

ДИЭЛЕКТРИКИ. ЧАСТЬ 2

Оглавление

ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ПОТЕРИ.....	2
Физическая сущность диэлектрических потерь	3
Зависимость $\operatorname{tg} \delta$ от частоты.....	4
Зависимость $\operatorname{tg} \delta$ от температуры	4
Зависимость $\operatorname{tg} \delta$ от влажности.....	4
Зависимость $\operatorname{tg} \delta$ от напряжения.....	5
ПРОБОЙ ИЗОЛЯЦИИ.....	6
Электрическая прочность.....	6
Средние значения электрической прочности диэлектриков [В/м].....	8
Пробой твердых диэлектриков	8
Значения пробивной напряженности диэлектриков	8
Виды пробоя твердых диэлектриков.....	9
Электрический, или собственный, пробой	9
Тепловой	9
Электрохимический пробой	10
Электрохимический пробой.....	10
Ионизационный пробой.....	10
Электрический пробой в газах.....	10
Классификация электрических разрядов в газах.....	11
Искровой разряд.....	13
Коронный разряд.....	14
Дуговой разряд.....	15
Применение дугового разряда	17
Глеющий разряд.....	17
ПЕРЕКРЫТИЕ ИЗОЛЯЦИИ.....	19
Зависимость пробивного напряжения $U_{пр}$ и пробивной прочности $E_{прот}$ различных факторов.....	20
Время приложения напряжения	20
Температура.....	21
Влажность.....	21
ТЕПЛОВЫЕ СВОЙСТВА ЭЛЕКТРОИЗОЛЯЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ	21
Нагревостойкость.....	21

ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ПОТЕРИ

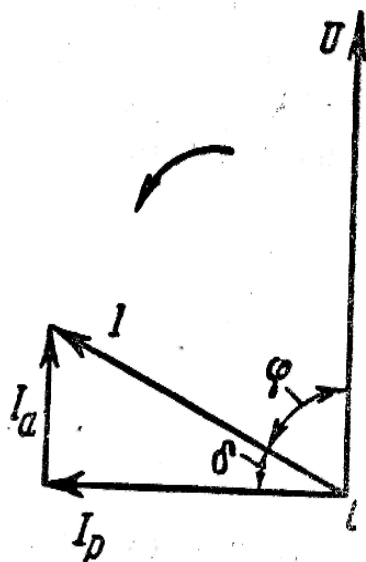
Диэлектрические потери — электрическая мощность, поглощаемая в диэлектрике под действием приложенного к нему напряжения. Эта мощность рассеивается в изоляции, превращаясь в тепло.

Величина диэлектрических потерь P [Вт] в участке изоляции с емкостью C [ф] при действующем значении *переменного синусоидального напряжения* U [В] и частоте f [Гц] (круговая частота $\omega = 2\pi f$ [сек⁻¹]) определяется из формулы

$$P = U^2 \omega C \operatorname{tg} \delta [\text{Вт}].$$

Здесь δ — **угол диэлектрических потерь** в векторной диаграмме токов в диэлектрике. **Тангенс этого угла равен отношению активного и реактивного токов:**

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{I_a}{I_p}$$



Угол диэлектрических потерь — важная характеристика как материала (диэлектрика), так и электроизоляционной конструкции (участка изоляции). Чем больше этот угол, тем больше (при прочих равных условиях) диэлектрические потери. Обычно в качестве характеристики материала или конструкции дается **величина** тангенса угла диэлектрических потерь $\operatorname{tg} \delta$. Иногда вводится **добротность изоляции** Q - величина, **обратная тангенсу** угла потерь:

$$Q = \frac{1}{\operatorname{tg} \delta} = \operatorname{ctg} \delta.$$

Значения $\operatorname{tg} \delta$ для наилучших электроизоляционных материалов, применяемых в технике высоких частот и высоких напряжений, порядка **тысячных или даже десяти-тысячных долей единицы**; для материалов более низкого качества, применяемых в менее ответственных случаях, $\operatorname{tg} \delta$ может составлять **сотые или иногда десятые доли единицы**.

Произведение $\eta = \varepsilon \cdot \operatorname{tg} \delta$ называется **коэффициентом диэлектрических потерь** данного материала.

При работе диэлектрика под *постоянным напряжением* полные потери мощности определяются формулой

$$P_{\text{пост}} = UI = \frac{U^2}{R_{\text{из}}} = U^2 G_{\text{из}} [\text{Вт}],$$

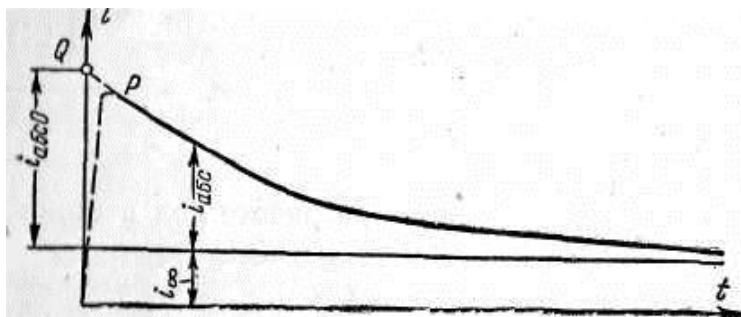
где I - ток утечки [А];

$R_{\text{из}}$ — сопротивление изоляции [Ом];

$G_{\text{из}}$ — проводимость, [Ом⁻¹].

Физическая сущность диэлектрических потерь

При включении диэлектрика под постоянное напряжение U изменение тока I , проходящего через диэлектрик, от времени имеет вид:



Исключая из рассмотрения начальный участок кривой OP , можно разбить ток i на две составляющие:

- установившийся ток i_{∞} , имеющий постоянную величину – это *сквозной* ток при постоянном напряжении (равен $\frac{U}{R_{\text{из}}}$), и
- **ток абсорбции** $i_{\text{абс}}$, спадающий по закону

$$i_{\text{абс}} = \frac{U}{R_{\text{абс}}} e^{-\frac{t}{T}},$$

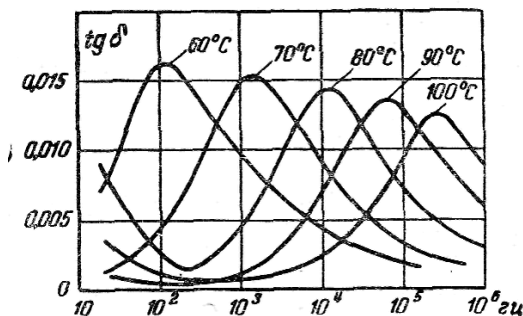
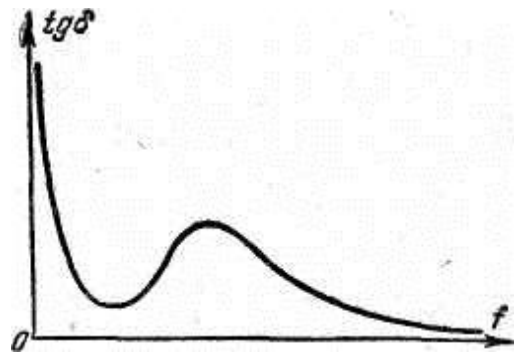
где $R_{\text{абс}}$ – сопротивление материала с учетом процесса поляризации.

