

Федеральное агентство по образованию
Нижегородский государственный технический университет
им. Р.Е. АЛЕКСЕЕВА

к.ф.-м.н. С. Н. Охулков

Электротехническое и конструкционное материаловедение

Кафедра “Теоретическая и общая и общая
электротехника”

Для студентов электротехнических
специальностей всех форм обучения

Автозаводская высшая школа управления и технологий

Очная и заочная форма обучения

- Автомобили и автомобильное хозяйство
- Автомобиле- и тракторостроение
- Технология машиностроения

г. Нижний Новгород, ул. Лескова, 68, т. (831) 256-02-10

5. **Корицкий Ю. В.**
Электротехнические материалы. Изд. 3-е.- М.: Энергия, 1976.
6. **Тареев Б.М.**
Электрорадиоматериалы.- М.: Высшая школа, 1978. - 336 с.
7. **Пасынков В.В., Сорокин В.С.**
Материалы электронной техники.- М.: Высш. шк., 1986.
8. **Д.Д. Мишин** Магнитные материалы.- М.: Высш. шк., 1991.
9. **Шалимова К. В.**
Физика полупроводников. Изд. 2-е.- М.: Энергия, 1976.
10. **Б.М. Яворский, А.А. Пинский**
Основы физики, т.2.- М.: Наука, 1972.

1. ВВЕДЕНИЕ

- Материаловедение - прикладная наука о связи состава, строения и свойств материалов. Теоретической основой материаловедения являются соответствующие разделы физики и химии.
- Материаловедение относится к числу основополагающих учебных дисциплин для студентов специальностей приборного и энергетического профиля. Это связано с тем, что применение и разработка новых материалов являются основой современного производства
- **Целью** изучения дисциплины «Электротехническое материаловедение» является формирование знаний и принципов использования электротехнических материалов в устройствах электротехники и электроэнергетики.

1. ВВЕДЕНИЕ

- *Задачей* дисциплины является изучение современной классификации электротехнических материалов и взаимосвязи их основных характеристик со структурой и процессами, происходящими в них при воздействии электромагнитного поля, тепла, влажности, химически агрессивных сред и других технологических эксплуатационных факторов.

1. ВВЕДЕНИЕ

- Перечень дисциплин, предшествующих изучению данной дисциплины:
 - - химия;
 - - физика;
 - - математика;
 - - электротехника.
- Перечень смежных дисциплин:
 - - электрические машины;
 - - перенапряжение и изоляция в электроустановках;
 - - электрические аппараты.

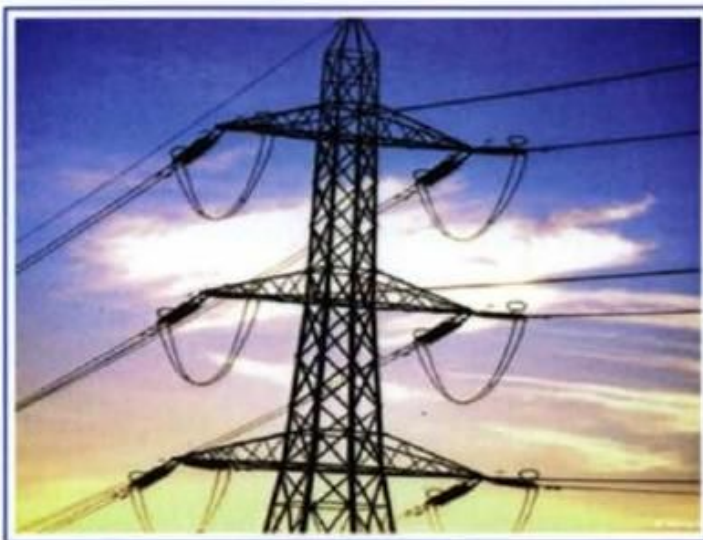
ЭЛЕКТРОМАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ



ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ

Электротехнические материалы – материалы, работающие в электрическом и магнитном полях

I. Проводники.



Линия электропередач (ЛЭП)

Металлы и их сплавы.

II. Диэлектрики.



Обмотки электрических машин

Слюда, целлюлоза и др.

Электротехнические материалы – материалы, работающие в электрическом и магнитном полях

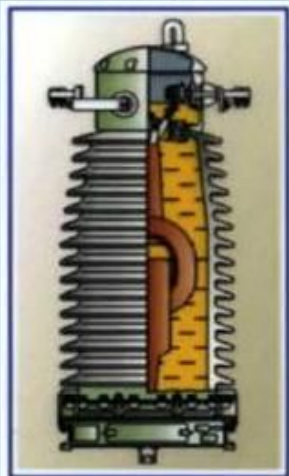
К диэлектрикам принадлежат электроизоляционные материалы



Кабель с ПВХ изоляцией

III. Магнитные материалы.

1. Ферромагнитные вещества:
(железо, никель, кобальт и их сплавы).



Сердечники трансформаторов

IV. Полупроводники
подразделяются на два вида:

1. Простые: германий, кремний, селен.
2. Химические соединения: карбид кремния SiC и др.



Фототранзисторы

2. Ферромагнитные вещества – химические соединения: ферриты – (окислы железа и металлов).

4 агрегатных состояния вещества



Элегазовый выключатель

I. Газообразное

Воздух, азот, элегаз
и т.д.

II. Жидкое

Нефтяные масла,
кремнийорганические
жидкости и т.д.



Маслонаполненный кабель



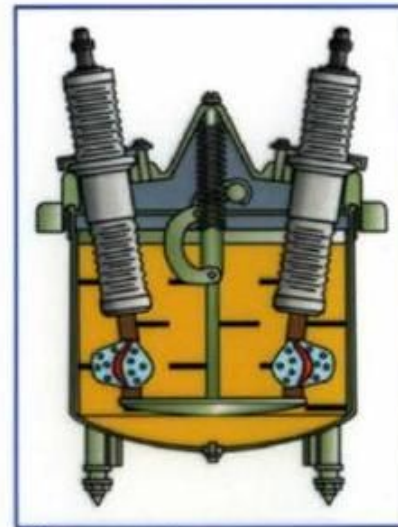
Керамический изолятор

III. Твёрдое

Проводники, органические
диэлектрики и др.

IV. Плазма

Равновесное состояние
свободных электронов и
ионов.



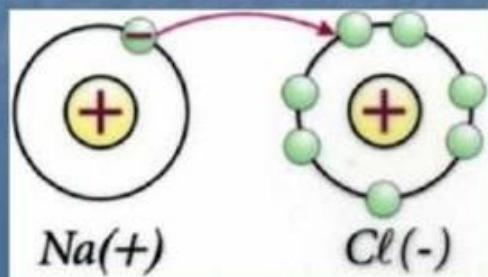
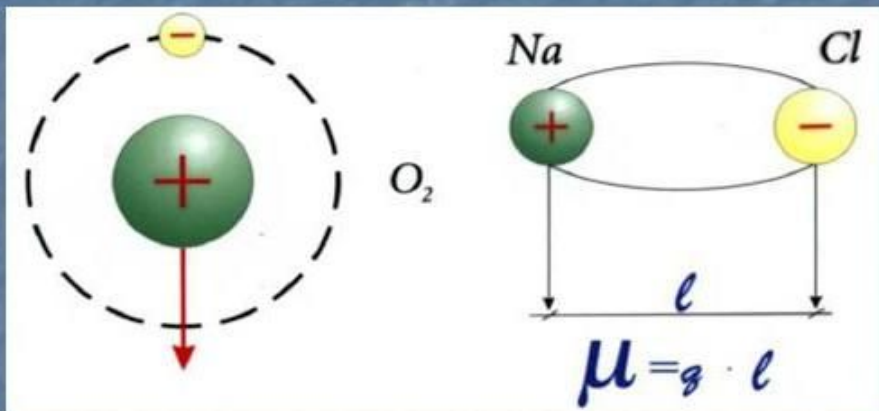
Масляный выключатель

4 агрегатных состояния вещества

I. Газы.

Молекулы газа могут быть:

- 1) неполярными или нейтральными; 2) полярными или дипольными.



II. Жидкости.

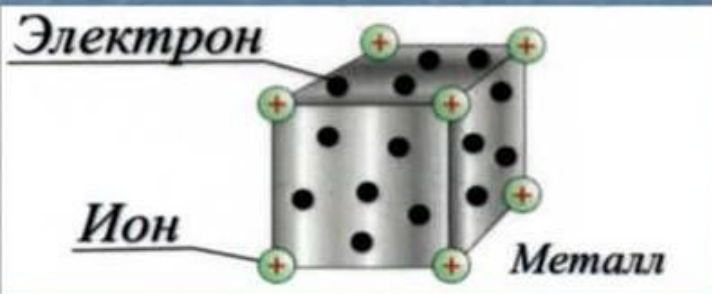


Конденсатор маслонаполненный
конденсаторное масло

1. Диэлектрики состоят из нейтральных и слабополярных молекул.
2. Проводники состоят из растворов или расплавов ионных соединений.

III. Твёрдое тело.

По структуре твёрдые тела бывают:



1. Кристаллические.

Большинство твёрдых тел имеет кристаллическую решётку.



Стекло

2. Аморфные.

Эти тела изотропны.

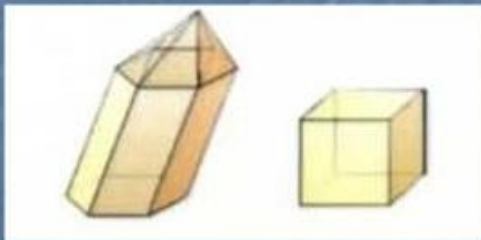


Фарфор

3. Смешанные.

Они имеют две фазы:
а) стекловидную и
б) кристаллическую.

Твёрдые вещества имеют две структуры.



1. Монокристаллическую – единый целый кристалл (Na Cl).



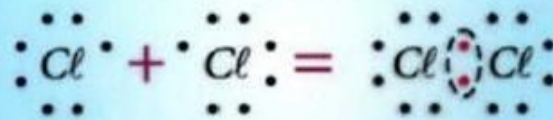
2. Поликристаллическую – плотные группы мелких беспорядочно сросшихся кристаллов (металлы, их сплавы).

Микроструктура электротехнической стали.

Физические и химические свойства атомов

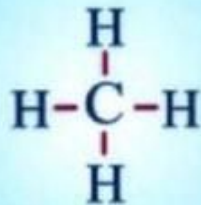
Строение внешних электронных оболочек атомов определяет виды связей в молекулах.

I. Ковалентная (химическая) связь
Молекулы образуются из атомов за счет объединения их внешних валентных электронов.

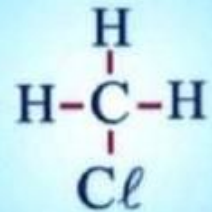


Молекулы могут быть:

1. Нполярными
(O_2, N_2, Cl_2, CH_4)

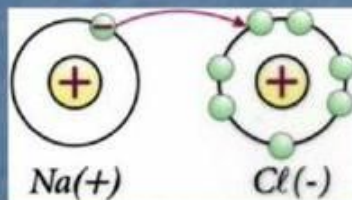


2. Полярными
(CH_3Cl)



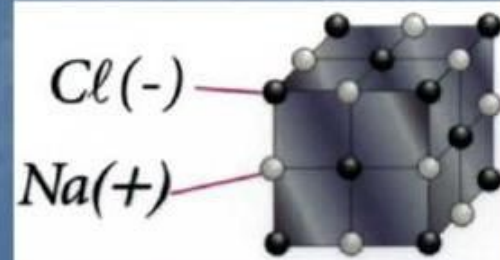
II. Ионная связь.

Вещества имеют кристаллическую решётку ($NaCl$).



1) с плотной упаковкой ионов ($NaCl$);

2) с неплотной упаковкой ($CSCl$).



