



*Неэлектрические свойства  
диэлектриков*

# *Тепловые свойства диэлектриков*

- Нагревостойкость
- Холодостойкость
- Теплопроводность
- Тепловое расширение

**Нагревостойкость** – способность изоляционного материала выдерживать воздействие повышенной температуры без явного ухудшения изоляционных свойств в течение всего срока службы электрооборудования.

В зависимости от допустимых в эксплуатации рабочих температур ( *tp* ) диэлектрики различают по **классам нагревостойкости**.

## *Классы нагревостойкости*

Класс нагревостойкости	У	А	Е	В	Ф	Н	С
Рабочая температура	90	105	120	130	155	180	Свыше 180

- **Класс Y** - изоляция из волокнистых материалов на основе целлюлозы (древесина, бумага, картон, фибра, хлопчатобумажное волокно), натуральный шелк, полиамиды, поливинилхлорид, натуральный каучук.
- **Класс A** – волокнистые материалы, пропитанные масляными, масляно-смоляными и другими лаками, либо погруженные в трансформаторное масло или синтетический жидкий диэлектрик.
- **Класс E**– слоистые пластики (гетинакс, текстолит, полиэтилентерефталатные пленки (ПЭТФ), эпоксидные, полиэфирные и полиуретановые смолы и компаунды.

Таким образом, к классам нагревостойкости Y, A и E относятся, в основном, чисто органические изоляционные материалы.

- **Класс В** – неорганические материалы: слюда, стекловолокно, асбест в сочетании с органическими связующими и пропитывающими материалами (миканиты, стеклолакоткани, стеклотекстолиты и т. п.); политрифторхлорэтилен и др.
- **Класс F** – материалы на основе слюды, стекловолокна и асбеста с более нагревостойкими связующими и пропитывающими составами: эпоксидными, полиэфирными, кремнийорганическими.
- **Класс H** – неорганические материалы с использованием кремнийорганических связующих особо высокой нагревостойкости.
- **Класс С** – неорганические материалы (слюда, электротехническая керамика, кварц) без связующих или с неорганическими связующими; политетрафторэтилен (тефлон) и полиимидные материалы.

Связь между сроком службы изоляционного материала ( $\tau_{сл}$ ) и рабочей температурой ( $t_p$ ) выражается формулой:

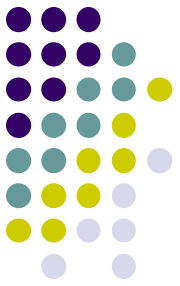
$$\tau_{сл} = \tau_o \cdot e^{-b \cdot t_p}$$

где  $\tau_{сл}$  - срок службы изоляционного материала;

$\tau_o$  - срок службы изоляционного материала при  $0^\circ C$  ;  
 $b$  - коэффициент, зависящий от свойств материала;  
 $e$  - основание натурального логарифма .

Срок службы *уменьшается в два раза* при повышении температуры на постоянное значение  $\Delta t = 0,695 / b$  ( $\Delta t = 7 \div 10^\circ C$  ). Например, изоляция имеет  $\Delta t = 8^\circ C$  и срок службы 10 лет при  $t_p = 105^\circ C$  ; при  $t_p = 113^\circ C$  срок службы составит 5 лет, при  $121$  градусе  $t_p = 121^\circ C$  - 2,5 года.

# Холодостойкость



- **Холодостойкость** – способность изоляции не снижать эксплуатационной надежности при низких температурах (  $-60 \div 70^{\circ}C$  ) и более низких (криогенных температурах).

Особенно важна холодостойкость для изоляции электрооборудования открытых распределительных устройств (ОРУ) подстанций.

При низких температурах *электрические свойства* изоляции *улучшаются*, но материалы гибкие и эластичные в нормальных условиях, при низких температурах становятся хрупкими.





## **Теплопроводность**

▣ **Теплопроводность** – способность материалов переносить тепло от более нагретых частей к менее нагретым, что приводит к выравниваю температуры.

Тепловые потери в проводниках, магнитопроводах электрических машин, аппаратов, кабелей передаются в окружающую среду через изоляцию.

От теплопроводности электрической изоляции зависит нагрев электрооборудования.

*Характеристикой теплопроводности* является **коэффициент теплопроводности** ( $\gamma_T$ ), Вт/(мК).



## **Значения коэффициентов теплопроводности некоторых материалов**

Материал	$\gamma_T$	Материал	$\gamma_T$
Воздух	0,05	Вода	0,58
Бумага	0,10	Никель	65
Лакоткань	0,13	Железо	68
Гетинакс	0,35	Алюминий	226
Текстолит	0,25	Медь	390

Перенос тепла осуществляется свободными электронами, поэтому у металлов коэффициент теплопроводности значительно выше, чем у диэлектриков.

