

A decorative graphic on the left side of the slide consists of several overlapping squares in various shades of blue and purple, arranged in a stepped pattern. A horizontal bar at the top of the slide transitions from a light blue gradient on the left to white on the right.

# ПОВЕДЕНИЕ МАТЕРИАЛОВ В СИЛЬНЫХ ПОЛЯХ

# ПРОБОЙ ТВЕРДЫХ ДИЭЛЕКТРИКОВ

- ❑ **Электрический пробой**, возникающий в результате развития ионизации (без химических превращений и перегрева), практически не зависящий от температуры ( $E \sim 10^2 - 10^3$  кВ/см).
- ❑ **Тепловой пробой (электротепловой)**, связанный с разогревом диэлектрика вследствие выделяемой в нем энергии при протекании в нем тока проводимости и диэлектрических потерь. При этом тепловыделение в твердом диэлектрике должно превышать теплоотдачу в окружающую среду, что обуславливает рост температуры во времени, проплавление диэлектрика и формирование проводящего канала ( $E \sim 10 - 10^2$  кВ/см).
- ❑ **Пробой при длительном приложении напряжении (электрохимический)**, связанный с развитием необратимых процессов: химических превращений, образованием субмикро- и микротрещин, развитием частичных разрядов ( $E \sim 10$  кВ/см и менее).

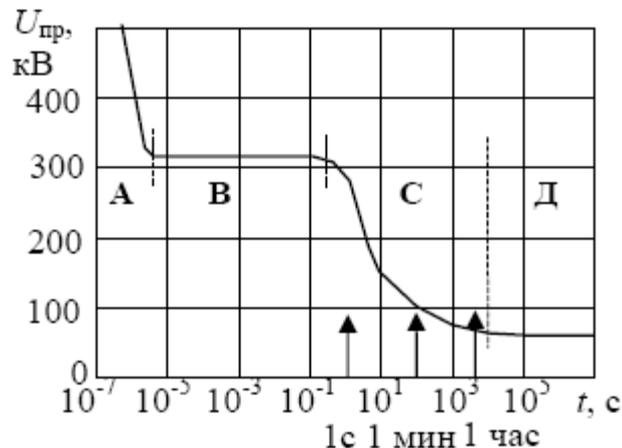
# Влияние условий эксплуатации на электрическую прочность твердых диэлектриков

Электрическая прочность твердой изоляции выше, чем газообразной и жидкой.

Электрическая прочность твердой изоляции зависит от:

- 1) формы электрического поля;
- 2) вида напряжения и полярности;
- 3) времени воздействия напряжения;
- 4) однородности диэлектрика;
- 5) электрофизических характеристик
- 6) температуры.

## Влияние времени приложения напряжения



**Область С** – преобладающая роль тепловых процессов при пробое.

**Область Д** – медленные процессы деградации (старения) твердой изоляции.

**Область А** – запаздывание развития канала пробоя (скорость развития каналов  $0,1 \dots 10^6$  см/с)

**Области А и В** – электрический характер пробоя.

Зависимость пробивного напряжения электрокартона

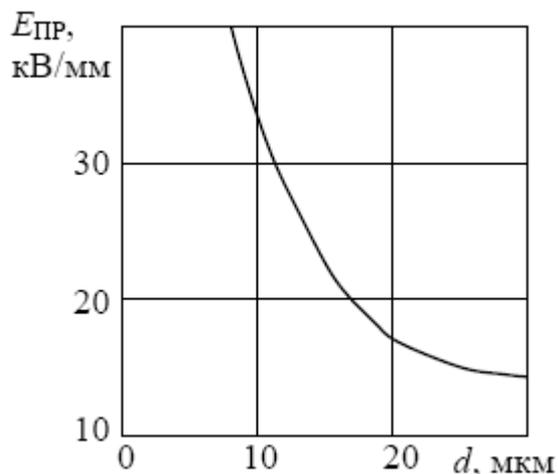
от времени воздействия напряжения: поле – однородное; среда – трансформаторное масло;

