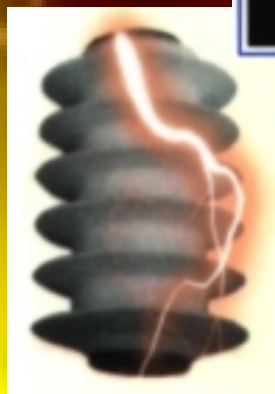


ЭЛЕКТРОМАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ



Раздел 1. Электротехнические материалы

1. Электротехнические материалы – материалы, работающие в электрическом и магнитном полях
2. Электротехнические материалы – материалы, работающие в электрическом и магнитном полях
3. Четыре агрегатных состояния вещества
4. Четыре агрегатных состояния вещества.
5. Четыре агрегатных состояния вещества.
6. Физические и химические свойства атомов
7. Физические и химические свойства атомов
8. Классификация веществ по электрическим свойствам
9. Основные электрические характеристики электротехнических материалов
10. Классификация веществ по магнитным свойствам

Раздел 2. Диэлектрики

11. Поляризация диэлектриков
12. Основные виды поляризации диэлектриков
13. Диэлектрическая проницаемость (или коэффициент поляризуемости)
14. Диэлектрическая проницаемость
15. Диэлектрическая проницаемость газов
16. Диэлектрическая проницаемость жидких диэлектриков
17. Диэлектрическая проницаемость твердых диэлектриков
18. Диэлектрическая проницаемость твердых диэлектриков
19. Электропроводность
20. Электропроводность газов
21. Электропроводность жидкостей
22. Электропроводность твердых тел
23. Диэлектрические потери в емкостной цепи
24. Диэлектрические потери в газах
25. Диэлектрические потери в жидких диэлектриках
26. Диэлектрические потери в твердых диэлектриках
27. Пробой диэлектриков
28. Пробой газов
29. Электрическая прочность
30. Пробой газа в однородном поле
31. Пробой газа в неоднородном поле
32. Пробой жидких диэлектриков
33. Пробой твердых диэлектриков
34. Газообразные диэлектрики
35. Газообразные диэлектрики
36. Газообразные диэлектрики
37. Жидкие диэлектрики
38. Жидкие диэлектрики
39. Смолы
40. Смолы
41. Волокнистые материалы
42. Волокнистые материалы
43. Асбест
44. Эластомеры
45. Стекла – аморфные тела
46. Стекловолокно, стекло
47. Керамика
48. Керамика

49. Слюдавые материалы

50. Нагревостойкий (термостойкий) миканит

Раздел 3. Проводники

51. Материалы высокой проводимости
52. Жидкие проводники
53. Материалы с большими удельными сопротивлениями
54. Сверхпроводники

Раздел 4. Магнитные материалы

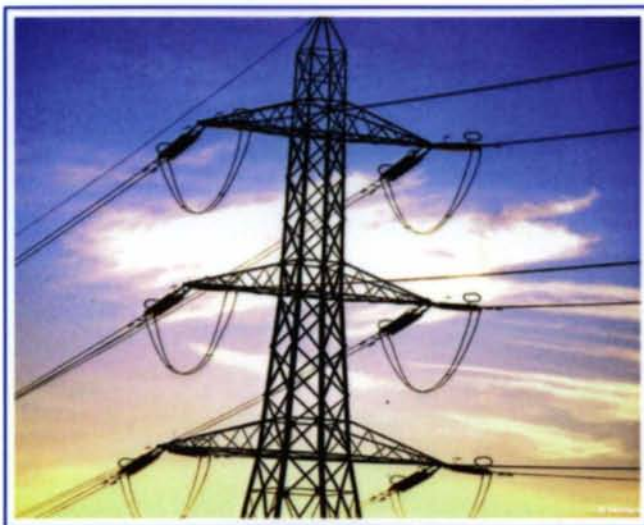
55. Магнитные материалы
56. Магнитомягкие
57. Магнитотвердые

Раздел 5. Материалы специального назначения

58. Ферриты – оксиды

Электротехнические материалы – материалы, работающие в электрическом и магнитном полях

I. Проводники.



Линия электропередач (ЛЭП)

Металлы и их сплавы.

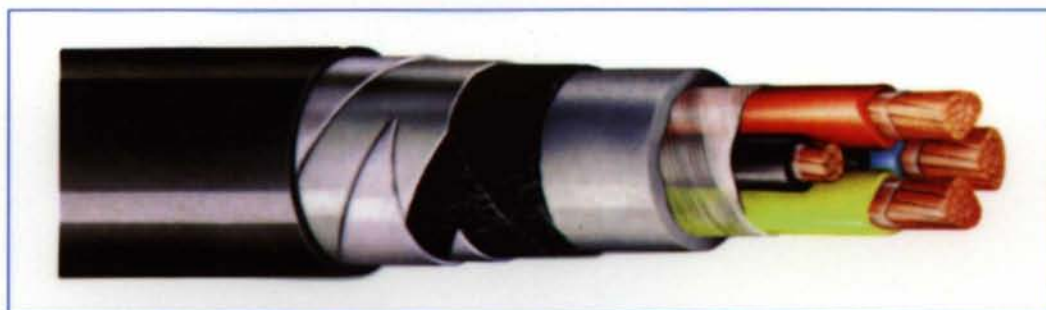
II. Диэлектрики.



Обмотки электрических машин

Слюда, целлюлоза и др.

К диэлектрикам принадлежат электроизоляционные материалы



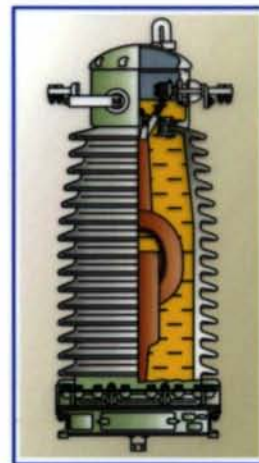
Кабель с ПВХ изоляцией

Электротехнические материалы – материалы, работающие в электрическом и магнитном полях

III. Магнитные материалы.

1. Ферромагнитные вещества:

(железо, никель, кобальт и их сплавы).



Сердечники трансформаторов

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



Сердечники трансформаторов



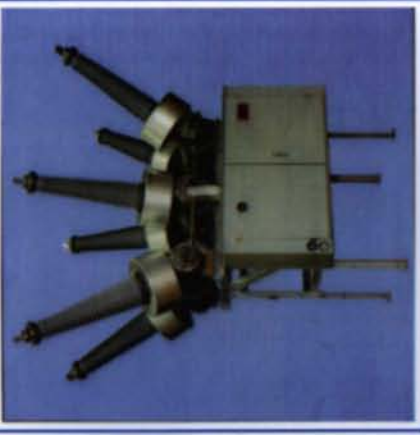
Фототранзисторы

IV. Полупроводники **подразделяются на два вида:**

1. Простые: германий, кремний, селен.

2. Химические соединения: карбид кремния **SiC** и др.

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

III. Твёрдое

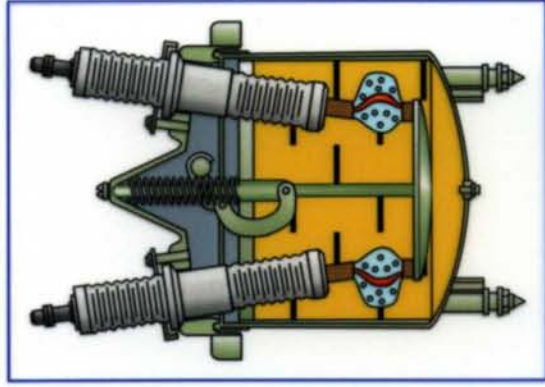
Проводники, органические диэлектрики и др.



Керамический изолятор

IV. Плазма

Равновесное состояние свободных электронов и ионов.



Масляный выключатель

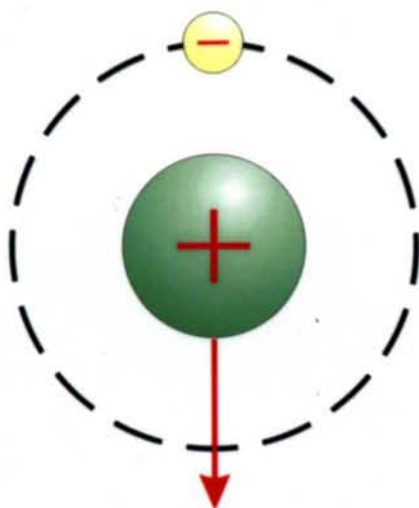
4 агрегатных состояния вещества

I. Газы.

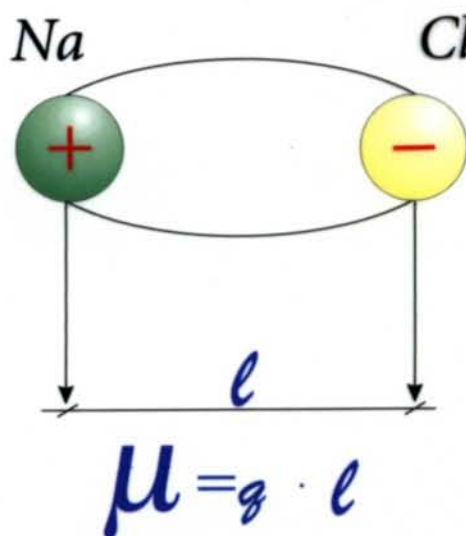
Молекулы газа могут быть:

1) неполярными или нейтральными;

2) полярными или дипольными.



O_2



II. Жидкости.



Конденсатор маслонаполненный
конденсаторное масло

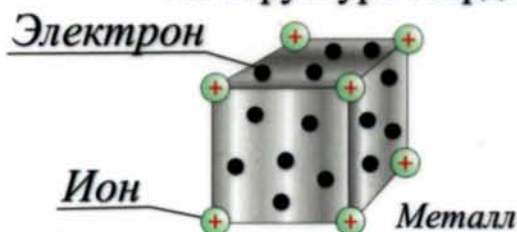
1. Диэлектрики состоят из нейтральных и слабополярных молекул.

2. Проводники состоят из растворов или расплавов ионных соединений.

4 агрегатных состояния вещества

III. Твёрдое тело.

По структуре твёрдые тела бывают:



1. Кристаллические.

Большинство твёрдых тел имеет кристаллическую решётку.



Стекло

2. Аморфные.

Эти тела изотропны.



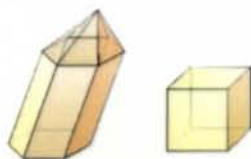
Фарфор

3. Смешанные.

Они имеют две фазы:

- а) стекловидную и
- б) кристаллическую.

Твёрдые вещества имеют две структуры.



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



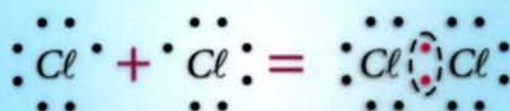
Микроструктура электротехнической стали.

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

Физические и химические свойства атомов

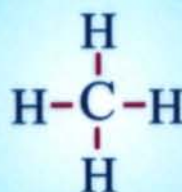
Строение внешних электронных оболочек атомов определяет виды связей в молекулах.

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

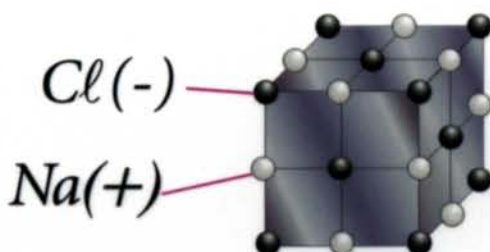
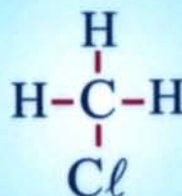


Молекулы могут быть:

1. Нполярными
($\text{O}_2, \text{N}_2, \text{Cl}_2, \text{CH}_4$)

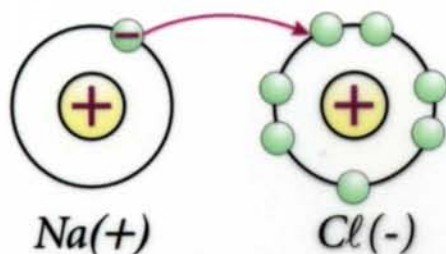


2. Полярными
($\text{CH}_3 \text{Cl}$)



II. Ионная связь.

Вещества имеют кристаллическую решётку (NaCl).



