

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего профессионального образования  
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

---

**С.И. Кузнецов**

**Краткий справочник по физике  
Часть II**  
**Электричество и магнетизм. Электромагнитные  
колебания и волны.**  
2-е издание, переработанное и дополненное

*Рекомендовано в качестве учебного пособия  
Редакционно-издательским советом  
Томского политехнического университета*

**Издательство  
Томского политехнического университета  
2013**

УДК 53(075.8)

ББК 22.3я73

К 891

**Кузнецов С.И.**

К 891

Справочник по физике. Часть II. Электричество и магнетизм. Электромагнитные колебания и волны: учебное пособие / С.И. Кузнецов. – 2-е изд., перераб. и доп. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2013. – 99 с.

Справочник по физике разработан на базе лекций по общей физике, более 20 лет читаемых авторами студентам технических вузов в полном соответствии с требованиями образовательного Госстандарта.

В пособии приведены основные законы и формулы по всем разделам II части курса физики с пояснениями, диаграммами, графиками и рисунками.

Цель пособия – помочь студентам освоить материал программы, научить активно применять теоретические основы физики как рабочий аппарат, позволяющий решать конкретные задачи, приобрести уверенность в самостоятельной работе.

Пособие подготовлено по программе курса физики высших технических учебных заведений. Соответствует инновационной политике, направлено на активизацию научного мышления и познавательной деятельности студентов.

Предназначено для межвузовского использования студентами технических специальностей очной и дистанционной форм обучения.

УДК 53(075.8)

ББК 22.3я73

### *Рецензенты*

Доктор физико-математических наук, профессор,  
заведующий кафедрой теоретической физики ТГУ

*А.В. Шаповалов*

Доктор физико-математических наук, профессор,  
заведующий кафедрой общей информатики ТГПУ

*А.Г. Парфенов*

© Томский политехнический университет, 2013

© Оформление. Издательство ТПУ, 2013

© Кузнецов С.И., 2013

# ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
1. ЭЛЕКТРОСТАТИКА. ПОСТОЯННЫЙ ТОК.....	5
1.1. Электрическое поле в вакууме .....	5
1.2 Теорема Остроградского – Гаусса и её применение .....	8
1.3. Потенциал и работа электростатического поля. Связь напряженности с потенциалом .....	9
1.4. Диэлектрики в электростатическом поле .....	15
1.5. Проводники в электростатическом поле.....	18
1.6. Эмиссия электронов из проводников. Контактные явления на границах проводников .....	21
1.7 Постоянный электрический ток .....	23
1.8. Электрический ток в газах металлах и электролитах.....	28
2. ЭЛЕКТРОМАГНЕТИЗМ.....	32
2.1. Магнитное поле.....	32
2.2. Силы, действующие на движущиеся заряды в магнитном поле .....	36
2.3. Явление электромагнитной индукции.....	40
2.4 Ускорители заряженных частиц .....	42
2.5. Самоиндукция и взаимоиндукция .....	46
2.6. Магнитные свойства вещества.....	49
2.7. Уравнения Максвелла.....	55
3. ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ КОЛЕБАНИЯ И ВОЛНЫ.....	60
3.1. Электрические колебания .....	60
3.2. Электромагнитные волны.....	66
ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....	69
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ .....	70
ПРИЛОЖЕНИЕ.....	72

*Дорога к мудрости проста,  
найди её без толстых книжек:  
мимо, и мимо, и мимо опять,  
но ближе, и ближе, и ближе.*

Пит Хайн. Груки

## **ВВЕДЕНИЕ**

«Справочник по физике» ставит своей целью дать студентам высших технических учебных заведений, преподавателям вузов, техникумов и средних школ краткое пособие, охватывающее все основные разделы современной физики: основы механики, молекулярной физики и термодинамики, электричество и магнетизм, колебания и волны, волновую и квантовую оптику, элементы физики атомов, атомного ядра и элементарных частиц.

Учебное пособие подготовлено в соответствии с программой, связанной с переходом на многоуровневую систему подготовки специалистов и является результатом опыта чтения курса общей физики автором на протяжении 20 лет. Многолетний опыт чтения лекций по системе изложения, принятой в пособии, позволяет заключить, что избранный путь повышения уровня знаний будущих инженеров и специалистов в области физики дает положительные результаты.

Пособие не заменяет учебники, но является «путеводителем» по ним, что позволяет более рационально организовать изучение курса общей физики. Задача книги – помочь студентам освоить материал программы, научиться активно применять теоретические основы физики как рабочий аппарат, позволяющий решать конкретные задачи и приобрести уверенность в самостоятельной работе.

Материал пособия основан на содержании учебных пособий «Курс лекций по физике», электронные версии которых размещены на сайте научно технической библиотеки ТПУ <http://www.lib.tpu.ru>.

Для настоящего курса физики реализовано его мультимедийное сопровождение и создан электронный учебник, размещенный в электронном читальном зале НТБ ТПУ, в среде дистанционного обучения "MOODLE" <http://mdl.lcg.tpu.ru> и в корпоративной сети ТПУ **WEB СТ** <http://e-le.lcg.tpu.ru>. Наиболее полно материал курса изложен на персональном сайте <http://portal.tpu.ru/SHARED/s/SMIT>.

Авторы считают приятным долгом выразить свою благодарность коллективу кафедр физики ТПУ и АлтГТУ за помощь в составлении и оформлении учебного пособия.

Авторы с благодарностью примут все замечания и пожелания читателей, способствующие улучшению курса по адресам: [smit@tpu.ru](mailto:smit@tpu.ru); [krogozi@mail.ru](mailto:krogozi@mail.ru).

# 1. ЭЛЕКТРОСТАТИКА. ПОСТОЯННЫЙ ТОК

## 1.1. Электрическое поле в вакууме

**Электростатика** – раздел, изучающий статические (неподвижные) заряды и связанные с ними электрические поля.

**Электростатическое поле** – одна из составляющих электромагнитного поля, возникающая вокруг тел или частиц, обладающих электрическим зарядом. Создается неподвижными в пространстве и неизменными во времени электрическими зарядами (при отсутствии электрических токов) и может наблюдаться благодаря силовому воздействию на заряженные тела.

**1.1.1. Точечный заряд ( $q$ )** – это заряженное тело, размеры которого пренебрежимо малы по сравнению с расстоянием до других заряженных тел, с которым оно взаимодействует.

**1.1.2. Элементарный электрический заряд** – это наименьший по абсолютной величине заряд, которым обладают некоторые элементарные частицы, наблюдаемые в свободном состоянии.

**1.1.3. Закон кратности элементарного заряда:**

а) существует наименьший неделимый заряд  $|e| = 1.6 \cdot 10^{-19}$  Кл;

б) любой заряд кратен элементарному заряду  $q = \pm n \cdot e$ ,

где  $n$  – целое число.

**1.1.4. Закон сохранения заряда.** При любых явлениях в замкнутой системе суммарный электрический заряд не меняется, т.е. не возникает из ничего и не исчезает в никуда. Возможно лишь перетекание (перераспределение) заряда между телами. Суммарный электрический заряд замкнутой системы не изменяется:  $q = \sum q_i = \text{const}$ .

**1.1.5. Закон Кулона:** сила взаимодействия точечных зарядов в вакууме пропорциональна величине зарядов и обратно пропорциональна квадрату расстояния между ними (рис.1.1):

$$F = \frac{1}{4\pi\epsilon_0\epsilon} \frac{|q_1q_2|}{r^2} \text{ или } \vec{F} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0\epsilon} \frac{q_1q_2}{r^2} \frac{\vec{r}}{r},$$

где  $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$  Ф/м – электрическая постоянная;  $r$  – радиус-вектор, определяющий точку поля;  $q$  – заряд, создающий поле,  $\epsilon$  – диэлектрическая проницаемость вещества.

Одноименные заряды отталкиваются, разноименные – притягиваются.

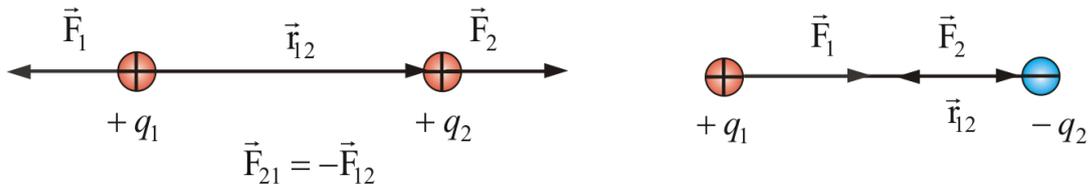


Рис.1.1

**1.1.6. Диэлектрическая проницаемость вещества** показывает во сколько раз сила взаимодействия между зарядами в вакууме больше, чем в среде.  $\epsilon = \frac{F_{\text{вак}}}{F_{\text{сп}}}$ .

**1.1.7. Принцип суперпозиции:** напряженность результирующего поля, системы точечных зарядов равна векторной сумме напряженностей полей, созданных в данной точке каждым из них в отдельности (рис. 1.2).

$$\vec{E} = \sum_{i=1}^N \vec{E}_i.$$

**1.1.8. Результирующая напряженность поля двух зарядов  $q_1$  и  $q_2$ :**

$$E = \sqrt{E_1^2 + E_2^2 + 2E_1E_2 \cos\alpha} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \sqrt{\frac{q_1^2}{r_1^4} + \frac{q_2^2}{r_2^4} + \frac{2q_1q_2}{r_1^2r_2^2} \cos\alpha},$$

где  $\cos\alpha = \frac{r_1^2 - r_2^2 - r^2}{2r_1r_2}$  (рис.1.2).

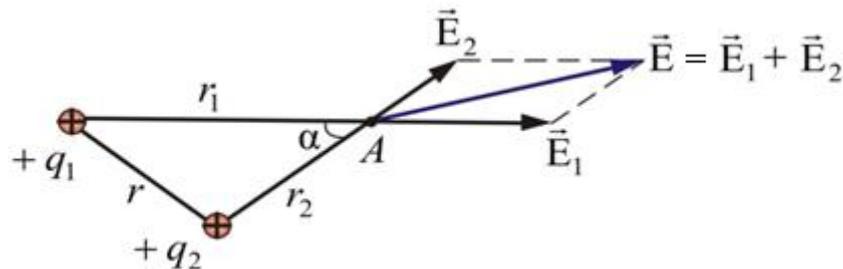


Рис.1.2

**1.1.9. Линейная плотность заряда** – предел отношения электрического заряда, находящегося в элементе линии, к длине этого элемента линии, который содержит данный заряд, когда длина этого элемента стремится к нулю:

$$\lambda = \frac{dq}{dl}.$$

**1.1.10. Поверхностная плотность заряда** – предел, к которому стремится отношение электрического заряда к площади, на которой этот заряд расположен, при условии, что площадь стремится к нулю:

$$\sigma = dq/dS.$$

**1.1.11. Объемная плотность заряда** – предел, к которому стремится отношение электрического заряда к объему, в котором этот заряд расположен, при условии, что объем стремится к нулю:

$$\rho = dq/dV.$$

**1.1.12. Электрический диполь** – система двух одинаковых по величине, но разноименных точечных зарядов (рис.1.3), расстояние между которыми  $l$  значительно меньше расстояния до тех точек, в которых определяется поле системы ( $r \gg l$ ).

**1.1.13. Электрический момент диполя** (дипольный момент) – произведение положительного заряда диполя на плечо:

$$\vec{p} = q\vec{l},$$

где  $\vec{l}$  – плечо диполя – вектор, направленный от отрицательного заряда к положительному и численно равный расстоянию между зарядами.

**1.1.14. Напряженность электрического поля диполя** (рис.1.3, 1.4).

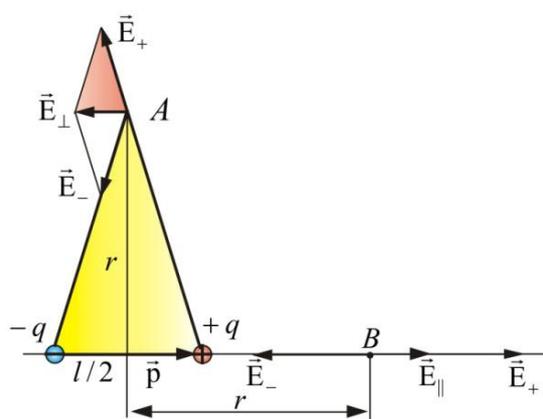


Рис. 1.3

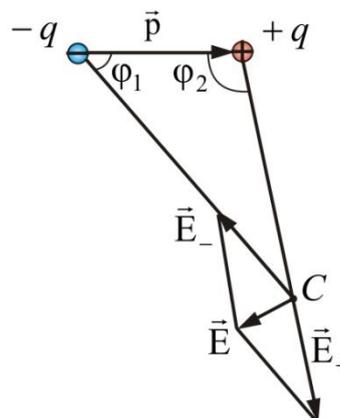


Рис. 1.4

• Напряженность в точке  $A$  на прямой, проходящей через центр диполя и перпендикулярной к оси (рис.1.3):

$$E_{\perp} = \frac{ql}{4\pi\epsilon_0 r^3}, \text{ или } E_{\perp} = \frac{p}{4\pi\epsilon_0 r^3}.$$

• На оси диполя, в точке  $B$ :

$$\vec{E}_{\parallel} = \frac{2ql}{4\pi\epsilon_0 r^3}, \text{ или } \vec{E}_{\parallel} = \frac{2\vec{p}}{4\pi\epsilon_0 r^3}.$$

- В произвольной точке  $C$  (рис. 1.4):

$$E = \frac{P}{4\pi\epsilon_0 r^3} \sqrt{3\cos^2 \varphi + 1}.$$

## 1.2 Теорема Остроградского – Гаусса и её применение

**1.2.1. Силовыми линиями** – это линии, касательная к которым в любой точке поля совпадает с направлением вектора напряженности  $\vec{E}$  (рис. 1.5).

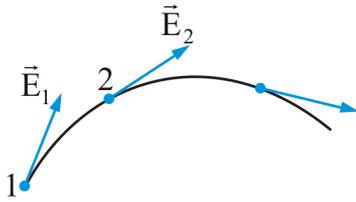


Рис.1.5

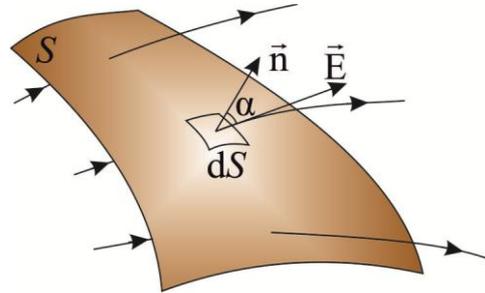


Рис. 1.6

**1.2.2. Поток вектора напряженности  $\Phi_E$**  называется полное число силовых линий, проходящих через поверхность  $S$  (рис. 1.6):

$$\Phi_E = ES_{\perp} = ES\cos\alpha = E_n S.$$

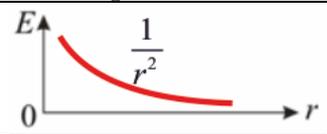
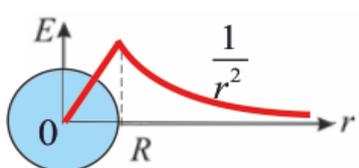
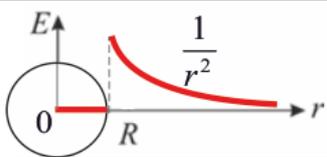
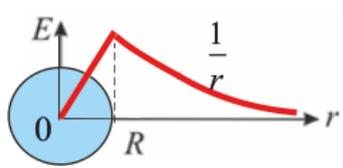
Определяется как скалярное произведение двух векторов  $\Phi_E = (\vec{E}, \vec{S})$ , где вектор  $\vec{S} = \vec{n}S$ . Таким образом, поток вектора  $\vec{E}$  есть скаляр, который в зависимости от величины угла  $\alpha$  может быть как положительным, так и отрицательным.

**1.2.3. Теорема Гаусса** для электростатического поля – поток вектора напряженности электрического поля через любую произвольно выбранную замкнутую поверхность пропорционален заключённому внутри этой поверхности электрическому заряду:

- для одного заряда:  $\Phi_E = \oint_S E_n dS = \frac{q}{\epsilon\epsilon_0}$ ;
- для нескольких зарядов:  $\Phi_E = \oint_S E_n dS = \frac{1}{\epsilon\epsilon_0} \sum_{i=1}^n q_i = \frac{1}{\epsilon\epsilon_0} \int_V \rho dV$ ;
- в дифференциальной форме:  $\text{div } \vec{E} = \frac{\rho}{\epsilon\epsilon_0}$  или  $\vec{\nabla} \vec{E} = \frac{\rho}{\epsilon\epsilon_0}$ ,

где  $S$  – площадь;  $E_n$  – произведение вектора  $\vec{E}$  на нормаль  $\vec{n}$  к данной площади.

### 1.2.4. Зависимости напряженности электростатического поля от расстояния для разных моделей:

Модели распределения заряда	Формулы для расчета напряженности	Графики зависимости напряженности от координаты
Точечный заряд	$E = \frac{q}{4\pi\epsilon_0 r^2}$	
Бесконечная равномерно заряженная плоскость с поверхностной плотностью заряда $\sigma$	$E = \frac{\sigma}{2\epsilon_0}$	
Шар радиуса $R$ , заряженный равномерно с объемной плотностью $\rho$	$E = \rho \frac{r}{3\epsilon_0}, \text{ при } r \leq R$ $E = \frac{q}{4\pi\epsilon_0 r^2} = \frac{\rho R^3}{3\epsilon_0 r^2},$ $r \geq R$	
Сфера радиуса $R$ , заряженная равномерно с поверхностной плотностью $\sigma$	$E = 0, \text{ при } r < R$ $E = \frac{q}{4\pi\epsilon_0 r^2} = \frac{\sigma R^2}{\epsilon_0 r^2}, r \geq R$	
Бесконечно длинный цилиндр (нить), заряженный равномерно с объемной плотностью $\rho$ ; $\tau$ – линейная плотность заряда.	$E = \frac{\rho r}{2\epsilon_0}, \text{ при } r \leq R$ $E = \frac{r}{2\pi\epsilon_0 r} = \frac{\rho R^2}{2\epsilon_0 r},$ $r \geq R$	

## 1.3. Потенциал и работа электростатического поля. Связь напряженности с потенциалом

### 1.3.1. Работа по перемещению заряда $q$ из точки 1 в точку 2:

$$dA = Fdl \cos\alpha; \quad A = q \int_1^2 \vec{E} d\vec{l}; \quad A_{12} = \frac{qq'}{4\pi\epsilon_0} \left( \frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right).$$

Работа электростатических сил не зависит от формы пути, а только лишь от координат начальной и конечной точек перемещения (рис. 1.7) Следовательно, силы поля **консервативны**, а само поле – **потенциально**.

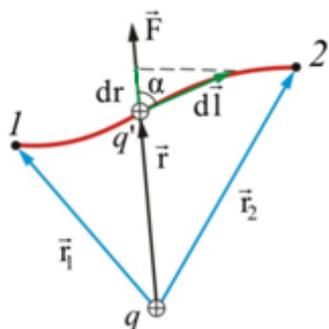


Рис. 1.7

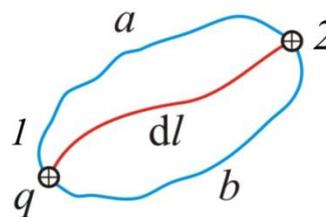


Рис. 1.8

**1.3.2. Теорема циркуляции вектора напряженности  $\vec{E}$ :** циркуляция вектора напряженности электростатического поля равна нулю (рис. 1.8)

$$\oint_L \vec{E} d\vec{l} = 0.$$

**1.3.3. Связь между контурным и поверхностным интегралами** согласно теореме Стокса:

$$\oint_L \vec{E} d\vec{l} = \int_S \text{rot} \vec{E} d\vec{S} = 0.$$

Отсюда видно, что  $\text{rot} E = [\nabla E] = 0$  и, следовательно, **электростатическое поле имеет безвихревой характер**.

**1.3.4. Работа по замкнутому пути** (рис. 1.8):

$$A = q \oint_L \vec{E} d\vec{l} = 0.$$

Поле, обладающее такими свойствами, называется **потенциальным**. Любое электростатическое поле является потенциальным.

**1.3.5. Потенциальная энергия** – скалярная физическая величина, характеризующая способность некоего тела (или материальной точки) совершать работу за счет его нахождения в поле действия сил. Она является характеристикой взаимодействия нескольких тел или тела и поля.

**1.3.6. Потенциальная энергия** взаимодействия электрических зарядов:

$$W = \frac{1}{4\pi\epsilon\epsilon_0} \frac{qq'}{r}.$$

**1.3.7. Потенциал электростатического поля  $\varphi$**  – физическая величина, численно равная потенциальной энергии единичного положительного точечного заряда, переносимого из бесконечности (точки нулевого потенциала) в данную точку поля:

$$\varphi = \frac{W}{q_0} = \frac{A_\infty}{q_0},$$

где  $A_\infty$  – работа перемещения заряда  $q_0$  из данной точки поля в бесконечность.

**1.3.8. Потенциал точечного заряда:**

$$\varphi = \frac{1}{4\pi\epsilon\epsilon_0} \frac{q}{r}.$$

**1.3.9. Силовые линии** электростатического поля – это линии, касательная к которым в любой точке поля совпадает с направлением вектора напряженности  $\vec{E}$ . С помощью силовых линий напряженности можно изобразить распределение электрического поля в пространстве. Для *неподвижных* или *неускоренных зарядов* силовые линии начинаются на положительных зарядах, а заканчиваются на отрицательных (или уходят на бесконечность). По густоте силовых линий можно судить о напряженности электрического поля (рис. 1.9).

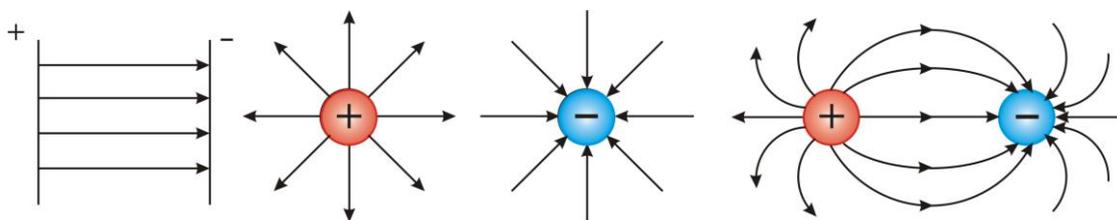


Рис. 1.9

**1.3.10. Эквипотенциальная поверхность** – воображаемая поверхность, все точки которой имеют одинаковый потенциал (рис. 1.10).

$$\varphi = \varphi(x, y, z) = \text{const.}$$

Там где расстояния между эквипотенциальными поверхностями мало, напряженность поля велика и наоборот (рис. 1.11).

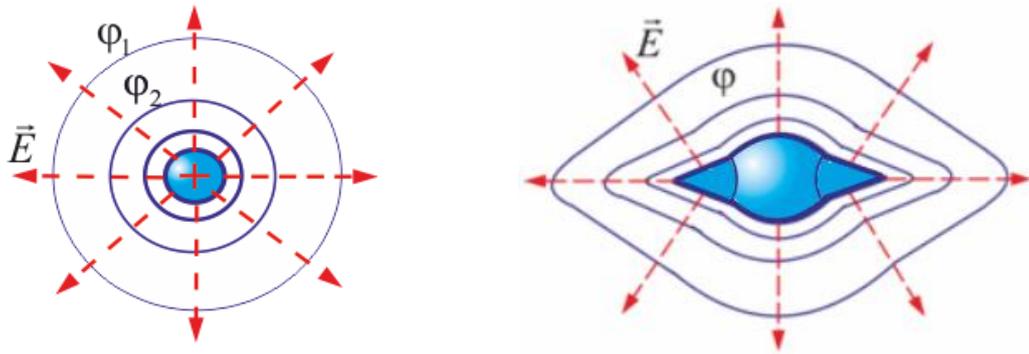


Рис.1.10

**1.3.11. Потенциал системы зарядов** (рис. 1.11) равен алгебраической сумме потенциалов, создаваемых каждым из зарядов в отдельности (принцип суперпозиции):

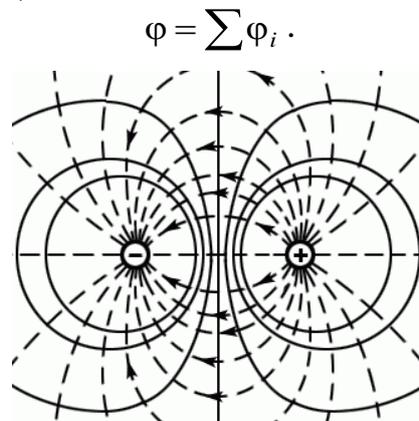


Рис. 1.11

**1.3.12. Связь между потенциалом электростатического поля и его напряженностью:**

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

$\text{grad}\varphi$  – вектор, показывающий направление наиболее быстрого увеличения функции.

**1.3.13. Работа**, совершаемая силами электрического поля при перемещении заряда из точки 1 в точку 2 (рис. 1.7) равна:

$$A_{12} = q_0(\varphi_1 - \varphi_2), \quad A_{12} = q_0 \int_1^2 E dl .$$

**1.3.14. Разность потенциалов** между двумя точками 1 и 2 в электрическом поле (рис. 1.11)

$$\varphi_1 - \varphi_2 = \frac{A_{12}}{q_0} = \int_1^2 E dl.$$

**1.3.15. Потенциал поля диполя:**

$$\varphi = \frac{p}{4\pi\epsilon_0\epsilon r^2} \cos\alpha.$$

**1.3.16. Потенциальная энергия диполя:**

$$W = -\vec{p}\vec{E} = pE \cos\alpha.$$

**1.3.17. Механический момент**, действующий на диполь в электростатическом поле:

$$\vec{M} = [\vec{p}, \vec{E}] \text{ или } M = pE \sin\alpha.$$

**1.3.18. Безвихревой характер** электростатического поля:

$$\text{rot}\vec{E} \equiv [\nabla, \vec{E}] = 0.$$

Работа по перемещению заряда по любому замкнутому пути в электростатическом поле равна нулю (рис. 3.11).