толщина – 2...2,5 мм

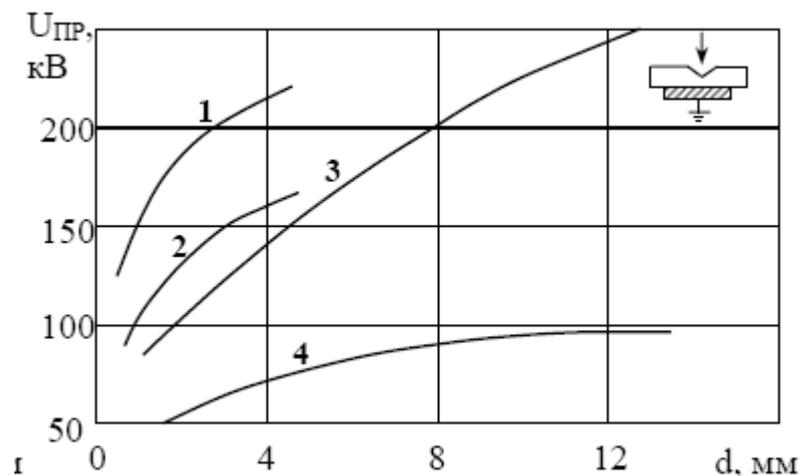
Зависимость пробивного напряжения от времени приложения напряжения, соответствующая электрической форме пробоя, называется **вольт-секундной характеристикой (ВСХ)** (на рис. выше это временной интервал  $t_{пр} < 10^{-1}$  с), а при  $t$  более  $10^{-1}$  – **вольт-временная**.

### Влияние толщины диэлектрика и полярности электродов

Электрическая прочность диэлектрика при неизменных геометрических параметрах электродов увеличивается с уменьшением толщины диэлектрика.



Зависимость электрической прочности непровитанной конденсаторной бумаги от толщины,  $U \sim$



Зависимость  $U_{пр}$  от толщины диэлектрика на импульсном напряжении. Поле острие-плоскость. 1,2 - оргстекло; 3,4 – NaCl; 1,3-отрицательная, 2,4-положительная полярность острия

Наблюдается резкое возрастание  $E_{пр}$  при толщинах 20 мкм и менее. Этот эффект был открыт [А.Ф. Иоффе](#) в 1928 году. Тонкие слои диэлектрика используются в изоляции конденсаторов, межвитковой и меж-слоевой изоляции трансформаторов, бумажно-масляной и пленочно-масляной изоляции кабелей, вводов.

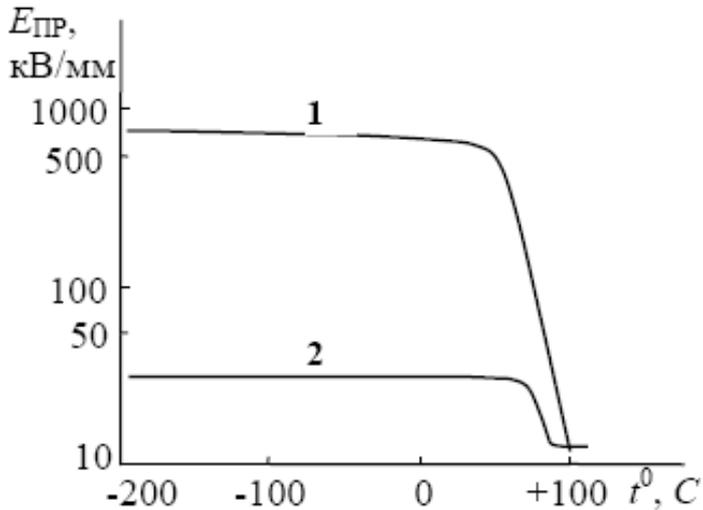
Увеличение пробивного напряжения с ростом толщины изоляции происходит с насыщением как для органической, так и неорганической изоляции. Характер этих зависимостей аналогичен  $E_{пр}$  газов и жидкостей: снижение электрической прочности  $E_{пр}$  диэлектриков с увеличением толщины в широком диапазоне изменения толщин.

### Влияние температуры

Пробой твердых диэлектриков в зависимости от температуры внутри диэлектрика имеет достаточно сложный характер и может быть разделен на две области относительно некоторой критической температуры  $T_{кр}$ .