Вещества с ионной связью бывают:

1) с плотной упаковкой ионов (NaCl);

2) с неплотной упаковкой (CsCl).

Физические и химические свойства атомов

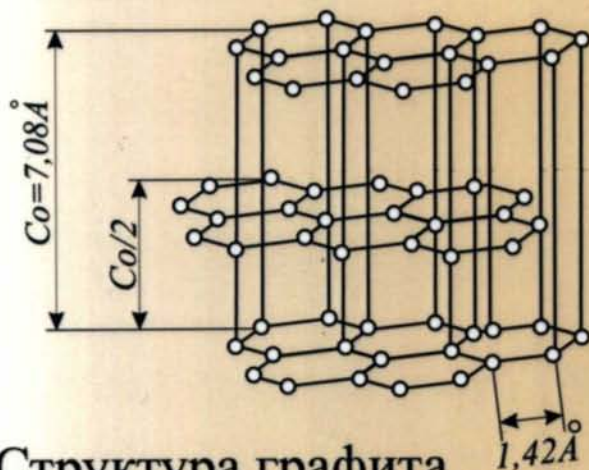
Электрон

Ион



III. Металлическая (химическая) связь.

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

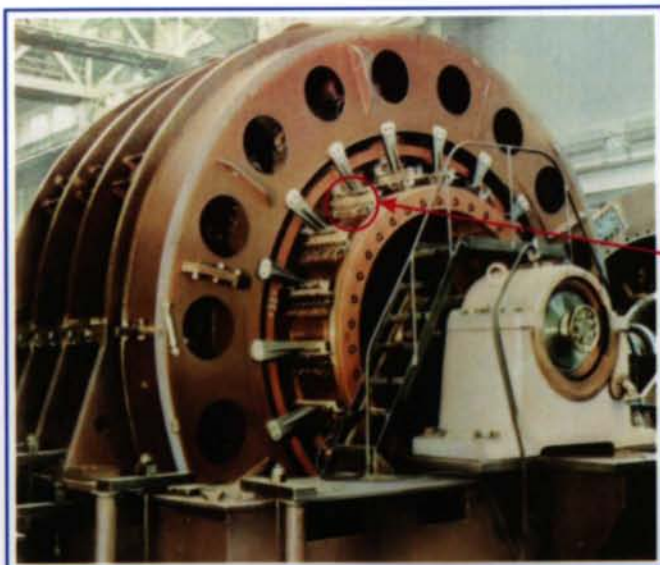


Структура графита

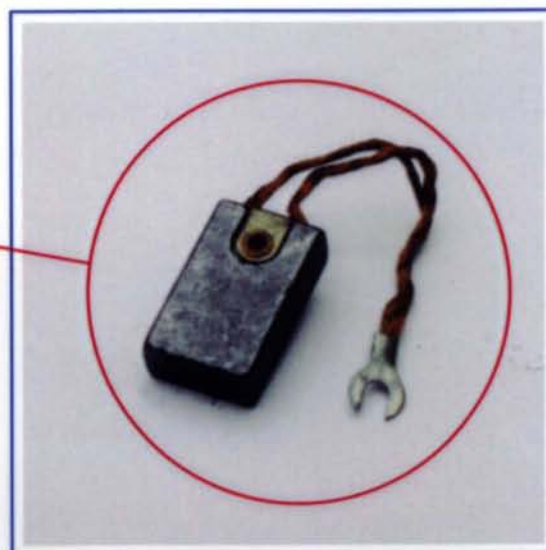
IV. Молекулярная связь (связь Ван-дер-Ваальса).

Вещества состоят из отдельных молекул и связаны слабыми молекулярными силами.

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



Электродвигатель И-1000В



Щётка графитовая

Классификация веществ по электрическим свойствам



Зонная теория твёрдых тел

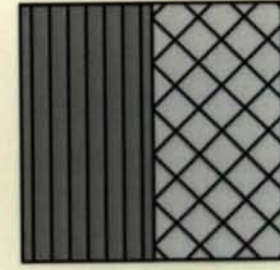
Энергетическая
диаграмма атома



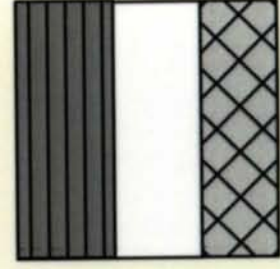
Различие между телами показывается с помощью энергетических диаграмм зонной теории твёрдых тел.

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 $\operatorname{tg} \delta$ – угол диэлектрических потерь.
4. E_{np} – напряжённость пробоя (электрическая прочность).

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).

II. Диэлектрики:

$$\rho_v = 10^8 \div 10^{18} \text{ Ом} \cdot \text{м} \quad \text{– изоляционные материалы.}$$

III. Полупроводники:

$$\rho_v = 10^{-2} \div 10^8 \text{ Ом} \cdot \text{м} \quad \text{– диоды, транзисторы и др.}$$



Классификация веществ по магнитным свойствам

$$\mu = \frac{B}{H} [\Gamma/M]$$

μ

– абсолютная магнитная проницаемость;

$B [Bб/М^2]$

– магнитная индукция;

$H [A/М]$

– напряжённость магнитного поля;

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

μ_r

– относительная магнитная проницаемость;

μ_0

– магнитная постоянная

$$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} [\Gamma/M]$$

По величине μ материалы делятся на виды

1. Диамагнетики

$$\mu < 1$$

Значение μ

не

зависит от напряженности внешнего магнитного поля.

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

2. Парамагнетики

$$\mu > 1$$

Значение μ

не

зависит от напряженности внешнего магнитного поля.

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

3. Магнитные материалы

$$\mu \gg 1$$

Значение μ

зависит от напряженности внешнего магнитного поля.

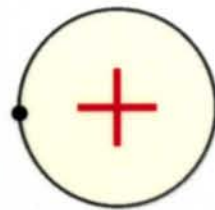
Fe, Ni, Co; сплавы на их основе; ферриты различного состава.



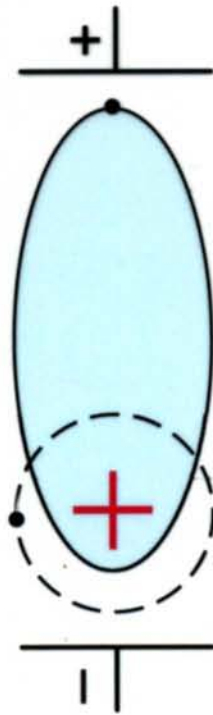
Поляризация диэлектриков

1. Ограниченное смещение связанных зарядов
в неполярных диэлектриках.

Без внешнего поля

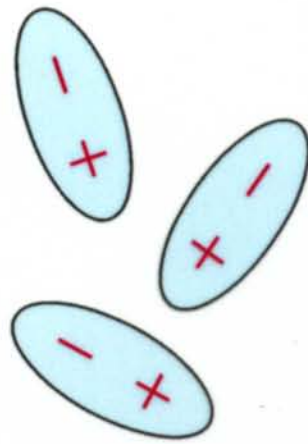


E (внешнее электрическое поле)

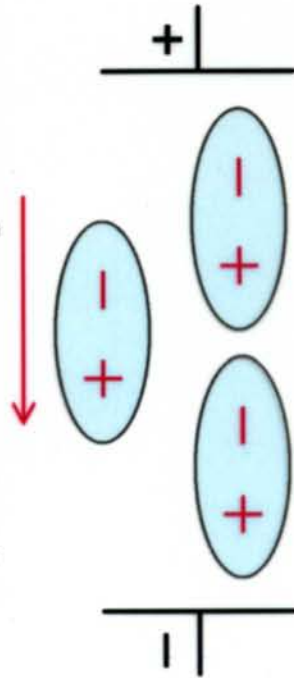


2. Ориентация диполей в полярных диэлектриках.

Без внешнего поля



E (внешнее электрическое поле)



Диэлектрики

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.



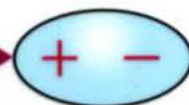
Особенности поляризации:

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

строение молекул



Нполярная молекула



Полярная молекула

III. Мгновенные.

Они происходят:

- 1) Быстро
- 2) Упруго
- 3) Без рассеяния энергии

К ним относятся:

1. Электронная

Во всех видах диэлектриков

2. Ионная

В твердых телах с ионным строением (кварц, слюда, корунд)

Поляризации

Характеризуются:
интенсивностью
процесса
поляризации.

ϵ

неполяр-
ные диэ-
лектрики
(1,8 ÷ 2,5)

полярные
диэлектри-
ки
(3 ÷ 10)

IV. Замедленные.

Они происходят:

- 1) Замедленно
- 2) С рассеянием энергии

К ним относятся:

1. Электронно – релаксационная.

В двуокиси титана с примесью Са, Ва

2. Ионно – релаксационная.

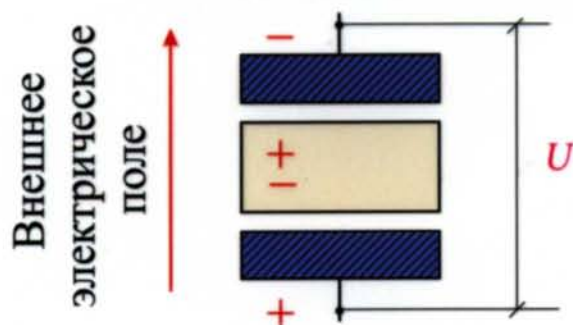
В неорганических стеклах

3. Дипольно – релаксационная.

В дипольных диэлектриках (органические вещества – целлюлоза)

Диэлектрики

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.

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

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

Во всех остальных случаях **$\epsilon > 1$**

$$\epsilon_{\text{воздуха}} = 1,00058$$

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

ϵ_a – абсолютная диэлектрическая проницаемость;

ϵ_0 – электрическая постоянная, $\epsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12} \text{ Ф/м}$;

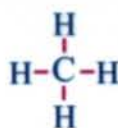
ϵ – относительная диэлектрическая проницаемость.