**1.3.19. Зависимости потенциала электростатического поля от расстояния** для разных моделей:

- **Потенциал поля** между заряженными плоскостями (рис. 1.12):

$$\varphi = \frac{\sigma d}{\epsilon_0}.$$

- **Потенциал нити** (цилиндра):

$$\varphi = \begin{cases} \frac{\lambda}{2\pi\epsilon_0} \ln \frac{1}{R} = \text{const} - \text{внутри и на поверхности}; \\ \frac{\lambda}{2\pi\epsilon_0} \ln \frac{r}{R} - \text{вне цилиндра}. \end{cases}$$

- **Потенциал поля** цилиндрического конденсатора (рис. 1.13):

$$\varphi = \begin{cases} \frac{\lambda}{2\pi\epsilon_0} \ln \frac{R_2}{R_1} = \text{const} - \text{внутри меньшего цилиндра } (r < R_1); \\ \frac{\lambda}{2\pi\epsilon_0} \ln \frac{r}{R_1} - \text{между цилиндрами } (R_1 < r < R_2); \\ 0 - \text{вне цилиндров}. \end{cases}$$

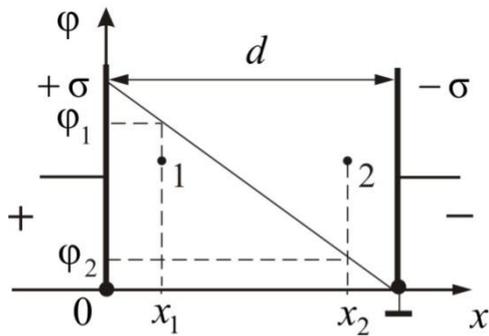


Рис. 1.12

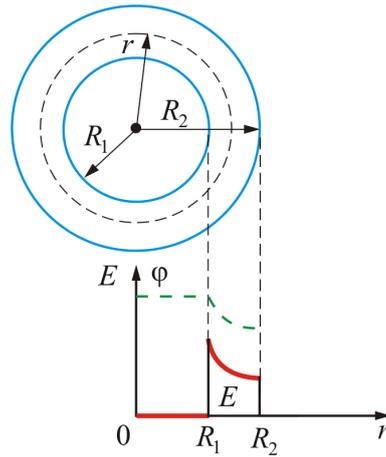


Рис. 1.13

- **Потенциал поля сферы (рис. 1.14):**

$$\varphi = \begin{cases} \frac{q}{4\pi\epsilon_0 R} = \frac{\sigma R}{\epsilon_0} = \text{const} - \text{внутри и на поверхн. сферы } (r \leq R) \\ \frac{q}{4\pi\epsilon_0 r} - \text{вне сферы } (r > R). \end{cases}$$

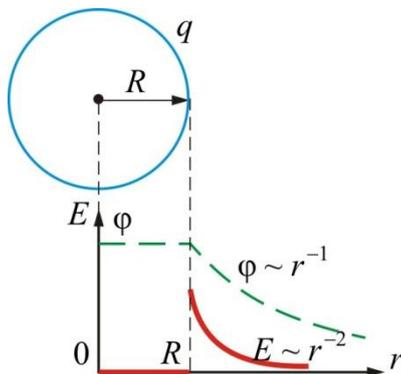


Рис. 1.14

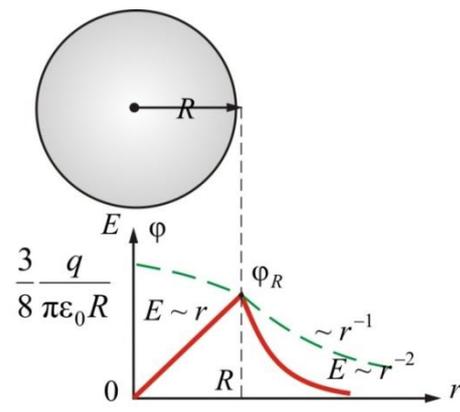
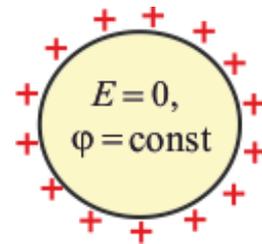


Рис. 1.15

- **Потенциал поля шара (рис. 1.15):**

$$\varphi = \begin{cases} \frac{3q}{8\pi\epsilon_0 R} - \text{в центре шара } (r = 0); \\ \frac{q}{8\pi\epsilon_0 R} \left( 3 - \frac{r^2}{R^2} \right) - \text{внутри шара } (r \leq R); \\ \frac{q}{4\pi\epsilon_0 r} - \text{на поверхности и вне шара } (r \geq R). \end{cases}$$



## 1.4. Диэлектрики в электростатическом поле

**1.4.1. Проводники и диэлектрики:** по взаимодействию с электрическим полем вещества делятся на проводники, полупроводники и диэлектрики.

**Проводники** – вещества, содержащие свободные заряды, т.е. заряды, которые могут свободно перемещаться по всему объему вещества под действием электрического поля.

**Полупроводники** – вещества, в которых количество свободных зарядов зависит от внешних условий (температура, напряженность электрического поля и т.д.).

**Диэлектрики** – вещества, в которых нет или пренебрежимо мало свободных зарядов.

**1.4.2. Диэлектрик (изолятор)** – материал, плохо проводящий или совсем не проводящий электрический ток. Концентрация свободных носителей заряда в диэлектрике пренебрежимо мала. Основное свойство диэлектрика состоит в способности поляризоваться во внешнем электрическом поле.

**1.4.3. Поляризация** – смещение электрических зарядов вещества под действием электрического поля (рис. 1.16). Способность к поляризации является основным свойством диэлектриков.

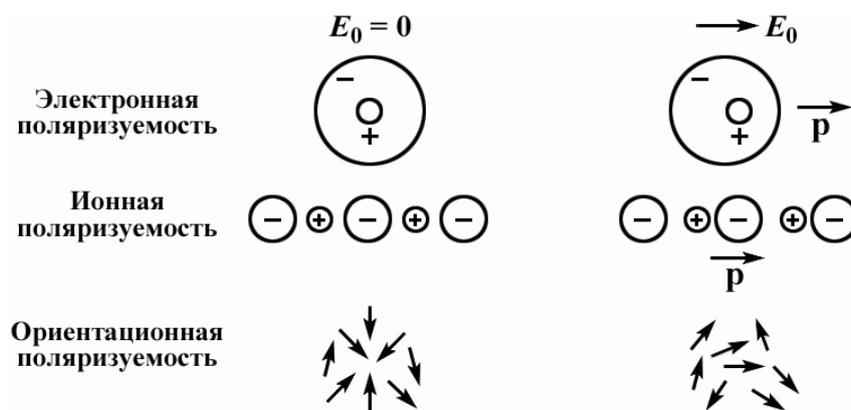


Рис. 1.16

**1.4.4. Результирующее поле внутри диэлектрика** (рис. 1.17):

$$E = E_0 - E',$$

где  $E'$  – электростатическое поле связанных зарядов,  $E_0$  – внешнее поле.

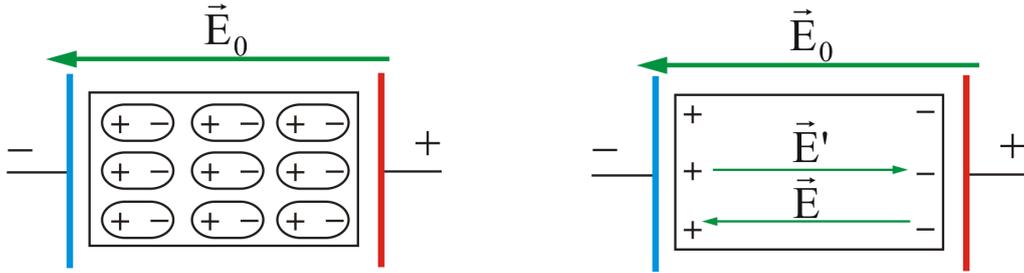


Рис. 1.17

Результирующая напряженность электростатического поля в диэлектрике равна внешнему полю, деленному на диэлектрическую проницаемость среды  $\epsilon$ :

$$E = \frac{E_0}{\epsilon}.$$

**1.4.5. Электрический момент** одной молекулы (рис. 1.18):

$$\vec{p}_1 = q\vec{l}.$$

**1.4.6. Вектор поляризации** – электрический момент единичного объема (рис. 1.19):

$$\vec{P} = \sum \vec{p}_1 = n\vec{p}_1 = \chi\epsilon_0\vec{E}.$$

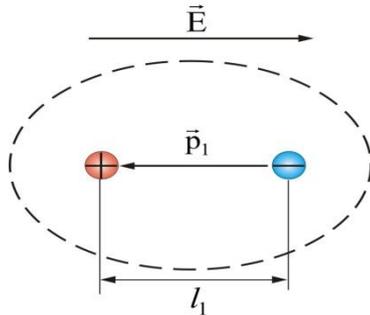


Рис. 1.18

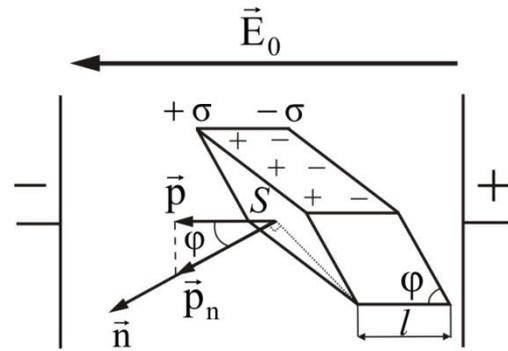


Рис. 1.19

**1.4.7. Поляризационный заряд** на поверхности диэлектрика равен поверхностной плотности заряда:

$$\sigma_{\text{пол}} = \frac{dq_{\text{пол}}}{dS} = (Pn),$$

где  $n$  – нормаль к поверхности диэлектрика. Это равенство справедливо для поверхности диэлектрика любой формы.

Полный поляризационный заряд в объеме диэлектрика при неоднородной поляризации равен поверхностному поляризационному заряду с обратным знаком:

$$q_{\text{пол}} = -\oint_S P dS = -\int_V \text{div} P dV.$$

$$q_{\text{пол}} = \int \rho_{\text{пол}} dV.$$

**1.4.8.** Соотношение между плотностью поляризационного заряда и вектором поляризации

$$\text{div} \vec{P} = -\rho_{\text{пол}}.$$

**1.4.9.** Диэлектрическая восприимчивость  $\chi$  характеризует поляризацию единичного объема среды:

$$\chi = n\alpha,$$

где  $n$  – концентрация молекул в единице объема;  $\alpha$  – поляризуемость молекулы.

**1.4.10.** Связь диэлектрической проницаемости с диэлектрической восприимчивостью:

$$\varepsilon = 1 + \chi$$

**1.4.11.** Связь диэлектрической восприимчивости с поляризуемостью молекулы:

$$\frac{\chi}{\chi + 3} = \frac{1}{3} \alpha n.$$

**1.4.12.** Вектор электрического смещения или электрическая индукция на границе раздела двух сред (рис.3.20):

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

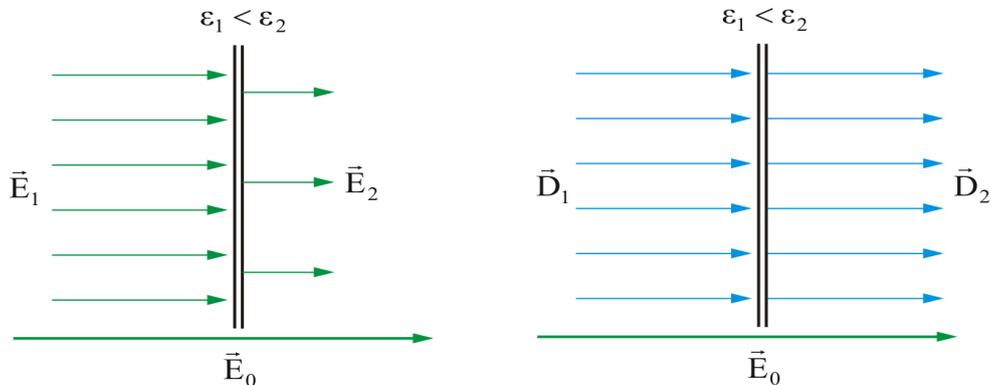


Рис. 1.20

**1.4.13.** Связь вектора электрического смещения с напряженностью и поляризуемостью:

$$\vec{D} = \varepsilon_0 \vec{E} + \vec{P}.$$

**1.4.14.** Теорема Гаусса для электростатического поля в диэлектрике: поток вектора электрического смещения через любую замкнутую

поверхность определяется только свободными зарядами, а не всеми зарядами внутри объема, ограниченного данной поверхностью (рис. 1.21):

$$\Phi_D = \oint_S \vec{D} d\vec{S} = \sum_{i=1}^n q_{i \text{ своб.}}$$

В дифференциальной форме  $\text{div} \vec{D} = \rho_{\text{своб.}}$ .

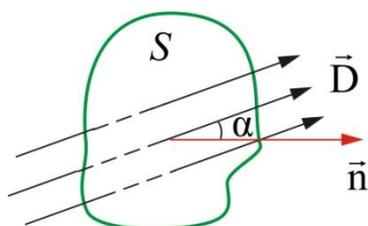


Рис. 1.21

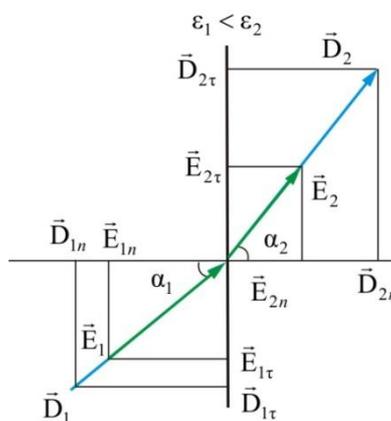


Рис. 1.22

**1.4.15. Закон преломления векторов  $\vec{E}$  и  $\vec{D}$  (рис 1.22):**

$$\frac{\text{tg} \alpha_1}{\text{tg} \alpha_2} = \frac{E_{1n}}{E_{2n}} = \frac{D_{2\tau}}{D_{1\tau}} = \frac{\epsilon_2}{\epsilon_1}.$$

## 1.5. Проводники в электростатическом поле

**1.5.1. Электростатическое экранирование** – внутрь проводника поле не проникает:

$$\frac{d\phi}{dl} = -E = 0, \text{ значит } \phi = \text{const.}$$

**1.5.2. Электроемкость** – характеристика проводящего тела, связанная с его способностью накапливать электрический заряд.

**1.5.3. Электрическая емкость** уединенного проводника – физическая величина, численно равная заряду, который необходимо сообщить проводнику для того, чтобы изменить его потенциал на единицу:

$$C = \frac{q}{\phi_0},$$

где  $\phi_0 = 1\text{В}$ .

**1.5.4. Электрическая емкость шара:**

$$C = 4\pi\epsilon_0\epsilon R.$$

**1.5.5. Электрическая емкость конденсаторов** (двух металлических пластин (обкладок), разделенных слоем диэлектрика)  $C = \frac{q}{\Delta\phi}$ :

- плоского (рис. 1.23):  $C = \frac{\epsilon_0 \epsilon S}{d}$ ;
- сферического (рис. 1.24):  $C = 4\pi\epsilon_0 \epsilon \frac{r_1 r_2}{r_2 - r_1} \approx \frac{\epsilon_0 \epsilon S}{d}$ .
- цилиндрического (рис. 1.25):  $C = \frac{2\pi\epsilon_0 l}{\ln r_2 / r_1} \approx \frac{\epsilon_0 \epsilon S}{d}$ ;

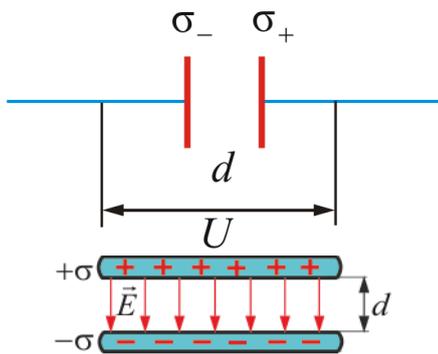


Рис. 1.23

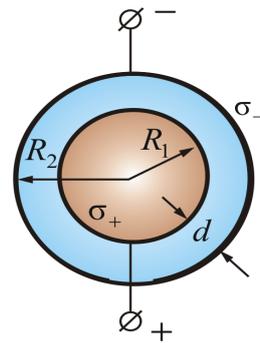


Рис. 1.24

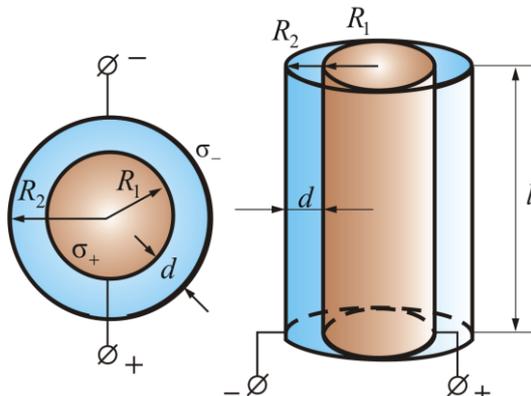


Рис. 1.25



**1.5.6. Емкость параллельно соединенных конденсаторов:**

$$C = \sum_{i=1}^n C_i .$$

**1.5.7. Емкость последовательно соединенных конденсаторов:**

$$\frac{1}{C} = \sum_{i=1}^n \frac{1}{C_i} .$$

Параллельное соединение		Последовательное соединение
$C$	$C = C_1 + C_2$	$\frac{1}{C} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2}$
$q$	$q = q_1 + q_2$	$q = q_1 = q_2$
$U$	$U = U_1 = U_2$	$U = U_1 + U_2$

**1.5.8. Энергия взаимодействия двух зарядов:**

$$W = \frac{q_1 q_2}{4\pi\epsilon_0 r_{12}} = \frac{1}{2}(q_1\phi_1 + q_2\phi_2).$$

**1.5.9. Энергия заряженного уединенного проводника:**

$$W = \frac{C\phi^2}{2} = \frac{q\phi}{2} = \frac{q^2}{2C}.$$

**1.5.10. Энергия заряженного конденсатора:**

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

**1.5.11. Энергия поля плоского конденсатора:**

$$W = \frac{CU^2}{2} = \frac{\epsilon\epsilon_0 S U^2}{2d} = \frac{\epsilon\epsilon_0 E^2}{2} V = \frac{ED}{2} V = \frac{D^2}{2\epsilon\epsilon_0} V.$$

**1.5.12. Объемная плотность энергии** – величина, которая измеряется энергией поля, заключенной в единице объема:

$$w = \frac{W}{V} = \frac{\epsilon_0 \epsilon E^2}{2} = \frac{ED}{2}.$$

**1.5.13. Взаимная энергия системы  $n$  точечных зарядов:**

$$W = \frac{1}{2} \sum_{k,i=1}^n \frac{q_k q_i}{4\pi\epsilon_0 r_{ik}} \quad (i \neq k).$$

- При непрерывном распределении зарядов с плотностью  $\rho$  по объему  $V$  и с плотностью  $\sigma$  на поверхности  $S$  в точках пространства с потенциалом  $\phi$ :

$$W = \frac{1}{2} \int_V \phi \rho dV + \frac{1}{2} \int_S \phi \sigma dS.$$

- Величина энергии через индукцию и напряженность поля:

$$W = \frac{1}{2} \int_V (\vec{E}, \vec{D}) dV.$$

**1.5.14. Пондермоторные силы** в конденсаторе – силы электрического взаимодействия между пластинами конденсатора:

$$F = \frac{q^2}{2\epsilon\epsilon_0 S}.$$

## **1.6. Эмиссия электронов из проводников. Контактные явления на границах проводников**

**1.6.1. Работа выхода электрона** из металла:

$$A_{\text{вых}} = e(\varphi_{\text{вн}} - \varphi_{\text{пв}}).$$

**1.6.2. Закон Чайльда – Ленгмюра** (закон трех вторых): плотность тока  $j$  в условиях влияния объемного заряда пропорциональна  $E^{3/2}$ :

$$j = AE^{3/2},$$

где  $A = \frac{4}{9} \epsilon_0 \left( \frac{2e}{m} \right)^{3/2} E^2 r^{-1/2}$  – коэффициент пропорциональности, определяемый геометрией и материалом катода.

**1.6.3. Термопара** (термоэлектрический преобразователь температуры) – термоэлемент, применяемый в измерительных и преобразовательных устройствах, а также в системах автоматизации.

**1.6.4. Термо ЭДС термопары:**

$$\mathcal{E} = \alpha(T_{\text{г}} - T_{\text{х}}),$$

где  $T_{\text{г}}$  – температура горячего спая,  $T_{\text{х}}$  – температура холодного спая.

**1.6.5. Эффект Пельтье** – обратный термоэлектрический эффект. Он заключается в том, что при пропускании через термопару, её спай поглощает или выделяет тепло, в зависимости от направления тока:

$$Q_{\text{П}} = \Pi_{12} j.$$

### Характеристики электростатического поля

Электростатическое поле	Формулы и обозначения
Точечный заряд	$q$
Диэлектрическая проницаемость	$\varepsilon$
Диэлектрическая восприимчивость	$\chi = \varepsilon - 1$
Сила Кулона	$F = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0\varepsilon} \frac{q_1q_2}{r^2}$
Напряженность поля	$E = \frac{\vec{F}}{q} = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0} \frac{q}{r^2}$
Электростатическая индукция	$\vec{D} = \varepsilon_0\varepsilon\vec{E}$
Принцип суперпозиции	$\vec{E} = \sum \vec{E}_i$
Потенциальная энергия	$U = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0} \frac{q_1q_2}{r}$
Связь силы с энергией	$\vec{F} = -\text{grad}U$
Потенциал поля	$\varphi = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0} \frac{q}{r}$
Сложение потенциалов	$\varphi = \sum \varphi_i$
Связь $\vec{E}$ и $\varphi$	$\vec{E} = -\text{grad}\varphi = -\nabla\varphi$
Поляризованность	$\vec{P} = \chi\varepsilon_0\vec{E}$
Емкость проводника	$C = \frac{q}{\varphi} = \frac{\varepsilon_0\varepsilon S}{d}$
Энергия конденсатора	$W = \frac{CU^2}{2} = \frac{q^2}{2C}$
Объемная плотность энергии	$w = \frac{ED}{2} = \frac{\varepsilon_0 E^2}{2}$
Работа по перемещению единичного заряда $q'$ из т. 1 в т. 2	$A = \frac{qq'}{4\pi\varepsilon_0} \left( \frac{1}{r_2} - \frac{1}{r_1} \right) = q(\varphi_2 - \varphi_1)$
Работа по замкнутому контуру	$A = \oint_L \vec{F}d\vec{r} = 0$
Циркуляция вектора $\vec{E}$	$\oint_L \vec{E}dl = 0$
Теорема Гаусса в интегральной форме	$\Phi_E = \oint_S \vec{E}d\vec{S} = \frac{q}{\varepsilon_0}$

Теорема Гаусса в дифференц. форме	$\operatorname{div} \vec{E} = \nabla \vec{E} = \frac{\rho}{\epsilon \epsilon_0}$
Электростатическое поле – безвихревое	$\operatorname{rot} \vec{E} = 0$
Электростат. поле создается зарядами	$\operatorname{div} \vec{D} = \nabla \vec{D} = \rho$

## 1.7 Постоянный электрический ток

**1.7.1. Электрический ток** – упорядоченное движение электрически заряженных частиц. За направление тока принимают направление движения положительных зарядов.

**1.7.2. Связь напряженности и потенциала** с плотностью распределения зарядов в пространстве:

$$\nabla E = \frac{1}{\epsilon} \rho \quad \text{и} \quad \nabla^2 \varphi = \frac{1}{\epsilon} \rho .$$

**1.7.3. Сила тока** – заряд, перенесенный сквозь рассматриваемую поверхность или через поперечное сечение проводника в единицу времени:

$$I = \frac{\partial q}{\partial t} = \oint_S \vec{j} \cdot \vec{\partial S} .$$

**1.7.4. Сила постоянного тока:**  $I = \frac{q}{t}$ .

**1.7.5. Плотность тока**  $\vec{j}$  – векторная характеристика тока, модуль которой равен отношению силы тока  $\partial I$  через элементарную площадку  $\partial S$ , перпендикулярную направлению движения носителей заряда, к её площади:

$$j = \frac{\partial I}{\partial S} \quad \text{или для постоянного тока} \quad j = \frac{I}{S} .$$

**1.7.6. Направление вектора**  $\vec{j}$  – направление вектора дрейфовой скорости  $\vec{v}_{\text{др}}$  положительных носителей зарядов:

$$\vec{j} = \rho \vec{v}_{\text{др}} = q_+ n_+ \vec{v}_{\text{др}+} + q_- n_- \vec{v}_{\text{др}-} ,$$

где  $q_+ n_+$  и  $q_- n_-$  – объемные плотности соответствующих зарядов.

Поле вектора  $\vec{j}$  изображается графически с помощью *линий тока*, которые проводят так же, как и линии вектора напряженности  $\vec{E}$  (рис. 1.26).

**1.7.7. Плотности постоянного тока** в различных поперечных сечениях 1 и 2 цепи обратно пропорциональны площадям  $S_1$  и  $S_2$  этих сечений (рис. 1.27):

$$j_2 / j_1 = S_1 / S_2 .$$

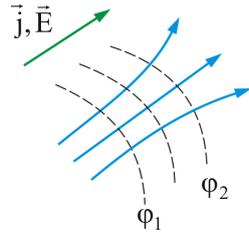


Рис. 1.26

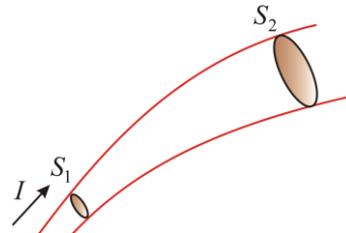


Рис. 1.27

**1.7.8. Уравнение непрерывности** – закон сохранения электрического заряда (рис. 1.27):

- в интегральной форме:  $\oint_S \vec{j} \cdot d\vec{S} = -\frac{\partial q}{\partial t}$ ;
- в дифференциальной форме:  $\nabla \cdot \vec{j} = -\frac{\partial \rho}{\partial t}$  или  $\text{div} \vec{j} = -\frac{\partial \rho}{\partial t}$ ;
- для постоянного тока:  $\oint_S \vec{j} \cdot d\vec{S} = 0$ .