В области низких температур пробивное напряжение практически не зависит от температуры.

## Влияние температуры



Зависимость электрической прочности от температуры:  
1- полиэтилен; 2- фарфор

Начиная с определенной критической температуры (для полиэтилена  $T_{кр} \approx +300$  С, для фарфора  $T_{кр} \approx +600$  С), происходит резкое и значительное снижение электрической прочности.

Следовательно, для одного и того же диэлектрика наблюдается две температурные области: **область теплового пробоя** – высокие температуры и **область электрического пробоя** – низкие температуры. Граница этих областей даже для одного и того же материала достаточно условна, поскольку она зависит от условий работы (охлаждение, вид напряжения, форма импульса, частота).

## Механизм электрического пробоя твердых диэлектриков

Электрический пробой твердых диэлектриков происходит в тех случаях, когда исключена возможность существенного разогрева диэлектрика или процессов старения.

Электрический пробой обусловлен электронными процессами, происходящими в сильном электрическом поле приводящими к резкому увеличению концентрации зарядов в диэлектрике.

Признаками электрического пробоя могут служить:

- а) независимость  $U_{пр}$  от температуры;
- б) слабая зависимость  $U_{пр}$  от времени (не считая очень коротких времен,  $< 10^{-6}$  с);
- в) значительное влияние локальных неравномерностей электрического поля.

2 стадии развития канала разряда в твердых диэлектриках:

1. **Формирование разряда:** появление (источник) свободных заряженных частиц (электроны, ионы), образование ионизационных процессов, протекание тока через диэлектрик, создание проводящего пути.
2. **Завершение разряда:** быстрое нарастание тока через диэлектрик, спад напряжения до нуля.

В условиях равномерного и слабонервномерного поля пробивное напряжение твердой изоляции можно оценить:

$$u_{\text{пр}} = E_{\text{пр}} \cdot d.$$

Электрическую прочность электротехнического фарфора, широко используемого в качестве наружной изоляции, в условиях слабонеоднородного поля (радиус закругления полусферического электрода  $R$ , см) для плоских образцов толщиной  $d=0,5-4,4$  см:

$$E_{\text{пр}} = 85 \cdot d^{-0,37}, \frac{\text{кВ}}{\text{см}} \text{ при } R \geq 0,4d$$

$$E_{\text{пр}} = 65 \cdot d^{-0,5}, \frac{\text{кВ}}{\text{см}} \text{ при } R < 0,4d$$

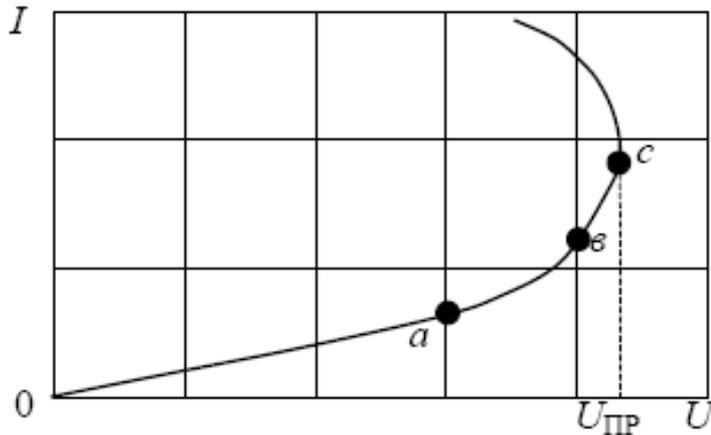
При изменении толщины диэлектрика, находящегося в неравномерном электрическом поле, величина пробивного напряжения определяется:

$$U_{\text{пр}2} = U_{\text{пр}1} \sqrt{\frac{d_2}{d_1}}$$

$U_{\text{пр}1}$  – пробивное напряжение, определяемое опытным путем, для образца произвольной толщины  $d_1$ .

$U_{\text{пр}2}$  – пробивное напряжение для образца произвольной толщины  $d_2$ .