Вещества с ионной связью бывают:

Физические и химические свойства атомов

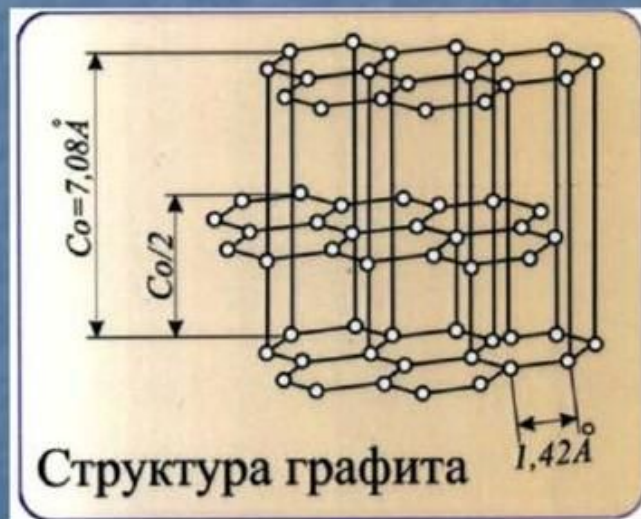
Электрон

Ион



III. Металлическая (химическая) связь.

Между узлами с ионами находятся свободные (коллективизированные) электроны. Это металлы и их сплавы.



IV. Молекулярная связь (связь Ван-дер-Ваальса).

Вещества состоят из отдельных молекул и связаны слабыми молекулярными силами.

Это: графит, парафин, мышьяк, фосфор, H_2 , N_2 .

Классификация веществ по электрическим свойствам

Зонная теория твёрдых тел

Энергетическая диаграмма атома



Различие между телами показывается с помощью энергетических диаграмм зонной теории твёрдых тел.

1. Заполненная электронами зона.
2. Запрещённая зона.
3. Свободная зона.

Различие в энергетических диаграммах проводников, полупроводников и диэлектриков



Проводник



Полупроводник



Диэлектрик

Основные электрические характеристики электротехнических материалов

1. ϵ – диэлектрическая проницаемость.

2. $\rho_v; \rho_s$ – удельные сопротивления.

3. δ и $\text{tg}\delta$ – угол диэлектрических потерь.

4. $E_{пр}$ – напряжённость пробоя (электрическая прочность).

II. Диэлектрики:

$$\rho_v = 10^8 \div 10^{18} \text{ Ом} \cdot \text{м}$$

– изоляционные материалы.

III. Полупроводники:

$$\rho_v = 10^{-2} \div 10^8 \text{ Ом} \cdot \text{м}$$

– диоды, транзисторы и др.

Классификация материалов по способности проводить электрический ток

По величине ρ_v , объемного удельного сопротивления, материалы подразделяются:

I. Проводники:

1. $\rho_v = 10^{-4} \div 10^{-2} \text{ Ом} \cdot \text{м}$ – металлы и их сплавы.

2. $\rho_v = 0$ при $t < t_{кр}$ – сверхпроводниковые материалы (многокомпонентные сплавы).

Классификация веществ по магнитным свойствам

$$\mu = \frac{B}{H} \left[\frac{\text{Г}}{\text{М}} \right]$$

$$\mu_r = \frac{\mu}{\mu_0}$$

$$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \left[\frac{\text{Г}}{\text{М}} \right]$$

 μ

– абсолютная магнитная проницаемость;

 $B \left[\frac{\text{Вб}}{\text{М}^2} \right]$

– магнитная индукция;

 $H \left[\frac{\text{А}}{\text{М}} \right]$

– напряжённость магнитного поля;

 μ_r

– относительная магнитная проницаемость;

 μ_0

– магнитная постоянная

По величине μ материалы делятся на виды

1. Диамагнетики

$$\mu < 1$$

Инертные газы, водород, органические соединения,
Cu, Zn, Au, Bi, Ga, Ag и др.

Значение μ не
зависит от напряженности
внешнего магнитного поля.

2. Парамагнетики

$$\mu > 1$$

Соли *Fe, Ni, Co*; кислород, окись азота, *Al, Pt* и др.

Значение μ не
зависит от напряженности
внешнего магнитного поля.

3. Магнитные материалы

$$\mu \gg 1$$

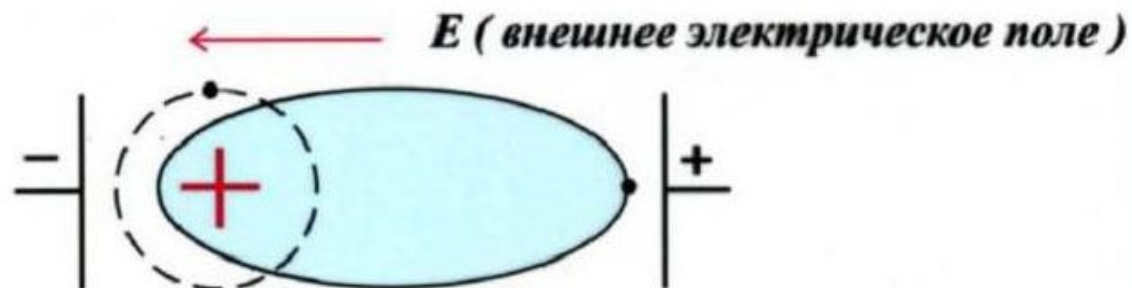
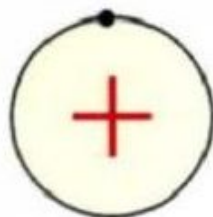
Fe, Ni, Co; сплавы на их основе; ферриты различного состава.

Значение μ
зависит от напряженности
внешнего магнитного поля.

Поляризация диэлектриков

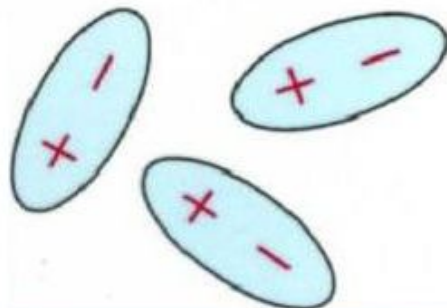
1. Ограниченное смещение связанных зарядов в неполярных диэлектриках.

Без внешнего поля

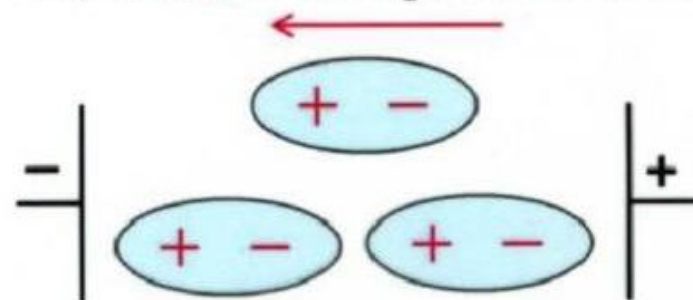


2. Ориентация диполей в полярных диэлектриках.

Без внешнего поля



E (внешнее электрическое поле)



Основные виды поляризации диэлектриков

Вид поляризации зависит от строения молекул.

I. Миграционная поляризация.



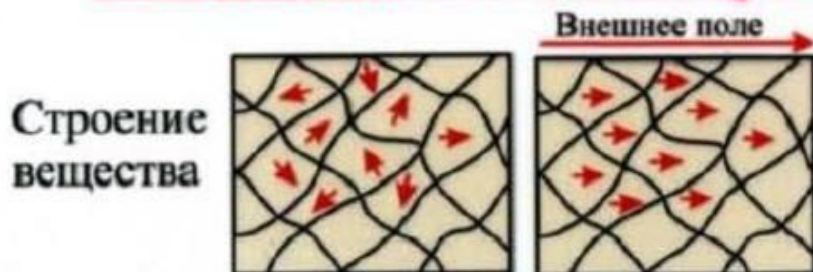
Поляризация происходит:

- 1) При низких частотах.
- 2) Со значительным рассеиванием энергии.

Она наблюдается:

В слоистых пластиках:
гетинакс, текстолит,
стеклотекстолит.

II. Спонтанная или самопроизвольная поляризация.

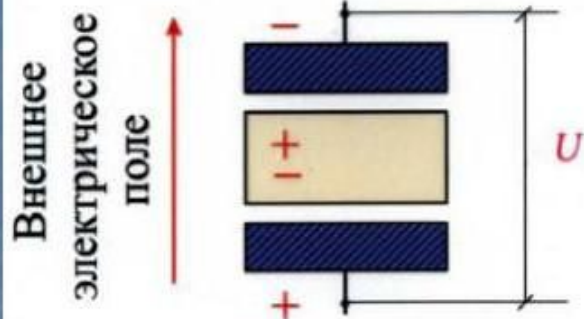


Особенности поляризации:

- 1) Домены
- 2) Очень сильное рассеяние энергии в сегнетоэлектриках



ϵ - относительная диэлектрическая проницаемость или коэффициент поляризуемости



Заряд конденсатора

$$Q = C \cdot U$$

можно представить:

$$Q = Q_0 + Q_d, \text{ где}$$

Q_0 – между обкладками вакуум;

Q_d – заряд на поверхности диэлектрика.

Во всех остальных случаях $\epsilon > 1$

ϵ воздуха = 1,00058

$$\epsilon_a = \epsilon_0 \epsilon, \text{ где}$$

ϵ_a – абсолютная

диэлектрическая проницаемость;

ϵ_0 – электрическая постоянная,

$$\epsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12} \text{ Ф/м};$$

ϵ – относительная диэлектрическая проницаемость;

ϵ – определяет интенсивность процесса поляризации

$$\epsilon = \frac{Q}{Q_0} = \frac{Q_0 + Q_d}{Q_0} = 1 + \frac{Q_d}{Q_0}$$

ϵ – относительная диэлектрическая проницаемость

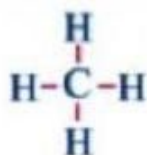
$\epsilon = 1$ – только в случае вакуума

$$\epsilon = \frac{Q}{Q_0} = 1$$

Диэлектрическая проницаемость

строение вещества

Вещество состоит
из неполярных
молекул

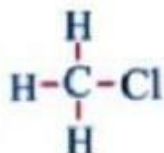


мгновенная
поляризация



$$\epsilon = 1,8 \div 2,5$$

Вещество состоит
из полярных молекул

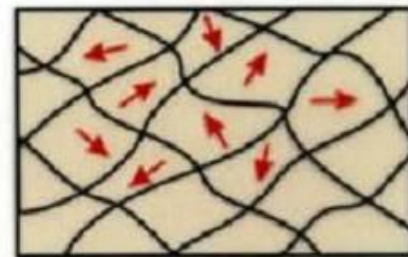


замедленная
поляризация
(релаксационная)



$$\epsilon = 3 \div 7$$

Доменная структура



спонтанная (само-
произвольная)
поляризация



$$\epsilon = 500 \div 1000$$

Диэлектрическая проницаемость

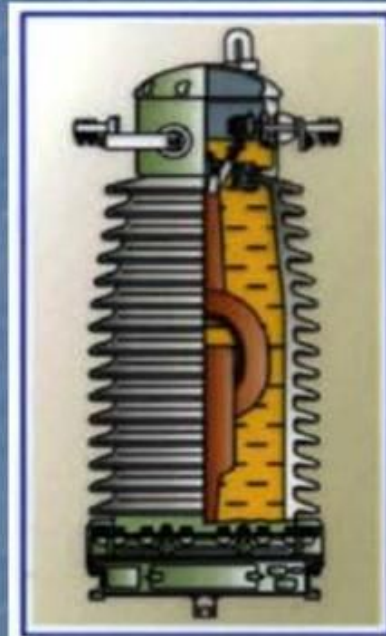
Величина ёмкости
конденсатора

$$C = \frac{\epsilon \epsilon_0 \cdot S}{d} [\text{Ф}], \text{ где}$$

S – площадь электродов;
 d – толщина диэлектрика.



