

**ЭЛЕКТРИЧЕСТВО
И
МАГНЕТИЗМ
ОСНОВНАЯ**

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

- Курс общей физики [Текст]/И.В. Савельев.- СПб.: Лань, 2011.
- Общий курс физики [Текст]/Д.В. Сивухин.- М.: Физматлит, 2008.
- Курс физики: электричество [Текст]/Р.В. Телеснин, В.Ф. Яковлев.- М.: Наука, 1970.
- Электричество [Текст]/С.Г. Калашников.- М.: Физматлит, 2008.
- Сборник задач по общему курсу физики [Текст]/В.С. Волькенштейн.- М.: Книжный мир, 2008.
- Задачи по общей физике [Текст]/И.Е. Иродов.- М.: Бином. Лаборатория знаний, 2012.

Электричество и магнетизм

- Электростатика
- Постоянный электрический ток
- Электромагнетизм

§ 1. Взаимодействие тел

В основе всех физических явлений лежит взаимодействие между телами или частицами, участвующими в этих явлениях. Земля движется вокруг Солнца из-за того, что взаимодействует с ним. Этим взаимодействием является притяжение Земли и Солнца по закону всемирного тяготения. Притяжение или отталкивание двух электрических зарядов — это их электрическое взаимодействие. Отталкивание или притяжение магнитных полюсов или токов — это магнитное взаимодействие. Столкновение бильiardных шаров, сжатие человеком пружины, давление подошвы на землю — все это примеры взаимодействия тел.

Согласно представлениям современной физики всякое взаимодействие передается через некоторое поле. Земля взаимодействует с Солнцем через гравитационное поле. Солнце создает гравитационное поле, которое действует на Землю. Земля, в свою очередь, создает поле, которое действует на Солнце. Это второе поле гораздо слабее первого, но зато помещенное в него тело (Солнце) гораздо больше. В результате оказывается, что силы, действующие на оба тела, равны в соответствии с третьим законом Ньютона.

Электрические заряды взаимодействуют через электрическое поле, которое они создают, магниты и электрические токи — через магнитное поле. Частицы в атомном ядре — протоны и нейтроны — взаимодействуют через так называемое π -мезонное поле. Каждая частица создает поле, и это поле уже действует на другую частицу.

Если всякое взаимодействие передается через поле, то спрашивается, через какое же поле взаимодействуют рука и камень, пружина и связывающая ее веревка, бильiardные шары, подошва и земля, т. е. чем объясняется существование обычных сил, возникающих при соприкосновении предметов? Оказывается, это электромагнитное взаимодействие. Атомы соприкасающихся тел сближаются на расстояния порядка размеров самих атомов. Быстро вращающиеся вокруг ядер отрицательно заряженные электроны и положительно заряженные ядра создают электромагнитное поле, которое и осуществляет взаимодействие при соприкосновении.

Но не только взаимодействие между различными телами, а и само существование твердых и жидких тел обусловлено взаимодействием между атомами. Именно благодаря этому взаимодействию твердые и жидкие тела не распадаются на отдельные атомы.

- **Электростатика** – раздел физики, изучающий взаимодействие и свойства систем электрических зарядов неподвижных относительно выбранной инерциальной системы отсчета.
- **Электрический заряд** – мера электрических свойств тел или их составных частей.

Термин ввел Б.Франклин в 1749 г. Он же – «батарея», «конденсатор», «проводник», «заряд», «разряд», «обмотка».

1.1.1. Электрический заряд. Закон сохранения электрического заряда

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

Перемещение зарядов либо отсутствует, либо происходит так медленно, что возникающие при движении зарядов магнитные поля ничтожны. Сила взаимодействия между зарядами определяется только их взаимным расположением. Следовательно, энергия электростатического взаимодействия – потенциальная энергия.

**Закон сохранения электрического заряда. Электрическое поле.
Напряженность электрического поля точечного заряда.
Принцип суперпозиции. Расчет электрического поля**

Электростатика – раздел классической физики, который изучает взаимодействие неподвижных электрических зарядов и свойства постоянного электрического поля.

Электрический заряд – это внутреннее свойство тел или частиц, характеризующее их способность к электромагнитным взаимодействиям. Заряд q определяют в кулонах (Кл).

Существует *элементарный* (минимальный) *электрический заряд*

$$e = 1,60 \cdot 10^{-19} \text{ Кл.}$$

Носитель элементарного отрицательного заряда – электрон. Его масса $m_e = 9,11 \cdot 10^{-31}$ кг. Носитель элементарного положительного заряда – протон. Его масса $m_p = 1,67 \cdot 10^{-27}$ кг.

Несмотря на обилие различных веществ в природе существуют только два вида электрических зарядов: заряды подобные тем, которые возникают на стекле, потертом о шелк, и заряды, подобные тем, которые появляются на янтаре, потертом о мех. Первые были названы положительными, вторые – отрицательными зарядами. Так их назвал американский ученый Бенджамин Франклин в 1746 г. Одним из фундаментальных законов природы является закон сохранения электрического заряда: *алгебраическая сумма зарядов замкнутой системы сохраняется при любых процессах, проходящих внутри этой системы.*

Электрические заряды не существуют сами по себе, а являются внутренними свойствами элементарных частиц – электронов, протонов и др.

Заряд всех элементарных частиц одинаков по модулю.

Имеются два типа электрических зарядов: положительный заряд, подобный возникающему заряду на стекле, потертом о кожу; отрицательный заряд, подобный возникающему на эбоните, потертом о мех.



Опытным путем в 1914 г. американский физик Р. Милликен показал, что *электрический заряд дискретен*. Заряд любого тела составляет целое кратное от *элементарного электрического заряда* $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл:

$$q = \pm ne,$$

где n – целое число.

Электрон и *протон* являются соответственно носителями элементарных отрицательного и положительного зарядов.

Экспериментально установлены следующие *фундаментальные свойства* электрического заряда:

1. Электрический заряд существует в двух видах: положительном и отрицательном. Одноименные заряды притягиваются, разноименные – отталкива-

2. Электрический заряд инвариантен – его величина не зависит от системы отсчета и, следовательно, не зависит от того движется он или покоится.

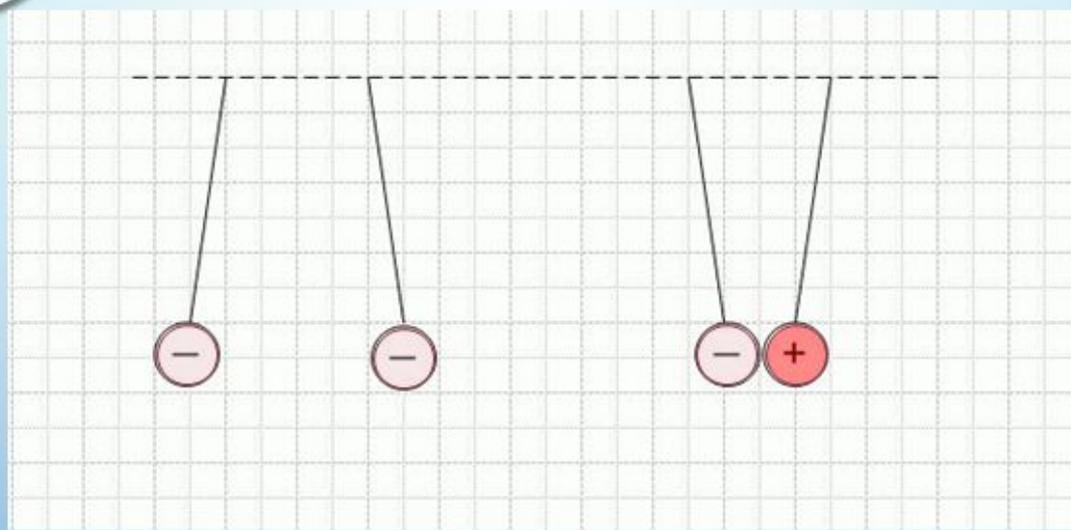
3. Электрический заряд дискретен – заряд любого тела составляет целое кратное элементарного электрического заряда e .

4. Электрический заряд аддитивен – заряд любой системы тел (частиц) равен сумме зарядов тел (частиц), входящих в систему.

В 1747 г. Франклин сформулировал, а М. Фарадей в 1843 г. доказал **закон сохранения электрического заряда**:

алгебраическая сумма электрических зарядов любой замкнутой системы остается неизменной, какие бы процессы ни происходили внутри данной системы.

Под замкнутой системой в данном законе понимается *электрически изолированная система*, которая не обменивается зарядами с внешними телами.



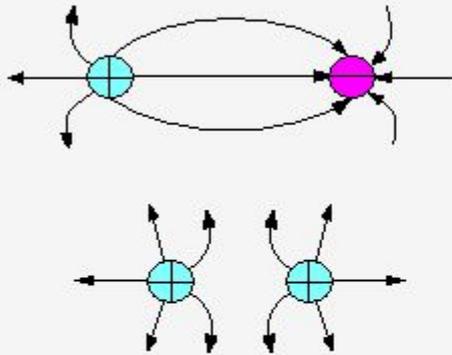
одноименные - отталкиваются,
разноименные - притягиваются

Электрический заряд – это физическая величина, характеризующая свойство частиц или тел вступать в электромагнитные силовые взаимодействия.

Обозначение - q или Q

Единица измерения — 1Кл (Кулон) = 1А·1с

- Есть два вида зарядов – положительный и отрицательный. Одноименные заряды отталкиваются, а разноименные – притягиваются друг другом.



Элементарный заряд « e »: электрон – « $-e$ », протон – « $+e$ »

Любой заряд – совокупность элементарных: $q = Ne$, N – целое число. Таким образом, заряд может меняться только дискретно, кратно « e » - **квантование заряда**.

Заряд может возникать и исчезать, но только попарно – два элементарных заряда противоположных знаков. Суммарный заряд электрически изолированных систем не меняется:

$$\sum_i q_i = \text{const} \quad \text{- закон сохранения заряда}$$

Свойства электрических зарядов

2) *Закон сохранения заряда* –

фундаментальный закон (экспериментально подтвержден Фарадеем в 1845 г.)

Полный электрический заряд изолированной системы есть величина постоянная.

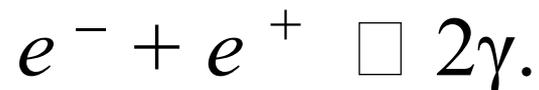
Полный электрический заряд – сумма

положительных и отрицательных зарядов, составляющих систему.

$$q_1 + q_2 + q_3 + \dots + q_n = \text{const}$$

- В соответствии с законом сохранения заряда разноименные заряды рождаются и исчезают попарно: сколько родилось (исчезло) положительных зарядов, столько родилось (исчезло) отрицательных зарядов.
- Два элементарных заряда противоположных знаков в соответствии с законом сохранения заряда всегда рождаются и исчезают одновременно.

Пример: электрон и позитрон, встречаясь друг с другом, аннигилируют, рождая два или более гамма-фотонов.



Свойства электрических зарядов

- 3) Электрический заряд – *инвариант*, его величина не зависит от выбора системы отсчета.
- 4) Электрический заряд – *величина релятивистки инвариантная*, не зависит от того движется заряд или покоится.
- 5) *Квантование заряда*, электрический заряд дискретен, его величина изменяется скачком.
- Опыт Милликена (1910 – 1914 г.)

$q = \pm n \cdot e$, где n – целое число. Заряд любого тела составляет целое кратное от элементарного электрического заряда

$$e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл (Кулон).}$$

1.1.2. Взаимодействие электрических зарядов в вакууме. Закон Кулона

Точечным зарядом (q) называется заряженное тело, размеры которого пренебрежительно малы по сравнению с расстоянием до других заряженных тел, с которым оно взаимодействует.

В результате опытов Кулон установил, что *сила взаимодействия точечных зарядов в вакууме пропорциональна величине зарядов и обратно пропорциональна квадрату расстояния между ними:*

$$F = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1 q_2}{r^2}, \quad (1.1.1)$$

где $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \frac{\text{Кл}^2}{\text{Н} \cdot \text{м}^2} = 8,85 \cdot 10^{-12} \frac{\text{Ф}}{\text{м}}$ – электрическая постоянная;

множитель 4π выражает сферическую симметрию закона Кулона.

В векторной форме закон Кулона имеет следующий вид:

$$\vec{F} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1 q_2 |\vec{r}|}{r^3}, \quad (1.1.2)$$

где $\frac{\vec{r}_{12}}{r_{12}}$ – единичный вектор, направленный от положительного заряда к отрицательному.

В электростатике взаимодействие зарядов подчиняется *третьему закону Ньютона*: силы взаимодействия между зарядами равны по величине и направлены противоположно друг другу вдоль прямой, связывающей эти заряды (рис. 1.1.1).

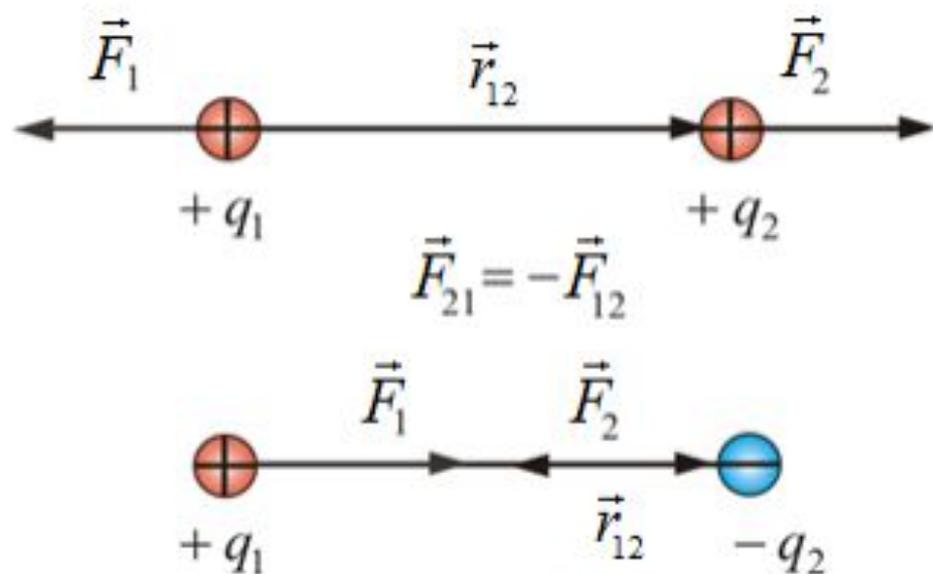


Рис. 1.1.1

Для определения силы взаимодействия тел, которые не могут рассматриваться как точечные заряды, необходимо разбивать эти тела на элементарные участки, а затем интегрировать по объему.

Закон Кулона справедлив при расстояниях $10^{-15} < r < 10^7$ м. Внутри ядра действуют уже другие силы, не кулоновские.

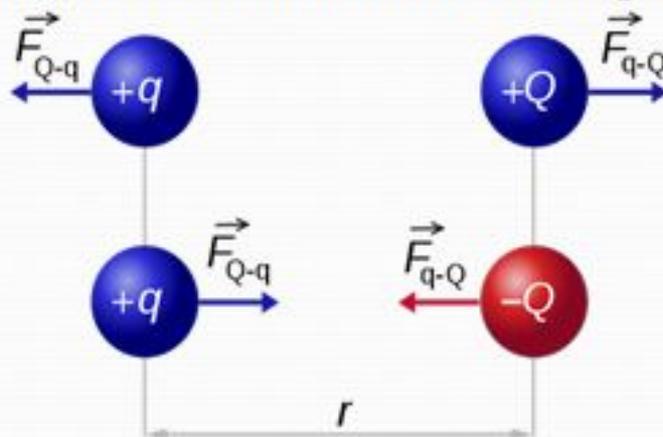
Шарль Огюстен Кулон

(1736-1806) - французский физик и инженер



Сила взаимодействия двух точечных неподвижных зарядов пропорциональна произведению модулей этих зарядов и обратно пропорциональна квадрату расстояния между ними.

Кулоновская сила - центральная, направлена вдоль прямой, соединяющей эти заряды.



$$|F_{Q-q}^{\rightarrow}| = |F_{q-Q}^{\rightarrow}| = k \frac{|q \times Q|}{r^2}$$

$$k = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} = 9 \cdot 10^9 \frac{\text{Н} \cdot \text{м}^2}{\text{Кл}^2}; \quad \epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \frac{\text{Кл}^2}{\text{Н} \cdot \text{м}^2} \text{ или } \left(\frac{\Phi}{\text{м}} \right)$$

1.1.3. Электростатическое поле. Напряженность поля

Вокруг заряда всегда есть электрическое поле, основное свойство которого заключается в том, что на всякий другой заряд, помещенный в это поле, действует сила. Электрическое поле обеспечивает взаимодействие электрических зарядов.

Электрические и магнитные поля – частный случай более общего – электромагнитного поля (ЭМП). Они могут порождать друг друга, превращаться друг в друга. Если заряды не движутся, то магнитное поле не возникает.

ЭМП – не абстракция, а объективная реальность – форма существования материи, обладающая определенными физическими свойствами, которые мы можем измерить.

Электрическое поле

Электрическое поле – особый вид материи, при помощи которой осуществляется взаимодействие между электрическими зарядами. Точно также как всякий объект, обладающий гравитационной массой m , создает вокруг себя поле тяготения, так и всякий электрический заряд (в данном случае рассматриваем его как физический объект) меняет определенным образом свойства окружающего его пространства.

СВОЙСТВА ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ

1. Электрические заряды – источники (стоки) поля, то есть другими словами, электрическое поле порождается электрическими зарядами.
2. Электрическое поле обнаруживается по действию на заряд.
3. Электрическое поле действует на внесенные в него заряды с некоторой силой.

Если заряды, создающие поле неподвижны относительно наблюдателя, то такое поле называется **электростатическим**.

Не существует статических электрических полей, не связанных с зарядами, как не существует «голых», не окруженных полем зарядов.

Силовой характеристикой поля, создаваемого зарядом q , является отношение силы, действующей на заряд, к величине этого заряда, называемое *напряженностью электростатического поля*, т.е.

$$E = \frac{F}{q} = \frac{q}{4\pi\epsilon_0 r^2}, \quad (1.1.3)$$

или в векторной форме –

$$\vec{E} = \frac{q}{4\pi\epsilon_0 r^2} \frac{\vec{r}}{r}, \quad (1.1.4)$$

здесь r – расстояние от заряда до точки, где мы изучаем это поле. Тогда

$$\vec{F} = q\vec{E} \text{ и, при } q = +1, \vec{F} = \vec{E}.$$

Вектор напряженности электростатического поля равен силе, действующей в данной точке на помещенный в нее пробный единичный положительный заряд.

Направление вектора напряженности определяет направление силы, действующей на положительный заряд, помещенный в рассматриваемую точку.

Единица измерения напряженности электростатического поля – **Вольт на метр** (В/м).

$$\text{В СИ } E = \frac{q}{4\pi\epsilon_0 r^2}, \text{ размерность напряженности } [E] = \frac{\text{Н}}{\text{Кл}} \text{ или } \frac{\text{В}}{\text{м}}.$$

- **НАПРЯЖЕННОСТЬ** – СИЛОВАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ

- **НАПРЯЖЕННОСТЬ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО**

ПОЛЯ В ДАННОЙ ТОЧКЕ ЧИСЛЕННО РАВНА СИЛЕ, С КОТОРОЙ ПОЛЕ ДЕЙСТВУЕТ НА ЕДИНИЧНЫЙ ПОЛОЖИТЕЛЬНЫЙ ЗАРЯД, ПОМЕЩЕННЫЙ В ЭТУ ТОЧКУ

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

$$\frac{Н}{Кл}; \frac{В}{м}$$

- **ЕДИНИЦА ИЗМЕРЕНИЯ:**
- **НАПРЯЖЕННОСТЬ ПОЛЯ ТОЧЕЧНОГО ЗАРЯДА:**

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

Как и в случае гравитационных полей, электрическое поле имеет две основные характеристики: силовую (**напряженность**) и энергетическую (**потенциал**).

Чтобы сила, действующая на заряд, характеризовала поле в данной точке, этот заряд (пробный) должен быть **точечным**.

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q_{\text{пр}}}$$

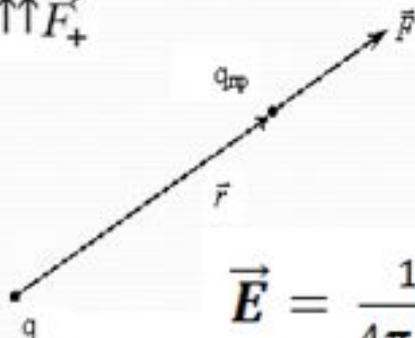
$$[E] = [1 \text{ Н/Кл}] = [1 \text{ В/м}]$$

Вектор напряженности направлен **от заряда**, если заряд положительный, и **к заряду**, если он отрицательный

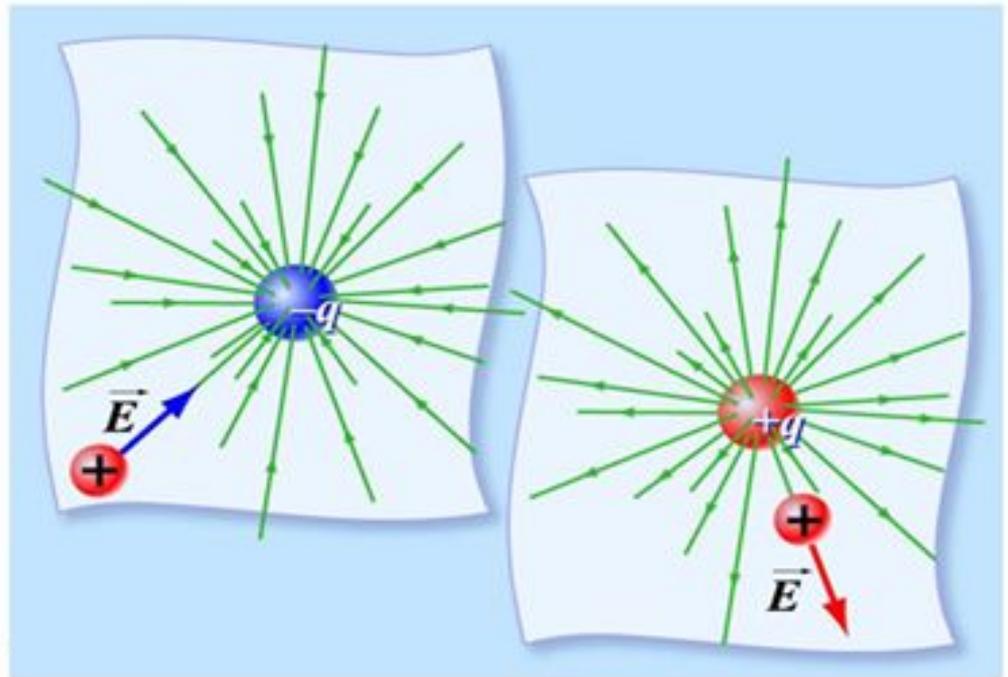
$$\vec{F} = q_{\text{пр}} \left(\frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{r^2} \vec{e}_r \right)$$

Здесь \vec{e}_r - орг \vec{r} .

$$\vec{E} \parallel \vec{F}_+$$

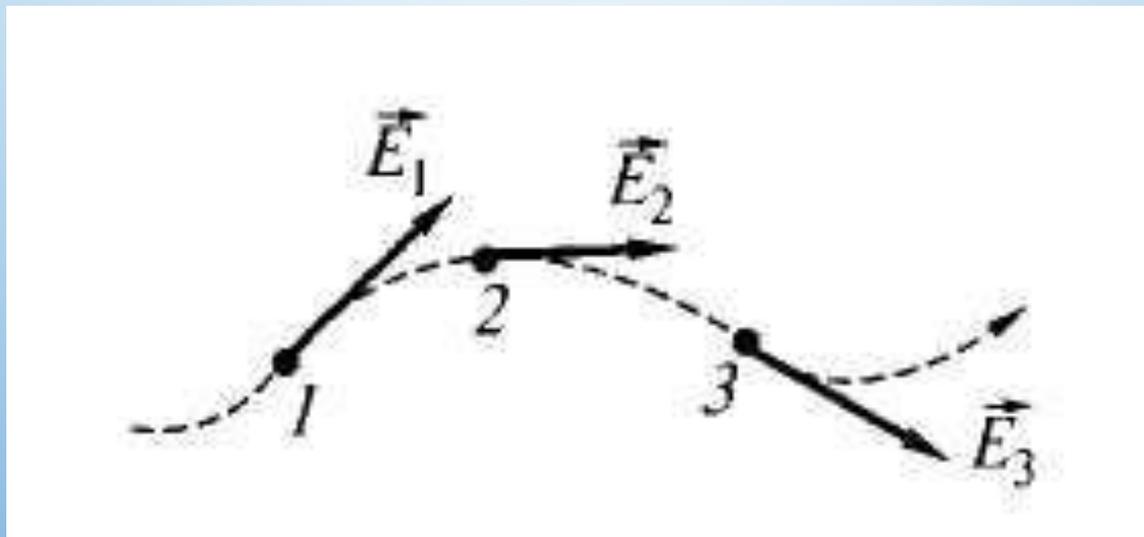


$$\vec{E} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{r^2} \vec{e}_r$$



Линии напряженности

электростатического поля- линии, касательные к которым в каждой точке поля совпадают по направлению с вектором напряженности поля.



1.1.4. Сложение электростатических полей. Принцип суперпозиции

Одним из фундаментальных принципов физики является *принцип независимости действия сил, или принцип суперпозиции*, который распространяется и на электростатику.

Если поле создается несколькими точечными зарядами, то на пробный заряд q действует со стороны заряда q_k такая сила, как если бы других зарядов не было.

Результирующая сила определится выражением:

$$\vec{F} = \sum_k \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{qq_k}{r_k^2} \frac{\vec{r}_k}{r_k} = \sum_k \vec{F}_k$$

– это математическая формулировка *принципа суперпозиции*.

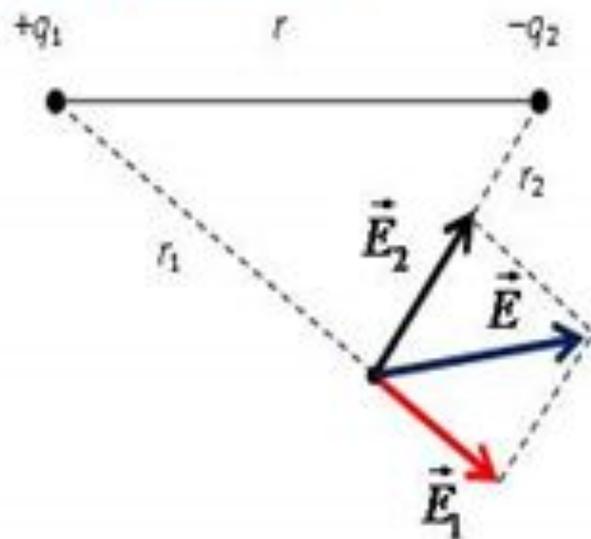
Так как $\vec{F} = q\vec{E}$, то \vec{E} – результирующая напряженность поля в точке, где расположен пробный заряд; так же *подчиняется принципу суперпозиции*:

$$\vec{E} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2 + \dots = \sum_k \vec{E}_k. \quad (1.1.5)$$

Напряженность результирующего поля системы точечных зарядов равна векторной сумме напряженностей полей, созданных в данной точке каждым из них в отдельности.

