Занятие 6. Электромагнитные волны.

Для подготовки к семинару надо проработать

Лекция 10. Уравнения Максвелла для электромагнитного поля.
ОЛ-1 (§10.1- 10.4), ОЛ-3 (§9.1- 9.3), ОЛ-4 (§10.1- 10.3), ДЛ-10,11,12.
Лекция 11. Электромагнитные волны.
ОЛ-2 (§1.1- 1.2), ОЛ-4 (§10.4- 10.5), ОЛ-5 (§2.1- 2.5), ОЛ-6 (§2.1- 2.5), ДЛ-10,11,12.

ОЛ-1. Мартинсон Л.К., Морозов А.Н., Смирнов Е.В. Электромагнитное поле. Учебное пособие. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э.Баумана, 2013. – 423 с.
ОЛ-2. Литвинов О.С., Горелик В.С. Электромагнитные волны и оптика. Учебное пособие. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э.Баумана, 2006. – 448 с.
ОЛ-3. Савельев И. В. Курс общей физики: Учебное пособие для втузов. В 5 кн (кн.2). – М.: Наука, 1998.
ОЛ-4. Иродов И.Е. Электромагнетизм. Основные законы. – М.: Лаборатория базовых знаний, 2000. – 352 с.
ОЛ-5. Савельев И. В. Курс общей физики: Учебное пособие для втузов. В 5 кн (кн.4). – М.: Наука, 1998.
ОЛ-6. Иродов И.Е. Волновые процессы. Основные законы. – М.: Лаборатория базовых знаний, 1999. – 256 с.

ДЛ-10. Макаров А.М., Лунёва Л.А., Макаров К.А. Теория и практика классической электродинамики. – М.: URSS, 2014. – 774 с.
ДЛ-11. Детлаф А.А., Яворский Б.М. Курс физики. – М.: Издательский центр «Академия», 2005. – 720 с.
ДЛ-12. Сивухин Д.В. Общий курс физики. Учебное пособие для вузов. В 5 томах. – М.: Физматлит, 2002..

Краткие теоретические сведения

МГТУ им. Н.Э. Баумана

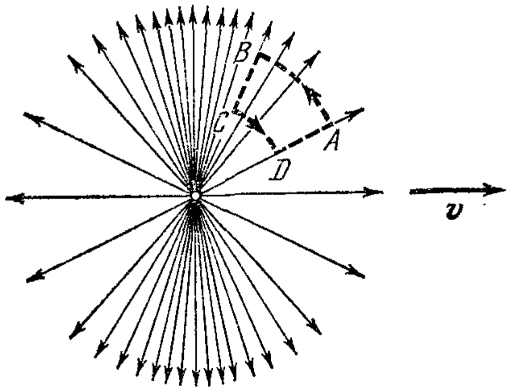
$$\boxed{B = \mu_0 H = \mu_0 \frac{qv}{4\pi r^2} = \frac{1}{c^2 \varepsilon_0} \frac{qv}{4\pi r^2}}$$

$$\frac{E_\perp}{E_{СТ}} = \frac{ar}{c^2}$$

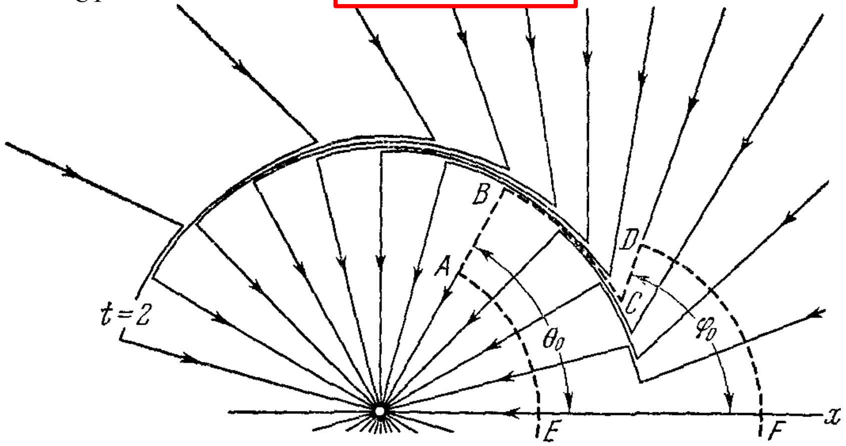
$$\boxed{E_\perp = \mu_0 \frac{qa}{4\pi r}}$$

$$E = E_m cos(\omega t - kz + \varphi)$$

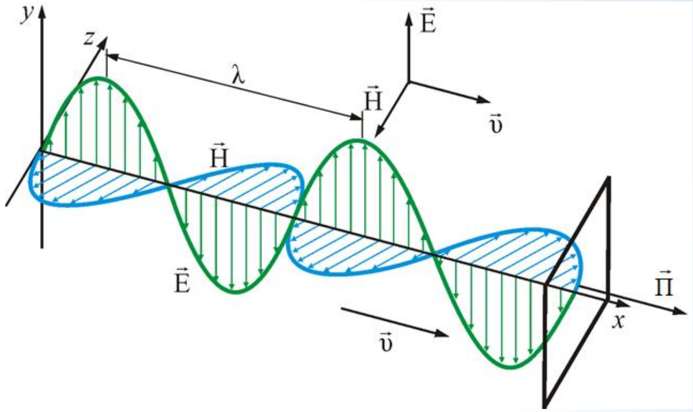
$$B = \frac{E_{СТ}\, v}{c^2}$$



представление поля равномерно движущегося заряда.



