

# **ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ ДЛЯ ВЫПОЛНЕНИЯ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ**

## **Основные понятия и определения**

### **1. Общие пояснения**

Приступая к выполнению лабораторной работы, студент должен прежде всего осознать слова, составляющие заголовок работы. В заголовке, как правило, присутствуют основные понятия, практическое изучение которых и происходит в процессе выполнения работы. Подробно эти понятия и их определение изложены в литературе, рассматриваются на лекциях и при выполнении расчётных заданий. Однако авторы курса сочли полезным ещё раз повторить основные определения и расчётные выражения, памятуя известную поговорку: «Повторение – мать учения». Опыт авторов также показывает, что существуют нерадивые учащиеся, для которых положения настоящей главы представлены впервые. Таким студентам следует напомнить, что знакомство с конспективным изложением материала не есть его изучение. Его обязательно нужно дополнять работой со справочниками, учебниками и той специальной литературой, новейшие сведения из которой давались на лекциях.

Иногда ту или иную лабораторную работу приходится выполнять с опережением, по сравнению с изложением материала на лекциях. В этих случаях следует считать, что материал, представленный в настоящей главе, является лишь начальным, и его обязательно следует закрепить работой на лекциях, выполнением расчётных заданий и чтением литературы.

Расположение материала в главе выполнено блоками. Все понятия, используемые и изучаемые в той или иной лабораторной работе, представлены в расположенных рядом параграфах. Любые непонятные вопросы можно дополнительно разобрать, используя справочники по электротехническим материалам, имеющиеся в лаборатории [1-3], а также учебники и учебные пособия, которые можно взять в библиотеке университета [4-8].

## 2. Удельное электрическое сопротивление

Удельное электрическое сопротивление – это один из параметров, характеризующий поведение вещества в электрическом поле и численно определяющий электропроводность материала.

Электропроводность – это способность вещества проводить электрический ток, обусловленная наличием свободных зарядов в веществе. В электротехнике удельное электрическое сопротивление обозначается греческой буквой  $\rho$  (ро)<sup>1</sup>. Иногда применяется величина (чаще для растворов электролитов) «удельная электрическая проводимость», обозначаемая греческой буквой  $\gamma$  (гамма). Эти величины являются обратными по отношению друг к другу:

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

Значение удельной электрической проводимости вещества –  $\gamma$  определяется как произведение суммарного заряда свободных носителей в единице объема  $nq$  [Кл/м<sup>3</sup>] и подвижности этих зарядов –  $u$  [м<sup>2</sup>/с×В]:

$$\gamma = nq \times u^2, \quad (2.2)$$

где  $n$  – концентрация свободных зарядов, [1/м<sup>3</sup>],  $q$  – заряд носителя, [Кл]. Подвижность носителей заряда,  $u$  – это средняя скорость движения носителя в веществе при напряжённости электрического поля 1В/м.

**Удельное электрическое сопротивление,  $\rho$  – это параметр вещества, численно равный сопротивлению образца длиной 1 м с площадью поперечного сечения 1 м<sup>2</sup>, измеренному в плоско-параллельном поле.**

Удельное электрическое сопротивление измеряется в [ $Ом \frac{м^2}{м}$ ] или в [ $Ом \times м$ ].

Удельная электрическая проводимость измеряется в [ $См/м$ ].

<sup>1</sup> В физике буквой  $\rho$  часто обозначают плотность вещества (массу единицы объёма). В курсе

«Материаловедение» плотность мы обозначаем маленькой латинской буквой **d**.

<sup>2</sup> Это выражение вытекает из закона Ома в дифференциальной форме:  $j = \gamma E$ ; понятия плотности тока  $j$ , равной произведению суммарного заряда носителей в единице объёма  $nq$  на их скорость  $v$  ( $j = nq \times v$ ) и определения подвижности как средней скорости носителей зарядов при единичной напряжённости электрического поля:  $u = v/E$

По значению удельного электрического сопротивления все вещества подразделяются на 3 класса:

- Проводники..... $\rho \approx 10^{-8} \dots 10^{-6} \text{ Ом} \times \text{м}$ ;
- Слабopроводящие материалы (полупроводники)... $\rho \approx 10^{-6} \dots 10^7 \text{ Ом} \times \text{м}$ ;
- Диэлектрики (изоляционные материалы)..... $\rho \approx 10^6 \dots 10^{20} \text{ Ом} \times \text{м}$ .

Измерение удельного электрического сопротивления материалов обычно проводится в плоско-параллельном электрическом поле, создаваемом в образце, когда линии тока, совпадающие с линиями напряженности электрического поля, параллельны друг другу, а любое перпендикулярное этим линиям сечение (поперечное сечение) является поверхностью равного потенциала (эквипотенциальной поверхностью). Если мы измерим в таком поле сопротивление  $R$  какого-либо образца, то удельное сопротивление материала, из которого изготовлен образец, можно вычислить, используя размеры образца по выражению:

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

где: -  $S$  - площадь поперечного сечения образца;  $l$  - образца (рис.4.1).

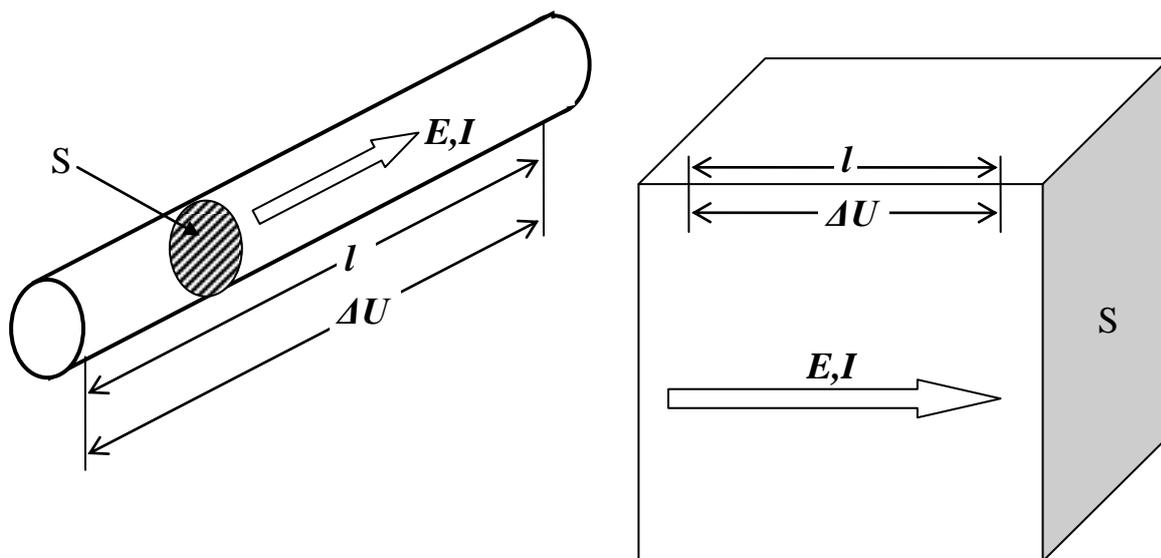


Рис. 1. Образцы в плоско-параллельном поле

### 3. Контактное сопротивление

Для включения и отключения электрических цепей служат коммутационные аппараты. Их главной функциональной частью являются электрические контакты. Здесь электрические контакты - это электропроводящие элементы, контактирующие при включённом аппарате, или имеющие изоляционный промежуток между собой в отключённом положении. Другой разновидностью контактов являются контакты, служащие для подсоединения какого либо электрического устройства к электрической цепи. Примером могут служить цоколь электрической лампочки, входящий в электрическое соединение с контактом электрического патрона к этой лампочке. В общем случае любое электрическое соединение двух различных частей, в том числе и постоянное, является электрическим контактом. Например – скрутка или спайка двух проводов.

Особый случай представляет собой электрический контакт двух разнородных материалов. Этот случай встречается, когда в электрическую цепь необходимо включить изделие из неметаллического проводящего или полупроводящего материала, такого как, например, эком, вилит, оксидно-цинковая керамика и др. При этом металлические части электрической цепи контактируют с неметаллическими, обеспечивая прохождение тока через последние.

При электрическом контакте двух частей в зоне, непосредственно примыкающей к месту контакта, возникает контактное сопротивление. **Контактным сопротивлением** называется сопротивление электрическому току, проходящему через место контакта. При отсутствии изоляционных окисных плёнок на поверхности контактирующих элементов контактное сопротивление определяется точечным характером соприкосновения этих элементов. Элементы контактируют не всей поверхностью, а определёнными точками на каждом из элементов. Это явление наблюдается при любых, даже самых гладких поверхностях. Единичный точечный контакт показан на рисунке 2.

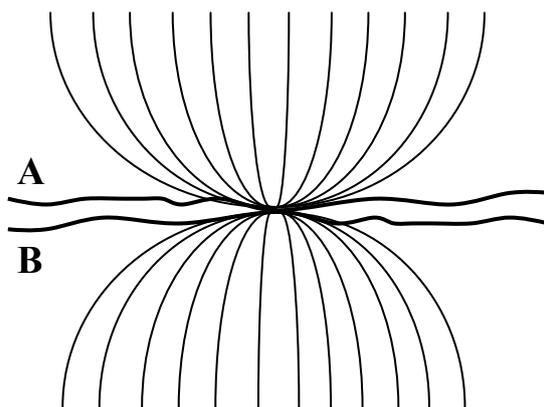


Рис. 2. Контакт поверхностей в одной точке

Как видим из рисунка, линии тока, идущие вначале параллельно, начинают стягиваться к точке контакта. Эффективное сечение уменьшается и увеличивается сопротивление. Это сопротивление называется сопротивлением стягивания. Реально в точке соприкосновения контакт осуществляется через маленькую плоскую площадку. При поперечном размере площадки  $\sqrt{S}$ , ( $S$ -площадь поверхности площадки) сопротивление стягивания будет равно:

$$R_{ст} = \frac{\rho\sqrt{\pi}}{4\sqrt{S}},$$

где  $\rho$  – удельное сопротивление материала контактирующего элемента.

При переходе через поверхность  $S$  в другой элемент ток начинает растекаться от точки контакта. Это сопротивление называется сопротивлением растеканию, и оно имеет то же значение. Что и сопротивление стягивания:

$$R_{рст} = \frac{\rho\sqrt{\pi}}{4\sqrt{S}}.$$

Эти два сопротивления складываются последовательно. То есть, сопротивление контакта с площадью соприкосновения  $S$ . при одинаковых материалах контактирующих элементов с удельным сопротивлением  $\rho$ , будет равно:

$$R_{к} = 0,886 \frac{\rho}{\sqrt{S}}.$$

Например, если контактируют два медных элемента ( $\rho=0,017 \cdot 10^{-6}$  Ом·м) площадкой  $1 \text{ мм}^2$ , то сопротивление контакта составит  $0,015 \text{ мОм}$ .

При контакте металла с композиционным материалом контактное сопротивление, как правило, выше. Это объясняется тем, что композиционный материал контактирует электрически с металлическим электродом только в тех точках, где к электроду прилегают электропроводящие включения. Таких точек на единице поверхности соприкосновения электрода с композиционным материалом считанное количество. Кроме того, как правило, материал проводящих включений имеет удельное сопротивление выше, нежели удельное сопротивление материала электрода. Поэтому при подсоединении композиционного материала к электрической цепи одной из не решённых до конца проблем является создание контакта с малым сопротивлением.

Измерение сопротивления контакта проводят по четырехэлектродной схеме (рис. 3).

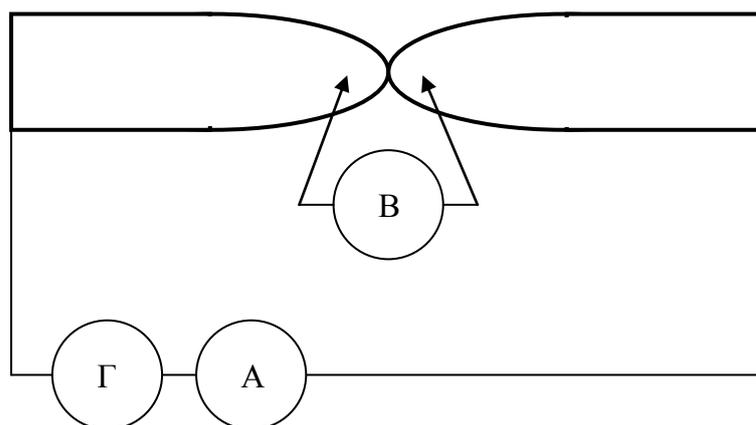


Рис. 3. Измерение контактного сопротивления

Амперметром «А» измеряется ток, протекающий от генератора «Г» через контакты, а вольтметром «В» - падение напряжения на контактном сопротивлении. По закону Ома вычисляется последнее. Расстояние между электродами от вольтметра выбирается минимальным с тем, чтобы пренебречь падением напряжения в теле контакта.