Принцип суперпозиции электрических полей

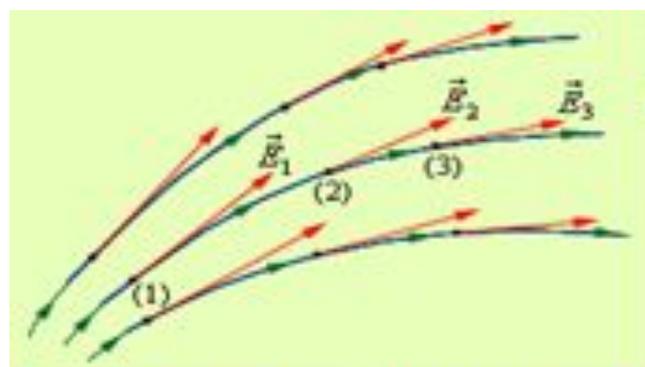
- Напряженность поля системы зарядов равна **векторной** сумме напряженностей полей, которые создавал бы каждый из зарядов системы в отдельности.



$$\vec{E} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2 + \dots + \vec{E}_n$$

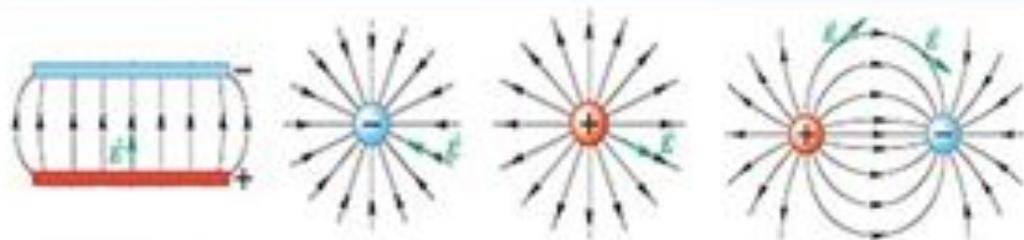
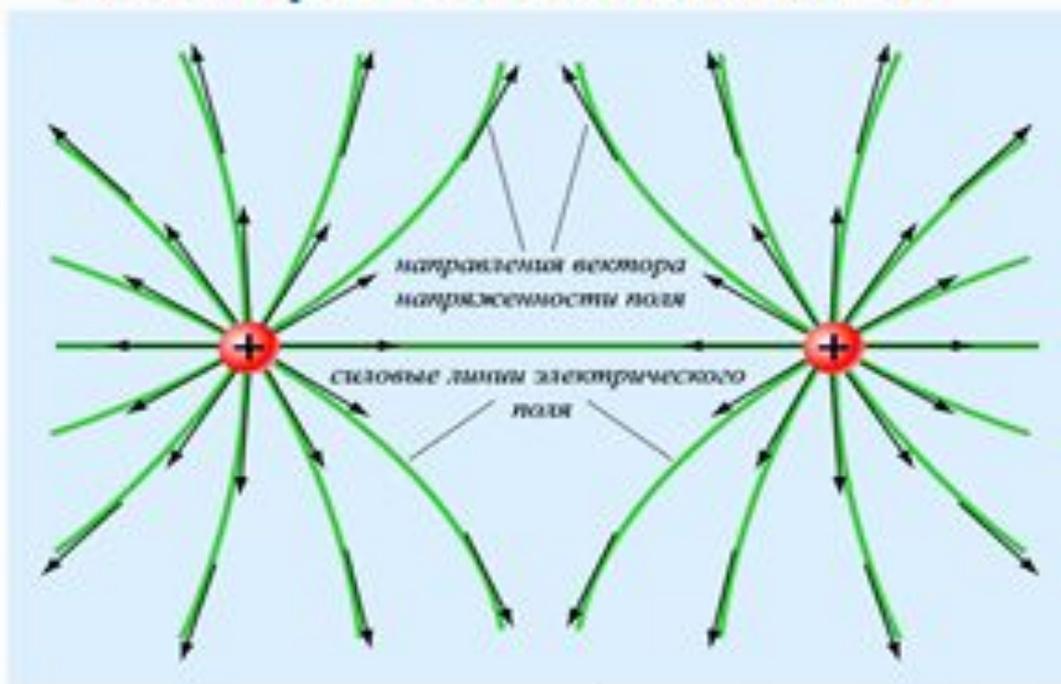
\vec{E} – вектор напряженности
резльтирующего электрического
поля

$\vec{E}_1, \vec{E}_2, \dots, \vec{E}_n$ – векторы напряженностей всех
электрических полей



Графическое изображение электрических полей

- Электрическое поле можно описать с помощью линий напряженности, которые называют **СИЛОВЫМИ ЛИНИЯМИ**. Линии напряженности проводят таким образом, чтобы касательная к ним в каждой точке совпала с направлением вектора напряженности. Густота линий выбирается таким образом, чтобы количество линий, пронизывающих единицу поверхности, перпендикулярной к линиям площадки, было равно числовому значению вектора напряженности.



1.3. Потенциальная энергия и работа электростатического поля. Связь напряженности с потенциалом

ПОТЕНЦИАЛ

ФИЗИЧЕСКАЯ ВЕЛИЧИНА, РАВНАЯ ОТНОШЕНИЮ ПОТЕНЦИАЛЬНОЙ ЭНЕРГИИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ЗАРЯДА В ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ ПОЛЕ К ЗАРЯДУ, НАЗЫВАЕТСЯ ПОТЕНЦИАЛОМ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ

$$\varphi = \frac{W_p}{q}$$

ПРИ ПЕРЕМЕЩЕНИИ ЗАРЯДА В
ПОЛЕ РАБОТА СИЛ ПОЛЯ РАВНА
ПРОИЗВЕДЕНИЮ ЗАРЯДА НА
РАЗНОСТЬ ПОТЕНЦИАЛОВ
НАЧАЛЬНОЙ И КОНЕЧНОЙ ТОЧЕК
ТРАЕКТОРИИ ДВИЖЕНИЯ ЗАРЯДА

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

17

$$\varphi = k \cdot \frac{q}{r}$$

Потенциал точечного заряда

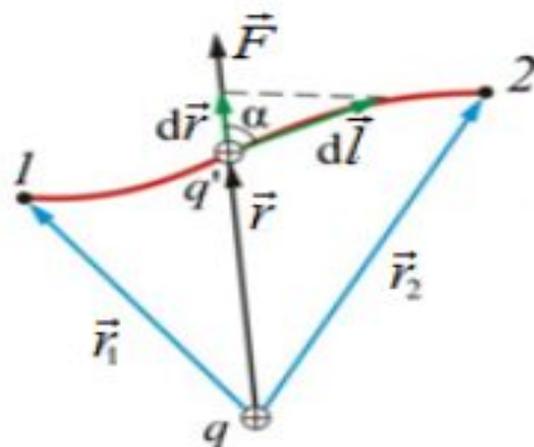
1.3.1. Работа сил электростатического поля

Между электростатическими полями и гравитационными прослеживается аналогия в форме написания законов взаимодействия. Однако этим аналогия не ограничивается. Как и гравитационное поле, электростатическое можно описать с помощью **потенциала**. Для этого необходимо *показать*, что силы электростатического поля, также как и гравитационные, **консервативны**, а само поле – **потенциально**.

Рассмотрим поле, создаваемое неподвижным точечным зарядом q . В любой точке этого поля на пробный точечный заряд q' действует сила \vec{F} (рис. 1.3.1), равная

$$\vec{F} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{qq'}{r^2} \frac{\vec{r}}{r} = F(r) \frac{\vec{r}}{r},$$

где $F(r)$ – модуль вектора силы \vec{F} ; $\frac{\vec{r}}{r}$ – единичный вектор, определяющий положение заряда q' относительно q ; ϵ_0 – электрическая постоянная.



Из раздела «Физические основы механики» известно, что *любое стационарное поле центральных сил является консервативным, т.е. работа сил этого поля не зависит от формы пути, а только от положения конечной и начальной точек.*

Вычислим работу, которую совершает электростатическое поле, созданное зарядом q по перемещению заряда q' из точки 1 в точку 2.

Работа на пути dl равна

$$dA = Fdl\cos\alpha = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{qq'}{r^2} dl\cos\alpha,$$

где dr – приращение радиус-вектора \vec{r} при перемещении на dl ; $dr = dl\cos\alpha$, т.е.

$$dA = \frac{qq'}{4\pi\epsilon_0 r^2} dr.$$

Тогда полная работа при перемещении q' из точки 1 в точку 2 равна интегралу

$$A_{12} = \frac{qq'}{4\pi\epsilon_0} \int_{r_1}^{r_2} \frac{dr}{r^2} = \frac{qq'}{4\pi\epsilon_0} \left(-\frac{1}{r} \right) \Big|_{r_1}^{r_2} = \frac{qq'}{4\pi\epsilon_0} \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right). \quad (1.3.1)$$

Таким образом, *работа электростатических сил не зависит от формы пути, а только лишь от координат начальной и конечной точек перемещения. Следовательно, силы поля консервативны, а само поле – потенциально.*

Этот вывод можно распространить и на поле, созданное системой зарядов, т. к. по принципу суперпозиции полей

$$\vec{E} = \sum_k \vec{E}_k.$$

Итак, как и в механике, любое стационарное поле центральных сил является консервативными, т.е. работа сил этого поля не зависит от формы пути, а только от положения начальной и конечной точек. Именно таким свойством обладает электростатическое поле – поле, образованное системой неподвижных зарядов. Если в качестве пробного заряда, перенесенного из точки 1 (рис. 1.3.2) заданного поля \vec{E} в точку 2, взять положительный единичный заряд q , то элементарная работа сил поля будет равна

$$dA = q\vec{E}d\vec{l}. \quad (1.3.2)$$

Тогда вся работа равна

$$A = q \int_1^2 \vec{E}d\vec{l}. \quad (1.3.3)$$

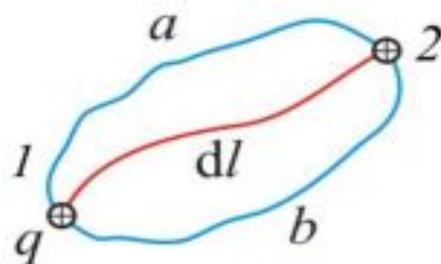


Рис. 1.3.2

Из независимости линейного интеграла от пути между двумя точками следует, что по **произвольному замкнутому пути**

$$\oint \vec{E} d\vec{l} = 0. \quad (1.3.4)$$

Такой интеграл по замкнутому контуру называется *циркуляцией вектора \vec{E}* , а формула (1.3.4) носит название **теорема о циркуляции \vec{E}** .

Для доказательства теоремы разобьем произвольно замкнутый путь на две части: *1a2* и *2b1* (рис. 1.3.2). Из сказанного выше следует, что

$$\int_1^2 E dl = - \int_2^1 E dl.$$

Интегралы по модулю равны, но знаки противоположны. Тогда работа по замкнутому пути

$$A = q \oint \vec{E} d\vec{l} = q \int_1^2 \vec{E} d\vec{l} - q \int_2^1 \vec{E} d\vec{l} = 0.$$

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

Потенциальная энергия электростатического поля

Значение константы выбирается таким образом, чтобы при удалении заряда на бесконечность потенциальная энергия обращалась в нуль. Тогда

$$W = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q q'}{r}$$

- Используем заряд q' в качестве пробного. Разные пробные заряды будут обладать в одной и той же точке поля различной энергией, но

$$\varphi = \frac{W}{q_{\text{пр}}} \quad \text{одно и то же}$$

Энергетическая характеристика поля – **потенциал** – численно равен потенциальной энергии, который обладал бы в данной точке поля единичный положительный заряд:

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

Физический смысл и единицы измерения потенциала

$$W = q \cdot \varphi$$

За единицу потенциала принимают потенциал в такой точке поля, для перемещения в которую из бесконечности единичного положительного заряда необходимо совершить $A = 1 \text{ Дж}$:

$$1[\varphi] = 1\text{В} = 1 \frac{\text{Дж}}{\text{Кл}}$$

Используются единицы W и A :

$$1\text{эВ} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл} \cdot 1\text{В} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Дж} \\ (\text{кэВ}, \text{МэВ}, \text{ГэВ})$$

$$A = W_1 - W_2 = q \cdot (\varphi_1 - \varphi_2)$$

Работа, совершаемая над зарядом силами поля, равна произведению величины заряда q на $(\varphi_1 - \varphi_2)$, т.е. на убыль потенциала.

Если заряд из точки с потенциалом φ удаляется на бесконечность (где $\varphi = 0$), то $A_\infty = q \cdot \varphi \Rightarrow$ потенциал численно равен A , которую совершают силы поля над единичным положительным зарядом при удалении его из данной точки на бесконечность. Такую же работу A надо совершить против сил электрического поля, чтобы переместить единичный положительный заряд из бесконечности в данную точку поля.

За единицу φ принимают потенциал в такой точке поля, для перемещения в которую из бесконечности единичного положительного заряда необходимо совершить работу, равную единице. В СИ единица потенциала $1 \text{ В} = 1 \text{ Дж/1 Кл}$. В физике часто используется единица энергии и работы, называемая электрон-вольт (эВ) – это работа, совершенная силами поля над зарядом, равным заряду электрона при прохождении им разности потенциалов 1 В , т.е.

$$1 \text{ эВ} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл} \cdot \text{В} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}.$$

Связь между силовой и энергетической характеристиками электростатического поля

Любое поле описывается при помощи двух основных характеристик: силовой (**напряженности**) и энергетической (**потенциала**)

$$\vec{F} = q\vec{E} \quad W = q\varphi$$

$$\vec{F} = -\nabla W$$

$$q\vec{E} = -\nabla q\varphi$$

$$\vec{E} = -\nabla\varphi$$

Работа, совершаемая силами поля над зарядом q при перемещении его из т.1 в т.2:

$$\left. \begin{aligned} A_{12} &= \int_1^2 q\vec{E} d\vec{l} \\ A_{12} &= q(\varphi_1 - \varphi_2) \end{aligned} \right\} \Rightarrow \varphi_1 - \varphi_2 = \int_1^2 \vec{E} d\vec{l}$$

Интеграл можно брать по любой линии, соединяющей т.1 и т.2, т.к. работа сил поля не зависит от пути. При обходе по замкнутому контуру:

$$\varphi_1 = \varphi_2$$

$$\oint \vec{E} d\vec{l} = 0$$

- только для электростатического поля

Направление *силовой линии* (линии напряженности) в каждой точке совпадает с направлением \vec{E} . Отсюда следует, что *напряженность \vec{E} равна разности потенциалов U на единицу длины силовой линии.*

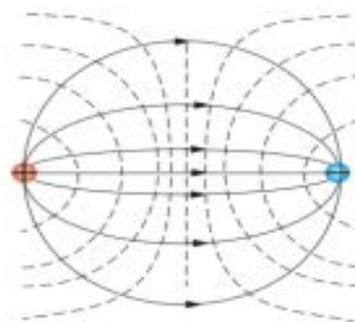
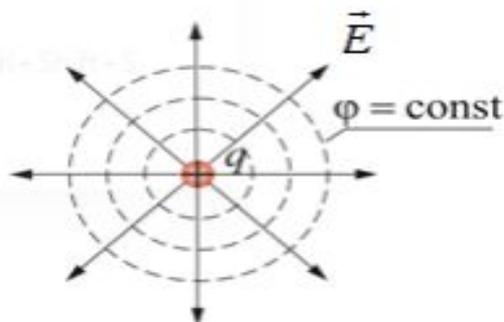
Именно вдоль силовой линии происходит максимальное изменение потенциала. Поэтому всегда можно определить \vec{E} между двумя точками, измеряя U между ними, причем тем точнее, чем ближе точки. В однородном электрическом поле силовые линии – прямые. Поэтому здесь определить \vec{E} наиболее просто:

$$E = \frac{U}{l} . \quad (1.3.21)$$

Теперь дадим определение *эквипотенциальной поверхности*. **Воображаемая поверхность, все точки которой имеют одинаковый потенциал, называется эквипотенциальной поверхностью.** Уравнение этой поверхности –

$$\varphi = \varphi(x, y, z) = \text{const} . \quad (1.3.22)$$

Графическое изображение силовых линий и эквипотенциальных поверхностей показано на рис. 1.3.3 а,б.



Вопросы к читателю. Упражнения

1. Какова связь между напряженностью и потенциалом электростатического поля? Выведите ее и объясните. Каков физический смысл этих понятий?
2. Чему равна работа по перемещению заряда вдоль эквипотенциальной поверхности?
3. Дайте определения потенциала данной точки электростатического поля и разности потенциалов двух точек поля. Каковы их единицы?

Металлы. Валентные электроны металла слабо связаны со своими атомами. Когда атомы металла, конденсируясь из металлического пара, образуют жидкий или твердый металл, внешние электроны оказываются уже не связанными с отдельными атомами и могут свободно перемещаться по всему телу. Эти электроны обуславливают хорошо известную значительную проводимость металлов, они так и называются электронами проводимости.

Атомы металла, лишенные своих валентных электронов, т. е. положительные ионы, составляют кристаллическую решетку. В кристаллической решетке ионы совершают хаотические колебания около своих положений равновесия, называемых узлами решетки. Эти колебания представляют собой тепловое движение решетки и усиливаются с повышением температуры.

Электронны проводимости в отсутствие электрического поля в металле совершают беспорядочное движение со скоростями порядка тысяч километров в секунду. При приложении напряжения к металлическому проводнику электроны проводимости, не ослабляя своего хаотического движения, сравнительно медленно «сносятся» электрическим полем вдоль проводника. При таком сносе все электроны получают, дополнительно к хаотической скорости, еще и небольшую скорость упорядоченного движения (порядка, например, миллиметров в секунду). Именно это слабое упорядоченное движение и обуславливает электрический ток в проводнике.

1.4. Диэлектрики в электростатическом поле

1.4.1. Поляризация диэлектриков

Все известные в природе вещества, в соответствии с их способностью проводить электрический ток, делятся на *три основных класса: диэлектрики, полупроводники и проводники*. Если удельное сопротивление у проводников равно $\rho_{\text{пр}} = 10^{-8} - 10^{-6}$ Ом·м, то у диэлектриков $\rho_{\text{д}} = 10^8 - 10^{18}$ Ом·м, а полупроводники занимают промежуточную область — $\rho_{\text{д}} > \rho_{\text{п/п}} > \rho_{\text{пр}}$.

В идеальном диэлектрике свободных зарядов, т.е. способных перемещаться на значительные расстояния (превосходящие расстояния между атомами), нет. Но это не значит, что диэлектрик, помещенный в электростатическое поле, не реагирует на него, что в нем ничего не происходит.

Любое вещество состоит из атомов, образованных положительными ядрами и отрицательными электронами. Поэтому в диэлектриках происходит *поляризация*.

Диэлектрики. Совсем иначе обстоит дело в других веществах, которые носят название изоляторов (на языке физики — диэлектриков). В диэлектриках атомы точно так же колеблются вокруг положений равновесия, как и в металлах, но они имеют полный комплект электронов. Внешние электроны атомов диэлектрика сильно связаны со своими атомами, и разлучить их не так-то просто. Для этого нужно значительно поднять температуру диэлектрика или подвергнуть его какому-нибудь интенсивному облучению, которое смогло бы оторвать электроны от атомов. В обычном же состоянии электронов проводимости в диэлектрике нет, и диэлектрики не пропускают тока.

Большая часть диэлектриков является не атомными, а молекулярными кристаллами или жидкостями. Это значит, что в узлах решетки находятся не атомы, а молекулы. Многие молекулы состоят из двух групп атомов или просто из двух атомов, один из которых электрически положителен, а другой отрицателен (такие молекулы называются полярными). Например, у молекулы воды положительной частью являются оба атома водорода, а отрицательной — атом кислорода, около которого большую часть времени вращаются электроны водородных атомов.

Два заряда, равные по величине, но противоположные по знаку, находящиеся на очень малом расстоянии друг от друга, называются *диполем*. Полярные молекулы представляют собой пример диполей. Если молекулы не состоят из противоположных по заряду ионов (заряженных атомов), т. е. не являются полярными и не представляют собой диполей, то они *становятся* диполями под действием электрического поля. Электрическое поле тянет положительные заряды, входящие в состав молекулы (например, ядра), в одну сторону, а отрицательные — в другую и, раздвигая их, создает диполи. Такие диполи называются упругими — поле растягивает их, как пружину. Поведение диэлектрика с неполярными молекулами мало отличается от поведения диэлектрика с полярными молекулами, и в дальнейшем мы всегда будем считать, что молекулы диэлектрика являются диполями.

Если кусок диэлектрика поместить в электрическое поле, т. е. поднести к диэлектрику электрически заряженное тело, обладающее, например, положительным зарядом, отрицательные концы молекул-диполей будут притягиваться к этому заряду, а положительные — отталкиваться. Из-за этого молекулы-диполи будут поворачиваться. Этот поворот называют ориентацией. Ориентация не представляет собой полного поворота всех молекул диэлектрика. Взятая наугад молекула в данный момент может оказаться повернутой против поля, и только в среднем у большого числа молекул существует слабая ориентация в сторону поля (т. е. больше молекул повернуто в сторону поля, чем в противоположную сторону). Ориентации препятствует тепловое движение — хаотические колебания молекул вокруг их по-

ложений равновесия. Чем ниже температура, тем сильнее ориентация молекул, вызываемая данным полем. С другой стороны, при данной температуре ориентация, естественно, тем сильнее, чем больше поле.

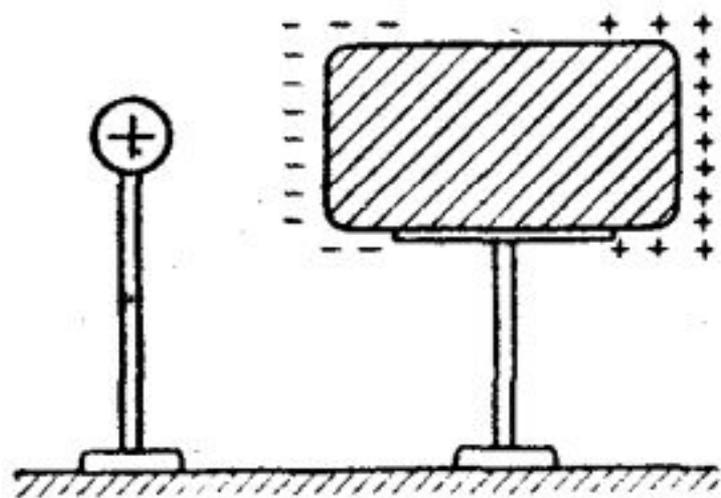


Рис. 1.

Поляризация диэлектрика. В результате ориентации молекул диэлектрика на поверхность его, обращенную к положительному заряду (рис. 1), выступают отрицательные концы молекул-диполей, а на противоположную поверхность — положительные. На поверхно-

стях диэлектрика образуются электрические заряды. Эти заряды носят название поляризационных, а их возникновение называется процессом *поляризации диэлектрика*.

Как следует из изложенного выше, поляризация, в зависимости от вида диэлектрика, может быть *ориентационной* (ориентируются готовые молекулы-диполи) и *деформационной*, или поляризацией электронного смещения (молекулы в электрическом поле деформируются, превращаясь в диполи).

Может возникнуть вопрос, почему поляризационные заряды образуются только на поверхностях диэлектрика, а не внутри его? Объясняется это тем, что внутри диэлектрика положительные и отрицательные концы молекул-диполей как раз компенсируют друг друга. Компенсация будет отсутствовать только на поверхностях диэлектрика или на границе раздела двух диэлектриков, а также в неоднородном диэлектрике.

Если диэлектрик поляризован, то это не значит, что он заряжен, т. е. что он имеет в целом электрический заряд. При поляризации общий заряд диэлектрика не меняется.

Однако диэлектрику можно сообщить заряд, перенося на него некоторое количество электронов извне или забирая некоторое число его собственных электронов. В первом случае диэлектрик зарядится отрицательно, а во втором — положительно.

Такую электризацию можно произвести, например, путем трения. Если потереть стеклянную палочку о шелк, то палочка и шелк зарядятся противоположными по знаку зарядами (стекло — положительно, шелк — отрицательно)*. У стеклянной палочки при этом будет отобрано некоторое число электронов (весьма малая доля общего числа электронов, принадлежащих всем атомам стеклянной палочки, — что-нибудь около 10^{-11} — 10^{-17}).

Поляризация диэлектрика включает составляющие – электронную, ионную и ориентационную (дипольную). На рис. 1.4.1 проиллюстрированы механизмы этих видов поляризации.

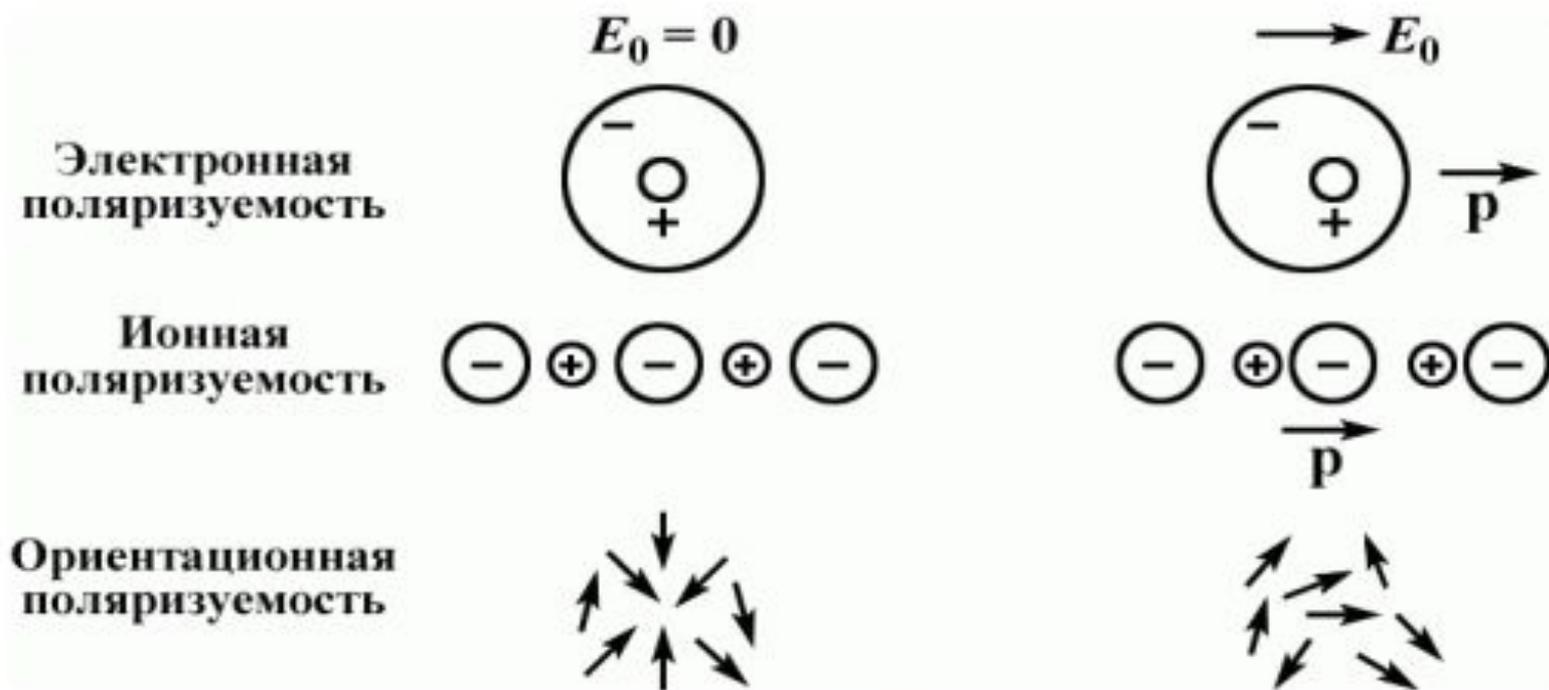


Рис. 1.4.1

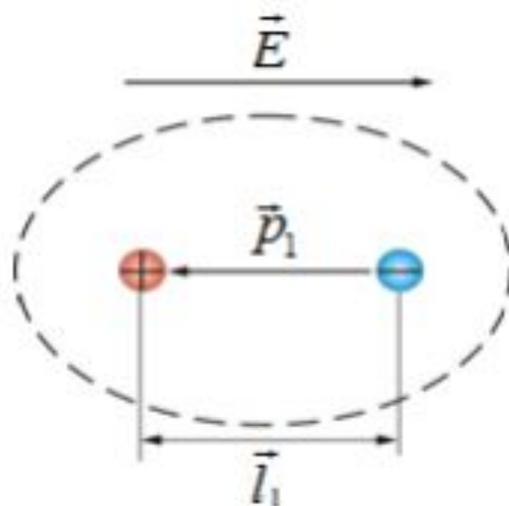
Электронная поляризуемость обусловлена смещением электронной оболочки атома относительно ядра. Ионная поляризуемость вызвана смещением заряженных ионов по отношению к другим ионам. Ориен-

тационная (дипольная) поляризуемость возникает, когда вещество состоит из молекул, обладающих постоянными электрическими дипольными моментами, которые могут более или менее свободно изменять свою ориентацию во внешнем электрическом поле.