В *дипольных диэлектриках* ток абсорбции вызывается процессом ориентации дипольных молекул. Кроме того, возможен поворот частей дипольных молекул, а также другие виды переброса молекул из одного положения в другое. Однако и в чистых *нейтральных* диэлектриках могут наблюдаться токи абсорбции: они объясняются практически неизбежной неоднородностью электрических свойств диэлектрика в различных местах, образованием под действием внешнего поля объемных зарядов в диэлектрике и другими причинами, вызывающими процессы перераспределения зарядов по объёму диэлектрика.

Так как ток абсорбции может существовать при всяких изменениях напряжения на диэлектрике, потери мощности при переменном напряжении больше, чем при постоянном напряжении той же величины.

Зависимость $\operatorname{tg} \delta$ от частоты

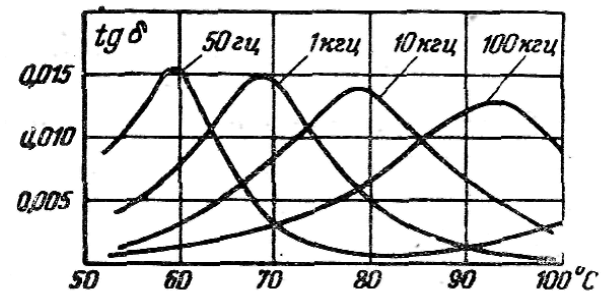
В самом общем виде график этой зависимости имеет вид:



Зависимости тангенса угла диэлектрических потерь дипольного диэлектрика — поливинилацетата от частоты.

Зависимость $\operatorname{tg} \delta$ от температуры

Как общее правило, $\operatorname{tg} \delta$ существенно увеличивается при повышении температуры. Условия работы изоляции будут при этом более тяжелыми. Рост $\operatorname{tg} \delta$ вызван повышением как проводимости сквозного тока $G_{из}$, так и проводимости тока абсорбции $\frac{1}{R_{абс}}$.



Как видно, при возрастании частоты переменного напряжения температура, соответствующая максимуму угла потерь, на семействе кривых $\operatorname{tg} \delta$ сдвигается в сторону возрастания температуры, т. е. в область более низких вязкостей. Соответственно при возрастании температуры на семействе кривых зависимости от частоты максимум $\operatorname{tg} \delta$ смещается в область более высоких частот.

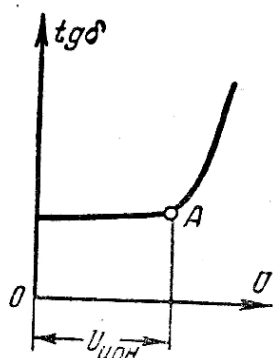
Зависимость $\operatorname{tg} \delta$ от влажности

У гигроскопичных диэлектриков величина $\operatorname{tg} \delta$ заметно возрастает при увеличении влажности. Таким образом, мы еще раз подтверждаем высказанное ранее положение о том, что высокая влажность ухудшает свойства электрической изоляции.

Зависимость $tg \delta$ от напряжения

При оценке качества изоляции (в особенности изоляции высоковольтных кабелей, аппаратов, машин и др.), помимо абсолютной величины $tg \delta$, во многих случаях большое значение имеет характер изменения $tg \delta$ в зависимости от приложенного напряжения U (или напряженности поля E).

Во многих случаях $tg \delta$ от напряжения не зависит, так что при прочих равных условиях диэлектрические потери возрастают пропорционально квадрату приложенного к изоляции напряжения: $P = U^2 \omega C tg \delta$.



Однако в ряде случаев зависимость $tg \delta$ от напряжения имеет следующий характер: на некотором участке величина $tg \delta$ почти неизменна, при уменьшении же напряжения сверх определенного предела $U_{\text{ион}}$ кривая $tg \delta(U)$ начинает резко повышаться. Эта кривая называется *кривой ионизации*; точка A кривой называется *точкой ионизации* и соответствует началу ионизации (образования короны или тихих разрядов) во включениях воздуха или других газов внутри изоляции. Такие включения легко образуются, в частности, в недостаточно плотной и не подвергнутой глубокой вакуумной сушке волокнистой или прессованной изоляции.

Ионизация воздуха связана с двумя весьма важными моментами:

- со значительным поглощением энергии, что и вызывает резкое увеличение потерь P и $tg \delta$;
- с химическими процессами, заключающимися в основном в том, что часть содержащегося в воздухе кислорода O_2 переходит в его видоизмененную форму озон O_3 , а также образуются окислы азота. Эти вещества, в особенности в присутствии даже малых количеств влаги, действуют как сильные окислители на большую часть органических изоляционных материалов, вызывая их постепенное разрушение. Неорганические материалы обычно стойки к действию озона.

Рабочее напряжение изоляции должно быть ниже напряжения ионизации $U_{\text{ион}}$, соответствующего точке A . Следует считать более высококачественной такую изо-

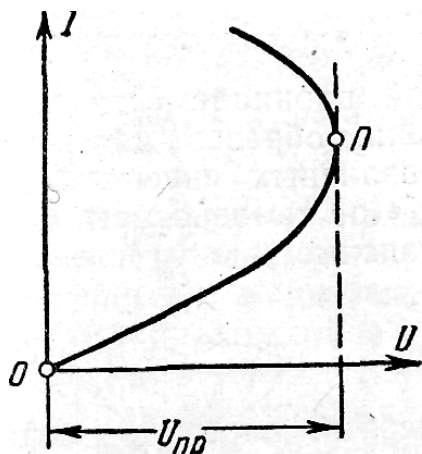
лящую, у которой напряжение ионизации будет более высоким, а подъем кривой ионизации после точки A — более пологим.

ПРОБОЙ ИЗОЛЯЦИИ

Электрическая изоляция не может без вреда для себя выдерживать неограниченно высокое напряжение. Диэлектрик, находясь в электрическом поле, может потерять свойства изоляционного материала, если напряжённость поля превысит некоторое критическое значение. *Явление образования проводящего канала в диэлектрике под действием электрического поля называют пробоем.*

Электрическая прочность

Если мы будем повышать приложенное к изоляции напряжение, то, в конце концов, произойдет пробой изоляции. Пред-пробойное состояние диэлектрика характеризуется резким возрастанием тока, отступлением от закона Ома в сторону увеличения проводимости. При этом ток проводимости, идущий через изоляцию, чрезвычайно резко возрастает, а сопротивление ее снижается, так что практически мы получаем короткое замыкание между электродами, к которым подведено напряжение.



