

# ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОЕ МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ



© 2019 Томский политехнический университет, ОЭЭ ИШЭ

Лектор: к.т.н., доцент Васильева Ольга Владимировна

# ПРОБОЙ ДИЭЛЕКТРИКОВ

Образование в диэлектрике *электропроводящего канала* под действием *электрического поля* называют *пробоем*.

Пробой может быть:

*полным, неполным, частичным, поверхностным.*

Не весь образец диэлектрика, на который подано напряжение, перейдет *в состояние высокой проводимости*, а только *узкий канал*, направленный от электрода к электроду.

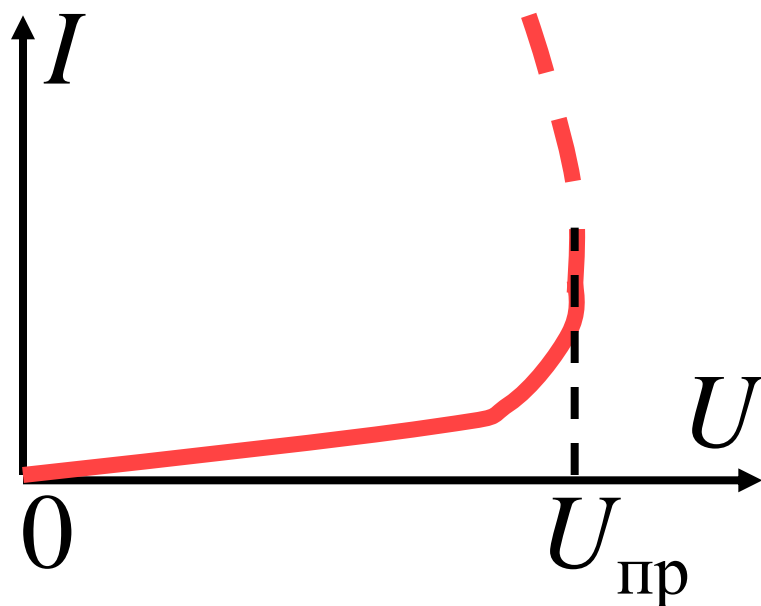
# ПРОБОЙ ДИЭЛЕКТРИКОВ

- **Полный пробой** – если проводящий канал проходит *от одного электрода к другому* и замыкает их.
- **Неполный пробой** – если проводящий канал *не достигает хотя бы одного* из электродов.
- **Частичный пробой** – если *пробивается* лишь газовое или жидкое *включение* твердого диэлектрика.
- **Поверхностный пробой** – пробой *по поверхности* (в газе или в жидкости) у *твердых* диэлектриков.

Механизмы *пробоя* *газообразных, жидких* и *твердых диэлектриков* имеют существенные различия.

**Пробивным напряжением  $U_{пр}$**  называется минимальное приложенное к образцу диэлектрика напряжение, приводящее к его пробое.

***Вольтамперная характеристика электрической изоляции:***



*В момент пробоя ток через диэлектрик резко возрастает, так что  $dI/dU \rightarrow \infty$ . В месте пробоя возникает искра или электрическая дуга. Вследствие образования плазменного сильно проводящего канала пробоя между электродами, образец оказывается короткозамкнутым, и напряжение на нем падает несмотря на рост тока (ток КЗ).*

- Если пробой произошел в *газообразном* или *жидком диэлектрике*, то *в силу подвижности молекул* пробитый участок после снятия напряжения *восстанавливает* свои первоначальные свойства и величину  $U_{пр}$ .
- После пробоя *твердого диэлектрика* в нем *остается след* в виде пробитого (откуда и название «пробой»), прожженного или проплавленного отверстия чаще всего неправильной формы.
- Связанное с образованием проводящих следов («треков») *повреждение поверхности твердого диэлектрика* поверхностным пробоем называют *трекингом*.