Конденсатор



Кабель с ПВХ изоляцией



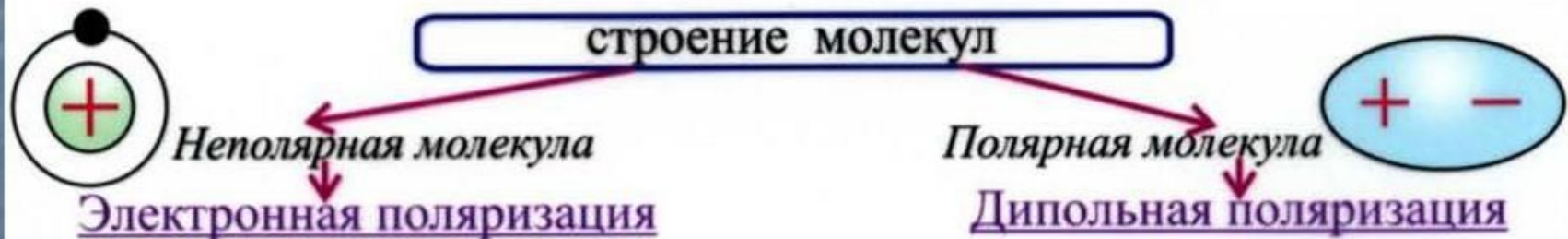
Стекло



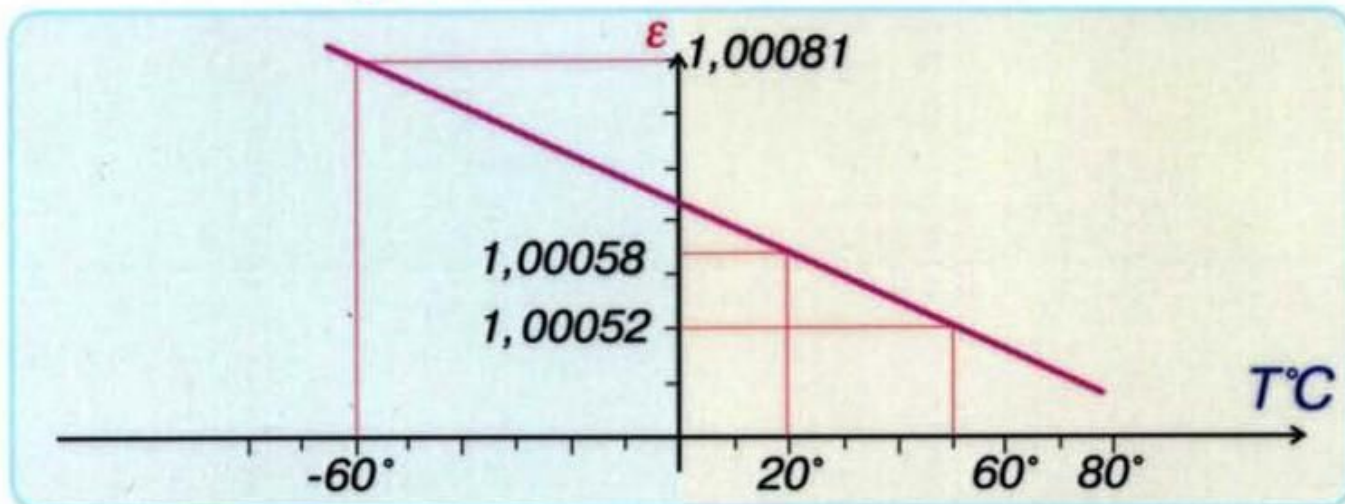
Фарфор

Диэлектрическая проницаемость газов

$$\epsilon_{\text{водорода}} = 1,00027$$



Зависимость $\epsilon = f(T)$ для воздуха при постоянном давлении .

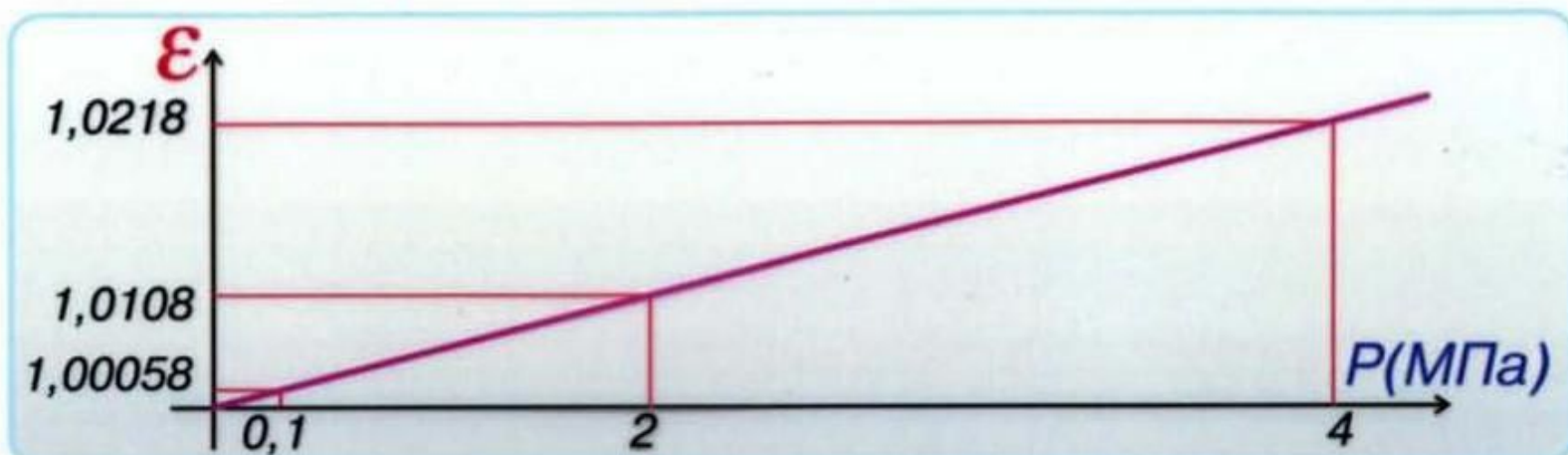


Диэлектрическая проницаемость газов

Температурный коэффициент диэлектрической проницаемости

$$\text{TK}_\epsilon = \frac{1}{\epsilon} \frac{d\epsilon}{dt}$$

Зависимость $\epsilon = f(P)$ для воздуха при нормальной температуре.



Диэлектрическая проницаемость жидких диэлектриков

$$\epsilon \gg 1$$

, т.к. плотность жидкости ρ_0 большая величина.

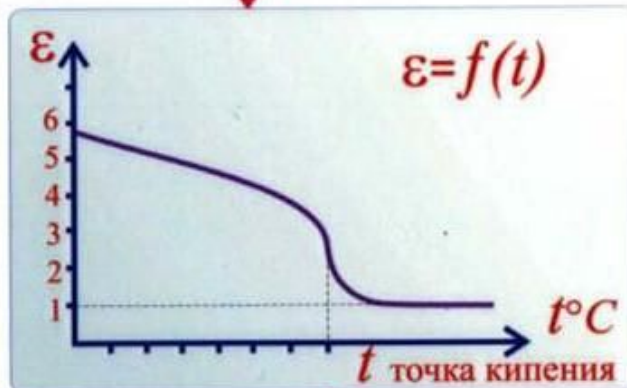
строение молекул

неполярные молекулы
(трансформаторное
масло)

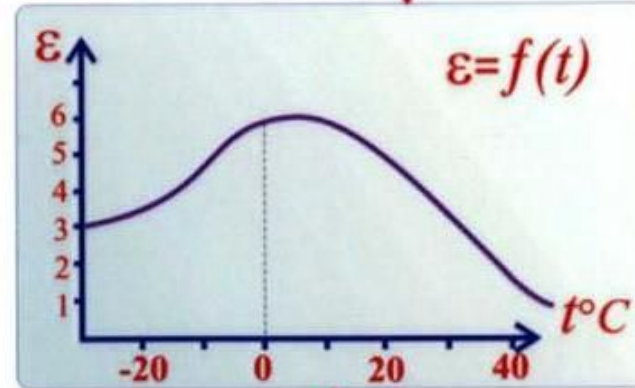
$$\epsilon = 2,1 \div 2,5$$

полярные молекулы
(совол)

$$\epsilon = 3,5 \div 5$$



Поляризация – электронная



Поляризации – электронная
и дипольная

Диэлектрическая проницаемость жидких диэлектриков

$$\epsilon \gg 1$$

, т.к. плотность жидкости ρ_0 большая величина.

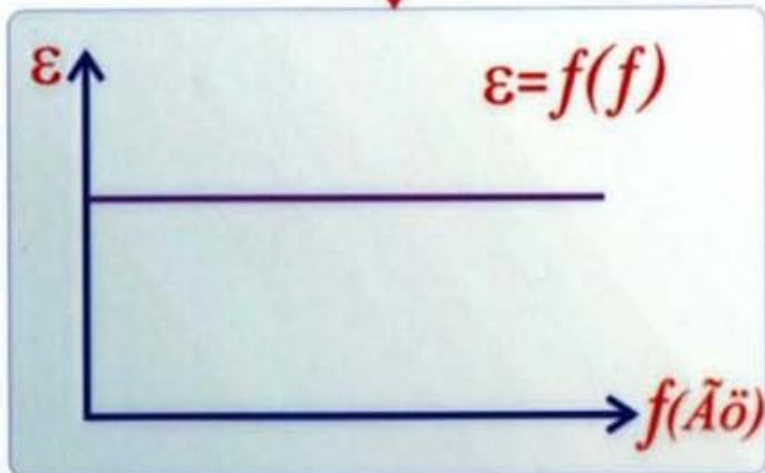
строение молекул

неполярные молекулы
(трансформаторное
масло)

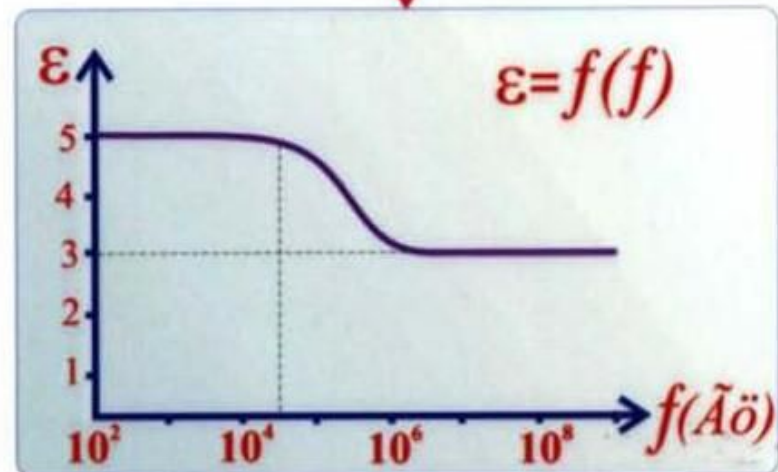
$$\epsilon = 2,1 \div 2,5$$

полярные молекулы
(совол)

$$\epsilon = 3,5 \div 5$$



Эти диэлектрики применяются на всех частотах



Эти диэлектрики применяются на низких частотах

Диэлектрическая проницаемость твердых диэлектриков

22

ϵ – имеет самые различные значения

строение молекул

неполярные молекулы

$$\epsilon = 1,9 \div 6$$

(полистирол, парафин,
алмаз)

полярные молекулы

$$\epsilon = 4 \div 10$$

(целлюлоза, полимеры)

строение молекул

ионные кристаллы
с плотной упаковкой
частиц $\epsilon = 6 \div 150$

(кварц, слюда, корунд)

электронная и ионная
поляризации

ионные кристаллы
с неплотной упаковкой
частиц $\epsilon = 4 \div 10$

(электротехнический
фарфор)

электронная, ионная и
ионно - релаксационная
поляризации

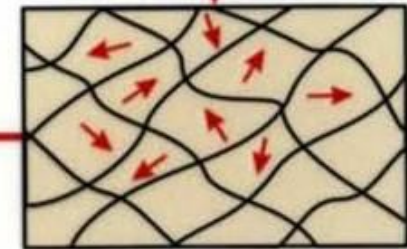
Диэлектрическая проницаемость твердых диэлектриков

сегнетоэлектрики (титанат бария)