Если контакт осуществляется между металлом и полупроводящим материалом, то следует учитывать падение напряжения в теле полупроводящего материала.

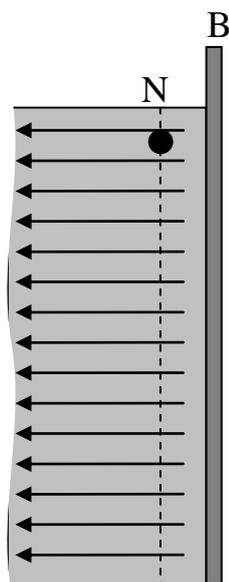


Рис. 4. Контакт металла со слабопроводящим материалом

Разберём пример контакта латунного электрода с полупроводящим материалом «ЭКОМ» (рис. 4). На рисунке показан латунный электрод «В», контактирующий с телом полупроводящего материала. От протекающего тока (линии тока показаны на рисунке) между электродом В и точкой N в полупроводящем материале, лежащей на эквипотенциальной линии (пунктир), создаётся падение напряжения  $U_{NB}$ , имеющее 2

составляющие:

- падение напряжения на контактом сопротивлении  $U_k = IR_k$ ;

- падение напряжения в теле полупроводника  $U_{nn} = I \cdot \rho_{nn} \frac{l_{BN}}{S}$ , где  $\rho_{nn}$  –

удельное сопротивление полупроводящего материала,  $l_{BN}$  – расстояние между электродами В и N, S – площадь поперечного сечения образца полупроводящего материала. Контактное сопротивление между латунным электродом «В» и материалом «ЭКОМ» можно определить как:

$$R_k = \frac{U_{BN}}{I} - \rho_{nn} \frac{l_{BN}}{S}$$

#### 4. Температурный коэффициент

Любой параметр материала зависит от температуры. В общем случае эта зависимость нелинейна, но определённые параметры в небольшом температурном интервале могут иметь линейную зависимость от температуры. Для характеристики и численного определения температурных зависимостей служит дифференциальная величина, называемая температурным коэффициентом параметра. Температурный коэффициент обозначается двумя заглавными русскими буквами **ТК** и буквой, которой обозначается соответствующий параметр. Например, температурный коэффициент удельного электрического сопротивления обозначается **ТК<sub>ρ</sub>**.<sup>3</sup>

**Температурный коэффициент любого параметра «а», ТК<sub>а</sub> – это значение относительного изменения этого параметра, определяемого при увеличении температуры на 1К.**

$$TKa = \frac{1}{a} \frac{\partial a}{\partial T}; \text{ при } T_2 > T_1.$$

Независимо от размерности параметра (удельное сопротивление, длина и т. д.) размерность температурного коэффициента всегда одинакова - [K<sup>-1</sup>].

Если в интервале температур  $T_1 \dots T_2$  зависимость параметра от температуры линейна, то для расчёта температурного коэффициента можно использовать выражение:

$$TKa = \frac{1}{a_1} \frac{a_2 - a_1}{T_2 - T_1};$$

где  $a_1$  – значение параметра, определённого при температуре  $T_1$ , и  $a_2$  – значение параметра, определённого при температуре  $T_2$ .

В справочниках [1-3] температурные коэффициенты приводятся для определённого интервала температур, в предположении линейной зависимости параметра от температуры в указанном интервале.

<sup>3</sup> В справочной литературе [1-3] эта величина обозначается греческой буквой **α** с индексом, соответствующим параметру, к которому относится температурный коэффициент. Например, температурный коэффициент длины обозначается **α<sub>l</sub>**.

## 5. Теплоотдача

Теплоотдача – это теплообмен между поверхностью твёрдого тела и соприкасающейся с ней средой – теплоносителем (жидкостью, газом). Теплоотдача осуществляется конвекцией, теплопроводностью, лучистым теплообменом.

Конвекция – перенос теплоты в газах, жидкостях или сыпучих средах потоками вещества. Естественная (свободная) конвекция возникает в поле силы тяжести (гравитационном поле) при нагреве снизу текучих или сыпучих веществ. Нагретое вещество (как более лёгкое) по закону Архимеда перемещается относительно менее нагретого вещества в направлении, противоположном направлению силы тяжести.

Теплопроводность – это перенос энергии, осуществляемый в результате непосредственной передачи энергии от частиц (молекул, атомов, электронов), обладающих большей энергией, частицам с меньшей энергией. Теплопроводность (или коэффициент теплопроводности) -  $\lambda$  связывает между собой плотность теплового потока

$\frac{\partial P}{\partial S}$  ( $P$  - мощность,  $S$  – площадь изотермической поверхности, перпендикулярной направлению потока) и

градиент температуры в направлении, обратном направлению потока  $-gradT$ :

$$\frac{\partial P}{\partial S} = -\lambda \cdot gradT.$$

Лучистый теплообмен – перенос энергии от одного тела к другому, обусловленный процессами испускания, распространения, рассеяния и поглощения электромагнитного излучения. Существенное отличие лучистого теплообмена от конвекции и теплопроводности заключается в том, что он может протекать и в пустоте.

Интенсивность теплоотдачи характеризуется коэффициентом теплоотдачи  $\lambda_{TO}$ , определяемым как количество теплоты, переданное в единицу времени через единицу поверхности при разности температур между поверхностью и средой-теплоносителем в 1К:

$$\lambda_{TO} = \frac{P}{S \cdot \Delta T}.$$

Коэффициент теплоотдачи зависит от условий теплообмена и при неизменности последних – постоянен. Поэтому чем больше разность температур между нагретым телом и средой-теплоносителем, тем большая тепловая мощность отводится.

При нагреве тела электрическим током его температура возрастает, и выделяемая мощность в виде тепла начинает передаваться в окружающую среду, в основном путём конвекции. В естественном режиме (при постоянстве  $\lambda_{TO}$ ) нагрев тела электрическим током происходит до такой температуры, при

которой отводимая тепловая мощность (растущая с повышением температуры) станет равной выделяемой электрической мощности.

## 6. Теплоёмкость

В общем случае теплоёмкость - это количество теплоты, поглощаемой телом при нагревании на 1 градус ( $1^{\circ}\text{C}$  или  $1^{\circ}\text{K}$ ); точнее – отношение количества теплоты (энергии), поглощаемой телом при бесконечно малом изменении его температуры к этому изменению (дифференциальная форма).

На практике теплоёмкостью материала обычно называют его удельную теплоёмкость.

Удельная теплоемкость – это количество энергии (теплоты), необходимое для повышения температуры единицы массы на 1 К. Теплоёмкость обозначается маленькой латинской буквой  $c$ .

$$c = \frac{1}{m} \cdot \frac{\partial W}{\partial T};$$

где  $m$  – масса в кг или молях;  $W$  – поглощаемая энергия, Дж;  $T$  - температура, К.

$$\text{Размерность удельной теплоемкости} - \left[ \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \times \text{K}} \right], \quad \text{или} \quad \left[ \frac{\text{Дж}}{\text{моль} \times \text{K}} \right].$$

Теплоёмкость твердых веществ имеет один порядок. У металлов и сплавов её значения в основном лежат в пределах (200...1000) Дж/кг·К, а у неметаллических технических материалов – (500...2000) Дж/кг·К.

Теплоёмкость можно оценить, нагревая образец протекающим током. При этом, если нагрев небольшой и опыт кратковременный, то можно пренебречь теплоотдачей и считать, что вся энергия движения носителей зарядов превратилась в тепло, то есть увеличила скорость колебательного движения молекул тела за счёт соударений носителей заряда с молекулами и ионами. В этом случае справедливо уравнение теплового баланса:

$$j^2 \cdot \rho \cdot \tau = cd\Delta T,$$

в котором левая часть – это электрическая энергия выделившаяся в единице объёма, а правая – прибавление тепловой энергии. В этом уравнении:

$j$  – плотность тока  $\text{A}/\text{m}^2$ ;  $\rho$  – удельное электрическое сопротивление материала,  $\text{Om}\cdot\text{m}$ ;  $\tau$  – время протекания тока, с;  $c$  – теплоёмкость, Дж/кг·К;  $d$  – плотность

материала, кг/м<sup>3</sup>;  $\Delta T = T_{\text{кон}} - T_{\text{нач}}$  – разность конечной и начальной температур образца, К.

## 7. Диэлектрическая проницаемость

Диэлектрическую проницаемость определяют чаще всего как меру способности вещества увеличивать электрическую ёмкость<sup>4</sup> какой-либо электротехнической конструкции или изделия по сравнению с ёмкостью того же объекта без этого вещества (когда между электродами пустота).

**По своей физической природе диэлектрическая проницаемость – это мера поляризации вещества в электрическом поле.** Поляризацией называется смещение под действием электрического поля связанных в атомы, молекулы, кристаллы заряженных частиц в соответствии со знаками их зарядов и направлением поля. Поляризации подвергаются заряженные частицы атома, в первую очередь деформируются электронные орбиты (атомная или электронная поляризация). При поляризации изменяется относительное расположение ионов в молекуле и (или) кристалле (ионная поляризация). Если вещество имеет молекулы с собственным дипольным моментом, то такие молекулы дополнительно к электронной и ионной поляризации стремятся ориентироваться по полю (ориентационная поляризация).

В случае, когда при поляризации происходит взаимодействие частиц и увеличивается энергия их колебательного движения, происходит нагрев диэлектрика. Такая поляризация называется тепловой (или релаксационной).

Количественно поляризация определяется вектором поляризации  $P$ , равным сумме дипольных моментов  $q \times r$  в единице объёма вещества:

$$P = \frac{\sum qr}{V},$$

где  $q$  – значение заряда одного знака в диполе,  $r$  – расстояние между центрами зарядов разного знака в диполе. Вектор поляризации имеет размерность Кл/м<sup>2</sup> и направлен противоположно вектору электрического смещения воздействующего поля –  $D$ , имеющему ту же размерность. Поэтому:

$$D - P = \varepsilon_0 E_{\text{материала}},$$

где  $E_{\text{материала}}$  – напряжённость электрического поля в материале.

(В пустоте поляризоваться нечему, поэтому для пустоты:  $D = \varepsilon_0 E_{\text{пустоты}}$ ).

После алгебраических преобразований получаем величину:

<sup>4</sup> Электрическая ёмкость  $C$  – это коэффициент пропорциональности между зарядом на одном из электродов  $q$  и напряжением, существующем на электродах конструкции –  $U$ :  $q = CU$

$$\varepsilon = 1 + \frac{P}{\varepsilon_0 E_{\text{материала}}} = \frac{D}{\varepsilon_0 E_{\text{материала}}},$$

которую называют диэлектрической проницаемостью. Как видно из выражения, значение диэлектрической проницаемости количественно связано со значением поляризации вещества  $P$  в электрическом поле с напряженностью  $E_{\text{материала}} = 1\text{В/м}$ .

Из этого же выражения можно найти, что поток электрического смещения, пронизывающий материал, выразится через напряжённость поля в материале как:

$$D = \varepsilon_0 \cdot \varepsilon \cdot E_{\text{материала}}.$$

В соответствии с этим выражением **диэлектрическую проницаемость можно определить как меру ослабления электрического поля в веществе по сравнению с внешним полем.** Её значение показывает во сколько раз поле в веществе слабее поля от того же источника в вакууме на эквипотенциальной границе «вещество-вакуум».