Диэлектрическая проницаемость

строение вещества

Вещество состоит
из неполярных
молекул



мгновенная
поляризация



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

Вещество состоит
из полярных молекул

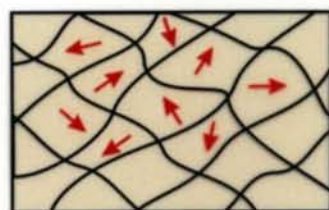


замедленная
поляризация
(релаксационная)



$$\epsilon = 3 \div 7$$

Доменная структура



спонтанная (само-
произвольная)
поляризация



$$\epsilon = 500 \div 1000$$



Конденсатор

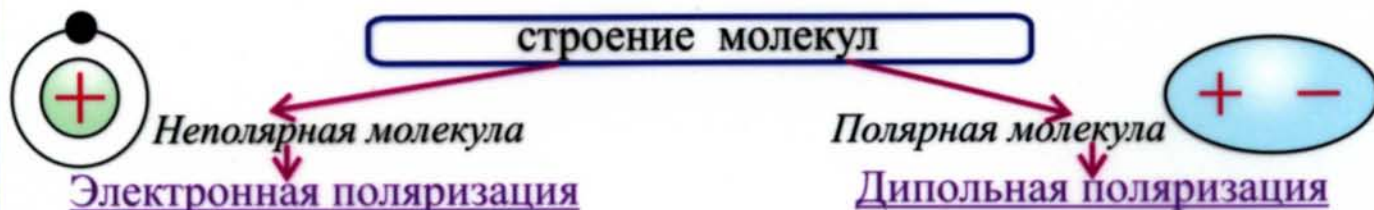
Величина ёмкости
конденсатора

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

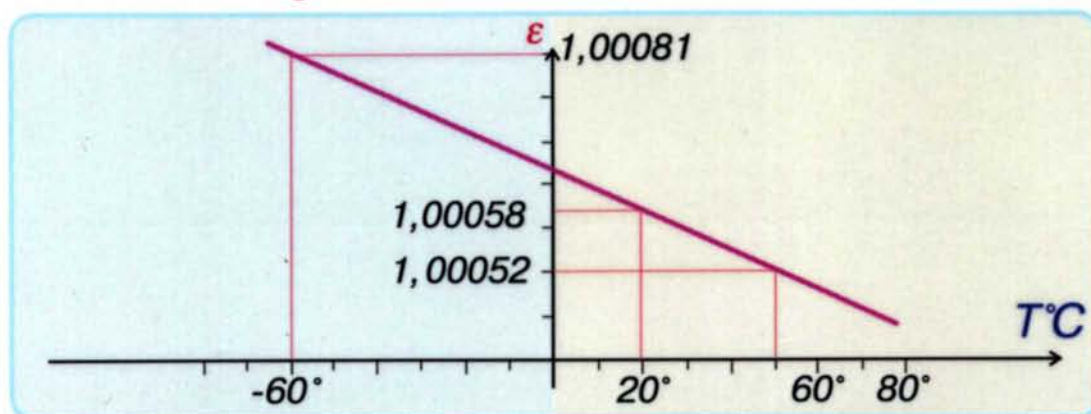
S – площадь электродов;
 d – толщина диэлектрика.

Диэлектрическая проницаемость газов

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



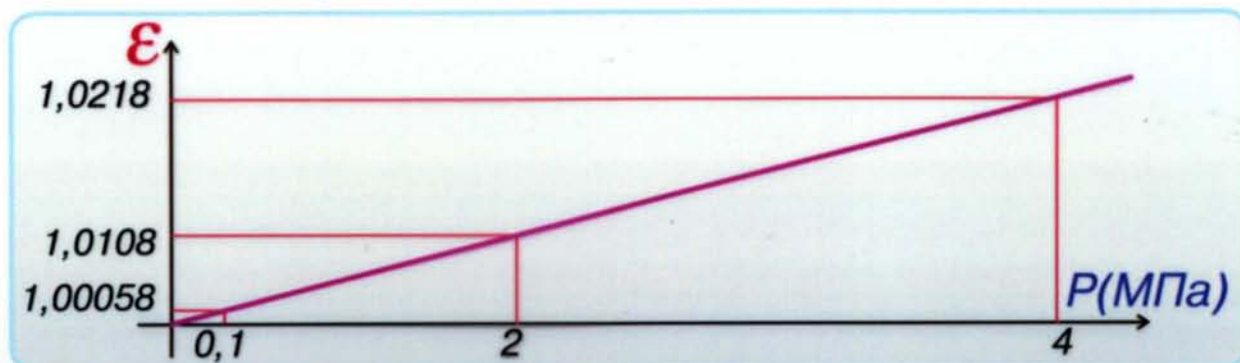
Зависимость $\epsilon = f(T)$ для воздуха при постоянном давлении .



Температурный коэффициент диэлектрической проницаемости

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

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



Диэлектрики

Диэлектрическая проницаемость жидких диэлектриков

$$\epsilon \gg 1$$

, т.к. плотность жидкости ρ_0 большая величина.

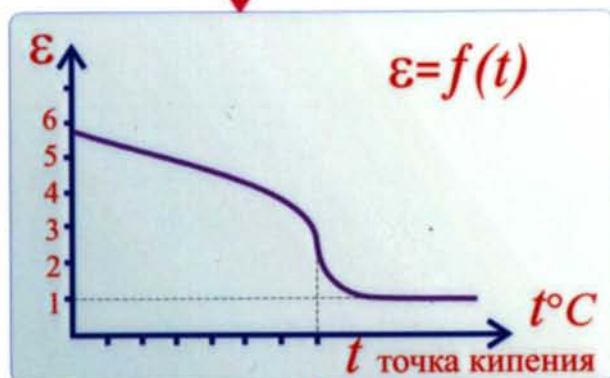
строение молекул

неполярные молекулы
(трансформаторное масло)

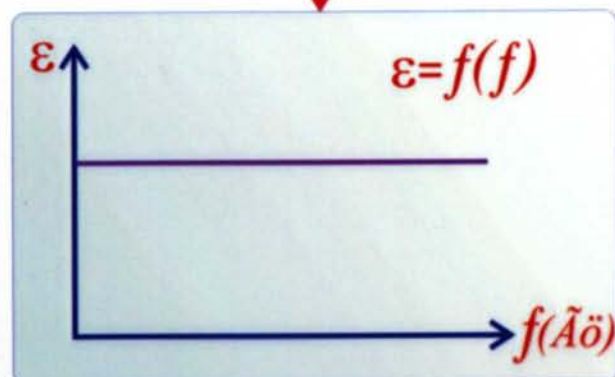
$$\epsilon = 2,1 \div 2,5$$

полярные молекулы
(совол)

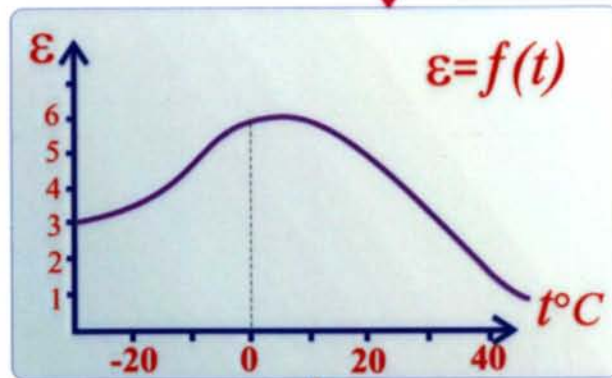
$$\epsilon = 3,5 \div 5$$



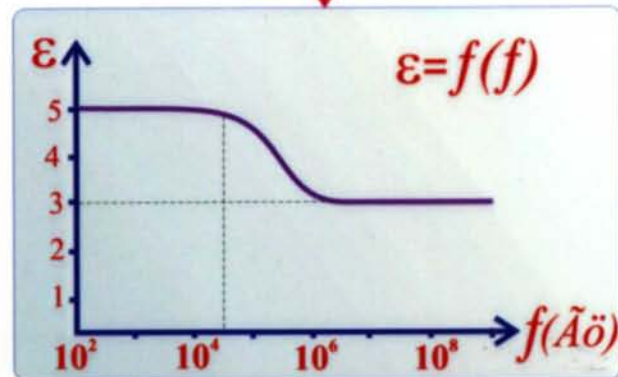
Поляризация – электронная



Эти диэлектрики применяются на всех частотах



Поляризации – электронная и дипольная



Эти диэлектрики применяются на низких частотах

Сильнополярные жидкости (вода, этиловый спирт) имеют очень высокое значение ϵ и в качестве диэлектриков не применяются.



Диэлектрики

Диэлектрическая проницаемость твёрдых диэлектриков

ϵ – имеет самые различные значения

**В твёрдых диэлектриках возможны все виды
поляризации**

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**



Диэлектрики

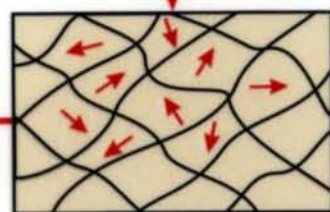
Диэлектрическая проницаемость твердых диэлектриков

сегнетоэлектрики (титанат бария)



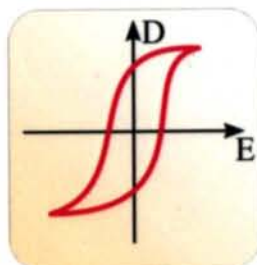
$$\epsilon = 500 \div 9000$$

строение молекул



доменная структура

① Самопроизвольная поляризация



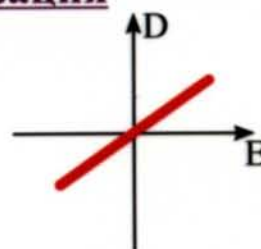
у сегнетоэлектриков

② $D = f(E)$

Диэлектрический гистерезис

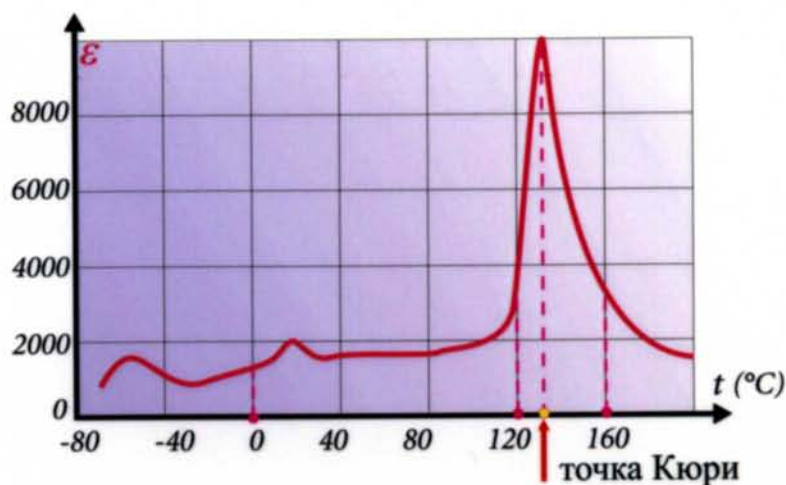
$$D = \epsilon E$$

D – электрическое смещение



у всех диэлектриков

③ $\epsilon = f(t)$



точка Кюри

④ $\epsilon = f(E)$



у сегнетоэлектриков



у всех диэлектриков

⑤ Явление электрического старения



Диэлектрики

Электропроводность

I. Сквозные токи или токи утечки возникают

из-за небольшого количества свободных зарядов.

II. Поляризационные токи или токи смещения возникают

из-за наличия поляризации.

ТОКИ СМЕЩЕНИЯ

Мгновенная поляризация

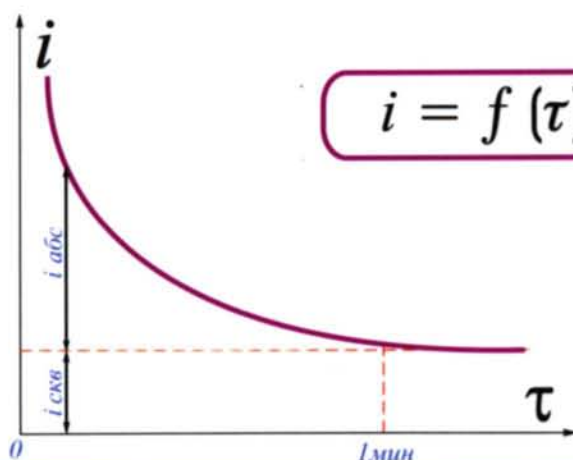
(электронная и ионная)

Токи малые и
кратковременные

Замедленная поляризация

(релаксационная)

Токи большие –
абсорбционные токи



Через диэлектрик
протекает

$$i = i_{скв} + i_{абс}$$

τ – время

Электропроводность диэлектриков носит ионный характер

строение вещества

неполярные вещества

Электропроводность

обусловлена

проводящими примесями

полярные вещества

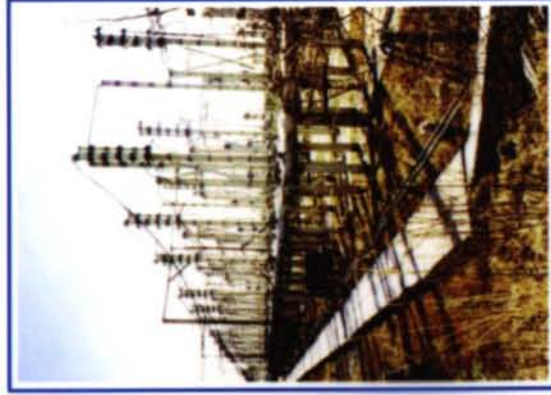
Электропроводность

обусловлена слабо-

связанными ионами диэлектрика



Электропроводность газов



РУ с воздушными выключателями

Ток в газе возникает при его ионизации.