## Механизм электрического пробоя твердых диэлектриков



Вольтамперная характеристика твердого диэлектрика (общий вид)

0a - проводимость диэлектрика не изменяется (соблюдается закон Ома);  
ав - ток быстро возрастает не пропорционально напряжению (нарушение закона Ома);  
bc – предпробивное состояние, после которого ток катастрофически увеличивается за счет увеличения проводимости (падение напряжения при этом на диэлектрике уменьшается).

Электрический пробой обычно связывают с кратковременным, импульсным воздействием на изоляцию высокого напряжения. Отсутствие научно обоснованных инженерных методов расчета затрудняет эффективное использование твердой изоляции во всем многообразии современного ее применения.

Распространение каналов разряда неразрывно связано с возникновением и перемещением в объеме твердого диэлектрика фазовых переходов первого рода. При **разряде с катода** это переход «твердое тело-расплав», а при **разряде с анода** — «твердое тело-плотная плазма».

Возникновение первичного канала разряда как с катода, так и с анода имеет одинаковую **тепловую физическую природу**. Различие состоит лишь в том, что при разряде с **катода** в его формировании участвуют преимущественно **несобственные электроны, инжектированные из катода**, а при разряде с **анода** - **собственные электроны из мелких донорных уровней**.

**Предпробивной этап развития разряда** в твердых диэлектриках состоит из двух стадий. На первой стадии происходит формирование начального участка канала — первичного канала разряда. Эта стадия является следствием возникновения в приэлектродной области разрядного промежутка **электронов проводимости и развития неустойчивостей в их коллективе**. При достижении в локальной области диэлектрика плотности тока  $j$ , превышающей некоторого критического значения  $j_{кр}$ , там создаются условия для перехода твердого вещества диэлектрика в его расплав.

## Закономерности и механизм формирования разряда

Вторая стадия начинается, когда электрический разряд переходит в состояние дуги, горящей в ограниченном пространстве. На этом завершающем этапе пробоя принципиально изменяются факторы, определяющие физическое содержание процесса.

**На предпробивном этапе** определяющие факторы - параметры импульса напряжения, свойства диэлектрика и геометрия разрядного промежутка.

**На втором этапе** главная роль отводится электрическим параметрам разрядной цепи и источника энергии.

## ТЕПЛОВОЙ ПРОБОЙ ТВЕРДЫХ ДИЭЛЕКТРИКОВ

При всех разрешенных режимах работы изоляционной конструкции наибольшие температуры ее элементов не должны превышать допустимые значения.

Для теплового пробоя характерны следующие признаки:

1. пробивное напряжение уменьшается с увеличением длительности приложения напряжения;
2. пробивное напряжение уменьшается с ростом толщины образца;
3. пробой происходит в том месте, где теплоотдача в окружающую среду наименьшая;
4. тепловой пробой наиболее часто происходит при напряженностях поля  $E_{пр} = 10 \div 10^2$  кВ/см.

Развитие теплового пробоя в общих чертах может быть представлено в виде следующей последовательности:

$U_d \rightarrow I_d \rightarrow T_d \uparrow \rightarrow \gamma \uparrow$  и  $\text{tg } \delta \uparrow \rightarrow I_d \uparrow \rightarrow T_d \uparrow$  и т.д.,

где  $U_d$  – напряжение, приложенное к диэлектрику;  $I_d$  – ток, текущий через диэлектрик;  $T_d$  – температура диэлектрика;  $\gamma$  и  $\text{tg } \delta$  – проводимость и угол диэлектрических потерь диэлектрика.

Нагрев изоляционной конструкции происходит, в общем случае, за счет потерь в токоведущих частях и в самой изоляции.

Мощность потерь энергии при постоянном токе:

$$P_{\text{п}} = UI = I^2 R = I^2 / \gamma$$

$R$ ,  $\gamma$  – сопротивление и проводимость изоляции.

Мощность диэлектрических потерь в изоляции при синусоидальном напряжении:

$$P_{\text{д}} = U \cdot I \cdot \cos \varphi = 2\pi \cdot f \cdot C \cdot U^2 \cdot \text{tg} \delta,$$

где  $f$  – частота переменного тока;

$C$  – емкость изоляции;

$\text{tg} \delta$  - угол диэлектрических потерь.