**Значение диэлектрической проницаемости вещества  $\varepsilon$  можно определить также как отношение емкости конденсатора с данным веществом (диэлектриком) к емкости конденсатора тех же размеров, диэлектриком которого является вакуум.**

В зависимости от вида поляризации и агрегатного состояния вещества (концентрации диполей в единице объёма) изменяются и значения диэлектрической проницаемости:

$$\varepsilon_{\text{при атомной поляризации}} < \varepsilon_{\text{при ионной поляризации}} < \varepsilon_{\text{при ориентационной поляризации}}$$

Существуют твердые вещества со спонтанной (самопроизвольной) поляризацией. Такие вещества называют сегнетоэлектриками. Сегнетоэлектрики обладают наибольшими значениями диэлектрической проницаемости – до 1000 и более.

Примеры:

Вещество	Диэлектрическая проницаемость	Тип поляризации
$\epsilon_{\text{воздуха}}$	1,00058	атомная
$\epsilon_{\text{каменной соли}}$	6,00	ионная
$\epsilon_{\text{воды}}$	81	ориентационная
$\epsilon_{\text{сегнетовой соли}}$	500...600	спонтанная ориентационная
$\epsilon_{\text{титаната бария}}$	1500...2000	спонтанная ионная

Напряженности поля в диэлектрике, помещенном в равномерное электрическое поле, состоящем из двух слоев различных материалов, при условии перпендикулярности границы раздела векторам напряженности электрического поля распределяются обратно пропорционально диэлектрическим проницаемостям материалов:

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{\epsilon_2}{\epsilon_1}.$$

## 8. Диэлектрические потери

Диэлектрические потери – это потери энергии в диэлектрике, находящемся в электрическом поле. Энергия электрического поля расходуется на нагрев диэлектрика, то есть повышение его температуры<sup>5</sup>. Нагрев происходит в результате взаимодействия поляризующихся частиц и воздействия на частицы диэлектрика свободных носителей зарядов, двигающихся в диэлектрике под воздействием электрического поля.

Наибольшие потери бывают при переменном электрическом поле, которое с соответствующей частотой меняет направление поляризации, создавая тем

<sup>5</sup> Температура – это характеристика равновесного состояния вещества, пропорциональная средней кинетической энергии колебательного движения частиц, из которых состоит это вещество.

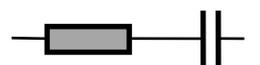
самым импульсы теплового взаимодействия на каждом полупериоде своего изменения. Энергия переменного электрического поля расходуется на:

- поляризацию диэлектрика,
- электропроводность диэлектрика,

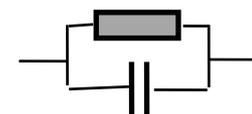
и за счет указанных явлений нагревает диэлектрик. В переменном поле основные тепловые потери диэлектрика с малой электропроводностью происходят за счёт поляризации. При постоянном электрическом поле основной нагрев диэлектрика связан лишь с его электропроводностью.

Для расчета диэлектрических потерь в переменном электрическом поле и других процессов в устройствах с диэлектриками последние замещаются схемами, наиболее известными из которых являются:

- последовательная схема замещения диэлектрика:



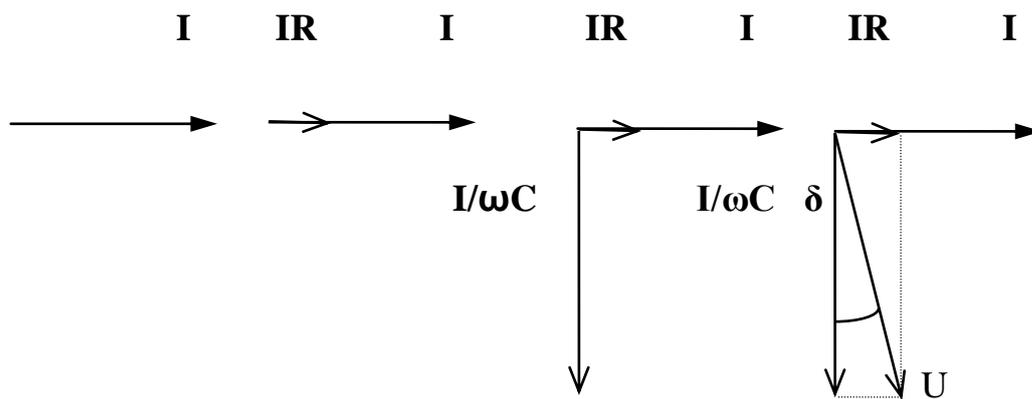
- параллельная схема замещения диэлектрика:



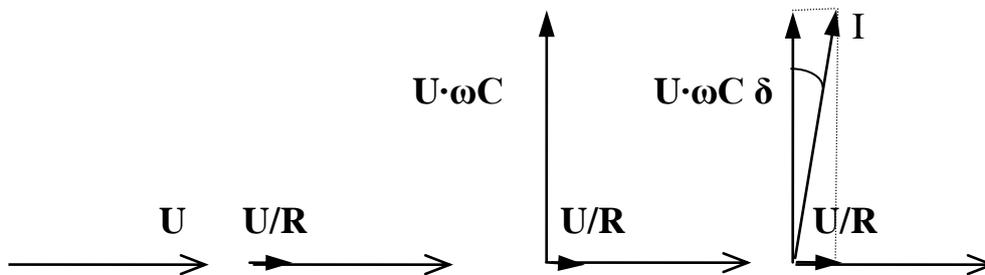
Схемы замещения диэлектрика обязательно содержат емкость и активное сопротивление. Емкость отражает способность диэлектрика накапливать заряды в постоянном поле, а в переменном поле создает путь для тока смещения в диэлектрике. Активное сопротивление - это элемент схемы, выделение энергии в котором отражает диэлектрические потери.

Углом диэлектрических потерь,  $\delta$  (дельта) называют угол, дополняющий до 90 градусов угол сдвига между током и напряжением в диэлектрике. Зная значение активного сопротивления  $R$  и ёмкости  $C$  в схеме замещения, можно построить векторные диаграммы токов и напряжений для диэлектрика, из которых определится угол диэлектрических потерь:

**Построение векторной диаграммы  
для последовательной схемы замещения**



**Построение векторной диаграммы  
для параллельной схемы замещения**



Потери активной мощности в устройстве с переменным током определяются как:

$$P = UI \cos \varphi, \text{ где } \varphi = 90 - \delta \dots \text{ или } : P_{акт} = UI_{акт} = UI_{реакт} \operatorname{tg} \delta .$$

Переписывая это выражение с использованием параметров схем замещения, получим:

Для последовательной схемы замещения:

$$P_{послед}^{акт} = \frac{U^2}{z^2} R = \frac{U^2 R}{x^2 + R^2} = \frac{RU^2}{x^2 \left( 1 + \frac{R^2}{x^2} \right)} = U^2 \cdot \omega C \times \operatorname{tg} \delta \frac{1}{1 + \operatorname{tg}^2 \delta} \cong U^2 \cdot \omega C \cdot \operatorname{tg} \delta .$$

Для параллельной схемы замещения:

$$P_{паралл} = \frac{U^2}{R} = U^2 \cdot \omega C \cdot \operatorname{tg} \delta .$$

При переходе к удельным параметрам (единице объема) получим:

$$P_{уд} = E^2 \cdot \omega \cdot \epsilon_0 \cdot \epsilon \cdot \operatorname{tg} \delta.$$

Таким образом, диэлектрические потери в материале прямо пропорциональны:

- квадрату напряженности приложенного электрического поля,  $E^2$ ,
- частоте переменного электрического поля,  $\omega = 2\pi f$ ,
- диэлектрической проницаемости материала,  $\epsilon$ ,
- тангенсу угла диэлектрических потерь в материале,  $\operatorname{tg} \delta$ .

Качество диэлектрика тем выше, чем меньше значение тангенса угла диэлектрических потерь. Для диэлектриков, предназначенных для работы в высокочастотном электрическом поле, тангенс угла диэлектрических потерь должен иметь порядок  $10^{-3} \dots 10^{-5}$ .

Примеры:

- электротехническое стекло  $\operatorname{tg} \delta = 0,0005 \dots 0,025$ ;
- трансформаторное масло  $\operatorname{tg} \delta = 0,01 \dots 0,25$ ;
- полиэтилен  $\operatorname{tg} \delta = 0,00007 \dots 0,0002$ ;
- фторопласт  $\operatorname{tg} \delta = 0,0002 \dots 0,00025$ .

## 9. Электрическая прочность диэлектриков

Свойство диэлектрика выдерживать то или иное электрическое напряжение определяется электрической прочностью диэлектрика.

Электрической прочностью,  $E_{пр}$  называется средняя напряженность электрического поля, при которой происходит электрический пробой.

Электрическим пробоем диэлектрика называют скачкообразное увеличение электропроводности материала при воздействии определенного напряжения, вплоть до образования электропроводящего плазменного канала. Явление электрического пробоя в газах или жидкостях часто называют «электрическим разрядом». Это говорит о разряде через этот канал емкости между электродами, к которым прилагается напряжение.

Напряжение, при котором происходит электрический пробой, называют «пробивным напряжением»,  $U_{пр}$ . Таким образом, электрическая прочность:

$$E_{пр} = \frac{U_{пр}}{h},$$

где  $h$ - толщина диэлектрика (промежуток между электродами, разрядный промежуток). Пробивное напряжение зависит от размера разрядного промежутка. При увеличении промежутка пробивное напряжение возрастает, а электрическая прочность снижается. Механизмы развития разряда в газообразных, жидких и твёрдых диэлектриках различны.

При электрическом пробое большого **газового промежутка** последовательно развиваются следующие явления:

I. Появление *свободного электрона* в газовом промежутке (случайного, из металлического электрода, в результате фотоионизации молекулы газа и т.п.)

II. Разгон свободного электрона электрическим полем до энергии, достаточной для того, чтобы при соударении с нейтральным атомом ионизировать последний (*ударная ионизация*).

III. Развитие *электронной лавины* как следствие множественных актов ударной ионизации.

IV. Рост *стримера* – проводящего плазменного канала, формирующегося из положительных ионов, оставшихся после прохождения лавины, и отрицательных зарядов, втягиваемых в положительную плазму.

V. Преобразование стримера в *лидер* за счет термоионизации, вызываемой прохождением емкостного тока по стримеру.

VI. *Главный разряд* происходит при замыкании каналом разряда разрядного промежутка.

При малых промежутках процесс пробоя может завершиться на стадиях III (лавиный пробой) и IV (стримерный пробой, искра).

Электрическая прочность газов зависит в первую очередь от:

- расстояния между электродами (рис. 5);

- давления (При увеличении давления уменьшаются расстояния между молекулами. Разгоняющемуся электрону необходимо на более коротком пути разгона (называемого длиной свободного пробега) получить ту же энергию, достаточную для ионизации атома. Эта энергия определяется в первую очередь конечной (в момент соударения) скоростью электрона. Большого ускорения электрон может достичь за счет увеличения действующей на него силы – напряженности электрического поля. Экспериментальная зависимость пробивного напряжения газового промежутка от произведения давления «р» на величину промежутка «h» называется кривой Пашёна. Минимальное значение пробивного напряжения для воздуха при  $p \cdot h = 0,7 \text{ Па} \cdot \text{м}$  составляет примерно 330 В. Левее

указанного значения  $p \cdot d$  электрическая прочность возрастает из-за малой вероятности столкновения электронов с молекулами газа.);

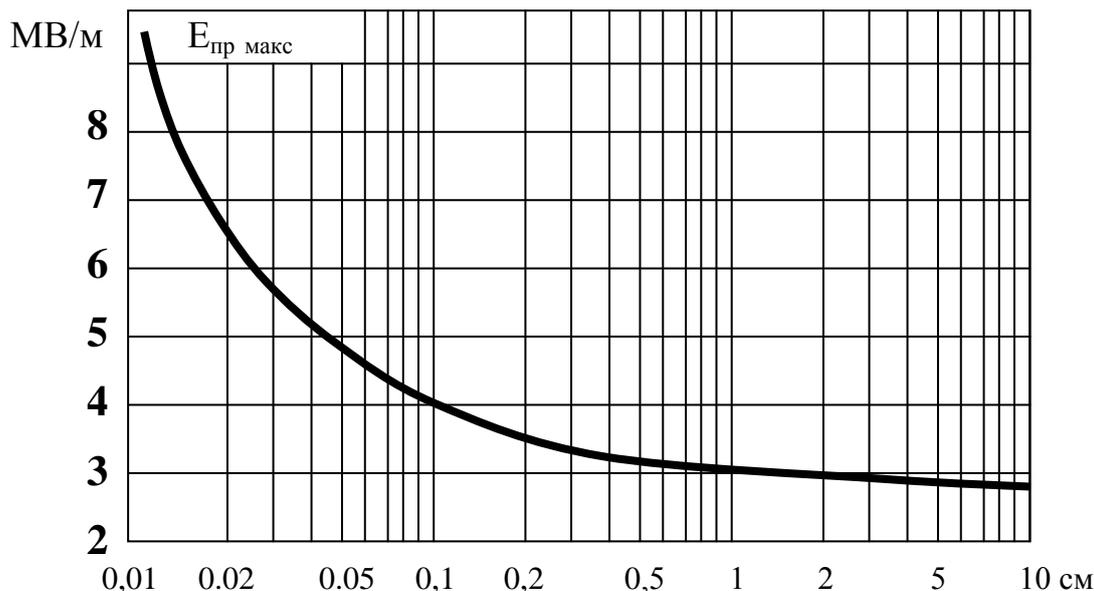


Рис. 5. Зависимость электрической прочности газов от расстояния между электродами

- сродства молекулы газа к электрону, электроотрицательности газа (Сродство к электрону – это способность некоторых нейтральных атомов и молекул присоединять добавочные электроны, превращаясь в отрицательные ионы. В электроотрицательных газах, состоящих из атомов с высоким сродством к электрону, требуется большая энергия разгона электронов полем для образования электронной лавины).