Заряд, двигавшийся с постоянной скоростью, в момент $t=0$ достигает начала координат, резко затормаживается там до остановки и остается в начале координат.



$$\boxed{\vec{\Pi} = \vec{E} \times \vec{H};}$$

$$\Pi = wv = \sqrt{\varepsilon\varepsilon_0/\mu\mu_0}\, E_m^2 \cos^2(\omega t - kx), \quad \langle \Pi \rangle = \frac{E_m^2}{2R_В};$$

$$\boxed{\Delta \mathbf{E} = \frac{\varepsilon\mu}{c^2} \frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial t^2}}$$

Уравнения Максвелла:

$$\oint_L \vec{E} d\vec{l} = -\int_S \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} d\vec{S};$$

$$\oint_L \vec{H} d\vec{l} = \int_S \left(\vec{j} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \right) d\vec{S};$$

$$\oint_S \vec{D} d\vec{S} = \int_V \rho dV;$$

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

$$\operatorname{rot} \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t};$$

$$\operatorname{rot} \vec{H} = \vec{j} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t};$$

$$\operatorname{div} \vec{D} = \rho;$$

$$\operatorname{div} \vec{B} = 0.$$

Материальные уравнения:

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

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

$$\vec{j} = \sigma(\vec{E} + \vec{E}_{ст}).$$

$$\boxed{\frac{\partial w}{\partial t} + \operatorname{div}\vec{\Pi} = 0}$$

$$j_{см} = \frac{dD}{dt}$$

$$\boxed{R_В = \sqrt{\frac{\mu_0}{\varepsilon_0}} = c\mu_0 \approx 377 \text{ Ом}}$$

$$\boxed{\varepsilon_0 \mu_0 = \frac{1}{c^2}}$$

Решение уравнений Максвелла:

$$\boxed{\mathbf{E} = -\nabla\varphi - \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t}.}\qquad \boxed{\mathbf{B} = \nabla \times \mathbf{A},}$$

$$\boxed{\varphi_1 = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\int \frac{\rho_2}{r_{1-2}}dV_2}\qquad \boxed{\vec{A}_1 = \frac{\mu_0}{4\pi}\int \frac{\vec{j}_2}{r_{1-2}}dV_2}$$

1 – точка наблюдения;

2 – точка расположения источника поля.

Взаимосвязь полевых и «материальных» электромагнитных величин

$$\vec{E} = \frac{1}{\varepsilon\varepsilon_0}\vec{D} = \frac{1}{\varepsilon_0}(\vec{D} - \vec{P}),\quad \text{где:}\quad \vec{P} = \frac{\sum \vec{p}_q}{V};\quad \boxed{\vec{D} = \frac{\sum \vec{p}_q^{\,\text{вирт}}}{V}}$$

$$\vec{B} = \mu\mu_0\vec{H} = \mu_0(\vec{H} + \vec{J}),\quad \text{где:}\quad \vec{J} = \frac{\sum \vec{p}_m}{V};\quad \boxed{\vec{H} = \frac{\sum \vec{p}_m^{\,\text{вирт}}}{V}}$$

Уравнения Пуассона: $\Delta\varphi = -\dfrac{\rho}{\varepsilon_0};\quad \Delta\vec{A} = -\mu_0\vec{j}.$

Физический смысл ε_0 и μ_0

$$\varepsilon_0 = C_{\text{уд}} = \frac{C_{\text{вак}}S}{V};\quad \mu_0 = L_{\text{уд}} = \frac{L_{\text{вак}}S}{V}$$