**1.7.9. Электродвижущая сила**, действующая в цепи, численно равна работе сторонних сил  $A_{\text{ст}}$  над единичным положительным зарядом:

$$\mathcal{E} = \frac{A_{\text{ст}}}{q}.$$

- Для участка цепи 1–2 (рис. 1.28):

$$\mathcal{E} = \int_1^2 E_{\text{ст}} dl; \quad \Delta\varphi = \frac{A_{\text{к}}}{q_0}.$$

- Для замкнутой цепи (рис. 1.29):

$$\mathcal{E} = \frac{A_{\text{ст}}}{q} = \oint_L E_{\text{ст}} dl; \quad U = \frac{A_{\text{к}} + A_{\text{ст}}}{q_0} = \Delta\varphi + \mathcal{E}.$$

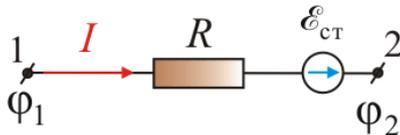


Рис. 1.28

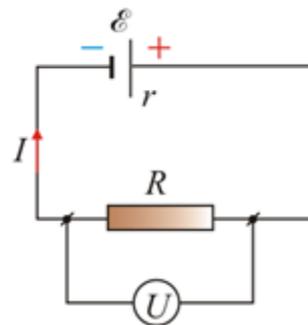


Рис. 1.29

**1.7.10. Сопротивление однородного проводника:**

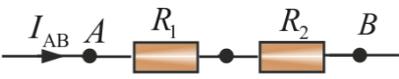
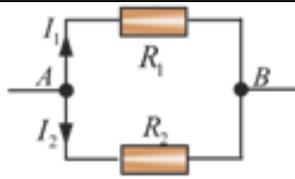
$$R = \frac{\rho l}{S}.$$

**1.7.11. Зависимость сопротивления проводника  $R$  и удельного сопротивления  $\rho$  от температуры:**

$$R = R_0(1 + \alpha t), \quad \rho = \rho_0(1 + \alpha t).$$

Здесь  $R$  и  $R_0$ ,  $\rho$  и  $\rho_0$  – соответственно сопротивление и удельное сопротивление проводника при  $t$  и  $0$  °С;  $\alpha$  – температурный коэффициент сопротивления.

**1.7.12. Общее сопротивление при последовательном и параллельном соединении:**

Последовательное соединение		Параллельное соединение
		
$I$	$I_{AB} = \text{const} = I_1 = I_2$	$I_{AB} = I_1 + I_2$
$R$	$R_{AB} = R_1 + R_2$	$\frac{1}{R_{AB}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}; R_{AB} = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}$
$U$	$U_{AB} = U_1 + U_2$	$U_{AB} = U_1 = U_2$

**1.7.13. Сопротивление шунта**, подключенного параллельно амперметру:

$$R = \frac{R_A}{n - 1},$$

где  $R_A$  – сопротивление амперметра;  $n$  – число, показывающее во сколько раз изменяются пределы измерения амперметра.

**1.7.14. Дополнительное сопротивление**, подключенное последовательно с вольтметром:

$$R = R_V(n - 1),$$

где  $R_V$  – сопротивление вольтметра;  $n$  – число, показывающее во сколько раз изменяются пределы измерения вольтметра.

**1.7.15. Проводимость  $G$**  – способность тела пропускать электрический ток под воздействием электрического поля:

$$G = \frac{1}{R}.$$

**1.7.16. Удельная электропроводность**  $\sigma$  – физическая величина, равная электропроводности цилиндрического проводника единичной длины и единичной площади поперечного сечения:

$$\sigma = \frac{1}{\rho}.$$

**1.7.17. Закон Ома** для однородного участка цепи ( $\mathcal{E}=0$ ): сила тока в проводнике прямо пропорциональна напряжению между концами проводника и обратно пропорциональна сопротивлению проводника

$$I = \frac{U}{R}.$$

**1.7.18. Закон Ома** в дифференциальной форме:

$$\vec{j} = \frac{1}{\rho} \vec{E} = \sigma \vec{E}.$$

**1.7.19. Обобщенный закон Ома** для участка цепи (рис. 1.30) содержащий источник ЭДС (закон сохранения энергии применительно к участку цепи постоянного тока):

$$I = \frac{\varphi_1 - \varphi_2 \pm \mathcal{E}_{12}}{R} = \frac{U}{R}.$$

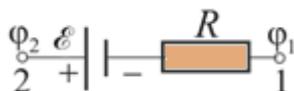


Рис. 1.30

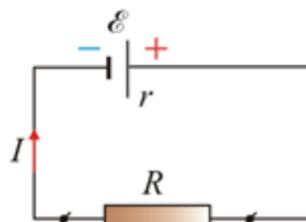


Рис. 1.31

**1.7.20. Закон Ома** для замкнутой цепи (рис. 1.31):

$$I = \frac{\mathcal{E}}{R + r},$$

где  $r$  – внутреннее сопротивление источника ЭДС;  $R$  – сопротивление нагрузки;  $\mathcal{E} = I(R + r)$ .

**1.7.21. Сила тока в цепи:**

- при последовательном соединении  $n$  источников с одинаковыми ЭДС и внутренними сопротивлениями:

$$I = \frac{n\mathcal{E}}{R + nr};$$

- при параллельном соединении  $n$  источников с одинаковыми ЭДС и внутренними сопротивлениями:

$$I = \frac{\mathcal{E}}{R + r/n}.$$

**1.7.22. Работа силы электрического поля:**

$$A = RI^2t.$$

**1.7.23. Работа,** совершаемая в цепи источником тока за время  $t$ :

$$A = I\mathcal{E}t = I^2(R + r)t = \frac{\mathcal{E}^2}{R + r}t.$$

**1.7.24. Мощность тока** – это работа тока, совершаемая в единицу времени:

$$N = \frac{dA}{dt} = IU = I^2R = \frac{U^2}{R}.$$

**1.7.25. Удельная мощность** – мощность, выделяемая в единице объема проводника:

$$w = \rho j^2.$$

**1.7.26. Полная мощность,** развиваемая источником тока в цепи:

$$N_0 = I\mathcal{E} = I^2(R + r) = \frac{\mathcal{E}^2}{R + r}.$$

**1.7.27. Закон Джоуля – Ленца:** при протекании тока, в проводнике выделяется количество теплоты:

$$dQ = IUdt = I^2Rdt = \frac{U^2}{R}dt.$$

**1.7.28. Закон Джоуля – Ленца** в дифференциальной форме характеризующий плотность выделенной энергии:

$$w = jE = \sigma E^2.$$

**1.7.29. КПД источника тока:**

$$\eta = \frac{A_n}{A_3} = \frac{N_n}{N_3} = \frac{U}{\mathcal{E}} = \frac{R}{R + r}.$$

**1.7.30. Первое правило Кирхгофа** – алгебраическая сумма сил токов, сходящаяся в любом узле цепи, равна нулю:

$$\sum_{k=1}^n I_k = 0.$$

Токи притекающие к узлу считают положительными, а оттекающие от узла – отрицательными. Для схемы, изображенной на рис. 1.32 первое правило Кирхгофа запишется в виде:

$$I_1 - I_2 + I_3 = 0.$$

**1.7.31. Второе правило Кирхгофа** – в любом замкнутом контуре электрической цепи алгебраическая сумма произведения тока на сопротивление равна алгебраической сумме ЭДС, действующих в этом же контуре (рис. 1.33):

$$\sum_i I_i R_i = \sum_k \mathcal{E}_k .$$

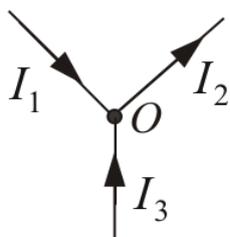


Рис. 1.32

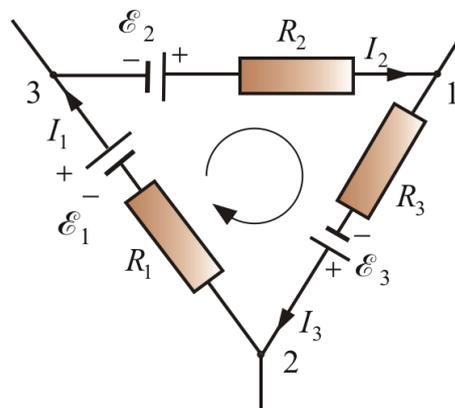


Рис. 1.33

## 1.8. Электрический ток в газах металлах и электролитах

**1.8.1. Несамостоятельным газовым разрядом** называется такой разряд, который, возникнув при наличии электрического поля, может существовать только под действием внешнего ионизатора (рис. 1.34).

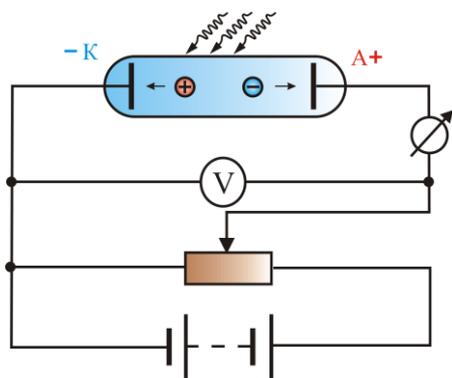


Рис. 1.34

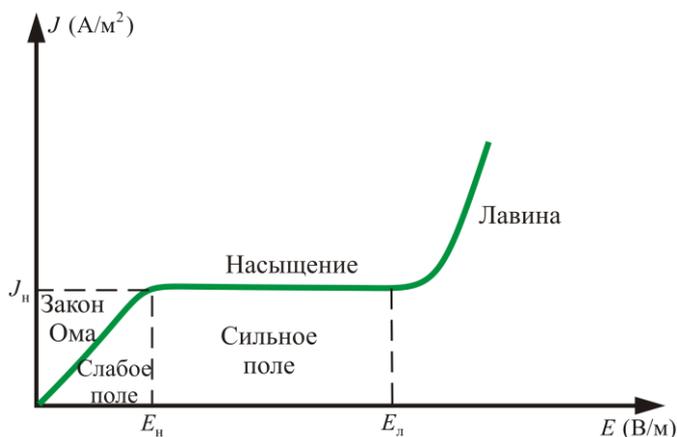


Рис. 1.35

**1.8.2. Зависимость плотности тока от напряженности поля** изображена на рисунке 1.35.

**1.8.3. Лавина** – лавинообразное размножение (под действием увеличения напряжения) первичных ионов и электронов, созданных внешним ионизатором (рис 1.35, 1.36).

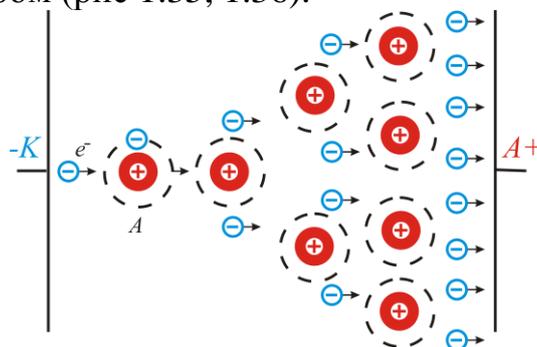


Рис. 1.36

**1.8.4. Плотность тока в газах :**

$$\vec{j} = nq(\vec{v}^+ + \vec{v}^-).$$

**1.8.5. Удельная электропроводность газов**

$$\sigma = q \sqrt{\frac{\Delta n_i}{r}} (\mu_+ + \mu_-).$$

**1.8.6. Типы разрядов** в зависимости от давления газа, конфигурации электродов и параметров внешней цепи:

- тлеющий разряд (рис.1.37);
- искровой разряд (рис 1.38);
- дуговой разряд (рис. 1.39);
- коронный разряд (рис. 1.40).

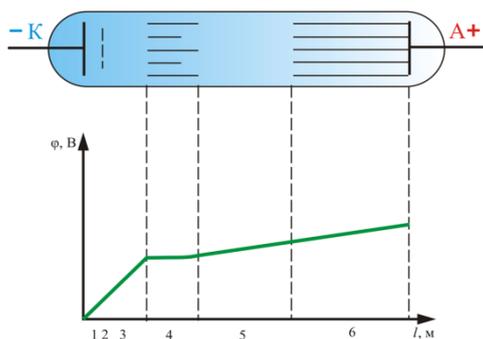


Рис. 1.37



Рис. 1.38

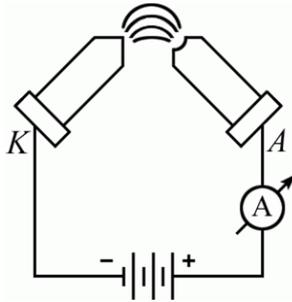


Рис. 1.39

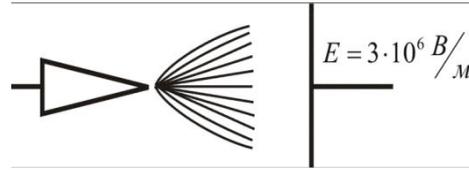


Рис. 1.40

**1.8.7. Закон Ома** для тока в газах:

$$\vec{j} = \sigma \vec{E}.$$

**1.8.8. Закон Ома** для тока в металлах:

$$I = enS\bar{v}_d = \frac{1}{2} \frac{e^2 \tau n S}{m} E = \frac{e^2 \tau n S}{2ml} U.$$

**1.8.9. Электрическое сопротивление проводника:**

$$R = \frac{2m}{e^2 \pi \tau} \frac{l}{S}.$$

**1.8.10. Зависимость сопротивления металла от температуры** записывается линейным законом (рис. 3.41, кривая 1):

$$R = R_0(1 + \alpha t),$$

где  $\alpha$  – температурный коэффициент сопротивления.

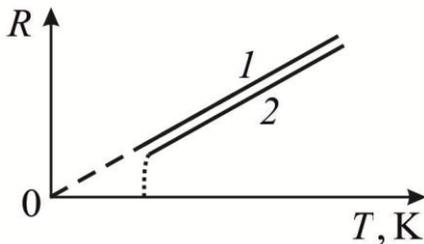


Рис. 1.41

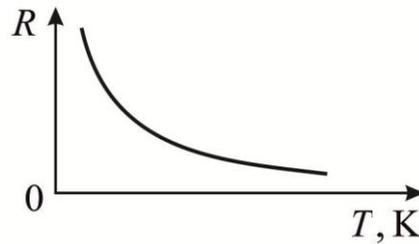


Рис. 1.42

**1.8.11. Сверхпроводимость** – явление резкого уменьшения сопротивления (при температурах ниже критических  $T_k$ ) до нуля (рис. 1.41, кривая 2)

**1.8.12. Сопротивление полупроводника** с ростом температуры уменьшается за счет появления дополнительных носителей заряда. Зависимость сопротивления полупроводника от температуры показана на рис.1.42.

**1.8.13. Электролиты** – проводящие среды, в которых протекание электрического тока сопровождается переносом вещества. Носителями свободных зарядов в электролитах являются положительно и отрицательно заряженные ионы (рис.1.43).

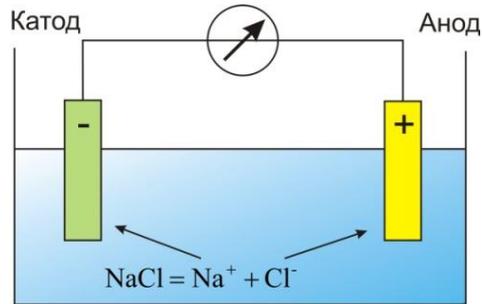


Рис. 1.43

**1.8.14. Первый закон Фарадея:** масса  $m$  вещества, выделившегося на электроде, прямо пропорциональна заряду  $q$ , прошедшему через электролит:

$$m = kq = kIt,$$

где  $k = \frac{\mu}{Fz}$  – электрический эквивалент вещества,  $z$  – заряд иона.

**1.8.15. Второй закон Фарадея:** электрохимические эквиваленты элементов прямо пропорциональны их химическим эквивалентам:

$$\frac{k_2}{k_1} = \frac{k_{x2}}{k_{x1}}.$$

**1.8.16. Объединенный закон Фарадея:**

$$m = \frac{1}{F} \frac{\mu}{n} It.$$

## 2. ЭЛЕКТРОМАГНЕТИЗМ

### 2.1. Магнитное поле

**Магнитное поле** – материя, связанная с движущимися зарядами (токами) и обнаруживающая себя по действию на движущиеся заряды, помещенные в это поле (рис 2.1).

Магнитное поле – это изменения в свойствах среды при внесении в неё движущегося заряда.

Магнитное поле проявляется как релятивистский эффект при переходе из одной инерциальной системы отсчета в другую.

**2.1.4. Магнитный момент  $P_m$  контура с током:**

$$P_m = IS \text{ или } \vec{P}_m = IS\vec{n},$$

где  $I$  – величина тока;  $S$  – площадь контура;  $\vec{n}$  – нормаль. Направление вектора магнитного момента совпадает с положительным направлением нормали (рис 2.2).

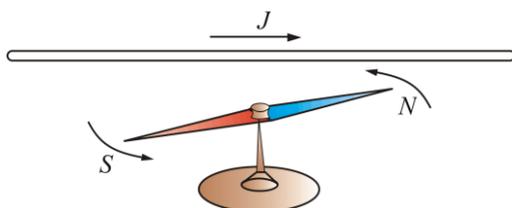


Рис. 2.1

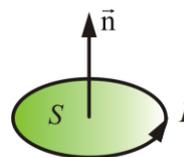


Рис. 2.2

**2.1.5. Момент силы (механический момент), вращающий рамку с током в магнитном поле:**

$$\vec{M} = [\vec{P}_m, \vec{B}] \text{ или } M = P_m B \sin \alpha = ISB \sin \alpha,$$

где  $\alpha$  – угол между нормалью  $\vec{n}$  к плоскости контура и вектора  $\vec{B}$ .

**2.1.6. Магнитная индукция** –  $\vec{B}$  векторная величина, являющаяся силовой характеристикой магнитного поля в данной точке пространства. Показывает, с какой силой  $\vec{F}$  магнитное поле действует на заряд  $\vec{q}$ , движущийся со скоростью  $\vec{v}$ .

*Магнитная индукция* определяется как отношение момента силы к магнитному моменту  $M/P_m$  для данной точки магнитного поля:

$$B = \frac{M_{\max}}{P_m}.$$

Физический смысл вектора  $\vec{B}$  состоит в том, что это максимальный вращающийся момент, действующий на рамку с током, помещённую в магнитное поле при единичном магнитном моменте  $P_m = 1 \text{ А} \cdot \text{м}^2$ .

**2.1.7. Потенциальная (механическая) энергия контура с током в магнитном поле:**

$$E_{\text{п, мех}} = \vec{P}_m \vec{B} = P_m B \cos \alpha.$$

**2.1.8. Принцип суперпозиции магнитных полей:** магнитное поле  $\vec{B}$ , порождаемое несколькими движущимися зарядами (токами), равно векторной сумме полей  $\vec{B}_i$ , порождаемых каждым зарядом (током) в отдельности (рис 2.3):

$$\vec{B} = \sum \vec{B}_i.$$

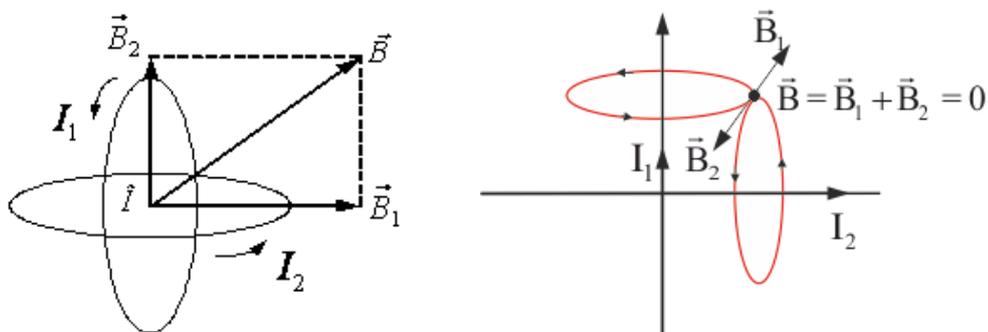


Рис. 2.3

**2.1.9. Модуль магнитной индукции при сложении двух полей:**

$$B = \sqrt{B_1^2 + B_2^2 + 2B_1B_2 \cos \alpha}.$$

**2.1.10. Закон Био – Савара – Лапласа:** элемент тока длины  $dl$  (рис 2.4) создает поле с магнитной индукцией:

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

где  $d\vec{l}$  – вектор, совпадающий с элементарным участком тока;  $\vec{r}$  – радиус вектор, проведенный от элемента тока в точку, в которой определяем  $d\vec{B}$ ;  $I$  – ток;  $\mu_0$  – магнитная постоянная;  $\mu$  – магнитная проницаемость среды.

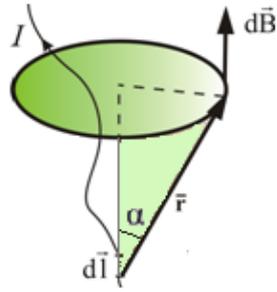


Рис. 2.4

**2.1.11. Правило буравчика** показывает связь направления  $d\vec{B}$  с направлением  $d\vec{I}$ : вращение головки винта дает направление  $d\vec{B}$ , поступательное движение винта соответствует направлению тока в элементе (рис 2.5). То же самое дает правило правой руки (рис.2.6).

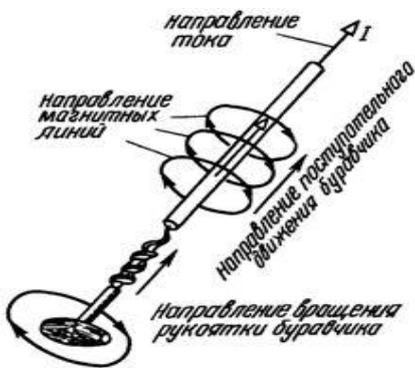


Рис. 2.5

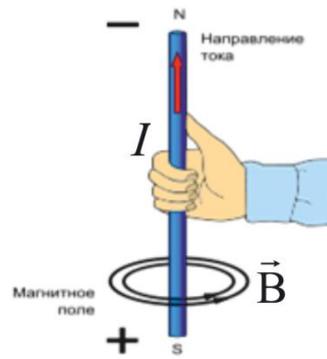


Рис. 2.6

**2.1.12. Индукция магнитного поля движущегося заряда  $q$**  (рис. 2.7):

$$B_1 = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{qv \sin(\vec{v}, \vec{r})}{r^2}.$$

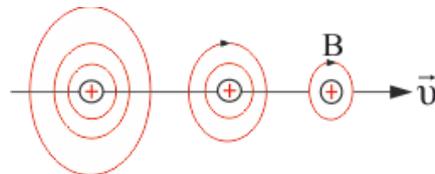


Рис. 2.7

**2.1.13. Магнитная индукция конечного проводника с током  $I$  на расстоянии  $b$**  (рис. 2.8):

$$B = \frac{\mu\mu_0}{4\pi} \frac{I}{b} (\cos\alpha_1 - \cos\alpha_2),$$

где  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$  – углы относительно проводника, под которыми видны его концы из точки, в которой определяется поле.

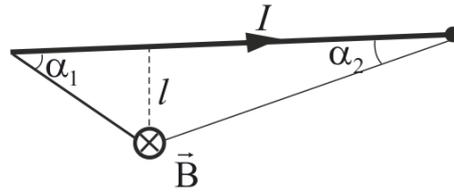


Рис. 2.8

**2.1.14. Магнитная индукция бесконечно длинного проводника с током  $I$ :**

$$B = \frac{\mu\mu_0}{4\pi} \frac{2I}{b}.$$

**2.1.15. Магнитная индукция в центре кругового тока:**

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

где  $R$  – радиус окружности.

**2.1.16. Магнитная индукция кругового тока на расстоянии  $x$  от центра (рис 2.9):**

$$B = \int_0^{2\pi R} dB_{\parallel} = \frac{\mu\mu_0}{4\pi} \frac{2\pi R^2 I}{(R^2 + x^2)^{3/2}}; \quad B = \frac{\mu\mu_0}{4\pi} \frac{2P_m}{x^3}.$$

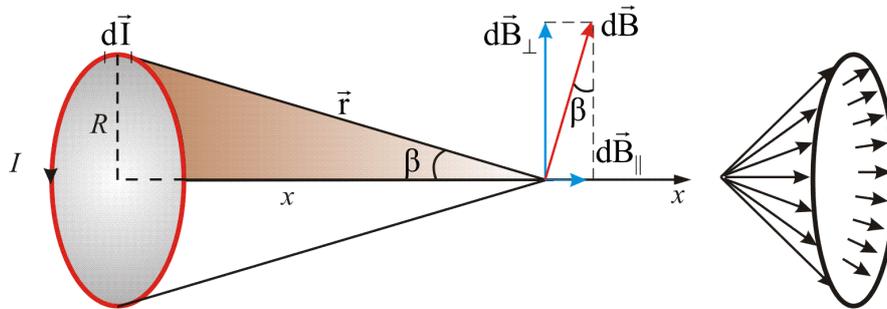


Рис. 2.9

**2.1.17. Напряженность магнитного поля  $\vec{H}$  – векторная величина, характеризующая магнитное поле:**

$$\vec{H} = \frac{\vec{B}}{\mu\mu_0}.$$

**2.1.18. Поток вектора магнитной индукции – магнитный поток сквозь поверхность  $S$  (рис. 2.10):**

$$\Phi_B = \int_S \vec{B} d\vec{S}, \text{ или } \Phi_B = BS \cos \beta = BS \sin \alpha$$

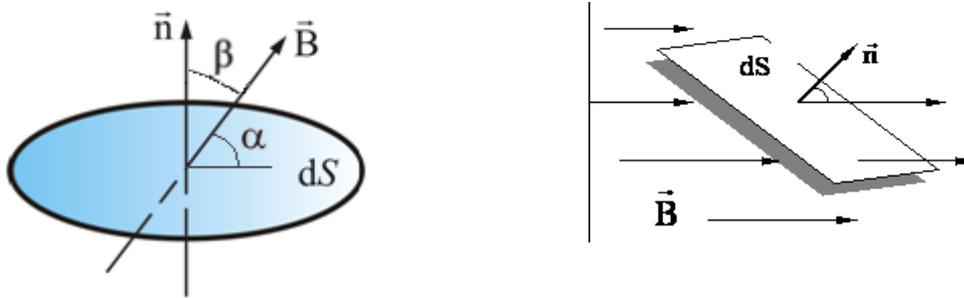


Рис. 2.10

**2.1.19. Теорема Гаусса:** поток вектора магнитной индукции через любую замкнутую поверхность равен нулю:

- в интегральной форме:  $\oint \vec{B} d\vec{S} = 0$ ;
- в дифференциальной форме:  $\text{div} \vec{B} \equiv \nabla \cdot \vec{B} = 0$ .

Этот результат является математическим выражением того, что в природе нет магнитных зарядов – источников магнитного поля, на которых начинались и заканчивались бы линии магнитной индукции. Магнитное поле вихревое или соленоидальное (рис. 2.11, 2.12).