Электрическая прочность воздуха в промежутке 1 см при нормальных температуре и давлении составляет 3 кВ/мм. При давлении 0,3 МПа электрическая прочность воздуха может достигать 10 кВ/мм

Электрическая прочность элегаза ( $SF_6$ , электроотрицательный газ) при нормальных температуре и давлении составляет 8,7 кВ/мм. При давлении 0,3 МПа электрическая прочность элегаза может достигать 20 кВ/мм.

**Электрическая прочность жидкого диэлектрика** не связана непосредственно с химическим строением жидкости. Из-за близкого расположения молекул механизм ударной ионизации в жидком диэлектрике не реализуется.

Энергия ударной ионизации составляет примерно  $W=5$  эВ. Эту энергию можно выразить как произведение заряда электрона на напряжённость поля и на длину свободного пробега ( $\lambda \approx 5 \cdot 10^{-7}$  м):  $W=e \cdot E_{пр} \cdot \lambda$ . Если вычислить из этого выражения электрическую прочность, то получим:

$$E_{пр} = \frac{W}{e \cdot \lambda} = \frac{5 \text{ эВ}}{1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл} \cdot 5 \cdot 10^{-7} \text{ м}} = 10^{10} \frac{\text{В}}{\text{м}} = 10000 \frac{\text{кВ}}{\text{мм}}$$

Реально электрическая прочность жидкостей составляет (20-40) кВ/мм.

На значение электрической прочности влияет в первую очередь количество газа в жидкости и состояние поверхности электродов.

Электрический пробой жидкого диэлектрика начинается, как правило, с пробоя микроскопических газовых пузырьков. Из-за низкой диэлектрической проницаемости газа напряженность в пузырьке выше, чем в жидкости, а электрическая прочность газа – ниже.

Частичные разряды в пузырьках (см. раздел 10) приводят к росту последних, что в итоге завершается пробоем жидкого диэлектрика.

Основными примесями, снижающими электрическую прочность трансформаторного масла, являются также проводящие включения (сажа) и вода. Причем последняя из примесей играет наиболее существенную роль. Вода при нормальной температуре не смешивается с маслом, а содержится в нём в виде мельчайших капелек. Под влиянием электрического поля эти капельки воды поляризуются и создают между электродами цепочки с повышенной проводимостью, по которым и происходит электрический пробой.

Определение электрической прочности жидких диэлектриков проводят в стандартных разрядниках с полусферическими электродами, позволяющими создать в зоне пробоя равномерное электрическое поле (при диаметре электродов на порядок превышающем пробивной промежуток). Стандартный разрядник для испытаний жидких диэлектриков содержит электроды со сферической поверхностью, расстояние между которыми – 2,5 мм. Пробивное напряжение качественного трансформаторного масла в стандартном разряднике должно превышать 50 кВ и может достигать 80 кВ. (По теории ударной ионизации пробивное напряжение должно было бы составлять 2...3 МВ).

Электрическая прочность жидкого диэлектрика повышается при:

- очистке от твердых проводящих микрочастиц (сажа, уголь и т.п.);
- сушке жидкости (удалении воды);
- дегазации жидкости (вакууммировании);
- повышении давления.

**Электрическая прочность твёрдого диэлектрика** зависит от времени приложения пробивного напряжения. По времени воздействия напряжения (с момента подачи до пробоя) и физическим процессам, происходящим при этом воздействии, различают (рис. 6):

- электрической пробой (время воздействия – доли секунды);
- тепловой пробой (время воздействия от секунд до часов);
- пробой под действием частичных разрядов (время воздействия от нескольких часов до года и более).

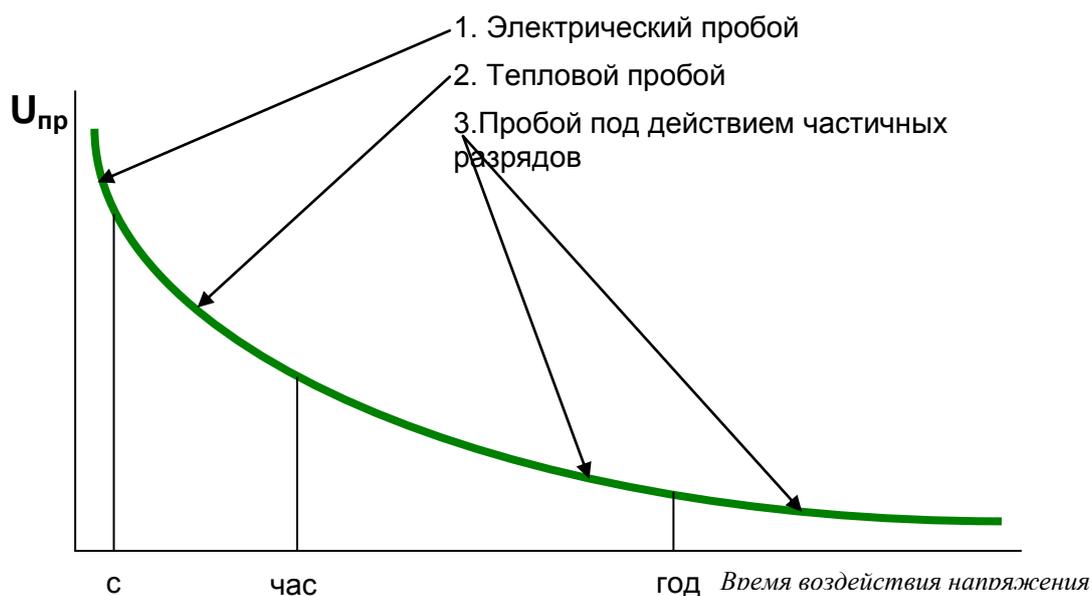


Рис. 6. Зависимость пробивного напряжения твердого диэлектрика от времени воздействия напряжения

При электрическом пробое под действием приложенного напряжения разрываются химические связи, и вещество перерабатывается в плазму. Электрическая прочность твердого диэлектрика пропорциональна энергии химических связей.

Твердые диэлектрики, как правило, имеют более высокую электрическую прочность, нежели жидкие и газообразные. Например:

- Полиэтилен  $\approx 30$  кВ/мм;
- Поливинилхлорид  $\approx 40$  кВ/мм;
- Изоляционное стекло  $\approx 70$  кВ/мм.

Причиной теплового пробоя является разогрев диэлектрика, чаще всего за счет диэлектрических потерь, когда мощность потерь превышает мощность, отводимую от диэлектрика.

При повышении температуры увеличиваются электропроводность (за счет увеличения числа носителей) и угол диэлектрических потерь, что приводит к дополнительному росту температуры, и снижению электрической прочности. В результате разогрева диэлектрик пробивается при более низкой напряженности поля, чем при электрическом виде пробоя.

## 10. Частичные разряды в диэлектриках

**Частичным разрядом, ЧР называют разряд, проходящий в какой-либо ограниченной области изоляционного промежутка, и не замыкающий весь промежуток.** Одним из примеров частичного разряда является коронный разряд в газах в неравномерном электрическом поле, когда стримером пробивается лишь область вблизи электрода с напряженностью поля выше электрической прочности газа (например, у провода высоковольтной линии электропередачи). В жидких диэлектриках частичные разряды возникают в пузырьках и у электродов, в местах повышенной напряжённости электрического поля. В твердых телах ЧР – это локальный многолавиновый разряд в газовой поре диэлектрика.

Для возникновения частичного разряда в твердом диэлектрике необходимы два условия:

- наличие воздушного включения, напряженность поля в котором выше, чем в самом диэлектрике;
- напряжение, приложенное к диэлектрику должно быть достаточным для того, чтобы напряженность поля в воздушном включении превысила электрическую прочность воздуха.

Легче всего наблюдать частичные разряды в двухслойном диэлектрике, одним из слоёв которого является воздух. Рассмотрим пример двухслойного диэлектрика, один из слоёв которого - стекло, а другой – воздух. При

приложении напряжения к такому диэлектрику распределение напряженности поля в нем определяется системой двух уравнений:

$$\begin{cases} U = E_c \cdot d_c + E_b \cdot d_b \\ \frac{E_b}{E_c} = \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_b} \end{cases},$$

где  $U$  – напряжение, прикладываемое к двухслойному диэлектрику,  $E_c$  и  $E_b$  – соответственно напряженности поля в стекле и в воздухе, а  $\varepsilon_c$  и  $\varepsilon_b$  соответственно диэлектрические проницаемости этих материалов.

При переменном поле, приложенном к диэлектрику, частичные разряды возникают на каждом полупериоде при достижении напряжением, прикладываемым к воздушному слою ( $E_b \cdot d_b$ ), пробивного значения. Если мы знаем электрическую прочность воздуха в рассматриваемых условиях, то при  $E_b = E_{пр.в}$  напряжение  $U = U_{чр}$  называют напряжением возникновения частичных разрядов.

Длительные периодические ЧР химически разрушают диэлектрик. Продукты распада (в первую очередь углерод) увеличивают проводимость и диэлектрические потери. Это в конечном итоге приводит к нагреву диэлектрика и его электрическому пробое.

## 11. Начальная кривая намагничивания

**Кривая намагничивания** – это зависимость индукции в материале (**B**) от напряжённости внешнего магнитного поля (**H**). Кривая намагничивания является важной характеристикой магнитных материалов, к которым относятся ферромагнетики и ферримагнетики.

**Ферромагнетизм** – это магнитоупорядоченное состояние вещества, при котором все магнитные моменты<sup>6</sup> атомов в определенном объеме вещества

---

<sup>6</sup> Магнитный момент- это основная векторная величина, характеризующая магнитные свойства вещества. Поскольку источником магнетизма является ток в замкнутой цепи, то значение магнитного момента **M** определяется как произведение силы тока **I** на площадь, охватываемую контуром тока **S**:

$$\mathbf{M} = \mathbf{I} \times \mathbf{S} \text{ A} \times \text{м}^2.$$

Магнитными моментами обладают электронные оболочки атомов и молекул (орбитальные магнитные моменты). Электроны и другие элементарные частицы имеют спиновый магнитный момент, определяемый существованием собственного механического момента частицы – спина. Спиновый магнитный момент электрона может ориентироваться во внешнем магнитном поле так, что возможны только две равные и противоположно

(домене) параллельны и однонаправлены, что обуславливает самопроизвольную намагниченность<sup>7</sup> домена. Появление магнитного порядка связано с обменным взаимодействием электронов, имеющим квантово-механическую природу. Силы взаимодействия подчиняются закону Кулона. В отсутствие внешнего магнитного поля ориентация магнитных моментов различных доменов может быть произвольной, и рассматриваемый объем вещества имеет в результате слабую или нулевую намагниченность. При приложении магнитного поля магнитные моменты доменов ориентируются по полю тем больше, чем выше напряженность поля. При этом изменяется значение магнитной проницаемости ферромагнетика и усиливается индукция в веществе. Примеры ферромагнетиков: Железо, никель, кобальт, гадолиний и сплавы этих металлов между собой и другими металлами (Al, Au, Cr, Si и др.). Магнитная проницаемость<sup>8</sup> ( $\mu$ ) ферромагнетиков зависит от напряженности внешнего магнитного поля и лежит в пределах  $\approx 100 \dots 100000$ .