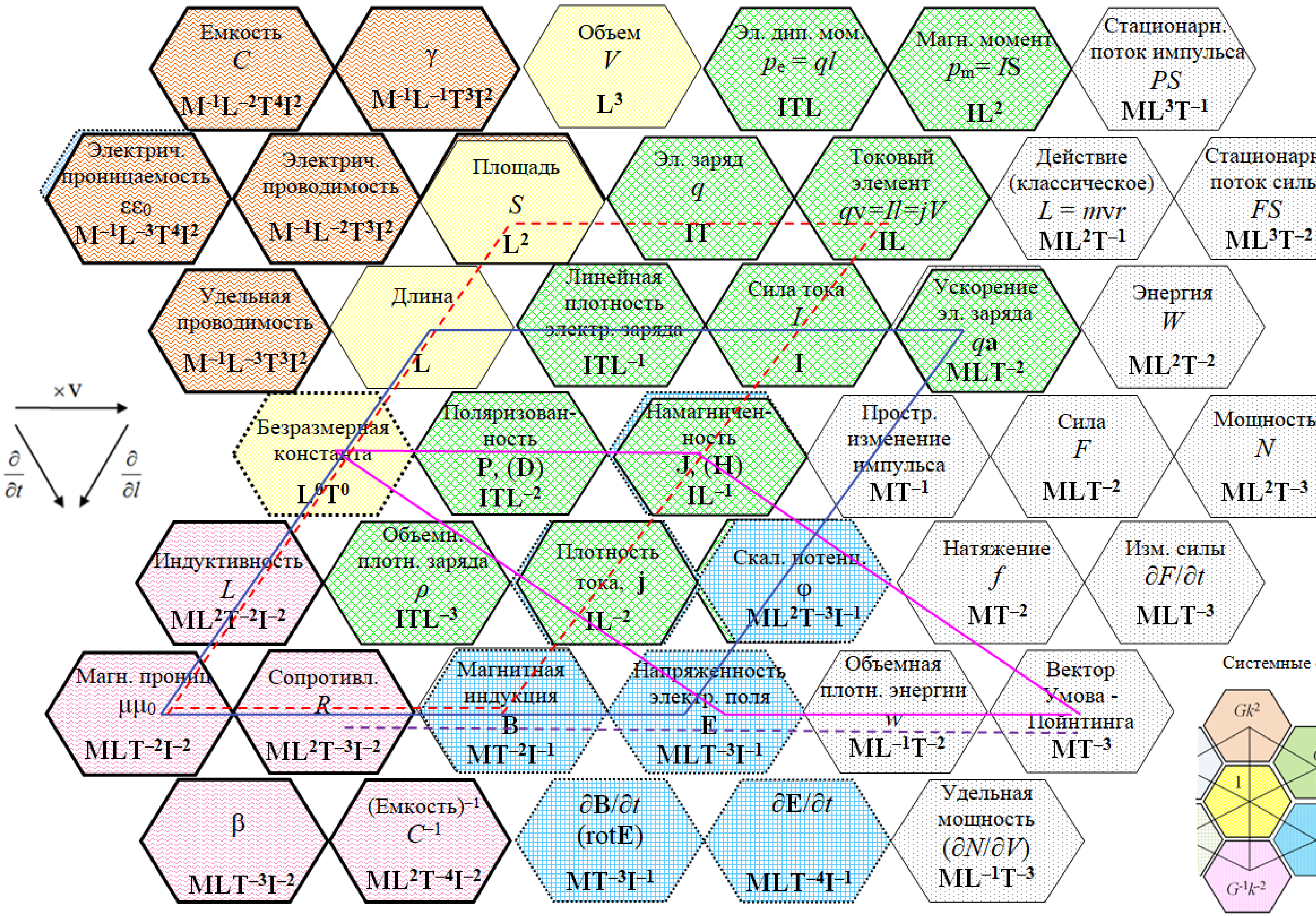
$$R_{\text{ВАК}} = \sqrt{\frac{\mu_0}{\varepsilon_0}};\quad c = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon_0\mu_0}}$$

Для электрического контура:

$$R_{\text{ХАР}} = \sqrt{\frac{L}{C}};\quad \omega_{\text{рез}} = \frac{1}{\sqrt{LC}}$$

Электромагнитные величины в системе ФВиЗ

МГТУ им. Н.Э. Баумана



$$B = \mu_0 \frac{qv}{4\pi r^2}$$

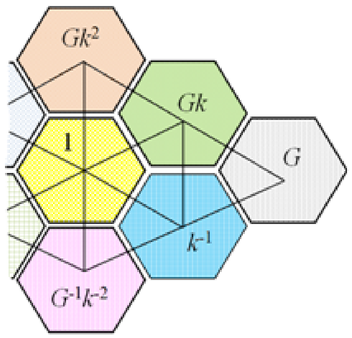
$$E_\perp = \mu_0 \frac{qa}{4\pi r}$$

$$\mathrm{rot}\vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$$

$$\vec{\Pi} = \vec{E} \times \vec{H}$$

$$\Pi = \frac{E^2}{R_B}$$

Системные связи ФВ



Задача 3.245. Шар радиуса R = 50 см находится в немагнитной среде проницаемости ε = 4,0. В среде распространяется плоская электромагнитная волна, длина которой λ << R и амплитуда электрической составляющей E_m = 200 В/м. Какая энергия падает на шар за время t = 60 с?