Зависимость тока через изоляцию I от напряжения U (*вольтамперная характеристика изоляции*) имеет точку пробоя P , для которой $\frac{dI}{dU} = \infty$. Минимальное приложенное к диэлектрику напряжение, приводящее к его пробоею, называется *пробивным напряжением $U_{пр}$* .

Дальнейшие явления, имеющие место в изоляции после пробоя, определяются как характером изоляционного материала, так и мощностью источника электрической энергии. В месте пробоя возникает искра или даже электрическая дуга, которая может вызвать оплавление, обгорание, растрескивание и тому подобные изменения диэлектрика, а также и электродов. После снятия напряжения в твердом диэлектрике может быть обнаружен след пробоя в виде пробитого (откуда и название «пробой»), проплавленного, прожженного или тому подобного отверстия, вообще говоря, неправильной формы.

При повторном приложении напряжения к подвергавшейся пробой твердой изоляции оказывается, что пробой по уже пробитому месту происходит, как правило, при сравнительно весьма малом напряжении. Таким образом, пробой твердой изоляции в электрической машине, аппарате, кабеле и т. п. означает аварию, выводящую данное устройство из строя и требующую серьезного ремонта.

Если же пробой происходил в жидком или газообразном диэлектрике, то в силу большой подвижности частиц после снятия напряжения пробитый участок диэлектрика полностью восстанавливает свою первоначальную величину пробивного напряжения (конечно, если мощность и длительность электрической дуги не были настолько значительны, чтобы вызвать существенные изменения диэлектрика во всем его объеме).

Пробивное напряжение изоляции зависит от ее толщины, т. е. от расстояния между электродами h . Чем толще слой данного электроизоляционного материала, тем выше его пробивное напряжение. В то же время слои одной и той же толщины из разных электроизоляционных материалов имеют весьма различные значения пробивных напряжений. Это даёт основание для введения характеристики материала, определяющей его способность противостоять пробой - **электрической прочности или пробивной прочности $E_{пр}$** .

Для простейшего случая однородного электрического поля в диэлектрике можно принять:

$$U_{пр} = E_{пр} h,$$

откуда

$$E_{пр} = \frac{U_{пр}}{h} \left[\frac{\text{кВ}}{\text{см}}, \frac{\text{кВ}}{\text{мм}} \right].$$

Таким образом, **электрическая прочность диэлектрика может рассматриваться как пробивная напряженность электрического поля, т. е. та величина напряженности поля в диэлектрике, при достижении которой происходит его пробой.**

Электрическая прочность высококачественных твёрдых диэлектриков, как правило, выше, чем жидких и тем более газообразных при нормальном давлении.

Средние значения электрической прочности диэлектриков [В/м]

Пробой газов:	
в неоднородном поле	10^5
в однородном поле	10^6
Пробой жидких диэлектриков:	
примесный	10^6
собственный	10^8
Пробой твердых диэлектриков:	
электрохимический	10^6
электротепловой	10^7
электронный	10^9

Пробой твердых диэлектриков

В таблице приведены значения пробивной напряженности (при нормальных условиях и в однородном постоянном поле) некоторых наиболее распространенных твердых диэлектриков.

Значения пробивной напряженности диэлектриков

Материал	Пробивная напряженность, кВ/мм
Бумага, пропитанная парафином	10,0-25,0
Воздух	3,0
Масло минеральное	6,0 -15,0
Мрамор	3,0 - 4,0
Миканит	15,0 - 20,0
Электрокартон	9,0 - 14,0
Слюда	80,0 - 200,0
Стекло	10,0 - 40,0
Фарфор	6,0 - 7,5
Шифер	1,5 - 3,0

Виды пробоя твердых диэлектриков

Различают несколько видов пробоя: чисто электрический, тепловой, электромеханический, электрохимический и ионизационный.

Электрический, или собственный, пробой

Это непосредственное разрушение структуры диэлектрика силами электрического поля. Подобный вид пробоя развивается практически мгновенно за $10^{-7} \dots 10^{-8}$ с и не обусловлен тепловой энергией. Это чисто электронный процесс, когда из немногих начальных электронов в твёрдом теле создается электронная лавина. В неоднородных электрических полях пробивное напряжение однородного диэлектрика меньше, чем в однородных.

Тепловой

Электрическая прочность твёрдых диэлектриков практически не зависит от температуры до некоторого её критического значения, когда наблюдается заметное снижение электрической прочности. В этом случае наступает *тепловой пробой*, который связан с нагревом изоляции в электрическом поле.

Процесс идет следующим образом. После подачи напряжения на диэлектрик в нём начинает выделяться теплота потерь, и он разогревается. Повышение температуры приводит к росту потерь, а следовательно, к ещё большему разогреву. В конце концов, в диэлектрике происходят существенные изменения (расплавление, обугливание и другие процессы, в зависимости от природы материала) и его собственная электрическая прочность снижается настолько, что происходит пробой.

Тепловой пробой может иметь *локальный* характер, при котором средняя температура всего объёма изолятора существенно не изменяется. Таким образом, тепловой пробой существенно зависит от отвода выделяющегося в диэлектрике тепла в окружающую среду, поэтому электрическая прочность при тепловом пробое является характеристикой не только материала, но и самого изделия.

Пробивное напряжение при тепловом пробое существенно зависит от времени приложения напряжения. Если это время невелико, то диэлектрик не успевает разогреться и пробой не наступает. С ростом частоты электрического напряжения и ростом окружающей температуры пробивное напряжение уменьшается.

Электрохимический пробой

Подготавливается механическим разрушением материала (образование макроскопических трещин) силами электрического поля (давление электродов).

Электрохимический пробой

Этот вид пробоя связан с химическим изменением материала в электрическом поле, например, прораствание металлических дендритов (древовидные кристаллы) в результате электролиза. Этот вид пробоя имеет существенное значение при повышенных температурах и высокой влажности воздуха. Электрохимический пробой может иметь место при высоких частотах, если в закрытых порах материала происходит ионизация газа, сопровождающаяся тепловым эффектом и восстановлением оксидов металлов переменной валентности, например, в керамике. Развитие электрохимического пробоя требует много времени, поскольку он связан с явлением электропроводности диэлектрика, и во многом зависит от материала электродов.

Ионизационный пробой

Объясняется действием на диэлектрик химически агрессивных веществ, образующихся в газовых порах диэлектрика при частотных разрядах, а также эрозией диэлектрика на границе пор ионами газа.