Есть и другие виды поляризации. Главное в поляризации – смещение зарядов в электростатическом поле. В результате каждая молекула или атом образует электрический момент p (рис. 1.4.2):

$$p_1 = ql_1, \text{ или } \vec{p}_1 = q\vec{l}_1. \quad (1.4.1)$$

Ясно, что электрический момент p пропорционален напряженности E – напряженности электростатического поля в месте нахождения молекулы, т.е. внутри вещества.



Поверхностная плотность поляризационных зарядов равна нормальной составляющей вектора поляризации в данной точке поверхности.

Отсюда следует, что индуцированное в диэлектрике электростатическое поле E' будет влиять только на нормальную составляющую вектора напряженности электростатического поля \vec{E} .

Результирующая электростатического поля в диэлектрике равна внешнему полю, деленному на диэлектрическую проницаемость среды ε :

$$E = \frac{E_0}{\varepsilon}. \quad (1.4.9)$$

Величина $\varepsilon = 1 + \chi$ характеризует электрические свойства диэлектрика. Физический смысл диэлектрической проницаемости среды ε – величина, показывающая, во сколько раз электростатическое поле внутри диэлектрика меньше, чем в вакууме:

$$\varepsilon = \frac{E_0}{E}. \quad (1.4.10)$$

$\chi = \rho\alpha$ – диэлектрическая восприимчивость – макроскопическая безразмерная величина, характеризующая поляризацию единицы объема.

1.4.2. Различные виды диэлектриков

До сих пор мы рассматривали диэлектрики, которые приобретают электрический момент во внешнем электростатическом поле. Но есть и другие диэлектрики, например: сегнетоэлектрики, пьезоэлектрики.

Сегнетоэлектрики

В 1920 г. была открыта *спонтанная* (самопроизвольная) *поляризация*. Сначала её обнаружили у кристаллов сегнетовой соли ($\text{NaKC}_4\text{H}_4\text{O}_6 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$), а затем и у других кристаллов. Всю эту группу веществ называли *сегнетоэлектрики* (или *ферроэлектрики*). Детальное исследование диэлектрических свойств этих веществ было проведено в 1930 – 1934 гг. И.В. Курчатовым в ленинградском физическом техникуме. Все сегнетоэлектрики обнаруживают резкую анизотропию свойств (сегнетоэлектрические свойства могут наблюдаться только вдоль одной из осей кристалла). У изотропных диэлектриков поляризация всех молекул одинакова, у анизотропных поляризация и, следовательно, вектор поляризации \vec{P} в разных направлениях разные. В настоящее время известно несколько сотен сегнетоэлектриков.

Рассмотрим *основные свойства сегнетоэлектриков*:

1. Диэлектрическая проницаемость ϵ в некотором температурном интервале велика ($\epsilon \sim 10^3 - 10^4$).

2. Значение ϵ зависит не только от внешнего поля E_0 , но и от предыстории образца.

3. Диэлектрическая проницаемость ϵ , а следовательно и P нелинейно зависят от напряженности внешнего электростатического поля (*нелинейные диэлектрики*).

Это свойство называется *диэлектрическим гистерезисом*. На рис. 1.4.6 изображена кривая поляризации сегнетоэлектрика – *петля гистерезиса*.

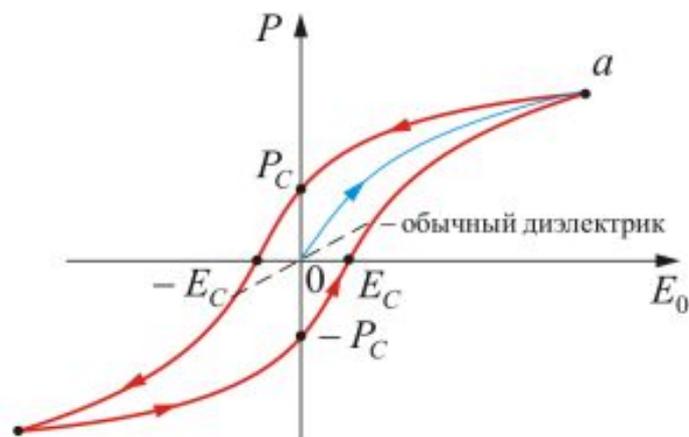


Рис. 1.4.6

Здесь точка a – *состояние насыщения*.

При $E_0 = 0$ $P \neq 0$; это говорит о том, что в кристаллах имеется *остаточная поляризованность* P_C ; чтобы ее уничтожить, необходимо приложить E_C – *коэрцитивную силу* противоположного направления.

4. Наличие точки Кюри – температуры, при которой сегнетоэлектрические свойства пропадают. При этой температуре происходит фазовый переход 2-го рода. (Например, для титанита бария она равна $+133\text{ }^{\circ}\text{C}$; для сегнетовой соли: $-18\dots+24\text{ }^{\circ}\text{C}$; для дигидрофосфата калия: $-150\text{ }^{\circ}\text{C}$; для ниобата лития: $+1210\text{ }^{\circ}\text{C}$).

Причиной сегнетоэлектрических свойств является самопроизвольная (спонтанная) поляризация, возникающая под действием особо сильного взаимодействия между частицами, образующими вещество.

Стремление к минимальной потенциальной энергии и наличие дефектов структуры приводят к тому, что сегнетоэлектрик разбит на **домены** (рис. 1.4.7). Без внешнего поля P электрический импульс кристалла равен нулю (рис. 1.4.7, *а*). Во внешнем электростатическом поле домены ориентируются вдоль поля (рис. 1.4.7, *б*).

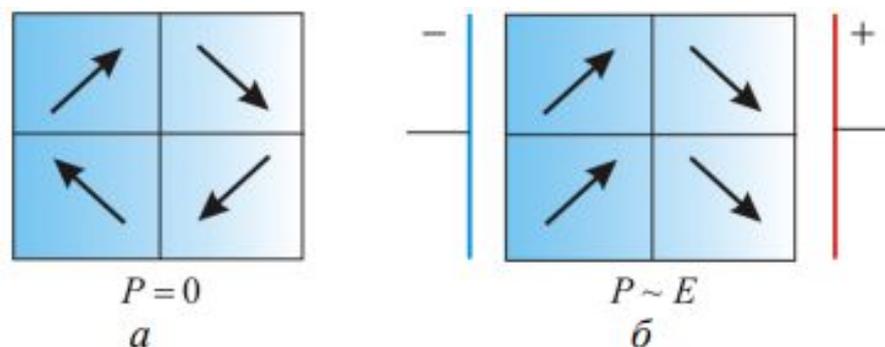


Рис. 1.4.7

Сегнетоэлектрики используются для изготовления многих радиотехнических приборов, например варикондов, – конденсаторов с изменяемой емкостью.

Среди диэлектриков есть вещества, называемые *электреты*, – это диэлектрики, длительно сохраняющие поляризованное состояние после снятия внешнего электростатического поля.

Электреты являются формальными аналогами постоянных магнитов, создающих вокруг себя магнитное поле. Принципиальная возможность получения таких материалов была предсказана Фарадеем. Термин «электрет» был предложен Хевисайдом в 1896 г. по аналогии с английским «magnet» – постоянный магнит, а первые электреты получены японским исследователем Егучи в 1922 г. Егучи охладил в сильном электрическом поле расплав карнаубского воска и канифоли. Электрическое поле сориентировало полярные молекулы, и после охлаждения материал остался в поляризованном состоянии. Для уточнения технологии такие материалы называют *термоэлектретами*.

Пьезоэлектрики

Некоторые диэлектрики поляризуются не только под действием электростатического поля, но и под действием механической деформации. Это явление называется *пьезоэлектрическим эффектом*.

Явление открыто братьями Пьером и Жаком Кюри в 1880 г.

Если на грани кристалла наложить металлические электроды (обкладки), то при деформации кристалла с помощью силы \vec{F} на обкладках возникнет разность потенциалов. Если замкнуть обкладки, то потечет ток.

Продемонстрировать пьезоэффект можно рис. 1.4.8. а, б, в

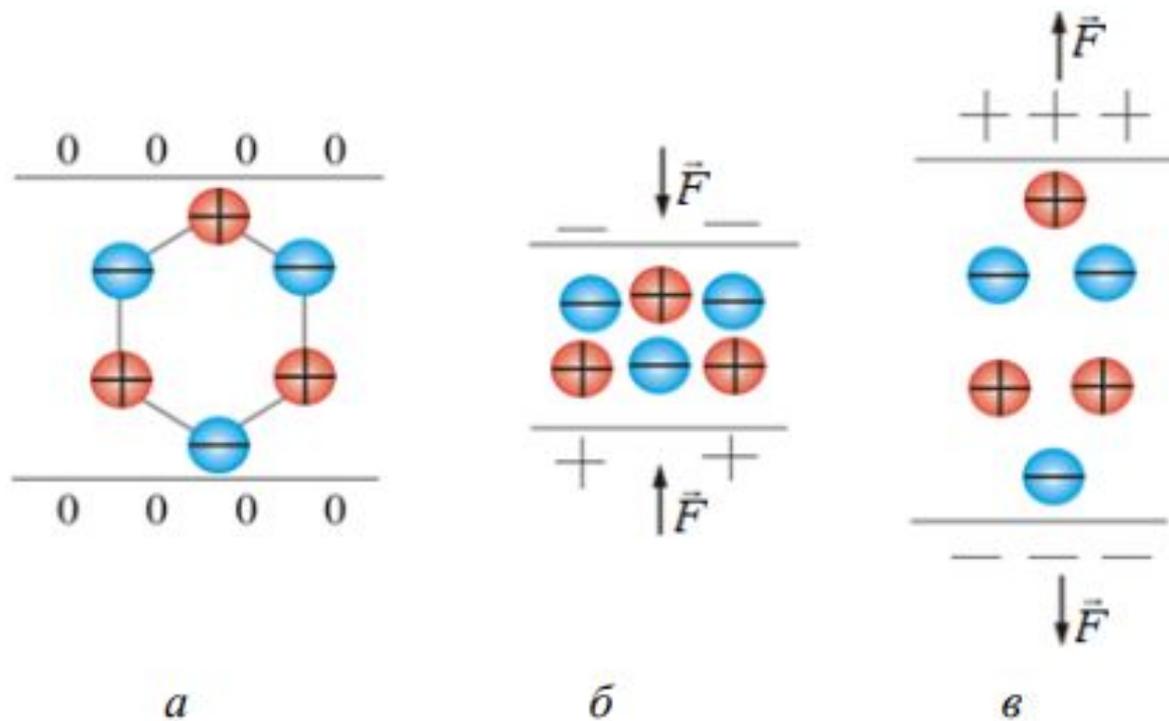


Рис. 1.4.8

Сейчас известно более 1800 пьезокристаллов. Все сегнетоэлектрики обладают пьезоэлектрическими свойствами.

Возможен и обратный пьезоэлектрический эффект. Возникновение поляризации сопровождается механическими деформациями. Если на пьезоэлектрический кристалл подать напряжение, то возникнут механические деформации кристалла, причем деформации будут пропорциональны приложенному электростатическому полю E_0 .

Пироэлектрики

Кроме сегнетоэлектриков, спонтанно поляризованными диэлектриками являются *пироэлектрики* (от греч. *pur* – огонь). Пироэлектрики – это кристаллические диэлектрики, обладающие спонтанной электрической поляризацией во всей температурной области, вплоть до температуры плавления.

В отличие от сегнетоэлектриков в пироэлектриках поляризация P линейно зависит от величины внешнего электрического поля, т.е. пироэлектрики являются линейными диэлектриками.

Пироэлектричество – появление электрических зарядов на поверхности некоторых кристаллов при их нагревании или охлаждении. При нагревании один конец диэлектрика заряжается положительно, а при охлаждении он же – отрицательно. Появление зарядов связано с изменением существующей поляризации при изменении температуры кристаллов. Типичный пироэлектрик – турмалин.

Все пирозлектрики являются пьезоэлектриками, но не наоборот. Некоторые пирозлектрики обладают сегнетоэлектрическими свойствами. Из сказанного следует, что понятие «пирозлектрик» является более общим, чем «сегнетоэлектрик». Можно сказать, что сегнетоэлектрики есть пирозлектрики с восстанавливаемой внешним полем поляризацией.

В пирозлектриках *поляризация P линейно зависит* от величины внешнего электростатического поля E_0 , т.е. пирозлектрики являются *линейными диэлектриками*.

В качестве примеров использования различных диэлектриков можно привести следующие:

- сегнетоэлектрики – электрические конденсаторы, ограничители предельно допустимого тока, запоминающие устройства;
- пьезоэлектрики – генераторы ВЧ и пошаговые моторы, микрофоны, наушники, датчики давления, частотные фильтры, пьезоэлектрические адаптеры;
- пирозлектрики – детекторы ИК-излучения, болометры (датчики инфракрасного излучения), электрооптические модуляторы.

Вопросы к читателю. Упражнения

1. Что такое поляризованность?
2. Что показывает диэлектрическая проницаемость среды?
3. Выведите связь между диэлектрической восприимчивостью вещества и проницаемостью среды.
4. В чем различие поляризации диэлектриков с полярными и неполярными молекулами?
5. Есть ли свободные заряды в идеальном диэлектрике?
6. Какие виды поляризуемости вы знаете?
7. Назовите 3 основных класса веществ в соответствии с их способностью проводить электрический ток

1.5. Проводники в электростатическом поле

1.5.1. Напряженность и потенциал электростатического поля в проводнике

В проводниках имеются электрически заряженные частицы – носители заряда (электроны в металлах, ионы в электролитах), способные перемещаться по всему объему проводника под действием внешнего электростатического поля. В настоящем разделе мы ограничимся рассмотрением твердых металлических проводников.

Носителями заряда в металлах являются электроны проводимости. Они возникают при конденсации паров металла за счет обобществления валентных электронов.

При отсутствии электростатического поля металлический проводник является электрически нейтральным – электростатическое поле, создаваемое положительными и отрицательными зарядами внутри него, компенсируется.

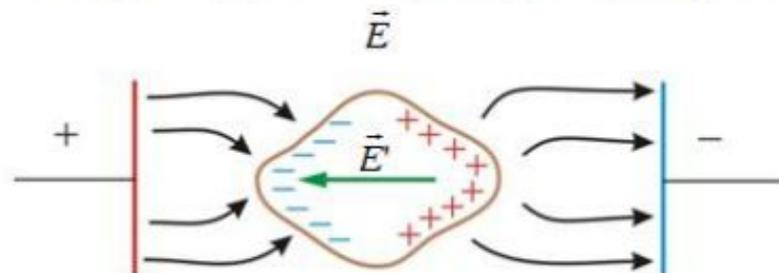
При внесении металлического проводника во внешнее электростатическое поле электроны проводимости перемещаются (перераспределяются) до тех пор, пока всюду внутри проводника поле электронов проводимости и положительных ионов не скомпенсирует внешнее поле.

При внесении металлического проводника во внешнее электростатическое поле электроны проводимости перемещаются (перераспределяются) до тех пор, пока всюду внутри проводника поле электронов проводимости и положительных ионов не скомпенсирует внешнее поле.

Итак, в любой точке внутри проводника, находящегося в электростатическом поле, $\vec{E} = 0$; $d\phi = 0$, т.е. $\phi = \text{const}$, в идеальном проводнике диэлектрическая проницаемость $\epsilon_{\text{ме}} \rightarrow \infty$.

На поверхности проводника напряженность \vec{E} (рис. 1.5.1) должна быть направлена по нормали к этой поверхности, иначе под действием составляющей E_{τ} , касательной к поверхности, заряды перемещались бы по проводнику, а это противоречило бы их статическому распределению.

Вне заряженного проводника поле есть, следовательно, должен быть вектор \vec{E} , и направлен он перпендикулярно поверхности.



Итак, в установившемся состоянии в проводнике, помещенном в электростатическое поле, имеем:

- *Появление у заряженной поверхности на металле заряда противоположного знака – электростатическая индукция. Этот процесс очень краток ($\sim 10^{-8}$ с).*

- *Электростатическое экранирование – внутри проводника поле не проникает.*

- *Во всех точках внутри проводника $E = 0$, а во всех точках на поверхности проводника $E = E_n$ ($E_\tau = 0$);*

- *Весь объем проводника, находящегося в электростатическом поле, эквипотенциален.*

Действительно, в любой точке внутри проводника $\frac{d\phi}{dl} = -E = 0$, следовательно, $\phi = \text{const}$.

Поверхность проводника тоже эквипотенциальна: $\phi_{\text{пов}} = \text{const}$, т.к.

$$\frac{d\phi}{dl} = -E_\tau = 0.$$

- *Потенциал на поверхности проводника равен потенциалу внутри проводника.*

- *В заряженном проводнике некомпенсированные заряды располагаются только на поверхности (их расталкивают кулоновские силы).*

Экспериментальная проверка распределения заряда на проводнике

Проверим экспериментально сделанные нами выводы.

1. *Заряженный кондуктор* (рис. 1.5.3).

В местах разной напряженности электростатического поля лепестки бумажки расходятся по-разному: на поверхности *1* – максимальное расхождение, на поверхности *2* заряд распределен равномерно ($q = \text{const}$) и на ней имеем одинаковое расхождение лепестков. На поверхности *3* (внутри кондуктора) зарядов нет и лепестки не расходятся.

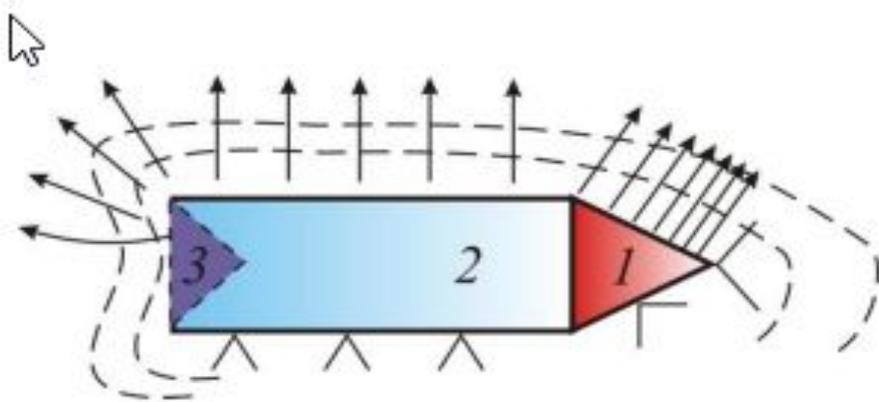


Рис. 1.5.3

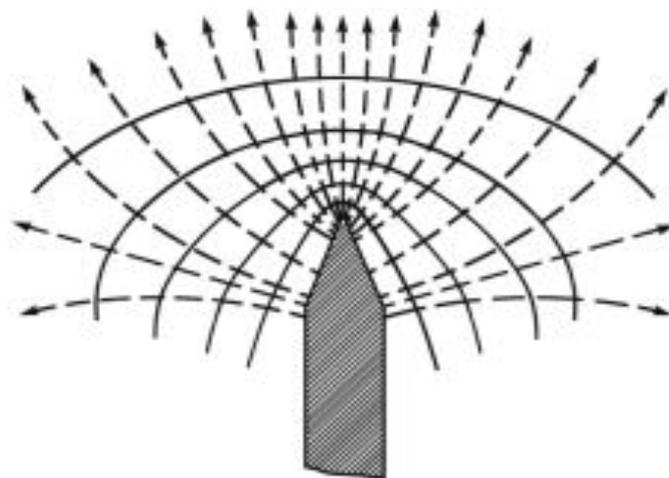


Рис. 1.5.4

Из рис. 1.5.4 видно, что напряженность электростатического поля максимальна на острие заряженного проводника.

2. Стеkanie электростатических зарядов с острия.

Большая напряженность поля E на остриях – нежелательное явление, т.к. происходит утечка зарядов и ионизация воздуха. Ионы уносят электрический заряд, образуется как бы «электрический ветер» («огни Святого Эльма»).

Есть наглядные эксперименты по этому явлению: сдувание пламени свечи электрическим ветром (рис. 1.5.5), колесо Франклина, или вертушка (рис. 1.5.6). На этом принципе построен электростатический двигатель.

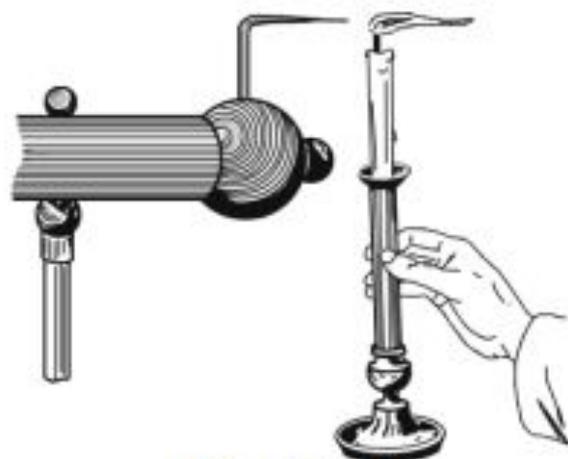


Рис. 1.5.5



Рис. 1.5.6

3. Электростатический генератор.

Если заряженный металлический шарик привести в соприкосновение с поверхностью какого-либо проводника, то заряд шарика частично передается проводнику: шарик будет разряжаться до тех пор, пока их потенциалы не выравняются. Иначе обстоит дело, если шарик привести в соприкосновение с внутренней поверхностью полого проводника. При этом весь заряд с шарика стечет на проводник и распределится на внешней поверхности проводника (рис. 1.5.7).

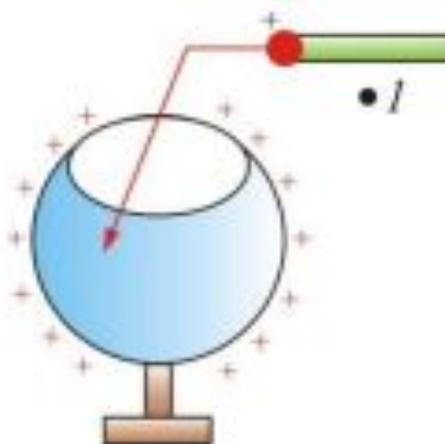


Рис. 1.5.7

Потенциал полого проводника может быть больше, чем потенциал шарика, тем не менее заряд с шарика стечет полностью. В точке I потенциал шарика меньше потенциала проводника ($\varphi_{ш} < \varphi_{пр}$), но пока мы переносили шарик в полость, мы совершили работу по преодолению сил отталкивания и тем самым, увеличивая потенциальную энергию, увеличили потенциал шарика, т.е., когда мы вносим шарик, потенциал его становится больше и заряд, как обычно, перетекает от большего потенциала к меньшему. Перенося с помощью шарика следующую порцию заряда, мы совершаем еще большую работу. Это наглядный пример того, что потенциал – энергетическая характеристика. На этом принципе построен электростатический генератор Ван-де-Граафа.

В 1931 г. Роберт Ван-де-Грааф – американский ученый физик – запатентовал высоковольтный *электростатический ускоритель*, принцип действия которого разработал в 1929 г., и в 1932–1933 гг. спроектировал и построил генератор с диаметром сферы 4,5 м. В 1936 г. он построил самый большой из традиционных генераторов постоянного напряжения.

Устройство *электростатического генератора Ван-де-Граафа* показано на (рис. 1.5.8).

Зарядное устройство 4 заряжает ленту транспортера 3 положительными зарядами. Лента переносит их вовнутрь металлической сферы 5, где происходит сьем этих зарядов. Далее они стекают на внешнюю поверхность 1. Так на поверхности сферы можно получить потенциал относительно Земли в несколько миллионов вольт. Ограничением является ток утечки. Такие генераторы существуют в настоящие время. Например, в Массачусетском технологическом институте построен генератор с диаметром сферы 4,5 метров и получен потенциал $3-5 \cdot 10^6$ В.

В Томске хорошо развита ускорительная техника. Так, только в НИИ ядерной физики имеется около десяти ускорителей различного класса. Один из них – ЭСГ, или генератор Ван-де-Граафа. Он изготовлен в специальной башне, и на нем был получен потенциал один миллион вольт.

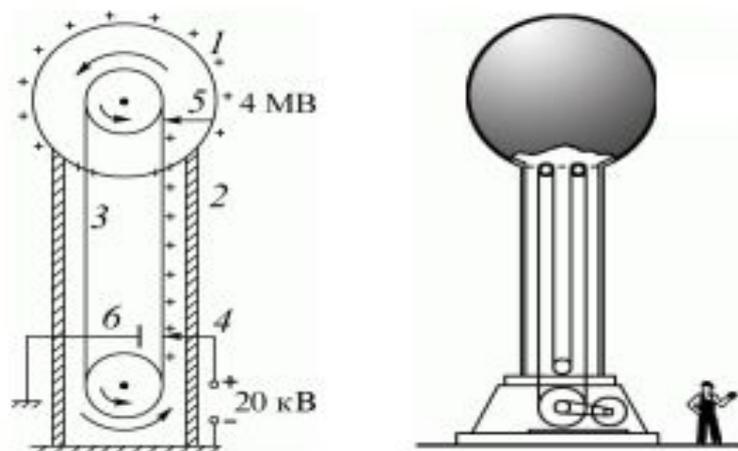


Рис. 1.5.8

Вопросы к читателю. Упражнения

1. Каковы напряженность и потенциал поля, а также распределение зарядов внутри и на поверхности заряженного проводника?
2. На чем основана электростатическая защита?
8. Каковы распределение зарядов, напряженность и потенциал поля внутри и на поверхности заряженного проводника?
9. Какова разность потенциалов между любой точкой на поверхности проводящего заряженного шара и любой точкой внутри шара?
10. Коснувшись пробным шариком внутренней поверхности заряженного полого металлического стакана, стрелка электрометра не отклоняется. Коснувшись же внешней поверхности – отклоняется. Поясните результаты данного опыта.
11. Почему вектор напряженности электростатического поля на внешней поверхности проводника направлен по нормали к каждой точке его поверхности?

1.6. Конденсаторы

1.6.1. Электрическая емкость

При сообщении проводнику заряда на его поверхности появляется потенциал φ , но если этот же заряд сообщить другому проводнику, то потенциал будет другой. Это зависит от геометрических параметров проводника. Но в любом случае потенциал φ пропорционален заряду q :

$$q = C\varphi. \quad (1.6.1)$$

Коэффициент пропорциональности C называют *электроемкостью* – физическая величина, численно равная заряду, который необходимо сообщить проводнику для того, чтобы изменить его потенциал на единицу:

$$C = \frac{q}{\varphi}. \quad (1.6.2)$$

Единица измерения емкости в СИ – фарада; $1 \text{ Ф} = 1 \text{ Кл/1 В}$.
Если потенциал поверхности шара

$$\varphi_{\text{шар}} = \frac{q}{4\pi\epsilon\epsilon_0 R}, \quad (1.6.3)$$

то

$$C_{\text{шар}} = 4\pi\epsilon\epsilon_0 R. \quad (1.6.4)$$

По этой формуле можно рассчитать емкость Земли. Если диэлектрическая проницаемость среды $\epsilon = 1$ (воздух, вакуум) и $R = R_{\text{Земли}}$, то имеем, что $C_{\text{З}} = 7 \cdot 10^{-4} \text{ Ф}$, или 700 мкФ .