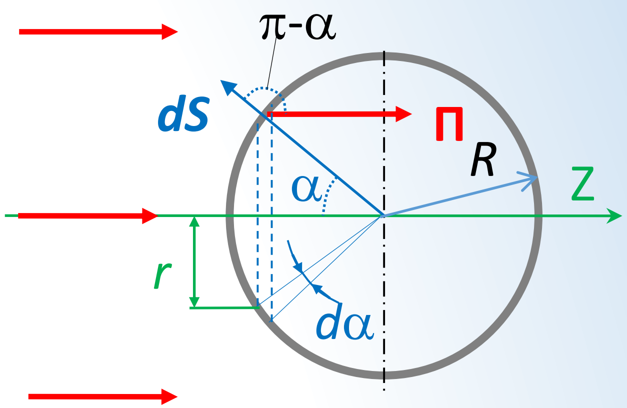


Рис. 1

Решение: Введём ось Z вдоль направления падения волны (рис.1). Тогда вектор Пойнтинга волны имеет координаты

$$\vec{\Pi} = (0,0,\Pi). \qquad (1)$$

Величина вектора Пойнтинга с учётом того, что в плоской электромагнитной волне векторы $\vec{E}$ и $\vec{H}$ направлены перпендикулярно друг другу

$$|\vec{\Pi}| = |\vec{E} \times \vec{H}| = EH. \qquad (2)$$

Для плоской электромагнитной волны величины напряженности магнитного и электрического поля связаны соотношением

$$H = \frac{E}{\mathrm{R_B}}, \qquad (3)$$

где

$$\mathrm{R_B} = \sqrt{\frac{\mu_0\mu}{\varepsilon_0\varepsilon}} = 120\pi\sqrt{\frac{\mu}{\varepsilon}}\ \text{Ом} \qquad (4)$$

– волновое сопротивление среды, в которой распространяется волна.

Пусть уравнение электрической части волны имеет вид

$$E = E_m cos(\omega t - kz + \varphi)\,, \qquad (5)$$

тогда величина вектора Пойнтинга

$$|\vec{\Pi}| = \frac{E_m^2}{R_В} cos^2(\omega t - kz + \varphi). \qquad (6)$$

Среднее значение вектора Пойнтинга по времени равно

$$< |\vec{\Pi}| >= \frac{E_m^2}{2R_В}\,. \qquad (7)$$

В координатной форме

$$\langle\vec{\Pi}\rangle = (0{,}0, \langle\Pi\rangle). \qquad (8)$$

Т.к.

$$\langle|\vec{\Pi}|\rangle = |\langle\vec{\Pi}\rangle| = \langle\Pi\rangle\,,$$

то и в скалярном выражении

$$\langle\Pi\rangle = \frac{{E_m}^2}{2R_В}\ . \qquad (9)$$

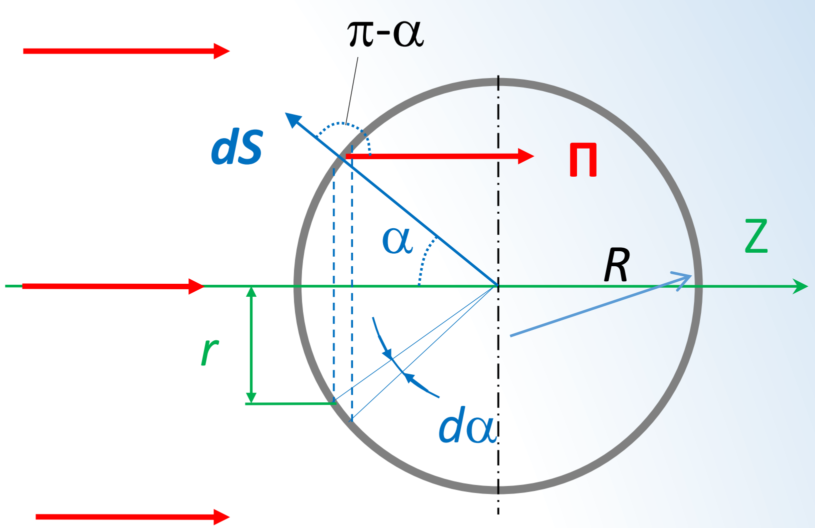


Рис. 1

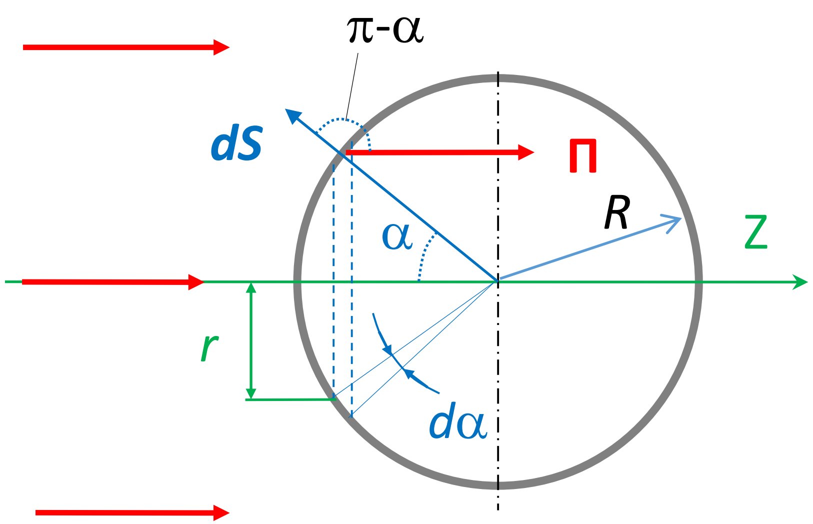


Рис. 1

МГТУ им. Н.Э. Баумана

Найдём среднее (по времени) значение потока вектора Пойнтинга через поверхность сферы (без учёта отражения).