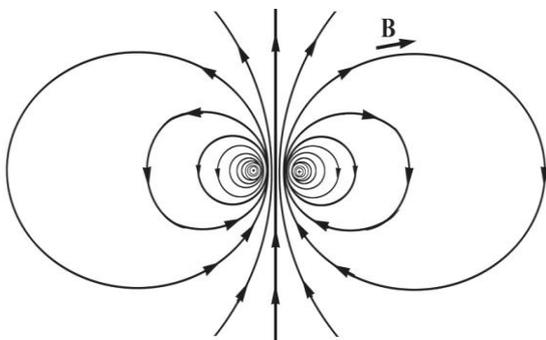


Рис. 2.11

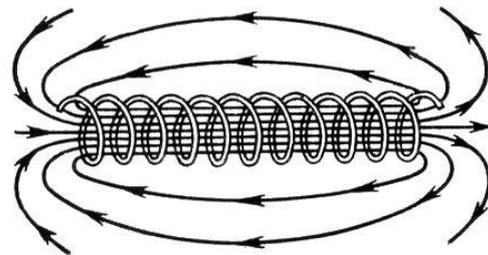


Рис. 2.12

## 2.2. Силы, действующие на движущиеся заряды в магнитном поле

**2.2.1. Закон Ампера:** сила  $d\vec{F}$ , с которой магнитное поле действует на элемент  $d\vec{l}$  проводника с током, находящегося в магнитном поле, прямо пропорциональна силе тока  $I$  в проводнике и векторному произведению элемента длины проводника на магнитную индукцию  $\vec{B}$  (рис.2.13):

$$d\vec{F} = I[d\vec{l}, \vec{B}] \text{ или } \vec{F} = I[\vec{l}, \vec{B}].$$

Направление силы Ампера определяется по правилу левой руки.

### 2.2.2. Модуль вектора силы Ампера:

$$F = I l B \sin \alpha.$$

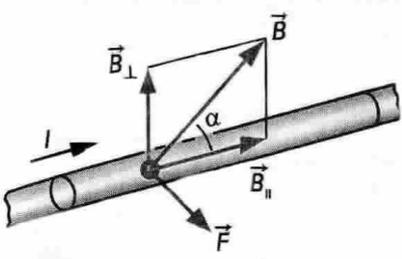


Рис. 2.13

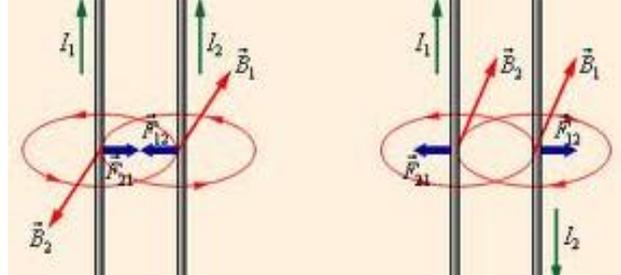


Рис. 2.14

**2.2.3. Сила взаимодействия** двух параллельных проводников с токами  $I_1$  и  $I_2$  на расстояние  $b$  (рис 2.14):

$$F = \frac{\mu\mu_0}{2\pi} \frac{I_1 I_2}{b}.$$

**2.2.4. Сила Лоренца** – это сила, действующая со стороны магнитного поля на движущийся со скоростью  $\vec{v}$  положительный заряд (рис 2.15):

$$\vec{F}_L = q[\vec{v}, \vec{B}], \quad F_L = qvB \sin \alpha, \quad \vec{F}_L = q\vec{E} + q[\vec{v}, \vec{B}],$$

здесь  $\vec{v}$  – скорость упорядоченного движения носителей положительного заряда.

Направление силы Лоренца определяется правилом «левой руки»: четыре пальца ставятся по направлению тока (направление движения «положительно» заряженных частиц), ладонь ориентируется так, чтобы силовые линии индукции входили в нее, тогда большой отогнутый палец покажет направление силы Лоренца (рис.2.16).

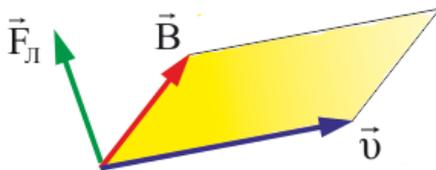


Рис. 2.15

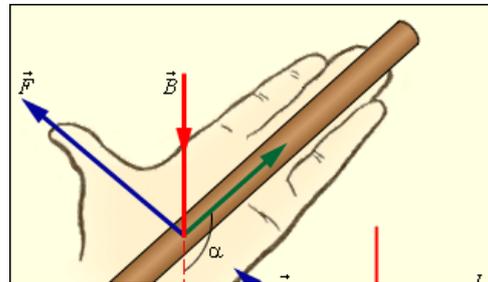


Рис. 2.16

**2.2.5. Работа силы Лоренца** равна нулю, т.к. сила Лоренца перпендикулярна вектору скорости. Постоянное магнитное поле изменяет направление движения частицы, но не величину скорости.

$$A = \vec{F}\vec{l} = Fl \cos\beta = 0,$$

так как  $\beta = 0$ .

Пример действия силы Лоренца на пучок электронов в электронно лучевой трубке приведен на рис. 2.17.

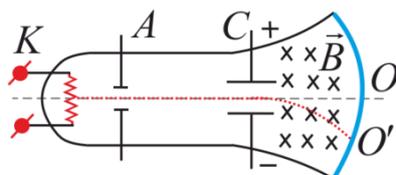


Рис. 2.17

**2.2.6. Теорема о циркуляции вектора** индукции магнитного поля: циркуляция вектора  $\vec{B}$  по замкнутому контуру  $L$  равна алгебраической сумме токов, находящихся внутри этого контура, умноженной на  $\mu_0$ :

$$\oint_L \vec{B}d\vec{l} = \mu_0 \sum_{i=1}^n I_i = \mu_0 I_{\text{полн}},$$

где  $I_{\text{полн}}$  – полный ток, находящийся внутри контура  $L$ .

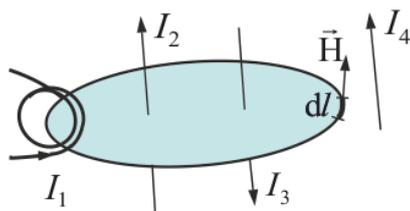
В дифференциальной форме:

$$\text{rot}\vec{B} \equiv [\nabla, B] = \mu_0 j_{\text{полн}}$$

**2.2.7. Вихревой характер** магнитного поля следует из того, что циркуляция вектора индукции магнитного поля по замкнутому контуру не равна нулю. Силовые линии этого поля замкнуты сами на себя. Магнитное поле возникает только в присутствии токов и является вихревым в области, где есть токи. Отсюда следует, что магнитное поле в этой области не является потенциальным.

**2.2.8. Теорема о циркуляции вектора  $\vec{H}$ :** циркуляция вектора напряженности магнитного поля равна току, охваченному контуром (рис 2.17):

$$\oint_L \vec{H}d\vec{l} = I.$$



$$\oint_L \vec{H}d\vec{l} = 2I_1 + I_2 - I_3$$

Рис 2.17

**2.2.9. Работа по перемещению проводника с током** в магнитном поле численно равна произведению тока на магнитный поток, пересеченный этим проводником (рис 2.18):

$$dA = I(\Phi_2 - \Phi_1).$$

**2.2.10. Работа по перемещению замкнутого контура** в магнитном поле равна произведению величины тока на изменение магнитного потока, сцепленного с этим контуром (рис 2.19):

$$dA = Id\Phi'.$$

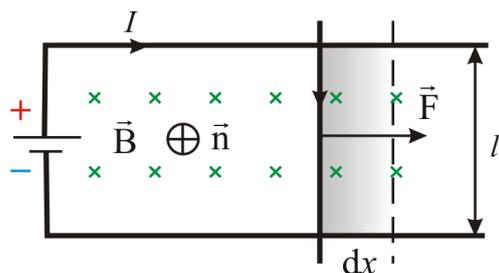


Рис. 2.18

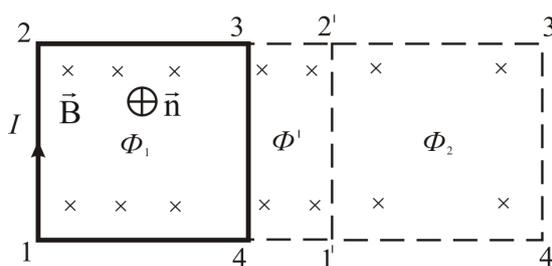


Рис. 2.19

**2.2.11. Магнитная индукция** внутри бесконечного длинного соленоида (рис. 2.20):

$$B = \mu\mu_0 nI,$$

где  $\mu$  – магнитная проницаемость вещества;  $n$  – число витков на единицу длины;  $I$  – ток в соленоиде.

**2.2.12. Магнитное поле** в произвольной точке внутри конечного соленоида (рис. 2.21):

$$B = \frac{1}{2} \mu\mu_0 nI (\cos\alpha_1 - \cos\alpha_2).$$

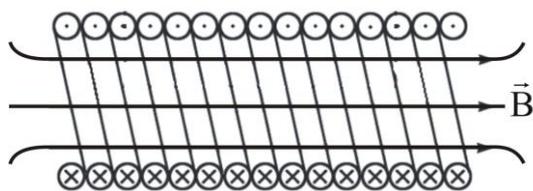


Рис. 2.20

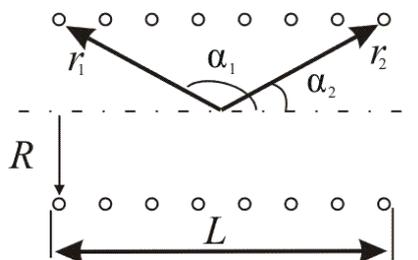


Рис. 2.21

**2.2.13. Магнитное поле** на середине оси соленоида (рис 2.21):

$$B_{\max} = \mu\mu_0 nI \frac{L}{\sqrt{4R^2 + L^2}},$$

где  $L$  – длина соленоида;  $R$  – радиус витков.

**2.2.14. Эффект Холла:** это возникновение на боковых гранях проводника с током, помещенного в поперечное магнитное поле, разности потенциалов, пропорциональной величине тока  $I$  и индукции магнитного поля  $B$  (рис 2.22).

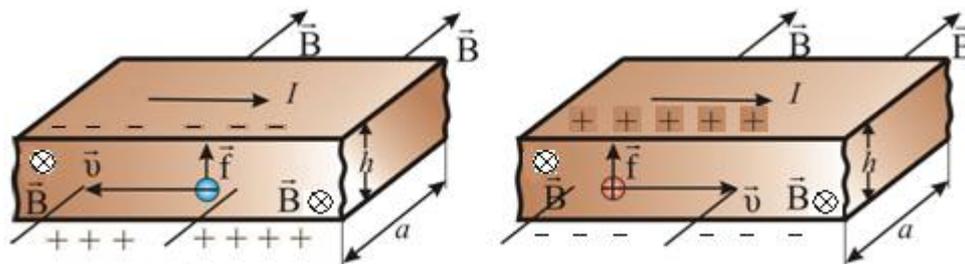


Рис. 2.22

**2.2.15. Холловская поперечная разность потенциалов** возникает при равной концентрации носителей заряда обоих знаков, если различна подвижность, т.е. дрейфовая скорость носителей заряда:

$$U_x = \frac{1}{en} \frac{IB}{a} = R \frac{IB}{a}.$$

**2.2.16. Коэффициент Холла** (константа Холла) – коэффициент пропорциональности между  $E$  и  $B$  зависящий от материала вещества.

$$R = \frac{1}{qn}.$$

**2.2.17. Число носителей заряда** – число подвижных частиц или квазичастиц, которые несут электрический заряд и способны обеспечивать протекание электрического тока.

$$n = \frac{IB}{qaU_x}.$$

### 2.3. Явление электромагнитной индукции.

Если поток вектора индукции, пронизывающий замкнутый, проводящий контур, меняется, то в контуре возникает электрический ток. Это явление называют **явлением электромагнитной индукции**, а ток – **индукционным**. При этом явление совершенно не зависит от способа изменения потока вектора магнитной индукции.

Движущиеся заряды (ток) создают магнитное поле, а движущееся магнитное поле создает (вихревое) электрическое поле.

**2.3.1. Правило Ленца:** индукционный ток всегда направлен так, что магнитное поле этого тока препятствует изменению магнитного потока, вызывающего индукционный ток.

**2.3.2. Закон фарадея:** ЭДС индукции контура равна скорости изменения потока магнитной индукции, пронизывающей этот контур:

$$\mathcal{E}_i = -\frac{d\Phi}{dt} \text{ или } \mathcal{E}_i = -\frac{d\Psi}{dt},$$

где  $\mathcal{E}$  – электродвижущая сила (ЭДС).

**2.3.3. ЭДС индукции** пропорциональна скорости изменения магнитного поля:

$$\mathcal{E}_i = -S \frac{dB}{dt}.$$

**2.3.4. Потокосцепление** (полный магнитный поток) – понятие которое используют, если контур состоит из нескольких витков  $N$ :

$$\Psi = \Phi N.$$

**2.3.5. Сторонняя сила**  $\mathcal{E}_i$  сила неэлектрического происхождения под действием которой течет ток.

Если перемещать проводник в однородном магнитном поле  $\vec{B}$ , то под действием силы Лоренца, электроны будут отклоняться вниз, а положительные заряды вверх – возникает разность потенциалов. Это и будет сторонняя сила под действием которой течет ток (рис. 2.23).

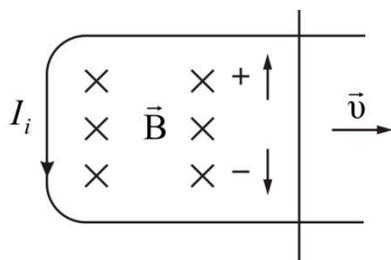


Рис. 2.23

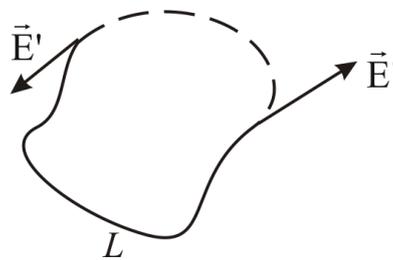


Рис. 2.24

**2.3.6. Работа по перемещению заряда** вихревым электрическим полем (рис. 2.24):

$$A = q \oint_L \vec{E}' d\vec{l} = q\mathcal{E}_i.$$

**2.3.7. Вихревые токи, токи Фуко** – вихревые индукционные токи, возникающие в массивных проводниках при изменении пронизывающего их магнитного потока (рис. 2.25).

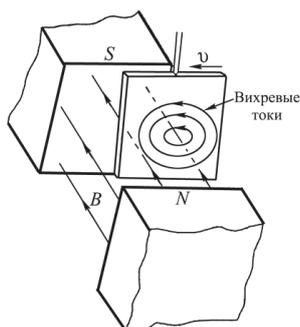


Рис. 2.25

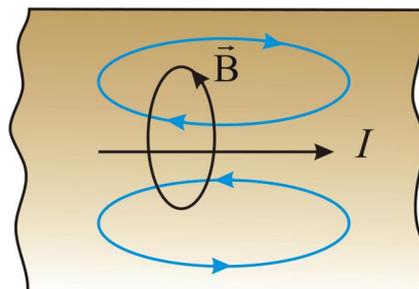


Рис. 2.26

**2.3.8. Скин-эффект** (поверхностный эффект) – эффект ослабления электромагнитных волн по мере их проникновения вглубь проводящей среды (рис. 2.26). В результате этого эффекта, например, переменный ток высокой частоты, при протекании по проводнику распределяется не равномерно по сечению, а преимущественно в *поверхностном* слое.

## 2.4 Ускорители заряженных частиц

**Ускорителями заряженных частиц** называются устройства, в которых под действием электрических и магнитных полей создаются и управляются пучки высокоэнергетических заряженных частиц (электронов, протонов, мезонов и т.д.).

Ускорители подразделяются на *непрерывные* (равномерный во времени пучок) и *импульсные* (в них частицы ускоряются порциями – импульсами). По форме траектории и механизму ускорения частиц ускорители делятся на *линейные, циклические* и *индукционные*.

**2.4.1. Линейный ускоритель.** Ускорение частиц осуществляется электростатическим полем. Заряженная частица проходит поле однократно: заряд  $q$ , проходя разность потенциалов  $\varphi_1 - \varphi_2$ , приобретает кинетическую энергию  $K = q(\varphi_1 - \varphi_2)$ . Таким способом частицы ускоряются до  $\approx 10$  МэВ. Их дальнейшее ускорение с помощью источников постоянного напряжения невозможно из-за утечки зарядов, пробоев и т.д. (рис. 2.27).

**2.4.2. Линейный резонансный ускоритель.** Ускорение заряженных частиц осуществляется переменным электрическим полем сверхвысокой частоты, синхронно изменяющимся с движением частиц. Таким способом протоны ускоряются до энергий порядка десятков мегаэлектронвольт, электроны – до десятков гигаэлектронвольт (рис. 2.28).

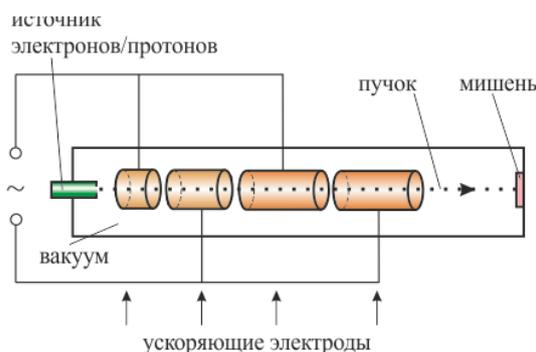


Рис. 2.27



Рис. 2.28

**2.4.3. Циклотрон** – циклический резонансный ускоритель тяжелых частиц (рис. 2.29).

Между полюсами сильного электромагнита помещается вакуумная камера, в которой находятся два электрода в виде полых металлических полуцилиндров, или дуантов (3). К дуантам приложено переменное электрическое поле (5). Магнитное поле, создаваемое электромагнитом, однородно и перпендикулярно плоскости дуантов. Если заряженную частицу ввести в центр зазора (1) между дуантами, то она, ускоряемая электрическим и отклоняемая магнитными полями, войдет в дуант и опишет полуокружность, радиус которой пропорционален скорости частицы.

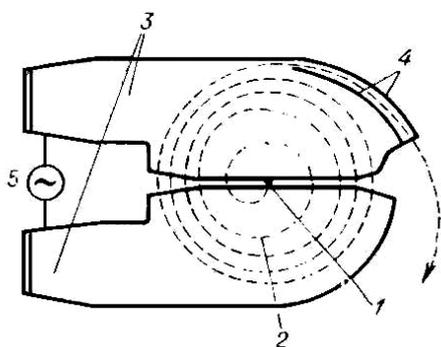


Рис. 2.29

**2.4.4. Микротрон** (электронный циклотрон) – циклический резонансный ускоритель электронов. Здесь, как и в циклотроне, и магнитное поле, и частота ускоряющего поля постоянны во времени, но резонансное условие в процессе ускорения все же сохраняется за счёт изменения кратности ускорения  $q$ . Частица вращается в микротроне в однородном магнитном поле, многократно проходя ускоряющий резонатор.

**2.4.5. Фазотрон** (синхроциклотрон) – циклический резонансный ускоритель тяжелых заряженных частиц (например, протонов, ионов,  $\alpha$ -

частиц), в котором управляющее магнитное поле постоянно, а частота ускоряющего электрического поля медленно изменяется с периодом.

**2.4.6. Синхротрон** – циклический резонансный ускоритель ультрарелятивистских электронов, в котором управляющее магнитное поле изменяется во времени, а частота ускоряющего электрического поля постоянна (рис.2.30).

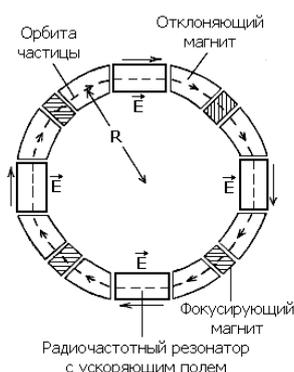


Рис. 2.30

**2.4.7. Синхрофазотрон** – циклический резонансный ускоритель тяжелых заряженных частиц (протонов, ионов), в котором объединяются свойства фазотрона и синхротрона. Здесь управляющее магнитное поле и частота ускоряющего электрического поля одновременно изменяются во времени так, чтобы радиус равновесной орбиты частиц оставался постоянным.

**2.4.8. Радиус траектории** нерелятивистской частицы:

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

**2.4.9. Период обращения** нерелятивистской частицы (частицы движущиеся со скоростью  $v < c$ ):

$$T = \frac{2\pi m}{qB}.$$

**2.4.10. Импульс релятивистской частицы:**

$$p = \frac{1}{c} \sqrt{E_k (E_k + 2m_0 c^2)},$$

где  $c$  – скорость света в вакууме;  $m_0$  – масса покоя частицы.

**2.4.11. Кинетическая энергия частицы:**

$$E_k = E - E_0 = mc^2 - m_0 c^2,$$

где  $E$  – полная энергия частицы;  $E_0$  – энергия покоя.

#### 2.4.12. Период обращения релятивистской частицы:

$$T = \frac{2\pi m}{qB\sqrt{1-v^2/c^2}} = \frac{2\pi E}{qBc^2}.$$

#### 2.4.13. Радиус окружности траектории релятивистской частицы:

$$R = \frac{m_0 v}{qB\sqrt{1-v^2/c^2}}.$$

**2.4.14. Бетатрон** – единственный циклический ускоритель (электронов) нерезонансного типа, в котором ускорение осуществляется вихревым электрическим полем (рис. 2.31). При каждом обходе контура энергия электронов увеличивается на величину  $q\mathcal{E}$ .



Рис. 2.31

**2.4.15. Энергия**, передаваемая вихревым электрическим полем единичному заряду в бетатроне:

$$\frac{mv^2}{2} = \oint_L q\vec{E}'d\vec{l} = q\mathcal{E}_i.$$

**2.4.16. Большой адронный коллайдер** (англ. *LHC, Large Hadron Collider*) является *ускорителем*, предназначенным для ускорения протонов и тяжёлых ионов. Целью проекта LHC прежде всего является открытие бозона Хиггса — важнейшей из экспериментально не найденных частиц Стандартной Модели (СМ). Также большое внимание планируется уделить исследованиям свойств  $W$  и  $Z$ -бозонов, ядерным взаимодействиям при сверхвысоких энергиях, процессам рождения и распадов тяжёлых кварков ( $b$  и  $t$ ).

Коллайдер состоит из 5-ти ступеней, каждая из которых придает протонам дополнительную скорость (рис. 2.32, 2.33).

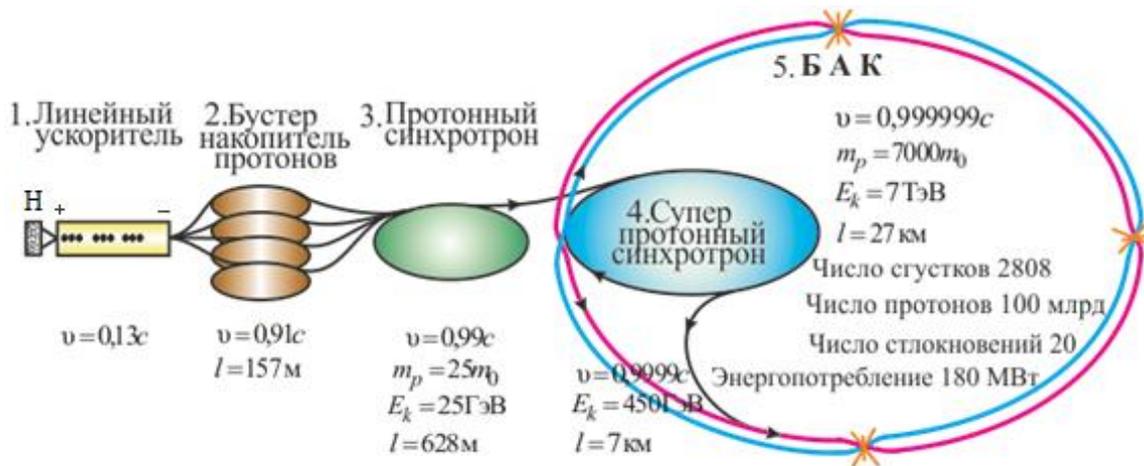


Рис.2.32

В ускорителе предполагается сталкивать протоны (рис. 2.34) с суммарной энергией 14 ТэВ (или  $14 \times 10^{12}$  электронвольт) в системе центра масс налетающих частиц, а также ядра свинца с энергией 5,5 ГэВ ( $5,5 \times 10^9$  электронвольт) на каждую пару сталкивающихся нуклонов.

Светимость БАК составит  $10^{29}$  частиц/см<sup>2</sup>·с и будет постепенно повышаться до номинальной  $1,7 \times 10^{34}$  частиц/см<sup>2</sup>·с.

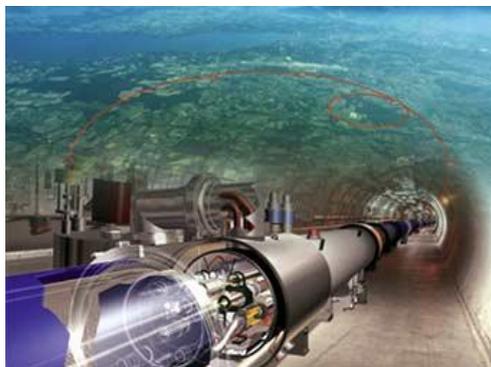


Рис. 2.33

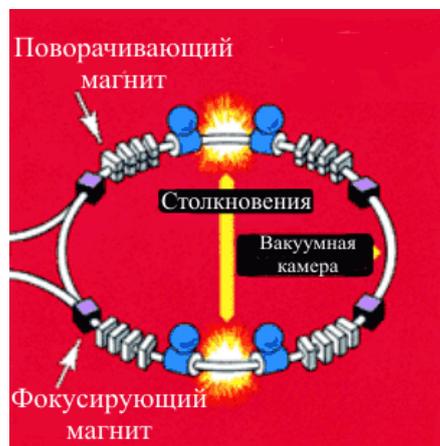


Рис. 2.34

## 2.5. Самоиндукция и взаимная индукция

При изменении тока в контуре изменяется магнитный поток, пронизывающий этот же контур или соседний контур. ЭДС индукции, возникающая в самом же контуре, называется ЭДС **самоиндукции**, а само явление – **самоиндукция**. Если же ЭДС индукции возникает в соседнем контуре, то говорят о явлении **взаимной индукции**.

Ток, текущий в любом контуре, создает магнитный поток  $\Phi$ , пронизывающий этот же контур. При изменении  $I$  будет изменяться  $\Phi$ , следовательно, в контуре будет наводиться ЭДС индукции.

**2.5.1. Магнитный поток  $\Phi$ ,** пронизывающий контур или катушку с током, пропорционален силе тока  $I$ :

$$\Phi = LI.$$

Коэффициент пропорциональности  $L$  в этой формуле называется коэффициентом самоиндукции или **индуктивностью катушки**.

**2.5.2. Соленоид** – тонкий провод, намотанный плотно виток к витку на цилиндрический каркас. Можно представить соленоид в виде системы одинаковых круговых токов с общей прямой осью (рис.2.12).

**2.5.3. Индуктивность соленоида:**

$$L_{\text{сол}} = \mu\mu_0 n^2 l S,$$

где  $n$  – число витков на единицу длины соленоида,  $l$  – длина соленоида,  $S$  – его диаметр.