Чаще на практике используют более мелкие единицы емкости: 1 нФ (нанофарада) = 10^{-9} Ф и 1 пкФ (пикофарада) = 10^{-12} Ф.

Необходимость в устройствах, накапливающих заряд, есть, а уединенные проводники обладают малой емкостью. Опытным путем было обнаружено, что электроемкость проводника увеличивается, если к нему поднести другой проводник, за счет явления *электростатической индукции*.

Конденсатор – это устройство для накопления заряда и энергии электрического поля. Состоит из двух проводников в форме пластин, называемых *обкладками*, разделенных диэлектриком. Толщина диэлектрика мала по сравнению с размерами пластин (рис.1.6.1).

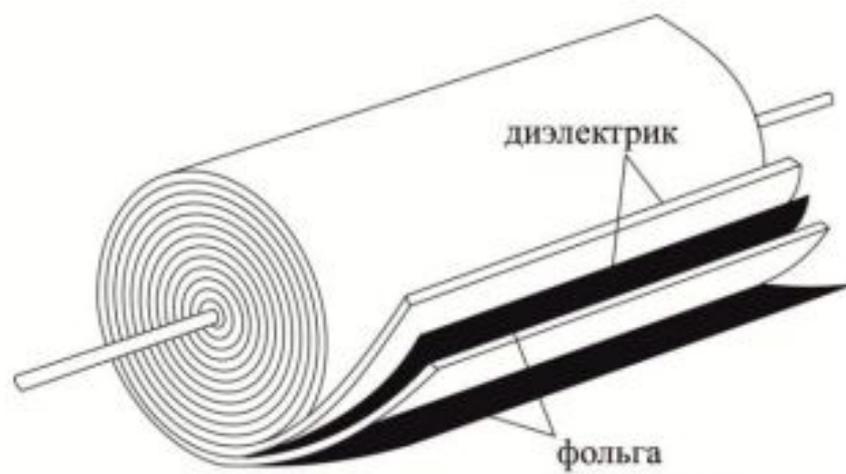


Рис.1.6.1



Конструкция такова, что внешние, окружающие конденсатор тела, не оказывают влияние на его емкость. Это будет выполняться, если электростатическое поле будет сосредоточено внутри конденсатора, между обкладками.

Конденсаторы бывают плоские, цилиндрические и сферические.

Так как электростатическое поле находится внутри конденсатора, то линии электрического смещения начинаются на положительной обкладке, заканчиваются на отрицательной и никуда не исчезают. Следовательно, заряды на обкладках *противоположны по знаку, но одинаковы по величине*.

Емкость конденсатора равна отношению заряда к разности потенциалов между обкладками конденсатора:

$$C = \frac{q}{\varphi_1 - \varphi_2} = \frac{q}{U}. \quad (1.6.5)$$

Помимо емкости каждый конденсатор характеризуется $U_{\text{раб}}$ (или $U_{\text{пр}}$) – максимальное допустимое напряжение, выше которого происходит пробой между обкладками конденсатора.

1.6.2. Соединение конденсаторов

Емкостные батареи – комбинации параллельных и последовательных соединений конденсаторов (рис. 1.6.2, 1.6.3).

1. Параллельное соединение конденсаторов (рис. 1.6.2).

В данном случае общим является напряжение U :

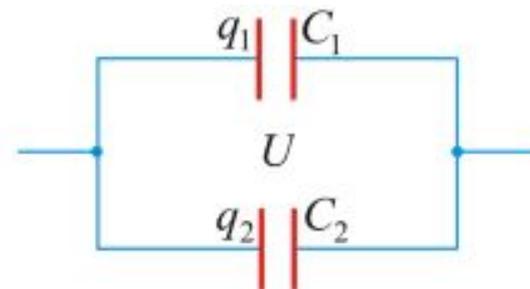
$$q_1 = C_1 U; \quad q_2 = C_2 U.$$

Суммарный заряд

$$q = q_1 + q_2 = U(C_1 + C_2).$$

Результирующая емкость

$$C = \frac{q}{U} = C_1 + C_2.$$



Таким образом, при параллельном соединении конденсаторов суммарная емкость

$$C = \sum_k C_k.$$

Общая емкость больше самой большой емкости, входящей в батарею.

Сравните с параллельным соединением сопротивлений R :

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}.$$

2. Последовательное соединение конденсаторов (рис. 1.6.3):

Общим является заряд q :

$$U_1 = \frac{q}{C_1}; U_2 = \frac{q}{C_2},$$

или

$$U = \sum_k U_k = q \sum_k \frac{1}{C_k},$$

отсюда

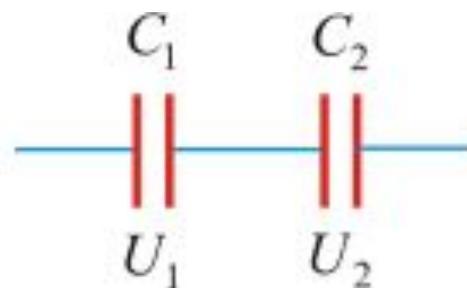
$$\frac{1}{C} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2}. \quad (1.6.6)$$

Сравните с последовательным соединением сопротивлений R :

$$R = R_1 + R_2.$$

Таким образом, при последовательном соединении конденсаторов *общая емкость меньше самой маленькой емкости*, входящей в батарею:

$$\frac{1}{C} = \sum_k \frac{1}{C_k}.$$



Постоянный электрический ток

Упорядоченное движение заряженных частиц называется электрическим током.

Количественной мерой тока служит сила тока I , т.е. заряд, перенесенный сквозь рассматриваемую поверхность S (или через поперечное сечение проводника) в единицу времени, т.е.

$$I = \frac{\partial q}{\partial t}. \quad (1.7.1)$$

*Ток, не изменяющийся по величине со временем, называется **постоянным током**:*

$$I = \frac{q}{t},$$

отсюда видна размерность силы тока в СИ: $1 \text{ А} = \text{Кл}/\text{с}$.

Плотность тока – более подробная характеристика тока, чем сила тока I . Плотность тока характеризует ток локально, в каждой точке пространства, а I – это интегральная характеристика, привязанная не к точке, а к области пространства, в которой протекает ток.

Модуль вектора плотности тока численно равен отношению силы тока ∂I через элементарную площадку ∂S , перпендикулярную направлению движения носителей заряда, к ее площади:

$$j = \frac{\partial I}{\partial S_{\perp}}. \quad (1.7.2)$$

Единица плотности тока – $\text{А}/\text{м}^2$.

1.7.3. Сторонние силы и ЭДС

Для того чтобы поддерживать ток достаточно длительное время, необходимо от конца проводника с меньшим потенциалом непрерывно отводить, а к другому концу – с большим потенциалом – подводить электрические заряды, т.е. необходим круговорот зарядов. Поэтому в замкнутой цепи, наряду с нормальным движением зарядов, должны быть участки, на которых движение (положительных) зарядов происходит в направлении возрастания потенциала, т.е. против сил электрического поля (рис. 1.7.1).

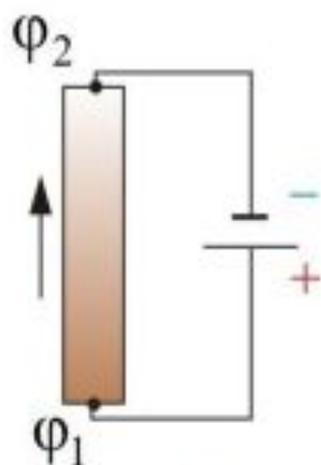


Рис. 1.7.1

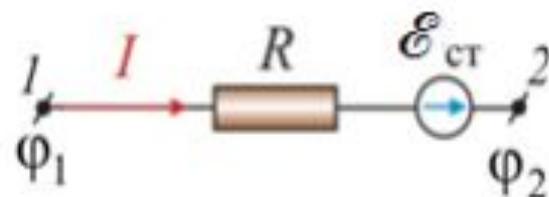


Рис. 1.7.2

Перемещение заряда на этих участках возможно лишь с помощью сил неэлектрического происхождения (сторонних сил): химические процессы, диффузия носителей заряда, вихревые электрические поля. Аналогия – насос, качающий воду в водонапорную башню, действует за счет негравитационных сил (электромотор).

Сторонние силы можно характеризовать работой, которую они совершают над перемещающимися по замкнутой цепи или ее участку зарядами (рис. 1.7.2).

Величина \mathcal{E} , равная работе сторонних сил по перемещению единичного положительного заряда в цепи, называется **электродвижущей силой (ЭДС)**, действующей в цепи:

$$\mathcal{E} = \frac{A}{q} \left[\frac{\text{Дж}}{\text{Кл}} \right] = [\text{В}]. \quad (1.7.6)$$

Как видно из (1.7.6), размерность ЭДС совпадает с размерностью потенциала, т.е. измеряется в вольтах.

1.7.4. Закон Ома для неоднородного участка цепи

Рассмотрим неоднородный участок цепи, участок, содержащий источник ЭДС (т.е. участок, где действуют неэлектрические силы). Напряженность \vec{E} поля в любой точке цепи равна векторной сумме поля кулоновских сил и поля сторонних сил, т.е. $\vec{E} = \vec{E}_k + \vec{E}_{ст}$.

Величина, численно равная работе по переносу единичного положительного заряда суммарным полем кулоновских и сторонних сил на участке цепи (1-2), называется напряжением U_{12} на этом участке (рис. 1.7.2):

$$U_{12} = \int_1^2 \vec{E}_q d\vec{l} + \int_1^2 \vec{E}_{ст} d\vec{l}, \quad (1.7.7)$$

т.к. $\vec{E}_q d\vec{l} = -d\varphi$, или $\int_1^2 \vec{E}_q d\vec{l} = \varphi_1 - \varphi_2$, тогда

$$U_{12} = (\varphi_1 - \varphi_2) + \mathcal{E}_{12}. \quad (1.7.8)$$

Напряжение на концах участка цепи совпадает с разностью потенциалов только в случае, если на этом участке нет ЭДС, т.е. на однородном участке цепи. Запишем *обобщенный закон Ома для участка цепи, содержащей источник ЭДС*:

$$IR_{12} = (\varphi_1 - \varphi_2) + \mathcal{E}_{12}. \quad (1.7.9)$$

Обобщенный закон Ома выражает закон сохранения энергии применительно к участку цепи постоянного тока. Он в равной мере справедлив как для пассивных участков (не содержащих ЭДС), так и для активных.

В электротехнике часто используют термин *падение напряжения* – изменение напряжения вследствие переноса заряда через сопротивление:

$$U = IR. \quad (1.7.10)$$

В замкнутой цепи (рис. 1.7.3) $\varphi_1 = \varphi_2$: $IR_{\Sigma} = \mathcal{E}$, или $I = \frac{\mathcal{E}}{R_{\Sigma}}$,
где $R_{\Sigma} = R + r$; r – внутреннее сопротивление активного участка цепи.

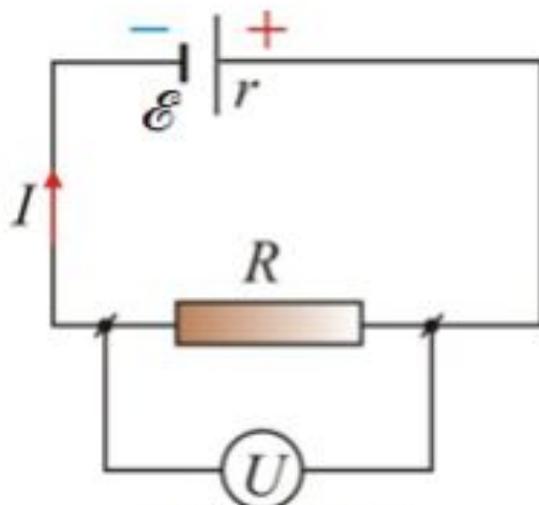


Рис. 1.7.3

Тогда закон Ома для замкнутого участка цепи, содержащего источник ЭДС, запишется в виде

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

1.7.6. Работа и мощность тока. Закон Джоуля – Ленца

Рассмотрим произвольный участок цепи, к концам которого приложено напряжение U . За время dt через каждое сечение проводника проходит заряд

$$dq = Idt.$$

При этом работа силы электрического поля на данном участке

$$dA = Udq = UI dt.$$

Разделив работу на время, получим выражение для мощности –

$$N = \frac{dA}{dt} = UI. \quad (1.7.16)$$

Полезно вспомнить и другие формулы для мощности и работы:

$$N = RI^2; \quad (1.7.17)$$

$$A = RI^2 t. \quad (1.7.18)$$

В 1841 г. манчестерский пивовар Джеймс Джоуль и в 1843 г. петербургский академик Эмилий Ленц установили закон теплового действия электрического тока.

Независимо друг от друга Джоуль и Ленц показали, что *при протекании тока в проводнике выделяется количество теплоты*

$$Q = RI^2t. \quad (1.7.19)$$

Если ток изменяется со временем, то

$$Q = \int_1^2 RI^2 dt.$$

Это закон Джоуля – Ленца в интегральной форме.

Отсюда видно, что *нагревание происходит за счет работы, совершаемой силами поля над зарядом.*

Соотношение (1.7.19) имеет интегральный характер и относится ко всему проводнику с сопротивлением R , по которому течет ток I . Получим закон Джоуля – Ленца в локально-дифференциальной форме, характеризуя тепловыделение в произвольной точке.

Правила Кирхгофа для разветвленных цепей

Расчет разветвленных цепей с помощью закона Ома довольно сложен. Эта задача решается более просто с помощью двух правил немецкого физика Г. Кирхгофа (1824 – 1887).

Первое правило Кирхгофа утверждает, что алгебраическая сумма токов, сходящихся в любом узле цепи равна нулю:

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

В случае установившегося постоянного тока в цепи ни в одной точке проводника, ни на одном из его участков не должны накапливаться электрические заряды *узел* – любой участок цепи, где сходятся более двух проводников (рис. 1.7.6).

Токи, сходящиеся к узлу, считаются положительными:

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

Первый закон является следствием закона сохранения заряда.

Второе правило Кирхгофа является обобщением закона Ома для разветвленной цепи и следствием ЗСЭ.

Для произвольного замкнутого контура с произвольным числом разветвлений (рис. 1.7.7) можно записать для каждого элемента контура:

$$\varphi_2 - \varphi_3 + \mathcal{E}_1 = I_1 R_1;$$

$$\varphi_3 - \varphi_1 + \mathcal{E}_2 = I_2 R_2;$$

$$\varphi_1 - \varphi_2 + \mathcal{E}_3 = I_3 R_3.$$

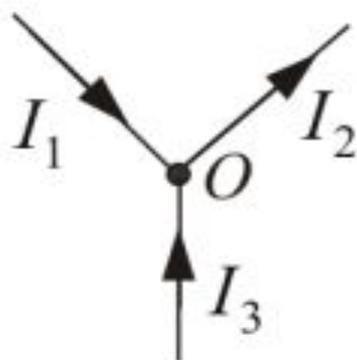


Рис. 1.7.6

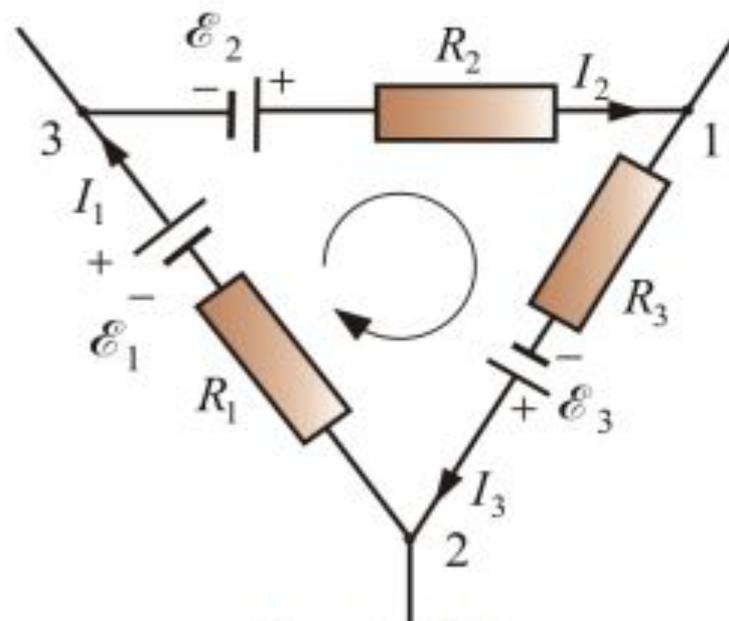


Рис. 1.7.7

Складывая эти уравнения получим **второе правило Кирхгофа**:

$$\sum_k I_k R_k = \sum_k \mathcal{E}_k.$$

В любом замкнутом контуре электрической цепи алгебраическая сумма произведения тока на сопротивление равна алгебраической сумме ЭДС, действующих в этом же контуре.

Обход контуров осуществляется по часовой стрелке, если направление обхода совпадает с направлением тока, то ток берется со знаком «ПЛЮС».

Вопросы к читателю. Упражнения

1. Что называют силой тока? плотностью тока? Каковы их единицы? Назовите условия возникновения и существования электрического тока
2. Что такое сторонние силы? Какова их природа?
3. В чем заключается физический смысл электродвижущей силы, действующей в цепи? напряжения? разности потенциалов?
4. Почему напряжение является обобщенным понятием разности потенциалов?
5. Какова связь между сопротивлением и проводимостью, удельным сопротивлением и удельной проводимостью?
6. На чем основано действие термометров сопротивления?
7. Выведите законы Ома и Джоуля – Ленца. В чем заключается физический смысл удельной тепловой мощности тока?
8. Проанализируйте обобщенный закон Ома. Какие частные законы можно из него получить?
9. Поясните физический смысл электродвижущей силы, разности потенциалов и напряжения на участке электрической цепи.
10. Как формулируются правила Кирхгофа? На чем они основаны?
11. Как составляются уравнения, выражающие правила Кирхгофа?
12. Определите сопротивление нихромовой проволоки длиной 1 м и массой 0,83 г. Удельное сопротивление нихрома 10^{-6} Ом•м, плотность 8300 кг/м^3

1.8.1. Электрический ток в металлах

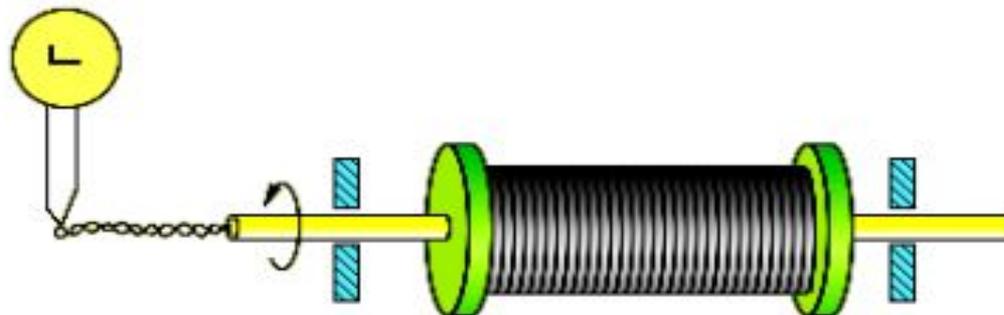
Электрический ток в металлах – это упорядоченное движение электронов под действием электрического поля.

Наиболее убедительное доказательство электронной природы тока в металлах было получено в опытах с инерцией электронов (опыт Толмена и Стьюарта).

Катушка с большим числом витков тонкой проволоки (рис. 1.8.1) приводилась в быстрое вращение вокруг своей оси. Концы катушки с помощью гибких проводов были присоединены к чувствительному баллистическому гальванометру. Раскрученная катушка резко тормозилась, и в цепи возникал кратковременный ток, обусловленный инерцией носителей заряда. Полный заряд, протекающий по цепи, измерялся гальванометром.

При торможении вращающейся катушки на каждый носитель заряда e массой m действует *тормозящая сила*, которая играет роль *сторонней силы*, т.е. *силы неэлектрического происхождения*:

$$F = -m \frac{dv}{dt}.$$



Хорошая электропроводность металлов объясняется высокой концентрацией свободных электронов, равной по порядку величины числу атомов в единице объема.

Предположение о том, что за электрический ток в металлах ответственны электроны, возникло значительно раньше опытов Толмена и Стюарта. Еще в 1900 г. немецкий ученый П. Друде на основе гипотезы о существовании свободных электронов в металлах создал электронную теорию проводимости металлов. Эта теория получила развитие в работах голландского физика Х. Лоренца и носит название *классической электронной теории*. Согласно этой теории электроны в металлах ведут себя, как электронный газ, во многом похожий на идеальный газ.

Электронный газ заполняет пространство между ионами, образующими кристаллическую решетку металла. Из-за взаимодействия с ионами электроны могут покинуть металл, лишь преодолев так называемый *потенциальный барьер*. Высота этого барьера называется *работой выхода*.

При обычных (комнатных) температурах у электронов не хватает энергии для преодоления потенциального барьера. Согласно теории Друде – Лоренца электроны обладают такой же средней энергией теплового движения, как и молекулы одноатомного идеального газа. Это позволяет оценить среднюю скорость теплового движения электронов по формулам молекулярно-кинетической теории: $v_{\text{теп}} = 10^5$ м/с.

При наложении внешнего электрического поля в металлическом проводнике, кроме теплового движения электронов, возникает их упорядоченное движение (дрейф), т.е. электрический ток. *Величина дрейфовой скорости электронов* лежит в пределах 0,6–6 мм/с. Таким образом, средняя скорость упорядоченного движения электронов в металлических проводниках на много порядков меньше средней скорости их теплового движения.

Малая скорость дрейфа не противоречит опытному факту, что ток во всей цепи постоянного тока устанавливается практически мгновенно. Замыкание цепи вызывает распространение электрического поля со скоростью $c = 3 \cdot 10^8$ м/с. Через время $\tau = l/c$ (l – длина цепи) вдоль цепи устанавливается стационарное распределение электрического поля, и в ней начинается упорядоченное движение электронов.

При наложении внешнего электрического поля в металлическом проводнике, кроме теплового движения электронов, возникает их упорядоченное движение (дрейф), т.е. электрический ток. *Величина дрейфовой скорости электронов* лежит в пределах 0,6–6 мм/с. Таким образом, средняя скорость упорядоченного движения электронов в металлических проводниках на много порядков меньше средней скорости их теплового движения.

Малая скорость дрейфа не противоречит опытному факту, что ток во всей цепи постоянного тока устанавливается практически мгновенно. Замыкание цепи вызывает распространение электрического поля со скоростью $c = 3 \cdot 10^8$ м/с. Через время $\tau = l/c$ (l – длина цепи) вдоль цепи устанавливается стационарное распределение электрического поля, и в ней начинается упорядоченное движение электронов.

Зонная модель электронной проводимости металлов

Качественное различие между металлами и полупроводниками (диэлектриками) состоит в характере зависимости удельной проводимости от температуры. У металлов с ростом температуры проводимость падает, а у полупроводников и диэлектриков – растет. При $T \rightarrow 0$ К у чистых металлов проводимость $\sigma \rightarrow \infty$. У полупроводников и диэлектриков при $T \rightarrow 0$ К $\sigma \rightarrow 0$. Качественного различия между полупроводниками и диэлектриками в отношении электропроводности нет.

Проявление у одних веществ металлических свойств, а у других полупроводниковых и диэлектрических может быть последовательно объяснено только в рамках *квантовой теории*.

Согласно квантовым представлениям энергия электронов в атоме может изменяться дискретным образом. Причем, согласно принципу Паули, в одном квантовом состоянии может находиться не более одного электрона. В результате электроны не собираются на каком-то одном энергетическом уровне, а последовательно заполняют разрешенные энергетические уровни в атоме, формируя его электронные оболочки.

В металлах внешние валентные оболочки заполнены не полностью, например, у атомов серебра во внешней оболочке $5s^1$ находится один электрон, в то время как, согласно принципу Паули, могло бы находиться два электрона с различными ориентациями спинов, но второго электрона во внешней оболочке атома серебра просто нет. При сближении N атомов Ag и расщеплении внешнего энергетического уровня $5s^1$ на N подуровней каждый из них заполняется уже двумя электронами с различными ориентациями спинов. В результате при сближении N атомов серебра возникает энергетическая зона, наполовину заполненная электронами. Энергия, соответствующая последнему заполненному электронному уровню при 0 К, называется энергией Ферми ($\varepsilon_F \approx kT_g$). Расстояние ΔE между соседними энергетическими уровнями очень мало, поскольку N очень велико, до 10^{23} см^{-3} ;

$$\varepsilon_F \sim 1 \div 10 \text{ эВ},$$

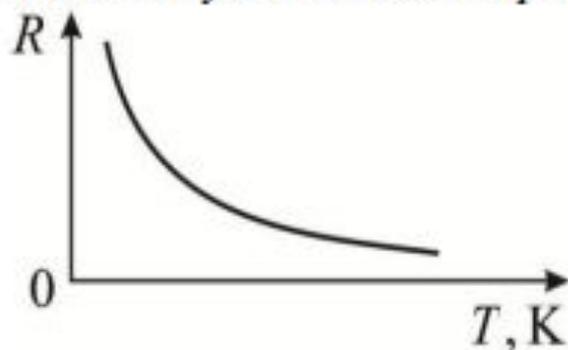
$$\Delta E = \varepsilon_F / N \ll kT \approx 0,025 \text{ эВ}.$$

Расстояние между соседними разрешенными уровнями электронов в металлах много меньше энергии теплового движения электронов даже при самых низких температурах. Если поместить проводник в электрическое поле, включив его, например, в замкнутую цепь с источником ЭДС, то электроны начнут перемещаться из точки проводника с меньшим потенциалом к точке с большим потенциалом, т.к. их заряд отрицателен. Но движение в электрическом поле означает увеличение энергии электрона, а по квантовым представлениям переход на более высокий энергетический уровень у электрона возможен, если этот соседний уровень свободен. В металлах таких свободных уровней для электронов, находящихся вблизи уровня Ферми, вполне достаточно, поэтому металлы являются хорошими проводниками электрического тока.

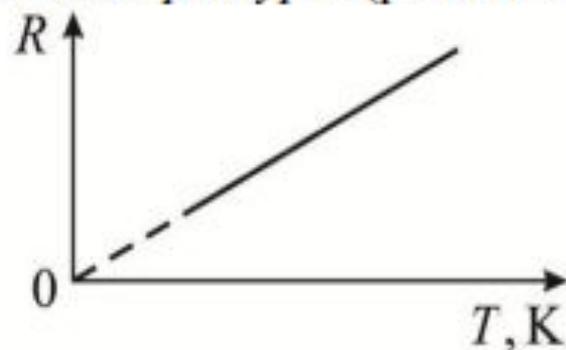
1.8.2. Электрический ток в полупроводниках

К числу полупроводников относятся многие химические элементы (германий, кремний, селен, теллур, мышьяк и др.), огромное количество сплавов и химических соединений. Почти все неорганические вещества окружающего нас мира – полупроводники. Самым распространенным в природе полупроводником является кремний, составляющий около 30 % земной коры.

Качественное отличие полупроводников от металлов проявляется в зависимости удельного сопротивления от температуры (рис. 1.8.3 а, б).