Вводим угловую координату α (рис. 1). Тогда

$$\Phi_{\Pi} = \oiint_S \left(\vec{\Pi}, \overrightarrow{dS}\right) = \oiint_S \ \Pi cos(\pi - \alpha)dS. \qquad (10)$$

Угол α и величина П одинаковые на участках поверхности *dS*, образующих кольцо радиусом $r = Rsin\alpha$ и шириной $dl = Rd\alpha$. Площадь этого кольца

$$dS_{К} = 2\pi r \cdot dl = 2\pi Rsin\alpha \cdot Rd\alpha, \qquad (11)$$

поэтому

$$\oiint_S \left(\vec{\Pi}, \overrightarrow{dS}\right) = \oiint_S \ \Pi cos(\pi - \alpha)dS_{К} = -\int_0^{\pi/2} \Pi \cdot cos\alpha \cdot 2\pi Rsin\alpha \cdot Rd\alpha. \qquad (12)$$

Среднее (по времени) значение потока вектора Пойнтинга

$$\langle\Phi_{\Pi}\rangle = -\int_0^{\pi/2} \langle\Pi\rangle \cdot cos\alpha \cdot 2\pi Rsin\alpha \cdot Rd\alpha = -\langle\Pi\rangle\pi R^2 \int_0^{\pi/2} sin2\alpha \cdot d\alpha \qquad (13)$$

или, с учётом (9)

$$\langle\Phi_{\Pi}\rangle = -\frac{E_m{}^2}{2R_{В}}\pi R^2 \qquad (14)$$

Знак минус в (14) показывает, что энергия втекает внутрь сферы.

Полная энергия, поглощенная шаром за время t, равна

$$W = |\langle \Phi_{\Pi} \rangle| t \qquad (15)$$

или

$$W = \frac{E_m^{\;2}}{2\mathrm{R_B}} \pi R^2 t\,. \qquad (16)$$

Для немагнитной среды $\mu = 1$.

Поэтому при $\varepsilon = 4$ волновое сопротивление среды примерно равно

$$\mathrm{R_B} \approx 60\pi \text{ Ом.}$$

Тогда вычисления по (16) дают:

$$W \approx 5000 \text{ Дж}\,.$$

Простой вариант решения:

Среднее значение вектора Пойнтинга: $\Pi = \sqrt{\frac{\varepsilon\varepsilon_0}{\mu_0}} \frac{E_m^{\;2}}{2}$

умножаем на сечение Миделя πR^2 и умножаем на заданное время t.

В результате получаем итоговую формулу $W = \sqrt{\frac{\varepsilon\varepsilon_0}{\mu_0}} \frac{E_m^{\;2}}{2} \pi R^2 t$,

совпадающую с (16).

Задача 3.249. Синусоидальный ток частоты $\omega = 1000$ с$^{-1}$ течёт по обмотке соленоида, радиус сечения которого R = 6,0 см. Найти отношение амплитудных значений электрической и магнитной энергий внутри соленоида.

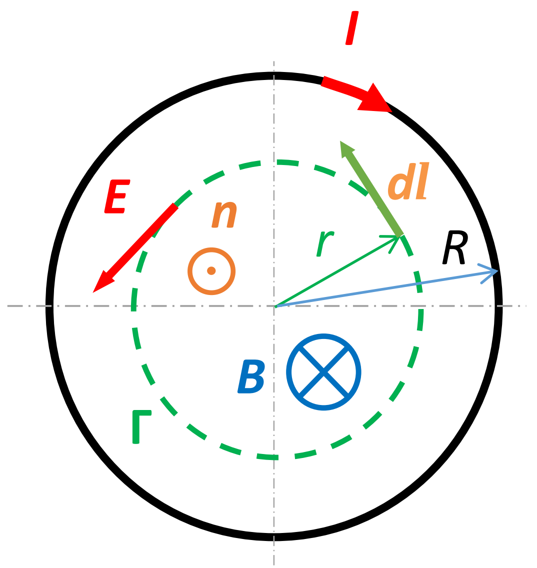


Рис. 2

Решение: Пусть сила тока в обмотке соленоида зависит от времени

$$I = I_0 sin(\omega t). \qquad (1)$$

Предполагаем, что окружающая среда – вакуум.
Ток создаёт внутри соленоида магнитное поле, индукция которого равна

$$B = \mu_0 n I. \qquad (2)$$

Применим закон электромагнитной индукции Фарадея

$$\oint_\Gamma (\vec{E}, \overrightarrow{dl}) = -\frac{d}{dt} \iint_S (\vec{B}, \overrightarrow{dS}). \qquad (3)$$

Выберем в качестве контура Г соосную окружность радиуса $r < R$ в поперечном сечении соленоида (рис. 2) с выбранным направлением касательного вектора $\overrightarrow{dl}$ и согласованным с ним направлением нормали $\vec{n}$ к площадки круга, ограниченного контуром Г.