Ферримагнетизм – это магнитоупорядоченное состояние вещества, в котором магнитные моменты атомов образуют в определенном объеме вещества (домене) магнитные подрешетки атомов или ионов с суммарными магнитными моментами не равными друг другу и направленными навстречу друг другу. Ферримагнетизм можно рассматривать как наиболее общий случай магнитоупорядоченного состояния, а ферромагнетизм как случай с одной

---

направленные проекции момента на направление вектора напряженности магнитного поля, равные *магнетону Бора* –  $9,274 \times 10^{-24} \text{ А} \times \text{м}^2$ .

<sup>7</sup> Намагниченность –  $\mathbf{J}$  – это суммарный магнитный момент единицы объема вещества:

$$J = \frac{\sum M}{V} \left[ \frac{A}{M} \right]$$

<sup>8</sup> Магнитная проницаемость,  $\mu$  – это физическая величина, характеризующая изменение магнитной индукции при воздействии магнитного поля. Для изотропных сред магнитная проницаемость равна отношению индукции в среде  $\mathbf{B}$  к напряженности внешнего магнитного поля  $\mathbf{H}$  и к магнитной постоянной  $\mu_0$

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

Магнитная проницаемость – величина безразмерная. Её значение для конкретной среды на 1 больше магнитной восприимчивости (отношение намагниченности вещества к напряженности магнитного поля) той же среды:

$$\mu = \kappa_v + 1,$$

так как магнитная индукция в веществе усиливается по сравнению с магнитной индукцией внешнего поля за счёт намагниченности вещества:  $B = \mu_0(H+J)$ .

подрешеткой. В состав ферритмагнетиков обязательно входят атомы ферромагнетиков. Примеры ферритмагнетиков:



Магнитная проницаемость ферритмагнетиков имеет тот же порядок, что и у ферромагнетиков ( $\mu \approx 100\dots 100000$ ) и также зависит от напряжённости магнитного поля.

**Начальные кривые намагничивания** – это зависимости намагниченности материала (кривая намагничивания по намагниченности) или индукции в материале (кривая намагничивания по индукции) от напряженности внешнего магнитного поля, снятая на предварительно размагниченном образце, при последовательном возрастании напряжённости магнитного поля. Размагничивают образец, как правило, его нагреванием выше температуры Кюри<sup>9</sup>. Начальная кривая намагничивания по индукции и зависимость магнитной проницаемости от напряжённости внешнего магнитного поля показаны на рис. 7.

Начальная кривая намагничивания отражает процессы перестройки доменов в магнитном материале при увеличении напряжённости внешнего магнитного поля.

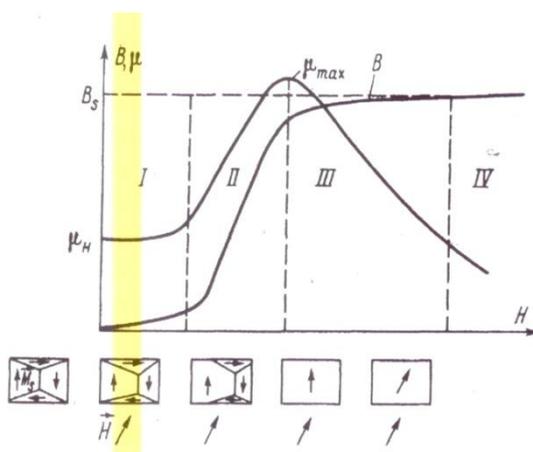


Рис. 7. Кривая намагничивания магнитного материала и соответствующая ей зависимость магнитной проницаемости от напряжённости внешнего магнитного поля.

<sup>9</sup> Температура Кюри для магнитных материалов – это температура, при которой за счёт теплового движения разрушается упорядоченная магнитная структура и материал превращается в парамагнетик.

При отсутствии внешнего магнитного поля магнитные моменты доменов располагаются таким образом, чтобы обеспечить минимум энергии в материале. Это достигается замыканием магнитного потока (векторов магнитных моментов) соседних доменов внутри материала. При наложении внешнего магнитного поля с небольшой напряжённостью (зона 1 на рис 4) происходит рост объёма доменов, которые имеют направление намагниченности, совпадающее или близкое к направлению напряженности внешнего поля. В материале появляется индукция, большая, чем у внешнего поля, и формируется значение магнитной проницаемости, которое называется «начальной магнитной проницаемостью». В области I процесс намагничивания обратим. Это означает, что при уменьшении напряжённости магнитного поля индукция в материале снижается по той же кривой, по которой она возрастала. Кривая намагничивания в области II характеризуется тем, что здесь происходит неупругое смещение доменных границ, индукция в материале растёт более быстрыми темпами, нежели напряжённость внешнего поля и магнитная проницаемость увеличивается до своего максимального значения. Этот процесс уже не является полностью обратимым (при снижении напряжённости внешнего магнитного поля до нуля индукция в материале остаётся и имеет определённое значение). К концу этого участка по мере роста напряжённости внешнего магнитного поля материал превращается в один домен с направлением вектора намагниченности, совпадающим с направлением лёгкого намагничивания материала. С вектором внешнего поля намагниченность материала составляет некоторый угол. В области приближения к насыщению (область III) изменение индукции в материале объясняется в основном процессом вращения вектора намагниченности в сторону уменьшения угла, который вектор намагниченности составляет с вектором напряжённости внешнего поля. Значение магнитной проницаемости начинает уменьшаться. При совпадении векторов намагниченности и внешнего поля наступает область технического насыщения. На последнем участке кривой индукции (область IV) последняя увеличивается в основном за счёт внешнего поля, а значение магнитной проницаемости уменьшается вплоть до 1.

По начальной кривой намагничивания можно определить такие параметры магнитного материала как:

- начальная магнитная проницаемость,  $\mu_{нач}$  – значение магнитной проницаемости начальной кривой намагниченности по индукции при стремлении магнитного поля к нулю;
- максимальная магнитная проницаемость,  $\mu_{макс}$  – значение магнитной проницаемости в точке кривой намагничивания по индукции с максимальным значением производной;
- индукция технического насыщения,  $B_{нас}$  – значение индукции в магнитном материале, определяемое экстраполяцией из области напряженности магнитных полей, соответствующих намагниченности технического насыщения, к нулевому значению напряжённости поля.

## 12. Петля магнитного гистерезиса и её характерные точки

Комплекс магнитных свойств магнитного материала описывается кривыми намагничивания-размагничивания – петлями магнитного гистерезиса (hysteresis – отставание, запаздывание). Намагничивание происходит при увеличении напряжённости внешнего магнитного поля, а размагничивание при снижении напряжённости внешнего магнитного поля. Магнитный гистерезис – это неоднозначная зависимость магнитной индукции в материале или намагниченности материала от напряженности внешнего магнитного поля при квазистатическом<sup>10</sup> его изменении. Неоднозначность точек кривой при намагничивании и размагничивании объясняется необратимостью процессов намагничивания в области II (рис. 7). При снижении напряжённости внешнего магнитного поля снижение намагниченности в материале происходит с отставанием: при определённом значении снижающейся напряжённости намагниченность материала будет выше, чем при том же значении увеличивающейся напряжённости внешнего магнитного поля.

---

<sup>10</sup> Квазистатический процесс – процесс в физической системе, протекающий столь медленно, что состояние системы в любой момент времени можно считать равновесным. (Quasi (лат) – приставка, соответствующая по значению словам «мнимый», «ненастоящий» или словам «почти», «близко»)

Петли гистерезиса могут быть построены как по намагниченности, так и по индукции.

Петля магнитного гистерезиса по индукции – замкнутая кривая, выражающая зависимость магнитной индукции в материале от амплитуды напряжённости магнитного поля при периодическом достаточно медленном изменении последнего.

Петля магнитного гистерезиса по намагниченности – замкнутая кривая, выражающая зависимость магнитной намагниченности материала от амплитуды напряжённости магнитного поля при периодическом достаточно медленном изменении последнего.

В зависимости от значения амплитуды периодически меняющейся напряжённости внешнего магнитного поля может быть построено множество петель гистерезиса для одного образца магнитного материала (рис. 8)

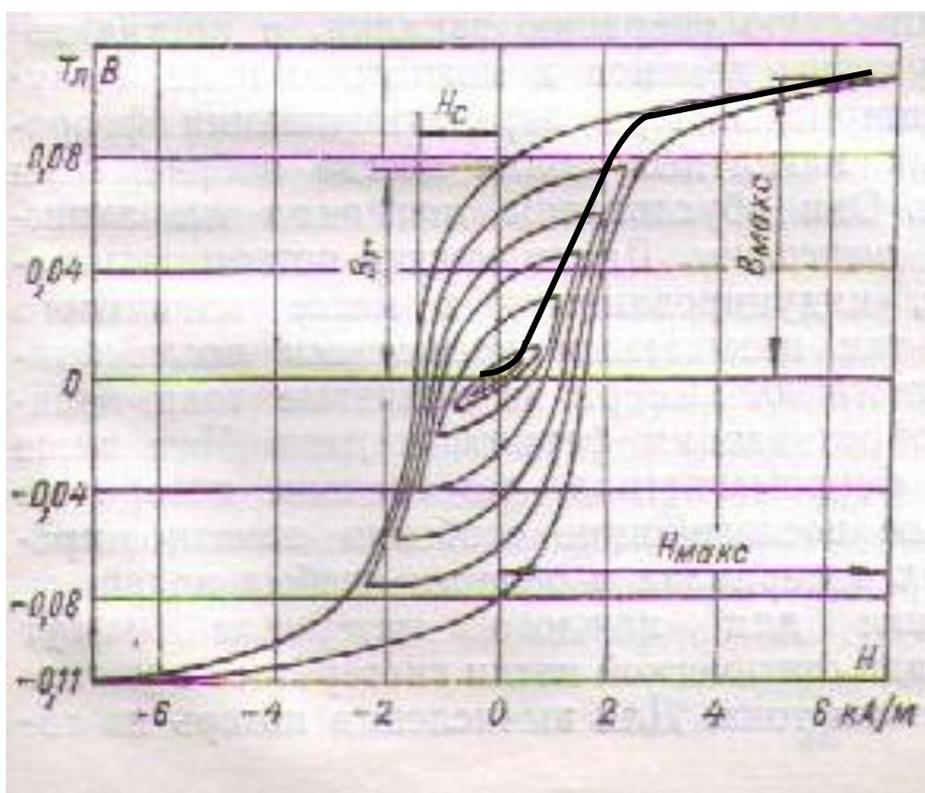


Рис. 8 Частные петли гистерезиса и основная кривая намагничивания

Вершины частных петель гистерезиса соединяет основная кривая намагничивания - геометрическое место вершин симметричных петель

магнитного гистерезиса<sup>11</sup>, которые получают при последовательно возрастающих максимальных значениях напряжённости внешнего магнитного поля.

Наиболее информативной является предельная петля гистерезиса, когда индукция в материале достигает индукции технического насыщения для взятого образца (материал полностью намагничен). Петля гистерезиса представлена на рисунке 9.

