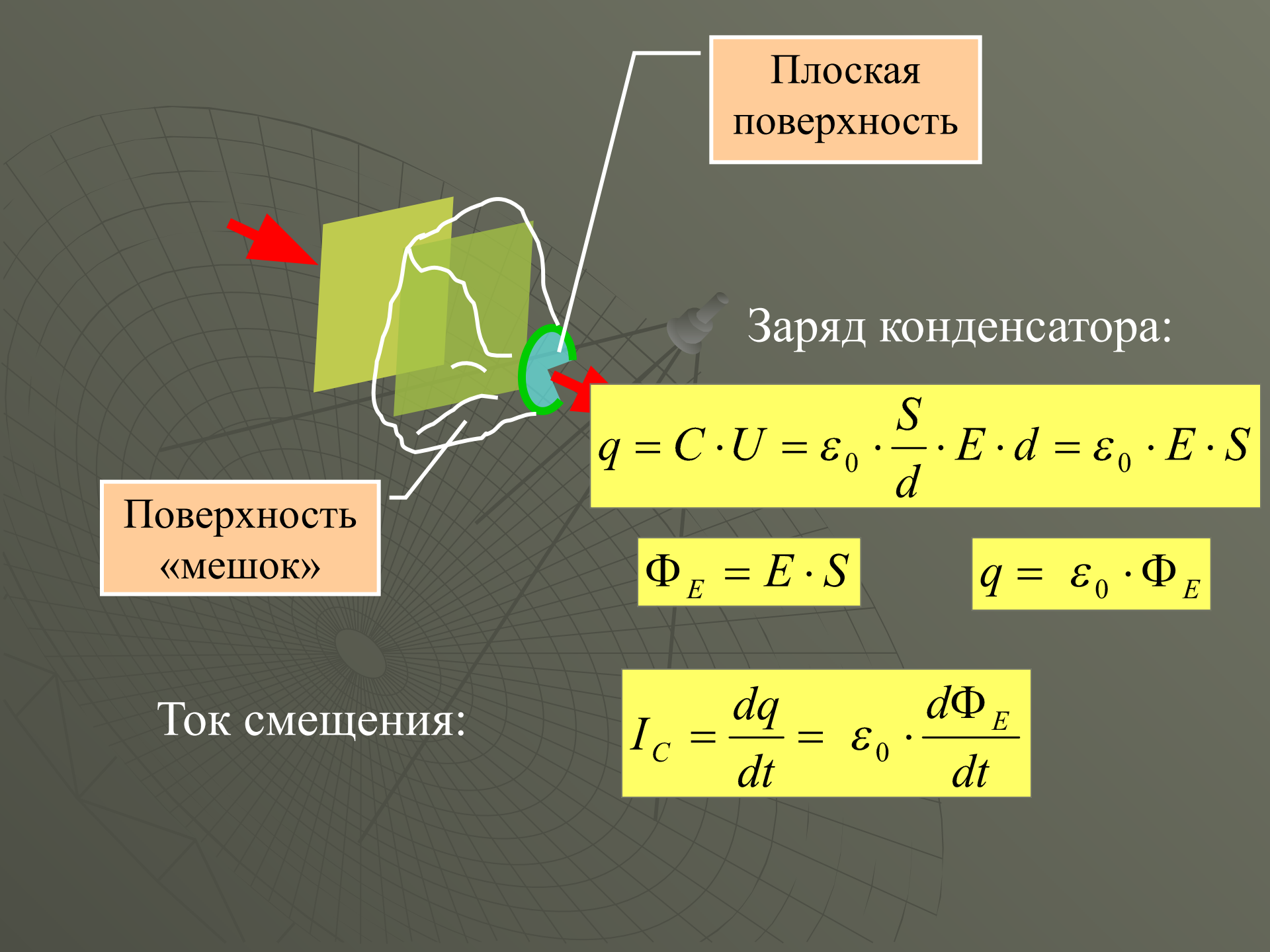
$$\Phi_E = E \cdot S$$

$$q = \varepsilon_0 \cdot \Phi_E$$

Поверхность
«мешок»