а



б

Зонная модель электронно-дырочной проводимости полупроводников

При образовании твердых тел возможна ситуация, когда энергетическая зона, возникшая из энергетических уровней *валентных электронов* исходных атомов, оказывается полностью заполненной электронами, а ближайшие доступные для заполнения электронами энергетические уровни отделены от *валентной зоны* E_V промежутком неразрешенных энергетических состояний – так называемой *запрещенной зоной* E_g (рис. 1.8.4). Выше запрещенной зоны расположена зона разрешенных для электронов энергетических состояний – *зона проводимости* E_C .

Зона проводимости при 0 К полностью свободна, а валентная зона – полностью занята. Подобные зонные структуры характерны для кремния, германия, арсенида галлия (GaAs), фосфида индия (InP) и многих других твердых тел, являющихся полупроводниками.

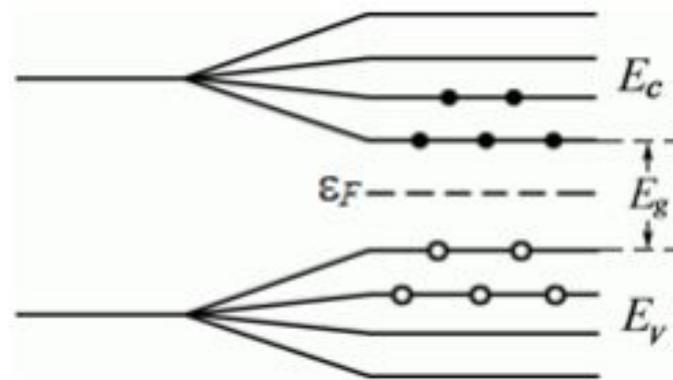


Рис. 1.8.4

При повышении температуры полупроводников и диэлектриков электроны способны получать дополнительную энергию, связанную с тепловым движением kT . У части электронов энергии теплового движения оказывается достаточно для перехода из валентной зоны в зону проводимости, где электроны под действием внешнего электрического поля могут перемещаться практически свободно.

В этом случае в цепи с полупроводниковым материалом по мере повышения температуры полупроводника будет нарастать электрический ток. Этот ток связан не только с движением электронов в зоне проводимости, но и с появлением вакантных мест от ушедших в зону проводимости электронов в валентной зоне, так называемых **дырок**. Вакантное место может быть занято валентным электроном из соседней пары, тогда дырка переместится на новое место в кристалле.

Если полупроводник помещается в электрическое поле, то в упорядоченное движение вовлекаются не только свободные электроны, но и дырки, которые ведут себя, как положительно заряженные частицы. Поэтому ток I в полупроводнике складывается из электронного I_n и дырочного I_p токов: $I = I_n + I_p$.

Электронно-дырочный механизм проводимости проявляется только у чистых (т.е. без примесей) полупроводников. Он называется *собственной электрической проводимостью полупроводников*. Электроны забрасываются в зону проводимости с уровня Ферми, который оказывается в собственном полупроводнике расположенным *посередине запрещенной зоны* (рис. 1.8.4).

Существенно изменить проводимость полупроводников можно, введя в них очень небольшие количества примесей. В металлах примесь всегда уменьшает проводимость. Так, добавление в чистый кремний 3 % атомов фосфора увеличивает электропроводность кристалла в 10^5 раз.

Небольшое добавление примеси к полупроводнику называется легированием.

Необходимым условием резкого уменьшения удельного сопротивления полупроводника при введении примесей является отличие валентности атомов примеси от валентности основных атомов кристалла. *Проводимость полупроводников при наличии примесей называется примесной проводимостью.*

1.8.3. Сверхпроводимость

Существует одно явление, механизм которого оказалось возможным объяснить лишь в рамках квантовой теории. При некоторой определенной температуре $T_{кр}$, различной для разных веществ, удельное сопротивление скачком уменьшается до нуля (рис. 1.8.9, кривая 2).

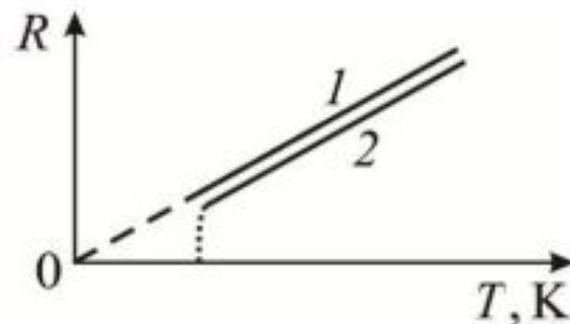


Рис. 1.8.9

В 1908 г. голландскому физика Г. Камерлинг–Оннесу удалось получить жидкий гелий с температурой кипения 4,44 К. Метод получения жидкого гелия оказался очень сложным и малоэффективным, и в течение долгого времени лишь лаборатория Камерлинг–Оннеса в Лейдене производила жидкий гелий.

Изучая поведение сопротивления ртути, охлаждаемой до гелиевых температур, Камерлинг–Оннес в 1911 г. впервые в мире наблюдал *исчезновение сопротивления ртути практически до нуля*. Это явление было названо *сверхпроводимостью*.

Камерлинг–Оннес писал: «При 4,3 К сопротивление ртути уменьшается до 0,084 Ом, что составляет 0,0021 от значения сопротивления, которое имела бы твердая ртуть при 0 °С (39,7 Ом). Обнаружено, что при 3 К сопротивление падает ниже $3 \cdot 10^{-6}$ Ом, что составляет 10^{-7} от значения при 0 °С». Отметим, что температурный интервал, в котором сопротивление уменьшалось до нуля, очень узок, и для некоторых металлов он составляет лишь 10^{-3} К.

В 1957 г. Дж. Бардином, Л. Купером, Дж. Шриффером дано квантово-механическое объяснение природы сверхпроводимости (**теория БКШ**). Было показано, что хотя между электронами действуют силы кулоновского отталкивания, тем не менее в твердых телах при температуре перехода в сверхпроводящее состояние T_c – критической температуре, между электронами начинают действовать силы притяжения, обусловленные обменом **фононами** между электронами (**фононы** – кванты упругих колебаний кристаллической решетки). Это притяжение приводит к образованию связанных электронных пар – **куперовских пар**.

Вещества в сверхпроводящем состоянии обладают исключительными свойствами. Практически наиболее важным из них является способность длительное время (многие годы) поддерживать без затухания электрический ток, возбужденный в сверхпроводящей цепи.

Научный интерес к сверхпроводимости возрастал по мере открытия новых материалов с более высокими критическими температурами. Значительный шаг в этом направлении произошел в 1986 году, когда было обнаружено, что у одного сложного керамического соединения $T_{кр} = 35 \text{ К}$. Уже в следующем 1987 году физики сумели создать новую керамику с критической температурой 98 К, превышающей температуру жидкого азота (77 К).

Явление перехода веществ в сверхпроводящее состояние при температурах, превышающих температуру кипения жидкого азота, было названо *высокотемпературной сверхпроводимостью*. В 1988 году было создано керамическое соединение на основе элементов Tl-Ca-Ba-Cu-O с критической температурой 125 К.

Следует отметить, что до настоящего времени механизм высокотемпературной сверхпроводимости керамических материалов до конца не выяснен.

1.8.6. Электрический ток в электролитах

Электролитами принято называть проводящие среды, в которых протекание электрического тока сопровождается переносом вещества. Носителями свободных зарядов в электролитах являются положительно и отрицательно заряженные ионы.

Основными представителями электролитов, широко используемыми в технике, являются водные растворы неорганических кислот, солей и оснований. Прохождение электрического тока через электролит сопровождается выделением веществ на электродах. Это явление получило название *электролиза* (рис.9.10).

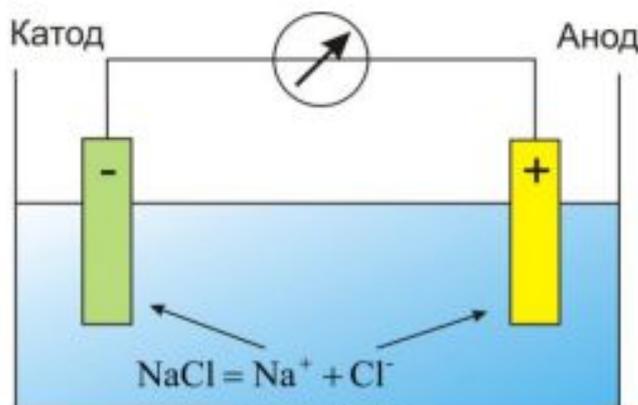


Рис.9.10

Электрический ток в электролитах представляет собой перемещение ионов обоих знаков в противоположных направлениях. Положительные ионы движутся к отрицательному электроду (*катоду*), отрицательные ионы – к положительному электроду (*аноду*). Ионы обоих знаков появляются в водных растворах солей, кислот и щелочей в результате расщепления части нейтральных молекул. Это явление называется *электролитической диссоциацией*.

Закон электролиза был экспериментально установлен английским физиком М. Фарадеем в 1833 году.

Первый закон Фарадея определяет количества первичных продуктов, выделяющихся на электродах при электролизе: *масса m вещества, выделившегося на электроде, прямо пропорциональна заряду q , прошедшему через электролит:*

$$m = kq = kIt,$$

где k – электрохимический эквивалент вещества:

$$k = \frac{1}{F} \frac{\mu}{n}$$

$F = eN_A = 96485$ Кл / моль. – постоянная Фарадея.

Второй закон Фарадея электрохимические эквиваленты различных веществ относятся их химические эквиваленты k_x :

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

Объединенный закон Фарадея для электролиза:

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

Электролитические процессы классифицируются следующим образом:

- получение неорганических веществ (водорода, кислорода, хлора, щелочей и т.д.);
- получение металлов (литий, натрий, калий, бериллий, магний, цинк, алюминий, медь и т.д.);
- очистка металлов (медь, серебро,...);
- получение металлических сплавов;
- получение гальванических покрытий;
- обработка поверхностей металлов (азотирование, борирование, электрополировка, очистка);
- получение органических веществ;
- электродиализ и обессоливание воды;
- нанесение пленок при помощи электрофореза.

Электролиз в гидрометаллургии является одной из стадий переработки металлосодержащего сырья, обеспечивающей получение товарных металлов. Электролиз может осуществляться с растворимыми анодами – процесс электрорафинирования или с нерастворимыми – процесс электроэкстракции. Главной задачей при электрорафинировании металлов является обеспечения необходимой чистоты катодного металла при приемлемых энергетических расходах. В цветной металлургии электролиз используется для извлечения металлов из руд и их очистки.

Электролизом расплавленных сред получают алюминий, магний, титан, цирконий, уран, бериллий и др. Для рафинирования (очистки) металла электролизом из него отливают пластины и помещают их в качестве анодов 1 в электролизер 3 (рис.9.11). При пропускании тока металл, подлежащий очистке 1, подвергается анодному растворению, т. е. переходит в раствор в виде катионов. Затем эти катионы металла разряжаются на катоде 2, благодаря чему образуется компактный осадок уже

чистого металла. Примеси, находящиеся в аноде, либо остаются нерастворимыми 4, либо переходят в электролит и удаляются.

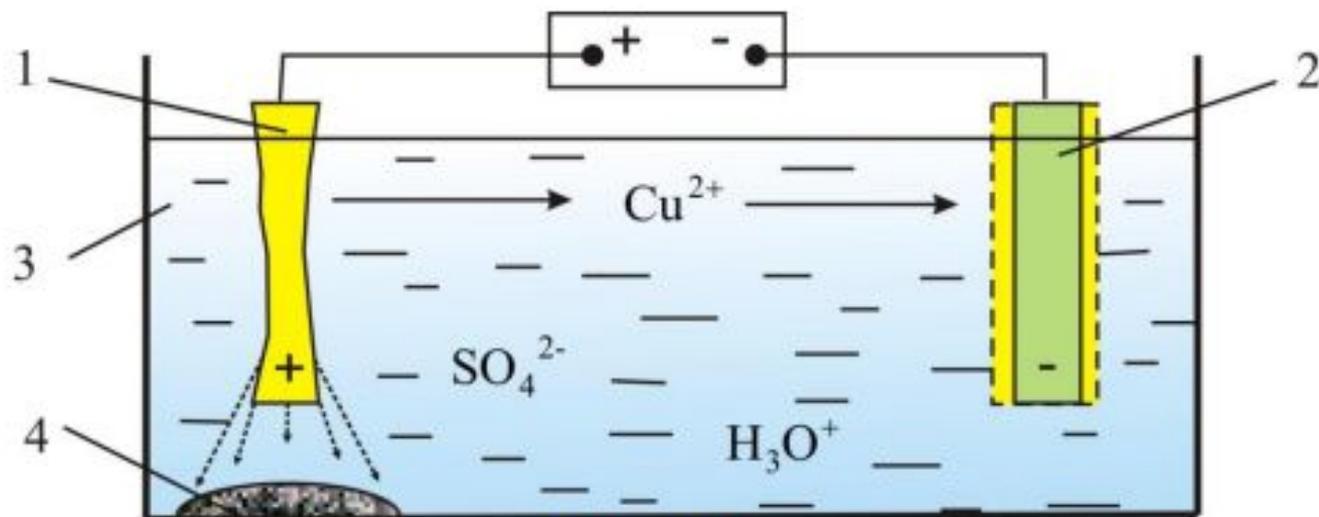


Рис. 9.11

На рисунке 9.11 приведена схема электролитического рафинирования меди.

Гальванотехника – область прикладной электрохимии, занимающаяся процессами нанесения металлических покрытий на поверхность как металлических, так и неметаллических изделий при прохождении постоянного электрического тока через растворы их солей. Гальванотехника подразделяется на **гальваностегию** и **гальванопластику**.

Гальваностегия (от греч. покрывать) – это электроосаждение на поверхность металла другого металла, который прочно связывается (сцепляется) с покрываемым металлом (предметом), служащим катодом электролизера (рис. 9.12).

Способом гальваностегии можно покрыть деталь тонким слоем золота или серебра, хрома или никеля. С помощью электролиза можно наносить тончайшие металлические покрытия на различных металлических поверхностях. При таком способе нанесения покрытий, деталь используют в качестве катода, помещенного в раствор соли того металла, покрытие из которого необходимо получить. В качестве анода используется пластинка из того же металла.

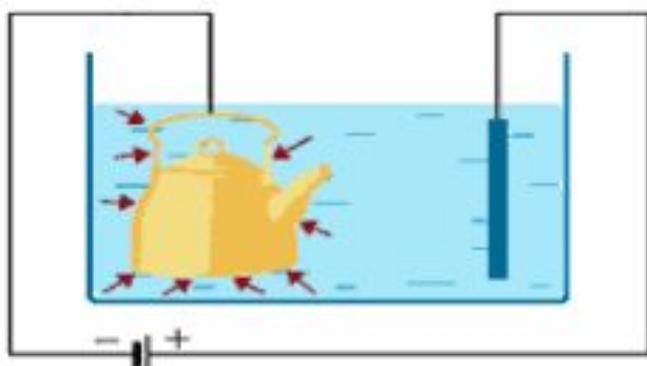


Рис. 9.12

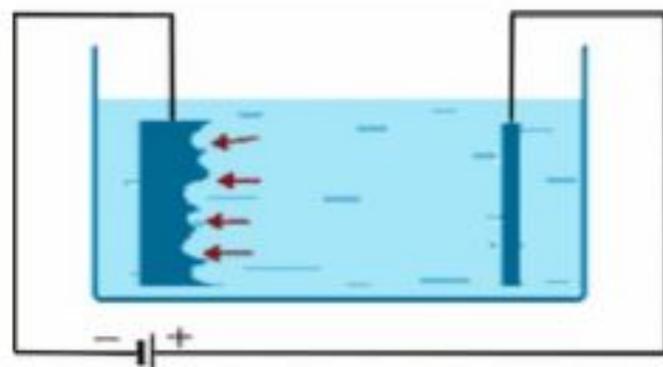


Рис. 9.13

Гальванопластика – получение путем электролиза точных, легко отделяемых металлических копий значительной толщины с различных как неметаллических, так и металлических предметов, называемых матрицами (рис. 9.13).

С помощью гальванопластики изготавливают бюсты, статуи и т. д. Гальванопластика используется для нанесения сравнительно толстых металлических покрытий на другие металлы (например, образование "накладного" слоя никеля, серебра, золота и т. д.).

1. Какими опытами была выяснена природа носителей электрического тока в металлах?
2. Каковы основные идеи теории Друде–Лоренца?
3. Сравните порядок средних скоростей теплового и упорядоченного движения электронов в металлах (при условиях, близких к нормальным и приемлемым в электротехнике).
4. Почему тепловое движение электронов не может привести к возникновению электрического тока?
5. Выведите на основе классической теории электропроводности металлов дифференциальную форму законов Ома и Джоуля–Ленца.
6. Как классическая теория проводимости металлов объясняет зависимость сопротивления металлов от температуры?
7. В чем заключаются трудности элементарной классической теории электропроводности металлов? Каковы границы ее применения?
8. В чем проявляется качественное отличие полупроводников от металлов?
9. Приведите зависимости удельного сопротивления от температуры для полупроводников и металлов.

10. Дайте понятие зонной модели электронно-дырочной проводимости полупроводников.

11. Что называется легированием?

12. Какие существуют типы примесной проводимости?

13. Чем отличаются полупроводниковые диоды от транзисторов?

14. Что такое сверхпроводимость?

15. Что называется электролизом? Где он применяется?

16. Сформулируйте законы Фарадея.

17. Дайте классификацию электролитическим процессам.

18. Как применяется электролиз в гидрометаллургии?

19. Какого практического применения электролиза?

20. Чем отличается гальванопластика от гальваностегии?

2.1. Магнитное поле

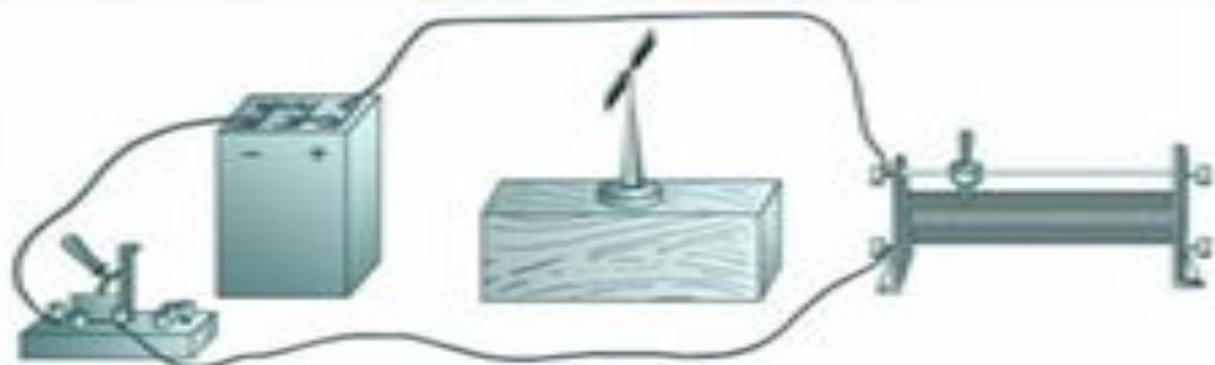
2.1.1. Магнитные взаимодействия

В 1820 г. датский ученый Ханс Христиан Эрстед открыл явление отклонения магнитной стрелки гальваническим током и тем самым сделал первый существенный шаг в выяснении характера связи электрических и магнитных явлений. Затем французские ученые Гей-Люссак и Араго наблюдали намагничивание железа постоянным током, идущим в проводнике. Ампер обнаружил притяжение между проводниками, по которым проходят параллельные токи, и отталкивание между противоположно направленными токами. Им же была выдвинута гипотеза о том, что свойства постоянных магнитов обусловлены циркулирующими в их толще постоянными круговыми токами (молекулярными токами).

Был сделан общий вывод: *вокруг всякого проводника с током есть магнитное поле*

Итак, *вокруг всякого движущегося заряда помимо электрического поля существует еще и магнитное. Магнитное поле – это поле движущихся зарядов.* Известно, что оно обнаруживает себя по действию на магнитные стрелки или на проводники с токами, т.е. на движущиеся заряды.

В 1820 г. датский физик Ханс Кристиан Эрстед (1777 – 1851 гг.) обнаружил ориентирующее действие поля, возбуждаемого проводником с током, на магнитную стрелку, которая при включении тока устанавливалась перпендикулярно к проволоке, по которой протекал ток. Изменение направления тока приводило стрелку к повороту в противоположную сторону.



Дальше мы увидим, что, подобно электрическому полю, оно обладает энергией и, следовательно, массой. Магнитное поле материально. Теперь можно дать следующее определение магнитного поля: *магнитное поле – это материя, связанная с движущимися зарядами и обнаруживающая себя по действию на магнитные стрелки и движущиеся заряды, помещенные в это поле.*

Магнитное поле токов принципиально отличается от электрического поля:

- источники **электростатического поля** – неподвижные заряды;
- источники **магнитного поля** – движущиеся заряды (токи).

Аналогия

напряженность электрического поля \vec{E}

вектор магнитной индукции
 \vec{B}

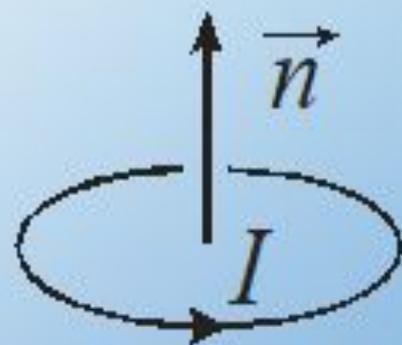
силовые линии

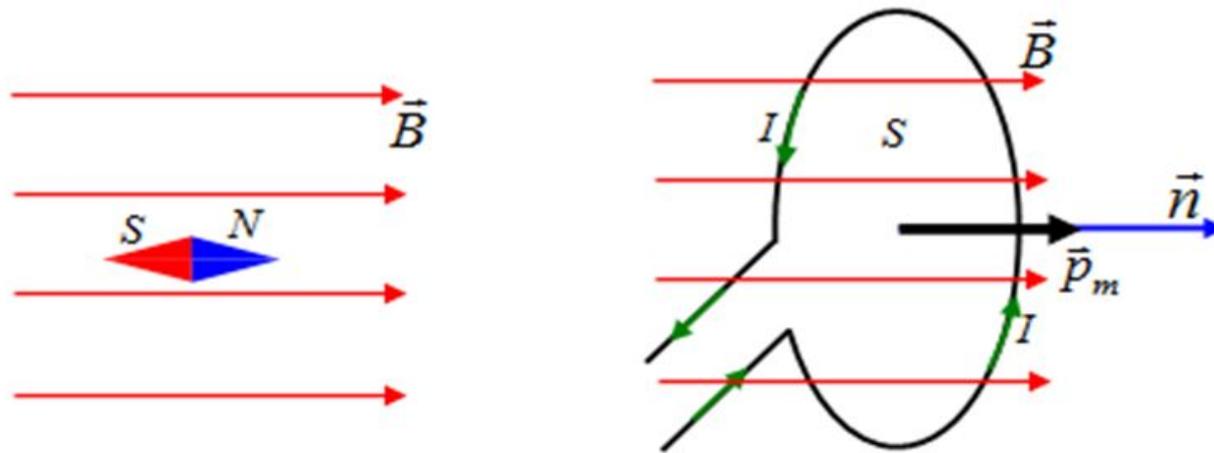
линии магнитной индукции

Используем пробный ток, циркулирующий в плоском замкнутом контуре очень малых размеров.

Ориентацию контура в пространстве характеризуют направлением нормали к контуру, связанной с направлением тока правилом правого винта. Такую нормаль мы будем называть положительной.

МП оказывает на контур с током такое же ориентирующее действие, как и на магнитную стрелку: положительная нормаль контура разворачивается в ту же сторону, что и северный полюс магнитной стрелки.





Методы обнаружения магнитного поля:
магнитная стрелка (слева), рамка с током

За направление магнитного поля принято:

- направление силы, действующей на северный полюс магнитной стрелки;
- направление нормали (вектора магнитного момента рамки с током).

На рамку площадью S с током I действует вращающий момент, зависящий как от свойств поля, так и от свойств рамки

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

$$B = \frac{M_{\max}}{p_m}, \text{ Тл (тесла)}$$

24

где \vec{B} – вектор магнитной индукции, совпадающий с нормалью \vec{n}

По аналогии с электрическим полем $\vec{E} = \vec{F}/q$.

Магнитная индукция \vec{B} характеризует силовое действие магнитного поля на ток (аналогично \vec{E} характеризует силовое действие электрического поля на заряд).

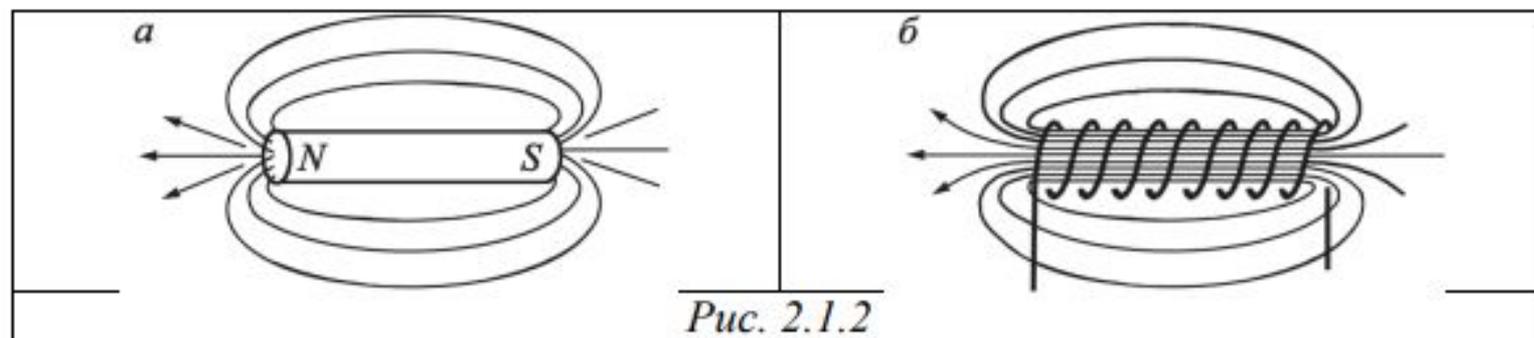
\vec{B} – силовая характеристика магнитного поля, ее можно изобразить с помощью *магнитных силовых линий*.

Поскольку M – момент силы и P_m – магнитный момент являются характеристиками вращательного движения, то можно предположить, что магнитное поле – *вихревое*.

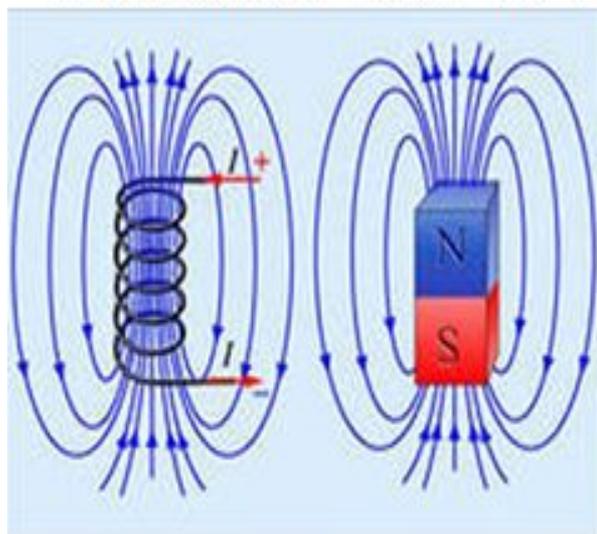
Условились за направление \vec{B} принимать направление северного конца магнитной стрелки. Силовые линии выходят из северного полюса, а входят соответственно в южный полюс магнита (рис. 2.1.2, а).

Для графического изображения полей удобно пользоваться силовыми линиями (*линиями магнитной индукции*). **Линиями магнитной индукции** называются кривые, касательные к которым в каждой точке совпадают с направлением вектора \vec{B} в этой точке.