Тогда для выбранного на рисунке 2 направления вектора $\vec{B}$

$$\iint_S \left(\vec{B}, \overrightarrow{dS}\right) = -B\pi r^2 \qquad (4)$$

и направления вектора $\vec{E}$

$$\oint_\Gamma \left(\vec{E}, \overrightarrow{dl}\right) = E2\pi r \qquad (5)$$

Выражение (3) с учётом (4) и (5) имеет вид:

$$E2\pi r = \frac{d}{dt}(B\pi r^2). \qquad (6)$$

С учетом (2) и (1) выражение (6) можно записать

$$E = \frac{r}{2}\mu_0 n\omega I_0 cos(\omega t). \qquad (7)$$

Т.е. электрическое поле внутри соленоида в любой момент времени является переменным и **неоднородным** (зависит от *r*).

Объёмная плотность энергии электрического поля с учётом (7)

$$w_Э = \frac{\varepsilon_0 E^2}{2} = \frac{\varepsilon_0(\mu_0 n\omega I_0)^2}{8} r^2 cos^2(\omega t) \qquad (8)$$

Полная энергия электрического поля будет равна

$$W_Э = \iiint_V w_Э dV \qquad (9)$$

Пусть длина соленоида равна l, тогда выбираем элементарный объём в виде

$$dV = 2\pi r l dr\ . \qquad (10)$$

Подставляя (8) и (10) в (9), получим

$$W_Э = \int_0^R \frac{\varepsilon_0(\mu_0 n\omega I_0)^2}{8} r^2 cos^2(\omega t) 2\pi r l dr = \frac{\pi l \varepsilon_0(\mu_0 n\omega I_0)^2}{16} R^4 cos^2(\omega t). \qquad (11)$$

Следовательно, максимальное значение энергии электрического поля

$$W_{Э\,max} = \frac{\pi l \varepsilon_0(\mu_0 n\omega I_0)^2}{16} R^4\ . \qquad (12)$$

Объёмная плотность энергии магнитного поля с учётом (1) и (2)

$$w_М = \frac{B^2}{2\mu_0} = \frac{1}{2}\mu_0 n^2 {I_0}^2 sin^2(\omega t)\ . \qquad (13)$$

Т.к. магнитное поле внутри соленоида в любой момент времени является **однородным** (не зависит от r), то энергия магнитного поля внутри соленоида, объём которого $V = \pi R^2 l$, с учётом (13) равна

$$W_М = \frac{1}{2}\mu_0 n^2 {I_0}^2 \pi R^2 l sin^2(\omega t)\ . \qquad (14)$$

Следовательно, максимальное значение энергии магнитного поля

$$W_{\text{М}\,max} = \frac{1}{2}\mu_0 n^2 {I_0}^2 \pi R^2 l\,. \qquad (15)$$

Тогда отношение амплитудных значений электрической и магнитной энергий внутри соленоида:

$$\frac{W_{\text{Э}\,max}}{W_{\text{М}\,max}} = \frac{\mu_0 \varepsilon_0 R^2 \omega^2}{8}\,. \qquad (16)$$

Т.к. $\mu_0\varepsilon_0 = \frac{1}{c^2}$, где $c = 3{\cdot}10^8$ м/с - скорость света в вакууме, то выражение (16) примет вид

$$\frac{W_{\text{Э}\,max}}{W_{\text{М}\,max}} = \frac{R^2\omega^2}{8c^2} = 5\cdot 10^{-15}. \qquad (17)$$

Таким образом, можно сделать вывод, что в соленоиде энергия магнитного поля в значительной степени превышает энергию электрического поля.

Задача 3.250. ***Плоский конденсатор с круглыми параллельными пластинами медленно заряжают. Показать, что поток вектора Пойнтинга через боковую поверхность конденсатора равен приращению энергии конденсатора за единицу времени. Рассеянием поля на краях при расчёте пренебречь.***

Решение: Пусть радиус пластин конденсатора равен *R*. Расстояние между пластинами *L*.