Электрический пробой в газах

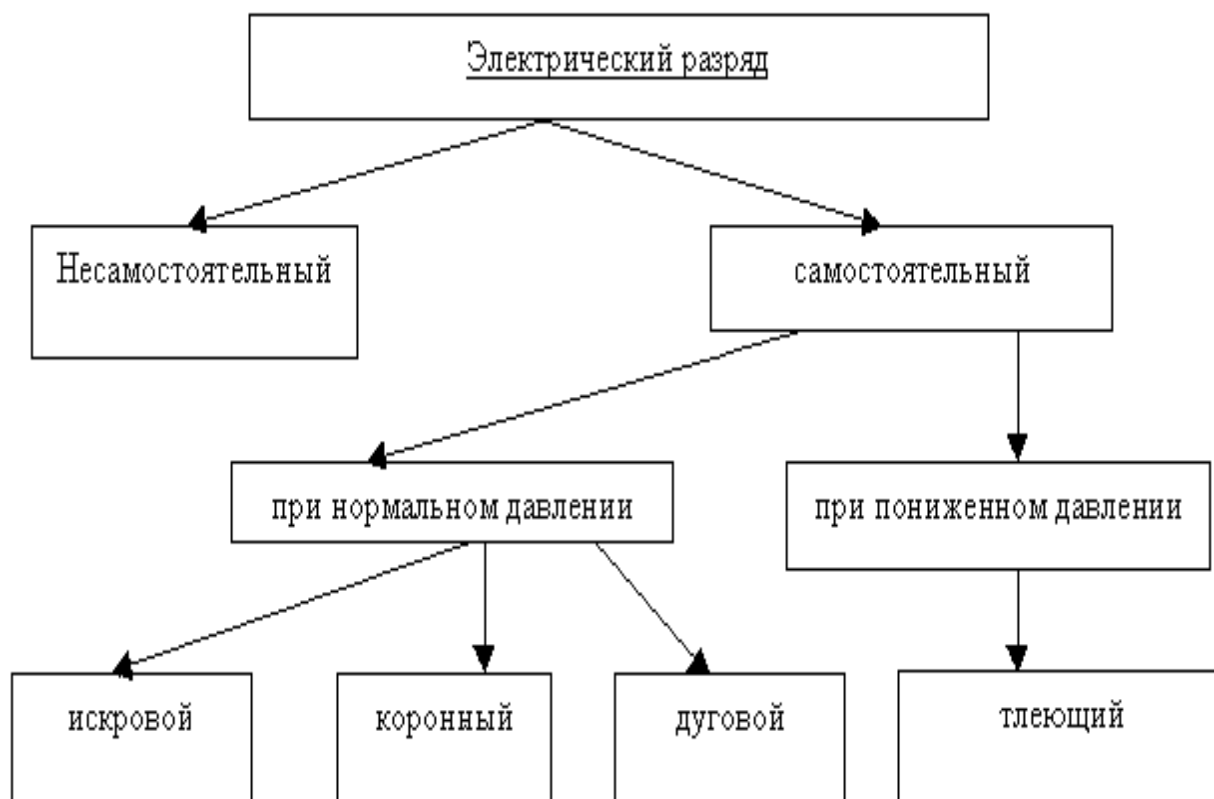
В естественном состоянии газы не проводят электрического тока, т.е. являются диэлектриками. В этом легко убедиться с помощью простого тока, если цепь прервана воздушным промежутком.

Изолирующие свойства газов объясняются тем, что атомы и молекулы газов в естественном состоянии являются нейтральными незаряженными частицами. Отсюда ясно, что для того, чтобы сделать газ проводящим, нужно тем или иным способом внести в него или создать в нем свободные носители заряда – заряженные частицы. При этом возможны два случая: либо эти заряженные частицы создаются действием какого-нибудь внешнего фактора или вводятся в газ извне – несамостоятельная проводимость, либо они создаются в газе действием самого электрического поля, существующего между электродами – самостоятельная проводимость.

Электрический разряд в газах - прохождение электрического тока через газовую среду под действием электрического поля, сопровождающееся изменением состояния газа. Электрические разряды в газах подчиняются закону Ома лишь при очень малой приложенной извне разности потенциалов, поэтому их электрические свойства описывают с помощью вольтамперной характеристики.

Газы становятся электропроводными при их ионизации.

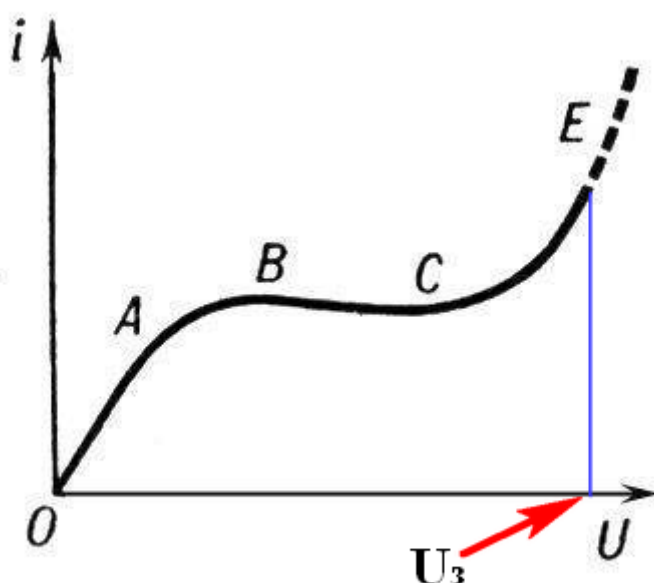
Классификация электрических разрядов в газах



Если электрический разряд происходит только при вызывающем и поддерживающем ионизацию внешнем воздействии (при действии т. н. внешних ионизаторов), его называют **несамостоятельным газовым разрядом**.

Электрический разряд в газах, продолжающийся и после прекращения действия внешнего ионизатора, называется **самостоятельным**.

Когда ионизация газа происходит при непрерывном действии внешнего ионизатора и малом значении разности потенциалов между анодом и катодом в газе, начинается "**тихий разряд**".



Вольтамперная характеристика тихого разряда

При повышении разности потенциалов (напряжения) сила тока тихого разряда сперва увеличивается пропорционально напряжению (участок кривой OA на), затем рост тока с ростом напряжения замедляется (участок кривой AB), и когда все заряженные частицы, возникшие под действием ионизатора в единицу времени, уходят за то же время на катод и на анод, усиления тока с ростом напряжения не происходит (участок BC). При дальнейшем росте напряжения ток снова возрастает и тихий разряд переходит в **несамостоятельный лавинный разряд** (участок CE).

В этом случае сила тока определяется как интенсивностью воздействия ионизатора, так и газовым усилением, которое зависит от давления газа и напряжённости электрического поля в пространстве, занимаемом разрядом.

Тихий разряд наблюдается при давлении газа порядка атмосферного.

Внешними ионизаторами могут быть:

- естественное радиоактивное излучение,

- космические лучи,
- потоки фотонов (сильное световое облучение),
- пучки быстрых электронов и т. д.

Ионизаторы двух последних типов используются (преимущественно в импульсном режиме) в газовых лазерах.

Переход несамостоятельного разряда в самостоятельный характеризуется резким усилением электрического тока (точка E на кривой) и называется **электрическим пробоем газа**. Соответствующее напряжение U_3 называется **напряжением зажигания**.