**2.5.4. Индуктивность бесконечно длинного соленоида,** имеющего  $N$  витков (рис.2.12):

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

**2.5.5. ЭДС самоиндукции контура** – это ЭДС индукции, возникающая в самом контуре:

$$\mathcal{E}_i = -L \frac{dI}{dt},$$

где  $L$  – индуктивность контура.

**2.5.6. Влияние самоиндукции на ток:** в соответствии с правилом Ленца, токи возникающие в цепях в следствии самоиндукции всегда направлены так чтобы препятствовать изменению тока, текущего в цепи. Это приводит к тому, что при замыкании ключа  $K$  установление тока  $I_2$  в цепи, содержащей индуктивность  $L$ , будет происходить не мгновенно, а постепенно (рис. 2.35).

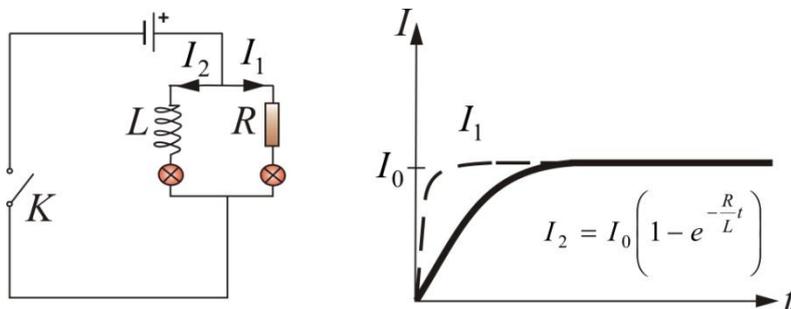


Рис. 2.35

- При замыкании цепи  $I = I_0 \left( 1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) \right)$ ;
- При размыкании цепи  $I = I_0 \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right)$ .

**2.5.7. Постоянная времени цепи** – это промежуток времени, в течение которого свободная составляющая тока убывает в  $e$  раз:

$$\tau = \frac{L}{R},$$

где  $R$  – активное сопротивление.

**2.5.8. Трансформатор** – электрический аппарат, имеющий две или более индуктивно связанные обмотки и предназначенный для преобразования посредством электромагнитной индукции одной или нескольких систем переменного тока в одну или несколько других систем переменного тока (рис. 2.36).

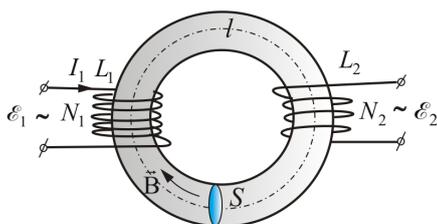


Рис. 2.36

**2.5.9. Коэффициент трансформации:**

$$k = \frac{\mathcal{E}_2}{\mathcal{E}_1} = \frac{N_2}{N_1}.$$

**2.5.10. Работа в цепи с изменяющимся током:**

$$dA = \mathcal{E}_i Idt.$$

**2.5.11. Энергия проводника с током  $I$  и индуктивностью  $L$ :**

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

**2.5.12. Энергия магнитного поля.** Подобно тому, как в заряженном конденсаторе имеется запас электрической энергии, в катушке, по виткам которой протекает ток, имеется запас магнитной энергии.

$$W = \frac{\mu\mu_0 H^2}{2} V.$$

Если включить электрическую лампу параллельно катушке с большой индуктивностью в электрическую цепь постоянного тока, то при размыкании ключа наблюдается кратковременная вспышка лампы. Ток в цепи возникает под действием ЭДС самоиндукции. Источником энергии, выделяющейся при этом в электрической цепи, является магнитное поле катушки (рис. 2.37).

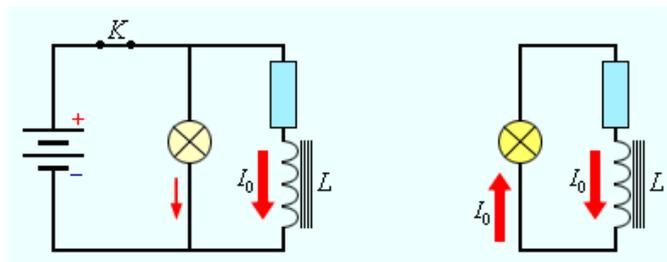


Рис. 2.37

**2.5.13. Плотность энергии магнитного поля:** физическая величина, равная отношению энергии магнитного поля в некотором объеме к величине этого объема:

$$w = \frac{W}{V} = \frac{\mu\mu_0 H^2}{2} = \frac{B^2}{2\mu\mu_0} = \frac{BH}{2}.$$

**2.5.14. Объемная плотность энергии однородного магнитного поля в вакууме:**

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

**2.5.15. Энергия магнитного поля в длинном соленоиде:**

$$W = \frac{1}{2} \mu\mu_0 n^2 I^2 V.$$

**2.5.16. Плотность энергии в длинном соленоиде:**

$$w = \frac{1}{2} \mu\mu_0 n^2 I^2.$$

## 2.6. Магнитные свойства вещества

Все известные вещества проявляют в магнитном поле магнитные свойства и называются, поэтому – магнетиками. Разнообразие типов магнетиков обусловлено различием магнитных свойств атомов (молекул), образующих вещество, особенностями их взаимодействия, фазовыми состояниями вещества и другими факторами. Магнитные свойства атомов определяются орбитальным движением электронов вокруг ядра (орби-

тальный магнитный момент электрона –  $\vec{P}_{mL}$ ) и вращением электрона вокруг собственной оси (спиновый магнитный момент электрона –  $\vec{P}_{mS}$ ).

Зависимость намагниченности вещества от напряженности магнитного поля показана на рис. 2.38.

**2.6.1. Намагниченность  $\vec{J}$**  – количественная характеристика намагниченного состояния вещества – векторная величина равная отношению магнитного момента малого объема вещества к величине этого объема:

$$\vec{J} = \frac{1}{\Delta V} \sum_{i=1}^n \vec{P}_{mi},$$

где  $\vec{P}_{mi}$  – магнитный момент  $i$ -го атома из числа  $n$  атомов, в объеме  $\Delta V$ .

**2.6.2. Связь напряженности магнитного поля с намагниченностью:**

$$\vec{H} = \frac{\vec{B}}{\mu_0} - \vec{J}.$$

Зависимость намагниченности вещества от напряженности магнитного поля показана на рис.2.38.

**2.6.3. Циркуляция вектора напряженности:**

$$\oint_L \vec{H} d\vec{l} = I_{\text{макро}}.$$

**2.6.4. Связь магнитной индукции с напряженностью магнитного поля, созданного макро и микро-токами:**

$$B = \mu_0 H + \mu_0 \kappa H$$

$$B = \mu_0 H (1 + \kappa).$$

**2.6.5. Связь намагниченности с напряженностью:**

$$\vec{J} = \vec{H} \kappa.$$

**2.6.6. Магнитная восприимчивость среды:**

$$\kappa = \mu - 1.$$

**2.6.7. Парамагнетики** – это вещества, атомы которых имеют, в отсутствии внешнего магнитного поля, отличный от нуля магнитный момент (рис. 2.38):

$$\kappa > 0, \quad \mu = \frac{B}{B_0} > 1.$$

**2.6.8. Диамагнетики** – это вещества, магнитные моменты атомов которых в отсутствии внешнего поля равны нулю, т.к. магнитные моменты всех электронов атома взаимно скомпенсированы (рис. 2.38):

$$\kappa < 0, \quad \mu = \frac{B}{B_0} < 1.$$

**2.6.9. Ферромагнетики** – это вещества, обладающие самопроизвольной намагниченностью, которая сильно изменяется под влиянием внешних воздействий – магнитного поля, деформации, температуры (рис. 2.34):

$$\kappa \gg 0, \quad \mu = \frac{B}{B_0} \gg 1.$$

**2.6.10. Петля гистерезиса** – зависимость намагниченности вещества  $J$  от напряженности магнитного поля  $H$  (рис. 2.39).

Намагниченность  $J_S$  при  $H = H_S$  называется **намагниченностью насыщения**. Намагниченность  $\pm J_R$  при  $H = 0$  называется **остаточной намагниченностью**.

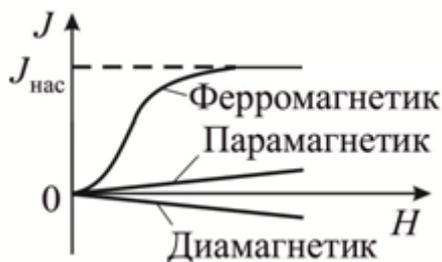


Рис. 2.38

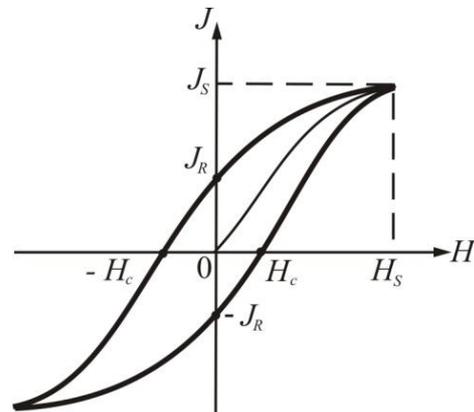


Рис. 2.39

**2.6.11. Коэрцитивная сила** – напряженность  $\pm H_c$  магнитного поля, необходимая для полного размагничивания ферромагнетика. Она характеризует способность ферромагнетика сохранять намагниченное состояние.

**2.6.12. Домены** – области спонтанного намагничивания ( $10^{-2} \div 10^{-3}$  см), в рамках которых магнитный момент имеет одно направление.

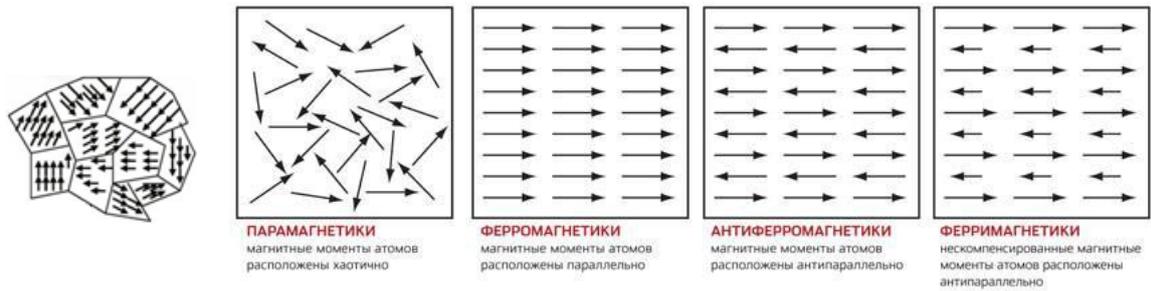


Рис. 2.40

Векторы намагниченности доменов в отсутствие внешнего магнитного поля ориентированы таким образом, что полный магнитный момент ферромагнитного материала равен нулю (рис.2.41 г). При помещении ферромагнетика в магнитное поле и увеличение этого поля весь кристалл превращается в один большой домен ориентированный по полю (рис. 2.41 а).

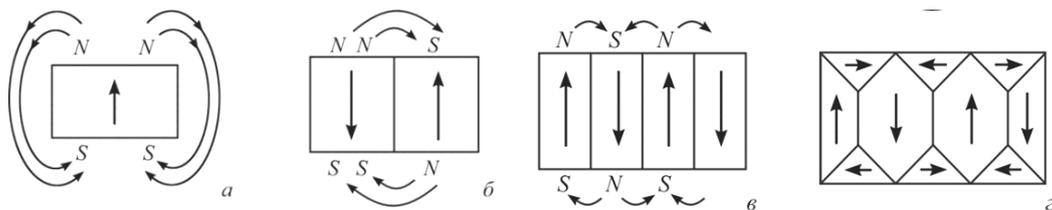


Рис. 2.41

**2.6.13. Магнитные свойства вещества:** определяются магнитными свойствами электронов и атомов.

**2.6.14. Частота вращения** электрона на орбите:

$$\nu = \frac{1}{T} = \frac{v}{2\pi r}$$

**2.6.15. Орбитальный ток** – искусственно созданная величина.

Магнетики состоят из атомов, которые, в свою очередь, состоят из положительных ядер и, условно говоря, вращающихся вокруг них электронов. Электрон, движущийся по орбите в атоме, эквивалентен замкнутому контуру с **орбитальным током** (рис. 2.42, 2,43):

$$I = e\nu,$$

где  $e$  – заряд электрона,  $\nu$  – частота его вращения по орбите.

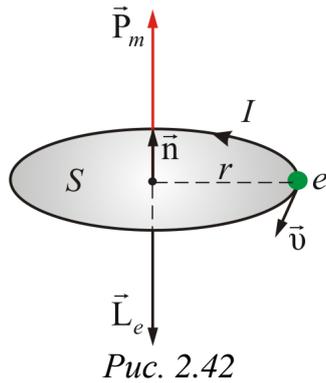


Рис. 2.42

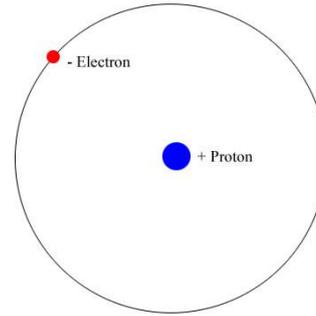


Рис. 2.43

**2.6.16. Орбитальный магнитный момент электрона:**

$$\vec{P}_m = IS\vec{n} = \frac{e\vec{v}}{2\pi r},$$

где  $S$  – площадь орбиты;  $\vec{n}$  – единичный вектор нормали к  $S$ ;  $\vec{v}$  – скорость электрона.

**2.6.17. Орбитальный момент импульса электрона** – это момент импульса электрона, движущегося по орбите, который направлен противоположно по отношению к магнитному моменту  $P_m$  (рис. 2.42):

$$\vec{L}_e = m\vec{v}r.$$

**2.6.18. Связь магнитного момента с моментом импульса электрона:**

$$\vec{P}_m = \gamma\vec{L}_e.$$

**2.6.19. Гиромангнитное отношение** – коэффициент пропорциональности отношения орбитальных моментов:

$$\gamma = -\frac{e}{2m}.$$

**2.6.20. Спин электрона** – собственный момент импульса электрона В современном представлении – спин, как заряд и масса, есть свойство электрона (рис. 2.44):

$$L_s = \frac{\sqrt{3}}{2}\hbar.$$

**2.6.21. Спиновый магнитный момент электрона:**

$$\vec{P}_{ms} = \gamma_s\vec{L}_s.$$

**2.6.22. Гиромангнитное отношение спиновых моментов:**

$$\gamma_s = -\frac{e}{m}.$$

**2.6.23. Квантовый магнитный момент электрона (магнетон Бора):**

$$\mu_B = \pm \frac{e\hbar}{2m}.$$

**2.6.24. Орбитальный магнитный момент атома** – это геометрическая сумма орбитальных магнитных моментов всех электронов атома:

$$\vec{P}_m = \sum_{i=1}^Z \vec{P}_{mi},$$

где  $Z$  – число всех электронов в атоме – порядковый номер элемента в периодической системе Менделеева.

**2.6.25. Орбитальным моментом импульса атома** – называется геометрическая сумма моментов импульсов всех электронов атома:

$$\vec{L} = \sum_{i=1}^Z \vec{L}_{ei}.$$

**2.6.26. Момент сил действующий на электрон при внесении атома в магнитное поле с индукцией  $B$**

$$\vec{M} = [\vec{P}_m, \vec{B}].$$

**2.6.27. Ларморовская прецессия** – прецессионное движение электрона и его орбитального момента при внесении атома в магнитное поле (рис.2.44).

**2.6.28. Угловая скорость ларморовской прецессии** зависит только от индукции магнитного поля и совпадает с ней по направлению:

$$\omega_L = \frac{e}{2m} \vec{B}.$$

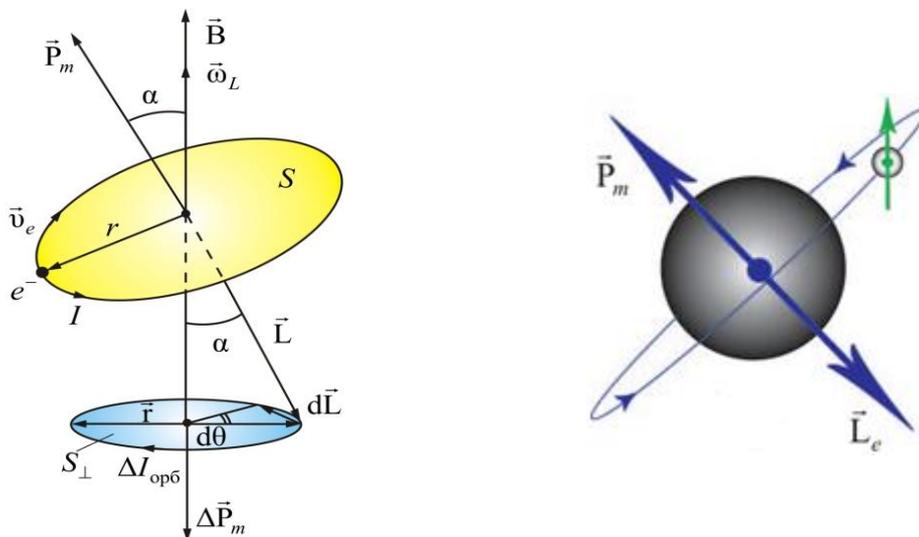


Рис. 2.44

**2.6.29. Теорема Лармора:** *единственным результатом влияния магнитного поля на орбиту электрона в атоме является прецессия орбиты и вектора  $\vec{P}_m$  – орбитального магнитного момента электрона с угловой скоростью  $\omega_L$  вокруг оси, проходящей через ядро атома, параллельно вектору индукции магнитного поля.*

## 2.7. Уравнения Максвелла

**Теория Максвелла** это стройная, последовательная теория единого электромагнитного поля (ЭМП), создаваемого произвольной системой зарядов и токов. В этой теории решается основная задача электродинамики – по заданному распределению зарядов и токов отыскиваются характеристики электрического и магнитного полей.

Эта теория явилась обобщением важнейших законов, описывающих электрические и магнитные явления (аналогично уравнениям Ньютона и началам термодинамики).

Максвелл сделал вывод: всякое переменное электрическое поле порождает переменное магнитное поле. Токи проводимости в проводнике замыкаются токами смещения в диэлектрике или в вакууме. Переменное электрическое поле в конденсаторе создает такое же магнитное поле, как если бы между обкладками существовал ток проводимости, имеющий величину, равную току в металлическом проводнике.

**2.7.1. Закон полного тока** для магнитного поля в веществе – циркуляция вектора напряженности магнитного поля  $\vec{H}$  вдоль произвольно замкнутого контура  $L$  равна алгебраической сумме макротоков сквозь поверхность, натянутую на этот контур:

- в интегральной форме: 
$$\oint_L \vec{H} d\vec{l} = (I_{\text{макро}} + I_{\text{микро}});$$

- в дифференциальной форме: 
$$\text{rot} \vec{H} = \vec{J}_{\text{макро}},$$

где  $I_{\text{макро}}$  и  $I_{\text{микро}}$  – алгебраическая сумма макротоков (токи проводимости и конвекционные токи, связанные с движением заряженных макроскопических тел) и микротоков (токи, обусловленные движением электронов в атомах, молекулах и ионах) сквозь поверхность, натянутую на замкнутый контур  $L$ .

**2.7.2. Ток смещения:** если в каком – либо проводнике течет переменный ток – *ток проводимости*, то внутри есть и переменное электрическое поле, т.е. *ток смещения*.

**2.7.3. Полный ток**, определяющий магнитное поле в веществе:

$$\vec{j}_{\text{полн}} = \vec{j}_{\text{пров}} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} = \vec{j}_{\text{пров}} + \vec{j}_{\text{см}},$$

где  $\vec{D}$  – вектор электрического смещения. В зависимости от электропроводности среды и частоты (поля) оба слагаемых играют разную роль:

- в металлах и на низких частотах  $j_{\text{пров}} \gg j_{\text{см}}$  (в скин-эффекте  $j_{\text{см}}$  не играет заметной роли);
- в диэлектриках и на высоких частотах  $j_{\text{см}}$  играет основную роль.

#### 2.7.4. Плотность тока смещения:

$$\vec{j}_{\text{см}} = \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} = \varepsilon_0 \frac{\partial E}{\partial t} + \frac{\partial P}{\partial t},$$

где  $\varepsilon_0 \partial E / \partial t$  – плотность тока смещения в вакууме;  $\partial P / \partial t$  – плотность тока поляризации. Вихревое магнитное поле ( $\vec{B}$ ), образующееся при протекании тока смещения, связано с направлением вектора  $\partial \vec{D} / \partial t$  **правилом правого винта** (рис 2.45)

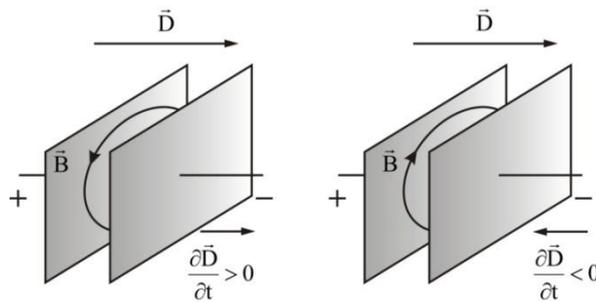


Рис. 2.45

**2.7.5. Теория Максвелла** – теория классической электродинамики описывающая электромагнитное поле и его связь с электрическими зарядами и токами.

- В теории Максвелла рассматриваются макроскопические поля, которые создаются макрочарядами и макротоками. Расстояния от источников полей до рассматриваемых точек много больше размеров атомов. Периоды изменения переменных электрических и магнитных полей много больше периодов внутренних процессов.
- Теория Максвелла имеет феноменологический характер. В ней не рассматривается внутренний механизм явлений в среде. Среда описывается с помощью трёх величин  $\varepsilon$ ,  $\mu$  и  $\sigma$ .

- Теория Максвелла является теорией близкодействия, согласно которой электрические и магнитные взаимодействия, происходящие в электрических и магнитных полях и распространяются с конечной скоростью, равной скорости света в данной среде.

### 2.7.6. Полная система уравнений Максвелла:

№	Название	Дифференциальная форма	Интегральная форма	Физический смысл
1	Закон индукции Фарадея	$\text{rot}\vec{E} = -\frac{\partial\vec{B}}{\partial t}$	$\oint_L \vec{E}d\vec{l} = -\oint_S \frac{\partial\vec{B}}{\partial t} d\vec{S}$	Вихревое электрическое поле порождается изменением магнитной индукции и наоборот
2	Обобщенный закон Био – Саварра – Лапласа	$\text{rot}\vec{H} = \vec{j} + \frac{\partial\vec{D}}{\partial t}$	$\oint_L \vec{H}d\vec{l} = I_{\text{encl}} + \oint_S \frac{\partial\vec{D}}{\partial t} d\vec{S}$	Вихревое магнитное поле порождается электрическим током и изменением электрической индукции
3	Теорема Гаусса для вектора $\vec{D}$	$\text{div}\vec{D} = \rho$	$\oint_S \vec{D}d\vec{S} = q_{\text{encl}}$	Электрический заряд является источником электростатического поля
4	Теорема Гаусса для вектора $\vec{B}$	$\text{div}\vec{B} = 0$	$\oint_S \vec{B}d\vec{S} = 0$	Магнитная индукция не расходится (нет магнитных зарядов)
5	Электростатическая индукция	$\vec{D} = \epsilon_0\epsilon\vec{E}$	Связь электрической индукции с напряженностью электростатического поля	
6	Магнитная индукция	$\vec{B} = \mu_0\mu\vec{H}$	Связь магнитной индукции с напряженностью магнитного поля	
7	Плотность тока	$\vec{j} = \sigma\vec{E}$	Связь плотности тока с напряженностью электростат. поля (Закон Ома в диф. форме)	

**2.7.7. Уравнения состояния** или материальные уравнения (определяются электрическими и магнитными свойствами среды):

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

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

$$\vec{j} = \sigma \vec{E} + \vec{j}_{\text{стр}},$$

где  $\sigma$  – удельная проводимость,  $\vec{j}_{\text{стр}}$  – плотность сторонних токов.

**2.7.8. Электромагнитная волна** – процесс распространения электромагнитного поля в пространстве (рис. 2.46). Скорость ЭМП в вакууме:

$$v = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}} = c.$$

При распространении ЭМП в среде:

$$v = \frac{1}{\sqrt{\epsilon \epsilon_0 \mu \mu_0}} = \frac{c}{\sqrt{\epsilon \mu}},$$

а т.к. в среде  $\epsilon > 1$  и  $\mu > 1$ , то *всегда скорость света в среде меньше скорости света в вакууме  $v < c$ .*

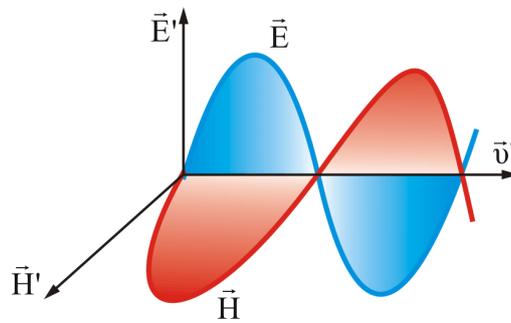


Рис. 2.46

**2.7.9. Дифференциальные уравнения ЭМВ**, распространяющихся вдоль оси  $x$  со скоростью  $v$ :

$$\frac{\partial^2 E_y}{\partial x^2} = \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 E_y}{\partial t^2} \quad \text{и} \quad \frac{\partial^2 H_z}{\partial x^2} = \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 H_z}{\partial t^2},$$

где,  $y$  и  $z$  при  $E$  и  $H$  подчеркивают лишь то, что векторы  $\vec{E}$  и  $\vec{H}$  направлены вдоль взаимно перпендикулярных осей  $y$  и  $z$ .

**2.7.10. Уравнения плоских монохроматических электромагнитных волн:**

$$E_y = E_0 \cos(\omega t - kx) \quad \text{и} \quad H_z = H_0 \cos(\omega t - kx),$$

где  $E_0$  и  $H_0$  – соответственно амплитуды напряженностей электрического и магнитного полей волны.