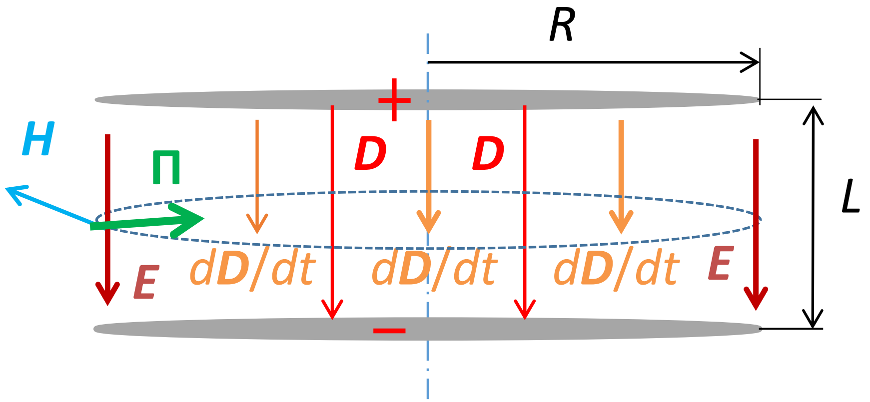


Рис. 3

Если конденсатор заряжается, то величина заряда пластин увеличивается, поэтому длина вектора электрического смещения $\vec{D}$ увеличивается. Вектор $\frac{d\vec{D}}{dt}$ направлен также как и вектор $\vec{D}$ (рис.3). Применим теорему о циркуляции вектора напряженности магнитного поля:

$$\oint_{\Gamma} (\vec{H}, \vec{dl}) = I + \frac{d}{dt} \iint_S (\vec{D}, \vec{dS}) . \qquad (1)$$

В данном случае ток проводимости отсутствует

$$I = 0, \qquad (2)$$

а ток смещения определяется только производной от вектора электрического смещения

$$\frac{d}{dt} \iint_S (\vec{D}, \vec{dS}) = \iint_S \left(\frac{d\vec{D}}{dt}, \vec{dS}\right). \qquad (3)$$

В поперечной плоскости боковая поверхность конденсатора даёт окружность Г радиуса *R*. Пусть ориентация окружности Г согласована с ориентацией поверхности круга внутри, тогда (1) с учётом (3) примет вид

$$H 2\pi R = \frac{dD}{dt}\pi R^2, \qquad (4)$$

откуда

$$H = \frac{dD}{dt}\frac{R}{2}. \qquad (5)$$

На боковой поверхности конденсатора вектор Пойнтинга

$$\vec{\Pi} = \vec{E} \times \vec{H} \qquad (6)$$

направлен внутрь конденсатора. Его величина постоянная в данный момент времени на боковой поверхности

$$\Pi = EH = E\frac{dD}{dt}\frac{R}{2}. \qquad (7)$$

Пусть боковая поверхность конденсатора ориентирована вовнутрь, тогда поток вектора Пойнтинга, совпадающий по размерности с мощностью, равен

$$\Phi_\Pi = \iint_S \left(\vec{\Pi}, \overrightarrow{dS}\right) = \Pi 2\pi R L = E\frac{dD}{dt}\pi R^2 L\,. \qquad (8)$$

Для исследования выражения (8) надо учесть следующее:

$$D = \varepsilon_0 E \,. \qquad (9)$$

Объёмная плотность энергии электрического поля:

$$w_\text{э} = \varepsilon_0 \frac{E^2}{2} \,. \qquad (10)$$

Объём пространства между обкладками конденсатора:

$$V = \pi R^2 L \,. \qquad (11)$$

Из (10) и (11) следует выражение для полной энергии конденсатора

$$W = w_\text{э} V = \varepsilon_0 \frac{E^2}{2} \pi R^2 L. \qquad (12)$$

Продифференцируем (12) по времени с учётом (9)

$$\frac{dW}{dt} = \frac{d}{dt}\left(\varepsilon_0 \frac{E^2}{2}\right) \pi R^2 L = \varepsilon_0 E \frac{dE}{dt} \pi R^2 L = E \frac{dD}{dt} \pi R^2 L \,. \qquad (13)$$

Конечные выражения (13) и (8) совпадают, значит задача выполнена.

Задача 3.253. ***Ток, протекающий по обмотке длинного прямого соленоида, достаточно медленно увеличивают. Показать, что скорость возрастания энергии магнитного поля в соленоиде равна потоку вектора Пойнтинга через его боковую поверхность.***

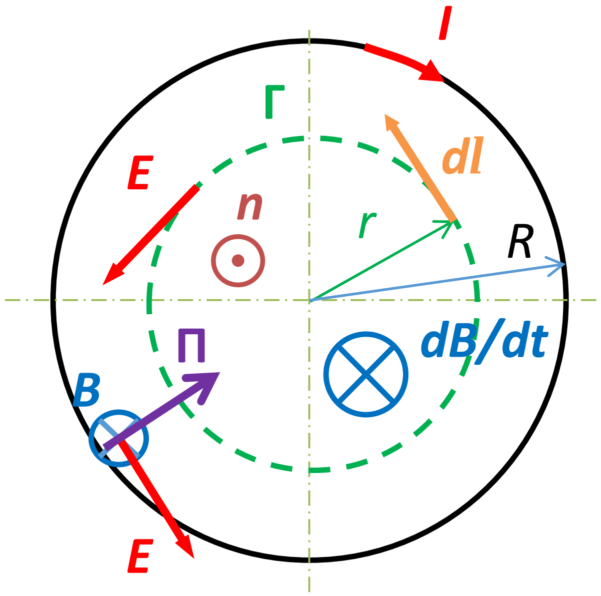


Рис. 4

Решение: Предполагаем, что окружающая среда – вакуум. Пусть радиус витков соленоида равен R, а его длина – l. Ток создаёт внутри соленоида магнитное поле, индукция которого равна

$$B = \mu_0 n I. \qquad (1)$$

Применим закон электромагнитной индукции Фарадея

$$\oint_\Gamma \left(\vec{E}, \vec{dl}\right) = -\frac{d}{dt}\iint_S \left(\vec{B}, \vec{dS}\right). \qquad (2)$$