Искровой разряд

При достаточно большой напряженности поля (около 3 МВ/м) между электродами появляется электрическая искра, имеющая вид ярко светящегося извилистого канала, соединяющего оба электрода. Газ вблизи искры нагревается до высокой температуры и внезапно расширяется, отчего возникают звуковые волны, и мы слышим характерный треск.

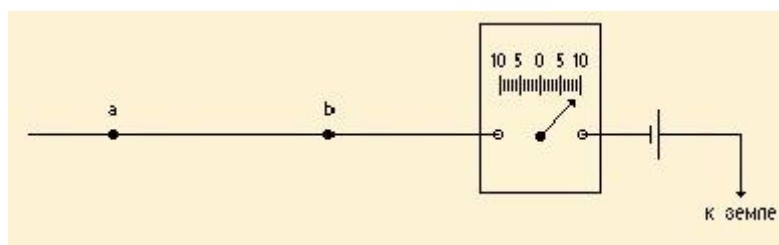


Описанная форма газового разряда носит название **искрового разряда** или **искрового пробоя газа**. При наступлении искрового разряда газ внезапно утрачивает свои диэлектрические свойства и становится хорошим проводником. Напряженность поля, при которой наступает искровой пробой газа, имеет различное значение у разных газов и зависит от их состояния (давления, температуры). Чем больше расстояние между электродами, тем большее напряжение между ними необходимо для наступления искрового пробоя газа. Это напряжение называется напряжением пробоя.

Коронный разряд

Возникновение ионной лавины не всегда приводит к искре, а может вызвать и разряд другого типа – коронный разряд.

Если натянуть на двух высоких изолирующих подставках металлическую проволоку ab , имеющую диаметр несколько десятых миллиметра, и соединить ее с отрицательным полюсом генератора, дающего напряжение несколько тысяч вольт. А второй полюс генератора отвести к Земле, то получится своеобразный конденсатор, обкладками которого являются проволока и стены комнаты, которые, конечно, со-общаются с Землей.



Поле в этом конденсаторе весьма неоднородно, и напряженность его вблизи тонкой проволоки очень велика. Повышая постепенно напряжение и наблюдая за проволокой в темноте, можно заметить, что при известном напряжении возле проволоки появляется слабое свечение (**корона**), охватывающее со всех сторон проволоку; оно сопровождается шипящим звуком и легким потрескиванием.

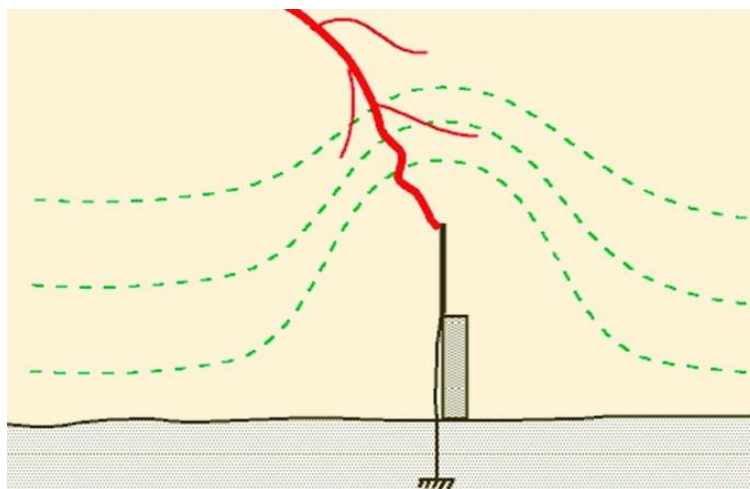
Если между проволокой и источником включен чувствительный гальванометр, то с появлением свечения гальванометр показывает заметный ток, идущий от генератора по проводам к проволоке и от нее по воздуху комнаты к стенам, между проволокой и стенами переносится ионами, образованными в комнате благодаря ударной ионизации.

Таким образом, свечение воздуха и появление тока указывает на сильную ионизацию воздуха под действием электрического поля. Коронный разряд может возникнуть не только вблизи проволоки, но и у острия и вообще вблизи любых электродов, возле которых образуется очень сильное неоднородное поле.

Громоотвод. Подсчитано, что в атмосфере всего земного шара происходит одновременно около 1800 гроз, которые дают в среднем около 100 молний в секунду. И хотя вероятность пораже-

ния молнией какого-либо отдельного человека ничтожно мала, тем не менее молнии причиняют немало вреда. Достаточно указать, что в настоящее время около половины всех аварий в крупных линиях электропередачи вызывается молниями. Поэтому, защита от молнии представляет собой важную задачу.

Ломоносов и Франклин не только объяснили электрическую природу молнии, но и указали, как можно построить громоотвод, защищающий от удара молнии. Громоотвод представляет собой длинную проволоку, верхний конец которой заостряется и укрепляется выше самой высокой точки защищаемого здания. Нижний конец проволоки соединяют с металлическим листом, а лист закапывают в Землю на уровне почвенных вод. Во время грозы на Земле появляются большие индуцированные заряды и у поверхности Земли появляется большое электрическое поле. Напряженность его очень велика около острых проводников, и поэтому на конце громоотвода зажигается коронный разряд. Вследствие этого индуцированные заряды не могут накапливаться на здании и молнии не происходит. В тех же случаях, когда молния все же возникает (а такие случаи очень редки), она ударяет в громоотвод и заряды уходят в Землю, не причиняя вреда зданию.



В некоторых случаях коронный разряд с громоотвода бывает настолько сильным, что у острия возникает явно видимое свечение. Такое свечение иногда появляется и возле других заостренных предметов, например, на концах корабельных мачт, острых вершущек деревьев, и т.д. Это явление было замечено еще несколько веков тому назад и вызывало суеверный ужас мореплавателей, не понимавших истинной его сущности.

Дуговой разряд

В 1802 году русский физик В.В. Петров (1761-1834) установил, что если присоединить к полюсам большой электрической батареи два кусочка древесного угля и, приведя угли в соприкосновение, слегка их раздвинуть, то между концами углей образуется яркое пламя, а сами концы углей раскалятся добела, испуская ослепительный свет.

Простейший прибор получения электрической дуги состоит из двух электродов, в качестве которых лучше брать не древесный уголь, а специально изготавливаемые

стержни, получаемые прессованием смеси графита, сажи и связующих веществ. Источником тока может служить осветительная сеть, в которую для безопасности включается реостат.

Заставляя гореть дугу при постоянном токе в сжатом газе (20 атм), удалось довести температуру конца положительного электрода до 5900°C , т.е. до температуры поверхности солнца. Еще более высокой температурой обладает столб газов и паров, обладающий хорошей электрической проводимостью, через который идет электрический заряд. Энергичная бомбардировка этих газов и паров электронами и ионами, подгоняемыми электрическим полем дуги, доводит температуру газов в столбе до $6000\text{-}7000^{\circ}\text{C}$. Такая сильная ионизация газа возможна только благодаря тому, что катод дуги испускает очень много электронов, которые своими ударами ионизируют газ в разрядном пространстве. Сильная электронная эмиссия с катода обеспечивается тем, что катод дуги сам накален до очень высокой температуры (от 2200 до 3500°C).