Удельная мощность потерь в изоляции :

$$P_{\text{д}} = 2\pi \cdot f \cdot \varepsilon \cdot \varepsilon_0 \cdot E^2 \cdot \text{tg} \delta,$$

где  $\varepsilon$  - относительная диэлектрическая проницаемость материала изоляции;

$\varepsilon_0$  – электрическая постоянная ( $\varepsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12}$  Ф/м);

$E$  – напряженность электрического поля в изоляции.

Потери энергии в твердом диэлектрике приводят к повышению его температуры. С увеличением температуры увеличивается  $\operatorname{tg}\delta$  по закону:

$$\operatorname{tg}\delta(T) = \operatorname{tg}\delta_0 \cdot e^{a(T-T_0)},$$

где  $\operatorname{tg}\delta_0$  – тангенс угла диэлектрических потерь при заданной температуре  $T_0$ , например, при  $+20^\circ\text{C}$ ;

$a$  – коэффициент, зависящий от свойств изоляции;

$T_0$  – исходная температура окружающей среды.

Для относительно узкого интервала возможных рабочих температур зависимость  $\gamma$  (ионная проводимость) от температуры  $T$  как для жидких, так и для твердых диэлектриков может быть выражена в виде:

$$\gamma = \gamma_0 \cdot e^{a(T-T_0)}$$

где  $\gamma_0$  – проводимость при температуре  $T_0$ ;

$a$  – коэффициент, определяемый опытным путем.

Тепловой пробой – это нарушение теплового равновесия в изоляционной конструкции, следствием которого является неограниченный рост наибольшей температуры  $T_{\text{макс}}$  и разрушение изоляции. Он происходит при напряжении  $U_{\text{пр}}$ , когда выполняется условие:

$$\frac{\partial U}{\partial T_{\text{макс}}} = 0.$$

## Длительная электрическая прочность твердых диэлектриков

При длительной эксплуатации электроизоляционных устройств происходит старение твердой изоляции, которое выражается в уменьшении кратковременной электрической прочности, увеличении проводимости и диэлектрических потерь и, как следствие, в ограничении срока службы изоляционных конструкций.

Изменения свойств изоляции при эксплуатации происходят за счет энергии от источников внешних нагрузок: электрические и тепловые поля, поле механических напряжений, химические взаимодействия с окружающей средой.

**Причинами старения внутренней изоляции являются:**

1. старение вследствие развития частичных разрядов (независимых разрядов в имеющихся порах или образующихся дендритах) при перенапряжениях и рабочем напряжении;
2. тепловая деструкция материала;
3. увлажнение изоляции и водный триинг (рост древовидных насыщенных водой фигур);
4. электрохимическое старение;
5. механическое старение и повреждения за счет электродинамических усилий, вибраций и т.п.

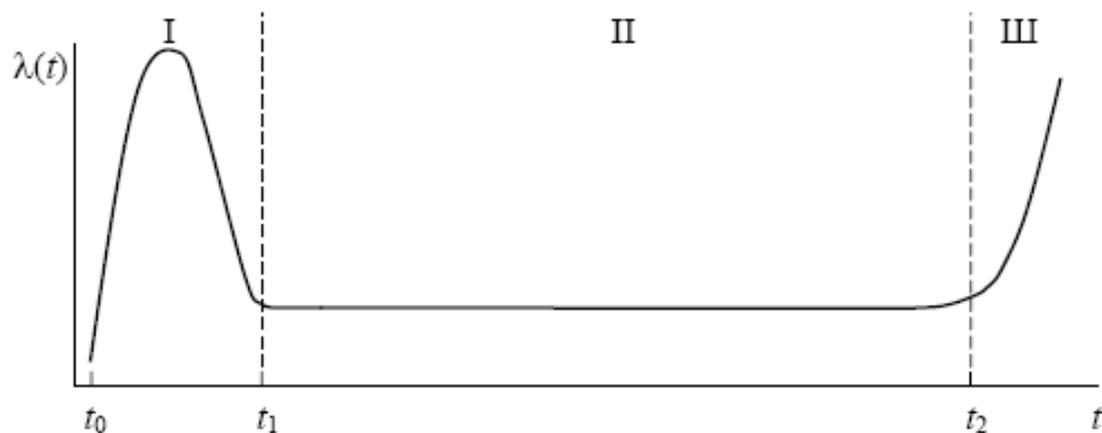
Старение имеет место при напряженностях электрического поля, во много раз меньших пробивных при кратковременном приложении напряжения (в 5 ...20 раз и более).