Пористые материалы имеют низкие коэффициенты теплопроводности, при пропитке их теплопроводность значительно увеличивается. Теплопроводность увеличивается при повышении давления газов.

*Тепловое расширение* – увеличение объема материала при нагреве.

Количественной оценкой данного свойства является *температурный коэффициент линейного расширения* ( $\alpha$ ),  $1/^\circ\text{C}$ .

## *Температурные коэффициенты линейного расширения некоторых диэлектриков*

Материал	ТКе	Материал	ТКе
Полиэтилен	145	Полистирол	68
Поливинилхлорид	160	Слюда	37
Политетрафторэтилен (тефлон)	100	Фарфор	3,5
Полиметилметакрилат(оргстекло)	70	Кварц	0,55

## *Влажностные свойства*

- Гигроскопичность
- Влагопроницаемость
- Тропикостойкость

# Гигроскопичность

**Гигроскопичность**- способность изоляционных материалов впитывать влагу из окружающей среды.

Атмосферный воздух всегда содержит некоторое количество водяного пара:

- **Абсолютная влажность** оценивается массой водяного пара ( $m$ ) в единице объема.

Каждой температуре соответствует определенное значение абсолютной влажности при насыщении –  $m_{нас}$ . Большее количества воды воздух содержать не может, и она выпадает в виде росы. Абсолютная влажность, необходимая для насыщения воздуха, резко возрастает с увеличением температуры, т.е. растет и давление водяных паров.



- *Относительная влажность* является выражаемым в процентах отношением:

$$\varphi = \frac{m}{m_{нас}} 100$$

При температуре 20 градусов и нормальном атмосферном давлении 0,1 МПа значение  $m_{нас}$  составляет 17,3 г/ м<sup>3</sup> . За нормальную влажность воздуха принимают  $\varphi$  , равную 65%.

С увеличением температуры увеличивается  $m_{нас}$  и уменьшается относительная влажность воздуха и наоборот. Особые сырые помещения:  $\varphi = 100\%$  (стены, потолок с конденсатом влаги).

При соприкосновении твердой изоляции с атмосферой, содержащей влагу, происходит два явления:

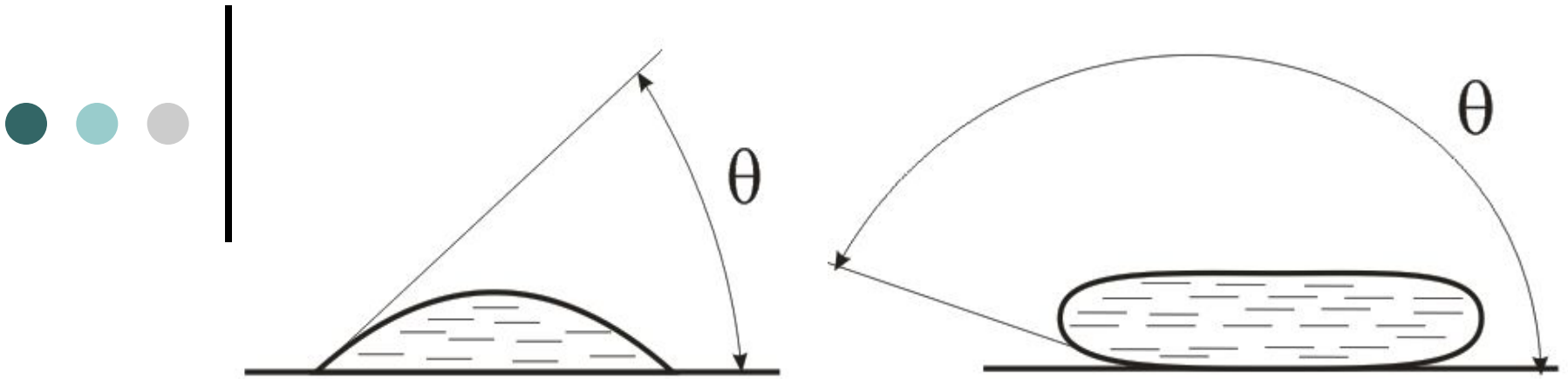
- ◆ *Адсорбция* - это смачивание поверхности материала ;
- ◆ *Абсорбция* – это проникновение влаги внутрь материала по причине его пористой или неплотной структуры.

Причиной абсорбции являются силы, которые действуют между молекулами воды и частицами материала на его поверхности:

- ◆ Если эти силы притягивающие - *гидрофильные поверхности*;
- ◆ Если силы отталкивающие- *гидрофобные поверхности*.

Способность диэлектрика смачиваться водой (или другой жидкостью) характеризуется *краевым углом смачивания*.