Магнитные силовые линии всегда замкнуты – *вихревое поле* (рис.2.1.2, б).



Вектор магнитной индукции \mathbf{B} характеризует силовое действие магнитного поля на токи, движущиеся заряды и постоянные магниты.



Магнитное поле удобно изображать с помощью линий вектора магнитной индукции, которые строятся так, чтобы в каждой точке вектор \mathbf{B} был направлен по касательной к линии, а густота была пропорциональна величине магнитной индукции. Магнитное поле удовлетворяет принципу суперпозиции: $\mathbf{B} = \Sigma \mathbf{B}_i$

В теории магнетизма используется вектор *напряжённости магнитного поля* \mathbf{H} : $\mathbf{B} = \mu\mu_0\mathbf{H}$ или $\mathbf{H} = \mathbf{B}/\mu\mu_0$, где μ - магнитная проницаемость среды, μ_0 - магнитная постоянная ($\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Н/А²)

Закон Био – Савара – Лапласа

В 1820 г. французские ученые **Био и Савар** провели исследования магнитных полей, которые создаются прямолинейным током, круговым током, катушкой с током и т.д. Проведя много опытов, они сделали выводы:

- а) индукция магнитного поля, которое создается электрическим током, **пропорциональна силе тока**;
- б) магнитная индукция **зависит от формы и размеров** проводника с током;
- в) магнитная индукция в произвольной точке **зависит от расположения этой точки** относительно проводника с током



Жан-Батист Био



Пьер-Симон Лаплас

2.1.2. Закон Био – Савара – Лапласа

Магнитное поле любого тока может быть вычислено как векторная сумма (суперпозиция) полей, создаваемых отдельными элементарными участками тока:

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

Элемент тока длины dl (рис. 2.1.3) создает поле с магнитной индукцией:

$$dB = k \frac{Idl}{r^2}, \quad (2.1.3)$$

или в векторной форме:

$$dB = k \frac{I[d\vec{l}, \vec{r}]}{r^3}. \quad (2.1.4)$$

Это и есть *закон Био – Савара – Лапласа*, полученный экспериментально.

Здесь I – ток; $d\vec{l}$ – вектор, совпадающий с элементарным участком тока и направленный в ту сторону, куда течет ток; \vec{r} – радиус-вектор, проведенный от элемента тока в точку, в которой мы определяем $d\vec{B}$; r – модуль радиус-вектора; k – коэффициент пропорциональности, зависящий от системы единиц.

Поле прямого проводника с током

Учитывая, что модуль векторного произведения $|\mathbf{dl} \times \mathbf{r}| = r dl \sin \alpha$, где α – угол между векторами \mathbf{r} и $d\mathbf{l}$ из выражения Закона Био – Савара – Лапласа можем получить формулу для **модуля вектора магнитной индукции** элемента тока dl :

$$dB = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{Idl \sin \alpha}{r^2}$$

Рассмотрим применение Закона Био – Савара – Лапласа на примере магнитного поля **прямого бесконечного проводника с током.**

Направление поля в таком случае может быть найдено с использованием **правила правой руки**, которое поясняется на рисунке.



2.1.4. Напряженность магнитного поля

Силовой характеристикой магнитного поля служит вектор магнитной индукции \vec{B} поля, созданного одним зарядом в вакууме:

$$\vec{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{q[\vec{v}, \vec{r}]}{r^3}.$$

Еще одной характеристикой магнитного поля является *напряженность*.

Напряженностью магнитного поля называют векторную величину \vec{H} , характеризующую магнитное поле и определяемую для вакуума следующим образом:

$$\vec{H} = \frac{\vec{B}}{\mu_0}. \quad (2.1.11)$$

Напряженность магнитного поля заряда q , движущегося в вакууме, равна

$$\vec{H} = \frac{1}{4\pi} \frac{q[\vec{v}, \vec{r}]}{r^3}. \quad (2.1.12)$$

Это выражение показывает *закон Био – Савара – Лапласа для \vec{H}* .

Напряженность магнитного поля \vec{H} является как бы аналогом вектора электрического смещения \vec{D} в электростатике.

где n – число носителей заряда в единице объема; \vec{v} – дрейфовая скорость зарядов.

В природе нет магнитных зарядов. Это приводит к тому, что линии вектора \vec{B} не имеют ни начала, ни конца. Мы знаем, что поток любого вектора через поверхность равен разности числа линий, начинающихся у поверхности, и числа линий, оканчивающихся внутри поверхности:

$$\Phi = N_{\text{нач}} - N_{\text{оканч}}.$$

В соответствии с вышеизложенным можно сделать заключение, что *поток вектора \vec{B} через замкнутую поверхность должен быть равен нулю.*

$$\Phi_B = \oint_S \vec{B} d\vec{S} = 0. \quad (2.1.15)$$

Это теорема Гаусса для Φ_B (в интегральной форме): поток вектора магнитной индукции через любую замкнутую поверхность равен нулю.

Это условие должно выполняться для любого произвольного объема V , а это, в свою очередь, возможно, если подынтегральная функция в каждой точке поля равна нулю. Таким образом, *магнитное поле обладает тем свойством, что его дивергенция всюду равна нулю:*

$$\operatorname{div} \vec{B} = 0. \quad (2.1.17)$$

В этом его отличие от электростатического поля, которое является потенциальным и может быть выражено скалярным потенциалом φ , магнитное поле – *вихревое, или соленоидальное.*

Вопросы к читателю. Упражнения

1. Как, пользуясь магнитной стрелкой, можно определить знаки полюсов источников постоянного тока?
2. Чему равен и как направлен магнитный момент рамки с током?
3. Что называют индукцией магнитного поля? Каково направление вектора \vec{B} ? Нарисуйте и покажите, как ориентированы линии магнитной индукции поля прямого тока?
4. Записав закон Био-Савара-Лапласа, объясните его физический смысл.
5. Рассчитайте, применяя закон Био-Савара-Лапласа, магнитное поле: 1) прямого тока; 2) в центре кругового проводника с током.
6. Какой вывод можно сделать, сравнивая циркуляцию векторов \vec{E} и \vec{B} ?
7. Какая теорема доказывает вихревой характер магнитного поля? Как она формулируется?
8. Почему магнитное поле является вихревым?
9. Используя теорему о циркуляции вектора магнитной индукции \vec{B} , рассчитайте магнитное поле тороида.
10. Что называют потоком вектора магнитной индукции? Запишите теорему Гаусса для магнитного поля, объяснив ее физический смысл.
11. Какая физическая величина выражается в веберах? Дайте определение вебера.

Закон Ампера

Направление силы Ампера определяется по правилу левой руки: если левую руку расположить так, чтобы вектор магнитной индукции входил в ладонь, а вытянутые пальцы были направлены вдоль тока, то отогнутый большой палец укажет на направление действия силы Ампера на проводник с током.

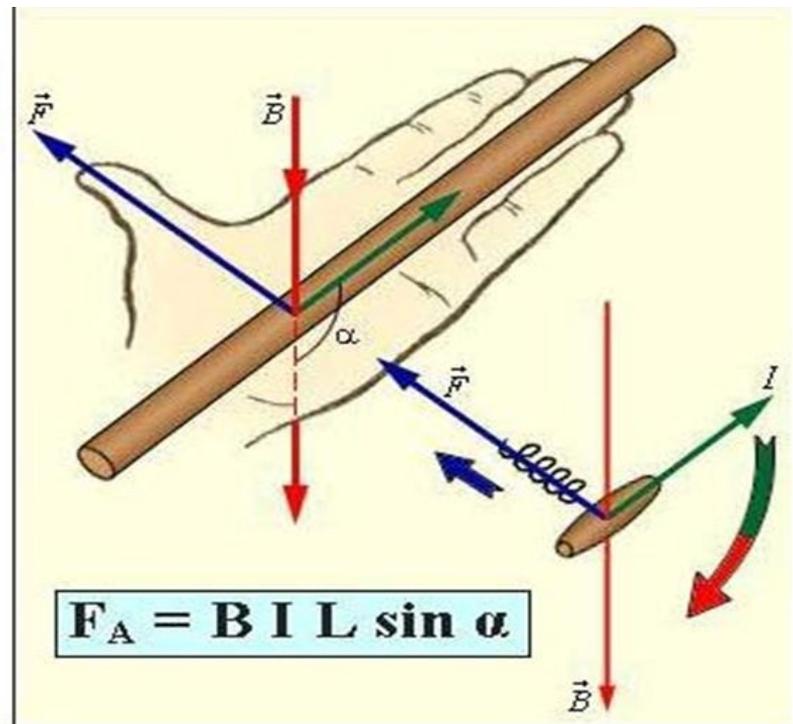
где $I = qnS$ – ток через проводник сечением S .

Закон Ампера – это первое открытие фундаментальных сил, зависящих от скоростей.

Из закона Ампера хорошо виден физический смысл магнитной индукции. B – величина, численно равная силе, с которой магнитное поле действует на проводник единичной длины, по которому течет единичный ток:

$$B = \frac{F}{Il}$$

Размерность индукции $[B] = \frac{\text{Н}}{\text{А} \cdot \text{м}}$.



Если провод, по которому течет ток, находится в магнитном поле, на каждый из носителей тока действует сила:

$$\vec{F} = e [\vec{v} + \vec{u}), \vec{B}]$$

, где \vec{v} - скорость хаотического движения носителя;
 \vec{u} - скорость упорядоченного движения.

От носителя тока действие этой силы передается проводнику, по которому он перемещается. В результате на провод с током, находящийся в магнитном поле, действует сила.

2.2.4. Единицы измерения магнитных величин

Закон Ампера используется для установления единицы силы тока – ампер.

Ампер – сила тока, неизменного по величине, который, проходя по двум параллельным прямолинейным проводникам бесконечной длины и ничтожно малого сечения, расположенным на расстоянии один метр один от другого в вакууме, вызывает между этими проводниками силу в $2 \cdot 10^{-7}$ Н/м:

$$\frac{dF}{dl} = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{2I_1 I_2}{b}.$$

Здесь $dl = 1$ м; $b = 1$ м; $I_1 = I_2 = 1$ А; $\frac{dF}{dl} = 2 \cdot 10^{-7} \frac{\text{Н}}{\text{м}}$.

Определим отсюда размерность и величину μ_0 в СИ:

$$2 \cdot 10^{-7} \frac{\text{Н}}{\text{м}} = \frac{\mu_0}{4\pi} \cdot 2 \text{А}^2,$$

следовательно, $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{\text{Н}}{\text{А}^2}$, или $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{\text{Гн}}{\text{м}}$.

Из закона Био – Савара – Лапласа для прямолинейного проводника с током $B = \frac{\mu_0 I}{4\pi b}$ тоже можно найти размерность индукции магнитного поля:

$$[B] = \frac{\text{Н}}{\text{А}^2} \frac{\text{А}}{\text{м}} = \frac{\text{Н}}{\text{А} \cdot \text{м}} = 1 \text{ Тл.}$$

Тесла – единица измерения индукции в СИ.

1 Тл равен магнитной индукции однородного магнитного поля, в котором на плоский контур с током, имеющим магнитный момент $1 \text{ А} \cdot \text{м}^2$, действует вращающий момент $1 \text{ Н} \cdot \text{м}$.

Другое определение: 1 Тл равен магнитной индукции, при которой магнитный поток сквозь площадку 1 м^2 , перпендикулярную направлению поля, равен 1 Вб.

Единица измерения магнитного потока Вб получила свое название в честь немецкого физика Вильгельма Вебера (1804–1891) – профессора университетов в Галле, Геттингене, Лейпциге.

Как мы уже говорили, *магнитный поток Φ через поверхность S – одна из характеристик магнитного поля* (рис. 2.2.4):

$$d\Phi_B = B d\vec{S} \cos(\vec{d}\vec{n}, \vec{B}); \quad \Phi = \int_S B_n dS.$$

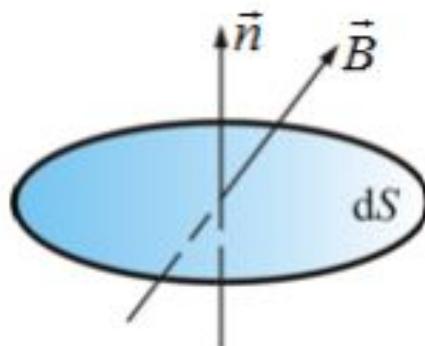


Рис. 2.2.4

Единица измерения магнитного потока в СИ:

$$[\Phi_B] = [B] \cdot [S] = \text{Тл} \cdot \text{м}^2 = \text{Вб}; \quad 1 \text{ Тл} = 1 \frac{\text{Вб}}{\text{м}^2}.$$

Напряженность магнитного поля H измеряется в $\text{А} \cdot \text{м}^{-1}$.

2.4. Явление электромагнитной индукции

2.4.1. опыты Фарадея. Индукционный ток. Правило Ленца

С момента открытия связи магнитного поля с током (что является подтверждением симметрии законов природы) делались многочисленные попытки получить *ток с помощью магнитного поля*. Задача была решена Майклом Фарадеем в 1831 г. (Американец Джозеф Генри тоже открыл, но не успел опубликовать свои результаты. Ампер также претендовал на открытие, но не смог представить свои результаты).

Если подносить постоянный магнит к катушке или наоборот (рис. 2.4.1), то в катушке возникнет электрический ток. То же самое происходит с двумя близко расположенными катушками: если к одной из катушек подключить источник переменного тока, то в другой также возникнет переменный ток (рис. 2.4.2), но лучше всего этот эффект проявляется, если две катушки соединить сердечником (рис. 2.4.3).

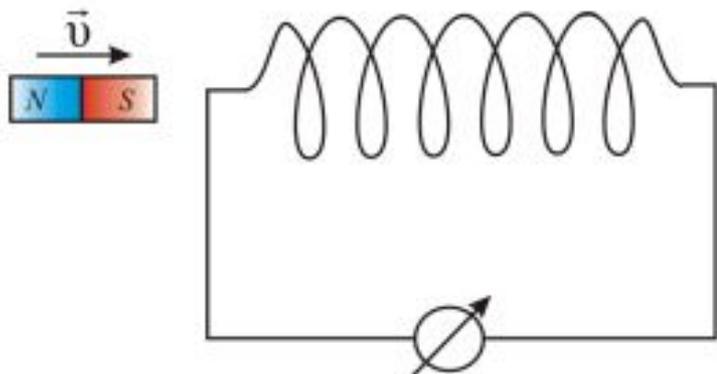


Рис. 2.4.1

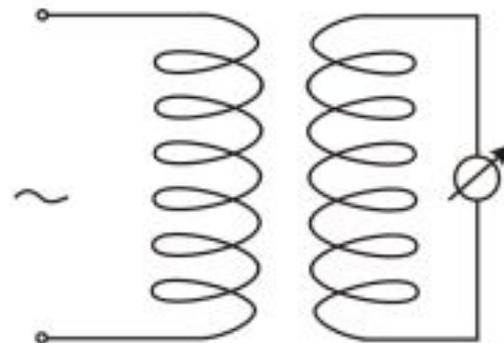


Рис. 2.4.2

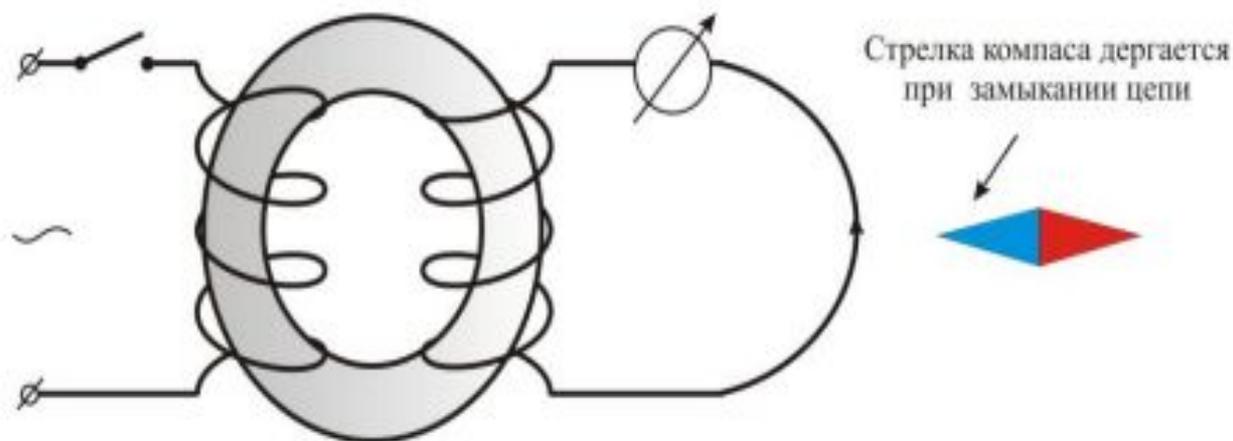


Рис. 2.4.3

По определению Фарадея общим для этих опытов является следующее: *если поток вектора индукции, пронизывающий замкнутый, проводящий контур, меняется, то в контуре возникает электрический ток.*

2.4.2. Величина ЭДС индукции

Для создания тока в цепи необходимо наличие электродвижущей силы. Поэтому явление электромагнитной индукции свидетельствует о том, что при изменении магнитного потока в контуре возникает электродвижущая сила индукции \mathcal{E}_i . Наша задача, используя законы сохранения энергии, найти величину \mathcal{E}_i и выяснить ее природу.

$$\mathcal{E}_i = -\frac{d\Phi}{dt}. \quad (2.4.4)$$

ЭДС индукции контура \mathcal{E}_i равна скорости изменения потока магнитной индукции, пронизывающей этот контур.

Это выражение (2.4.4) для ЭДС индукции контура является универсальным, не зависящим от способа изменения потока магнитной индукции, и носит название **закон Фарадея**.

Знак минус в выражении отражает **правило Ленца о направлении индукционного тока: индукционный ток всегда направлен так, чтобы своим полем противодействовать изменению начального магнитного поля.**

Это явление называют явлением электромагнитной индукции, а ток – индукционным. При этом явление совершенно не зависит от способа изменения потока вектора магнитной индукции.

Итак, получается, что движущиеся заряды (ток) создают магнитное поле, а движущееся магнитное поле создает (вихревое) электрическое поле и собственно индукционный ток.

Для каждого конкретного случая Фарадей указывал направление индукционного тока.

В 1833 г. русский физик Э.Х. Ленц установил общее **правило нахождения направления тока**: индукционный ток всегда направлен так, что магнитное поле этого тока препятствует изменению магнитного потока, вызывающего индукционный ток. Это утверждение носит название **правило Ленца**.

Заполнение всего пространства однородным магнетиком приводит, при прочих равных условиях, к увеличению индукции в μ раз. Этот факт подтверждает то, что индукционный ток обусловлен изменением потока вектора магнитной индукции \vec{B} , а не потока вектора напряженности \vec{H} .

2.4.3. Природа ЭДС индукции

Ответим на вопрос: что является причиной движения зарядов, причиной возникновения индукционного тока? Рассмотрим рис. 2.4.6.

Проводник с током, изогнутый как показано на рисунке, замкнут подвижным проводником.

- 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 \mathcal{E}_i – *сторонняя сила*, под действием которой течет ток.

Для положительных зарядов $\vec{F}_L = q^+[\vec{B}, \vec{v}]$, для электронов $\vec{F}_L = e^-[\vec{B}, \vec{v}]$.

- Если проводник неподвижен, а изменяется магнитное поле, какая сила возбуждает индукционный ток в этом случае?

2.4.3. Природа ЭДС индукции

Ответим на вопрос: что является причиной движения зарядов, причиной возникновения индукционного тока? Рассмотрим рис. 2.4.6.

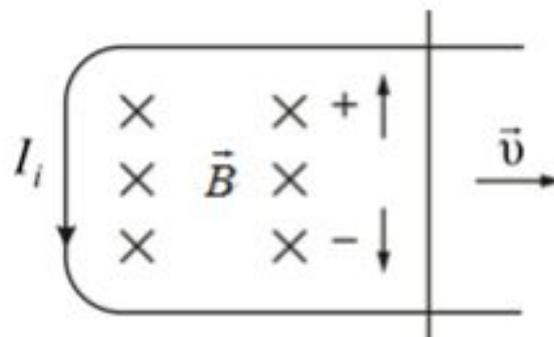
Проводник с током, изогнутый как показано на рисунке, замкнут подвижным проводником.

- 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 \mathcal{E}_i – *сторонняя сила*, под действием которой течет ток.

Для положительных зарядов $\vec{F}_L = q^+[\vec{B}, \vec{v}]$, для электронов $\vec{F}_L = e^-[\vec{B}, \vec{v}]$.

- Если проводник неподвижен, а изменяется магнитное поле, какая сила возбуждает индукционный ток в этом случае?

Если взять обыкновенный трансформатор, то, как только замыкается цепь первичной обмотки, во вторичной обмотке сразу возникает ток. При этом сила Лоренца не участвует, т.к. она действует на движущиеся заряды.



Ответ был дан Дж. Максвеллом в 1860 г.: *всякое переменное магнитное поле возбуждает в окружающем пространстве переменное электрическое поле E'* . Оно и является причиной возникновения индукционного тока в проводнике. То есть E' возникает только при наличии переменного магнитного поля (на постоянном токе трансформатор не работает).

Сущность явления электромагнитной индукции совсем не в появлении индукционного тока (ток появляется тогда, когда есть заряды и замкнута цепь), а в возникновении вихревого электрического поля (не только в проводнике, но и в окружающем пространстве, в вакууме).

Это поле имеет совершенно иную структуру, нежели поле, создаваемое зарядами. Так как оно не создается зарядами, то силовые линии не могут начинаться и заканчиваться на зарядах, как это было у нас в электростатике. Это поле вихревое, силовые линии его замкнуты.

Так как это поле перемещает заряды, оно обладает силой.

т.е. ЭДС индукции \mathcal{E} пропорциональна скорости изменения магнитного поля $\frac{dB}{dt}$.

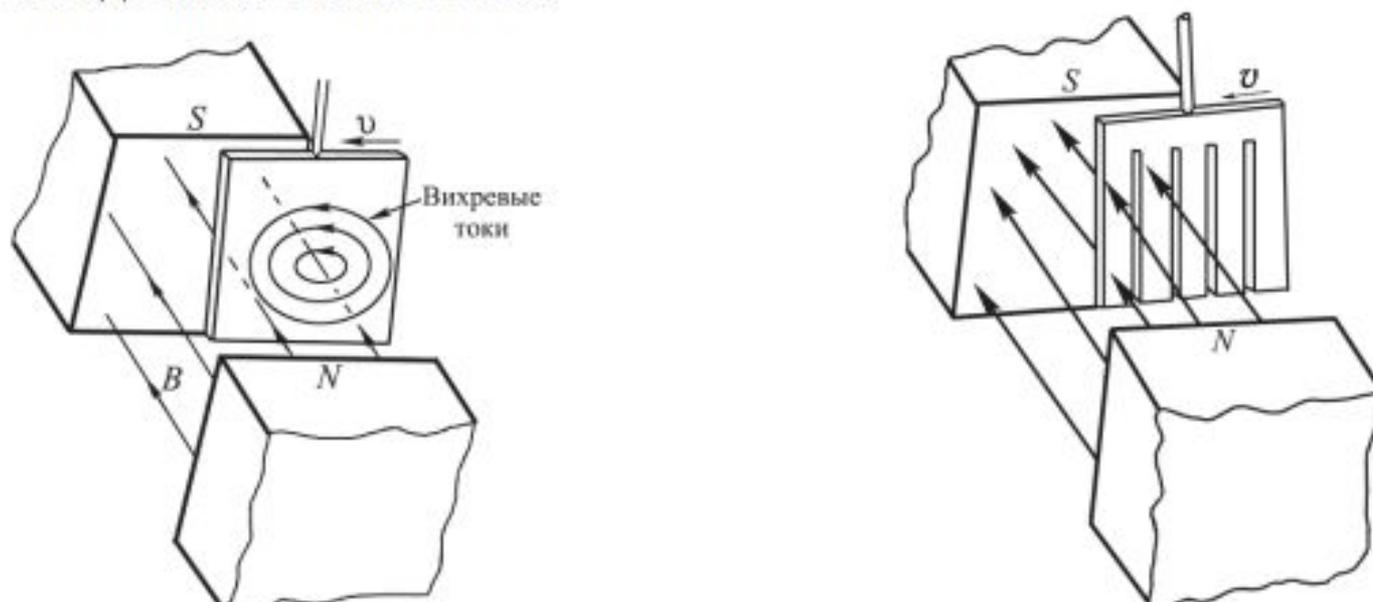
2.4.5. Токи Фуко (вихревые токи)

До сих пор мы рассматривали индукционные токи в линейных проводниках. Но индукционные токи будут возникать и в толще сплошных проводников при изменении в них потока вектора магнитной индукции \vec{B} . Они будут циркулировать в веществе проводника (напомним, что линии \vec{E}' – замкнуты). Так как электрическое поле вихревое, то и токи называются вихревыми токами, или *токами Фуко*.

Если медную пластину отклонить от положения равновесия и отпустить так, чтобы она вошла со скоростью v в пространство между полюсами магнита, то пластина практически остановится в момент ее вхождения в магнитное поле (рис. 2.4.8).

Замедление движения связано с возбуждением в пластине вихревых токов, препятствующих изменению потока вектора магнитной индукции. Поскольку пластина обладает конечным сопротивлением, токи индукции постепенно затухают и пластина медленно двигается в магнитном поле. Если электромагнит отключить, то медная пластина будет совершать обычные колебания, характерные для маятника.

Сила и расположение вихревых токов очень чувствительны к форме пластины. Если заменить сплошную медную пластину «гребенкой» – медной пластиной с пропилами, то вихревые токи в каждой части пластины возбуждаются меньшими потоками. Индукционные токи уменьшаются, уменьшается и торможение (рис. 2.4.9). Маятник в виде гребенки колеблется в магнитном поле почти без сопротивления. Этим опытом объясняется, почему сердечники электромагнитов, трансформаторов делают не из сплошного куска железа, а набранными из тонких пластин, изолированных друг от друга. В результате уменьшаются токи Фуко и выделяемое ими тепло.



Тормозящее действие тока Фуко используется для создания магнитных успокоителей – демпферов. Если под качающейся в горизонтальной плоскости магнитной стрелкой расположить массивную медную пластину, то возбуждаемые в медной пластине токи Фуко будут

тормозить колебание стрелки. Магнитные успокоители такого рода используются в сейсмографах, гальванометрах и других приборах.

Токи Фуко применяются в электрометаллургии для плавки металлов (рис. 2.4.10). Металл помещают в переменное магнитное поле, создаваемое током частотой 500–2000 Гц. В результате индуктивного разогрева металл плавится, а тигль, в котором он находится, при этом остается холодным. Например, при подведенной мощности 600 кВт тонна металла плавится за 40–50 минут.