строение молекул



$$\epsilon = 500 \div 9000$$



доменная структура

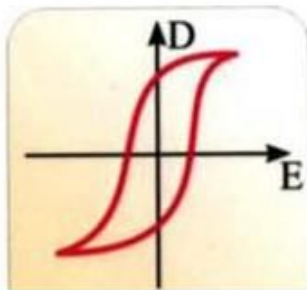
① Самопроизвольная поляризация

② $D = f(E)$

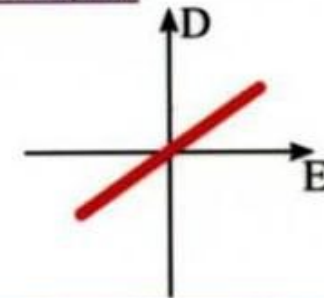
Диэлектрический гистерезис

$$D = \epsilon E$$

D – электрическое смещение



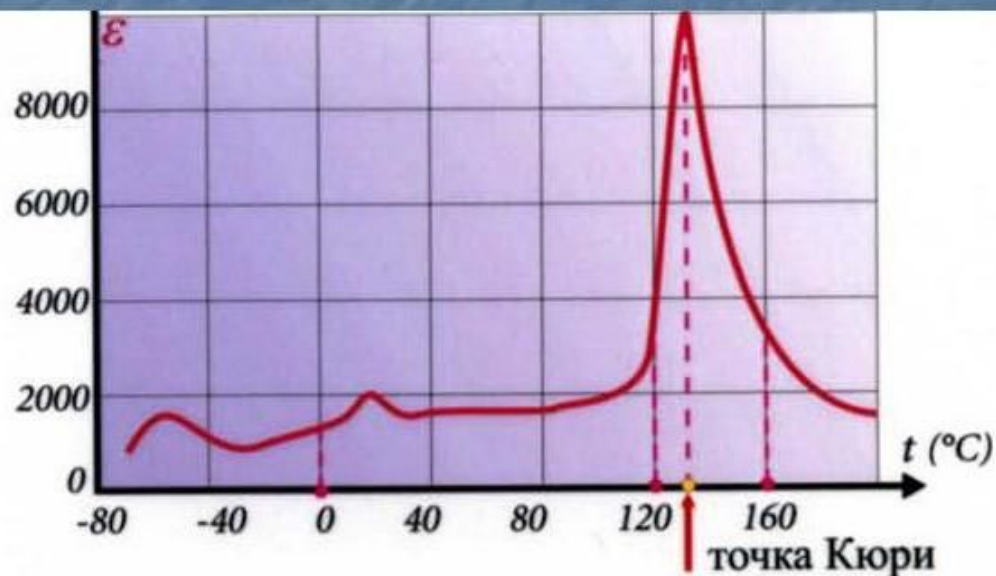
у сегнетоэлектриков



у всех диэлектриков

Диэлектрики

Диэлектрическая проницаемость твердых диэлектриков

③ $\epsilon = f(t)$ ④ $\epsilon = f(E)$ ⑤ Явление электрического старения

Электропроводность

I. Сквозные токи или токи утечки возникают из-за небольшого количества свободных зарядов.

ТОКИ СМЕЩЕНИЯ**Мгновенная поляризация**

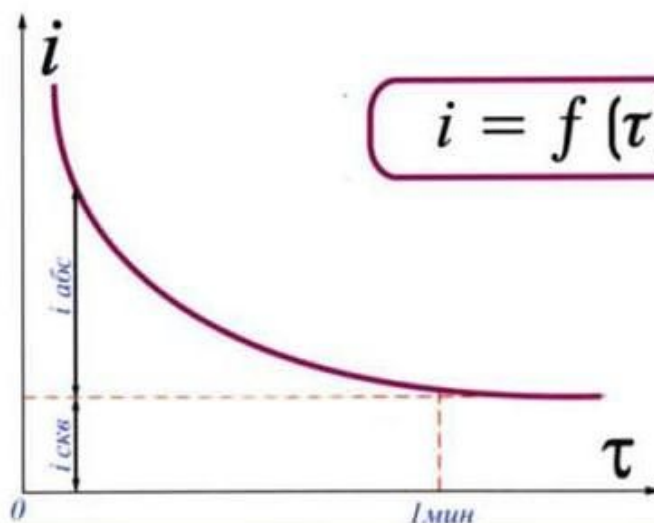
(электронная и ионная)

Токи малые и кратковременные

Замедленная поляризация

(релаксационная)

Токи большие – абсорбционные токи



$$i = f(\tau)$$

Через диэлектрик протекает

$$i = i_{\text{скв}} + i_{\text{абс}}$$

τ – время

Электропроводность

II. Поляризационные токи или токи смещения возникают из-за наличия поляризации.

Электропроводность диэлектриков носит ионный характер

строение вещества

```
graph TD; A[строение вещества] --> B[неполярные вещества]; A --> C[полярные вещества]; B --- D[Электропроводность обусловлена проводящими примесями]; C --- E[Электропроводность обусловлена слабо-связанными ионами диэлектрика];
```

неполярные вещества

Электропроводность

обусловлена

проводящими примесями

полярные вещества

Электропроводность

обусловлена слабо-

связанными ионами диэлектрика

Электропроводность газов

Ток в газе возникает при его ионизации.

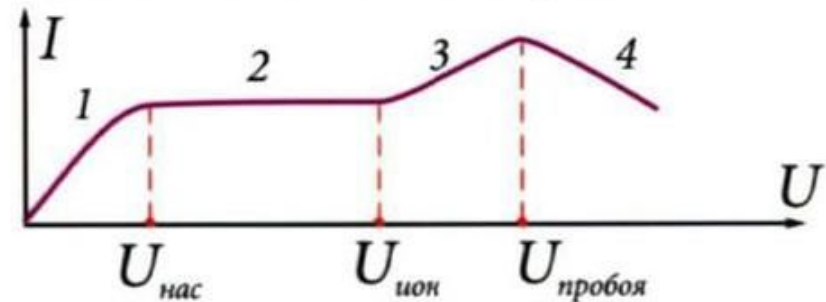
Ток в газе – это разряд в газе.

Разряды в газе

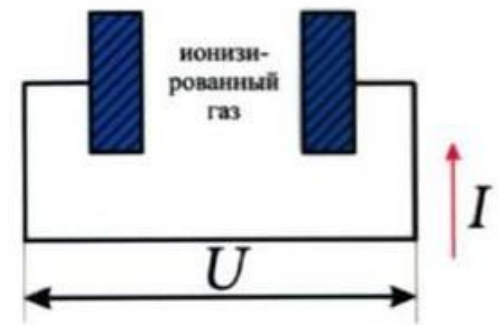
- 1. Несамостоятельный – при внешних факторах (рентгеновские лучи, термическое воздействие и т.д.).
- 2. Самостоятельный – только под действием приложенного напряжения.

$$I = f(U) \text{ для ионизированного газа}$$

Зависимость тока в газе от напряжения



1 - 2 - 3 – несамостоятельный разряд;
 4 – самостоятельный разряд



РУ с воздушными выключателями

Электропроводность жидкостей

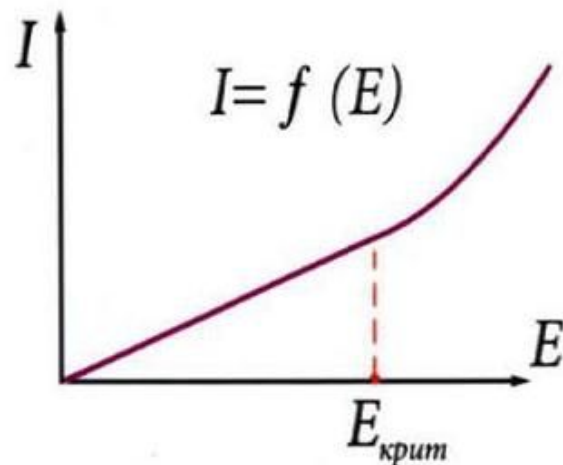


Трансформатор и аппаратура с трансформаторным маслом

Электропроводность имеет ионный характер.

строение молекул жидкости

нполярные и слабополярные	полярные	сильнополярные	коллоидные системы
электропроводность			
<u>Примесная</u> (трансформаторное масло)	<u>Собственная</u> (свол)	<u>Проводники с ионной электропроводностью</u> (этиловый спирт)	<u>Электрофоретическая</u> (органические жидкости со смолами)



Тока насыщения не наблюдается

Степень диссоциации молекул зависит от ϵ :
чем больше ϵ , тем выше электропроводность

Электропроводность увеличивается с повышением температуры

Электропроводность твердых тел

I. Электронная (при сильных электрических полях).

II. Ионная.

структура вещества

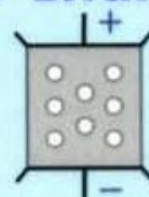
неполярные вещества

электропроводность обусловлена
ионами примесей
(малые значения)

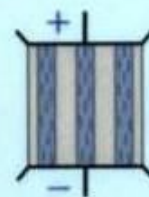
полярные вещества

электропроводность обусловлена
ионами самого диэлектрика
(небольшие значения)

Влияние влаги



неполярные –
влаги почти не влияет
на электропроводность



полярные –
влаги сильно влияет
на электропроводность

От влажности зависит поверхностная электропроводность

Электропроводность твердых тел

- I. Электронная (при сильных электрических полях).
- II. Ионная.

От влажности зависит поверхностная электропроводность



Наибольшей электропроводностью обладают волокнистые и пористые материалы (дерево, мрамор, пластмассы).

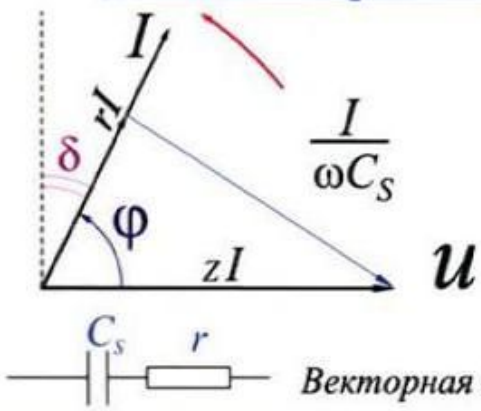
Меньшей – стекла.



Наименьшей – полистирол, янтарь, парафин.

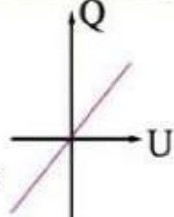
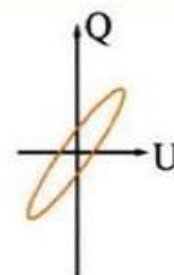



Диэлектрические потери в емкостной цепи

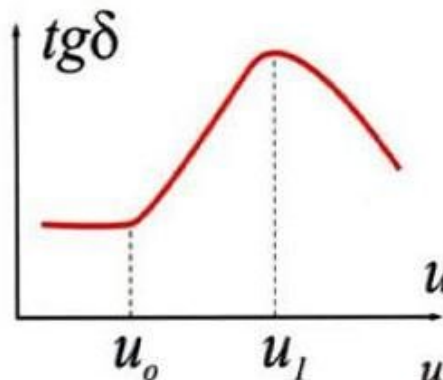


Диэлектрические потери характеризуются:

1. $P_a = U^2 \omega C \operatorname{tg} \delta$ – активной мощностью, рассматриваемой в диэлектрике
2. δ – углом диэлектрических потерь
3. $\operatorname{tg} \delta$

Причины потерь	Виды диэлектриков		
<p>I. Поляризации</p> <p><u>Мгновенная</u> Q – заряд на обкладках конденсатора U – приложенное напряжение. В неполярных диэлектриках</p> 	<p><u>Релаксационная</u> В дипольных жидких и твёрдых диэлектриках, в диэлектриках с неплотной упаковкой ионов</p> 	<p><u>Спонтанная</u> В сегнетоэлектриках</p> 	
<p>II. Сквозная электропроводность</p>	<p>В жидких и твёрдых диэлектриках с большими значениями γ_v и γ_s</p>		
<p>III. Ионизация газа</p>	<p>В газообразных диэлектриках и в диэлектриках с газовыми включениями</p>		
<p>VI. Неоднородность структуры</p>	<p>В диэлектриках с неоднородной структурой</p>		

Диэлектрические потери в газах



Источник потерь – электропроводность.

Изменение $\text{tg } \delta$ в зависимости от напряжения для изолятора с воздушными включениями.