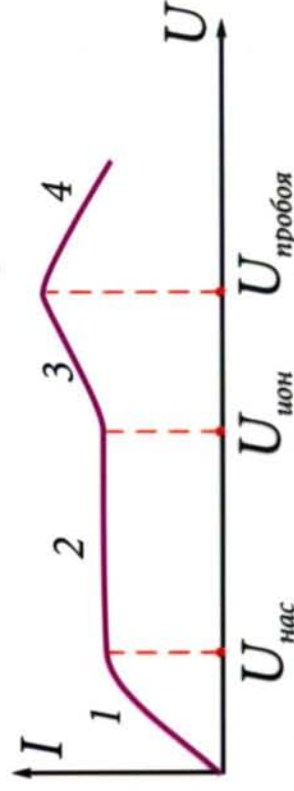
Ток в газе – это разряд в газе.

Разряды в газе

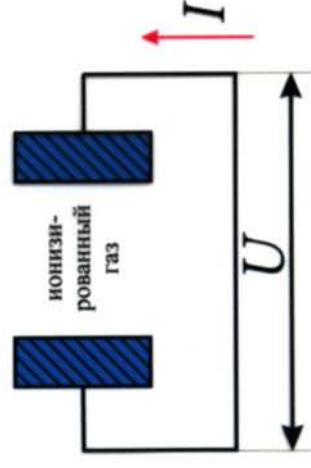
1. Несамостоятельный – при внешних факторах (рентгеновские лучи, термическое воздействие и т.д.).
2. Самостоятельный – только под действием приложенного напряжения.

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

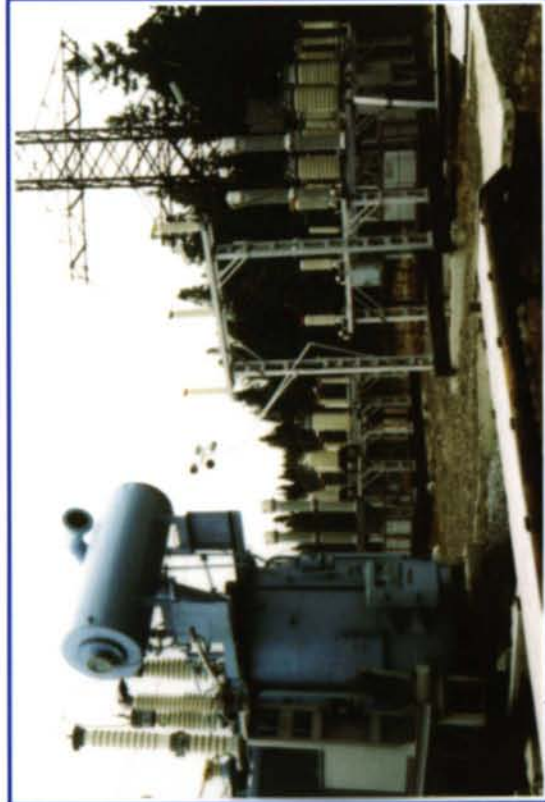
Зависимость тока в газе от напряжения



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



Электропроводность жидкостей

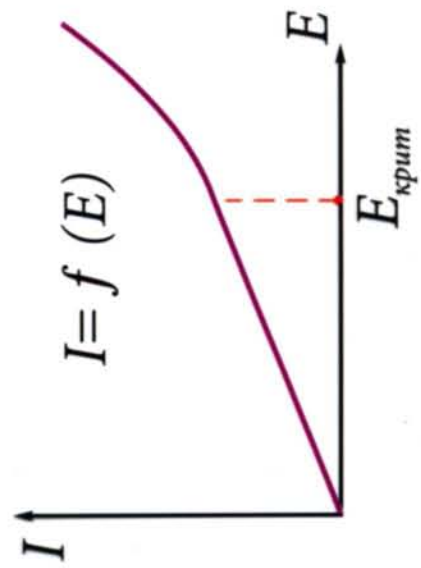


Трансформатор и аппаратура с трансформаторным маслом

Электропроводность имеет ионный характер.

строение молекул жидкости

нполярные и слабополярные	полярные	сильнополярные	коллоидные системы
электропроводность			
Примесная (трансформаторное масло)	Собственная (совол)	Проводники с ионной электропроводностью (этиловый спирт)	Электрофоретическая (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



Диэлектрики

Электропроводность твердых тел

I. Электронная (при сильных электрических полях).

II. Ионная.

структура вещества

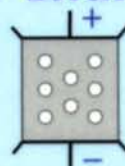
неполярные вещества

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



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

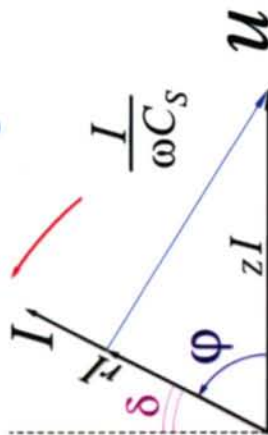
Меньшей – стёкла.



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

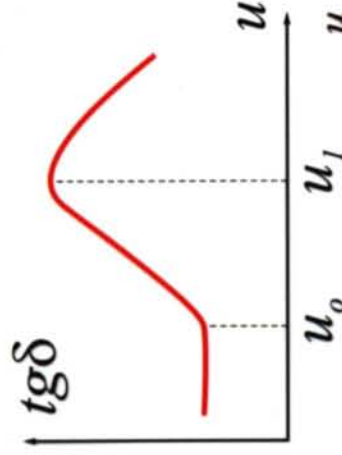
2. δ – углом диэлектрических потерь

3. $\operatorname{tg} \delta$

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



Диэлектрические потери в газах



Источник потерь – электропроводность.

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

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

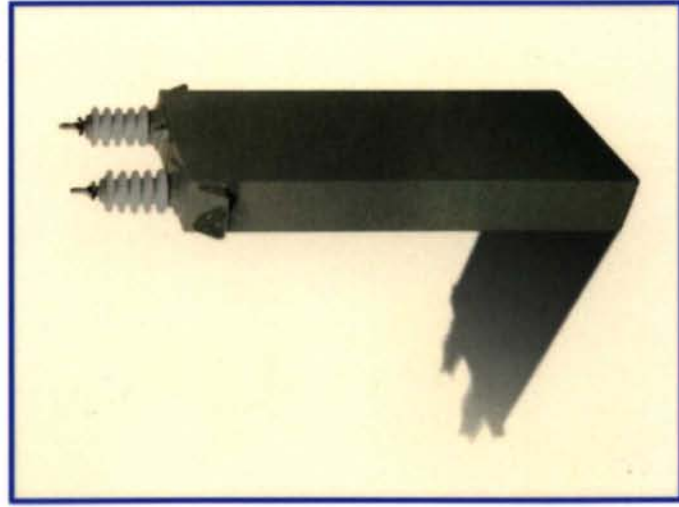
строение молекул

неполярные – $\tan \delta$ малый

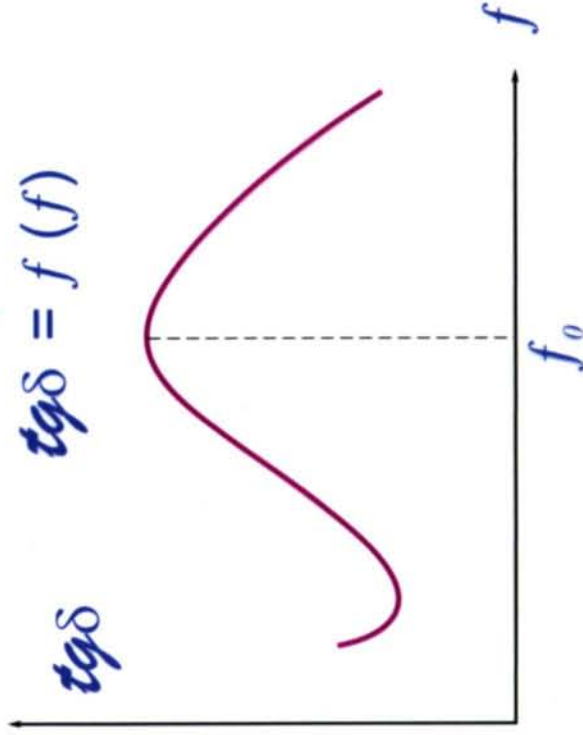
Причина – электропроводность
(конденсаторное масло – $\tan \delta = 0,001$)

полярные – $\tan \delta$ большой

Причина – электропроводность и дипольно –
релаксационная поляризация
(совол – $\tan \delta = 0,02$)



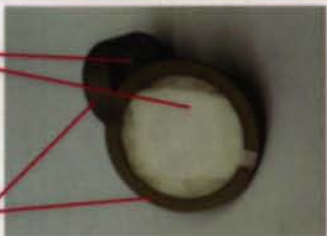
Конденсатор



f – частота приложенного напряжения

Диэлектрические потери в твердых диэлектриках

Структура вещества

Материалы	молекулярная		ионная		сегнето - электрики	неоднородная		
	неполярные	полярные	с плотной упаковкой ионов	с неплотной упаковкой ионов		керамика	на основе слюды	пронитанная бумага
<i>ε_д</i>	0,0002	0,02	0,0005	0,02	0,03	0,02	0,03	0,03
Поляризации	Электронная и ионная	Электронная и дипольно-релаксационная	Электронная и ионная	Электронная, ионная, релаксационная	Спонтанная	Электронная, ионная, релаксационная	Электронная и ионная (<i>ε_д</i> возрастает из-за проводящих примесей)	Дипольно-релаксационная
	Полиэтилен, полистирол	Картон, эбонит, капрон	Корунд (Al ₂ O ₃) в составе ультрафарфора	Мулит в составе изоляторного фарфора	Сегнетокерамика на основе BaTiO ₃	Радиофарфор	Слюдотерм	Целлюлоза
	Полиэтилен				 Сегнетокерамика Контакты посеребрённые			

Пробой диэлектриков

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

$$U_{пр} [кВ]$$

– напряжение пробоя, при котором происходит пробой диэлектрика;

$$E_{пр} [кВ/м]$$

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

$$E_{пр} = U_{пр}/h$$

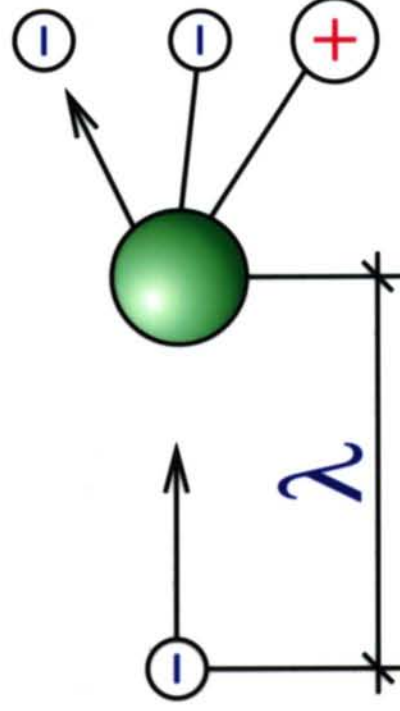
$$h [м]$$

– толщина диэлектрика (для конструкций 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.