Интенсивность электрического старения любой изоляционной конструкции зависит не только от значения воздействующего напряжения, но и от ряда факторов, неподдающихся контролю, например, от количества, размеров и расположения микронеровностей на поверхности электродов и микро- и макронеоднородностей в объеме изоляции. Поэтому срок службы изоляционной конструкции любого типа при заданном напряжении является величиной случайной.

Электрическая прочность при длительном приложении напряжения характеризует способность изоляции выдерживать рабочее напряжение в течение определенного срока службы и численно определяется напряженностью электрического поля (напряжением), приводящей к разрушению изоляции к концу заданного периода эксплуатации, например, через 20-30 лет.

Для описания общего вида отказов изоляционных устройств во времени используют **зависимость интенсивности отказов  $\lambda(t)$** . Эта важная характеристика определяет надежность работы изоляции в каждый момент времени  $t$ .

Интенсивность отказов  $\lambda(t)$  есть вероятность того, что электроизоляционное устройство, дожившее до момента  $t$ , откажет за следующую единицу времени.



Область I - приработка связана с выходом из строя (отказами) изоляции за счет грубых технологических дефектов в процессе ее изготовления. К концу периода  $(t_0 - t_1)$  эти дефекты полностью выявляются и интенсивность отказов резко понижается.

Зависимость интенсивности отказов электроизоляционных

Различают 3 области:

I – область начальных отказов – область приработки  $(t_0 - t_1)$ ;

II – область случайных отказов – рабочая область  $(t_1 - t_2)$ ;

III – область износных отказов - старение  $(t > t_3)$ .

Область II – внезапные случайные отказы, которые не могут быть устранены приработкой.

Область III - отказы вызываются общим старением изоляции, износные отказы, которые связаны с длительным приложением электрического поля к изоляции и всеми сопутствующими ему процессами.

Увеличение времени работы изоляции больше  $t_2$  нецелесообразно, т.к. это приводит к снижению надежности ее работы, к увеличению аварийности.

Эффективным методом определения  $E_p$  является расчет по уравнению «кривой жизни».

Это уравнение является основной характеристикой, позволяющей экстраполировать экспериментальные результаты в область рабочих напряженностей электрического поля:

$$t = A \cdot E^{-n}$$

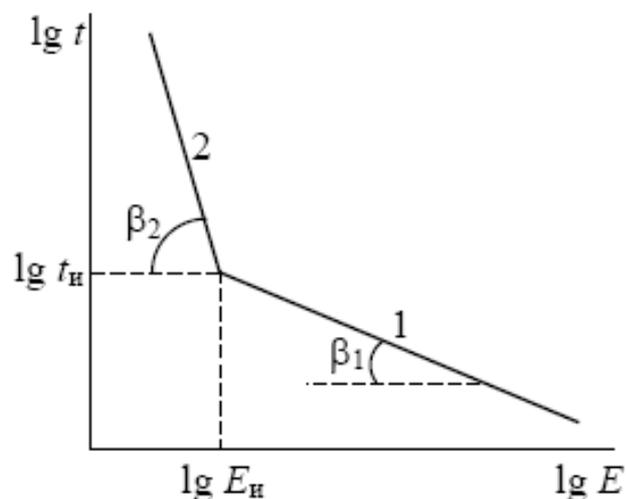
где  $t$  – «время жизни» изоляции при напряженности  $E$ ;

$A$ ,  $n$  – коэффициенты, определяемые экспериментально:

коэффициент  $A$  – известное значение «времени жизни»  $t_0$  при заданной напряженности  $E_0$ , т.е.  $A = t_0 \cdot E_0^n$ ; коэффициент  $n$  – тангенс угла наклона «кривой жизни» (рис. 1.38) – коэффициент скорости старения:  $n = \text{tg } \beta$ .

$$t = t_0 \left( \frac{E_0}{E} \right)^n .$$

Исследования поведения «кривой жизни» в широком диапазоне напряженностей электрического поля показали, что для полимеров в координатах  $\lg t$  и  $\lg E$  она состоит из двух прямолинейных участков, для которых  $A$  и  $n$  различны.