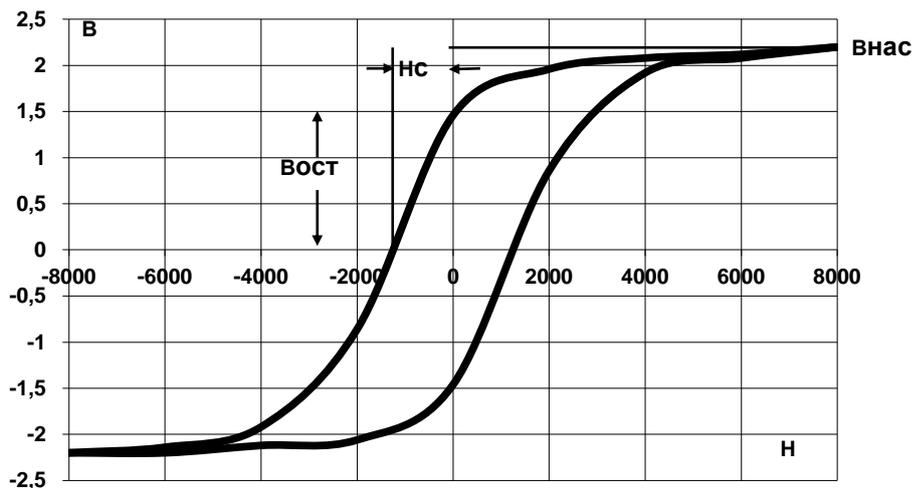


Рис. 9. Предельная петля гистерезиса

Предельная петля гистерезиса определяет следующие параметры магнитного материала:

- остаточная индукция,  $B_{ост}$  - индукция, сохраняющаяся в магнитном материале после намагничивания его до намагничённости технического насыщения и уменьшения напряжённости внешнего магнитного поля до нуля.
- коэрцитивная сила,  $H_c$  - величина, равная напряжённости магнитного поля, необходимого для изменения магнитной индукции от остаточной индукции до нуля (коэрцитивная сила по индукции).
- магнитные потери на гистерезис – потери энергии на перемагничивание, пропорциональные площади, охватываемой петлей гистерезиса.

<sup>11</sup> Симметричная петля магнитного гистерезиса – петля, получаемая при циклическом изменении напряжённости магнитного поля между равными по модулю значениями максимальной и минимальной напряжённости, симметричная относительно начала координат.

По значению коэрцитивной силы и площади петли гистерезиса различают магнитомягкие и магнитотвёрдые материалы. Магнитомягкие материалы имеют малую площадь петли гистерезиса, а магнитотвердые – большую.

У магнитомягких материалов коэрцитивная сила, как правило, ниже 800 А/м. Эти материалы используются, например, для магнитопроводов электрических машин переменного тока, и малая коэрцитивная сила обуславливает малые потери на перемагничивание.

Магнитотвердые материалы имеют коэрцитивную силу более 4000 А/м. Они имеют также большую остаточную индукцию и используются как материалы для постоянных магнитов.

### 13. Твёрдость материалов

**Твёрдость** – это сопротивление, оказываемое материалом при внедрении в него другого, более твёрдого материала. Эта характеристика материала, отражает его прочность и пластичность.

Пластичность – это свойство твёрдых тел сохранять часть деформации при снятии нагрузки, которая её вызвала. Например, при растяжении цилиндрического металлического образца последний деформируется вначале пропорционально нагрузке, а затем, – опережая рост растягивающих усилий –  $\sigma$  [МПа] (рис. 10).

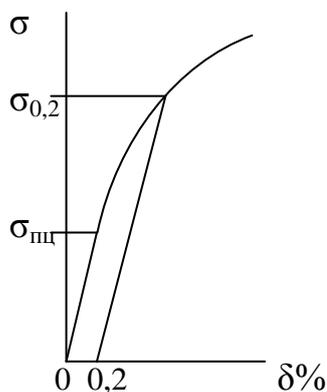


Рис. 10. Кривая растяжения металла

До значения нормального напряжения  $\sigma_{плц}$  относительное удлинение  $\delta\%$  пропорционально нормальному напряжению. Здесь выполняется закон Гука:

$$\sigma = E_{ю} \cdot \delta,$$

где  $E_{ю}$  – модуль нормальной упругости (модуль Юнга). Предел  $\sigma_{плц}$  называют пределом пропорциональности. При нагрузках меньше предела пропорциональности образец подвержен лишь упругой деформации, и при снятии нагрузки его длина становится равной первоначальной. Упругая деформация происходит за счёт

изменения межатомных расстояний в кристаллической решётке. Её устранение после снятия нагрузки происходит благодаря силам взаимодействия между атомами, имеющими «кулоновскую» природу.

При нормальном напряжении, превышающем предел пропорциональности  $\sigma_{пл}$ , деформация увеличивается быстрее роста нагрузки. Здесь уже начинают проявляться пластические деформации. На этом этапе выделяют «условный предел текучести» -  $\sigma_{0,2}$ , - значение нормального напряжения, после снятия которого в образце наблюдается остаточная деформация, составляющая 0,2% от длины образца. Пластическая деформация носит дислокационный<sup>12</sup> механизм, при котором наблюдается взаимный сдвиг по линии (или плоскости) дислокаций дефектной кристаллической структуры. Сдвиг (скольжение) начинается от мест нарушения кристаллической решётки и распространяется последовательно по плоскости сдвига.

Твёрдость наиболее часто определяется методом вдавливания шарика или призмы в испытуемый образец или царапанием.

В методе Виккерса алмазная пирамида стандартных размеров вдавливается остриём в тело со шлифованной поверхностью (рис. 11).

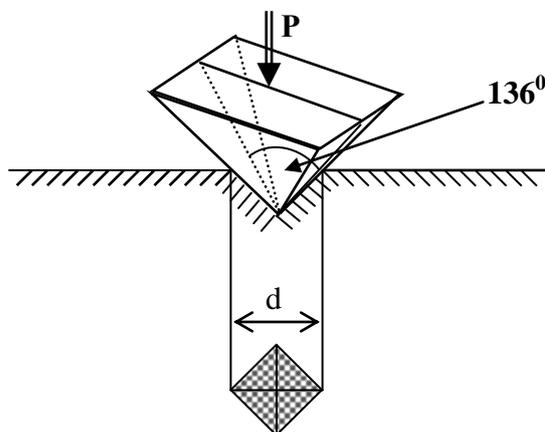


Рис. 11 схема определения твёрдости по Виккерсу

Твёрдость по Виккерсу (HV) определяется как отношение стандартной силы  $P$  к площади отпечатка в  $\text{мм}^2$ :

$$HV = 1,854 \frac{P}{d^2},$$

где  $d$  – среднеарифметическое значение для двух диагоналей отпечатка.

Твёрдость по Бринеллю (HB) – отношение силы, вдавливающей стандартный стальной шарик к площади отпечатка.

Твёрдость по Роквеллу (HR) – отношение силы вдавливания к глубине внедрения алмазного конуса ( $e$ ) с углом при вершине  $120^\circ$  (шкалы А и С), или стального шарика диаметром 1,5875 мм (шкала В). Твёрдость по Роквеллу для

<sup>12</sup> Дислокация – дефекты кристалла, представляющие собой линии, вдоль и вблизи которых нарушено характерное для кристалла правильное расположение атомных плоскостей.

шкал А и С (HRC) равна  $(100 - e)$ , а по шкале В (HRB) равна  $(130 - e)$ . Чем меньше величина  $e$ , выраженная в делениях шкалы циферблата, тем выше твёрдость, которую показывает шкала. При использовании алмазного конуса HRC не зависит от нагрузки, так как условия пластической деформации под вершиной конуса остаются постоянными, и действует закон подобия.

Твёрдость по Моосу (твёрдость царапанием) определяется с использованием эталонных минералов, каждому из которых присвоено число твёрдости:

- 1 – тальк,
- 2 – гипс,
- 3 – кальцит,
- 4 – флюорит,
- 5 – апатит,
- 6 – ортоклаз,
- 7 – кварц,
- 8 – топаз,
- 9 – корунд,
- 10 – алмаз.

## 14. Электрохимическая коррозия металлов

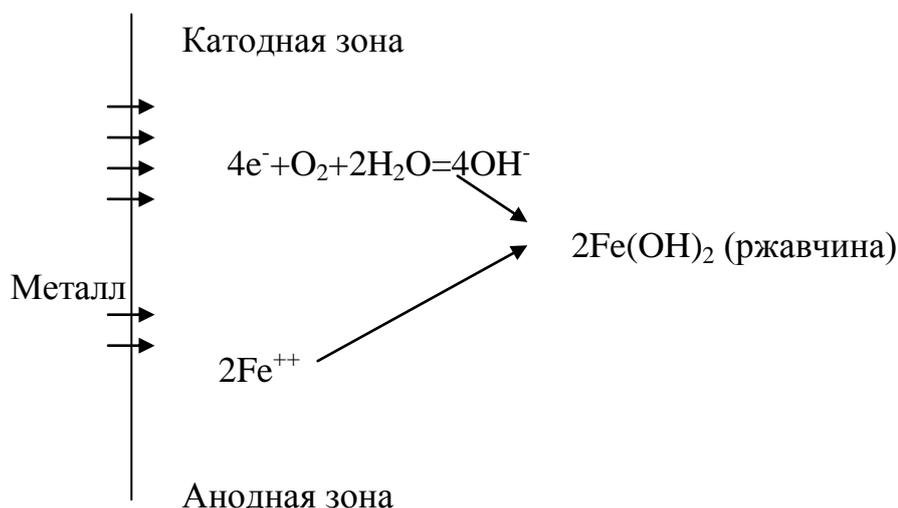
Коррозией материала называются химические превращения материала (прежде всего окисление), происходящие при участии внешней среды. Коррозия характерна для материалов, состав и структура которых далеки от природных. При получении таких материалов из исходных природных минералов и руд затрачивается энергия, энергетически «приподнимая» материал над окружающей средой. При эксплуатации в природных условиях материал стремится вернуться в исходное состояние, на более низкий уровень энергии. Кроме того, коррозионные процессы энергетически обеспечиваются и сторонними источниками. В природной среде коррозия носит, как правило, электрохимический характер. Это означает, что электрическим процессам

движения заряженных частиц (электронов и ионов) сопутствуют химические реакции окисления и восстановления.

По характеру источника энергии. Обеспечивающего протекание этих процессов электрохимическую коррозию можно подразделить на 3 вида:

- коррозия в неоднородной и влажной грунтовой среде,
- контактная коррозия,
- электрокоррозия.

Коррозия во влажной среде (в грунте, при увлажнении туманом, дождем и т.п.) происходит при разделении поверхности металла на участки с разными электрохимическими характеристиками (анодные и катодные зоны).



В анодной зоне идет выход ионов металла из кристаллической решетки в окружающую среду и соединение с присутствующими там ионами. В катодной зоне приэлектродная реакция сводится к восстановлению отрицательных гидроксильных ионов за счёт электронов металла, кислорода и воды грунта:



Разделение на катодную и анодную области происходит по причине разной концентрации кислорода в этих областях. Например, заземляющий проводник проходит из воздуха в грунт. Во влажной воздушной среде образуется катодная зона – здесь много кислорода. Под поверхностью грунта кислорода меньше, и здесь образуется анодная зона, где металл корродирует.

Контактная коррозия происходит при электрическом контакте между собой различных металлов во влажной среде. Более «благородные» из этих металлов имеют более положительный электродный потенциал и «перетягивают» в себя электроны из металла, имеющего менее положительный электродный потенциал. «Благородные» металлы являются катодом в паре с менее "благородным", корродирующим анодом. Электрохимический ряд металлов, применяемых в электроэнергетике, имеет следующий вид (вышерасположенные металлы более "благородны" по сравнению с нижерасположенными):

*медь*

*свинец*

*сталь в бетоне*

*сталь в грунте*

*алюминий*

*цинк.*

Тот или иной электрохимический потенциал металла по отношению к грунту обусловлен особенностями взаимодействия металла с грунтовой средой. Электрохимические потенциалы измеряются по отношению к стандартным электродам сравнения, электрохимический потенциал которых неизменен.