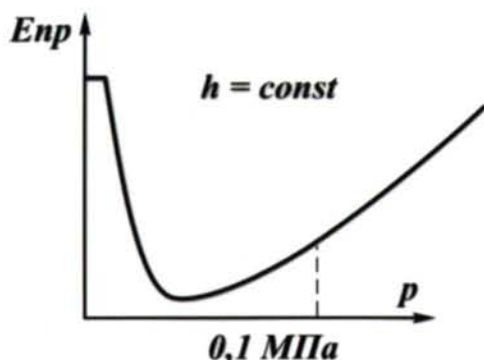
Расщепление нейтральной
молекулы (ударная ионизация)

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

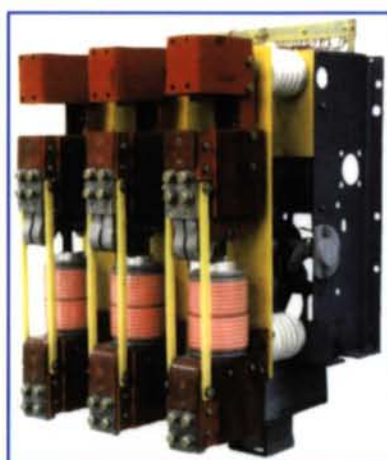


Пробой газа совершается практически мгновенно, и это явление чисто
электрическое. Поэтому все численные данные по пробую газа относятся к
максимальным (амплитудным) значениям напряжения.

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



Воздушный выключатель
220кВ
ВВБ-220



Вакуумный выключатель
10кВ
ВВПЭ-10

Высокую $E\rho$ при больших давлениях используют в воздушных высоковольтных выключателях.

Большую $E\rho$ 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

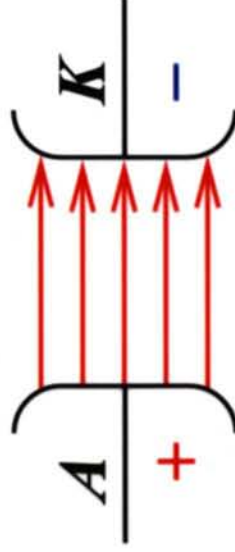
Диэлектрики

Пробой газа в однородном поле

В однородном поле E – величина постоянная

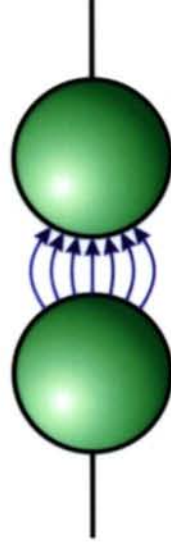
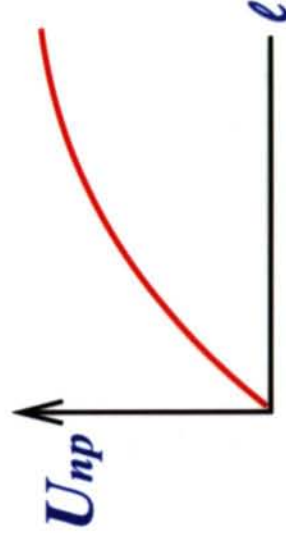
Однородное поле можно получить:

- 1) между плоскими электродами с закругленными краями;
- 2) между шарами большого диаметра при малом расстоянии между ними.

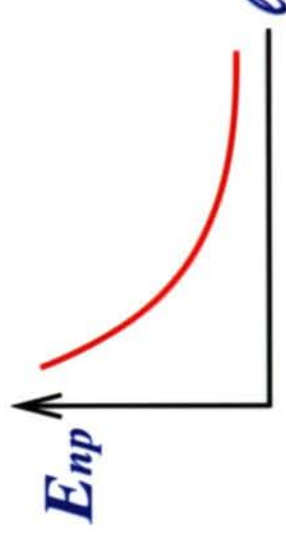


Зависимость $U_{пр} = f(\ell)$

ℓ – расстояние между электродами



Зависимость $E_{пр} = f(\ell)$

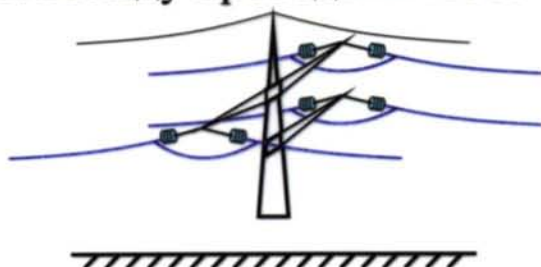


Особенность пробоя при однородном поле – возникновение искры, которая может перейти в дугу.

Диэлектрики

Пробой газа в неоднородном поле

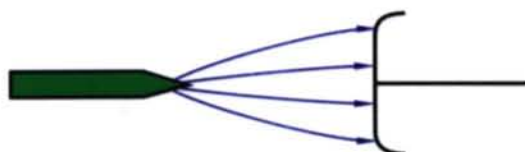
1. Между проводами ЛЭП



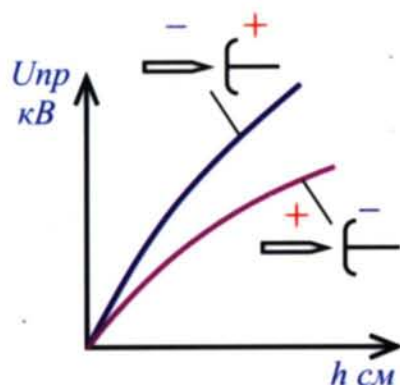
2. Между двумя остриями



3. Между острием и плоскостью



4. Между шарами при большом расстоянии между ними



Зависимость $U_{пр} = f(h)$ – около острия образуется положительный объемный заряд

Особенность пробоя в неоднородном поле – возникновение разряда в виде короны с переходом в искровой разряд или дугу.

Разъединитель
500кВ
РПД-500



Пробой жидких диэлектриков

Наличие примесей способствует пробоем.

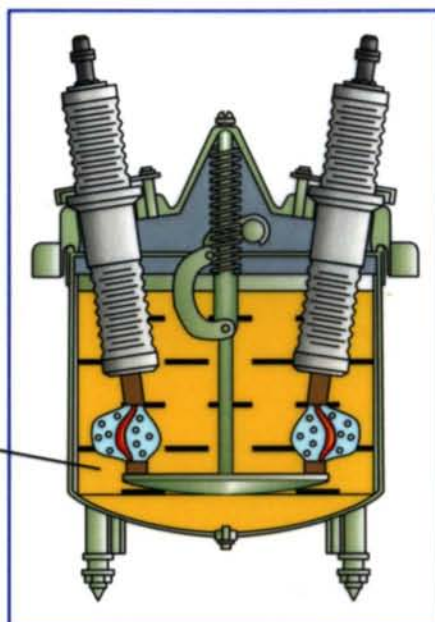
Три теории пробоя

I. Для максимально очищенных от примесей жидкостей.

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

Трансформаторное масло

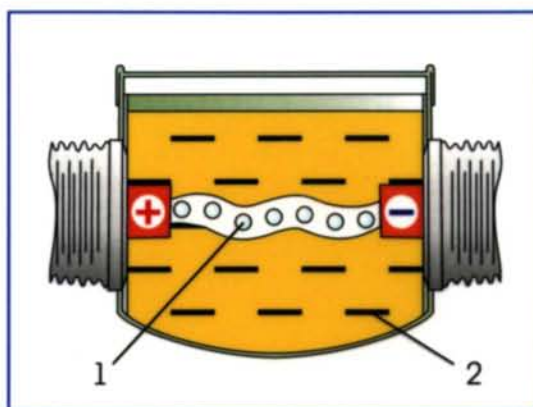
Масляный баковый выключатель



II. Для жидкостей с пузырьками газа.

Газ в пузырьках ионизируется, образуется газовый канал.

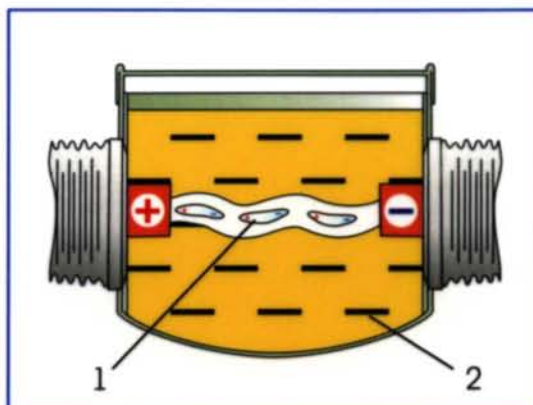
1 – пузырьки газов;
2 – трансформаторное масло



III. Для жидкостей с водой.

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

1 – вода;
2 – трансформаторное масло

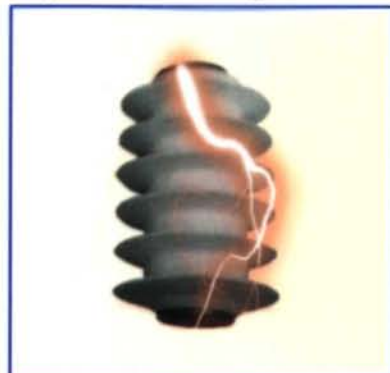


Пробой твердых диэлектриков

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 $E_{пр}$.



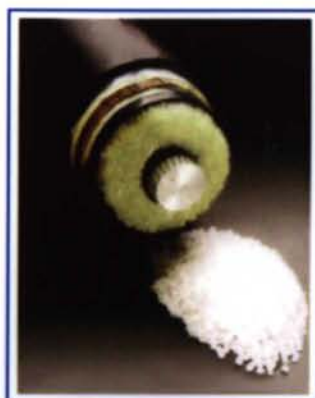
III. Электротепловой пробой.

Причина – возрастание электропроводности или диэлектрических потерь.



IV. Электрохимический пробой.

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



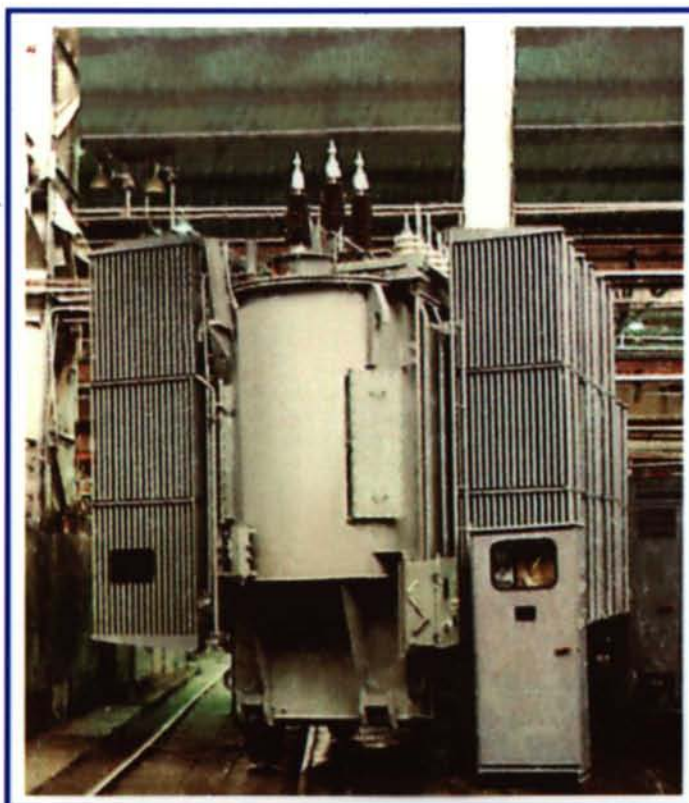
Газообразные диэлектрики



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

$E_{пр\text{ воздуха}} = E_{пр N_2}$,
но с азотом нет окисления.

Применение: силовые трансформаторы с азотной подушкой, газовые конденсаторы.

