



*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;

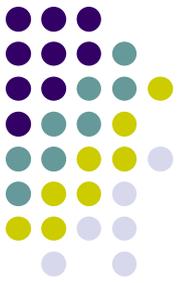
τ_o - срок службы изоляционного материала при $0^\circ C$;

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 $t_p = 2,5$ 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** (γ_T), Вт/(мК).



Значения коэффициентов теплопроводности некоторых материалов

Материал	γ_T	Материал	γ_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* (α), $1/^\circ\text{C}$.

Температурные коэффициенты линейного расширения некоторых диэлектриков

Материал	ТКе	Материал	ТКе
Полиэтилен	145	Полистирол	68
Поливинилхлорид	160	Слюда	37
Политетрафтор-этилен (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/ м³ . За нормальную влажность воздуха принимают φ , 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).

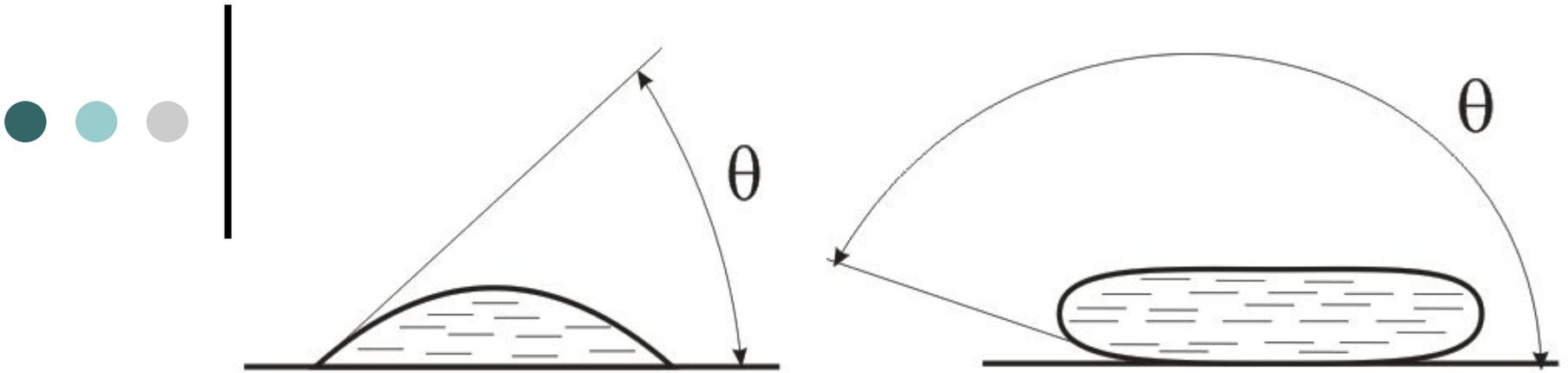
При соприкосновении твердой изоляции с атмосферой, содержащей влагу, происходит два явления:

- ◆ *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 : $\theta < 90^\circ C$

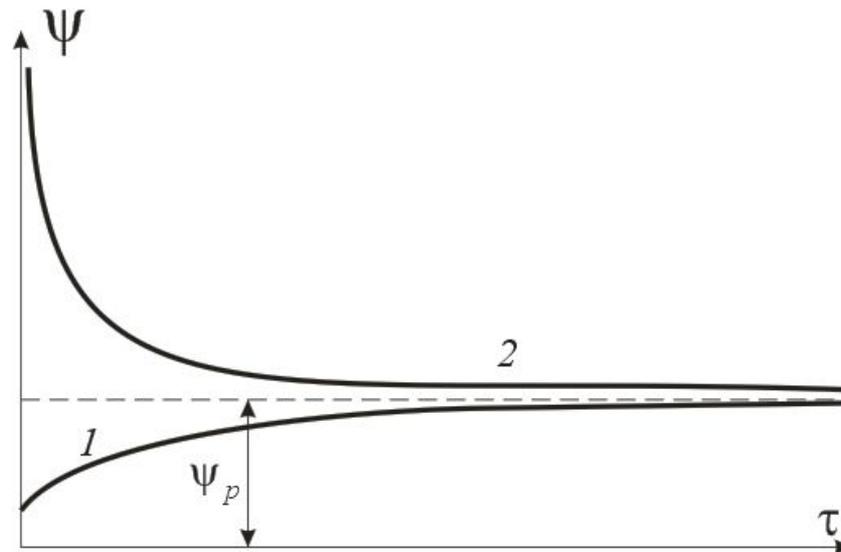
$\theta > 90^\circ C$

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 (ψ_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 Π - влагопроницаемость, с; p_1 и p_2 - давление водяных паров вне и внутри материала, h – толщина материала, S - площадь, τ - 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** σ_p , **сжатию** σ_c , **изгибе** σ_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 - η** .
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/м²*

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.