Когда для зажигания дуги угли приводятся в соприкосновение, то в месте контакта, обладавшем очень большим сопротивлением, выделяется почти все джоулево тепло проходящего через угли тока. Поэтому концы углей сильно разогреваются, и этого достаточно для того, чтобы при их раздвижении между ними вспыхнула дуга. В дальнейшем катод дуги поддерживается в накаленном состоянии самим током, проходящим через дугу. Главную роль в этом играет бомбардировка катода падающими на него положительными ионами.



Применение дугового разряда

Освещение. Вследствие высокой температуры электроды дуги испускают ослепительный свет (свечение столба дуги слабее, так как излучающая способность газа мала), и поэтому электрическая дуга является одним из лучших источников света. Она потребляет всего около 3 Вт на канделу и является значительно более экономичной, нежели наилучшие лампы накаливания. Электрическая дуга впервые была использована для освещения в 1875 году русским инженером-изобретателем П.Н. Яблочкинским (1847-1894) и получила название «русского света» или «северного света».

Сварка. Электрическая дуга применяется для сварки металлических деталей. Свариваемые детали служат положительным электродом; касаясь их углем, соединенным с отрицательным полюсом источника тока, получают между телами и углем дугу, плавящую металл.

Ртутная дуга. Большой интерес представляет ртутная дуга, горящая в кварцевой трубке, так называемая кварцевая лампа. В этой лампе дуговой разряд происходит не в воздухе, а в атмосфере ртутного пара, для чего в лампу вводят небольшое количество ртути, а воздух откачивают. Свет ртутной дуги чрезвычайно богат ультрафиолетовыми лучами, обладающими сильным химическим и физиологическим действием. Чтобы можно было использовать это излучение, лампу делают не из стекла, которое сильно поглощает УФО, а из плавленого кварца. Ртутные лампы широко используют при лечении разнообразных болезней, а также при научных исследованиях как сильный источник ультрафиолетового излучения.

Тлеющий разряд

Существует ещё одна форма самостоятельного разряда в газах – так называемый тлеющий разряд. Для получения этого типа разряда нужно использовать стеклянную трубку длиной около полуметра, содержащую два металлических электрода



Присоединим электроды к источнику постоянного тока с напряжением несколько тысяч вольт (годиться электрическая машина) и будем постепенно откачивать из трубки воздух. При атмосферном давлении газ внутри трубки остаётся тёмным, так как приложенное напряжение в несколько тысяч вольт недостаточно для того, чтобы пробить длинный газовый промежуток. Однако когда давление газа достаточно понизится, в трубке вспыхивает светящийся разряд. Он имеет вид тонкого

шнура (в воздухе – малинового цвета, в других газах других цветов), соединяющего оба электрода. В этом состоянии газовый столб хорошо проводит электричество.

При дальнейшей откачке светящийся шнур размывается и расширяется, и свечение заполняет почти всю трубку. При давлении газа в несколько десятых миллиметра ртутного столба разряд имеет типичный вид, схематически изображённый на рис. Различают следующие две главные части разряда: 1) несветящуюся часть, прилегающую к катоду, получившую название тёмного катодного пространства; 2) светящийся столб газа, заполняющий всю остальную часть трубки, вплоть до самого анода. Эта часть разряда носит название положительного столба. При подходящем давлении положительный столб может распадаться, а отдельные слои, разделённые тёмными промежутками, так называемые страты.

Описанная форма разряда называется тлеющим разрядом. Почти всё количество света, испускаемого при разряде, исходит от его положительного столба. При этом цвет свечения зависит от рода газа. При тлеющем разряде газ хорошо проводит электричество, а значит, в газе всё время поддерживается сильная ионизация. Причинами ионизации газа в тлеющем разряде являются ионизация электронным ударом и выбивание электронов с катода положительными ионами (вторичная электронная эмиссия с катода).

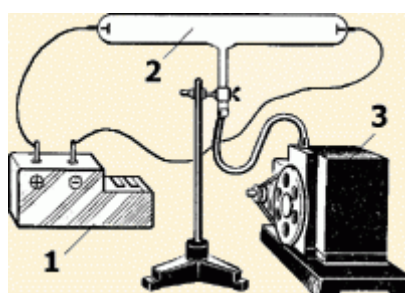
В настоящее время трубки с тлеющим разрядом находят практическое применение как источник света – газосветные лампы. Для целей оснащения с успехом применяются газосветные лампы, в которых разряд происходит в *парах ртути*, причём вредное для зрения ультрафиолетовое излучение поглощается слоем фосфоресцирующего вещества, покрывающего изнутри стенки лампы. Фосфоресцирующее вещество начинает светиться видимым светом, который добавляется к собственному свечению паров ртути, давая в результате свет, близкий по характеристикам к дневному свету (газосветные лампы дневного света). Такие лампы не только дают очень приятное “естественное” освещение, но и значительно (в 3-4 раза) экономичнее лампочек накаливания.

Газосветные лампы применяются также для декоративных целей. В этих случаях им придают очертания букв, различных фигур и т. д. и наполняют газом с

красивым цветом свечения (**неоном**, делающим оранжево – красное свечение, или **аргоном** с синевато – зелёным свечением).

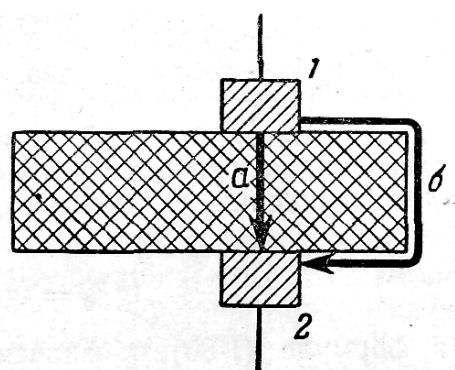
Важнейшее применение тлеющий разряд получил в сравнительно недавно созданных квантовых источниках света – **газовых лазерах**.

Обычно этот заряд возникает при давлениях в газе значительно ниже атмосферного: 1–10 Па. Прделаем опыт. Из стеклянной трубки 2 с электродами, подключенными к высоковольтному источнику тока 1, насосом 3 будем откачивать воздух.



Через некоторое время воздух, оставшийся в трубке, начнет испускать неяркий красно-малиновый свет. Используя вместо воздуха другие разреженные газы, можно наблюдать свечения и других оттенков. Разреженные водород и гелий, например, испускают сине-зеленый свет, а газ неон – красно-оранжевый. Трубки с этими газами, изогнутые в виде букв и других фигур, используют для изготовления светящихся надписей на магазинах, кинотеатрах и т. д.