U Кривая ионизации – $\text{tg } \delta = f(U)$,

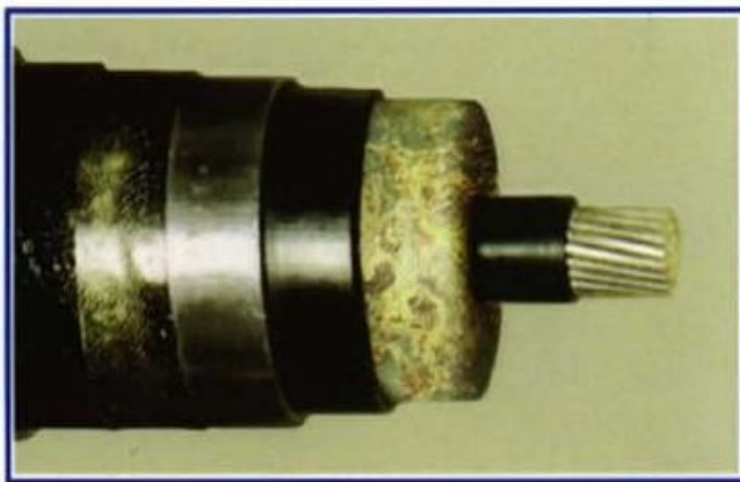
U_0 – начало ионизации; U_1 – ионизированный газ

Ионизация воздуха вызывает:

1) образование озона и окислов азота.
(результат – химическое разложение органической изоляции);

2) явление короны

(результат – потери на ионизацию воздуха у поверхности ЛЭП, что снижает КПД ЛЭП)



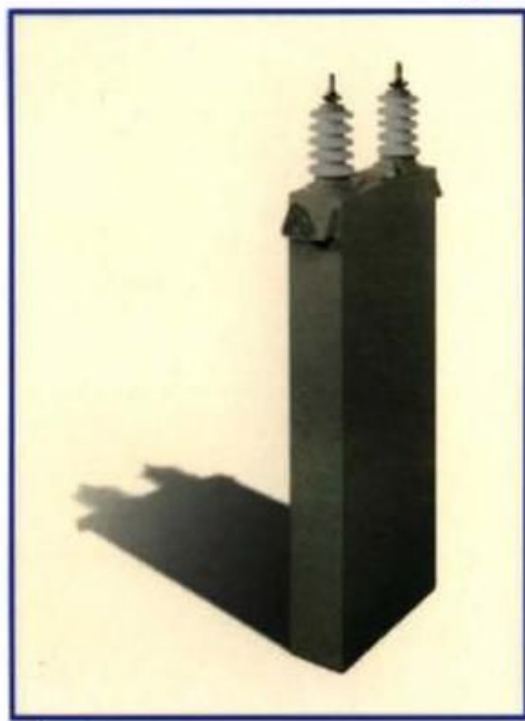
Диэлектрические потери в жидких диэлектриках

строение молекул

неполярные – $\operatorname{tg} \delta$ малый

Причина – электропроводность

(конденсаторное масло – $\operatorname{tg} \delta = 0,001$)

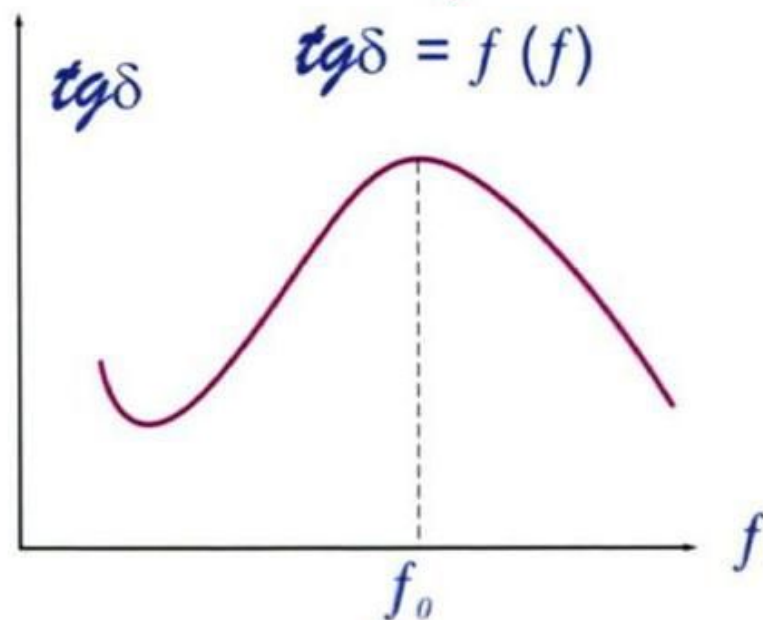


Конденсатор

полярные – $\operatorname{tg} \delta$ большой

Причина – электропроводность и дипольно –
релаксационная поляризация

(совол – $\operatorname{tg} \delta = 0,02$)



f – частота приложенного напряжения

Пробой диэлектриков

Пробоем диэлектриков или нарушением его электрической прочности называется потеря им свойств электроизоляционного материала под действием электрического поля.

$$U_{np} [\text{кВ}]$$

– напряжение пробоя, при котором происходит пробой диэлектрика;

$$E_{np} [\text{кВ/м}]$$

$$E_{np} = U_{np} / h$$

– электрическая прочность (напряженность электрического поля), при которой происходит пробой диэлектрика;

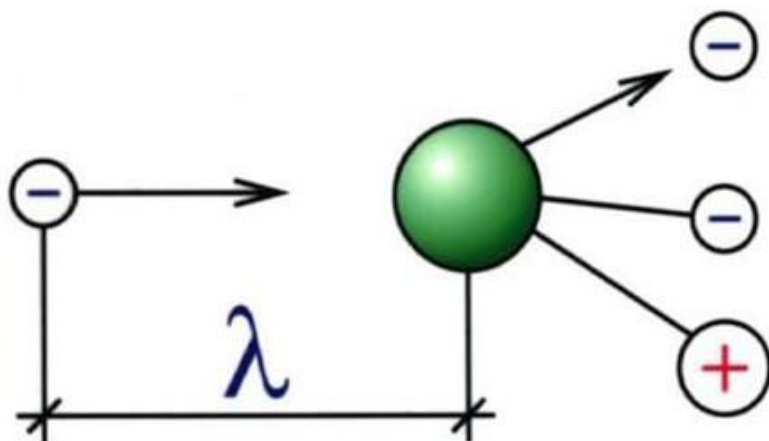
$$h [\text{м}]$$

– толщина диэлектрика (для конструкции с однородным полем).

Пробой газов

Воздух – элемент изоляции ЛЭП и оборудования подстанций.

Пробой газов обусловлен явлением ударной ионизации, т.е. расщеплением нейтральных молекул электронами, которые разгоняются полем.



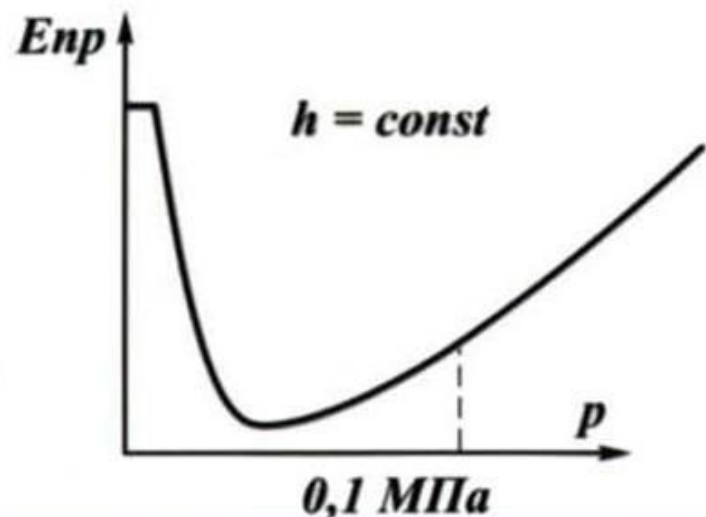
Расщепление нейтральной молекулы (ударная ионизация)



λ – длина свободного пробега частицы, т.е. среднее расстояние, пройденное заряженной частицей без столкновений.

Пробой газа совершается практически мгновенно, и это явление чисто электрическое. Поэтому все численные данные по пробую газа относятся к максимальным (амплитудным) значениям напряжения.

Электрическая прочность газа зависит от его плотности, т.е. от давления



Высокую $E_{пр}$ при больших давлениях используют в воздушных высоковольтных выключателях.

Большую $E_{пр}$ вакуума используют для изготовления вакуумных выключателей, конденсаторов.

В электрическом поле заряженная частица приобретает дополнительную энергию — W

$$W = q \cdot U_{\lambda}, \text{ где } q \text{ — заряд частицы,}$$

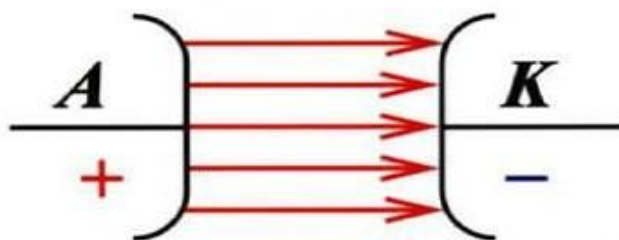
U_{λ} — падение напряжения на длине свободного пробега — λ

Пробой газа в однородном поле

В однородном поле E – величина постоянная

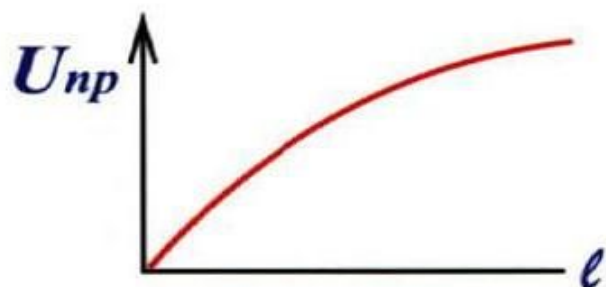
Однородное поле можно получить:

1) *между плоскими электродами с закругленными краями;*

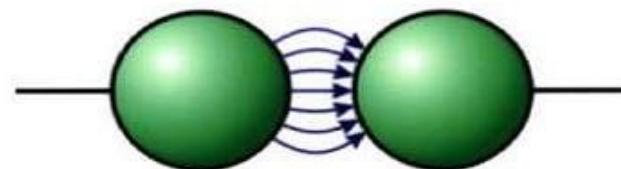


Зависимость $U_{пр} = f(\ell)$

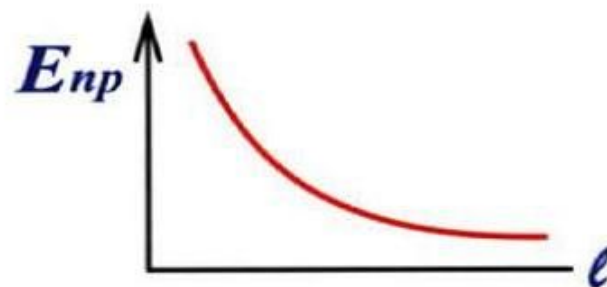
ℓ – расстояние между электродами



2) *между шарами большого диаметра при малом расстоянии между ними.*



Зависимость $E_{пр} = f(\ell)$



Особенность пробоя при однородном поле – возникновение искры, которая может перейти в дугу.

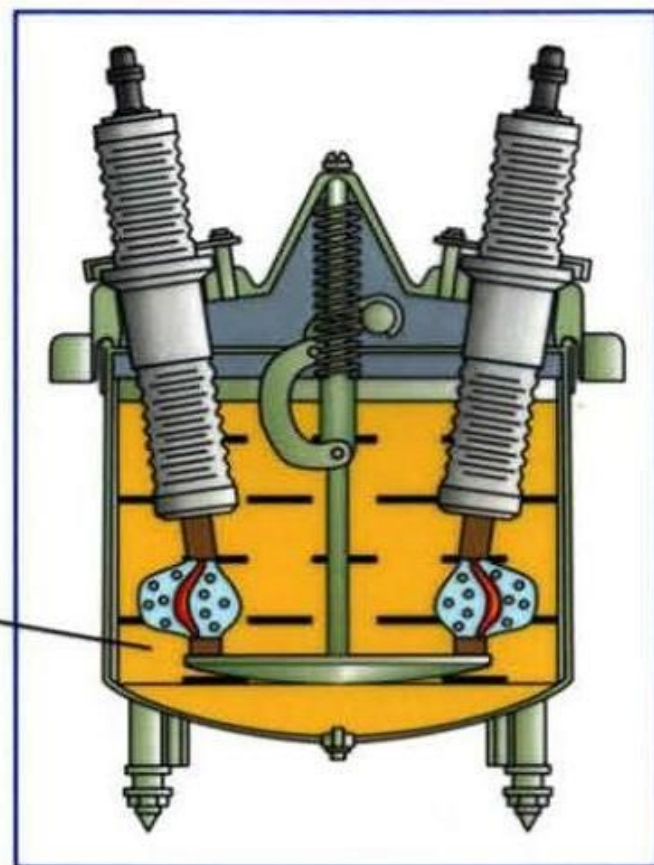
Пробой жидких диэлектриков

Наличие примесей способствует пробоем.