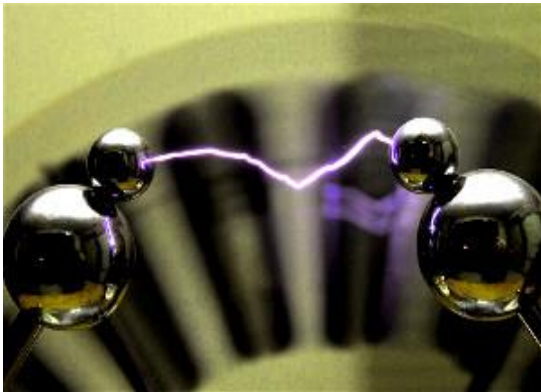
Отношение  $U_{\text{пр}}$  к номинальному напряжению, называют *коэффициентом запаса электрической прочности*.

При длительном воздействии электрического поля высокой напряженности происходит *электрическое старение* изоляции, в результате чего  $U_{\text{пр}}$  снижается.

Кривую зависимости  $U_{\text{пр}}$  от времени приложения напряжения называют *кривой жизни* электрической изоляции.

# ПРОБОЙ ДИЭЛЕКТРИКОВ

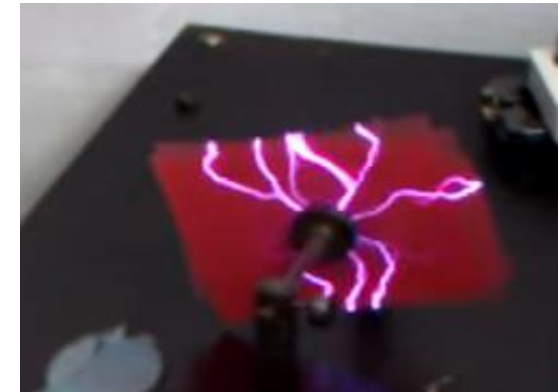
При *кратковременных импульсах* пробой происходит *при больших напряжениях*, чем в случае *постоянного* или *длительно приложенного переменного напряжения*.



*Пробой газов*



*Пробой жидкостей*



*Пробой твердых диэлектриков*



Номинальное напряжение *электрической изоляции* должно быть *меньше пробивного напряжения*.

$U_{\text{пр}}$  зависит от времени приложения напряжения.

При медленном увеличении напряжения,  $U_{\text{пр}}$  называют *статическим* пробивным напряжением.

При воздействии импульсов — *импульсным* пробивным напряжением.

Отношение импульсного пробивного напряжения диэлектрика к статическому называют *коэффициентом импульса*, который  $> 1$ .



Для характеристики *способности материала противостоять разрушению* в эл. поле вводят понятие *напряженности эл. поля*, при которой происходит пробой.

*Электрическая прочность* – напряженность однородного электрического поля, приводящая к пробую ( $h$  – толщина диэлектрика):

$$E_{\text{пр}} = U_{\text{пр}} / h$$

*Электрическая прочность*  $E_{\text{пр}}$  является одним из *важнейших параметров* электроизоляционного материала.

# ПРОБОЙ ДИЭЛЕКТРИКОВ

*Основные вид пробоя:*

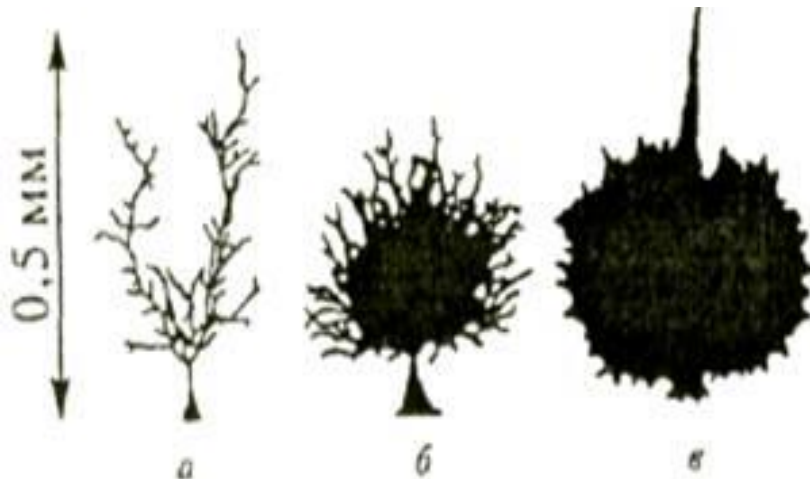
*электрический, тепловой, электрохимический.*