ПЕРЕКРЫТИЕ ИЗОЛЯЦИИ

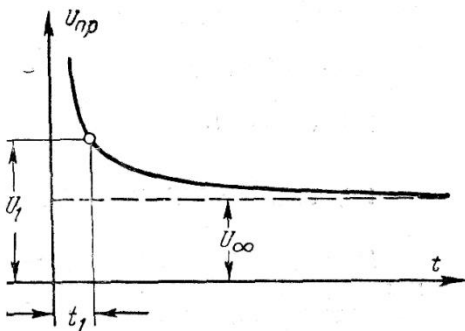


Пробивная прочность высококачественных твердых диэлектриков, как правило выше, чем жидких, и, тем более, чем газообразных диэлектриков. Поэтому, если расстояние между ближайшими друг к другу точками электродов 1 и 2 по поверхности твердой изоляции не намного превосходит кратчайшее расстояние между электродами сквозь изоляцию a , то при повышении приложенного к изоляции напряжения может произойти в первую очередь не пробой сквозь толщину изоляции (стрелка a), а **поверхностный разряд** или **перекрытие изоляции**. При

этом происходит разряд в прилегающем к твердой изоляции слое газообразного (например, воздуха) или жидкого диэлектрика (стрелка б).

Для надежной работы любой электрической машины, аппарата или другого электрического устройства рабочее напряжение ее изоляции $U_{\text{раб}}$ должно быть меньше пробивного напряжения. Отношение $\frac{U_{\text{пр}}}{U_{\text{раб}}}$ называют **коэффициентом запаса электрической прочности изоляции**.

Зависимость пробивного напряжения $U_{\text{пр}}$ и пробивной прочности $E_{\text{пр}}$ от различных факторов



Время приложения напряжения

Развитие **теплового** пробоя требует накопления в диэлектрике тепла, на что нужно некоторое время — тем меньше, чем больше приложенное к диэлектрику напряжение. Зависимость пробивного напряжения (для теплового механизма пробоя) от времени приложения напряжения (*экспозиции*) t называется **кривой жизни изоляции**.

Если мы приложим к диэлектрику напряжение U_1 на промежуток времени, меньший, чем t_1 , и затем снимем напряжение, то диэлектрик еще не успеет разогреться и не будет пробит. Диэлектрик способен неограниченно долго выдерживать напряжение, величина которого меньше, чем напряжение U_{∞} , к которому асимптотически стремится $U_{\text{пр}}$ при увеличении времени экспозиции.

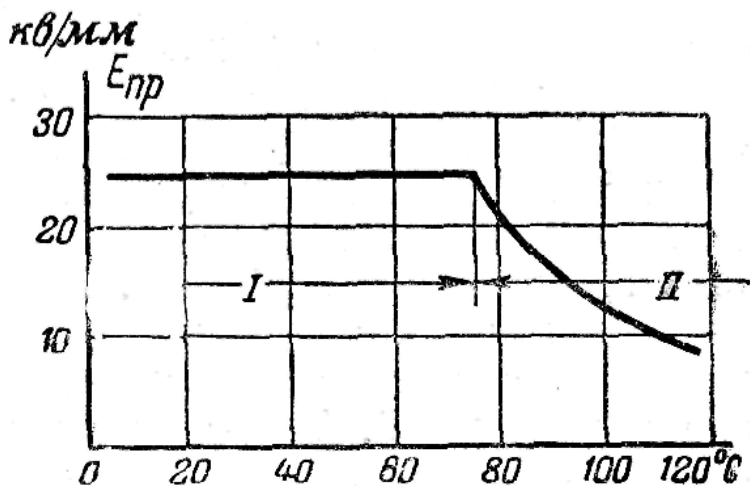
При **электрическом пробое**, который развивается практически мгновенно, нет зависимости пробивного напряжения от времени выдержки, т. е. если пробой не произошел тотчас после приложения напряжения, то диэлектрик должен выдерживать ту же величину напряжения длительно (если не иметь в виду пробоя кратковременными, порядка $0,1 \dots 1$ микросекунд — импульсами напряжения).

Отношение «импульсного» пробивного напряжения изоляции к пробивному напряжению при медленном подъеме напряжения называется **коэффициентом им-**

пульса данной электроизоляционной конструкции. Коэффициент импульса зависит от формы и размеров изоляции и электродов и от материала диэлектрика; как правило, коэффициент импульса больше единицы.

Температура

При повышении температуры пробивное напряжение в случае **теплового** про-



боя уменьшается. В случае же **электрического** пробоя $U_{пр}$ от температуры обычно практически не зависит; однако у некоторых кристаллических диэлектриков и при электрическом пробое обнаруживается имеющая максимум зависимость $U_{пр}$ от температуры.

Влажность

Электрическая прочность гигроскопичных диэлектриков зависит также от **влажности**, уменьшаясь при возрастании последней.

ТЕПЛОВЫЕ СВОЙСТВА ЭЛЕКТРОИЗОЛЯЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

Нагревостойкость

Практически очень важна способность электрической изоляции выдерживать повышенную температуру без существенного уменьшения эксплуатационной надежности, так как от этого зависит наивысшая допустимая рабочая температура изоляции.

В электрических машинах и аппаратах повышение температуры, которое обычно лимитируется именно материалами электрической изоляции, дает возможность для заданной мощности достичь уменьшения габаритных размеров, веса и стоимости изделия. Повышение рабочей температуры особенно важно для тяговых и крановых электродвигателей, самолетного электрооборудования и других передвижных устройств, где вопросы уменьшения веса и габаритных размеров выступают на пер-

вый план. С вопросами допустимой температуры тесно связаны вопросы пожарной безопасности и взрывобезопасности (масляные хозяйства электрических подстанций, электрооборудование для нефтяной и угольной промышленности и др.). Наконец, в электрических печах и нагревательных приборах, в электросварочной аппаратуре, в источниках света и электронных и ионных приборах и т. п. необходимость высокой рабочей температуры изоляции вытекает из особенности работы устройства.

У аморфных материалов (стекла, смолы и пр.) резко выраженной температуры плавления нет, и у них температура размягчения определяется при помощи различных условных приемов. Приближение к температуре размягчения в эксплуатационных условиях может вызвать сильное снижение механической прочности и постепенную деформацию изделий. У ряда материалов при нагреве могут наблюдаться химическое разложение, обугливание, интенсивное окисление — до явного горения включительно. В ряде случаев, даже при сохранении механической прочности и целостности изоляции, диэлектрические характеристики ее ухудшаются настолько существенно, что делают работу изоляции при повышенной температуре уже невозможной. Такие изменения качества изоляции могут проявляться даже при кратковременном повышении температуры.

Уже при кратковременном повышении температуры происходят качественные изменения электрической изоляции. Если повышение температуры держится длительное время, начинаются необратимые химические процессы, сопровождающиеся необратимым ухудшением электрических свойств изоляции. Это так называемое ***тепловое старение изоляции***.

У трансформаторного масла старение проявляется в образовании продуктов окисления, у лаковых пленок—в повышении жесткости и хрупкости, образовании трещин и отставании от подложки и т. п.