Три теории пробоя

I. Для максимально очищенных от примесей жидкостей.

Причина – вырывание электронов из электродов: электроны производят ударную ионизацию.



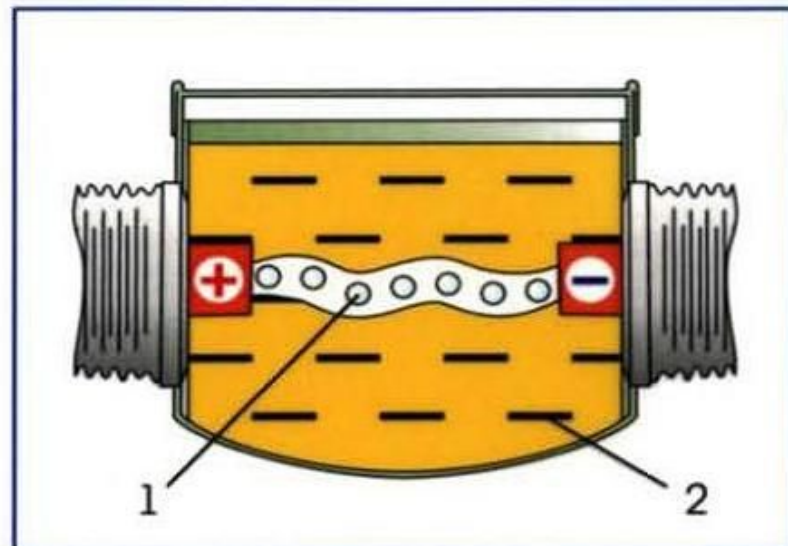
Трансформаторное масло

Масляный баковый выключатель

II. Для жидкостей с пузырьками газа.

Газ в пузырьках ионизируется, образуется газовый канал.

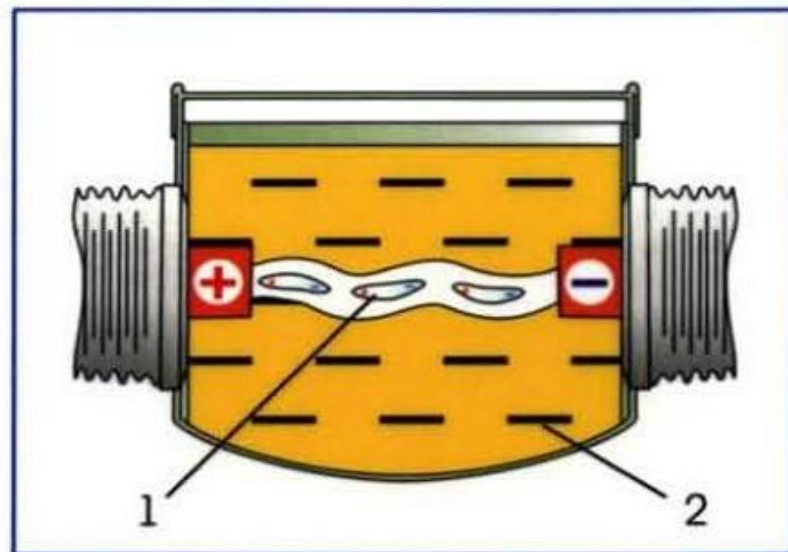
*1 – пузырьки газов;
2 – трансформаторное масло*



III. Для жидкостей с водой.

Вода – полярное вещество. Вода поляризуется, создает цепочки с повышенной проводимостью.

*1 – вода;
2 – трансформаторное масло*



Пробой твердых диэлектриков

I. Пробой в макроскопических однородных диэлектриках
(органических полимерах).

Причина пробоя – ударная ионизация электронами.

пробой по поверхности



II. Пробой в неоднородных диэлектриках, содержащих газовые включения.

Причина – ионизация газа. С увеличением толщины диэлектрика усиливается неоднородность структуры и снижается $E_{пр}$.



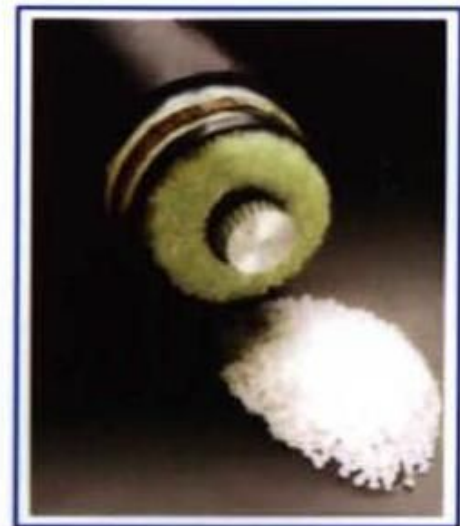
III. *Электротепловой пробой.*

Причина – возрастание электропроводности или диэлектрических потерь.



IV. *Электрохимический пробой.*

Причина – развитие электролитических процессов из-за ионизации воздушных включений.

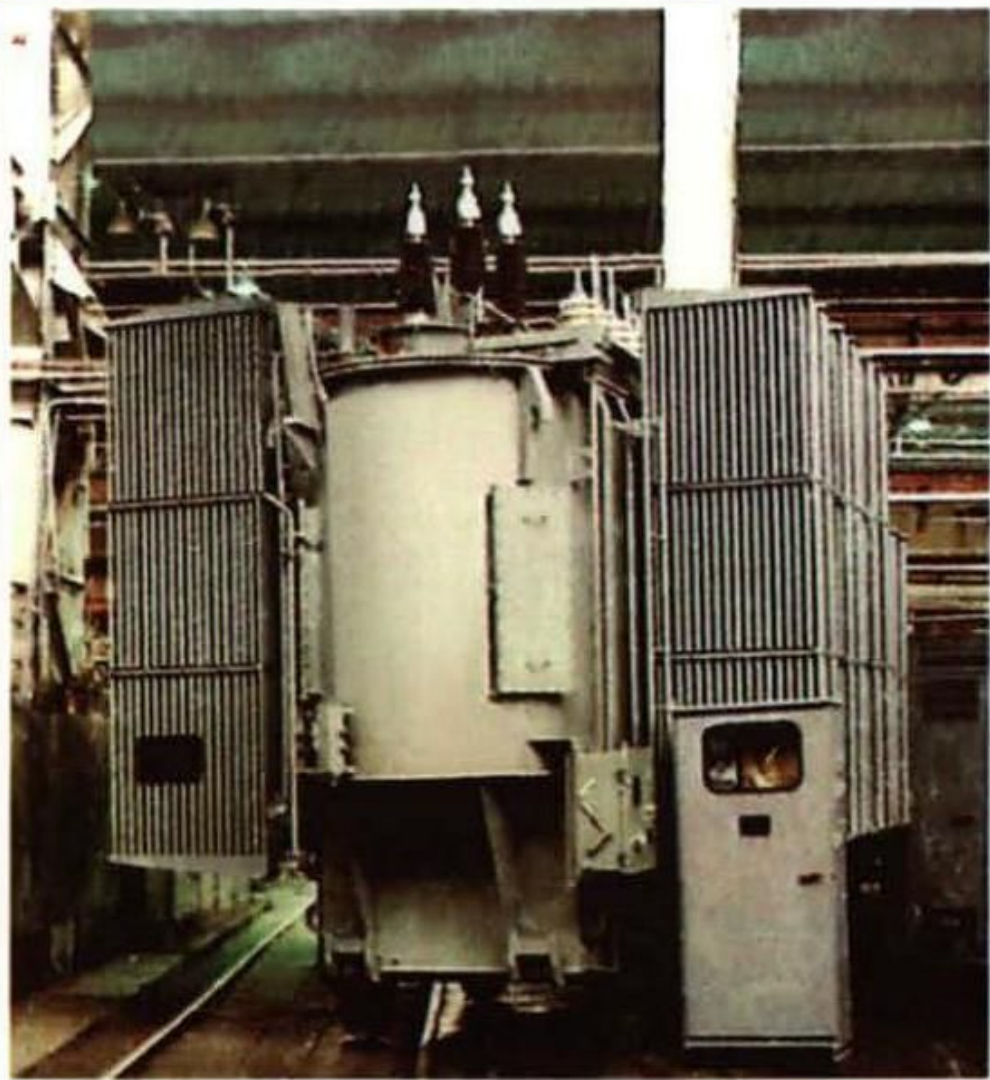


Газообразные диэлектрики



Воздушный выключатель

1. Воздух
при малых
напряженностях
электрического
поля – хороший
диэлектрик (ЛЭП).
Применение:
высоковольтные
выключатели с
давлением $2 \div 12$ МПа.



2. Азот N_2

$E_{пр\text{ воздуха}} = E_{прN_2}$,
но с азотом нет
окисления.

Применение: силовые
трансформаторы с
азотной подушкой,
газовые конденсаторы.

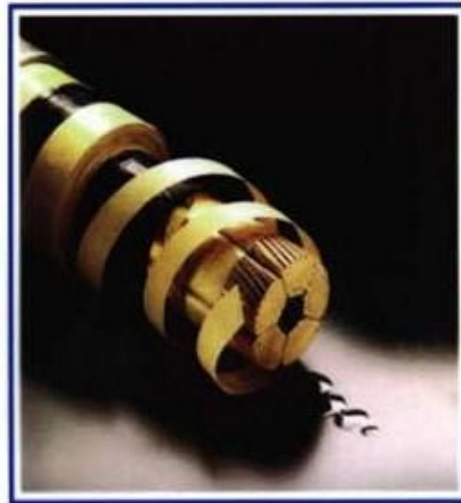
Силовой трансформатор

Жидкие диэлектрики

I. Нефтяные электроизоляционные масла.



Трансформаторное масло – применяется для заливки трансформаторов, масляных высоковольтных выключателей, маслonaполненных вводов, реакторов, реостатов и других аппаратов.



Кабельное масло – применяется в производстве силовых электрических кабелей



Конденсаторное масло – применяется для пропитки бумажных конденсаторов.

Жидкие диэлектрики

II. Синтетические жидкие диэлектрики.

1. Трихлордифенил $C_{12}H_{10-n}Cl_n$ – хлорированные углеводороды.

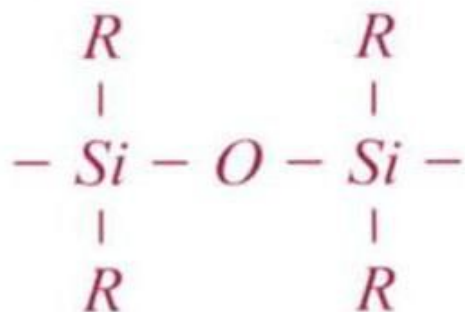
Например:

а) совол $C_{12}H_5Cl_5$ – применяется для пропитки конденсаторов.

б) гексол 20% $C_{12}H_5Cl_{5n}$ – применяется для заливки трансформаторов.
80% C_4Cl_6

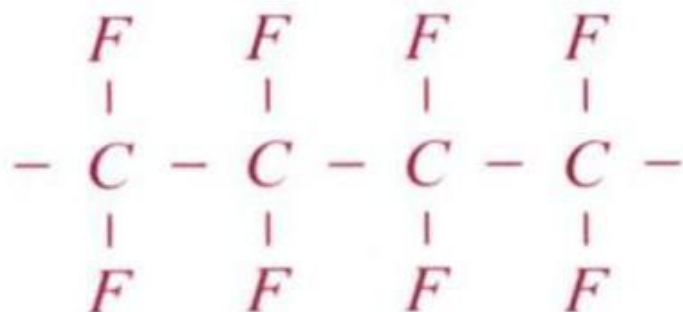
ЭТИ ЖИДКОСТИ ТОКСИЧНЫ

2. Кремнийорганические соединения (полиорганосилоксаны) –



применяются в импульсных трансформаторах, специальных конденсаторах, в электронной аппаратуре.

3. Фторорганические соединения (хладон) –



– применяются в качестве хладоагентов в небольших трансформаторах, блоках электронного оборудования (создание испарительного охлаждения в силовых трансформаторах).

Смолы

Смолы – это высокомолекулярные органические вещества.

I. Природные: шеллак, канифоль, янтарь.

Применение: изготовление лаков и компаундов.