## Характеристики магнитного поля

Характеристики магнитного поля	Формулы и обозначения
Ток	$I$
Магнитная постоянная	$\mu_0$
Магнитная проницаемость	$\mu$
Магнитная восприимчивость	$\kappa = \mu - 1$
Взаимодействие токов	$F = \frac{\mu_0 \mu}{4\pi} \frac{2I_1 I_2}{r}$
Магнитная индукция	$\vec{B} = \frac{\vec{M}_{\max}}{\vec{P}_m}$
Закон Ампера (векторно)	$\vec{F} = I [\vec{l}, \vec{B}]$
Закон Ампера (скалярно)	$F = IlB \sin(\vec{l}, \vec{B})$
Сила Лоренса (векторно)	$\vec{F}_L = q [\vec{v}, \vec{B}]$
Сила Лоренса (скалярно)	$F_L = qvB \sin \alpha$
Напряженность магнитного поля	$\vec{H} = \frac{\vec{B}}{\mu_0 \mu}$
Принцип суперпозиции	$\vec{B} = \sum \vec{B}_i$
Намагниченность	$\vec{J} = \kappa \vec{H}$
Индуктивность катушки	$L = \frac{\Phi}{I} = \mu_0 \mu S l$
Энергия катушки с током	$W = \frac{LI^2}{2} = \frac{\Phi^2}{2L}$
Объемная плотность энергии	$w = \frac{BH}{2} = \frac{\mu_0 H^2}{2}$
Циркуляция $\vec{B}$	$\oint_L H = I_{\text{полн}}$
Теорема Гаусса	$\Phi_B = \oint_S \vec{B} d\vec{S} = 0$
Магнитное поле создается токами	$\text{rot} \vec{H} = \vec{j}_{\text{полн}}$
Магнитное поле – вихревое поле	$\text{div} \vec{B} = \nabla \vec{B} = 0$

### 3. ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ КОЛЕБАНИЯ И ВОЛНЫ

#### 3.1. Электрические колебания

**Электрические колебания** – электромагнитные колебания в квазистационарных цепях, размеры которых малы по сравнению с длиной электромагнитной волны. Это позволяет не учитывать волнового характера процессов и описывать их как колебания электрических зарядов  $q$  (в ёмкостных элементах цепи).

**3.1.1. Переменный ток** – электрический ток, изменяющийся во времени:

$$I = I_0 \sin \omega t .$$

**3.1.2. Напряжение:**

$$U = I_0 R \sin \omega t$$

**3.1.3. Сопротивление  $R$  в цепи переменного тока** (рис. 3.14):

Векторные диаграммы тока и напряжения показаны на рис 3.15. *Колебания тока происходят в одной фазе с напряжением.*

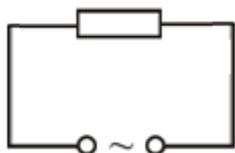


Рис. 3.14

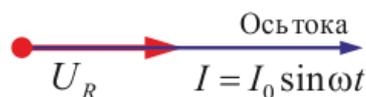


Рис. 3.15

$$I = I_0 \sin \omega t$$

$$U = I_0 R \sin \omega t = U_0 \sin \omega t$$

**3.1.4. Емкость  $C$  в цепи переменного тока** (рис. 3.16)

Векторные диаграммы тока и напряжения показаны на рис 3.17. *Амплитуда напряжения на конденсаторе отстает по фазе от амплитуды тока на  $\pi/2$ .*

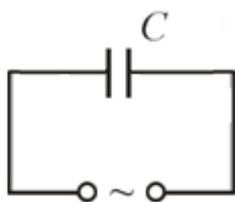


Рис. 3.16

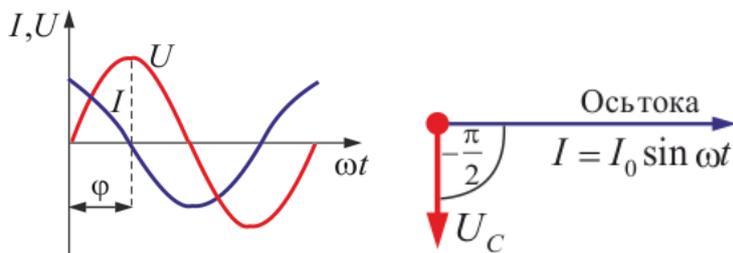


Рис. 3.17

- реактивное индуктивное сопротивление:  $R_L = L\omega$ ;
- изменение напряжения:  $U_L = I_0 R_L \sin(\omega t + \pi/2)$ ;
- ток:  $I = I_0 \sin \omega t$ .

### 3.1.5. Индуктивность $C$ в цепи переменного тока (рис. 3.18).

Векторные диаграммы тока и напряжения показаны на рис 3.19.

Амплитуда напряжения на индуктивности  $U_L = IR_L$  опережает по фазе амплитуду тока на  $\pi/2$ .

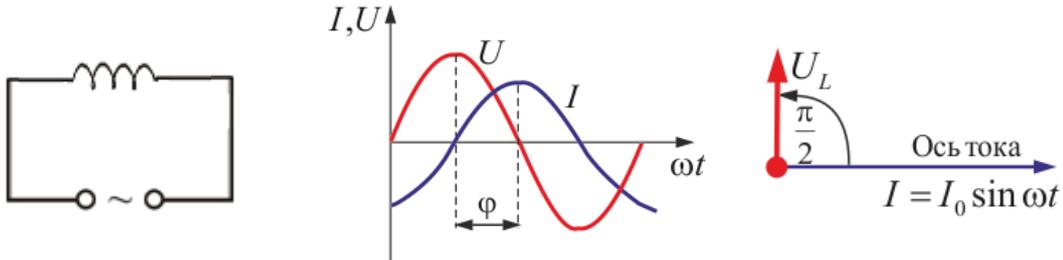


Рис. 3.18

Рис. 3.19

- реактивное индуктивное сопротивление:  $R_L = L\omega$ ;
- изменение напряжения:  $U_L = I_0 R_L \sin(\omega t + \pi/2)$ ;
- ток:  $I = I_0 \sin \omega t$ .

### 3.1.6. Сопротивление, емкость и индуктивность в цепи переменного тока (рис 3.20).

Общее напряжение  $U = U_R + U_C + U_L$ . Так как  $U_R, U_C, U_L$  отличаются по фазе, то складывать их надо при помощи векторной диаграммы (рис 3.21).

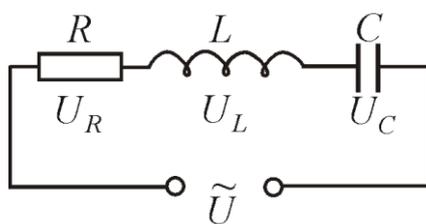


Рис. 3.20

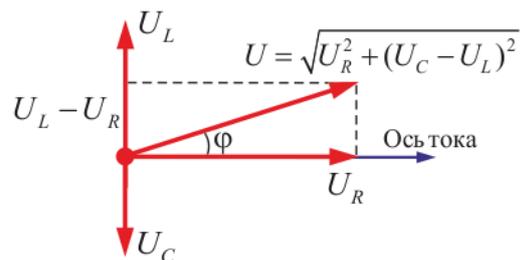


Рис. 3.21

- Полное сопротивление цепи (комплексное сопротивление)  $Z$ ;
- изменение напряжения  $U = IZ$  закон Ома для переменных токов;
- ток:  $I = I_0 \sin \omega t$ .

### 3.1.7. Полное сопротивление цепи или импеданс – представляет комплексное сопротивление для гармонических процессов (рис. 3.22):

$$Z = R + iX ,$$

где  $R$  – активное сопротивление, отвечающее за потерю мощности в цепи,  $X$  – реактивное сопротивление, определяющие величину энергии пульсирующей в цепи с частотой  $2\omega$ .

$$Z = \frac{U_0}{I_0} = \sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2}.$$

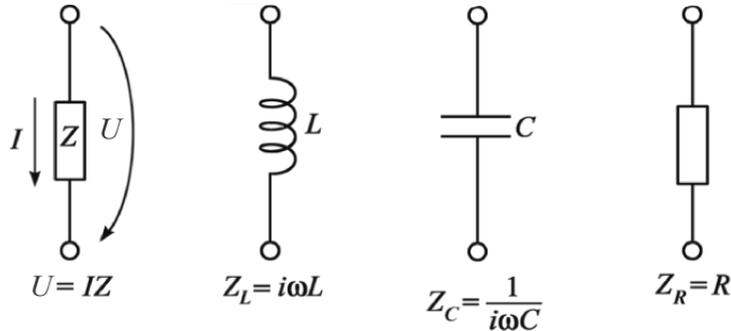


Рис. 3.22

### 3.1.8. Реактивное сопротивление:

$$X = R_L - R_C = \omega L - \frac{1}{\omega C}.$$

### 3.1.9. Закон Ома для цепи переменного тока:

$$U_0 = I_0 \sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2}.$$

### 3.1.10. Закон Ома в комплексной форме:

$$I = \frac{\mathcal{E}}{Z} = \frac{\mathcal{E}}{R + i\left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)}.$$

**3.1.11. Дифференциальное уравнение свободных (незатухающих) колебаний в контуре (рис. 3.23):**

$$\frac{d^2 q}{dt^2} + \omega_0^2 q = 0;$$

- решение уравнения:

$$q = q_m \cos(\omega_0 t + \varphi).$$

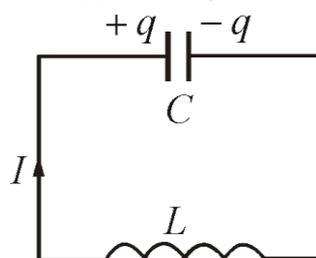


Рис. 3.23

### 3.1.12. Собственная частота контура:

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}.$$

**3.1.13. Формула Томсона** – формула, выражающая зависимость периода незатухающих собственных колебаний, возникающих в колебательном контуре, от индуктивности и емкости этого контура:

$$T = 2\pi\sqrt{LC}.$$

### 3.1.14. Закон Ома для контура:

$$U_m = I_m \sqrt{\frac{L}{C}}.$$

**3.1.15. Затухающие колебания.** В реальном колебательном контуре свободные электромагнитные колебания будут затухающими из-за потерь энергии на нагревание проводов (рис. 3.24). На рис. 3.25 показан вид затухающих колебаний заряда  $q$  и силы тока  $I$ .

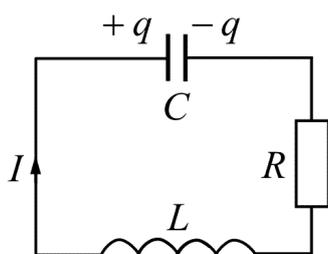


Рис. 3.24

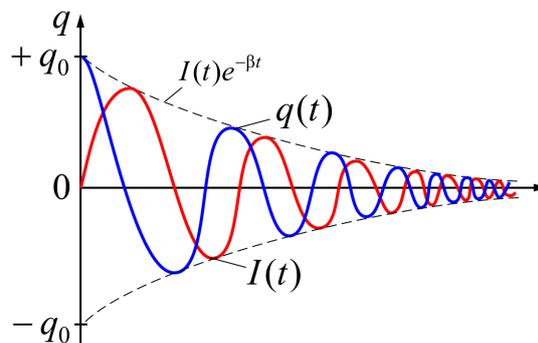


Рис. 3.25

### 3.1.16. Уравнение затухающих колебаний в колебательном контуре:

$$\frac{d^2q}{dt^2} + 2\beta \frac{dq}{dt} + \omega_0^2 q = 0;$$

- решение уравнения:

$$q = q_0 \exp(-\beta t) \cos(\omega t + \varphi).$$

### 3.1.17. Частота затухающих колебаний контура:

$$\omega = \sqrt{\omega_0^2 - \beta^2} = \sqrt{\frac{1}{LC} - \frac{R^2}{4L^2}},$$

где  $\beta = \frac{R}{2L}$  – коэффициент затухания.

**3.1.18. Логарифмический декремент затухания** – безразмерная характеристика затухающих колебаний, измеряемая натуральным логарифмом отношения двух последовательных максимальных отклонений колеблющейся величины в одну и ту же сторону:

$$\chi = \ln \frac{A(t)}{A(t+T)} = \beta T = \frac{\pi R}{L\omega} = \pi R \sqrt{\frac{C}{L}}.$$

**3.1.19. Добротность контура** – характеристика колебательной системы, определяющая остроту резонанса и показывающая, во сколько раз запасы энергии в реактивных элементах контура больше, чем потери энергии на активных элементах за один период колебаний:

$$Q = 2\pi \frac{W}{\Delta W} = \frac{\pi}{\chi} = \pi N_e.$$

Чем выше добротность контура, тем больше система совершит колебаний, прежде чем амплитуда колебаний уменьшится в  $e$  раз.

**3.1.20. Число колебаний за время затухания:**

$$N_e = \frac{\tau}{T} = \frac{1}{\beta T},$$

где  $\tau = 1/\beta$  – время затухания.

**3.1.21. Аперриодический процесс** (рис. 3.26) происходит при

$$\beta^2 \geq \omega_0^2, \text{ т.е. при } \frac{R^2}{4L^2} \geq \frac{1}{LC}$$

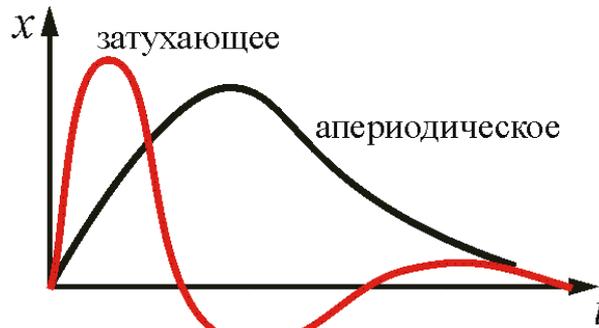


Рис. 3.26

**3.1.22. Критическое сопротивление** – сопротивление контура, при котором колебательный процесс переходит в аперриодический:

$$R_k = 2\sqrt{\frac{L}{C}} = 2R_{\text{вол}},$$

где  $R_{\text{вол}}$  – волновое сопротивление, определяемое параметрами  $L$  и  $C$ .

**3.1.23. Вынужденными электромагнитными колебаниями** называют периодические изменения силы тока и напряжения в электрической цепи, происходящие под действием переменной ЭДС от внешнего источника. Внешним источником ЭДС в электрических цепях являются генераторы переменного тока, работающие на электростанциях.

**3.1.24. Дифференциальное уравнение вынужденных колебаний:**

$$\frac{d^2x}{dt^2} + 2\beta \frac{dx}{dt} + \omega_0^2 x = \frac{U_m}{L} \cos \omega t ;$$

- решение данного уравнения:

$$q = q_m \cos(\omega t + \varphi).$$

### 3.1.25. Амплитуда колебаний заряда:

$$q_m = \frac{U_m}{\omega \sqrt{R^2 + (R_L - R_C)^2}}.$$

**3.1.26. Последовательный резонанс** или резонанс напряжений (рис. 3.27) наблюдается когда:

$$\omega L = \frac{1}{\omega C}.$$

### 3.1.27. Резонансная частота при последовательном резонансе:

$$\omega_{\text{рез}} = \sqrt{\omega_0^2 - 2\beta^2}.$$

### 3.1.28. Параллельный резонанс

 или резонанс токов (рис. 3.28):

$$\omega = \omega_{\text{рез}} = \frac{1}{\sqrt{LC}}.$$

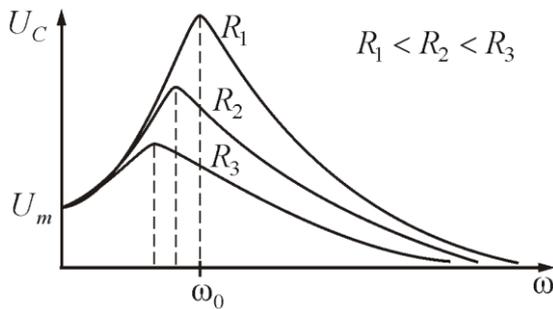


Рис. 3.27

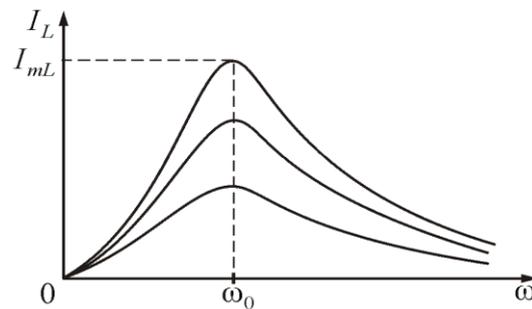


Рис. 3.28

### 3.1.29. Работа переменного тока за dt:

$$A = P_t dt = U_m I_m \sin \omega t dt ,$$

где  $I_m$  и  $U_m$  – амплитудные значения силы тока и напряжения.

### 3.1.30. Работа за период T:

$$A = \frac{1}{2} I_m U_m T .$$

### 3.1.31. Средняя мощность:

$$\langle P \rangle = I_m U_m = \frac{1}{2} R I_m^2 .$$

### 3.1.32. Действующие (эффективные) значения тока и напряжения:

$$I = \frac{I_m}{\sqrt{2}}; \quad U = \frac{U_m}{\sqrt{2}}.$$

## 3.2. Электромагнитные волны

Из теории Максвелла следует, что изменяющееся электрическое поле порождает в пустом пространстве магнитное поле. Изменяющееся магнитное поле приводит, в свою очередь, к появлению изменяющегося электрического поля и т.д. Анализируя свои уравнения, Максвелл пришел к заключению, что конечным итогом подобной связи изменяющихся полей будет появление волны, которая содержит электрическое и магнитное поля и способна распространяться в пустом пространстве.

Впервые электромагнитные волны были обнаружены и исследованы в 1887 г. Генрихом Герцем, который в качестве источника электромагнитных колебаний использовал колебательный контур.

### 3.2.1. Дифференциальное уравнение электромагнитных волн:

$$\nabla^2 \vec{E} = \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2}; \quad \nabla^2 \vec{H} = \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 \vec{H}}{\partial t^2};$$

- решения данных уравнений:

$$E_y = E_0 \cos(\omega t - kr); \quad H_z = H_0 \cos(\omega t - kr),$$

где  $\vec{E}$  и  $\vec{H}$  – вектор напряженности электромагнитного поля.

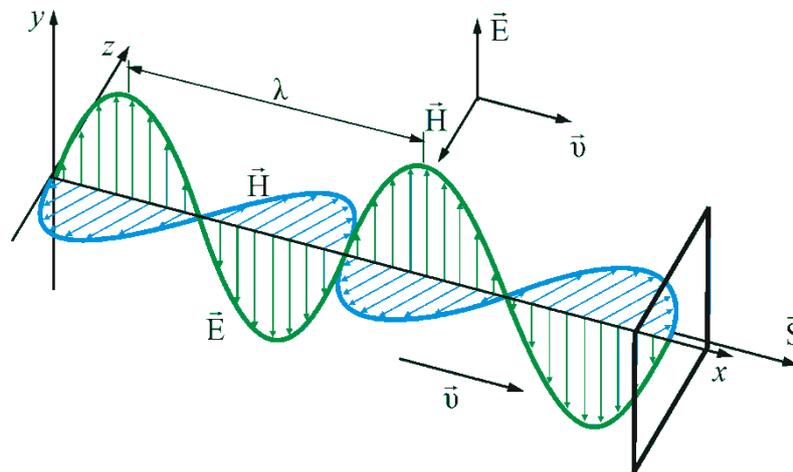


Рис. 3.36

### 3.2.2. Скорость распространения электромагнитных волн в среде:

$$v = \frac{c}{\sqrt{\epsilon\mu}},$$

где  $c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}}$  – скорость света в вакууме;  $\epsilon$  – электрическая проницаемость среды;  $\mu$  – магнитная проницаемость среды.

**3.2.3. Абсолютный показатель преломления среды** – величина, равная отношению фазовых скоростей света (электромагнитных волн) в вакууме и в данной среде:

$$n = \frac{c}{v} = \sqrt{\epsilon \mu}.$$

**3.2.4. Объемная плотность энергии** электромагнитных волн – энергия в единице объёма  $w = \frac{W}{V} = \frac{W_э + W_м}{V}$ ;

$$w = w_э + w_м = \frac{\epsilon_0 \epsilon E^2}{2} + \frac{\mu \mu_0 H^2}{2}.$$

Отсюда следует, что электромагнитная волна переносит энергию.

**3.2.5. Плотность потока энергии** – поток энергии через единичную площадку, перпендикулярную направлению распространения волны в единицу времени (рис. 3.36):

$$S = wv = EH.$$

**3.2.6. Вектор Умова – Пойнтинга** – это вектор плотности потока энергии электромагнитного поля:

$$\vec{S} = [\vec{E}, \vec{H}].$$

Этот вектор по модулю равен количеству энергии, переносимой через единичную площадь, нормальную к  $\vec{S}$ , в единицу времени (рис. 3.36). Своим направлением вектор определяет направление переноса энергии.

**3.2.7. Интенсивность электромагнитных волн** – это среднее по времени от модуля вектора Умова – Пойнтинга ( $J \sim E^2$ ):

$$J = \langle |\vec{S}| \rangle \quad \text{или} \quad J = \frac{\sin^2 \theta}{r^2}.$$

**3.2.8. Давление света** – давление, которое оказывает световое (и вообще электромагнитное) излучение, падающее на поверхность тела:

$$P = F/S, \quad \text{или} \quad P = \frac{E_{ед}}{c}(1 + K),$$

где  $E_{ед} = Nh\nu$  – энергия всех фотонов, падающих на единицу поверхности в единицу времени, т.е. энергетическая освещенность поверхности,  $K$  – коэффициент отражения.

Давление света на различные поверхности (рис. 3.37) можно считать:

- если тело зеркально отражает, то  $K = 1$  и  $P = \frac{E_{\text{ед}}}{c}(1 + K)$ ;
- если полностью поглощает (абсолютно черное тело), то  $K = 0$  и  $P = \frac{E_{\text{ед}}}{c}$ , т.е. *световое давление на абсолютно черное тело в два раза меньше, чем на зеркальное.*

Давление света открыто русским ученым П.Н. Лебедевым в 1901 г. Впервые гипотеза о световом давлении была высказана в 1619 г. немецким ученым И. Кеплером (1571–1630) для объяснения отклонения хвостов комет, пролетающих вблизи Солнца (рис. 3.38).

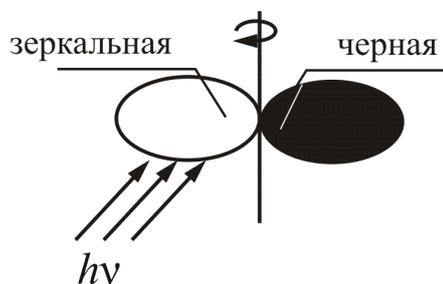


Рис. 3.37

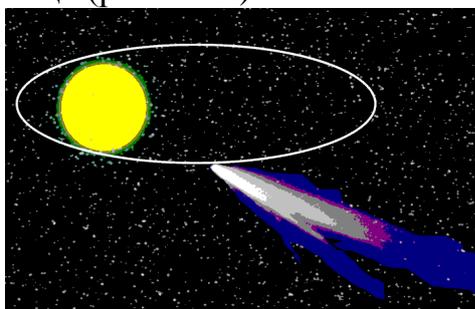


Рис. 3.38

### 3.2.9. Электромагнитная масса:

$$m_{\text{эл}} = \frac{2}{3} \frac{e^2}{ac^2 4\pi\epsilon_0},$$

где  $e$  – заряд движущейся частицы;  $a$  – её радиус.

### 3.2.10. Электромагнитный импульс:

$$\vec{p} = \frac{2}{3} \frac{e^2}{ac^2 4\pi\epsilon_0} \frac{\vec{v}}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}.$$

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В последние десятилетия мир переживает невиданную по своим масштабам и скорости осуществления научно-техническую революцию. Современная наука (и техника), развивающаяся необыкновенно быстрыми темпами, приводит к резкому повышению требований, которые предъявляются к современному курсу физики в вузе. Эти требования находят свое выражение в повышении научно-технического уровня курса, внедрении инновационных технологий, направленных на активизацию познавательной деятельности студентов, развитие их творческих способностей, научного мышления.

Данный краткий курс физики охватил все основные разделы классической и современной физики. Мы изучили основы классической механики и, рассмотрев границы ее применимости, перешли к специальной теории относительности. Далее были рассмотрены основы термодинамики и молекулярной физики, учение о электричестве и магнетизме, колебательные, волновые процессы, включая учение об электромагнитных волнах и оптику. Существенное место отведено квантовым свойствам излучения, основам квантовой оптики и элементам квантовой механики.

В конце курса мы разобрали вопросы, посвященные современным достижениям физики XXI века – атомной физики, физики атомного ядра и элементарных частиц. Они стали возможными благодаря быстрому расширению технических возможностей эксперимента и развитию квантовой механики, применению ее к теории твердых тел, расчетам ускорителей, ядерных и термоядерных реакторов, квантовых генераторов, усилителей и т.д.

Наряду с большими достижениями физики, во всех ее разделах остается много вопросов. Например, построение квантовой теории тяготения, проблемы физики плазмы и атомного ядра, построение теории объединяющей все известные силы взаимодействия.

Из сказанного ясно, какое значение имеет для будущего инженера изучение физики.

# СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

## Основная

1. Тюрин Ю.И. Ч.1. Механика. Молекулярная физика. Термодинамика: учебное пособие для технических университетов / Ю.И. Тюрин, И.П. Чернов, Ю.Ю. Крючков – Томск: Изд-во Томского ун-та, 2002. – 502 с.
2. Тюрин Ю.И., Чернов И.П., Крючков Ю.Ю. Физика. Ч. 2. Электричество и магнетизм: учебное пособие для технических университетов. – Томск: Изд-во Томского ун-та, 2003. – 738 с.
3. Тюрин Ю.И., Чернов И.П., Крючков Ю.Ю. Физика. Ч. 3. Оптика. Квантовая физика: учебное пособие для технических университетов. – Томск: Изд-во Томского ун-та, 2004. – 738 с.
4. Бондарев Б.В. Курс общей физики. В 3 кн.: Учеб пособие/ Б.В. Бондарев, Н.П. Калашников, Г.Г. Спириин – 2-е изд., стер. – М.: Высш. шк., 2005 – 352 с.
5. Калашников Н.П. Основы физики. В 2 т.: учебник для вузов/ Н.П. Калашников, М.А. Смондырев. – 3-е изд., стереотип. – М.: Дрофа, 2007.
6. Савельев И.В. Курс общей физики. В 5 кн.: учебное пособие для вузов/ И.В. Савельев – М.: АСТ Астрель, 2006. – 336 с.

## Дополнительная

1. Кузнецов С.И. Физические основы механики: учебное пособие. – 2-е изд., испр., допол. – Томск: Изд-во ТПУ, 2007. – 121 с.
2. Кузнецов С.И. Молекулярная физика. Термодинамика: учебное пособие. – 2-е изд., испр., допол. – Томск: Изд-во ТПУ, 2007. – 113 с.
3. Кузнецов С.И. Электростатика. Постоянный ток: учебное пособие. – 2-е изд., испр., допол. – Томск: Изд-во ТПУ, 2007. – 132 с.
4. Кузнецов С.И. Электромагнетизм: учебное пособие. – 2-е изд., испр., допол. – Томск: Изд-во ТПУ, 2007. – 92 с.
5. Кузнецов С. И. Колебания и волны. Геометрическая и волновая оптика: учебное пособие. – 2-е изд., испр., допол. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2007. – 170 с.
6. Кузнецов С. И. Квантовая оптика. Атомная и ядерная физика. Физика элементарных частиц: учебное пособие. – 2-е изд., испр., допол. – Томск: Изд-во ТПУ, 2007. – 154 с.
7. Кузнецов С.И. Квантовая физика: учебное пособие. – Томск: Изд-во ТПУ, 2006. – 62 с.
8. Кузнецов С.И. Курс физики с решениями задач. Основы механики: учебное пособие / под ред. В.В. Ларионова; Томский политехниче-

ский университет. – 3-е изд., перераб. и доп. – Томск: Изд-во ТПУ, 2011 – 249 с.