Силовой трансформатор

Диэлектрики

Газообразные диэлектрики

3. Элегаз SF_6 (гексафторид)

$E_{npsf_6} > E_{np}$ воздуха в 2,5 раза.

Применение: высоковольтные выключатели, герметично закрытые КРУ, силовые трансформаторы.



Распределительное устройство (КРУЭ)



Элегазовый выключатель
 $U=110\text{кВ}$

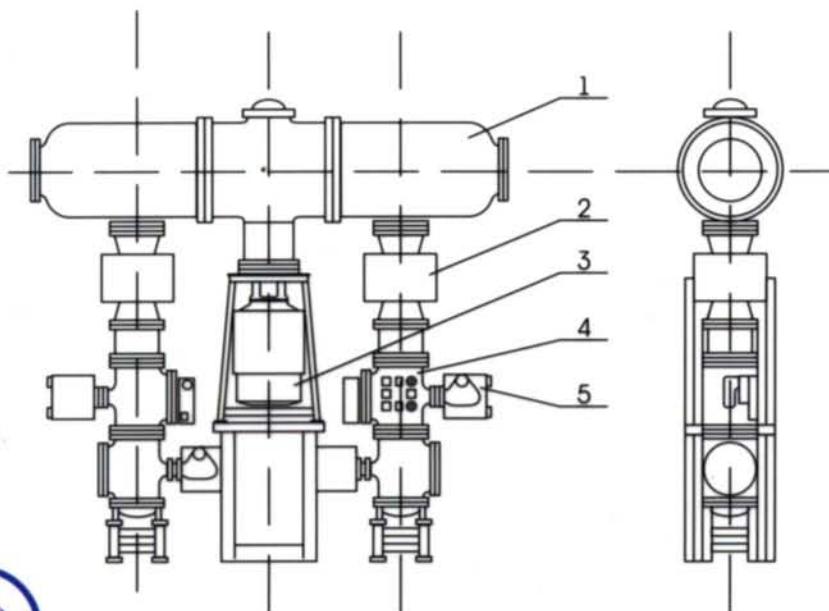
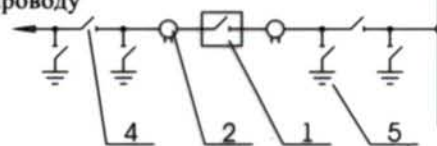


Схема электрическая
(КРУЭ)

к кабелю или
токопроводу



- 1 – полюс выключателя (3 шт.);
- 2 – трансформатор тока (6 шт.);
- 3 – гидропривод (3 шт.);
- 4 – разъединитель (6 шт.);
- 5 – заземлитель (12 шт.)



Диэлектрики

Газообразные диэлектрики

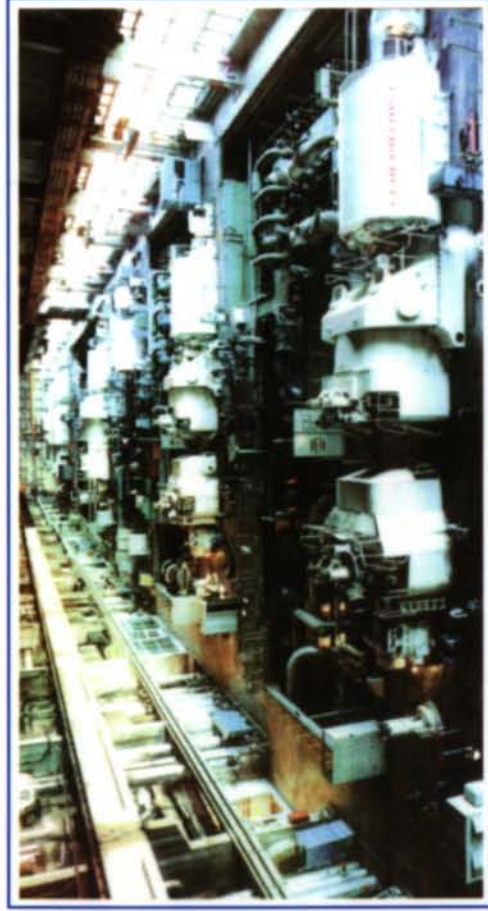
4. Водород H_2

Применение: охлаждающая среда в мощных электрических машинах (турбогенераторах).

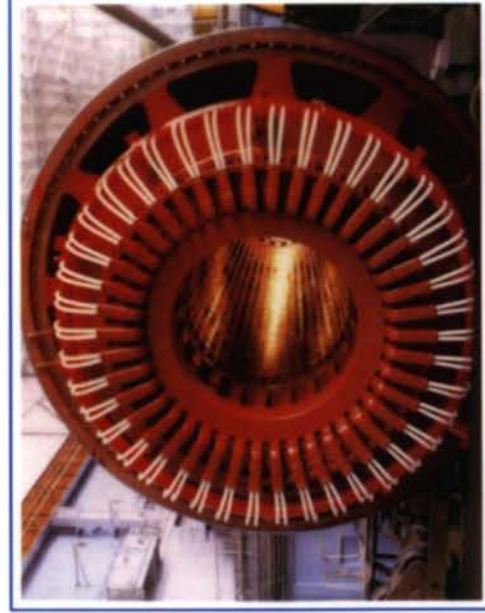


Смесь водорода с воздухом – взрывоопасная смесь. В современных генераторах применяется водяное охлаждение.

Турбогенератор



Машинный зал



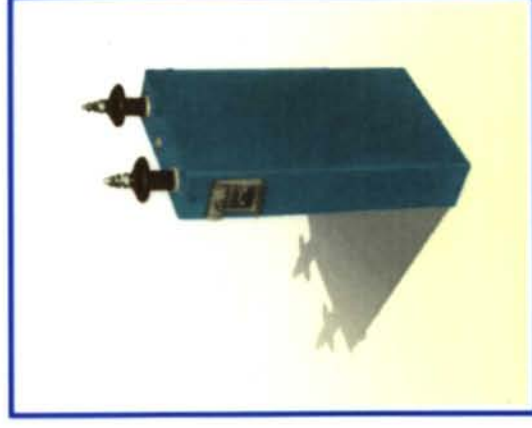
Статор генератора с водяным охлаждением

Жидкие диэлектрики

1. Нефтяные электроизоляционные масла.



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



Конденсаторное масло – применяется для пропитки бумажных конденсаторов.



Кабельное масло – применяется в производстве силовых электрических кабелей

Жидкие диэлектрики

II. Синтетические жидкие диэлектрики.

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

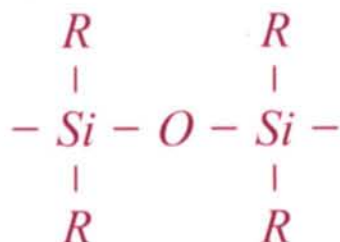
Например:

- 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).



Диэлектрики

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

$\left\{ \begin{array}{l} \text{полиэтилен} - (C_2 H_4)_n; \\ \text{полипропилен} - (C_3 H_6)_n; \\ \text{полиизобутилен} - (C_4 H_8)_n; \end{array} \right.$



Полистирол $(C_8 H_8)_n$

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

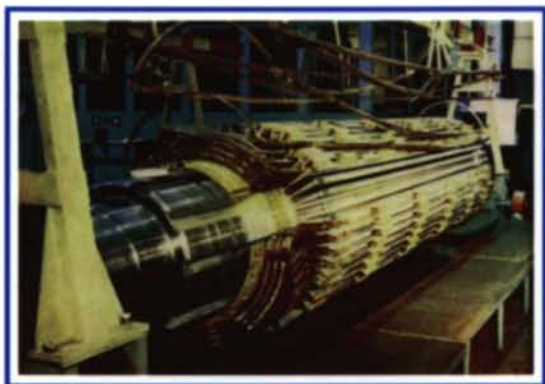
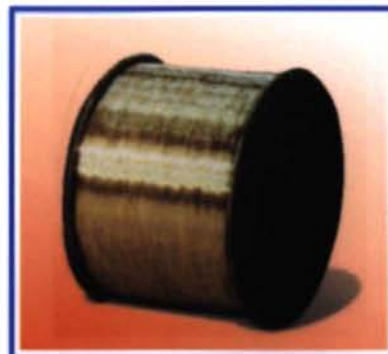
Применение: пластмассы, изоляция кабелей, дугогасящий материал.

Диэлектрики

Смолы

2. Полимеры, получаемые поликонденсацией:

- а) фенолоформальдегидные смолы
новолак – термопластичная смола
 применение: лаки, пресс-порошки;



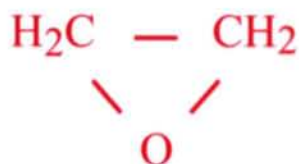
Обмотка ротора. Изоляция - стеклотекстолитовая

- бакелит – термореактивная смола
 применение: слоистые пластики (гетинакс, текстолит, стеклотекстолит);



Измерительные трансформаторы тока

- б) эпоксидные полимеры
эпоксидные группы



- применение: изоляционные и герметизирующие материалы;



ОПН. Защитная кремнийорганическая оболочка.

- в) кремнийорганические смолы –



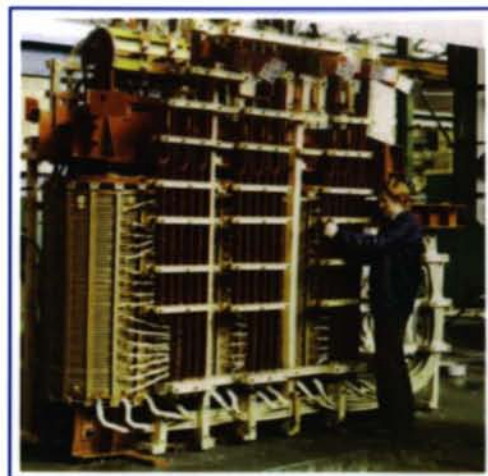
- полиорганосилоксаны, силиконы
 применение: связующие для композиционных электроизоляционных материалов.

Волокнистые материалы

Дерево

Применение:
деревянные опоры ЛЭП,
крепежные детали
трансформаторов, пазовые
клинья электрических машин.

*Трансформатор
ТДНП-10000/10У1*



Бумага и картон

Кабельная бумага



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

Кабель

Конденсаторная бумага

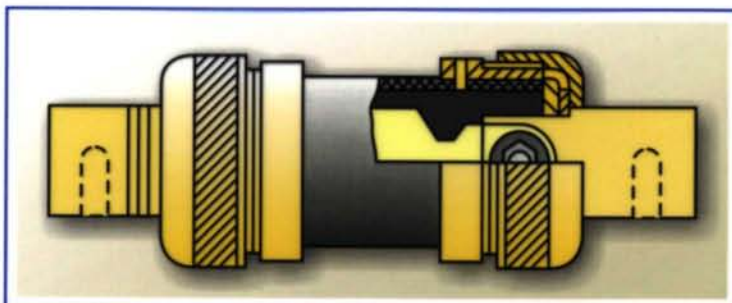


Марки: КОН, СКОН, МКОН.
СМКОН обладает высокой
электрической прочностью и
малыми потерями.

Конденсаторы

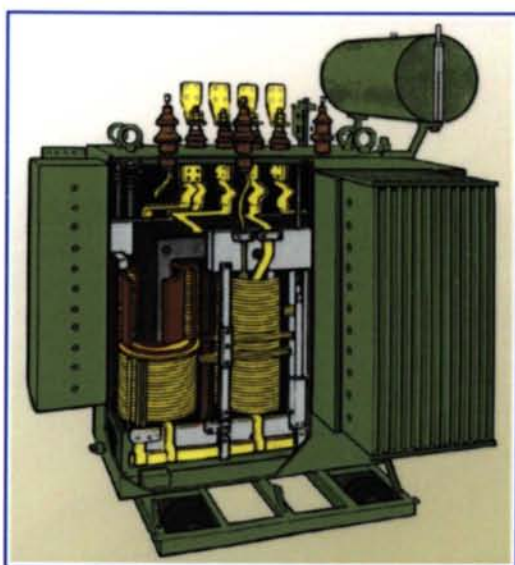
Волокнистые материалы

Листовая, трубчатая фибра



Применение:
конструкционный,
изоляционный и дугогасящий
материал.