II. Синтетические:

1. Полимеры, получаемые полимеризацией:

а) линейные неполярные полимеры – $\epsilon = 1,9 \div 2,6 :$



Полиэтилен

Применение:
изоляция кабелей

{
полиэтилен – $(C_2 H_4)_n$;
полипропилен – $(C_3 H_6)_n$;
полиизобутилен – $(C_4 H_8)_n$;

Диэлектрики



Полистирол ($C_8 H_8$) и
 применение:
 плёнки, добавки
 к лакам, изоляция проводов;



Политетрафторэтилен (ПТФР)
 применение:
 изоляция проводов, кабелей,
 конденсаторов, трансформаторов;

б) линейные полярные полимеры – $\epsilon = 3 \div 6$:



поливинилхлорид (ПВХ) ($C_2 H_3 Cl$)_n и
винипласт – ПВХ без пластификатора

Применение: пластмассы, изоляция кабелей, дугогасящий материал.

Бумага и картон

Кабельная бумага



Основы – целлюлоза марки К, КМ, КВУ. Применение: изоляция кабелей, обмоточных проводов трансформаторов.

Кабель

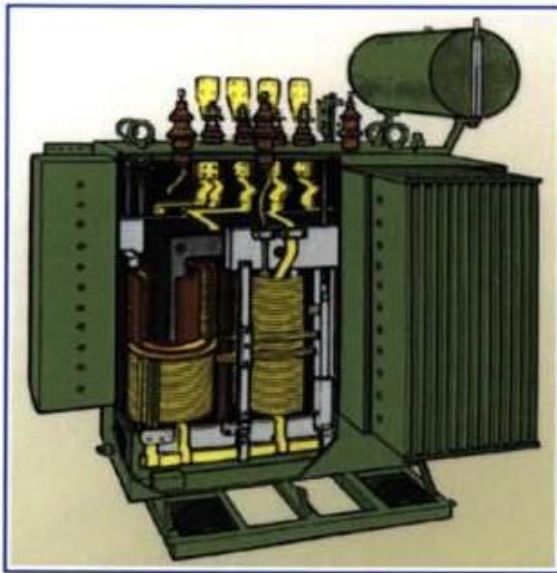
Конденсаторная бумага



Марки: КОН, СКОН, МКОН. СКОН обладает высокой электрической прочностью и малыми потерями.

Конденсаторы

Диэлектрики

*Трансформатор**Электрокартон*

Применение:
марка АМ – основной твердый материал в силовых трансформаторах.

Природные волокна*Хлопчатобумажные ленты*

Применение:
изоляция кабелей, обмоточных проводов, изоляция электрических машин и аппаратов.

Преобразовательный трансформатор

Стекла – аморфные тела

Установочные стекла.



Применение:
закаленные
щелочные
стекла для

ЛЭП–35÷1150кВ, установочные детали.

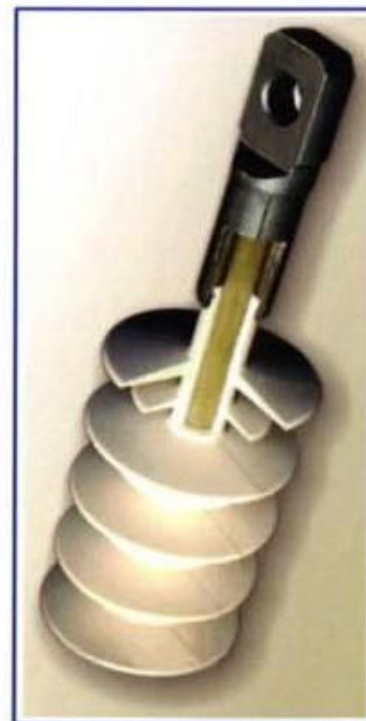


Диэлектрики**Ламповые стекла.**

Применение:
баллоны и
ножки освети-
тельных лапм,
электронные
приборы.

**Конденсаторные стекла.**

Применение:
конденсаторы,
высоковольтные
фильтры,
импульсные
генераторы.

**Стекла с
наполнителями.**

Применение:
стеклопластики,
изоляция
высоковольтных
машин.

Керамика

II. Низковольтный фарфор.

Применяется на напряжение до 35 кВ:
вводы, изоляторы.



Трансформатор ОМ – 1,25; 10 кВ.

V. Сегнетоэлектрики.

Сегнетокерамика – $BaTiO_3$ – титанат бария.



Применение: конденсаторы для
усилителей, модуляторов;
вычислительная техника.

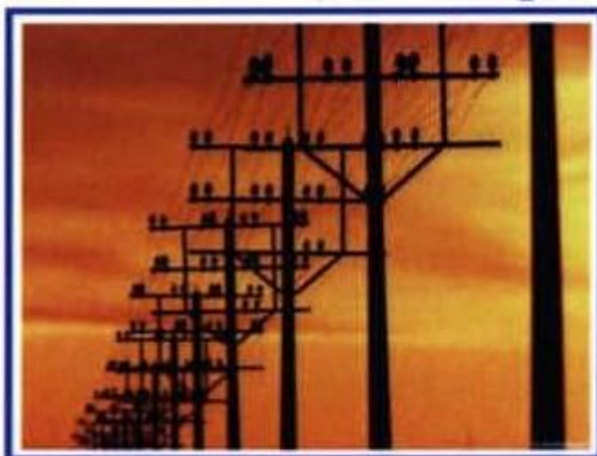
1. Стационарные изоляторы.



Высоковольтные выключатели

Применение: вводы, опорные и проходные изоляторы.

2. Линейные изоляторы для ЛЭП.

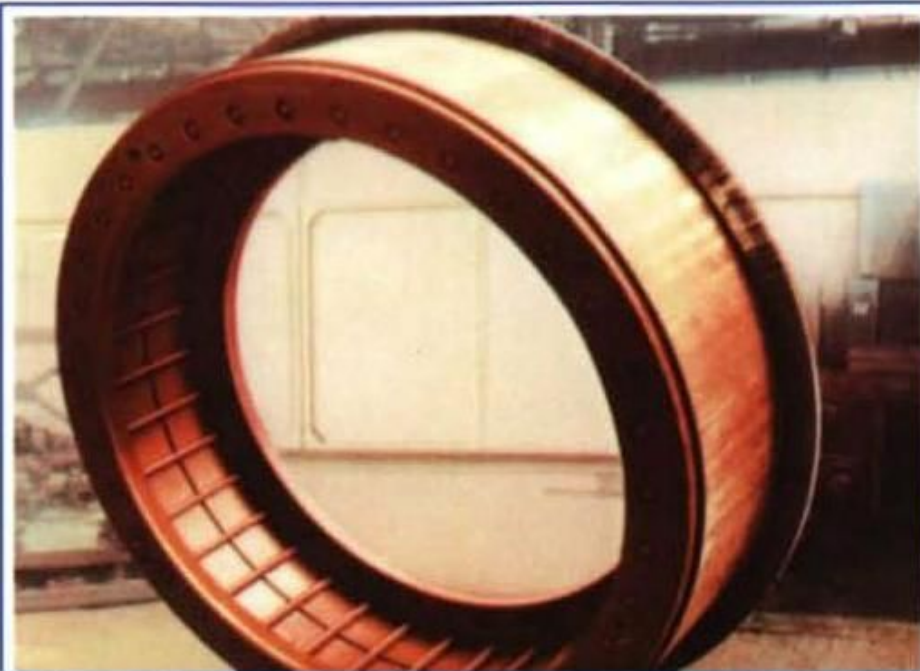


ЛЭП

Применение: подвесные и штыревые изоляторы.

Слюдяные материалы

Миканиты – слюда, склеенная лаком или смолой.



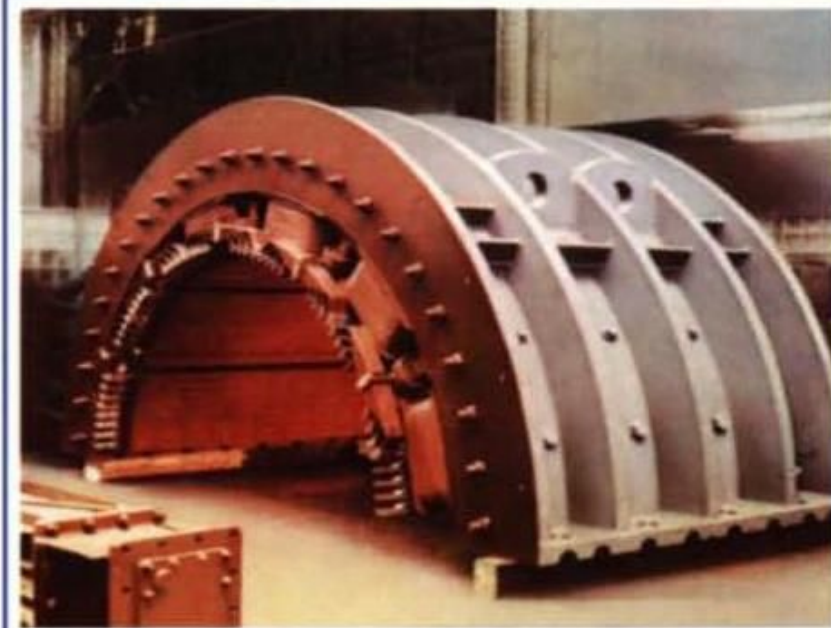
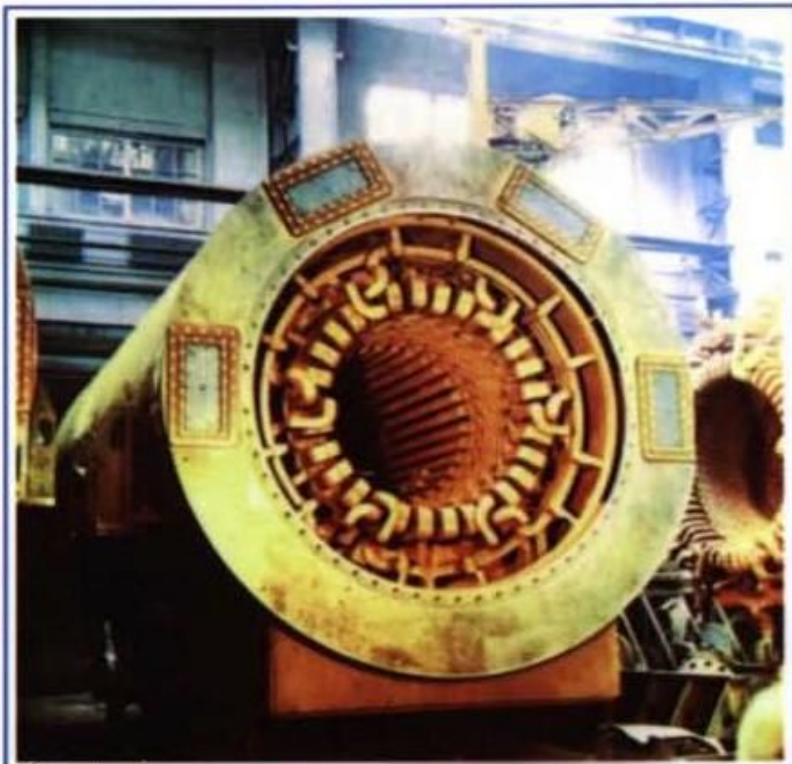
Коллекторные, прокладочные миканиты изготавливают в виде штампованных заготовок, прокладок, шайб.

Коллектор крупного электродвигателя

Диэлектрики

Гибкие миканиты

применяются для изоляции частей электрических машин и аппаратов (гибкие прокладки, обмотка секций, пазовая изоляция).

**Формовочные миканиты**

применяются для изготовления коллекторных манжет (изоляция коллектора от вала электрических машин), фланцев, каркасов катушек, трубок.

Микалекс –

это пластическая масса слюды и легкоплавкого стекла.

Применение: держатели мощных ламп, гребенки катушек индуктивности, платы.



Синтетическая слюда

Фторфлогопит

Рабочая температура от -200 до $+800^{\circ}\text{C}$.

Высокие электроизоляционные свойства.

Применение: штамповочные детали.

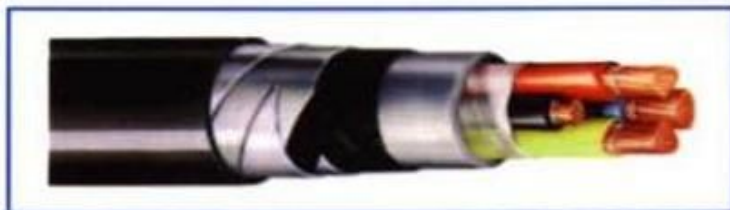
I Материалы высокой проводимости

1. Серебро – Ag.