Ток смещения:

$$I_C = \frac{dq}{dt} = \varepsilon_0 \cdot \frac{d\Phi_E}{dt}$$



Поле неоднородное:

$$\Phi_E = \int_S \vec{E} \cdot d\vec{S}$$

$$I_C = \frac{dq}{dt} = \varepsilon_0 \cdot \frac{d\Phi_E}{dt} = \varepsilon_0 \cdot \frac{d}{dt} \int_S \vec{E} \cdot d\vec{S}$$

Закон Ампера с учётом тока смещения:

$$\oint_L \vec{B} \cdot d\vec{l} = \mu_0 \cdot \sum_1^n I_i = \mu_0 \cdot (I + I_C)$$

$$\oint_L \vec{B} \cdot d\vec{l} = \mu_0 \cdot I + \mu_0 \cdot \varepsilon_0 \cdot \frac{d\Phi_E}{dt}$$

$$\oint_L \vec{B} \cdot d\vec{l} = \mu_0 \cdot I + \mu_0 \cdot \varepsilon_0 \cdot \frac{d}{dt} \int_S \vec{E} \cdot d\vec{S}$$

Обобщенный закон Фарадея:

$$\oint_L \vec{E}_i \cdot d\vec{l} = - \frac{d\Phi}{dt} = - \frac{d}{dt} \int_S \vec{B} \cdot d\vec{S}$$

Переменное магнитное поле



Переменное электрическое поле

$$\oint_S \vec{E} \cdot d\vec{S} =$$

$$\oint_S \vec{B} \cdot d\vec{S}$$

$$\oint_L \vec{E}_i \cdot d\vec{l}$$

$$\oint_L \vec{B} \cdot d\vec{l}$$

(1)

(2)

(3)

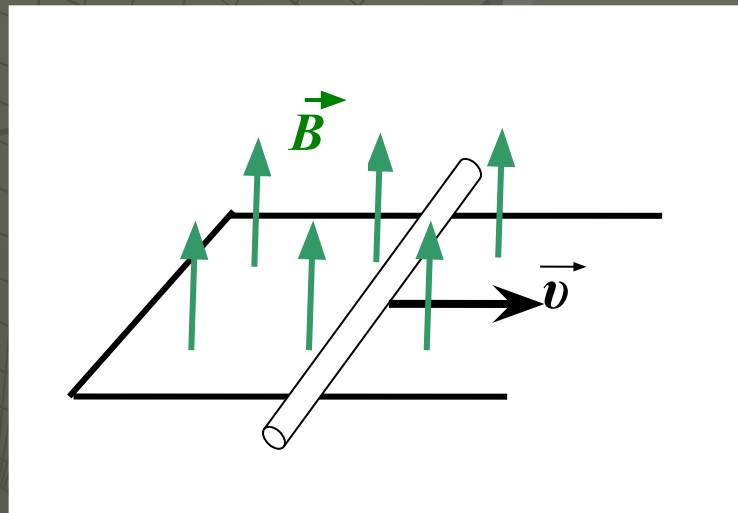
(4)



Дж. Максвелл.

Задан

ИЯ 1. Определите направление индукционного тока в стержне для случая, изображенного на рисунке.



2. Какое из уравнений Максвелла, записанных ниже, является законом электромагнитной индукции

а)
$$\oint_S \vec{E} \cdot d\vec{S} = \frac{1}{\epsilon_0} \sum_{i=1}^N q_i$$

б)
$$\oint_{\Gamma} \vec{E} \cdot d\vec{l} = - \frac{d}{dt} \int_S \vec{B} \cdot d\vec{S}$$

в)
$$\oint_S \vec{B} \cdot d\vec{S} = 0$$

г)
$$\oint_{\Gamma} \vec{B} \cdot d\vec{l} = \mu_0 I + \mu_0 \epsilon_0 \frac{d}{dt} \int_S \vec{E} \cdot d\vec{S}$$