Предохранитель типа ПР-2



Электрокартон

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

Трансформатор

Природные волокна

Хлопчатобумажные ленты



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

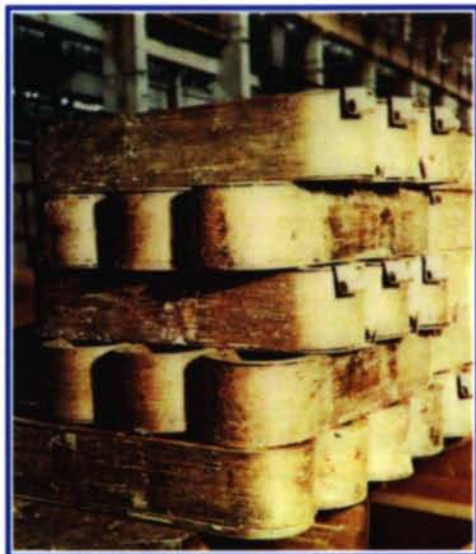
Преобразовательный трансформатор

Диэлектрики

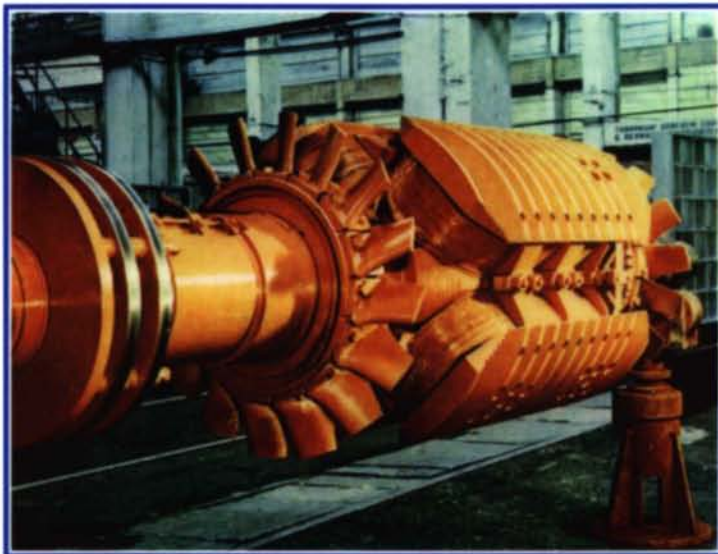
Асбест

Применение:

оплетка нагревостойких проводов и кабелей, полюсные катушки синхронных машин (при $t=50\div 450\text{ }^{\circ}\text{C}$).



*Асбестовая бумага .
Полюсные катушки
синхронных машин*



*Обработанная смолой асбестовая бумага.
Ротор быстроходной синхронной
машины*

Лакобумаги, лакоткани, электроизоляционные ленты



Применение:
изоляция в
электрических
машинах, аппаратах.

Эластомеры

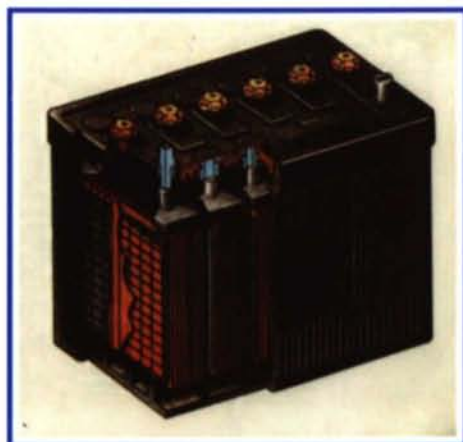
Основа – натуральный каучук.

Резины – каучук с добавлением серы.

Мягкая резина - каучук с добавлением серы (1÷3%).



Применение: изоляция проводов, кабелей, защитные боты, галоши, перчатки, коврики и изоляционные трубки.



Эбонит – каучук с добавлением серы (30 ÷ 35%).

Применение: баки для аккумуляторов.

Каучуки

Бутадиеновый каучук –

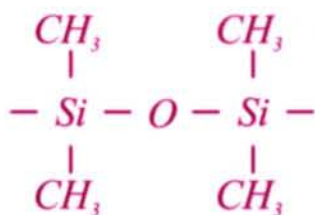


Применение: лаки, лакоткани, компаунды.



Кремнийорганический каучук.

Применение: изоляция кабелей, проводов, изоляторы.



Фторкаучуки: химически стойкие, маслостойкие (t раб. = 400°).

Применение: изоляция кабелей, проводов, прокладки.

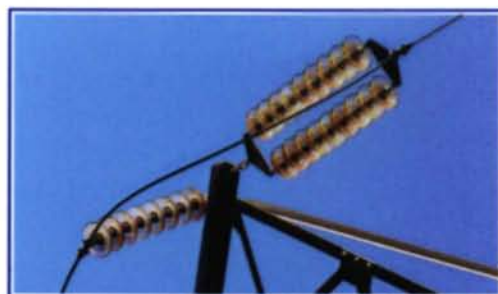
Стекла – аморфные тела

Установочные стекла.



Применение:
закаленные
щелочные
стекла для

ЛЭП–35÷1150кВ, установочные детали.



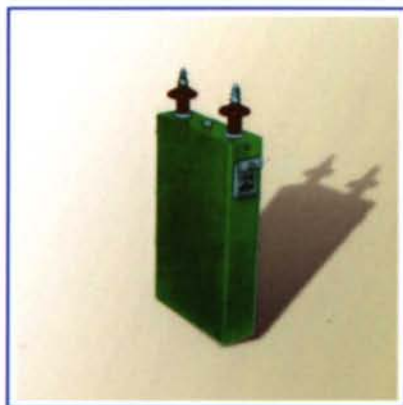
Ламповые стекла.

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

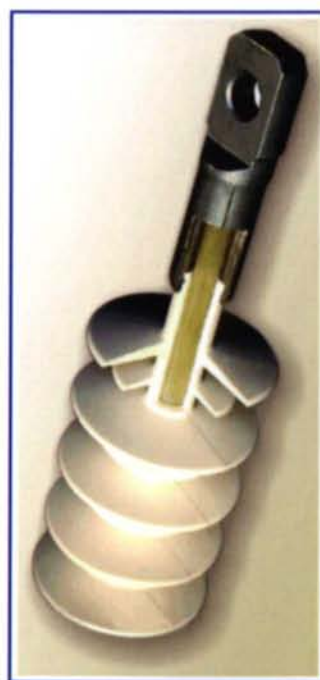


Конденсаторные стекла.

Применение:
конденсаторы,
высоковольтные
фильтры,
импульсные
генераторы.



Стекла с наполнителями.



Применение:
стеклопластики,
изоляция
высоковольтных
машин.

Диэлектрики

Стекловолокно

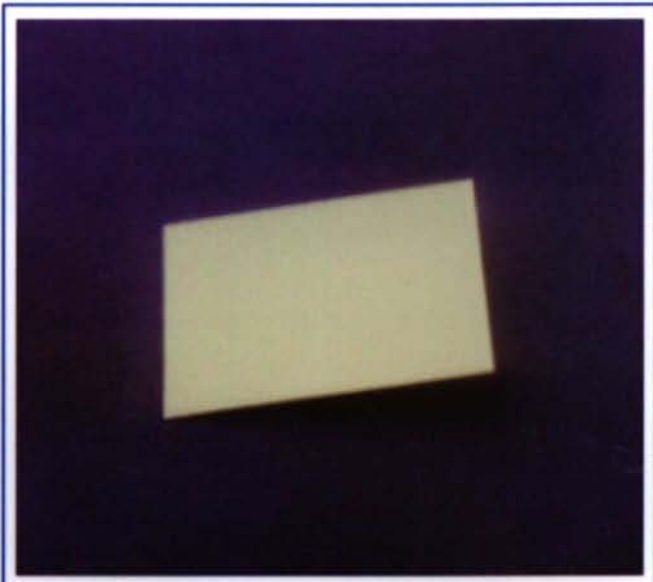
Из стекловолокна производят:
ленты, ткани, шланги.

Применение:
изоляция обмоточных проводов электрических машин, пресс-порошки.



*Сухие
трансформаторы*

Стекло



Применение: световоды, ситаллы.

Керамика

Электротехнический фарфор

I. Высоковольтный фарфор.

Высоковольтные изоляторы на напряжение $6 \div 1150$ кВ.

1. Стационарные изоляторы.



Высоковольтные выключатели

Применение: вводы, опорные и проходные изоляторы.

2. Линейные изоляторы для ЛЭП.



ЛЭП

Применение: подвесные и штыревые изоляторы.



Конденсатор СМП-110

3. Высокочастотная, высоковольтная керамика стеатитовая.

Основная фаза – $\text{MgO} \cdot \text{SiO}_2$ – метасиликат магния.

Применение: конденсаторы, установочные детали.

Керамика



II. Низковольтный фарфор.

Применяется на напряжение до 35 кВ: вводы, изоляторы.

Трансформатор ОМ – 1,25; 10 кВ.

III. Фарфор для электронной и радиотехнической промышленности

Радиофарфор	Ультрафарфор	Алюминоксид
с введением тяжёлого оксида Ва О	большое содержание Al_2O_3	оксид Al - Al_2O_3 ; нагревостойкость 1600°C
		

IV. Конденсаторная керамика – высокочастотный диэлектрик

титановая керамика	титано – циркониевая, лантановая керамика
--------------------	---

V. Сегнетоэлектрики.

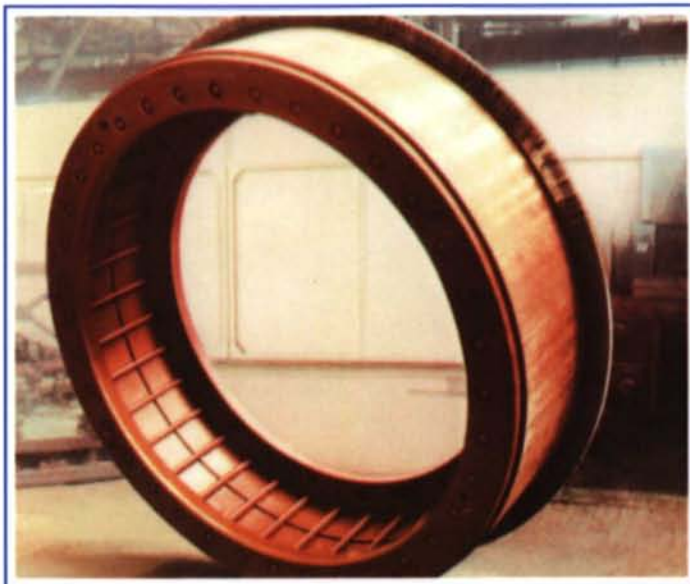
Сегнетокерамика – $BaTiO_3$ – титанат бария.



Применение: конденсаторы для усилителей, модуляторов; вычислительная техника.

Слюдяные материалы

Миканиты – слюда, склеенная лаком или смолой.