Выберем в качестве контура Г соосную окружность радиуса $r < R$ в поперечном сечении соленоида (рис. 4), с выбранным направлением касательного вектора $\vec{dl}$ и согласованным с ним направлением нормали $\vec{n}$ к площадки круга, ограниченного контуром Г. Тогда для выбранного на рис. 4 направления вектора $\vec{E}$

$$\oint_\Gamma \left(\vec{E}, \vec{dl}\right) = E 2\pi r\, . \qquad (3)$$

Т.к. ток медленно увеличивается, то величина индукции поля увеличивается, поэтому вектор $\frac{d\vec{B}}{dt}$ направлен **так же** как и вектор $\vec{B}$.

Тогда

$$\frac{d}{dt}\iint_S \left(\vec{B},\overrightarrow{dS}\right) = \iint_S \left(\frac{d\vec{B}}{dt},\overrightarrow{dS}\right) = -\frac{dB}{dt}\pi r^2 \,. \quad (4)$$

Выражение (2) с учётом (3) и (4)

$$E2\pi r = \pi r^2 \frac{dB}{dt}$$

или

$$E = \frac{r}{2}\frac{dB}{dt} \,. \quad (5)$$

Вблизи боковой поверхности ($r \to R$) вектор Пойнтинга

$$\vec{\Pi} = \vec{E} \times \vec{H} \quad (6)$$

направлен внутрь соленоида. Его величина в определенный момент времени на боковой поверхности соленоида

$$\Pi = EH = \frac{R}{2}\frac{dB}{dt}H. \quad (7)$$

С учётом ориентации потока энергии через боковую поверхность соленоида (из вне вовнутрь), искомый поток вектора Пойнтинга равен

$$\Phi_{\Pi} = \iint_S \left(\vec{\Pi}, \vec{dS}\right) = \Pi 2\pi R l = \frac{dB}{dt} H \pi R^2 l. \qquad (8)$$

Для исследования выражения (8) надо учесть следующее:

$$B = \mu_0 H. \qquad (9)$$

Объёмная плотность энергии магнитного поля:

$$w_{\text{М}} = \mu_0 \frac{H^2}{2}. \qquad (10)$$

Объём пространства соленоида:

$$V = \pi R^2 l. \qquad (11)$$

Из (10) и (11) следует выражение для полной энергии соленоида

$$W = w_{\text{М}} V = \mu_0 \frac{H^2}{2} \pi R^2 l. \qquad (12)$$

Продифференцируем (12) по времени с учётом (9):

$$\frac{dW}{dt} = \frac{d}{dt}\left(\mu_0 \frac{H^2}{2}\right) \pi R^2 l = \mu_0 H \frac{dH}{dt} \pi R^2 l = H \frac{dB}{dt} \pi R^2 l. \qquad (13)$$

Конечные выражения (8) и (13) совпадают, значит задача выполнена.

Для закрепления знаний по теме данного семинара дома следует самостоятельно решить следующие задачи, которые рекомендуются учебным планом

Домашнее задание

Иродов И.Е. Задачи по общей физике.- М.: Бином, 1998 - 2001,

Дома: ОЛ-7 задачи 3.243, 3.245 или ОЛ-8 задачи 4.227, 4.229..

ОЛ-7. Иродов И.Е. Задачи по общей физике.- М.: Бином, 1998÷2001.
ОЛ-8. Иродов И.Е. Задачи по общей физике.- М.: Наука, 1988.

Домашнее задание к семинару 6. ОЛ-7 задачи 3.243, 3.245

3.243. В вакууме вдоль оси x распространяются две плоские одинаково поляризованные волны, электрические составляющие которых изменяются по закону $\mathbf{E}_1 = \mathbf{E}_0 \cos(\omega t - kx)$ и $\mathbf{E}_2 = \mathbf{E}_0 \cos(\omega t - kx + \varphi)$. Найти среднее значение плотности потока энергии.

$$\langle П \rangle = \varepsilon_0 c E_0^2 (1 + \cos\varphi)$$

3.245. Шар радиуса $R = 50$ см находится в немагнитной среде проницаемости $\varepsilon = 4{,}0$. В среде распространяется плоская электромагнитная волна, длина которой $\lambda \ll R$ и амплитуда электрической составляющей $E_m = 200$ В/м. Какая энергия падает на шар за время $t = 60$ с?

$$W = \left(\sqrt{\varepsilon\varepsilon_0/\mu_0}\, E_m^2 \pi R^2 t\right)\frac{1}{2} = 5 \text{ кДж}$$

Спасибо за внимание