Угол смачивания :  $\theta < 90^\circ C$

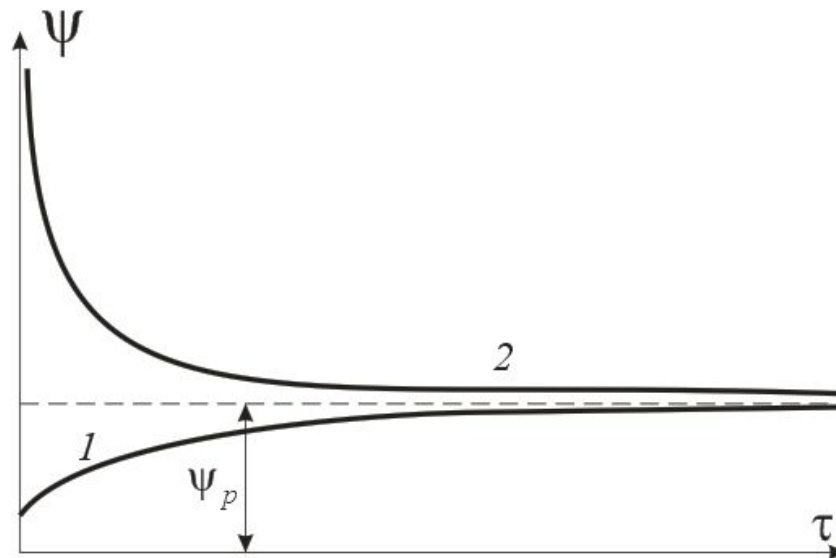
$\theta > 90^\circ C$

Полярные диэлектрики имеют гидрофильные поверхности (притягивают воду). Но гидрофильные поверхности можно превратить в гидрофобные: покрыть поверхности лаками.

**Адсорбированная влага** уменьшает поверхностное сопротивление материала.

- Проникновение влаги даже во внутримолекулярные поры объясняется тем, что *размер межмолекулярных пор составляет менее 1 нм*, а *молекулы воды имеют  $d=0,27$  нм*.

Если диэлектрик поместить в определенную среду с некоторой относительной влажностью и температурой, то через некоторое время он достигнет равновесной влажности ( $\psi_p$ )



Абсорбция влаги приводит к уменьшению сопротивления изоляции, электрической прочности и увеличению угла диэлектрических потерь.

***Наиболее гигроскопичны материалы, имеющие пористую структуру.***

О степени увлажнения можно судить по увеличению массы образца:

***Условный показатель степени увлажнения-влагопоглощаемость –  $W$ :***

$$W = \frac{m_1 - m_2}{m_0} \cdot 100, \%$$

- начальная масса материала ;

$m_2$  - масса материала в конце увлажнения.

$m_1$

**Однако количество поглощенной влаги не отражает степени изменения электрических свойств.**

---

*Если поглощенная влага способна образовывать нити или пленки по толщине материала между электродами, то даже при небольшом повышении влажности существенно ухудшатся электрические свойства.*

Если влага распределится по объему диэлектрика в виде несоединенных между включений, то влияние влаги на электрические свойства будет значительно меньше.

**Для уменьшения абсорбции используется пропитка материалов или покрытие их изоляционными лаками, но это лишь замедляет процесс увлажнения.**

**Единственный способ защиты от проникновения влаги - это герметизация.**

# Влагопроницаемость

- **Влагопроницаемость**- способность материала пропускать через себя пары воды.

Эта характеристика важна для материалов, применяемых в качестве шлангов для кабелей, компаундных заливок, защитных лаковых покрытий.

Количество влаги, проходящей через диэлектрик ( $m$ ) определяется по формуле:

$$m = \Pi(p_1 - p_2) \cdot S\tau / h$$

, где  $\Pi$  - влагопроницаемость, с;  $p_1$  и  $p_2$  - давление водяных паров вне и внутри материала,  $h$  – толщина материала,  $S$  - площадь,  $\tau$  - время.

# Механические свойства

- **Прочность**
- **Хрупкость**
- **Вязкость**
- **Вибропрочность**

# Механическая прочность

В процессе эксплуатации детали из изоляционных материалов подвергаются воздействию **механических нагрузок**:

- **растягивающих;**
- **сжимающих;**
- **изгибающих.**

**Количественной оценкой** способности материалов выдерживать механические нагрузки без разрушения являются **пределы прочности при растяжении**  $\sigma_p$ , **сжатию**  $\sigma_c$ , **изгибе**  $\sigma_u$ .

Единица измерения – **паскаль**:  $1\text{Па} = 1\text{ Н/м}^2$ .

Как известно у металлов значения пределов прочности при различных механических воздействиях имеют один порядок.

Для многих диэлектриков (*стекло, керамические материалы, многие пластмассы*) предел прочности при сжатии значительно больше, чем при растяжении и изгибе.