Помимо температуры, существенное влияние на скорость старения могут оказать:

- повышение давления воздуха;
- повышение концентрации кислорода;

- присутствие озона, являющегося более сильным окислителем, чем кислород;
- присутствие химических реагентов, ускоряющих или замедляющих старение.

Тепловое старение ускоряется от освещения образца ультрафиолетовыми лучами, воздействия электрического поля, механических нагрузок и т. п.

Наконец, для ряда электроизолирующих материалов, в особенности *хрупких* (стекла, керамики и т. д.), важна стойкость по отношению к резким сменам температуры (*тепловым импульсам*). При быстром нагреве или охлаждении поверхности материала за счет создания температурного перепада между наружным, и внутренним слоями материала и неравномерного теплового расширения или сжатия могут образоваться трещины.

Допустимый для эксплуатации материала или изделия температурный режим может определяться различными факторами. В результате испытаний устанавливается стойкость материала к тепловым воздействиям, причем стойкость эта в разных случаях может быть неодинаковой. Например, материал, легко выдерживающий кратковременный нагрев до некоторой температуры, может оказаться неустойчивым по отношению к тепловому старению при длительном воздействии даже более низкой температуры. Или материал, могущий длительно выдерживать нагрев до высокой неизменной температуры, растрескивается при быстром охлаждении и т. п.

Способность электроизолирующих материалов и изделий без вреда для них как кратковременно, так и длительно выдерживать воздействие высокой температуры, а также резких смен температуры называется *нагревостойкостью*.

Материалы, применяемые для изоляции электрических устройств, исходя из их нагревостойкости (при длительном воздействии нагрева), на практике обычно разделяют на ***классы нагревостойкости***, причем для каждого класса устанавливается определенная максимальная рабочая температура. Международной электротехнической комиссии (МЭК) предусмотрены приведенные ниже в таблице ***классы нагревостойкости***. Температура, указанная в таблице, установлена как максимальная для электроизоляционных материалов при их использовании в электрических машинах, трансформаторах и некоторых аппаратах общего применения, длительно (в течение ряда лет) работающих в обычных эксплуатационных условиях.

Классы нагревостойкости твердых изоляционных материалов

Обозначение класса нагревостойкости	Y	A	E	B	F	H	C
Рабочая температура, °C	90	105	120	130	155	180	Выше 180

К классу Y относится изоляция из непропитанных и не погруженных в жидкий диэлектрик волокнистых материалов на основе целлюлозы (древесина, бумага, картон, фибра, хлопчатобумажное волокно, гидратцеллюлозное и ацетилцеллюлозное волокно), натурального шелка и полиамидных волокон.

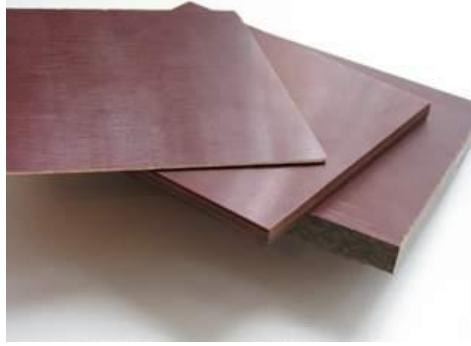


Электроизоляционный картон	Целлюлозная фибра	Хлопчатобумажная изолента	Гидратцеллюлозное волокно
			

К классу A принадлежат материалы класса Y, если они пропитаны масляными, масляно-смоляными и тому подобными лаками или погружены в нефтяное масло или синтетический жидкий диэлектрик, а также изоляция эмальпроводов на основе масляно-смоляных лаков.

Деревянные столбы	Фанера бакелитовая	Лакоткани электроизоляционные
-------------------	--------------------	-------------------------------



К классу Е относятся пластмассы на фенолформальдегидных и меламиноформальдегидных смолах с целлюлозным наполнителем, включая гетинакс и текстолит; триацетатцеллюлозная пленка; полиэтилентерефталат в виде пленки и волокна; изоляция эмальпроводов на основе поливинилформалевых лаков.

Гетинакс	Текстолит	Полиэтилентерефталатная пленка
		

Класс В образуют неорганические материалы: слюда, стекловолокно и асбест в композиции со связующими и пропитывающими органическими маслянобитумными и другими составами: миканиты, стеклолакоткань, стеклотекстолит и пр., пластмассы с минеральным наполнителем.

Миканит прокладочный	Стеклолакоткань	Стеклотекстолит
----------------------	-----------------	-----------------

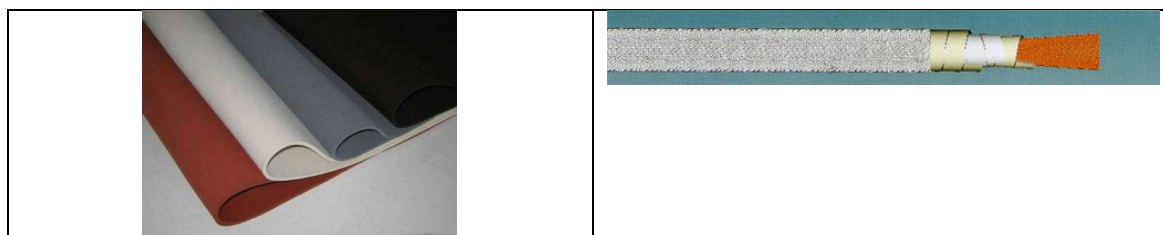


К классу F - материалы, указанные в классе В, из слюды, стекловолокна, асбеста, но без подложки или с неорганической подложкой; пленкостеклопласт «Имидофлекс», стекловолокнистая и асбестовая изоляция проводов типов ПСД, ПСДТ, а также эмалевая изоляция проводов типов ПЭТ-155, ПЭТП-155 на основе капрона. Пропитывающими составами служат термостойкие синтетические лаки и смолы.

Рулонный стеклопластик РСТ	Изоляция провода ПСДТ	Капроновая изоляция
		

В класс H входят материалы на основе слюды, стекловолокна и асбеста с применением в качестве связующих и пропитывающих составов кремнийорганических смол. К этому же классу нагревостойкости относится кремнийорганическая резина. Это указанные в классе В материалы из слюды, стекловолокна и асбеста без подложки или с неорганической подложкой, кремнийорганические эластомеры, стекловолокнистая и асбестовая изоляция проводов типов ПСДК, ПСДКТ, эмалевая изоляция проводов типов ПЭТ-200, ПЭТП-200 и др. на основе кремнийорганических лаков; пропитывающими составами служат кремнийорганические лаки и смолы

Кремнийорганические эластомеры	Асбестовая изоляция проводов
--------------------------------	------------------------------



Класс С образуют чисто неорганические материалы (слюда, фарфор и другие керамические материалы, стекло, кварц) совсем без связующих или с неорганическими и элементарно-органическими связующими. К этому же классу изоляции относится политетрафторэтилен (для температур до 250°C).

Керамический изолятор	Стекланный изолятор	Слюда московит обрезная гидро-динамическая СМОГ
	 <small>www.rekmm.ru</small>	