- ✓ *Электрический пробой* – пробой, обусловленный ударной ионизацией с разрывом связей между частицами диэлектрика непосредственно под действием эл. поля.
- ✓ *Тепловой пробой* – пробой, обусловленный нарушением теплового равновесия диэлектрика, вследствие диэлектрических потерь.

# ПРОБОЙ ДИЭЛЕКТРИКОВ

✓ *Электрохимический пробой* – пробой, обусловленный химическими процессами, приводящими к изменениям в диэлектрике под действием электрического поля.

В монослойной (слой толщиной в одну молекулу) полимерной изоляции (например, ПЭ) эл. старение обусловлено образованием ветвистых каналов неполного пробоя, называемых *электрическими дендритами*, которые под действием частичного разряда постепенно прорастают в направлении от одного электрода к другому.



Характерные формы электрических дендритов: древовидный (а), кустообразный (б), полость в виде «каштан с колючками» (в)

# Пробой газов

В поле  $E$ , заряженные частицы между двумя соударениями приобретают энергию  $W=q\lambda E$ .

Если  $W \geq W_{и}$ , то возможен пробой, где  $W_{и}$  - энергия ионизации молекулы газа (молекула распадается на ионы).

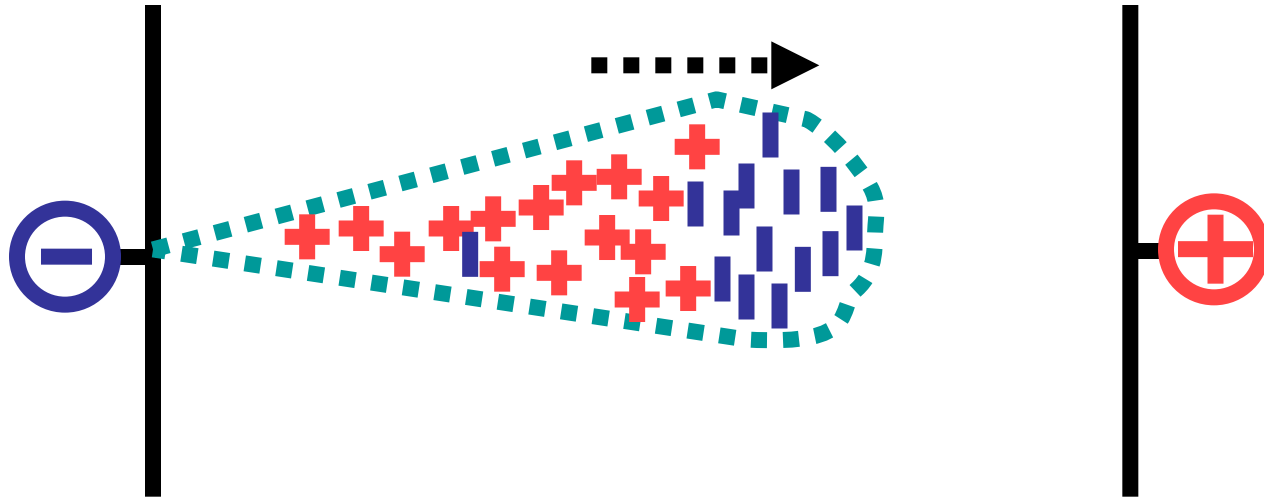
*Начальная напряженность* поля  $E_{нач}$  — значение напряженности, при которой в данном газе (при данных  $P$  и  $T$ ) начинается *ударная ионизация* (столкновение эл-на с нейтральной молекулой, чтобы выбить эл-н).