Применение: радиочастотные кабели, электроды конденсаторов, контакты.

2. Медь – Cu.



Применение: жилы кабелей, обмоточные и монтажные провода.

3. Золото – Au.



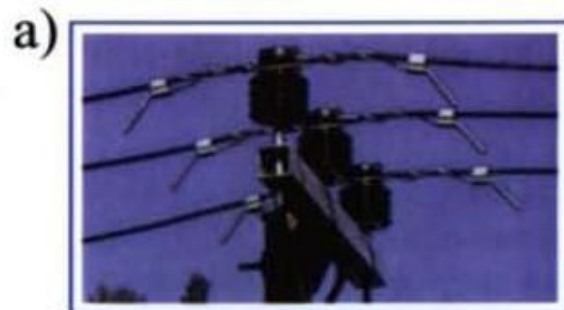
Применение: контакты, электроды, фотоэлементы.

4. Алюминий – Al.



Применение: жилы кабелей, монтажные, установочные провода, провода для ЛЭП.

5. Железо – Fe.



Применение: провода для ЛЭП небольшой мощности.



Al
Сталь



Сталеалюминиевые провода применяют для ЛЭП большой мощности.



6. Металлический натрий – Na.

Применение: провода и кабели в полиэтиленовой оболочке.

II. Материалы с большим удельным сопротивлением

(использование: резисторы и нагревательные приборы).



1. Манганин.

Применение: образцовые резисторы.

Cu - 85%, Mn - 12%, Ni - 3%.

2. Константан.

Применение: реостаты и электронагревательные элементы, длительно работающие при $t = 450^{\circ} \text{C}$.

Cu - 60%, Ni - 40% .



3. Сплавы на основе железа.

Применение: электронагревательные элементы.

*Fe - Ni - Cr - нихромы;
Fe - Cr - Al - фехрالی.*



Сверхпроводники и криопроводники

Сверхпроводники – металлы и их сплавы при $t = -273^{\circ}\text{C}$



Алюминиевый провод

-Al (алюминий);

-Sn (олово);

-Pb (свинец)

Криопроводники – металлы и их сплавы при $t = -173^{\circ}\text{C}$.



Медный провод

-Al (алюминий); **-Cu** (медь); **-Be** (бериллий).

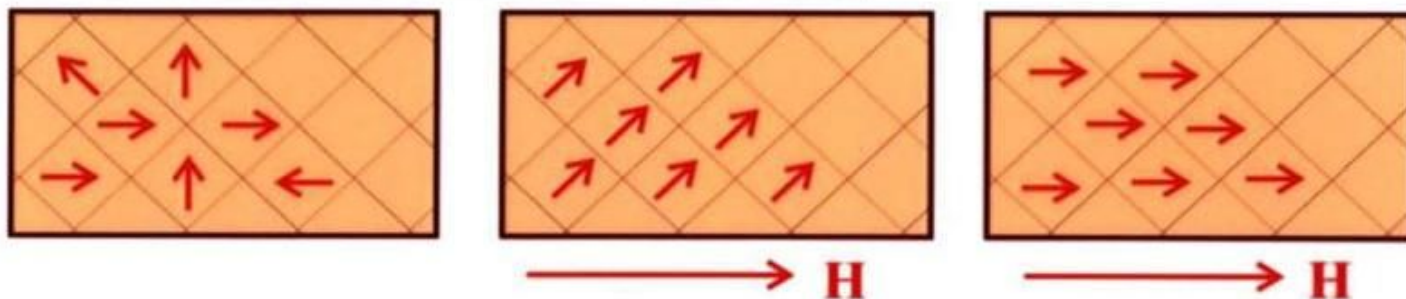
Применение: ЛЭП, передающие большие мощности, электрические машины, жилы кабелей, волноводы, трансформаторы.

Магнитные материалы

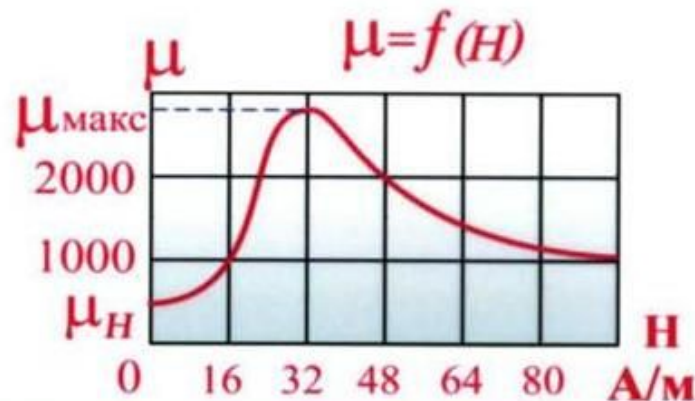
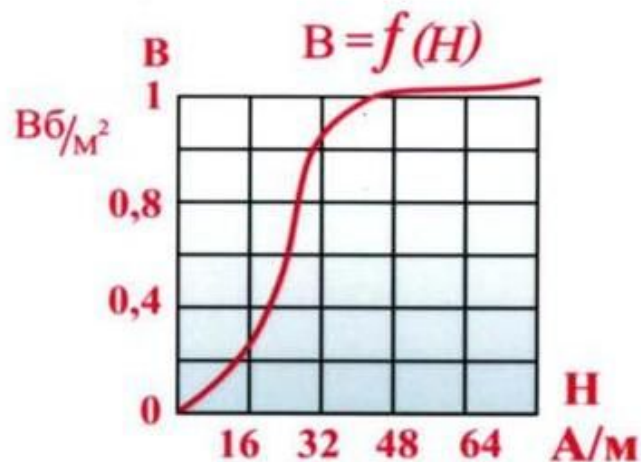
Ферромагнитные вещества: Fe, Ni, Co и их сплавы

Свойства:

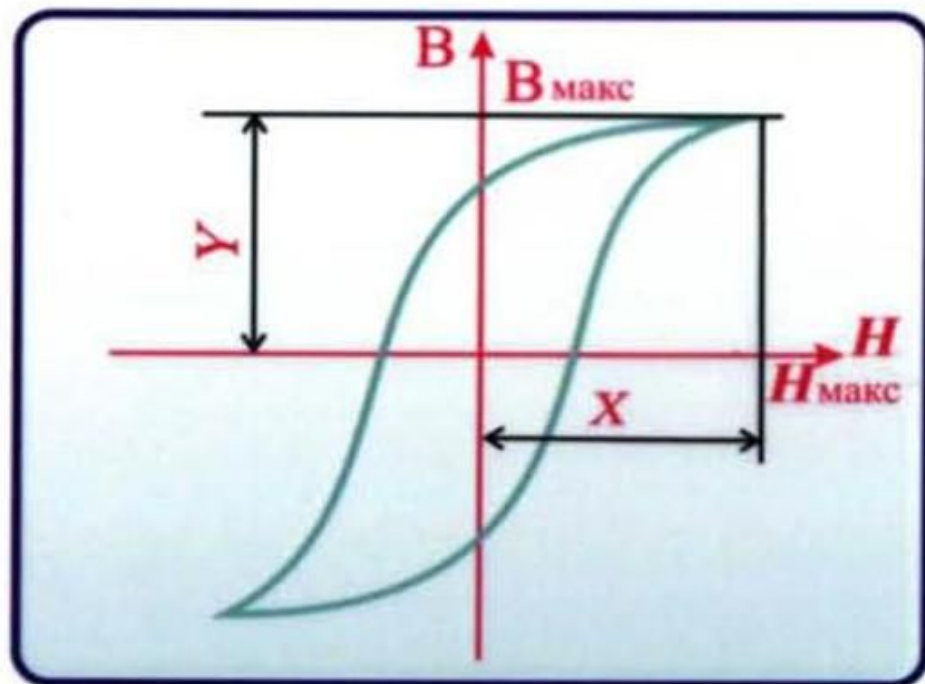
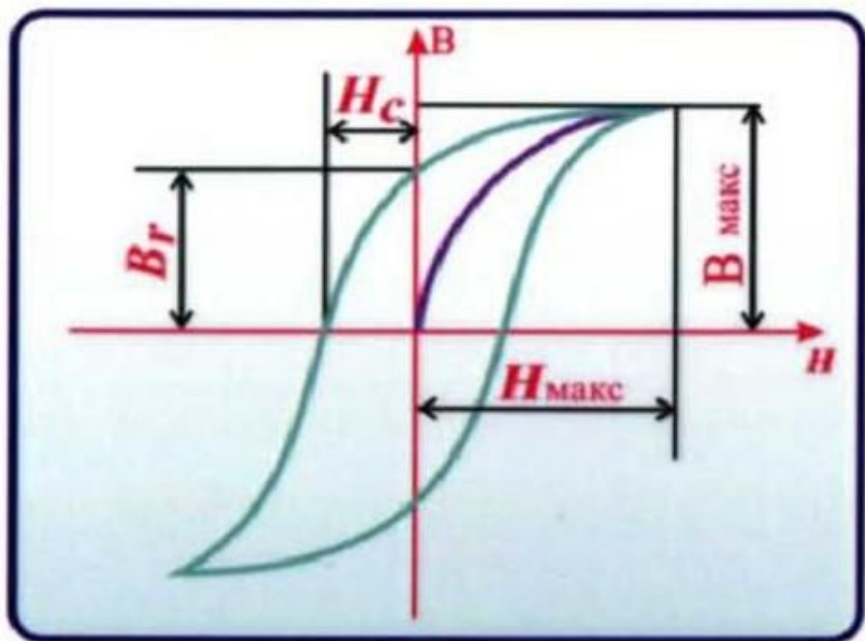
1. Спонтанное намагничивание.



2. Кривая намагничивания.



3. Явление гистерезиса.



Петля гистерезиса, снятая с экрана осциллографа

Магнитомягкие материалы

$$H_c < 760 \text{ А/м}$$

1. Электротехническая сталь.

Fe, C, Si



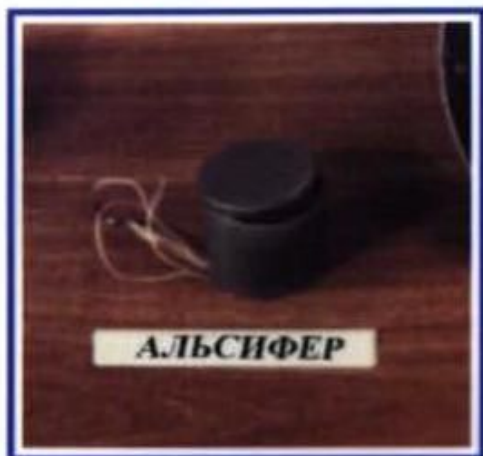
Применение:
сердечники трансформаторов,
электромагнитов, якоря и
статоры электрических машин,
измерительные приборы.

Магнитные материалы

2. Пермаллой.

Fe, C, Ni

Применение: сердечники малогабаритных силовых трансформаторов, дросселей, реле.

3. Альсифер.

Fe, C, Si, Al

Применение: магнитные экраны, корпуса приборов, пресованные сердечники из порошка.

Магнитотвердые материалы

$$H_c > 24000 \text{ А/м}$$

Применение: изготовление постоянных магнитов.

Литые сплавы	Магниты из порошков	
<i>Al - Ni - Fe</i> альни	металлокерамические сплавы	Металлопластические сплавы
<i>Al - Ni - Fe - Si</i> альнисси	<i>Cu - Ni - Co</i> <i>Cu - Ni - Fe</i> прессование и спекание при высоких температурах	<i>Cu - Ni - Co</i> <i>Cu - Ni - Fe</i> с фенолоформальдегидной смолой под давлением 500 МПа при $t = 120 \div 180^\circ\text{C}$
<i>Al - Ni - Fe - Co</i> альнико (магнико)		

Ферриты – оксиферы

$MeO \cdot Fe_2 O_3$ (Me – металл)



Применение на высоких частотах: сердечники катушек индуктивности, фильтров, трансформаторов, магнитных усилителей.



Соединение альсифера, пермаллоя с фенолоформальдегидной смолой, полистиролом, стеклом.



Применение на высоких частотах: сердечники катушек индуктивности.