При контактной коррозии имеет значение соотношение площадей поверхности металлов коррозионной пары. Поскольку значение тока анода и катода одно и то же, то соотношение площадей определяет соотношение плотностей тока с анода и катода. Интенсивнее электродные реакции идут при более высоких плотностях тока. Так, например, широко известен способ защиты стали от коррозии путём оцинковки, то есть покрытия поверхности стали тонким слоем цинка. Цинк по отношению к стали является анодом и будет растворяться, защищая сталь. Но поскольку, поверхность стали, соприкасающаяся с влажной средой минимальна (трещины в поверхности цинка, отверстия для болтов и т.п.), то для защиты стали требуется малый ток, который в расчёте на большую поверхность цинка создаёт мизерные плотности тока, и цинк растворяется весьма медленно. Оцинковки хватает на десятки лет. Иное дело, когда

поверхность анода сравнима с поверхностью катода или превышает её. Например, если применить оцинкованные заземлители, то на подстанции они будут работать в паре с арматурой железобетона, поверхность которой больше, нежели оцинкованная поверхность заземлителей. Большой ток такой пары вызовет быстрое растворение цинка. Опыт показывает, что полное растворение цинка с поверхности оцинкованных стальных заземлителей происходит в течение 1-2х лет. Поэтому здесь оцинковка неэффективна.

Медные заземлители вызывают коррозию стальных труб, свинцовых и алюминиевых оболочек кабелей.

- Электрокоррозия (коррозия под действием блуждающих токов) происходит в водной и грунтовой средах в зонах, прилегающих к электрифицированному на постоянном токе транспорту (железная дорога, трамвай, метро). Электрокоррозии подвержены обычно протяжённые металлические коммуникации, например, трубопроводы. Схема коррозионных токов показана на рис. 12.

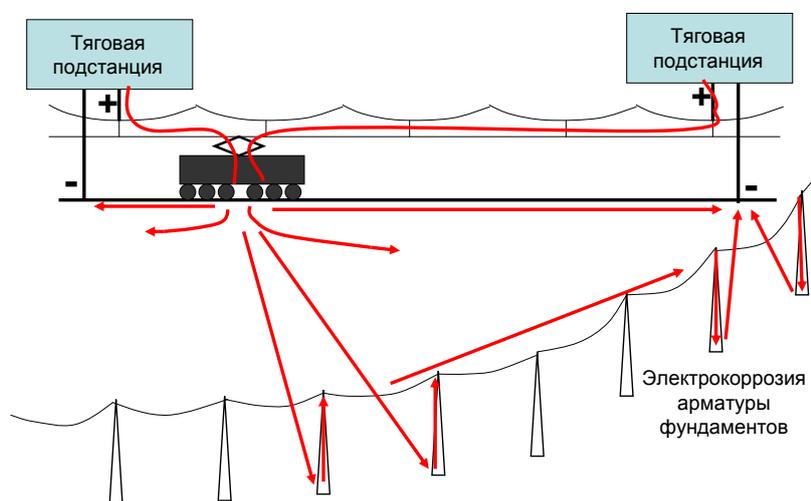


Рис. 12. Пример распределения блуждающих токов при наличии ВЛ, проходящей вблизи электрифицированной железной дороги

На рисунке рассмотрен пример, когда вблизи железной дороги, электрифицированной на постоянном токе, проходит воздушная линия

электропередачи (ВЛ). Грозозащитный трос этой ВЛ соединён с заземлёнными опорами.

Электрокоррозия происходит в тех зонах, где потенциал металла по отношению к грунту положительный. Такие зоны называются анодными. Здесь с металла ток стекает, вынося с собой ионы металла, то есть, вызывая электрокоррозию (см. рис. 12).

### Список литературы

1. Справочник по электротехническим материалам: В 3 т. Т.1/ Под ред. Ю.В.Корицкого и др. – 3-е изд., перераб. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 368 с.: ил.
2. Справочник по электротехническим материалам: В 3 т. Т.2/ Под редакцией Ю.В.Корицкого и др. – 3-е изд., перераб. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 464 с.: ил.
3. Справочник по электротехническим материалам / Под ред. Ю.В.Корицкого, В.В. Пасынкова, Б.М. Тареева. – Т.3. – 3-е изд., перераб. – Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1988. – 728 с.: ил.
4. Богородицкий Н.П., Пасынков В.В, Тареев Б.М. Электротехнические материалы: Учебник для вузов. – 7-е изд., перераб. и доп. – Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1985. – 304 с., ил.
5. Материаловедение. Технология конструкционных материалов: Учеб.для вузов. В 2 т. / А.В.Шишкин, В.С.Чередниченко, А.Н.Черепанов, В.В.Марусин; под ред. В.С.Чередниченко. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2004. – Т.1. Элементы теоретических основ материаловедения и технологии получения материалов. – 448 с.
6. Материаловедение. Технология конструкционных материалов: Учеб.для вузов. В 2 т. / А.В.Шишкин, В.С.Чередниченко, А.Н.Черепанов, В.В.Марусин; под ред. В.С.Чередниченко. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2004. – Т.2. Технология получения и обработки материалов. Материалы как компоненты оборудования. – 508 с.
7. Материаловедение. Технология конструкционных материалов: учеб. пособие для студентов вузов, обучающихся по направлению «Электротехника, электромеханика и электротехнология» / под ред. В.С.Чередниченко. – 4-е изд. стер. – Москва, Издательство «Омега-Л», 2008, 752 с.
8. Целебровский Ю. В. Электротехническое материаловедение. Сборник практических заданий : учебное пособие / Ю. В. Целебровский, Н. А. Черненко ; Новосиб. гос. техн. ун-т. - Новосибирск, 2016. - 146 с.

## Сведения о полупроводящих материалах

### П1.1. Электропроводность полупроводников и слабопроводящих материалов

В любом теле при приложении напряжения должен протекать ток в соответствии с выражением, определяющим плотность тока

$$j = \left( \sum n_i \cdot q_i \cdot \mu_i \right) \cdot E \quad (\text{П1})$$

Здесь  $n_i$  - концентрация носителей заряда  $i$ -ого сорта,  $q_i$  - значение заряда,  $\mu_i$  - подвижность носителей заряда. Определяющий параметр в этом выражении -  $n_i$ . Значение  $n_i$  велико для металлов, т.к. нет энергетического барьера для выхода электронов,  $n_i$  - очень мало для диэлектриков, т.к. энергетический барьер (ширина запрещенной зоны) значителен и составляет порядка 10 эВ. Полупроводники и слабопроводящие материалы являются промежуточным звеном. Их ширина запрещенной зоны составляет обычно от доли эВ до нескольких эВ.

Большой интерес к полупроводникам вызван возможностью управления их свойствами путем добавления небольших количеств других веществ, т.н. легирования. Если добавлять легко ионизирующиеся вещества, т.е. вещества, легко отдающие электроны, их еще называют веществами-донорами электронов, то можно создать полупроводник с электронной проводимостью. В этом случае существует некоторое количество свободных электронов, за счет которых осуществляется проводимость. Такой полупроводник называется полупроводником  $n$ -типа. Если добавлять вещества с большим сродством к электрону, т.е. вещества, легко захватывающие электроны, то создается полупроводник с т.н. "дырочной" проводимостью. В этом случае существует некоторое количество свободных электронных вакансий, за счет которых осуществляется проводимость. Такой полупроводник называется

полупроводником р-типа. За счет комбинации полупроводников р- и n- типа созданы различные электронные приборы: диоды, транзисторы, тиристоры и т.п.

Из полупроводниковых материалов отметим германий (он исторически был первым полупроводником наряду с окисью меди) и кремний. Последний в настоящее время является полупроводником № 1.

Рассмотрим некоторые характеристики кремния:

Плотность, кг/м<sup>3</sup> 2329.

Т плавления, °С 1410.

Теплоемкость, кДж/(кг·К) 0.8.

Теплопроводность, Вт/(м·К) 109.

Собственное удельное сопротивление, Ом·м 2300.

Диэлектрическая проницаемость 12,5.

Магнитная восприимчивость  $-0,13 \cdot 10^{-4}$ .

Электропроводность технических материалов также определяется аналогично выражению (П1). Отметим, что электропроводность растет с ростом температуры. Это связано с тем, что с ростом температуры электроны имеют повышенную энергию, они легче могут стать свободными и участвовать в электропроводности.

В металлах, как указывалось ранее, электропроводность падает с ростом температуры. Это связано с тем, что в металлах количество носителей заряда велико и не зависит от температуры, но их движение может затрудниться при взаимодействии с тепловыми колебаниями молекул металла. Если снова обратиться к формуле (П1), то подвижность  $\mu_i$  должна падать с ростом температуры из-за участвовавших столкновений электронов с колебаниями решетки.

## П1.2 Резистивные материалы

**Нихром.** Из металлических материалов для резисторов наибольшее распространение получили материалы на основе никеля, хрома и железа, так называемые нихромы, и родственные им материалы на основе железа, хрома и алюминия - фехрали. В обозначении марки буква Х означает хром, буква Н - никель, буква Ю - алюминий. Цифра после каждой буквы - процентное содержание этого элемента (массовые проценты). Железо обычно составляет основу, его не обозначают, а его содержание составляет остальное, т.е. сколько нужно, чтобы дополнить до 100 %. Температурный коэффициент удельного сопротивления нихромов положителен, т.е. с ростом температуры удельное сопротивление увеличивается.

**Графит.** Вторым по значению резистивным материалом является графит. Графит – одна из кристаллических модификаций углерода. Это непрозрачный, мягкий, электропроводный материал. Структура у него слоеная. В слое атомы углерода соединены в бесконечные шестичленные кольца. Каждое единичное кольцо представляет собой аналог бензольного кольца. Удельное сопротивление зависит от направления измерения. Если приложить напряжение поперек слоев, удельное сопротивление составит 100 мкОм·м, если приложить напряжение в плоскости слоев, удельное сопротивление снижается до 0.3-0.5 мкОм·м.

Помимо чистого углерода известно много модификаций технического углерода. Их физические характеристики также сильно меняются в зависимости от структуры и от количества разнообразных примесей. В основе их лежит структура графита, поэтому технические углероды можно считать и техническими графитами. Из них отметим сажу, кокс, коллоидный графит, силицированный графит. Сажа характеризуется очень малым размером частиц, до десятков ангстрем. Используется как наполнитель для резин, полимеров, электропроводных композиций. Взвесь порошка графита в воде называется «аквадаг» и используется для создания электропроводящих покрытий.

Тот факт, что графит имеет повышенное удельное сопротивление по сравнению с металлами, позволяет применять его в промышленности для

создания различных сопротивлений. Начиная с пленочных сопротивлений в радиоэлектронике, графитовой бумаги и графитовой ткани и заканчивая композиционными материалами, где частицы графита выступают в роли проводящего наполнителя.

**Бетэл.** Бетэл - (бетон электропроводный) - исторически один из первых российских электропроводящих композиционных материалов. Предложен в середине шестидесятых новосибирскими учеными (Вершинин Ю.Н., Добжинский М.А). Эта разработка в начале восьмидесятых была награждена государственной премией. Состоит из четырех компонентов: цемент, поликристаллический углерод (с добавкой сажи), вода, кварцевый песок. Главное достоинство - дешевизна исходных компонентов и простота технологии приготовления. Сделав смесь типа обычного бетона, куда добавлен поликристаллический графит с добавлением сажи, получаем материал с удельным сопротивлением примерно в диапазоне 0,01-10 Ом·м.

Недостатки бетэла – способность к водопоглощению с последующим изменением многих параметров, малый коэффициент теплопроводности ( $\sim 0.6$  Вт/(м·К)).

**Эком.** Материал “ЭКОМ” состоит из трех мелкодиспергированных компонентов: силицированный графит, окись железа, корунд и одного жидкого компонента: ортофосфорная кислота. Каждый из компонентов обеспечивает определенную функцию. Графит обеспечивает электропроводность материала за счет контактов частичек графита между собой и получения, тем самым, сплошного проводящего мостика от одного электрода к другому. Изменяя концентрацию графита, можно менять, в значительных пределах электропроводность композиционного материала. Корунд обеспечивает его теплопроводность, ввиду того, что теплопроводность корунда достаточно велика (30-50 раз больше теплопроводности других компонентов) и составляет примерно 30 Вт/(м·К). Для сравнения, это значение равно теплопроводности нержавеющей стали. Взаимодействие окиси железа с ортофосфорной кислотой дает фосфат железа, обеспечивающий механическую прочность.