В газах наблюдается *электрический вид пробоя*. Пробой газа зависит также от степени однородности электрического поля.

# Пробой газов

- В результате процессов *ударной ионизации* *концентрация* заряженных частиц резко возрастает.
- При достаточно большой концентрации плотность тока достигает высоких значений и обеспечивает практически КЗ между электродами – наступает *электрический пробой*.
- Внешне это проявляется в виде *искры или сплошной дуги* между электродами.

# Лавинный механизм пробоя газа – ударная ионизация



*Лавинный* пробой развивается относительно долго, более 1 мкс, и не характерен для импульсных напряжений.

*Лавинно-стримерный* пробой, при длине промежутка 1 см, развивается  $10^{-7}$ – $10^{-8}$  сек.

# Пробой газов

*Электрон* набрал *достаточно энергии*, чтобы *выбить эл-н из нейтральной молекулы*, выбитые эл-ны пошли дальше выбивать из молекул другие эл-ны и т.д., образовалась *лавина*; когда *лавина достигнет другого электрода - пробой*.

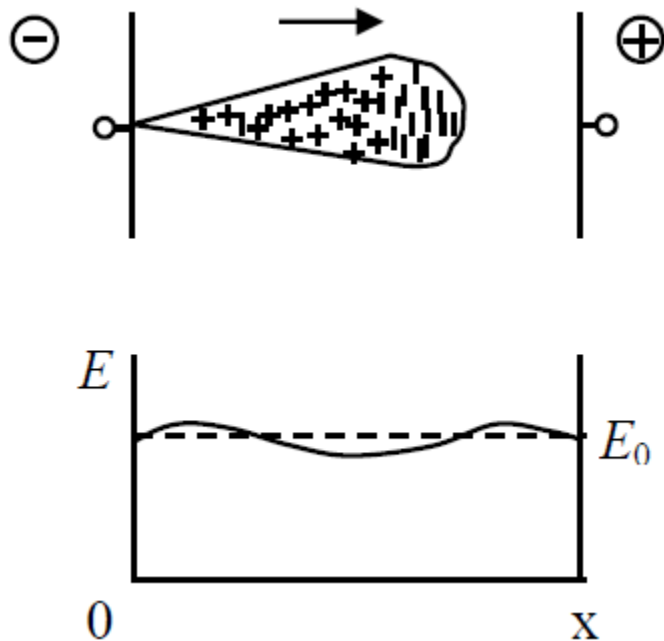
Образовался *проводящий канал* – система отключилась, *сработала защита*:

- если повторное напряжение будет подано *через сутки* – пробой произойдет *при такой же величине  $U$* ;
- если повторное напряжение будет подано *через несколько минут* – пробой произойдет *при меньшем  $U$* .

# Пробой газов

Это связано с тем, что когда *электрон столкнется с ионом*, произойдет *рекомбинация*:

- *через сутки* – *все* электроны и ионы *прорекомбинируют*;
- *через несколько минут* – останутся *нерекомбинированные* электроны и ионы.