Зависимость  $\lg t=f(\lg E)$

Выражение для определения времени жизни изоляции имеет существенный недостаток – невозможно прогнозировать надежность работы изоляции, поскольку отсутствует вероятностная оценка отказов. При длительном воздействии электрического поля на партию идентичных электроизоляционных устройств будет иметь место большой разброс времени до пробоя, достигающий нескольких порядков.

С этой точки зрения наиболее приемлемым и физически обоснованным для описания «времени жизни» является вероятностное уравнение Вейбулла.

Для конкретного значения испытательной напряженности электрического поля  $E_{\text{исп}}$  функция распределения времени до пробоя имеет вид:

$$Q(t) = 1 - \exp(-B \cdot t^b),$$

где  $Q(t)$  – вероятность пробоя изоляции;  $B$  и  $b$  – параметры уравнения Вейбулла, определяемые экспериментально.

Для описания «кривой жизни» уравнение Вейбулла имеет вид:

$$Q(E, t) = 1 - \exp\left[-C \cdot E^a \cdot B \cdot t^b\right],$$

где  $C$ ,  $a$  – определяемые экспериментально параметры уравнения Вейбулла, описывающие распределение пробивных напряженностей изоляции.

## Пробой твердой изоляции

Электрическая прочность твердой изоляции выше, чем газообразной и жидкой.

Электрическая прочность твердой изоляции зависит от:

- 1) формы электрического поля;
- 2) вида напряжения и полярности;
- 3) времени воздействия напряжения;
- 4) однородности диэлектрика;
- 5) электрофизических характеристик
- 6) температуры.

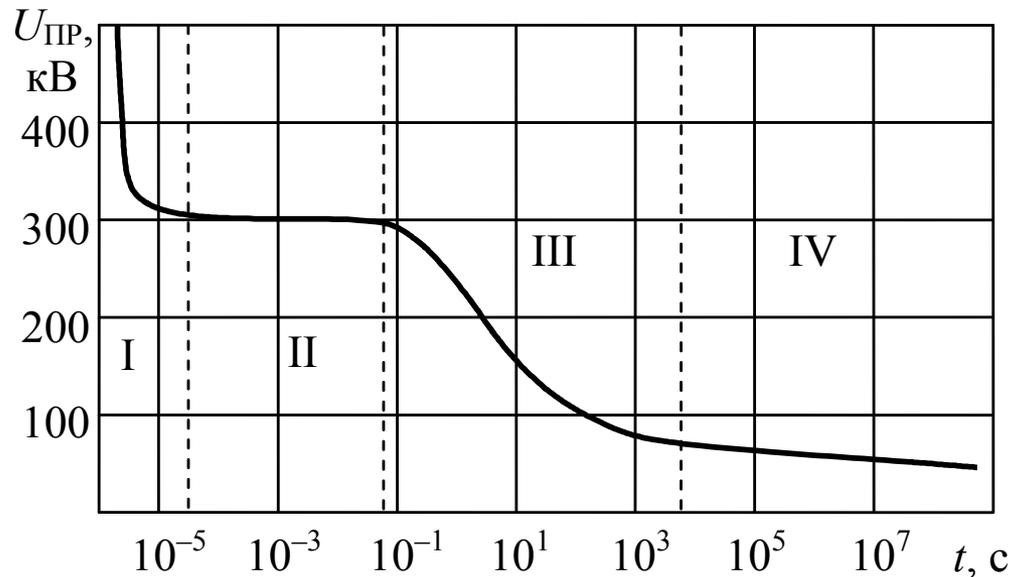
Различают три вида пробоя твердого диэлектрика:

- 1) **электрический** –  $E \sim 10^2 - 10^3$  кВ/мм;
- 2) **тепловой** –  $E \sim 10 - 10^2$  кВ/мм;
- 3) **старение** –  $E \sim 10$  кВ/мм и менее.