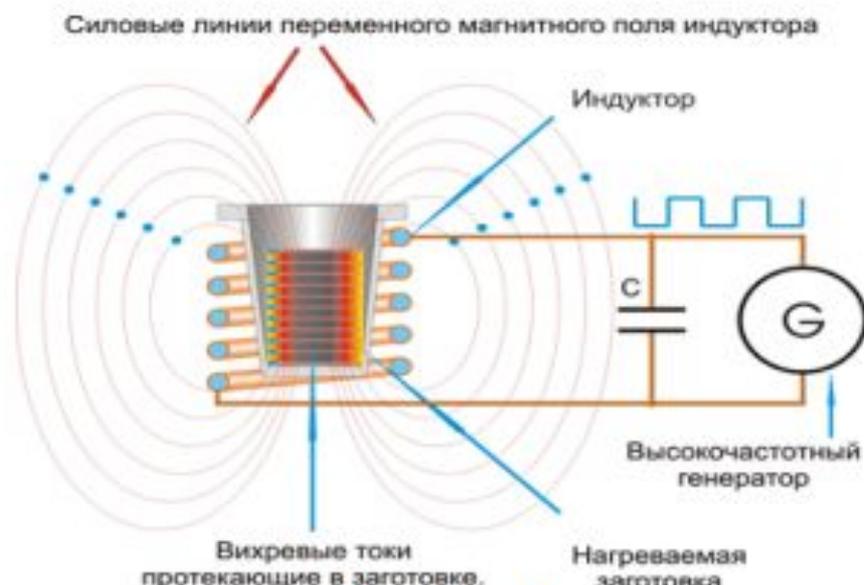


Рис. 2.4.10

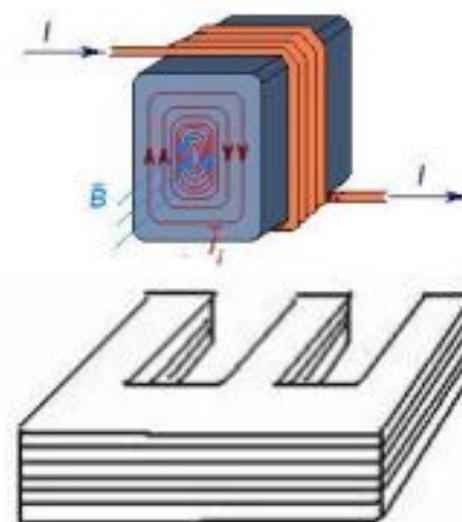
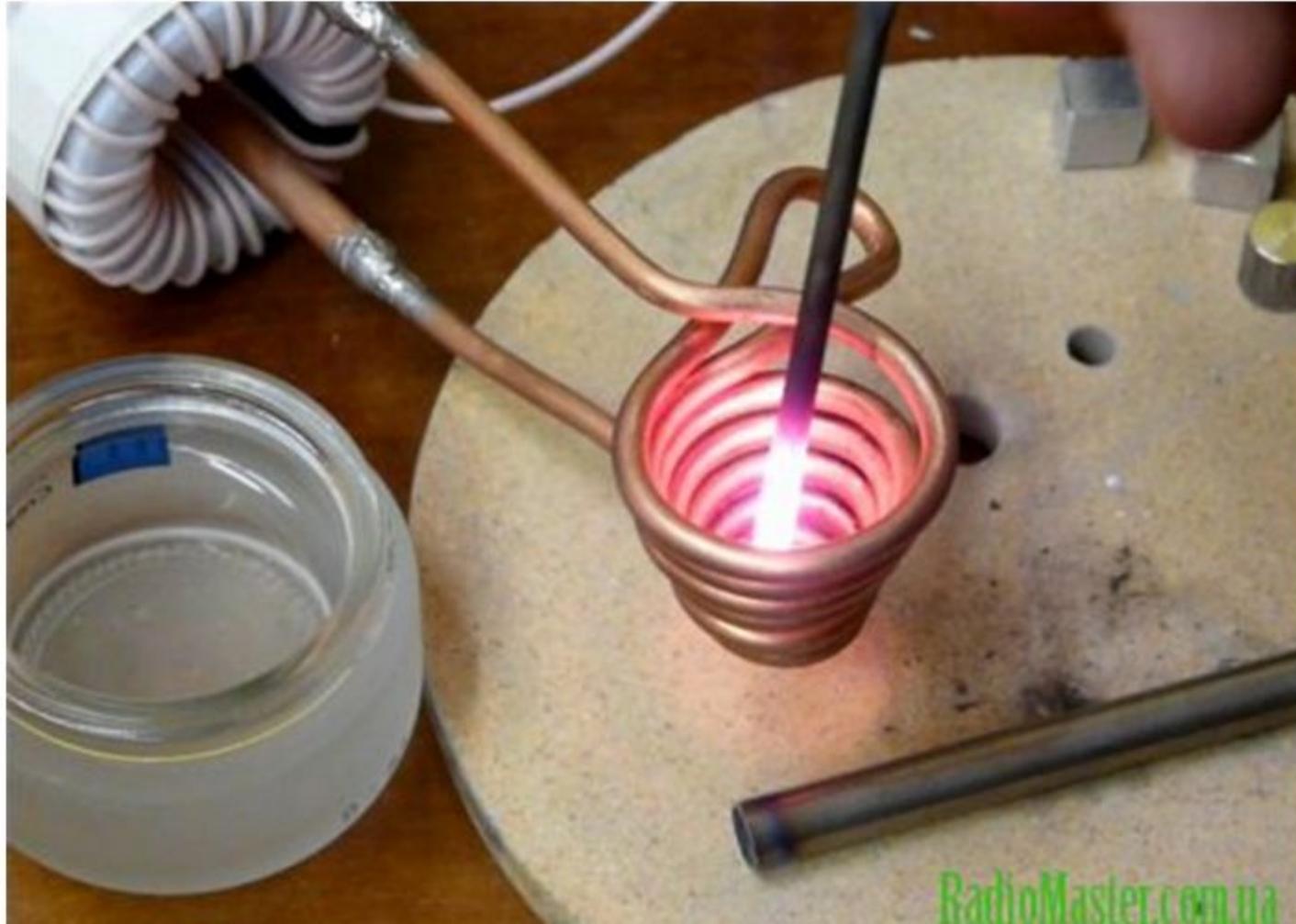


Рис. 2.4.11

Вредное действие токов Фуко проявляется в разогреве сердечников трансформаторов (рис. 2.4.11). Чтобы избежать этого, приходится изготавливать сердечники не сплошные, а из пластин.

По катушке протекает переменный ток высокой частоты. Соответственно, магнитный поток постоянно изменяется. Это вызывает появление токов Фуко в толще проводника, которыми обуславливается сильный нагрев проводника. По такому принципу работает индукционная печь а также ВЧ закалка.



2.4.6. Скин-эффект

Если быстропеременный высокочастотный ток протекает по проводнику, то вихревые токи, индуцируемые в проводнике, препятствуют равномерному распределению плотности тока по поперечному сечению проводника – плотность тока на оси провода оказывается меньше, чем у его поверхности. Ток как бы вытесняется на поверхность провода, при этом вихревые токи по оси проводника текут против направления основного тока, а на поверхности – в том же направлении (рис. 2.4.10). Это явление называется скин-эффектом (от англ. *skin* – кожа, оболочка). Впервые это явление описано в 1885–1886 гг. английским физиком О. Хевисайдом, а обнаружено на опыте его соотечественником Д. Юзом в 1886 г.

При нарастании тока в проводе ЭДС индукции направлена против тока. Электрическое поле самоиндукции максимально на оси провода, что приводит к неравномерному распределению плотности тока. Плотность тока убывает от поверхности к оси провода примерно по экспоненциальному закону (рис. 2.4.13).

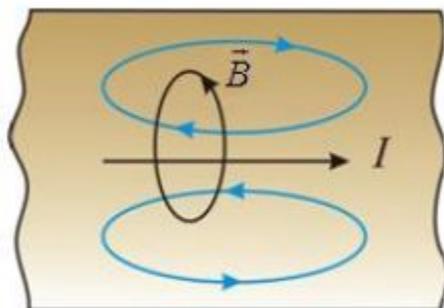


Рис. 2.4.12

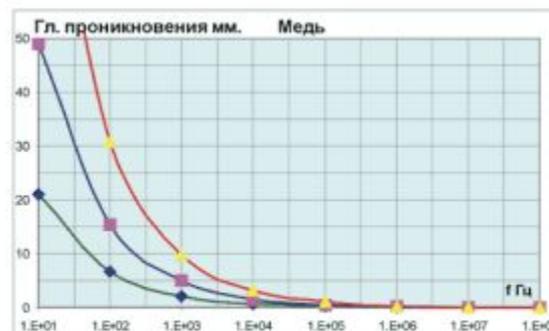


Рис. 2.4.13

При частоте $\nu = 50$ Гц $r_0 = 10$ мм – ток практически равномерно распределен по объему проводов, исключая очень толстые кабели. Но при высокочастотных колебаниях ($\nu \approx 100$ МГц = 10^8 Гц) глубина проникновения $r_0 \approx 7 \cdot 10^{-3}$ мм и ток почти целиком течет по поверхности провода. По этой причине с целью уменьшения потерь поверхность высокочастотных контуров серебрят. Провода для переменных токов высокой частоты, учитывая скин-эффект, сплетают из большого числа тонких проводящих нитей, изолированных друг от друга эмалевым покрытием – *литцендратом* (рис. 2.4.14).



Рис. 2.4.14

ВЧ-токи используются для закалки поверхностей деталей: поверхностный слой разогревается быстро в ВЧ-поле, закаливается и становится прочным, но не хрупким, т.к. внутренняя часть детали не разогревалась и не закаливалась.

1. Что является причиной возникновения ЭДС индукции в замкнутом проводящем контуре? От чего и как зависит ЭДС индукции, возникающая в контуре?

2. В чем заключается явление электромагнитной индукции? Проанализируйте опыты Фарадея.

3. Почему для обнаружения индукционного тока лучше использовать замкнутый проводник в виде катушки, а не в виде одного витка провода?

4. Сформулируйте правило Ленца, проиллюстрировав его примерами.

5. Как направлен индукционный ток?

6. Всегда ли при изменении магнитной индукции в проводящем контуре в нем возникает ЭДС индукции? индукционный ток?

7. Возникает ли индукционный ток в проводящей рамке, поступательно движущейся в однородном магнитном поле?

8. Покажите, что закон Фарадея есть следствие закона сохранения энергии.

9. Какова природа ЭДС электромагнитной индукции?

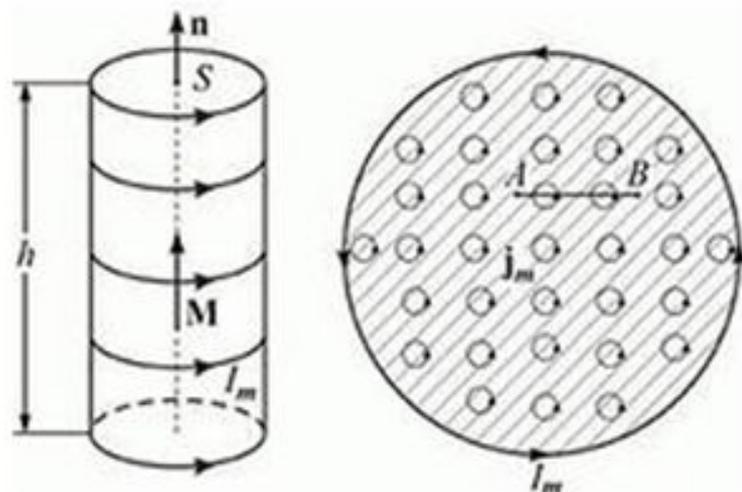
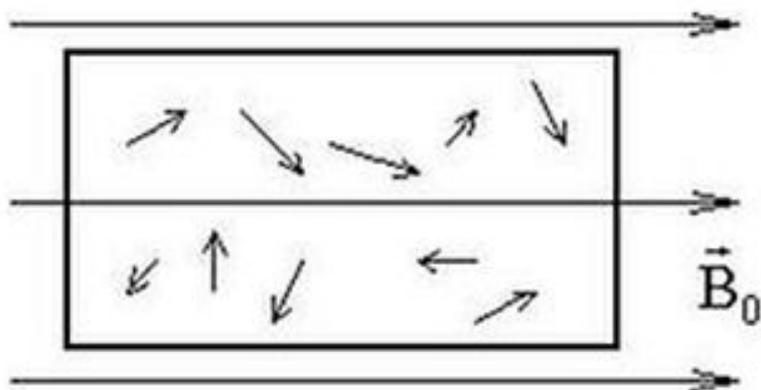
10. Выведите выражение для ЭДС индукции в плоской рамке, равномерно вращающейся в однородном магнитном поле. За счет чего ее можно увеличить?

11. Что такое вихревые токи? Вредны они или полезны?

12. Почему сердечники трансформаторов не делают сплошными?

13. Когда ЭДС самоиндукции больше – при замыкании или размыкании цепи постоянного тока?

Магнитное поле в веществе



В отношении влияния магнитного поля на вещество это вещество называют магнетиком. Первые представления о магнитном поле в веществе были сформулированы Ампером. Он считал, что в веществе имеются замкнутые токи очень малых размеров (порядка атомных), обладающие магнитными моментами. Эти токи и их магнитные моменты обычно называют молекулярными. В отсутствие внешнего магнитного поля, вследствие хаотического теплового движения, их векторная сумма в макроскопическом объёме вещества равна нулю. При помещении этого объема во внешнее поле магнитные моменты молекулярных токов выстраиваются вдоль поля, и вещество намагничивается, т.е. указанный объём вещества приобретает магнитный момент

Поле в веществе можно представить в виде $\mathbf{B} = \mathbf{B}_0 + \mathbf{B}'$, где \mathbf{B}' - индукция, обусловленная ориентацией молекулярных токов во внешнем магнитном поле

Намагниченность

Вектор намагниченности $\mathbf{J} = (\sum \mathbf{P}_{mi})/V$, где \mathbf{P}_{mi} - молекулярный магнитный момент с номером i .

Индукция поля в веществе $\mathbf{B} = \mu_0 \mathbf{H}_0 + \mu_0 \mathbf{J}$, где \mathbf{H}_0 - напряжённость внешнего поля

Намагниченность пропорциональна внешнему полю $\mathbf{J} = \chi \mathbf{H}_0$, где χ - коэффициент, не зависящий от внешнего поля и называемый магнитной восприимчивостью вещества.

$\mathbf{B} = \mu_0 \mathbf{H}_0 + \chi \mu_0 \mathbf{H}_0 = \mu_0 (\chi + 1) \mathbf{H}_0$. С другой стороны для такого вещества $\mathbf{B} = \mu \mu_0 \mathbf{H}_0$ и тогда $\mu = 1 + \chi$.

Для неоднородного магнетика $\chi = \chi(x, y, z)$ и $\mu = \mu(x, y, z)$ и при однородном внешнем поле намагниченность вещества в различных точках образца различна: $\mathbf{J} = \mathbf{J}(x, y, z)$ и $\mathbf{B}' = \mathbf{B}'(x, y, z)$. В случае нелинейного магнетика ($\chi = \chi(H_0)$ и $\mu = \mu(H_0)$) зависимость \mathbf{B} от \mathbf{H}_0 не является линейной. В анизотропном магнетике, когда χ и μ зависят от направления внешнего поля по отношению к направлению кристаллических осей вещества, \mathbf{B}' не совпадает по направлению с \mathbf{B}_0 и зависимость \mathbf{B} от \mathbf{H}_0 носит сложный характер.

Магнетики можно разделить на три основные группы: *диамагнетики, парамагнетики и ферромагнетики.*

Зависимость намагниченности от напряженности магнитного поля для разных материалов приведена на рис. 2.7.5.



Рис. 2.7.5

Диамагнетизм (от греч. *dia* – расхождение и магнетизм) – свойство веществ намагничиваться навстречу приложенному магнитному полю.

Диамагнетиками называются вещества, магнитные моменты атомов которых в отсутствии внешнего поля равны нулю, т.к. магнитные моменты всех электронов атома взаимно скомпенсированы

Диамагнитные добавки ΔP_m направлены против внешнего поля B_0 , и образец намагничивается в противоположном направлении. Для диамагнетиков χ - отрицательна. Экспериментально полученные значения $|\chi| = 10^{-6} - 10^{-5}$, а $\mu = 1 + \chi$ - величина, очень близкая к единице.

К диамагнетикам относятся инертные газы, молекулярные водород и азот, германий, кремний, висмут, цинк, медь, золото, серебро, вода, ацетон, глицерин, нафталин и другие. Диамагнитный эффект имеет место и в других магнетиках, но в них он пренебрежимо мал по сравнению с пара- и ферромагнитным эффектом.

В отсутствие внешнего магнитного поля атомы и молекулы парамагнитных веществ обладают собственными магнитными моментами. При помещении во внешнее поле эти моменты стремятся ориентироваться вдоль его направления, однако тепловое движение нарушает эту ориентацию, которая оказывается частичной. Степень ориентации зависит от величины намагничивающего поля и температуры образца.

Парамагнетизм (от греч. *para* – возле, рядом и магнетизм) – свойство веществ во внешнем магнитном поле намагничиваться в направлении этого поля, поэтому внутри парамагнетика к действию внешнего поля прибавляется действие наведенного внутреннего поля.

Парамагнетиками называются вещества, атомы которых имеют, в отсутствие внешнего магнитного поля, отличный от нуля магнитный момент \vec{P}_m .

Парамагнетиками называются вещества, атомы которых имеют, в отсутствие внешнего магнитного поля, отличный от нуля магнитный момент \vec{P}_m .

Эти вещества намагничиваются в направлении вектора $\vec{B}_{\text{внеш}}$.

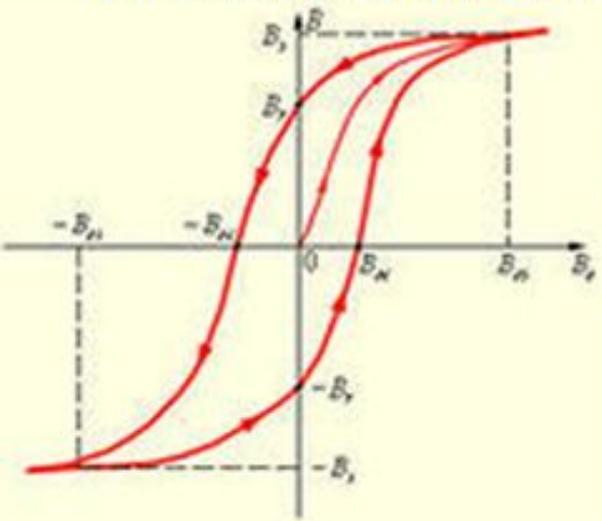
К *парамагнетикам* относятся многие щелочные металлы, кислород O_2 , оксид азота NO , хлорное железо $FeCl_2$ и др.

В отсутствие внешнего магнитного поля намагниченность парамагнетика $J = 0$, т.к. векторы \vec{P}_{mi} разных атомов ориентированы беспорядочно.

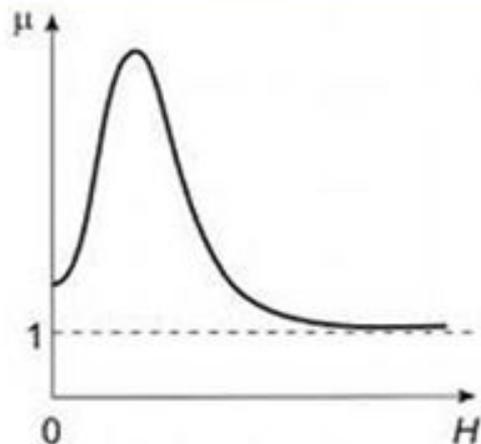
При внесении парамагнетика во внешнее магнитное поле происходит преимущественная ориентация собственных магнитных моментов атомов \vec{P}_{mi} по направлению поля, так что парамагнетик намагничивается. Значения i для парамагнетиков положительны ($i > 0$) и находятся в пределах $\sim 10^{-5} - 10^{-3}$, т.е. примерно как и у диамагнетиков.

Ферромагнетики

Существуют вещества, способные сильно намагничиваться в сравнительно слабых в внешних полях, называемые ферромагнетиками



- а) μ - велико ($\sim 5 \cdot 10^3 - 8 \cdot 10^5$);
- б) $B(H)$ – нелинейна, т.е. $\mu = \mu(H)$;
- в) Наблюдается гистерезис: B_r - остаточная индукция, H_c - коэрцитивная сила;
- г) имеют точку Кюри – температуру перехода из ферромагнитного в парамагнитное состояние



К ферромагнетикам относятся некоторые металлы: железо, никель, кобальт, ряд сплавов: пермаллой (78% Ni, 22% Fe), супермаллой (79% Ni, 16% Fe, 5% Mo), сплав железа с кремнием (96,7% Fe, 3,3% Si), алнико (51% Fe, 24% Co, 14% Ni, 8% Al, 3% Cu) и большое количество других. К ферромагнетикам относятся также ферриты, относящиеся к керамикам и обладающие очень высоким удельным электрическим сопротивлением

Существенным отличием ферромагнетиков от диа- и парамагнетиков является наличие у ферромагнетиков самопроизвольной (спонтанной) намагниченности в отсутствие внешнего магнитного поля. Наличие у ферромагнетиков самопроизвольного магнитного момента \vec{J} в отсутствие внешнего магнитного поля означает, что электронные спины и магнитные моменты атомных носителей магнетизма ориентированы в веществе упорядоченным образом.

Ферромагнетики – это вещества, обладающие самопроизвольной намагниченностью, которая сильно изменяется под влиянием внешних воздействий – магнитного поля, деформации, температуры.

Ферромагнетики, в отличие от слабо магнитных диа- и парамагнетиков, являются сильно магнитными веществами: внутреннее магнитное поле в них может в сотни раз превосходить внешнее поле.

3.1. Электромагнитные колебания

3.1.1. Квазистационарные токи

При рассмотрении электрических колебаний приходится иметь дело с токами, изменяющимися во времени. Закон Ома и вытекающие из него правила Кирхгофа были установлены для постоянного тока. Однако они остаются справедливыми и для мгновенных значений изменяющегося тока и напряжения, если их изменения происходят не слишком быстро. Электромагнитные сигналы распространяются по цепи со скоростью света c . Пусть l – длина электрической цепи. Тогда время распространения сигнала в данной цепи $t = l/c$. Если $t \ll T$ (T – период колебаний электрического тока), то такие токи называются **квазистационарными**. При этом условии мгновенное значение силы тока во всех участках цепи будет постоянным. Для частоты $f = 50$ Гц условие квазистационарности выполняется при длине цепи ~ 100 км.

Рассматривая в дальнейшем электрические колебания, мы будем считать, что токи квазистационарны.

3.1.2. Свободные колебания в электрическом контуре без активного сопротивления

В цепи, содержащей индуктивность L и ёмкость C , могут возникать электрические колебания. Такая цепь называется *колебательным контуром* (рис. 3.1.1).

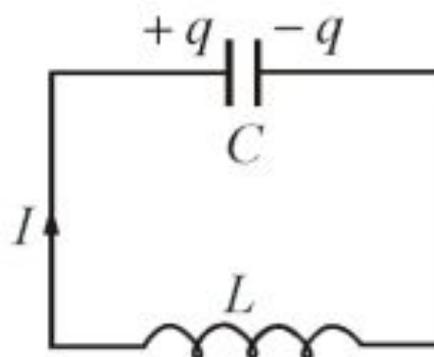


Рис. 3.1.1

Колебания в контуре можно вызвать, либо зарядив конденсатор, либо вызвав в индуктивности ток (например, включив магнитное поле).

Поскольку активное сопротивление контура $R = 0$, полная энергия остаётся постоянной. Если энергия конденсатора равна нулю, то энергия магнитного поля максимальна, и наоборот. Рассмотрим процессы, происходящие в колебательном контуре, в сравнении с колебаниями маятника (рис. 3.1.2).

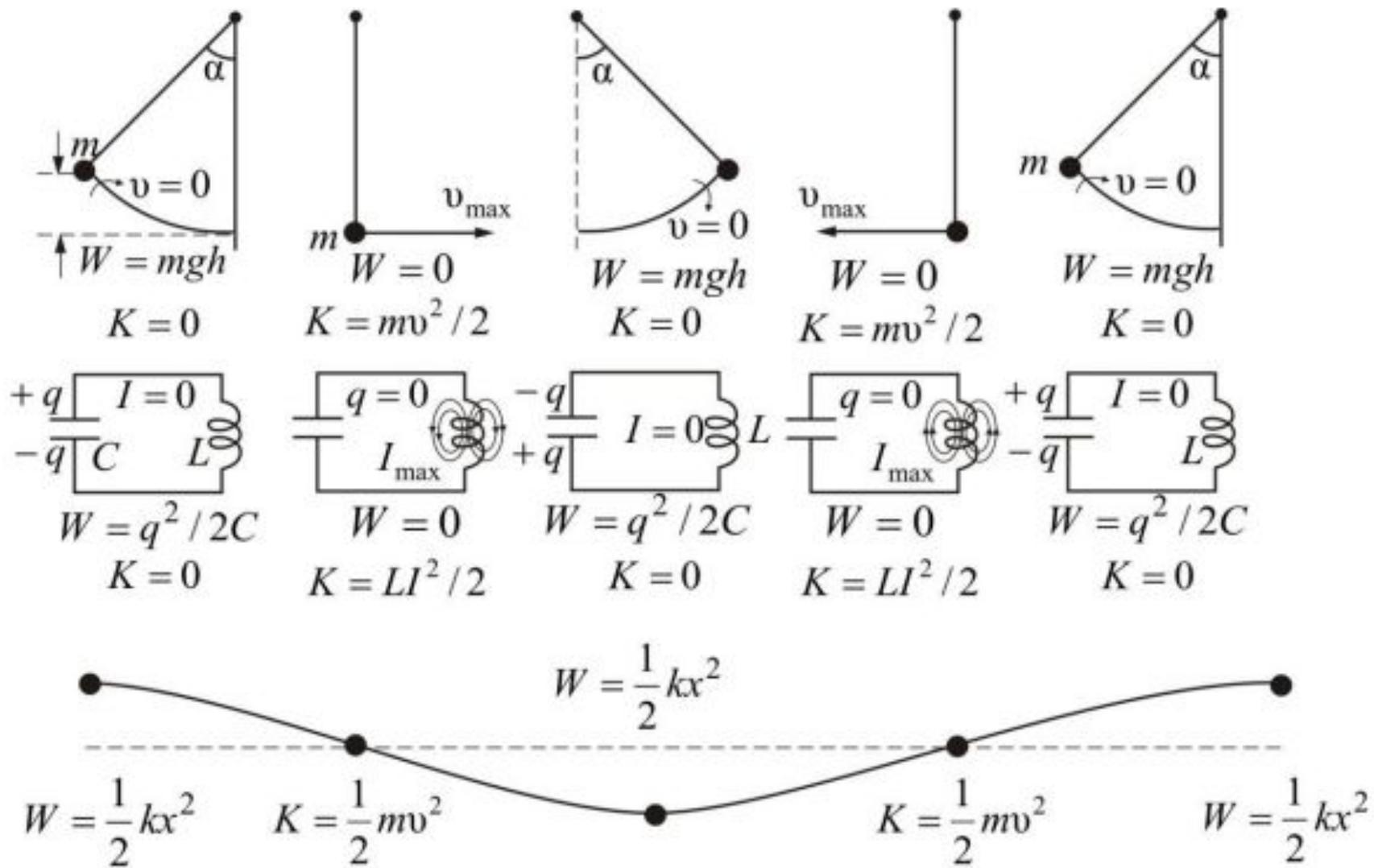


Рис. 3.1.2

Из сопоставления электрических и механических колебаний (рис. 3.1.2) следует, что энергия электрического поля $W = \frac{q^2}{2C}$ аналогична потенциальной энергии mgh или $1/2kx^2$, а энергия магнитного поля $\frac{LI^2}{2}$ аналогична кинетической энергии $\frac{mv^2}{2}$; L играет роль массы m ; $1/C$ – роль коэффициента жесткости k . Наконец, заряду q соответствует смещение маятника из положения равновесия x , силе тока I – скорость v , а напряжению U – ускорение a .

Ниже мы увидим, что эта аналогия сохраняется и в математических уравнениях. В соответствии со вторым законом Кирхгофа (и законом сохранения энергии) можно записать:

$$\frac{q}{C} = -L \frac{dI}{dt}. \quad (3.1.1)$$

Но, т.к. $I = \frac{dq}{dt}$, $\xi_i = -L \frac{dI}{dt}$, тогда получим $\frac{d^2q}{dt^2} + \frac{1}{LC}q = 0$.