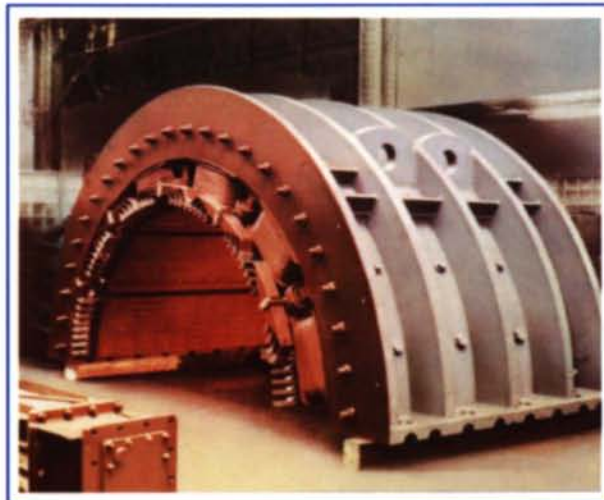
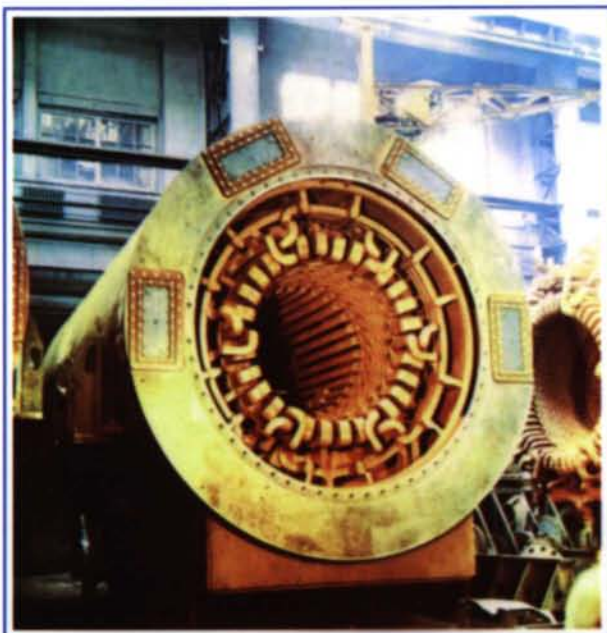


Коллекторные, прокладочные миканиты изготавливают в виде штампованных заготовок, прокладок, шайб.

Коллектор крупного электродвигателя

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.

Статор турбогенератора
Изоляция – микалентная, компаундированная

Нагревостойкий (термостойкий) миканит

Изоляция работает при температуре в несколько сот градусов.



Наложение изоляции типа слюдотерм на стержень обмотки статора турбогенератора



Стержни обмотки статора в разрезе. Сложная изоляция: стеклослюдяная лента и слюдотерм

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 °С.
Высокие электроизоляционные свойства.
Применение: штамповочные детали.

Проводники

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.

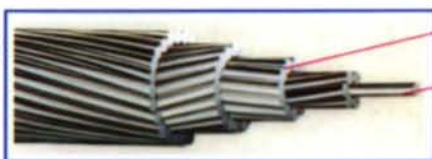


5. Железо – Fe.

Применение: провода для ЛЭП небольшой мощности.



б)



Al

Сталь



Сталеалюминиевые провода применяют для ЛЭП большой мощности.

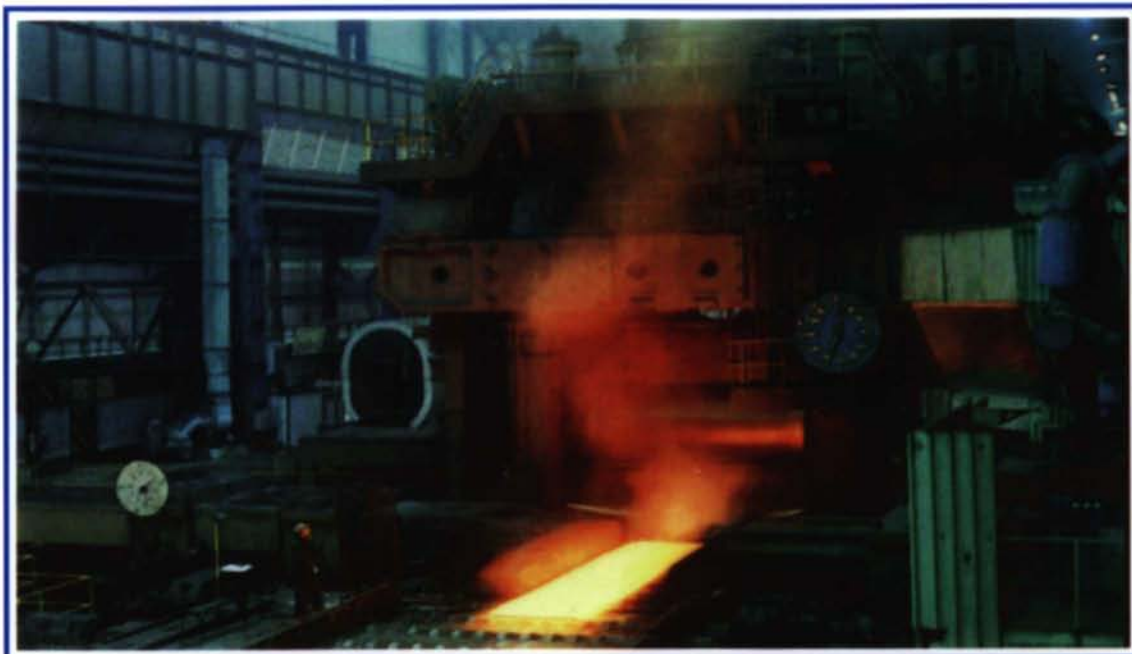
6. Металлический натрий – Na.

Применение: провода и кабели в полиэтиленовой оболочке.



Жидкие проводники

1. Расплавленные металлы и электролиты.



2. Ртуть – жидкий металлический проводник при нормальной температуре.



Газы и пары при высоких напряженностях электрического поля



Плазма – сильно ионизированный газ.

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 - фехрали.*

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).

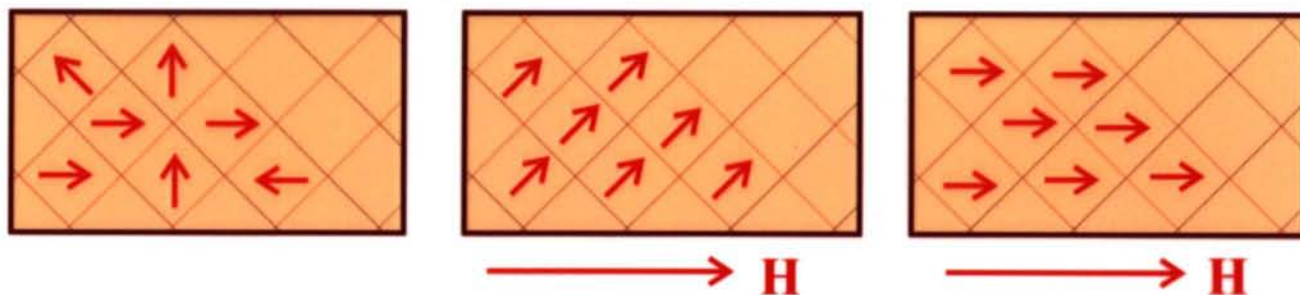
Применение: ЛЭП, передающие большие мощности, электрические машины, жилы кабелей, волноводы, трансформаторы.

Магнитные материалы

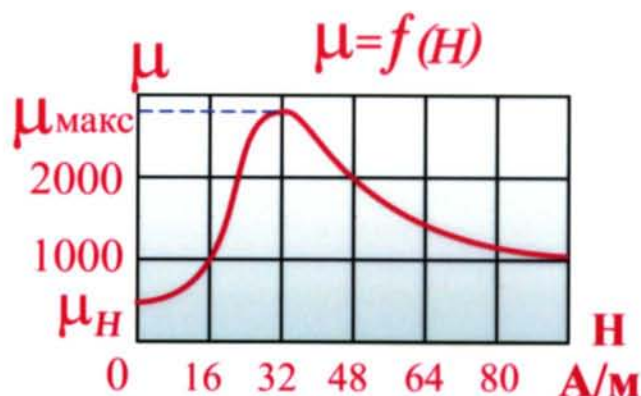
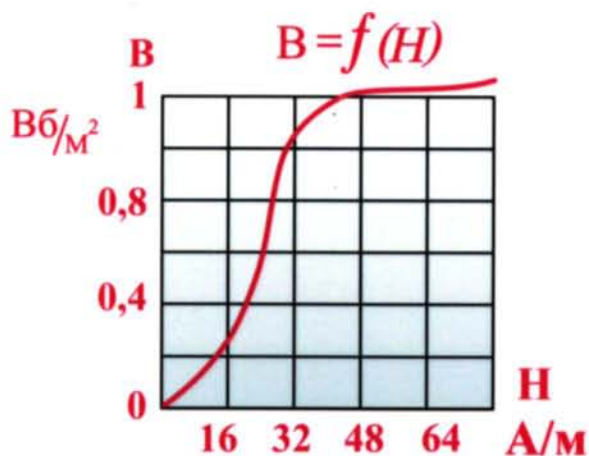
Ферромагнитные вещества: Fe, Ni, Co и их сплавы

Свойства:

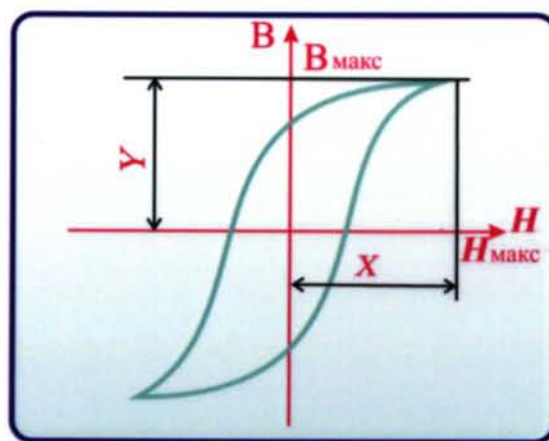
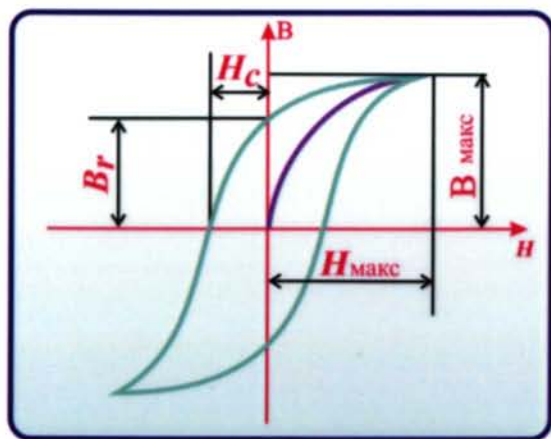
1. Спонтанное намагничивание.



2. Кривая намагничивания.



3. Явление гистерезиса.



Петля гистерезиса, снятая с экрана осциллографа

Магнитные материалы

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.

2. Пермаллой.

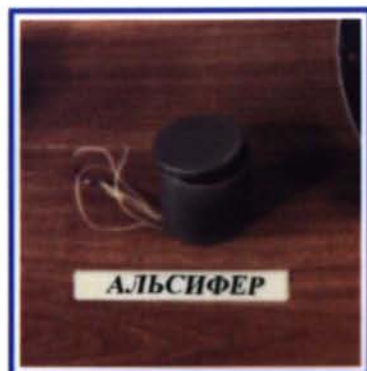
Fe, C, Ni



Применение: сердечники мало-
габаритных силовых транс-
форматоров, дросселей, реле.

3. Альсифер.

Fe, C, Si, Al



Применение: магнитные экраны,
корпуса приборов, прес-
сованные сердечники из
порошка.



Магнитные материалы

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> альниси	<i>Cu - Ni - Co</i> <i>Cu - Ni - Fe</i> прессование и спекание при высоких темпе- ратурах	<i>Cu - Ni - Co</i> <i>Cu - Ni - Fe</i> с фенолоформаль- дегидной смолой под давлением 500 МПа при $t = 120 \div 180^\circ\text{C}$
<i>Al - Ni - Fe - Co</i> альнико (магнико)		



Ферриты – оксиферы



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.