9. Кузнецов С.И. Краткий курс физики: учебное пособие / Томский политехнический университет. –Томск: Изд-во ТПУ, 2011. – 187 с.

10. Кузнецов С.И. Курс физики с примерами решения задач. Молекулярная физика и термодинамика: учебное пособие / ТПУ – 3-е изд., перераб. и доп. – Томск: Изд-во ТПУ, 2011. – 178 с.

11. Кузнецов С.И. Физика. Ч. I. Механика. Механические колебания и волны. Молекулярная физика и термодинамика: учебное пособие / С.И. Кузнецов; Э.В. Поздеева; Томский политехнический университет. – 3-е изд., перераб. доп. – Томск: Изд-во ТПУ, 2012. – 234 с.

12. Кузнецов С.И. Физика. Ч II. Электричество и магнетизм. Электромагнитные колебания и волны: учебное пособие / С.И. Кузнецов; ТПУ. – 3-е изд., перераб. и доп. – Томск: Изд-во ТПУ, 2011 – 248 с.

13. Кузнецов С.И. Физика. Ч III. Оптика. Квантовая природа излучения. Основы атомной физики и квантовой механики. Физика атомного ядра и элементарных частиц: учебное пособие / С.И. Кузнецов, Э.В. Поздеева, Э.Б. Шошин; ТПУ. – Томск: Изд-во ТПУ, 2012. 212 с.

## ПРИЛОЖЕНИЕ

### Некоторые математические формулы

$$\sin(\alpha \pm \beta) = \sin \alpha \cos \beta \pm \cos \alpha \sin \beta$$

$$\cos(\alpha \pm \beta) = \cos \alpha \cos \beta \pm \sin \alpha \sin \beta$$

$$\sin 2\alpha = 2 \sin \alpha \cos \alpha$$

$$\cos 2\alpha = \cos^2 \alpha - \sin^2 \alpha$$

$$\sin^2 \alpha = \frac{1}{2}(1 - \cos 2\alpha)$$

$$\cos^2 \alpha = \frac{1}{2}(1 + \cos 2\alpha)$$

$\frac{d}{dx}(x^n) = nx^{n-1}$	$\frac{d}{dx}(\ln x) = \frac{1}{x}$	$\int_0^{\infty} \frac{x dx}{e^x - 1} = \frac{\pi^2}{6}$
$\frac{d}{dx}(e^x) = e^x$	$\frac{d}{dx}(\operatorname{tg} x) = \frac{1}{\cos^2 x}$	$\frac{d}{dx}\left(\frac{1}{x^n}\right) = -\frac{n}{x^{n+1}}$
$\frac{d}{dx}(\cos x) = -\sin x$	$\int \frac{dx}{x^2} = -\frac{1}{x}$	$\frac{d}{dx}\left(\frac{1}{x}\right) = -\frac{1}{x^2}$
$\int \frac{dx}{x} = \ln x$	$\int e^x dx = e^x$	$\frac{d}{dx}(\sin x) = \cos x$
$\int \cos x dx = \sin x$	$\int u dv = uv - \int v du$	$\int_0^{\infty} x^n e^{-x} dx = n!$
$\int x^n dx = \frac{x^{n+1}}{n+1} (n \neq -1)$	$\int_0^{\infty} x^n e^{-ax} dx = \frac{n!}{a^{n+1}}$	
$\int \sin x dx = -\cos x$	$\int_0^{\infty} \frac{x^3 dx}{e^x - 1} = \frac{\pi^4}{15}$	

### Значения фундаментальных констант

Гравитационная постоянная	$G = 6,6720 \cdot 10^{-11} \text{ Н} \cdot \text{м}^2 / \text{кг}^2$
Скорость света в вакууме	$c = 2,99792458 \cdot 10^8 \text{ м/с}$
Магнитная постоянная	$\mu_0 = 12,5663706144 \cdot 10^{-7} \text{ Гн/м}$
Электрическая постоянная	$\epsilon_0 = 8,85418782 \cdot 10^{-12} \text{ Ф/м}$
Постоянная Планка	$h = 6,626176 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}$
Масса покоя электрона	$m_e = 9,109534 \cdot 10^{-31} \text{ кг}$
Масса покоя протона	$m_p = 1,6726485 \cdot 10^{-27} \text{ кг}$
Масса покоя нейтрона	$m_n = 1,6749543 \cdot 10^{-27} \text{ кг}$
Отношение массы протона к массе электрона	$m_p/m_e = 1836,15152$
Элементарный заряд	$e^- = 1,6021892 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$
Отношение заряда электрона к его массе (удельный заряд электрона)	$e^- / m_e = 1,7588047 \cdot 10^{11} \text{ Кл/кг}$
Атомная единица массы	$1 \text{ а.е.м.} = 1,6605655 \cdot 10^{-27} \text{ кг}$
Постоянная Авогадро	$N_A = 6,022045 \cdot 10^{23} \text{ моль}^{-1}$
Постоянная Фарадея	$F = 96,48456 \cdot 10^3 \text{ Кл/моль}$
Молярная газовая постоянная	$R = 8,31441 \text{ Дж/(моль} \cdot \text{К)}$
Молярный объем идеального газа при нормальных условиях	$V_0 = 22,41383 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3 / \text{моль}$
Постоянная Больцмана	$k = 1,380662 \cdot 10^{-23} \text{ Дж/К}$
Ускорение свободного падения на уровне моря и широте 45°	$g = 9.80665 \text{ м/с}^2$
Нормальное атмосферное давление	$P_0 = 1.013 \cdot 10^5 \text{ Н/м}^2$
Точка плавления льда	$273,15^\circ \text{ К}$
Постоянная Стефана-Больцмана	$\sigma = 5,67 \cdot 10^7 \text{ Дж/м}^2 \cdot \text{К}^4 \cdot \text{с}$
Постоянная Вина	$b = 2.9 \cdot 10^{-3} \text{ м} \cdot \text{К}$
Постоянная Ридберга	$R = 10\,967\,758 \text{ м}^{-1}$

### Греческий алфавит

Α α – альфа	Η η – эта	Ν ν – ню	Τ τ – тау
Β β – бета	Θ θ – тэта	Ξ ξ – кси	Υ υ – ипсилон
Γ γ – гамма	Ι ι – йота	Ο ο – омикрон	Φ φ – фи
Δ δ – дельта	Κ κ – каппа	Π π – пи	Χ χ – хи
Ε ε – эпсилон	Λ λ – ламбда	Ρ ρ – ро	Ψ ψ – пси
Ζ ζ – дзета	Μ μ – мю	Σ σ – сигма	Ω ω – омега

### Множители и приставки для образования десятичных кратных и дольных единиц и их наименований

Множитель	Приставка	Обозначение
1 000 000 000 000=10 <sup>12</sup>	тера	Т
1 000 000 000=10 <sup>9</sup>	гига	Г
1 000 000=10 <sup>6</sup>	мага	М
1 000=10 <sup>3</sup>	кило	к
100=10 <sup>2</sup>	гекто	г
10=10 <sup>1</sup>	дека	да
0,1=10 <sup>-1</sup>	деци	д
0,01=10 <sup>-2</sup>	санتي	с
0,001=10 <sup>-3</sup>	милли	м
0,000001=10 <sup>-6</sup>	микро	мк
0,000000001=10 <sup>-9</sup>	нано	н
0,000000000001=10 <sup>-12</sup>	пико	п
0,000000000000001=10 <sup>-15</sup>	фемто	ф
0,00000000000000001=10 <sup>-18</sup>	атто	а

### Дополнительные единицы СИ

Величина	Единица	
	Наименование	Обозначение
Плоский угол	радиан	рад
Телесный угол	стерадиан	ср

## Международная система единиц СИ

Величина		Единица			Определение
		Наименование	Обозначение		
наименование	Размерность			русское	
Длина	L	Метр	м	m	<b>Метр</b> – единица длины равная, расстоянию, проходимому в вакууме плоской электромагнитной волной за $1/299792458$ доли секунды.
Масса	M	килограмм	кг	kg	<b>Килограмм</b> – единица массы, равная массе международного прототипа килограмма.
Время	T	Секунда	с	s	<b>Секунда</b> – единица времени равная $9192631770$ периода излучения атома цезия -133.
Сила электрического тока	I	Ампер	A	A	<b>Ампер</b> – проходя по двум параллельным прямолинейным проводникам расположенным на расстоянии 1 м один от другого в вакууме, вызывает между этими проводниками силу, равную $2 \cdot 10^{-7}$ Н на каждый метр длины.
Термодинамическая температура	$\theta$	Кельвин	К	K	<b>Кельвин</b> – единица термодинамической температуры, равная $1/273,16$ термодинамической температуры тройной точки воды.
Количество вещества	$\nu$	Моль	МОЛЬ	mol	<b>Моль</b> – единица количества вещества, в которой содержится столько же структурных элементов сколько содержится атомов в углероде $C^{12}$ , массой 0,012 кг.

Сила света	J	Кандела	кд	cd	<b>Кандела</b> – единица силы света, равная силе света в данном направлении от источника, испускающего монохроматическое излучение частотой 540 ТГц, сила излучения которого в этом направлении составляет 1/683 Вт/ср.
------------	---	---------	----	----	---

**Таблица производных единиц физических величин**

Наименование величины	Единица		
	Определяющее уравнение	Обозначения	Наименование и определение
<b>Единицы геометрических и механических величин</b>			
Площадь	$S = l^2$	м <sup>2</sup>	<i>Квадратный метр</i> равен площади квадрата со сторонами, длины которых равны 1 м
Объем	$V = l^3$	м <sup>3</sup>	<i>Кубический метр</i> равен объему куба с ребрами, длины которых равны 1 м
Скорость	$v = \frac{s}{t}$	м/с	<i>Метр в секунду</i> равен скорости равномерного и прямолинейного движения, при котором точка за 1 с перемещается на расстояние 1 м
Ускорение	$a = \frac{\Delta v}{\Delta t}$	м/с <sup>2</sup>	<i>Метр на секунду в квадрате</i> равен ускорению прямолинейного движения точки, при котором за 1 с скорость точки изменяется на 1 м/с
Угловая скорость	$\omega = \frac{\varphi}{t}$	рад/с	<i>РадIAN в секунду</i> равен угловой скорости равномерно вращающегося тела, все точки которого за 1 с поворачиваются на угол 1 рад

Угловое ускорение	$\varepsilon = \frac{\Delta\varphi}{\Delta t}$	рад/с <sup>2</sup>	<i>Радан на секунду в квадрате</i> равен угловому ускорению равноускоренно вращающегося тела, при котором оно за 1 с изменит угловую скорость на 1 рад/с
Частота периодического процесса	$\nu = \frac{1}{T}$	Гц	<i>Герц</i> равен частоте периодического процесса, при которой за 1 с совершается один цикл процесса
Плотность	$\rho = \frac{m}{V}$	кг/м <sup>3</sup>	<i>Килограмм на кубический метр</i> равен плотности однородного вещества, масса которого при объеме 1 м <sup>3</sup> равна 1 кг
Сила	$F = ma$	Н	<i>Ньютон</i> равен силе, сообщаемой телу массой 1 кг ускорение 1 м/с <sup>2</sup> в направлении действия силы: $1\text{Н} = 1 \text{ кг} \cdot \text{м}/\text{с}^2$
Импульс	$p = mv$	кг · м/с	<i>Килограмм- метр на секунду</i> равен импульсу материальной точки массой 1 кг, движущейся со скоростью 1 м/с
Давление	$p = \frac{F}{S}$	Па	<i>Паскаль</i> равен давлению, создаваемому силой 1 Н, равномерно распределенной по нормальной к ней поверхности площадью 1 м <sup>2</sup> : $1\text{Па} = 1\text{Н}/\text{м}^2$
Работа, энергия	$A = Fs$	Дж	<i>Джоуль</i> равен работе, совершаемой силой 1 Н на пути 1 м: $1\text{Дж} = 1\text{Н} \cdot \text{м}$

Мощность	$N = \frac{A}{t}$	Вт	<i>Ватт</i> равен мощности, при которой за время 1 с совершается работа 1 Дж : $1\text{Вт}=1\text{Дж}/\text{с}$
Момент инерции	$J = mr^2$	Н·м	<i>Ньютон-метр</i> равен моменту силы, равной 1 Н, относительно точки, расположенной на расстоянии 1 м от линии действия силы
Момент импульса	$L = mvr$	кг·м <sup>2</sup> /с	<i>Килограмм-метр в квадрате на секунду</i> равен моменту импульса материальной точки, движущейся по окружности радиусом 1 м и имеющей импульс 1кг·м/с
Градиент скорости	$\left  \frac{\Delta v}{\Delta x} \right $	с <sup>-1</sup>	<i>Секунда в минус первой степени</i> равна градиенту скорости, при котором скорости слоев жидкости (газа), отстоящих друг от друга на расстоянии 1 м, отличается 1 м/с
Динамическая вязкость	$\eta = \frac{F}{S \left  \frac{\Delta v}{\Delta x} \right }$	Па·с	<i>Паскаль – секунда</i> равен динамической вязкости среды, касательное напряжение в которой при ламинарном течении и градиенте скоростей слоев, находящихся на расстоянии 1 м по нормали направлению скорости, равной 1м/с : $1\text{Па} \cdot \text{с} = 1\text{Н} \cdot \text{с}/\text{м}^2$
Кинематическая вязкость	$\nu = \frac{\eta}{\rho}$	м <sup>2</sup> /с	<i>Квадратный метр на секунду</i> равен кинематической вязкости среды с динамической вязкостью 1Па·с и плотностью 1кг/м <sup>3</sup>

<b>Единицы тепловых величин</b>			
Количество теплоты, внутренняя энергия	$q$	Дж	<i>Джоуль</i> равен количеству теплоты, эквивалентному работе 1 Дж
Тепловой поток (тепловая мощность)	$\Phi$	Вт	<i>Ватт</i> равен тепловому потоку, эквивалентному механической мощности 1 Вт
Градиент температуры	$\left  \frac{\Delta T}{\Delta x} \right $	К/м	<i>Кельвин на метр</i> равен температурному градиенту поля, в котором на участке длиной 1 м в направлении градиента температура изменяется на 1 К
Теплопроводность	$\lambda = \frac{q}{S \left  \frac{\Delta T}{\Delta x} \right }$	$\frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}$	<i>Ватт на метр – кельвин</i> равен теплопроводности вещества, в котором при стационарном режиме с поверхностной плотностью потока 1 Вт/м <sup>2</sup> устанавливается температурный градиент 1 К/м
Теплоемкость системы	$C = \frac{dq}{dt}$	Дж/К	<i>Джоуль на кельвин</i> равен теплоемкости системы, температура которой повышается на 1К при подведении к системе количества теплоты 1Дж
Удельная теплоемкость	$c = \frac{dq}{m dt}$	$\frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$	<i>Джоуль на килограмм-кельвин</i> равен удельной теплоемкости вещества, имеющего при массе 1 кг теплоемкость Дж/К
Молярная теплоемкость	$c_m = \frac{dq}{\nu dt}$	$\frac{\text{Дж}}{\text{моль} \cdot \text{К}}$	<i>Джоуль на моль – кельвин</i> равен молярной теплоемкости вещества, имеющего при количестве вещества 1 моль теплоемкости 1 Дж/К

Энтропия	$\frac{\delta q}{T}$	Дж/К	<i>Джоуль на кельвин</i> равен изменению энтропии системы, которой при температуре $n$ К в изотермическом процессе сообщается количество теплоты $n$ Дж
Поверхностное натяжение	$\sigma = \frac{F}{l}$	$\frac{Н}{м} = \frac{Дж}{м^2}$	<i>Ньютон на метр</i> равен поверхностному натяжению жидкости, создаваемому силой 1 Н, приложенной к участку контура свободной поверхности длиной 1 м и действующей нормально к контуру и по касательной к поверхности
<b>Единицы электрических и магнитных величин</b>			
Электрический заряд (количество электричества)	$q = It$	Кл	<i>Кулон</i> равен электрическому заряду, проходящему сквозь поперечное сечение проводника при силе постоянного тока 1 А за время 1 с
Объемная плотность электрического заряда	$\rho = \frac{q}{V}$	Кл/м <sup>3</sup>	<i>Кулон на кубический метр</i> равен объемной плотности электрического заряда, при которой в объеме 1 м <sup>3</sup> равномерно распределен заряд 1 Кл
Поверхностная плотность электрического заряда	$\sigma = \frac{q}{S}$	Кл/м <sup>2</sup>	<i>Кулон на квадратный метр</i> равен поверхностной плотности электрического заряда, при которой заряд, равномерно распределенный по поверхности площадью 1 м <sup>2</sup> , равен 1 Кл
Линейная плотность электрического заряда	$\tau = \frac{q}{l}$	Кл/м	<i>Кулон на метр</i> равен линейной плотности электрического заряда, при которой заряд, равномерно распределенный по нити длиной 1 м, равен 1 Кл

Напряженность электрического поля	$E = \frac{E}{q_0}$	$\frac{\text{Н}}{\text{Кл}} = \frac{\text{В}}{\text{м}}$	<i>Ньютон на кулон</i> равен напряженности электрического поля в точке поля, в которой на точечный электрический заряд 1 Кл поле действует с силой 1 Н <i>Вольт на метр</i> равен напряженности однородного электрического поля, создаваемого разностью потенциалов 1 В между точками, находящимися на расстоянии 1 м на линии напряженности поля
Электрическое смещение	$D$	$\text{Кл}/\text{м}^2$	<i>Кулон на квадратный метр</i> равен электрическому смещению, при котором поток электрического смещения сквозь поперечное сечение площадью $1 \text{ м}^2$ равен 1 Кл
Поток электрического смещения	$\oint_S \vec{D} d\vec{S} = \sum_{i=1}^n q_i$	$\text{Кл}$	<i>Кулон</i> равен потоку электрического смещения, связанному с суммарному свободным зарядом 1 Кл
Электрический потенциал	$\varphi = \frac{A}{q_0}$	$\text{В}$	<i>Вольт</i> равен потенциалу такой точки поля, в которой заряд 1 Кл обладает потенциальной энергией 1 Дж: $1 \text{ В} = 1 \text{ Дж}/\text{Кл}$
Электрическая емкость	$C = \frac{q}{\varphi}$	$\text{Ф}$	<i>Фарад</i> равен электрической емкости такого уединенного проводника, потенциал которого изменяется на 1 В при сообщении ему заряда 1 Кл
Электрический момент диполя	$p =  q l$	$\text{Кл} \cdot \text{м}$	<i>Кулон-метр</i> равен электрическому моменту диполя, заряды которого, равные каждый 1 Кл, расположены на расстоянии 1 м один от другого

Поляризованность	$\vec{P} = \frac{\vec{p}}{V}$	Кл/м <sup>2</sup>	<i>Кулон на квадратный метр</i> равен поляризованности диэлектрика, при которой диэлектрик объемом 1 м <sup>3</sup> имеет электрический момент 1 Кл·м
Плотность электрического тока	$j = \frac{I}{S}$	А/м <sup>2</sup>	<i>Ампер на квадратный метр</i> равен плотности электрического тока, при которой сила тока, равномерно распределенного по поперечному сечению проводника площадью 1 м <sup>2</sup> , равна 1 А
Электрическое сопротивление	$R = \frac{U}{I}$	Ом	<i>Ом</i> равен сопротивлению такого проводника, в котором при напряжении 1 В течет постоянный ток 1 А
Электрическая проводимость	$G = \frac{1}{R}$	См	<i>Сименс</i> равен проводимости участка электрической цепи сопротивлением 1 Ом
Удельное электрическое сопротивление	$\rho = \frac{RS}{l}$	Ом·м	<i>Ом-метр</i> равен удельному электрическому сопротивлению проводника площадью поперечного сечения 1 м <sup>2</sup> и длиной 1 м, имеющего сопротивление 1 Ом
Удельная электрическая проводимость	$\sigma = \frac{1}{\rho}$	См/м	<i>Сименс на метр</i> равен удельной электрической проводимости проводника, который при площади поперечного сечения 1 м <sup>2</sup> и длине 1 м имеет электрическую проводимость 1 См
Магнитная индукция	$B = \frac{F}{I \cdot l}$	Тл	<i>Тесла</i> равен магнитной индукции такого однородного магнитного поля, которое действует с силой 1 Н на каждый метр длины проводника, расположенного перпендикулярно направлению поля, если по

			<i>этому проводнику проходит ток</i> $1 \text{ Тл} = \frac{1 \text{ Н}}{\text{Ам}}$
Магнитный поток	$\Phi = BS$	Вб	<i>Вебер равен магнитному потоку, проходящему сквозь плоскую поверхность площадью <math>1 \text{ м}^2</math>, расположенную перпендикулярно однородному магнитному полю, индукция которого равна <math>1 \text{ Тл}</math>: <math>1 \text{ Вб} = 1 \text{ Тл} \cdot \text{м}^2</math></i>
<i>Наряженность магнитного поля</i>	$H = \frac{B}{\mu_0}$	А/м	<i>Ампер на метр равен напряженности такого поля, магнитная индукция которого в вакууме равна <math>4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Тл}</math></i>
Магнитный момент контура с током	$P = IS$	А·м	<i>Ампер-квадратный метр равен моменту контура площадью <math>1 \text{ м}^2</math>, если по нему течет ток <math>1 \text{ А}</math></i>
Индуктивность	$L = \frac{\Phi}{I}$	Гн	<i>Генри равен индуктивности такого контура, магнитный поток которого при токе <math>1 \text{ А}</math> равен <math>1 \text{ Вб}</math>: <math>1 \text{ Гн} = 1 \text{ Вб/А}</math></i>
Намагниченность	$J = \frac{\sum p_a}{V}$	А/м	<i>Ампер на метр равен намагниченности, при которой вещество объемом <math>1 \text{ м}^3</math> имеет магнитный момент <math>1 \text{ А} \cdot \text{м}^2</math></i>

### Производные единицы СИ, имеющие собственные наименования

Величина	Единица		Выражение производной единицы	
	Наименование	Обозначение	Через другие единицы СИ	Через основные единицы СИ
Частота	герц	Гц		$\text{с}^{-1}$
Сила	ньютон	Н		$\text{м} \cdot \text{кг} \cdot \text{с}^{-1}$
Давление	паскаль	Па	$\text{Н}/\text{м}^2$	$\text{м}^{-1} \cdot \text{кг} \cdot \text{с}^{-2}$
Энергия, работа, кол-во теплоты	джоуль	Дж	Н/м	$\text{м}^2 \cdot \text{кг} \cdot \text{с}^{-2}$
Мощность, поток энергии	ватт	Вт	Дж/с	$\text{м}^2 \cdot \text{кг} \cdot \text{с}^{-3}$
Кол-во электричества, электрический заряд	кулон	Кл	А·с	с·А
Электрическое напряжение, электрический потенциал	вольт	В	Вт/А	$\text{м}^2 \cdot \text{кг} \cdot \text{с}^{-3} \cdot \text{А}^{-2}$
Электрическая ёмкость	фарада	Ф	Кл/В	$\text{м}^{-2} \cdot \text{кг}^{-1} \cdot \text{с}^4 \cdot \text{А}^2$
Электрическое сопротивление	ом	Ом	В/А	$\frac{\text{м}^2 \cdot \text{кг} \cdot \text{с}^{-3}}{\text{А}^2}$
Электрическая проводимость	сименс	См	А/В	$\text{м}^{-2} \cdot \text{кг}^{-1} \cdot \text{с}^3 \cdot \text{А}^2$
Поток магнитной индукции	вебер	Вб	В·с	$\text{м}^2 \cdot \text{кг} \cdot \text{с}^{-2} \cdot \text{А}^{-1}$
Магнитная индукция	тесла	Т	Вб/м <sup>2</sup>	$\text{кг} \cdot \text{с}^{-2} \cdot \text{А}^{-1}$
Индуктивность	генри	Г	Вб/А	$\frac{\text{м}^2 \cdot \text{кг} \cdot \text{с}^{-2} \cdot \text{А}^{-1}}{2}$
Световой поток	люмен	лм		кд·ср
Освещенность	люкс	лк		$\text{м}^{-2} \cdot \text{кд} \cdot \text{ср}$

### Внесистемные единицы измерений и их перевод в единицы СИ

Единица	Обозначение	Перевод в единицы СИ
микрон	мкм	$1 \cdot 10^{-6}$ м
ангстрем	Å	$1 \cdot 10^{-10}$ м
световой год	св.год	$9,46 \cdot 10^{15}$ м
парсек	пк	$3,09 \cdot 10^{16}$ м
литр	л	$1 \cdot 10^{-3}$ м <sup>3</sup>
атомная единица массы	а.е.м.	$1,66 \cdot 10^{-27}$ кг
тонна	т	1000 кг
минута	мин	60 с
час	ч	3600 с
сутки	сут	86400 с
секунда	"	$4,85 \cdot 10^{-6}$ рад
минута	'	$2,9 \cdot 10^{-4}$ рад
градус	°	0,017 рад
оборот	об	6,28 рад
полный телесный угол	-	12,57 ср
оборот в секунду	об/с	$1 \text{ с}^{-1}$
оборот в минуту	об/мин	$0,0167 \text{ с}^{-1}$
километр в час	км/ч	0,278 м/с
оборот в секунду	об/с	6,28 рад/с
оборот в минуту	об/мин	0,105 рад/с
миллиметр ртутного столба	мм. рт. ст.	133 Па
бар	бар	$1 \cdot 10^5$ Па
киловатт-час	кВт · ч	$3,6 \cdot 10^6$ Дж
электрон-вольт	эВ	$1,6 \cdot 10^{-19}$ Дж
ампер-час.	А · ч	$3,6 \cdot 10^{-3}$ Кл
калория	кал	$4,19 \cdot 10^6$ Дж
рентген	Р	$2,58 \cdot 10^{-3}$ Кл/кг
рад	рад	0,01 Дж/кг
кюри	Ки	$3,7 \cdot 10^{10} \text{ с}^{-1}$
распад в секунду	расп./с	$1 \text{ с}^{-1}$