## Характеристики изоляции

Электрические	Механические	Тепловые	Химические	Прочие
$U_{пр}$ $U_{пер}$ $U_{раб}$ $U_{сухо\ разр}$ $\rho_V, \rho_S$ $tg \delta$ $t = f(E, f)$	$\sigma_{раст}$ $\sigma_{сж}$ $\sigma_{изг}$ Твердость Гибкость Эластичность	$T_{кип}$ $T_{плавл}$ $T_{заст}$ Теплопро- водность Теплоемкость Тепловое расширение	Стабильность Растворимость Действие на другие диэлектрики	Удельный вес Абсорбция влаги Действие облучения Микроорганизмы и др.

Наиболее сильное влияние на электрическую прочность твердой изоляции оказывают время приложения напряжения, температура, толщина. Зависимость пробивного напряжения от времени приложения напряжения называется вольт-временной характеристикой.



Вольт-временная характеристика твердой изоляции:

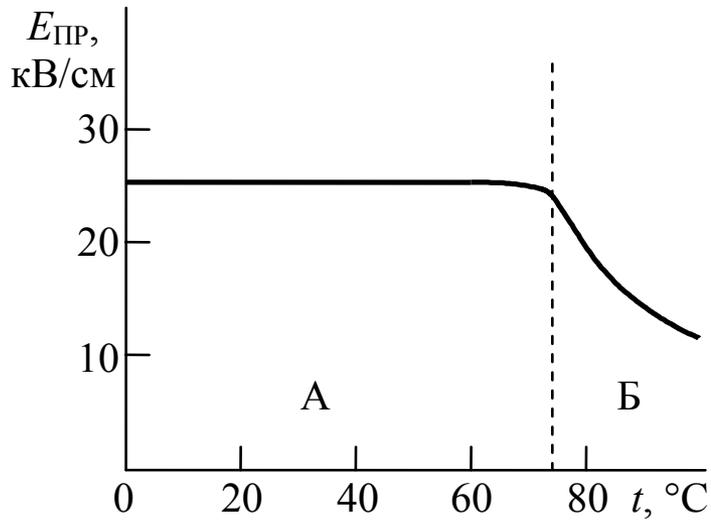
I – электрический пробой, запаздывание развития канала разряда;

II – электрический пробой,  $t < 0,1$  с, не зависит от температуры;

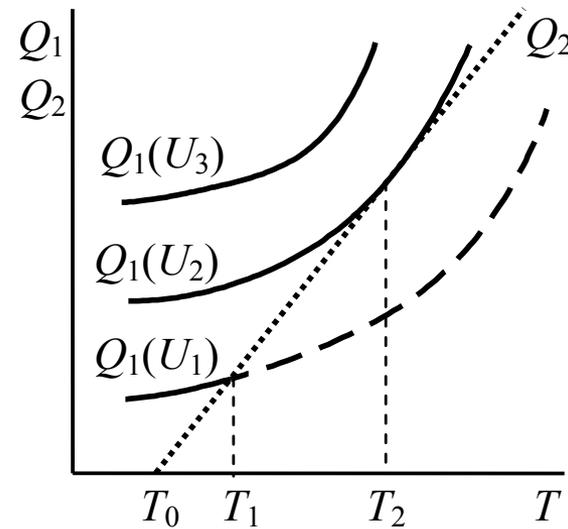
III – тепловой пробой,  $t > 0,1$  с, резкое снижение  $U_{пр}$  во времени;

IV – старение,  $U_{пр}$  мало изменяется, а время до пробоя возрастает значительно

Резкое возрастание пробивного напряжения в I области обусловлено запаздыванием развития разряда относительно времени приложения напряжения. Область III характеризуется резким спадом пробивного напряжения, что говорит о преобладающей роли тепловых процессов. Область IV – медленное снижение пробивного напряжения с увеличением времени воздействия связано с медленными процессами старения, деградации твердой изоляции.



Зависимость пробивного  
напряжения  
от температуры для фарфора  
(напряжение 50 Гц)



Изменение выделенного  $Q_1$   
и отводимого  $Q_2$  тепла в изоляции при  
разных  $U$

Выделенное тепло	$Q_1 = w C \operatorname{tg} d U^2$
отводимое тепло	$Q_2 = k S (T - T_0)$