Введем обозначение: $\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$ – *собственная частота контура*,

отсюда получим *основное уравнение колебаний в контуре* –

$$\frac{d^2q}{dt^2} + \omega_0^2 q = 0. \quad (3.1.2)$$

Решением этого уравнения является выражение вида

$$q = q_m \cos(\omega_0 t + \varphi). \quad (3.1.3)$$

Таким образом, заряд на обкладке конденсатора изменяется по гармоническому закону с собственной частотой контура ω_0 .

Для периода колебаний справедлива *формула Томсона*

$$T = \frac{1}{\nu} = \frac{2\pi}{\omega_0} = 2\pi\sqrt{LC};$$
$$T = 2\pi\sqrt{LC}. \quad (3.1.4)$$

Продифференцируем выражение (3.1.3) по времени и получим выражение для тока

$$I = \frac{dq}{dt} = -\omega_0 q_m \sin(\omega_0 t + \varphi) = I_m \cos\left(\omega_0 t + \varphi + \frac{\pi}{2}\right). \quad (3.1.5)$$

Напряжение на конденсаторе отличается от заряда на $1/C$:

$$U = \frac{q_m}{C} \cos(\omega_0 t + \varphi) = U_m \cos(\omega_0 t + \varphi). \quad (3.1.6)$$

Таким образом, ток опережает по фазе напряжение на конденсаторе на $\pi/2$. На индуктивности, наоборот, напряжение опережает ток на $\pi/2$:

$$U_m = \frac{q_m}{C}; \quad I_m = \omega_0 q_m; \quad U_m C = \frac{I_m}{\omega_0};$$
$$U_m = I_m \sqrt{\frac{L}{C}}, \quad (3.1.7)$$

где $\sqrt{\frac{L}{C}} = R_{\text{вол}}$ – волновое сопротивление [Ом].

Выражение (3.1.7) – это **закон Ома** для колебательного контура.

3.1.3. Свободные затухающие электрические колебания

Всякий реальный контур обладает активным сопротивлением (рис. 3.1.3). Энергия, запасенная в контуре, постепенно расходуется в этом сопротивлении на нагревание, вследствие чего колебания затухают.

По второму закону Кирхгофа

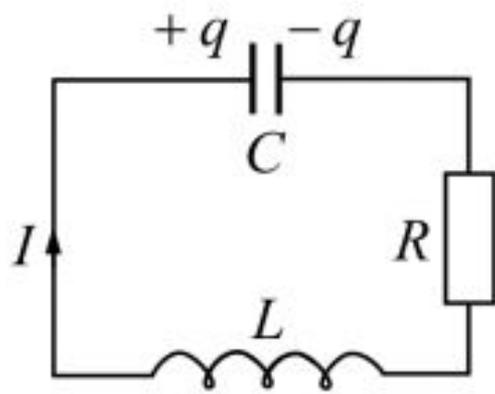


Рис. 3.1.3

$$IR + \frac{q}{C} = -L \frac{dI}{dt};$$

$$\frac{dq}{dt} R + \frac{q}{C} = -L \frac{d^2q}{dt^2},$$

$$\frac{d^2q}{dt^2} + \frac{R}{L} \frac{dq}{dt} + \frac{1}{LC} q = 0.$$

Пусть $\beta = \frac{R}{2L}$ – коэффициент затухания и, учитывая, что собст-

венная частота контура $\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$, получим *уравнение затухающих колебаний* в контуре с R , L и C

$$\frac{d^2q}{dt^2} + 2\beta \frac{dq}{dt} + \omega_0^2 q = 0. \quad (3.1.9)$$

3.1.4. Вынужденные электрические колебания. Резонанс

Чтобы вызвать вынужденные колебания, нужно оказывать на систему внешнее периодическое воздействие. Рассмотрим этот вопрос кратко, используя аналогию с механическими колебаниями.

К контуру, изображенному на рис. 3.1.6, подадим переменное напряжение U :

$$U = U_m \cos \omega t. \quad (3.1.14)$$

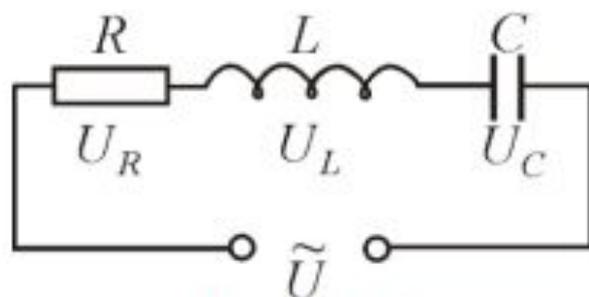


Рис. 3.1.6

Тогда уравнение (3.1.9) примет вид

$$\frac{d^2q}{dt^2} + 2\beta \frac{dq}{dt} + \omega_0^2 q = \frac{U_m}{L} \cos \omega t. \quad (3.1.15)$$

Это *уравнение вынужденных электрических колебаний*, которое совпадает с аналогичным уравнением механических колебаний. Его решение имеет вид

$$q = q_m \cos(\omega t + \varphi), \quad (3.1.16)$$

где

$$q_m = U_m / \omega \sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2} = U_m / \omega \sqrt{R^2 + (R_L - R_C)^2}.$$

Величина $Z = \sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2}$ называется *полным сопротивле-*

нием цепи, или импедансом (от лат. *impedio* – препятствую). Импеданс представляет комплексное сопротивление для гармонических процессов $Z = R + iX$, где R – *активное сопротивление*, отвечающее за потерю мощности в цепи; X – *реактивное сопротивление*, определяющее величину энергии, пульсирующей в цепи с частотой 2ω ,

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

На рис. 3.1.7 изображены идеальные элементы цепи и соответствующий им импеданс.

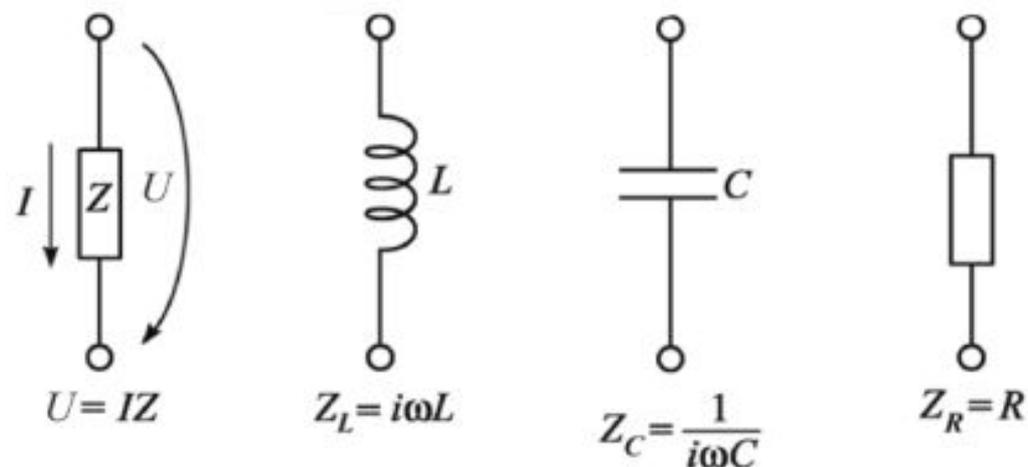


Рис. 3.1.7

Резонанс напряжений

При последовательном соединении R , L , C в контуре (рис. 3.1.6), когда $\omega L = \frac{1}{\omega C}$, наблюдается **резонанс**. При этом угол сдвига фаз между током и напряжением обращается в нуль ($\varphi = 0$).

Резонансная частота при напряжении на конденсаторе U_C равна

$$\omega_{\text{рез}} = \sqrt{\omega_0^2 - 2\beta^2} \quad \text{и} \quad Z = R,$$

тогда $U = U_R$, а U_C и U_L одинаковы по амплитуде и противоположны по фазе. Такой вид резонанса называется **резонансом напряжения**, или **последовательным резонансом**.

Резонансные кривые для напряжения U изображены на рис. 3.1.8. Они сходны с резонансными кривыми для ускорения a при механических колебаниях:

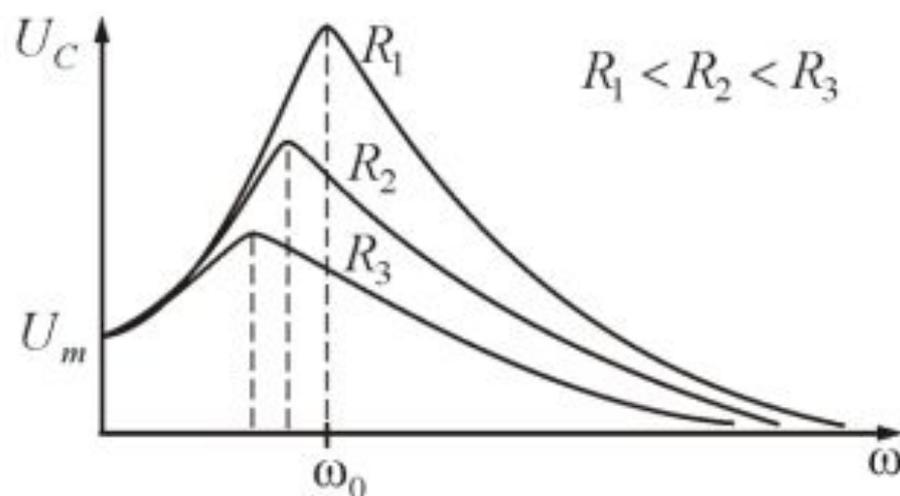


Рис. 3.1.8

Резонансные напряжения определяются выражением

$$U_{L_{\text{рез}}} = U_{C_{\text{рез}}} = \sqrt{\frac{L}{C}} I_m = \frac{1}{R} \sqrt{\frac{L}{C}} U_m = QU_m.$$

Таким образом, при последовательном резонансе на ёмкости можно получить усиление напряжения с амплитудой $QU \gg U$ в узком диапазоне частот. Этот эффект широко используется в различных усилительных устройствах.

Резонанс токов

В цепях переменного тока, содержащих параллельно включенные ёмкость и индуктивность (рис. 3.1.9), наблюдается другой тип резонанса.

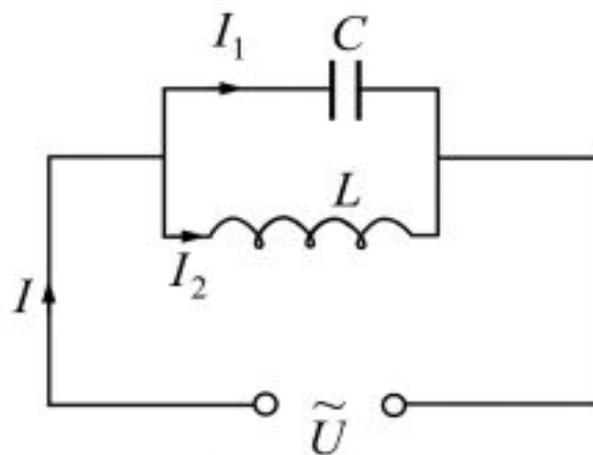


Рис. 3.1.9

Поскольку в таком контуре сопротивлением R можно пренебречь ($R = 0$), то выражение для тока через емкость I_1 примет вид

$$I_1 = I_{m1} \cos(\omega t - \varphi_1), \quad (3.1.17)$$

где $I_{m1} = \frac{U_m}{1/\omega C}$; $\text{tg } \varphi_1 = -\infty$, т.к. $\varphi_1 = \left(2n + \frac{3}{2}\right)\pi$, а $n = 1, 2, 3, \dots$

Аналогично для тока через индуктивность (при $R = 0$, $C = \infty$)

$$I_2 = I_{m2} \cos(\omega t - \varphi_2), \quad (3.1.18)$$

где $I_{m2} = \frac{U_m}{\omega L}$; $\text{tg } \varphi_2 = +\infty$, т.к. $\varphi_2 = \left(2n + \frac{1}{2}\right)\pi$, $n = 1, 2, 3, \dots$

Из сравнения (3.1.17) и (3.1.18) вытекает, что разность фаз в ветвях цепи $\varphi_1 - \varphi_2 = \pi$, т.е. токи противоположны по фазе:

$$I_m = |I_{m1} - I_{m2}| = U_m \left| \omega C - \frac{1}{\omega L} \right|. \quad (3.1.19)$$

Если $\omega = \omega_{\text{рез}} = \frac{1}{\sqrt{LC}}$, то $I_{m1} = I_{m2}$ и $I_m = 0$.

Резонансные кривые для тока изображены на рис. 3.1.10. Они соответствуют резонансным кривым для скорости при механических колебаниях.

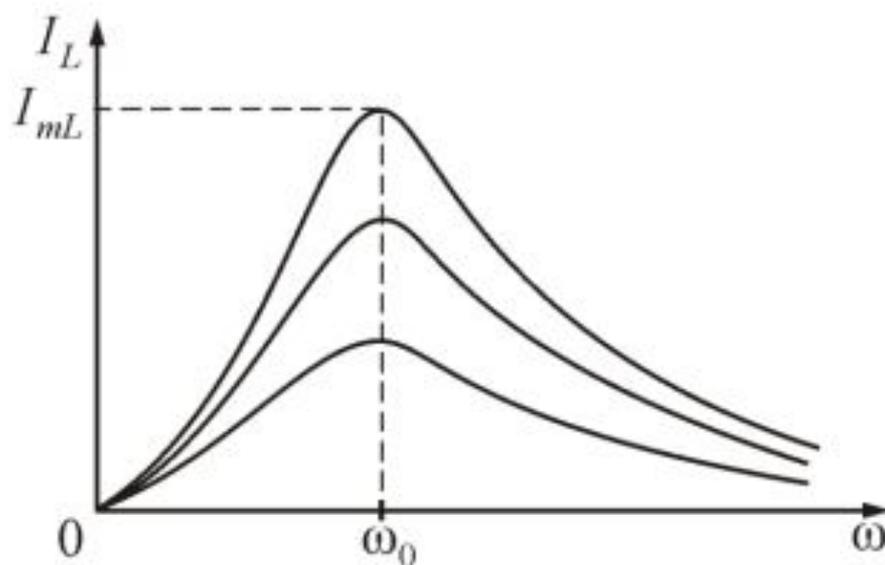


Рис. 3.1.10

Явление уменьшения амплитуды тока во внешней цепи и при этом *резкого увеличения тока в катушке индуктивности*, при приближении частоты приложенного напряжения ω к $\omega_{рез}$, *называется резонансом токов*, или *параллельным резонансом*.

Резонанс токов используется в резонансных усилителях, приемниках, а также в индукционных печах для разогрева металла.

Контрольные вопросы. Упражнения

1. Почему возможен единый подход при изучении колебаний различной физической природы?
2. Что такое периодические процессы? гармонические колебания? свободные колебания?
3. Дайте определения амплитуды, фазы, периода, частоты, циклической частоты колебания.
4. Приведите формулы для скорости и ускорения гармонически колеблющейся точки.
5. Как связаны амплитуда и начальная фаза гармонических механических колебаний?
6. Какие формулы для кинетической, потенциальной и полной энергии при гармонических колебаниях?
7. Что называется гармоническим осциллятором? пружинным маятником? физическим? математическим?
8. Приведите формулы для периодов колебаний пружинного, физического и математического маятников.
9. Что такое приведенная длина физического маятника?
10. Какие процессы происходят при свободных гармонических колебаниях в колебательном контуре? Чем определяется их период?

2.8.3. Единая теория электрических и магнитных явлений. Система уравнений Максвелла

Итак, переменное магнитное поле вызывает появление вихревого электрического поля. Переменное электрическое поле вызывает появление магнитного поля. Взаимно порождаясь, они могут существовать независимо от источников заряда или токов, которые первоначально создали одно из них. В сумме это есть электромагнитное поле (ЭМП). Превращение одного поля в другое и распространение в пространстве есть способ существования ЭМП. Конкретные проявления ЭМП – радиоволны, свет, гамма-лучи и т.д.

В 1860 г. знаменитый английский физик Джеймс Клерк Максвелл создал единую теорию электрических и магнитных явлений, в которой он использовал понятие *ток смещения*, дал *определение ЭМП* и предсказал существование в свободном пространстве *электромагнитного излучения*, которое распространяется со скоростью света.

Теорию ЭМП Максвелл сформулировал в виде системы нескольких уравнений. В учении об электромагнетизме эти уравнения Максвелла играют такую же роль, как уравнения (или законы) Ньютона в механике.

2.8.1. Закон полного тока

Если в каком-либо проводнике течет переменный ток – ток проводимости, то внутри есть и переменное электрическое поле, т.е. ток смещения.

Магнитное поле проводника определяется *полным током*:

$$\vec{j}_{\text{полн}} = \vec{j}_{\text{пров}} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} = \vec{j}_{\text{пров}} + \vec{j}_{\text{см}}. \quad (2.8.1)$$

В зависимости от электропроводности среды и частоты (поля) оба слагаемых играют разную роль:

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

Оба члена в уравнении полного тока могут иметь одинаковые знаки и противоположные. Поэтому $j_{\text{полн}}$ может быть как больше, так и меньше тока проводимости или равен нулю.

Если мы имеем разомкнутый проводник, то на его концах обрывается лишь ток проводимости. Поэтому если под током понимать полный ток, то окажется, что в природе все *переменные электрические токи – замкнуты*. Этот вывод сделан Дж. Максвеллом, выдающимся английским физиком-теоретиком.

2.8.2. Ток смещения

Если замкнуть ключ (рис. 2.8.1), то лампа при *постоянном* токе гореть не будет: емкость C разрывает цепь *постоянного* тока. Но вот в моменты включения лампа будет вспыхивать.

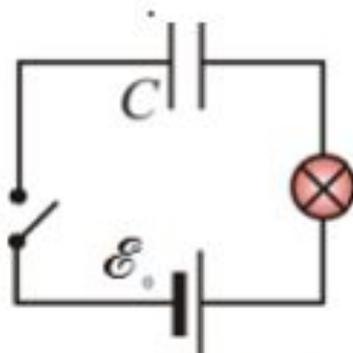


Рис. 2.8.1

При переменном токе – лампа горит, но, в то же время, нам ясно, что электроны из одной обкладки в другую не переходят – между ними изолятор (или вакуум). А вот если бы взять прибор, измеряющий магнитное поле, то в промежутке между обкладками мы обнаружили бы *магнитное поле* (рис. 2.8.2).

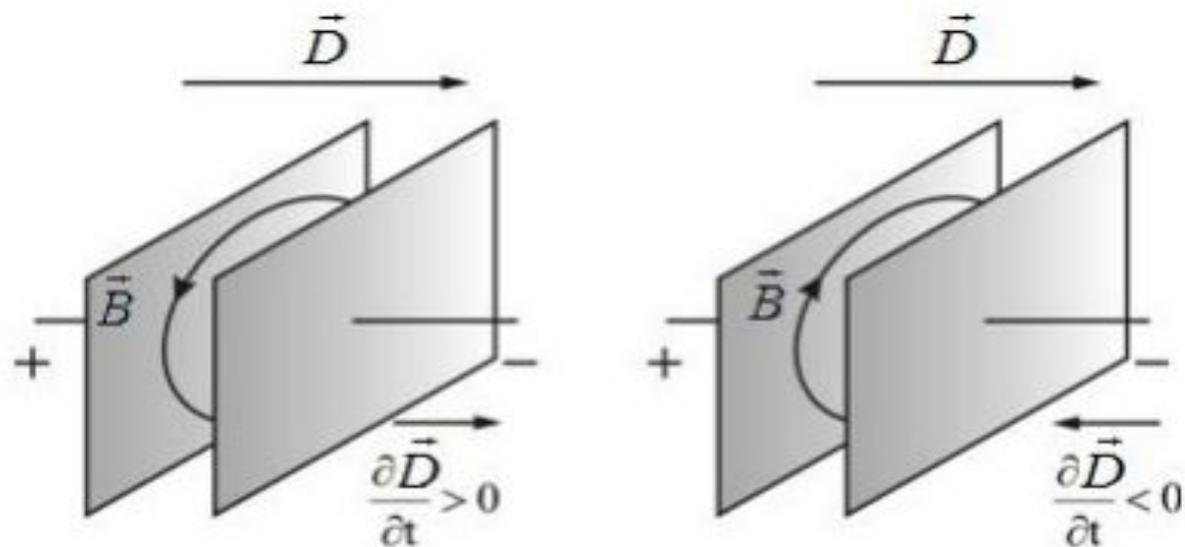


Рис. 2.8.2

Для установления количественных соотношений между изменяющимся электрическим полем и вызываемым им магнитным полем Максвелл ввел в рассмотрение *ток смещения*. Этот термин имеет смысл в таких веществах, как, например, диэлектрики. Там смещаются заряды под действием электрического поля. Но в вакууме зарядов нет – там смещаться нечему, а магнитное поле есть, т.е. название Максвелла «ток смещения» – не совсем удачное, но смысл, вкладываемый в него Максвеллом, – правильный.

Максвелл сделал вывод: всякое переменное электрическое поле порождает переменное магнитное поле.

2.8.3. Единая теория электрических и магнитных явлений. Система уравнений Максвелла

Итак, переменное магнитное поле вызывает появление вихревого электрического поля. Переменное электрическое поле вызывает появление магнитного поля. Взаимно порождаясь, они могут существовать независимо от источников заряда или токов, которые первоначально создали одно из них. В сумме это есть электромагнитное поле (ЭМП). Превращение одного поля в другое и распространение в пространстве есть способ существования ЭМП. Конкретные проявления ЭМП – радиоволны, свет, гамма-лучи и т.д.

В 1860 г. знаменитый английский физик Джеймс Клерк Максвелл создал единую теорию электрических и магнитных явлений, в которой он использовал понятие *ток смещения*, дал *определение ЭМП* и предсказал существование в свободном пространстве *электромагнитного излучения*, которое распространяется со скоростью света.

Теорию ЭМП Максвелл сформулировал в виде системы нескольких уравнений. В учении об электромагнетизме эти уравнения Максвелла играют такую же роль, как уравнения (или законы) Ньютона в механике.

Уравнение 1. Мы знаем теорему о циркуляции вектора напряжённости магнитного поля:

$$\oint_L \vec{H} d\vec{l} = \sum I_i = I_{\text{пр}} + I_{\text{см}} = I_{\text{макро}} + I_{\text{см}},$$

но $I_{\text{см}} = \int_S \frac{d\vec{D}}{dt} d\vec{S}$; $dI_{\text{пр}} = \vec{j} dS$; т.е. $I_{\text{пр}} = \int_S \vec{j} dS$, тогда

$$\oint_L \vec{H} d\vec{l} = \int_S \left(\vec{j} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \right) d\vec{S}. \quad (2.8.6)$$

Это уравнение является *обобщением закона Био – Савара – Лапласа* и показывает, что циркуляция вектора \vec{H} по произвольному замкнутому контуру L равна сумме токов проводимости и токов смещения сквозь поверхность, натянутую на этот контур, и, другими словами, показывает связь между полным током и порождаемым им магнитным полем.

В дифференциальной форме это уравнение Максвелла выглядит так:

$$\text{rot } \vec{H} = \vec{j} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t},$$

Уравнение 2. Рассматривая явление электромагнитной индукции, мы сделали вывод, что ЭДС индукции $\mathcal{E}_i = \oint_L \vec{E}'_i d\vec{l}$. Перейдем от вихревого электрического поля к магнитному:

$$\oint_L \vec{E}'_i d\vec{l} = \mathcal{E}_i = -\frac{d\Phi}{dt} = -\frac{d}{dt} \int_S \vec{B} d\vec{S} = -\int_S \frac{d\vec{B}}{dt} d\vec{S},;$$

$$\oint_L \vec{E}'_i d\vec{l} = -\int_S \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} d\vec{S}. \quad (2.8.7)$$

Это уравнение описывает явление электромагнитной индукции (закон Фарадея) и устанавливает количественную связь между электрическими и магнитными полями: *переменное электрическое поле порождает переменное магнитное поле*. В этом физический смысл уравнения.

В дифференциальной форме это уравнение выглядит так:

$$\text{rot } \vec{E}'_i = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}.$$

Различие в знаках этого уравнения Максвелла соответствует закону сохранения энергии и правилу Ленца. Если бы знаки при $\frac{d\vec{B}}{dt}$ и $\frac{d\vec{D}}{dt}$ были одинаковы, то бесконечно малое увеличение одного из полей вызвало бы неограниченное увеличение обоих полей, а бесконечно малое уменьшение одного из полей приводило бы к полному исчезновению обоих полей, т.е. различие в знаках является необходимым условием существования устойчивого ЭМП.

Уравнение 3. Ещё два уравнения выражают теорему Остроградского – Гаусса для электрического и магнитного полей (статических полей):

$$\oint_S \vec{D} d\vec{S} = \int_V \rho dV. \quad (2.8.8)$$

Поток вектора электрического смещения \vec{D} через замкнутую поверхность S равен сумме зарядов внутри этой поверхности. Это уравнение показывает также, что силовые линии вектора \vec{D} и \vec{E} начинаются и заканчиваются на зарядах.

В дифференциальной форме

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

где $\operatorname{div} \vec{D} = \frac{\partial D_x}{\partial x} + \frac{\partial D_y}{\partial y} + \frac{\partial D_z}{\partial z}.$

Уравнение 4. Для магнитного поля

$$\oint_S \vec{B} d\vec{S} = 0. \quad (2.8.9)$$

Это уравнение выражает то свойство магнитного поля, что линии вектора магнитной индукции \vec{B} всегда замкнуты и что магнитных зарядов нет.

В дифференциальной форме

$$\operatorname{div} \vec{B} = 0. \quad (2.8.10)$$

Уравнения 5, 6, 7. Наконец надо помнить, что величины, входящие в эти четыре уравнения, зависимы и между ними существует связь:

$$\vec{B} = \mu_0 \mu \vec{H}; \quad (2.8.11)$$

$$\vec{D} = \epsilon_0 \epsilon \vec{E}; \quad (2.8.12)$$

$$\vec{j} = \sigma \vec{E} + \vec{j}_{\text{стр}}, \quad (2.8.13)$$

здесь σ – удельная проводимость; $\vec{j}_{\text{стр}}$ – плотность сторонних токов.

Эти уравнения называются **уравнениями состояния** или **материальными уравнениями**. Вид этих уравнений определяется электрическими и магнитными свойствами среды. В общем случае уравнения состояния очень сложны и нелинейны.

Уравнения (2.8.6) – (2.8.13) составляют **полную систему уравнений Максвелла**. Они являются наиболее общими для электрических и магнитных полей в покоящихся средах. Уравнения Максвелла инвариантны относительно преобразований Лоренца. Физический смысл уравнений Максвелла в дифференциальной и интегральной формах полностью эквивалентен.

2.8.4. Пояснение к теории классической электродинамики

Теория Максвелла это 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).

В теории Максвелла рассматриваются макроскопические поля, которые создаются макрозарядами 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 – ϵ , μ и σ .

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

Контрольные вопросы. Упражнения

1. Сформулируйте закон полного тока. Что такое ток смещения?
2. Что является причиной возникновения вихревого электрического поля? Чем оно отличается от электростатического поля?
3. Чему равна циркуляция вихревого электрического поля?
4. Почему вводится понятия тока смещения? Что он собой по существу представляет?
5. Выведите и объясните выражение для плотности тока смещения.
6. Запишите, объяснив физический смысл, обобщенную теорему о циркуляции вектора напряженности магнитного поля.
7. Запишите полную систему уравнений Максвелла в интегральной и дифференциальной форме и объясните их физический смысл.
8. Почему постоянные электрические и магнитные поля можно рассматривать обособленно друг от друга? Запишите для них уравнения Максвелла в обеих формах.
9. Почему уравнения Максвелла в интегральной форме являются более общими?
10. Какие основные выводы можно сделать на основе теории Максвелла? Релятивистская трактовка теории.
11. Приведите и проанализируйте систему уравнений Максвелла.