**Характеристики колебаний в механической системе  
и соответствующие им величины в электрической цепи**

Механическая система		Электрическая цепь (контур)	
Масса	$m$	Индуктивность	$L$
Упругость (жесткость)	$k$	Величина	$1/C$
Коэффициент трения	$\mu$	Сопротивление	$R$
Сила	$F$	Э.д.с.	$\mathcal{E}$
Отклонение от положения равновесия	$x$	Заряд на конденсаторе	$q$
Скорость	$v$	Ток	$I$
Потенциальная энергия	$U$	Энергия электрического поля	$W_e$
Кинетическая энергия	$K$	Энергия магнитного поля	$W_m$

**Диэлектрические проницаемости**

Диэлектрик	$\epsilon$	Диэлектрик	$\epsilon$
Вода	81	Керосин	2,0
Полиэтилен	2,3	Стекло	6,0
Воздух	1,00058	Парафин	2,0
Слюда	7,5	Фарфор	6,0
Воск	7,8	Плексиглас	3,5
Спирт	26	Эбонит	2,7

**Удельное электросопротивление некоторых материалов, Ом·м·10<sup>6</sup>**

Серебро	0,016	Канстантан	0,4-0,51
Медь	0,017	Нихром	1,1
Алюминий	0,029	Фехраль	1,2
Никелин	0,4-0,44	Хромель	1,3
Манганин	0,42	Уголь для дуговых ламп	40-50

**Удельное сопротивление  $\rho$  и температурный коэффициент  $\alpha$  проводников**

<b>Вещество</b>	<b><math>\rho</math> при 20° С, нОм · мн</b>	<b><math>\alpha</math>, К<sup>-1</sup></b>
Железо	98	$6,2 \cdot 10^{-3}$
Медь	17	$4,2 \cdot 10^{-3}$
Алюминий	26	$3,6 \cdot 10^{-3}$
Графит	$3,9 \cdot 10^3$	$-0,8 \cdot 10^3$

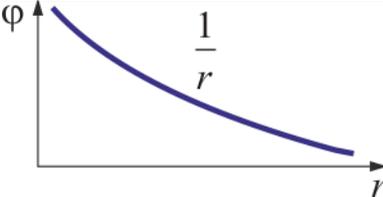
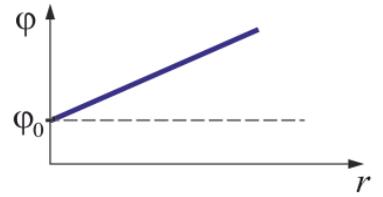
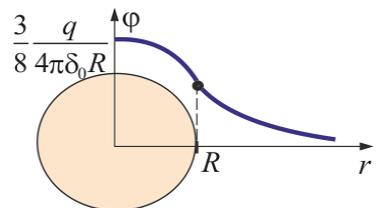
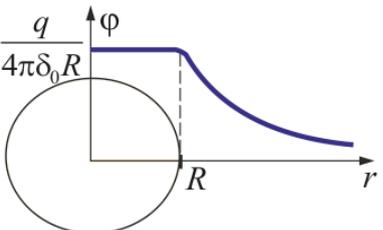
**Работа выхода электрона из металлов**

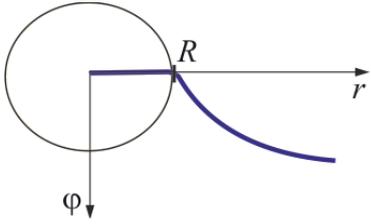
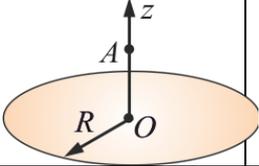
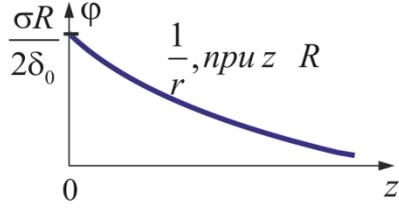
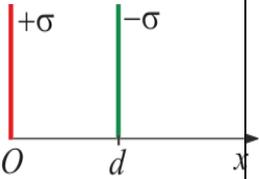
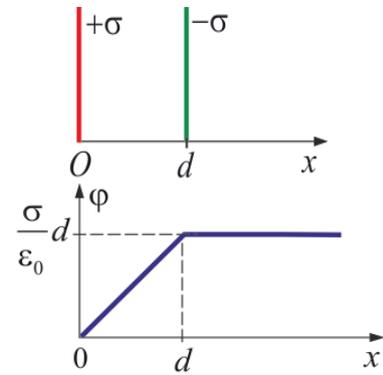
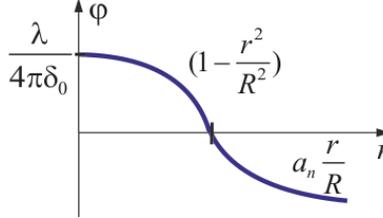
<b>Металл</b>	<b>A, эВ</b>	<b>Металл</b>	<b>A, эВ</b>	<b>Металл</b>	<b>A, эВ</b>
Алюминий	3,74	Висмут	4,62	Железо	4,36
Калий	2,15	Литий	2,39	Молибден	4,27
Никель	4,84	Серебро	4,28	Цезий	1,89
Барий	2,29	Вольфрам	4,50	Золото	4,58
Кобальт	4,25	Медь	4,47	Натрий	2,27
Платина	5,29	Титан	3,92	Цинк	3,74

**Подвижность ионов в электролитах (м<sup>2</sup>/В·с)**

$\text{NO}_3^-$	$6,4 \cdot 10^{-8}$
$\text{Ag}^+$	$5,6 \cdot 10^{-8}$
$\text{Cl}^-$	$6,8 \cdot 10^{-8}$
$\text{H}^+$	$3,3 \cdot 10^{-8}$
$\text{K}^+$	$6,7 \cdot 10^{-8}$

## Зависимость потенциала от расстояния

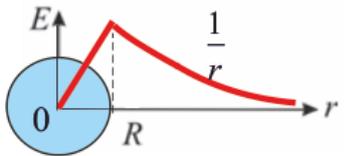
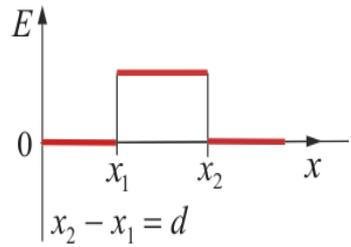
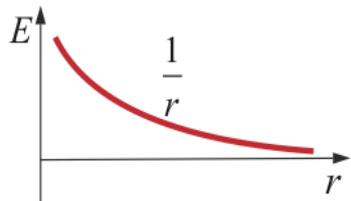
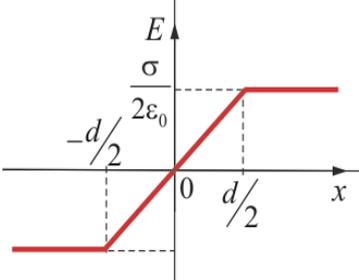
Модели распределения заряда	Формулы для расчёта потенциала	Графики зависимости потенциала от координат
Точечный заряд	$\varphi = \frac{q}{4\pi\epsilon_0 r}$	
Бесконечная равномерно заряженная плоскость	$\varphi = \frac{\sigma}{2\epsilon_0}  x  + \varphi(0),$ <p>где <math>\varphi(0)</math> – произвольная постоянная (потенциал плоскости)</p>	
Потенциал шара, равномерно заряженного по объёму (радиус шара $R$ )	$\varphi = \frac{q}{4\pi\epsilon_0 R} \left( \frac{3}{2} - \frac{r^2}{2R^2} \right), \text{ при } r \leq R$ $\varphi = \frac{q}{4\pi\epsilon_0 r}, \text{ при } r \geq R$ <p><math>\left( \varphi_R = \frac{q}{4\pi\epsilon_0 R} \right)</math> – потенциал заряженного шара на его поверхности</p>	
Сфера, заряженная равномерно с поверхностной плотностью $\sigma$ (радиус сферы $R$ )	$\varphi = \frac{q}{4\pi\epsilon_0 r}, \text{ при } r \geq R$ $\left( \varphi = \frac{\sigma R^2}{\epsilon_0 r} \right) \varphi = \frac{q}{4\pi\epsilon_0 R}, \text{ при } r \leq R$ <p><math>\left( \varphi = \frac{\sigma R}{\epsilon_0} \right)</math></p>	

<p>Бесконечно длинный тонкий цилиндр (нить), заряженный равномерно с линейной плотностью <math>\lambda</math></p>	$\varphi = -\frac{\lambda}{2\pi\epsilon_0} \ln\left(\frac{r}{R}\right), \text{ при } r \geq R$ $\varphi = \varphi_0 = \text{const при } r \leq R$ <p>(внутри цилиндра) (значения <math>\varphi_0</math> задается) полагаем <math>\varphi_0 = 0</math></p>	
<p>Потенциал равномерно заряженного диска с поверхностной плотностью <math>\sigma</math></p> 	$\varphi_A = \frac{\sigma}{2\epsilon_0} (\sqrt{R^2 + z^2} -  z )$ $\varphi_0 = \frac{\sigma R}{2\epsilon_0}$ <p>При <math>z \gg R</math></p> $\varphi = \frac{\sigma R^2}{4\epsilon_0  z } = \frac{q}{4\epsilon_0  z }$	
<p>Потенциал поля системы двух бесконечно длинных равномерно разноименно заряженных плоскостей</p> 	$\varphi = \frac{\sigma}{2\epsilon_0}  x  - \frac{\sigma}{2\epsilon_0} (x - d) + \text{const.}$ <p>Условие <math>\varphi(x=0) = 0</math> выполняется при значении</p> $\text{const} = \frac{\sigma}{2\epsilon_0} d$ $\varphi = \begin{cases} 0, & x \leq 0 \\ \frac{\sigma}{\epsilon_0} x, & 0 \leq x \leq d \\ \frac{\sigma}{\epsilon_0} d, & x \geq d \end{cases}$	
<p>Потенциал поля равномерно заряженной цилиндрической области с по-</p>	$\varphi = \begin{cases} \frac{\lambda}{2\pi\epsilon_0} \frac{1}{2} \left(1 - \frac{r^2}{R^2}\right) + \varphi_0, & r \leq R \\ -\frac{\lambda}{2\pi\epsilon_0} \ln \frac{r}{R} + \varphi_0, & r \geq R \end{cases}$	

<p>стоянной объемной плотностью заряда <math>\rho</math></p>	<p>(<math>\varphi_0</math> - потенциал поверхности цилиндра)</p>	
<p>Потенциал поля плоскопараллельной пластины, равномерно заряженной по объему толщиной <math>d</math></p>	$\varphi(x) = \begin{cases} -\frac{\sigma}{2\varepsilon_0 d} \left(x^2 + \frac{d^2}{4}\right) + \varphi_0, & -\frac{d}{2} \leq x \leq \frac{d}{2} \\ -\frac{\sigma x}{2\varepsilon_0} + \varphi_0, & x \geq \frac{d}{2} \\ +\frac{\sigma x}{2\varepsilon_0} + \varphi_0, & x \leq -\frac{d}{2} \end{cases}$ <p>(<math>\varphi_0</math> - потенциал поля на поверхности пластины)</p>	

### Зависимость напряженности поля от расстояния

<p>Модели распределения заряда</p>	<p>Формулы для расчета напряженности</p>	<p>Графики зависимости напряженности от координаты</p>
<p>Точечный заряд</p>	$E = \frac{q}{4\pi\varepsilon_0 r^2}$	
<p>Бесконечная равномерно заряженная плоскость с поверхностной плотностью заряда <math>\sigma</math></p>	$E = \frac{\sigma}{2\varepsilon_0}$	
<p>Шар радиуса <math>R</math>, заряженный равномерно с объемной плотностью <math>\rho</math></p>	$E = \rho \frac{r}{3\varepsilon_0}, \text{ при } r \leq R$ $E = \frac{q}{4\pi\varepsilon_0 r^2} = \frac{\rho R^3}{3\varepsilon_0 r^2}, r \geq R$	
<p>Сфера радиуса <math>R</math>, заряженная равномерно с поверхностной плотностью <math>\sigma</math></p>	$E = 0, \text{ при } r < R$ $E = \frac{q}{4\pi\varepsilon_0 r^2} = \frac{\sigma R^2}{\varepsilon_0 r^2}, r \geq R$	

<p>Бесконечно длинный цилиндр (нить), заряженный равномерно с объемной плотностью <math>\rho</math>; <math>\tau</math> – линейная плотность заряда.</p>	$E = \frac{\rho r}{2\varepsilon_0}, \text{ при } r \leq R$ $E = \frac{r}{2\pi\varepsilon_0 R} = \frac{\rho R^2}{2\varepsilon_0 r}, r \geq R$	
<p>Две бесконечно длинные параллельные плоскости, заряженные разноименно с одинаковой поверхностной плотностью заряда (модель плоского конденсатора; расстояние между пластинками <math>d</math>)</p>	$E = \frac{\sigma}{\varepsilon_0}$	
<p>Бесконечно длинная равномерно заряженная прямая нить (линейная плотность заряда <math>\tau = \text{const}</math>)</p>	$E = \frac{\tau}{2\pi\varepsilon_0 r}$	
<p>Бесконечная равномерно заряженная по объему зарядом с объемной плотностью <math>\rho = \text{const}</math> плоскопараллельная пластина толщиной <math>d</math></p>	$E = \frac{\sigma x}{\varepsilon_0 d}, \text{ при } \frac{d}{2} \leq x \leq \frac{d}{2}$ $E = \frac{\sigma}{2\varepsilon_0}, \text{ при } x \leq -\frac{d}{2}, x \geq \frac{d}{2}$ <p style="text-align: center;"><math>(\sigma = \rho d)</math></p>	

### Характеристики электростатического поля

Электростатическое поле	Формулы и обозначения
Точечный заряд	$q$
Диэлектрическая проницаемость	$\varepsilon$
Диэлектрическая восприимчивость	$\chi = \varepsilon - 1$

Сила Кулона	$F = \frac{1}{4\pi\epsilon_0\epsilon} \frac{q_1q_2}{r^2}$
Напряженность поля	$E = \frac{\vec{F}}{q} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{r^2}$
Электростатическая индукция	$\vec{D} = \epsilon_0\epsilon\vec{E}$
Принцип суперпозиции	$\vec{E} = \sum \vec{E}_i$
Потенциальная энергия	$U = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1q_2}{r}$
Связь силы с энергией	$\vec{F} = -\text{grad}U$
Потенциал поля	$\varphi = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{r}$
Сложение потенциалов	$\varphi = \sum \varphi_i$
Связь $\vec{E}$ и $\varphi$	$\vec{E} = -\text{grad}\varphi = -\nabla\varphi$
Поляризованность	$\vec{P} = \chi\epsilon_0\vec{E}$
Емкость проводника	$C = \frac{q}{\varphi} = \frac{\epsilon_0\epsilon S}{d}$
Энергия конденсатора	$W = \frac{CU^2}{2} = \frac{q^2}{2C}$
Объемная плотность энергии	$w = \frac{ED}{2} = \frac{\epsilon_0 E^2}{2}$
Работа по перемещению единичного заряда $q'$ из т. 1 в т. 2	$A = \frac{qq'}{4\pi\epsilon_0} \left( \frac{1}{r_2} - \frac{1}{r_1} \right) = q(\varphi_2 - \varphi_1)$
Работа по замкнутому контуру	$A = \oint_L \vec{F}d\vec{r} = 0$
Циркуляция $\vec{E}$	$\oint_L \vec{E}dl = 0$
Теорема Гаусса в интегральной форме	$\Phi_E = \oint_S \vec{E}d\vec{S} = \frac{q}{\epsilon_0}$
Теорема Гаусса в дифференциальной форме	$\text{div}\vec{E} = \nabla\vec{E} = \frac{\rho}{\epsilon\epsilon_0}$
Электростатическое поле – безвихревое	$\text{rot}\vec{E} = 0$
Электростатическое поле создается зарядами	$\text{div}\vec{D} = \nabla\vec{D} = \rho$

### Характеристики магнитного поля

Характеристики магнитного поля	Формулы и обозначения
Ток	$I$
Магнитная постоянная	$\mu_0$
Магнитная проницаемость	$\mu$
Магнитная восприимчивость	$\kappa = \mu - 1$
Взаимодействие токов	$F = \frac{\mu_0 \mu}{4\pi} \frac{2I_1 I_2}{r}$
Магнитная индукция	$\vec{B} = \frac{\vec{M}_{\max}}{\vec{P}_m}$
Закон Ампера (векторно)	$\vec{F} = I [\vec{l}, \vec{B}]$
Закон Ампера (скалярно)	$F = IlB \sin(\vec{l}, \vec{B})$
Сила Лоренса (векторно)	$\vec{F}_L = q [\vec{v}, \vec{B}]$
Сила Лоренса (скалярно)	$F_L = qvB \sin \alpha$
Напряженность магнитного поля	$\vec{H} = \frac{\vec{B}}{\mu_0 \mu}$
Принцип суперпозиции	$\vec{B} = \sum \vec{B}_i$
Намагниченность	$\vec{J} = \kappa \vec{H}$
Индуктивность катушки	$L = \frac{\Phi}{I} = \mu_0 \mu S l$
Энергия катушки с током	$W = \frac{LI^2}{2} = \frac{\Phi^2}{2L}$
Объемная плотность энергии	$w = \frac{BH}{2} = \frac{\mu_0 H^2}{2}$
Циркуляция $\vec{B}$	$\oint_L \vec{H} = I_{\text{полн}}$
Теорема Гаусса	$\Phi_B = \oint_S \vec{B} d\vec{S} = 0$
Магнитное поле создается токами	$\text{rot} \vec{H} = \vec{j}_{\text{полн}}$
Магнитное поле – вихревое поле	$\text{div} \vec{B} = \nabla \vec{B} = 0$

## Сравнительные характеристики гравитационного и электростатического полей

Сравнительные характеристики	Виды полей	
	Гравитационное	Электростатическое
Масса, заряд	$m$	$q$
Сила	$F = \gamma \frac{mM}{r^2}$	$F = k_0 \frac{qQ}{r^2}$
Напряженность поля	$G = \gamma \frac{M}{r^2}$	$E = k_0 \frac{Q}{r^2}$
Связь напряженности с силой	$\vec{G} = \frac{\vec{F}}{m}$	$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q}$
Принцип суперпозиции	$\vec{G} = \sum \vec{G}_i$	$\vec{E} = \sum \vec{E}_i$
Потенциал поля	$\varphi = \gamma \frac{M}{r}$	$\varphi = k_0 \frac{Q}{r}$
Сложение потенциалов	$\varphi = \sum \varphi_i$	$\varphi = \sum \varphi_i$
Связь $\vec{G}$ и $\varphi$	$\vec{G} = -\text{grad} \varphi = -\nabla \varphi$	$\vec{E} = -\text{grad} \varphi = -\nabla \varphi$
Работа по перемещению тела или заряда	$A = m \left( \frac{\gamma M}{r_2} - \frac{\gamma M}{r_1} \right) = m (\varphi_2 - \varphi_1)$	$A = q \left( \frac{k_0 Q}{r_2} - \frac{k_0 Q}{r_1} \right) = q (\varphi_2 - \varphi_1)$
Работа по замкнутому контуру	$A = \oint_L \vec{F} d\vec{r} = 0$	$A = \oint_L \vec{F} d\vec{r} = 0$
Циркуляция вектора напряженности	$\oint_L \vec{G} d\vec{l} = 0$	$\oint_L \vec{E} d\vec{l} = 0$
Потенциальная энергия	$U = \gamma \frac{mM}{r}$	$U = k_0 \frac{qQ}{r}$
Связь потенциала с энергией	$\varphi = \frac{U}{m}$	$\varphi = \frac{U}{q}$
Связь силы с энергией	$\vec{F} = -\text{grad} U$	$\vec{F} = -\text{grad} U$
Теорема Гаусса в интегр. форме	$\Phi_G = \oint_S \vec{G} d\vec{S} = 4\pi\gamma M$	$\Phi_E = \oint_S \vec{E} d\vec{S} = 4\pi k_0 Q$
Теорема Гаусса в диф. форме	$\text{div} \vec{G} = \nabla \vec{G} = 4\pi\gamma\rho$	$\text{div} \vec{E} = \nabla \vec{E} = \frac{\rho}{\epsilon\epsilon_0} = 4\pi k_0 \rho$
Безвихревое поле	$\text{rot} \vec{G} = 0$	$\text{rot} \vec{E} = 0$

## Полная система уравнений Максвелла

№	Название	Дифференциальная форма	Интегральная форма	Физический смысл
1	Закон индукции Фарадея	$\text{rot}\vec{E} = -\frac{\partial\vec{B}}{\partial t}$	$\oint_L \vec{E}d\vec{l} = -\oint_S \frac{\partial\vec{B}}{\partial t} d\vec{S}$	Вихревое электрическое поле порождается изменением магнитной индукции и наоборот
2	Обобщенный закон Био – Саварра – Лапласа	$\text{rot}\vec{H} = \vec{j} + \frac{\partial\vec{D}}{\partial t}$	$\oint_L \vec{H}d\vec{l} = I_{\text{encl}} + \oint_S \frac{\partial\vec{D}}{\partial t} d\vec{S}$	Вихревое магнитное поле порождается электрическим током и изменением электрической индукции
3	Теорема Гаусса для вектора $\vec{D}$	$\text{div}\vec{D} = \rho$	$\oint_S \vec{D}d\vec{S} = q_{\text{encl}}$	Электрический заряд является источником электростатического поля
4	Теорема Гаусса для вектора $\vec{B}$	$\text{div}\vec{B} = 0$	$\oint_S \vec{B}d\vec{S} = 0$	Магнитная индукция не расходится (нет магнитных зарядов)
5	Электростатическая индукция	$\vec{D} = \epsilon_0\epsilon\vec{E}$	Связь электрической индукции с напряженностью электростатического поля	
6	Магнитная индукция	$\vec{B} = \mu_0\mu\vec{H}$	Связь магнитной индукции с напряженностью магнитного поля	
7	Плотность тока	$\vec{j} = \sigma\vec{E}$	Связь плотности тока с напряженностью электростат. поля (Закон Ома в диф. форме)	

$\vec{B}$  – вектор индукции магнитного поля;

$\vec{E}$  – вектор напряженности электрического поля;

$\vec{D} = \epsilon_0\vec{E} + \vec{P}$  – вектор электрического смещения;

$\vec{H} = \frac{\vec{B}}{\mu_0} - \vec{J}$  – напряженности магнитного поля;

$\vec{P}$  – поляризованность;

$\vec{J}$  – намагниченность вещества;

$\vec{j}$  – вектор плотности тока;

$\rho$  – объемная плотность заряда.

## Сопоставление характеристик механических и электромагнитных колебаний

Колебания			
механические		электромагнитные	
Масса	$m$	Индуктивность	$L$
Коэффициент жесткости	$k$	Обратная величина емкости	$\frac{1}{C}$
Собственная частота пружинного маятника	$\omega_0 = \sqrt{\frac{k}{m}}$	Собственная частота колебательного контура	$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$
Уравнение гармонических колебаний	$\frac{d^2x}{dt^2} + \frac{k}{m}x = 0$	Уравнение гармонических колебаний	$\frac{d^2q}{dt^2} + \frac{1}{LC}q = 0$
Смещение	$x = x_m \cos(\omega_0 t + \varphi)$	Заряд	$q = q_m \cos(\omega_0 t + \varphi)$
Скорость	$v = x_m \omega \sin(\omega_0 t + \varphi)$	Сила тока	$I = I_m \sin(\omega_0 t + \varphi)$
Ускорение	$a = x_m \omega_0^2 \cos(\omega_0 t + \varphi)$	Напряжение	$U = U_m \cos(\omega_0 t + \varphi)$
Период колебаний	$T = 2\pi\sqrt{m/k}$	Период колебаний Формула Томсона	$T = 2\pi\sqrt{LC}$
Потенциальная энергия	$W = mgh = \frac{kx^2}{2}$	Энергия электрического поля	$W = \frac{q^2}{2C} = \frac{CU^2}{2} = \frac{qU}{2}$
Кинетическая энергия	$K = \frac{mv^2}{2}$	Энергия магнитного поля	$K = \frac{LI^2}{2}$
Дифференциальное уравнение затухающих колебаний	$\frac{d^2x}{dt^2} + \frac{r}{m} \frac{dx}{dt} + \frac{k}{m}x = 0$ $\ddot{x} + 2\beta\dot{x} + \omega_0^2x = 0$	Дифференциальное уравнение затухающих колебаний	$\frac{d^2q}{dt^2} + \frac{R}{L} \frac{dq}{dt} + \frac{1}{LC}q = 0$ $\ddot{q} + 2\beta\dot{q} + \omega_0^2q = 0$
Решение уравнения	$x = x_m e^{-\beta t} \cos \omega t$	Решение уравнен.	$q = q_m e^{-\beta t} \cos \omega t$
Коэффициент затухания	$\beta = \frac{r}{2m}$	Коэффициент затухания	$\beta = \frac{R}{2L}$
Циклическая частота затухающих колебаний	$\omega = \sqrt{\frac{k}{m} - \frac{r^2}{4m^2}}$	Циклическая частота затухающих колебаний	$\omega = \sqrt{\frac{1}{LC} - \frac{R^2}{4L^2}}$
Логарифмический декремент затухания	$\chi = \ln \frac{A(t)}{A(t+T)} = \beta T$	Логарифмический декремент затухания	$\chi = \pi R \sqrt{\frac{C}{L}} = \beta T$
Добротность пружинного маятника	$Q = \frac{\omega_0}{2\beta} = \frac{\pi}{\chi} = \frac{\sqrt{km}}{r}$	Добротность колебательного контура	$Q = \frac{\omega_0}{2\beta} = \frac{\pi}{\chi} = \frac{1}{R} \sqrt{\frac{L}{C}}$

Резонансная частота	$\omega_{\text{рез}} = \sqrt{\omega_0^2 - 2\beta^2}$	Резонансная частота	$\omega_{\text{рез}} = \sqrt{\omega_0^2 - 2\beta^2}$
---------------------	--	---------------------	--

Учебное издание

КУЗНЕЦОВ Сергей Иванович

# Краткий справочник по физике Часть II

## Электричество и магнетизм. Электромагнитные колебания и волны.

Учебное пособие

Научный редактор  
доктор педагогических наук, профессор  
*В.В. Ларионов*

Редактор *Н.Т. Синельникова*  
Верстка *Л.А. Егорова*

**Отпечатано в Издательстве ТПУ в полном соответствии  
с качеством предоставленного оригинал-макета**

Подписано к печати      Формат 60×84/16.  
Бумага «Снегурочка». Печать Хегох.  
Усл. печ. л. 13,46. Уч.-изд. л. 12,37.  
Заказ                      . Тираж                      экз.



Национальный исследовательский  
Томский политехнический университет  
Система менеджмента качества  
Томского политехнического университета сертифицирована  
NATIONAL QUALITY ASSURANCE по стандарту ISO 9001:2000



**ИЗДАТЕЛЬСТВО** **ТПУ**. 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30.  
Тел./факс: 8(3822)56-35-35, www.tpu.ru