Материал имеет следующие параметры:

Параметры материала	Значения
Плотность	2.6-2.7 Мг/м <sup>3</sup>
Предел прочности при сжатии	50-100 МПа
Теплопроводность	3-4 Вт/(м·К)
Удельное электрическое сопротивление	10 <sup>-6</sup> ÷3000 Ом·м
Температурный коэффициент удельного сопротивления	- (1.5÷2)·10 <sup>-3</sup> 1/К
Температурный коэффициент линейного расширения	10 <sup>-5</sup> 1/К
Теплостойкость <sup>13</sup>	1100 °С
Нагревостойкость <sup>14</sup>	300 °С

Одиночный элемент резистора из материала ЭКОМ выпускается в виде нескольких типоразмеров. Наиболее часто применяется в изделиях элемент с размерами 150x150x10 мм, массой 0.6 кг, номинальным сопротивлением R=2÷20 Ом. В каждом конкретном случае осуществляется выбор необходимого номинала путем изменения соотношения компонентов и изготовление элементов в нужном количестве. В зависимости от допустимой длительности включения и способов организации теплоотвода допустимая мощность на элемент может меняться в пределах от 50 Вт до 200 Вт.

В конструкции электрообогревателей и резисторов предусмотрено использование нескольких элементов соединенных последовательно. Можно показать, что при таком типе соединения происходит выравнивание мощности по элементам, что обусловлено отрицательным температурным коэффициентом сопротивления. При увеличении мощности на каком-то элементе его сопротивление уменьшается, что приводит к уменьшению падения напряжения на этом элементе, что приводит, в свою очередь, к уменьшению мощности на этом элементе.

В процессе разработки материала было перепробовано большое количество компонентов. Рассмотрим варианты выбора электропроводного компонента.

<sup>13</sup> Теплостойкость – способность вещества приобретать при заданной температуре деформацию не выше нормированной. В методе Мартенса – деформацию изгиба, в методе Вика – деформацию вдавливания.

<sup>14</sup> Нагревостойкость – температура, при которой вещество может эксплуатироваться заданное время без недопустимого ухудшения его свойств.

Были испробованы порошки металлов: нержавеющая сталь, медь и т.п. Выяснилось, что композит на основе металлических порошков меняет свое сопротивление после каждого эксперимента с протеканием более-менее значительного тока, а именно, сопротивление уменьшается. Исследования показали, что частички металла сплавляются в месте контактов за счет повышенной плотности тока и повышенной температуры в контактах. В результате перешли на материал, который теоретически плавится при температуре 3500 °С, а именно, графит.

Однако не всякий графит подходит – например, коллоидный графит имеет слишком высокую электропроводность, низкую адгезию к связующему материалу (в результате - низкая прочность материала) и повышенный температурный коэффициент сопротивления. Изготовленные на основе этого материала нагреватели «разбегались» по температуре, т.е. по мере нагревания сопротивление материала уменьшалось, что приводило к увеличению мощности, это вело к дополнительному нагреву, увеличению мощности и т.д. Чтобы предотвратить выход из строя из-за перегрева, пришлось ставить термодатчики, которые отключали прибор после достижения определенной температуры.

Важно также выбрать концентрацию графита. Дело в том, что сопротивление сильно зависит от его содержания. При этом, при малом содержании материал является диэлектриком, а затем, при увеличении количества графита, становится проводником. При этом имеется пороговое значение концентрации графита, при котором резко меняется электросопротивление.

Особенностью композиционных материалов структуры ЭКОМа является наличие контактного сопротивления между впрессованным электродом и материалом, которое может лежать в пределах от десятых долей до единиц Ом. Когда это сопротивление становится сравнимым с сопротивлением элемента, элемент бракуется.

**Электропроводящие полимеры.** Как известно, полимеры являются диэлектриками. Однако можно их сделать и проводниками. Для чего такие проводники? Они, в отличие от металлов, имеют высокую коррозионную стойкость, легкую обрабатываемость, малый удельный вес, эластичность, дешевизну и т.п. Для того, чтобы из диэлектрика сделать проводник используются два пути. При введении дисперсной электропроводной фазы, тем самым получается композит, в котором матрицей является полимер, а наполнителем - электропроводная добавка. Обычно используют один из видов технического углерода, чаще сажу. Трудности - плохая адгезия полимера и наполнителя. Значит трудно ввести достаточно много наполнителя чтобы достичь высокой электропроводности. Характерное значение удельного электросопротивления при 20% содержании ацетиленовой сажи составляет  $10^2$  Ом·м.

Второй вариант электропроводящих полимеров заключается в модифицировании их структуры. Оказывается, если сделать полимер не из насыщенных углеводородов, а из ненасыщенных, в которых есть двойные, либо тройные связи, то в таком полимере может быть электронная, либо дырочная электропроводность. Первым электропроводным полимером был полиацетилен, в котором чередуются одинарные и двойные связи в линейной молекуле полимера. Пока электрополимеры такого типа не вышли за пределы лабораторий. Но, несомненно, у них есть будущее. Достигнутое значение удельного сопротивления примерно как у графита ( $10^{-3}$  Ом·м, частное сообщение японских разработчиков).

### Сведения о титане

Титан – это твёрдый блестящий серебристый металл. Титан устойчив к коррозии, благодаря мгновенному образованию плотной оксидной плёнки на поверхности. При измельчении титана в порошок его большая активность приводит к горению на воздухе. Титан не взаимодействует почти со всеми кислотами (за исключением фтористой, фосфорной и концентрированной серной) и щелочами.

#### Физико-химические свойства титана:

Температура плавления – 1960 К;

Температура кипения – 3450 К;

Плотность (при 293К) – 4520 кг/м<sup>3</sup>;

Теплоёмкость – 530 Дж/кгК

Теплопроводность (при 300 К) – 21,9 Вт/мК;

Удельное электрическое сопротивление (при 293К) - 0,47 мкОм·м;

Удельная магнитная восприимчивость (в тверд. состоянии) -  $\pm 4,01 \cdot 10^{-8} \text{ м}^3/\text{кг}$ .

Прочностные свойства титана близки к свойствам стали. Предел прочности при растяжении составляет 270-350 МПа, а при легировании алюминием (3-7%) может достигать 1000 МПа.

Титан как конструкционный материал широко применяется в химической промышленности, в медицине из него изготавливаются остеопротезы. Основное применение он нашёл в авиастроении. Эти области применения определены, с одной стороны, такими замечательными свойствами титана как:

- сочетание малой плотности и высокой прочности, что делает титан незаменимым материалом в авиастроении и ракетостроении
- высочайшая коррозионная стойкость даже в морской воде, что делает титан незаменимым в химической промышленности, медицине и судостроении.

С другой стороны, титан имеет высокую стоимость, что ограничивает области его применения.

Титан получают на титано-магниевых комбинатах. Титан достаточно широко распространён в природе (0,56% земной коры), в основном в виде ильменита ( $\text{FeTiO}_3$ ), рутила ( $\text{TiO}_2$ ) и титанита ( $\text{CaTiSiO}_5$ ). Для получения титана вначале из этих минералов получают соединения титана с хлором ( $\text{TiCl}_4$ ) или йодом ( $\text{TiI}_4$ ). Из этих соединений хлор или йод вытесняют предварительно полученным магнием. Все эти технологические процессы весьма энергоёмки, что приводит к высокой стоимости и ограниченности применения титана

## Сведения о твёрдости материалов

Материал	НВ, МПа	Материал	НВ, МПа
<b>Металлы</b>		<b>Литейные стали</b>	
Алюминий отожжённый 99,95%Al	<b>150</b>	27ГЛ после закалки и отпуска	<b>1800-2290</b>
Алюминий отожжённый 99,5%Al	<b>250</b>	30 ХНМЛ после закалки и отпуска	<b>2170-2690</b>
Вольфрам	<b>4150</b>	<b>Нержавеющие стали</b>	
Железо отожжённое, особой чистоты	<b>800</b>	04Х18Н10, аустенитная после закалки	<b>1350-2000</b>
Золото отожжённое	<b>220</b>	12Х17, ферритная после отпуска	<b>1400-1900</b>
Медь	<b>400</b>	10Х13, мартенситная после закалки и отпуска	<b>2550</b>
Серебро отожжённое	<b>500</b>	<b>Алюминиевые сплавы</b>	
Титан особой чистоты	<b>600</b>	Al технический, (АД 1М)	<b>250</b>
<b>Стали обыкновенного качества</b>		Al-Mg (АМг1М)	<b>300</b>
Ст1	<b>1100</b>	Al-Zn-Cu-Mg (В95пчГ1)	<b>1600</b>
Ст3	<b>1310</b>	Al-Mg (АМГ5нМ), заклёпочная проволока	<b>700</b>
Ст6	<b>1970</b>	Fl-Si силумин, АЛ2	<b>550</b>
<b>Стали качественные</b>		<b>Медные сплавы</b>	
10	<b>1160</b>	Латунь простая(Л96)	<b>1350</b>
45	<b>2290</b>	Латунь кремнистая (ЛК80-3)	<b>1800</b>
70	<b>2690</b>	Бронза (БрОФ6,5-0,4) мягкое состояние	<b>800</b>
		Бронза (БрОФ6,5-0,4) жёсткое состояние	<b>2200</b>
		<b>Материалы для электрич/ контактов</b>	
<b>Стали легированные после закалки</b>		Сплав для слаботочных контактов Зл999-999,9	<b>196</b>
20ХГСА	<b>2070</b>	Сплав для слаботочных контактов ВРН	<b>2450</b>
36ХГСА	<b>4100-4500</b>	Сильноточный контакт КМК-А100 (Ag)	<b>490</b>
30ХМА жаропрочная	<b>2290</b>	Сильноточный контакт КМК-Б25(Cu27W70Ni3)	<b>2060</b>

### Измерение линейных размеров при помощи штангенциркуля

Штангенциркуль позволяет измерить линейный размер с точностью до 0,1 мм. Для этой цели используется основная и вспомогательная (нониус) шкалы штангенциркуля (см. рисунок). Штангенциркуль устанавливается перпендикулярно измеряемому образцу и острые края губок для наружных измерений вплотную сдвигаются на образце.

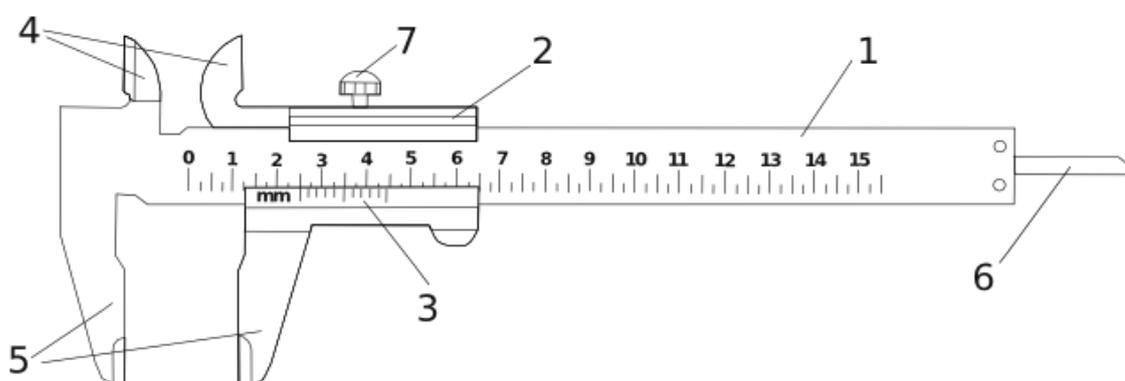


Рис. Штангенциркуль

- |                                   |                                 |
|-----------------------------------|---------------------------------|
| 1. Штанга со шкалой               |                                 |
| 2. Подвижная рамка                | 5. Губки для наружных измерений |
| 3. Нониус                         | 6. Линейка глубиномера          |
| 4. Губки для внутренних измерений | 7. Винт для зажима рамки        |

Производится отсчёт показаний штангенциркуля по шкалам штанги и нониуса в следующем порядке:

- Читают число целых миллиметров. Для этого находят на шкале штанги риску, ближайшую слева к нулевой риске нониуса, и запоминают её числовое значение;
- Читают доли миллиметра. Для этого на шкале нониуса находят риску, ближайшую к нулевому делению нониуса и совпадающую с риской шкалы штанги, и умножают её порядковый номер на цену деления (0,1 мм) нониуса;
- Подсчитывают полную величину показания штангенциркуля, для этого складывают число целых миллиметров и долей миллиметра.