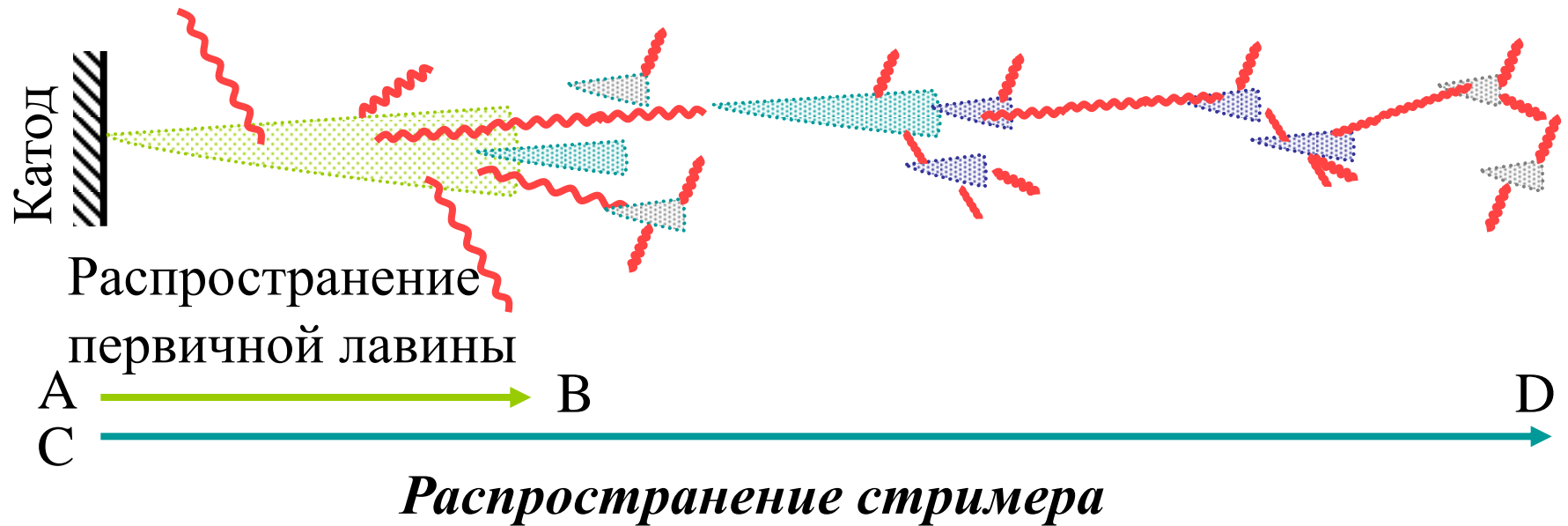


Схематическая картина искажения электрического поля в промежутке между электродами, создаваемого лавиной:  $E_0$  - напряженность неискаженного поля.

Реализуется в постоянных эл. полях, переменных эл. полях невысокой частоты (50 Гц).



**Лавинно-стримерный механизм пробоя газа** — совместное действие поля пространственного заряда лавины и фотоионизации в объеме газа.



**Стример** — скопление ионизованных частиц, намного превосходящее лавину по степени ионизации.

Одновременно с ростом **стримера**, направленного **к аноду**, образуется **лавиновый поток** положительно заряженных частиц, направленный **к катоду**.