Например, у кварцевого стекла  $\sigma_c \approx 200 \text{ МПа}$

$$\sigma_p \approx 50 \text{ МПа}$$



- Механическая прочность некоторых диэлектриков зависит от *площади поперечного сечения*. Например, прочность стеклянного волокна  $d=0,01$  мм равна *800-1200 МПа*, что соответствует *прочности бронзы*.
- Механическая прочность *уменьшается* с *увеличением температуры*.
- Механическая прочность пористых диэлектриков зависит от относительной влажности воздуха.
- Способность материалов деформироваться под действием механических нагрузок определяет *пластичность материала*.

- **Хрупкость** - способность диэлектрика разрушаться без заметной пластической деформации.

Хрупкость зависит от структуры диэлектрика и **увеличивается** при увеличении **скорости нарастания механической нагрузки** и при воздействии **отрицательных температур**.

Механические нагрузки делят на:

- ▣ **статические** (медленно нарастающие);
- ▣ **динамические** (внезапно возникающие, ударные).

- **Количественной оценкой** способности диэлектрика выдерживать воздействие динамических нагрузок является – **ударная вязкость** ( $\sigma_{уд}$ ).

**Полиэтилен** -  $\sigma_{уд} = 100 \text{ кДж} / \text{м}^2$

**Керамика** -  $\sigma_{уд} = 2 - 5 \text{ кДж} / \text{м}^2$ .

$$\sigma_{уд} = \frac{W}{S},$$

где  $W$  – энергия, затраченная на излом образца изоляционного материала;

$S$  – площадь поперечного сечения.

- **Вязкость** ( внутреннее трение) – свойство жидкостей оказывать сопротивление перемещению одной их части относительно другой.
- **Количественной оценкой** вязкости является **коэффициент динамической вязкости** или **коэффициент внутреннего трения -  $\eta$** .  
**Вязкость зависит от температуры.**

- **Вибропрочность** - способность электроизоляционных материалов выдерживать без разрушения **длительное воздействие вибраций**, то есть повторяющихся колебаний определенной частоты и амплитуды.

*Такая проверка производится на готовых изделиях , которые крепят на вибростендах, подвергающихся вибрациям по заданному режиму .*

# Химические свойства

- **Растворимость .**

Это свойство важно для подбора растворителей лаков, а также для оценки стойкости изоляционных материалов к действию различных жидкостей, с которыми эти материалы соприкасаются в процессе изготовления изоляции ( например, при пропитке лаками) и в эксплуатации (изоляция маслонаполненных трансформаторов и т.п.).

*Растворимость твердых материалов* можно оценить по **количеству материала**, переходящему в раствор за единицу времени с единицы поверхности материала, соприкасающейся с растворителем.

- Как правило, легче всего растворяются вещества, близкие к растворителю **по химическому составу**: полярные вещества легче растворяются в полярных жидкостях, например, **каучук (резина)** растворяется в жидких углеводородах (**керосине, бензине и других нефтепродуктов**).
- **Химостойкость** - стойкость к коррозии различными химически активными веществами (**кислотами, щелочами, солевыми растворами**).
- При определении химостойкости образцы материалов на длительное время помещают в условия, близкие к эксплуатационным с точки зрения выбора концентрации химической активности среды.

После этого определяют изменение внешнего вида образцов, их массы и других характеристик.

Для масел и смол измеряют **кислотное число**, характеризующее **содержание** в материале **свободных кислот**.

**Кислотное число** – количество граммов едкого кали **КОН**, которое требуется для нейтрализации всех свободных кислот, содержащихся в 1 кг испытуемого образца ( например: 0,4 г КОН/кг или 0,4 мг КОН/г).

В трансформаторном масле **высокое кислотное число** является **признаком старения масла**.



- ***Радиационная стойкость*** - способность изоляционных материалов продолжать выполнять свои функции в условиях интенсивного облучения или после радиационного воздействия.
- Иногда радиационное воздействие на материалы используют с целью полезного изменения их структуры , улучшения или придания им новых свойств ( *радиационная сшивка полимеров*).

Воздействие радиации приводит к ***появлению дефектов в структуре материала***, которые со временем накапливаются.

- **Количественно радиационную стойкость** характеризуют **общим числом радиоактивных частиц**, попадающих на единицу площади вещества и вызывающих заметное ухудшение его изоляционных свойств – *нейтрон/м<sup>2</sup>*

Многие диэлектрики выдерживают дозы до

$$10^{22} \text{ нейтрон} / \text{м}^2$$

- **Светостойкость** - способность диэлектриков сохранять свои эксплуатационные характеристики под действием светового облучения.

Под действием света и особенно УФ-излучения происходит ускорение процесса старения некоторых материалов:

- Под действием света и особенно УФ-излучения происходит ускорение процесса старения некоторых материалов: *нефтяные масла, резина, капрон.*

*Под действием светового облучения некоторые материалы теряют механическую прочность и эластичность, в результате чего в них появляются трещины.*