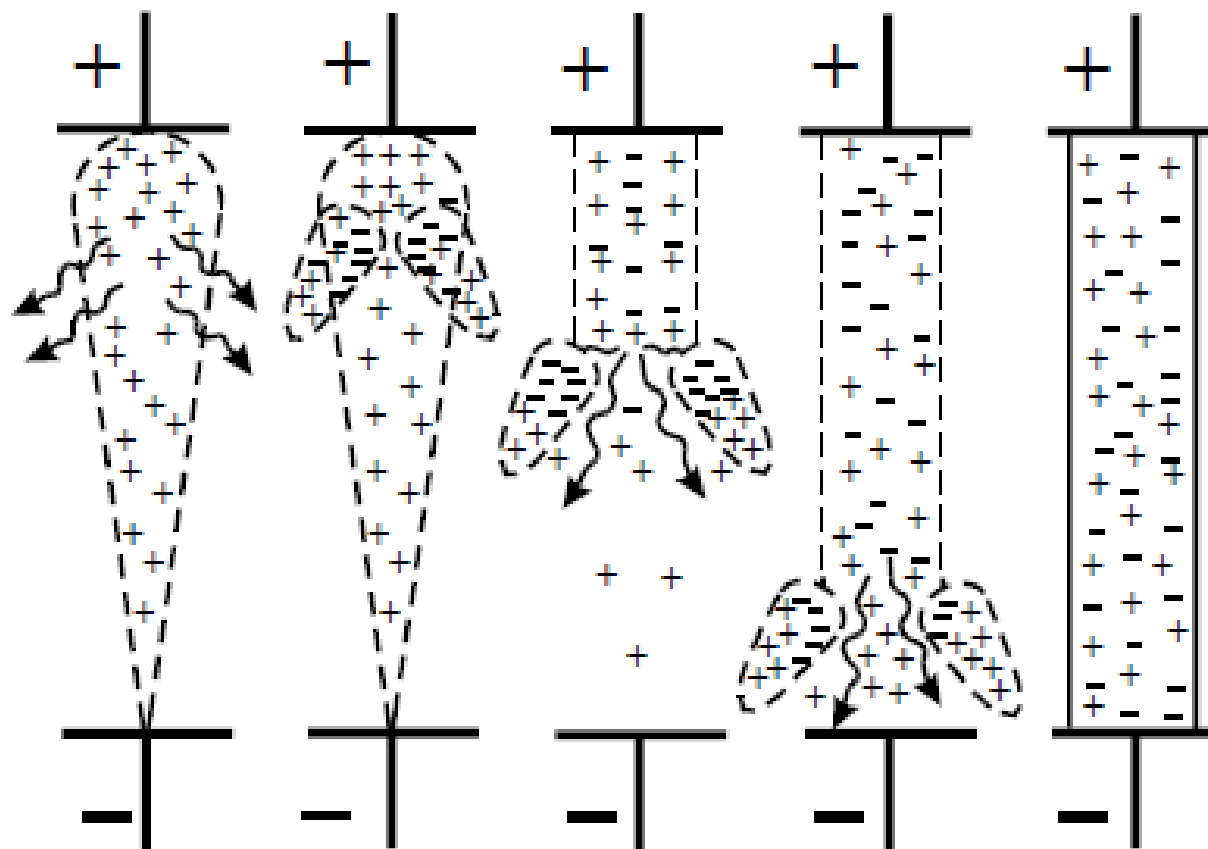


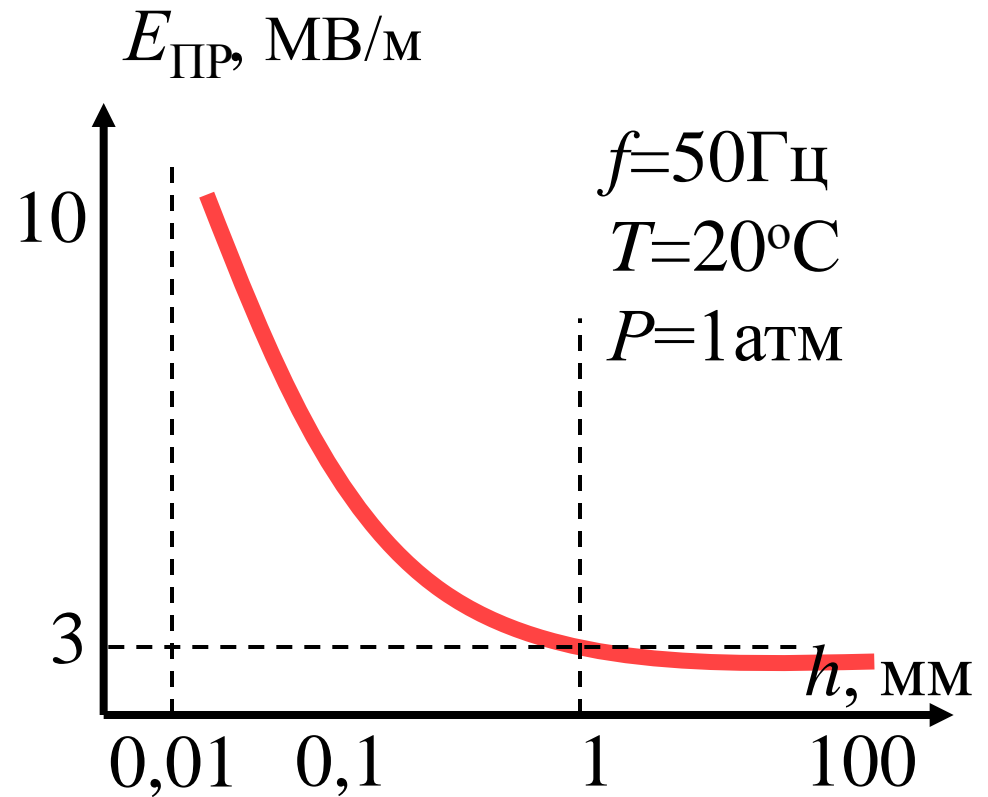
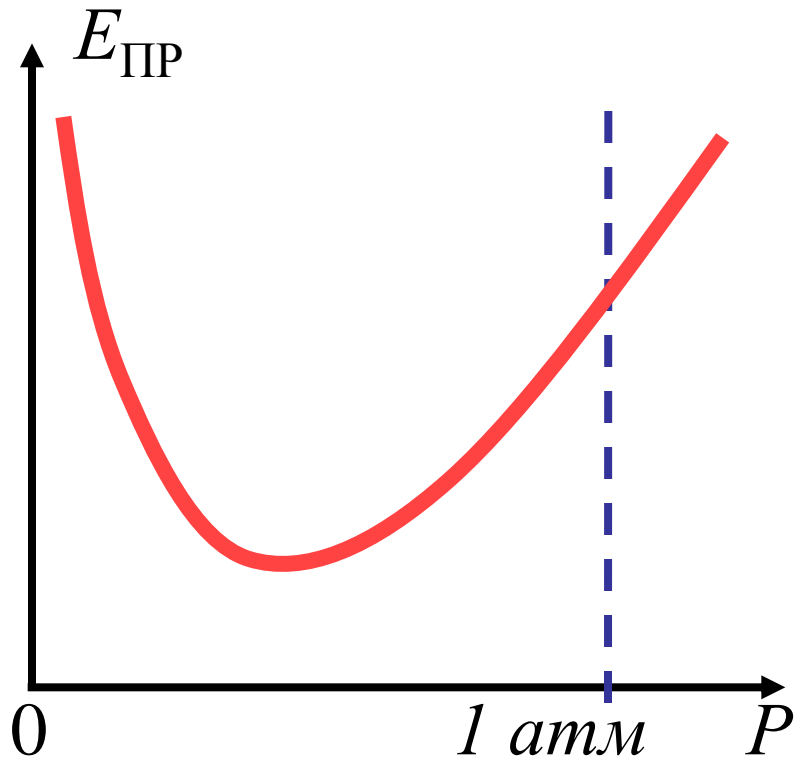
Схема возникновения и развития положительного стримера.

# Пробой газов

*Электроны* не успевают набрать *достаточно энергии*, чтобы *выбить эл-н из нейтральной молекулы*, часть энергии эл-н отдал молекуле, где молекула перешла в возбужденное состояние, избавляется от избытка энергии за счет светового излучения – *кванта света*.

*Квант* движется со ск-ю света, сталкивается с молекулой, которая получила уже доп. эн-ю – образовалась *дочерняя лавина*, когда дочерняя лавина перейдет расстояние между электродами – *пробой*.

Зависимость  $E_{\text{ПР}}$  газа от давления  $P$  и расстояния между электродами  $h$  в *однородном* поле:



# Зависимость $E_{пр}$ газа от давления $P$

*При снижении  $P$*  числа молекул в ед. объема *меньше*; любой эл-н должен провести акт ионизации, нужно, чтобы эл-н разогнался и разбил молекулу на «+» и «-» ионы (*уменьшение вероятности столкновений электронов с молекулами газа*).

*При увеличении  $P$*  числа молекул в ед. объема *больше*; эл-ну тесно, нужно, чтобы эл-н на маленьком расстоянии разогнался и разбил молекулу (*уменьшение длины свободного пробега электронов*).

## Эмпирический *закон Пашена*:

**если** длина разрядного промежутка  $h$  и давление газа  $p$  изменяются так, что  $h \cdot p = \text{const}$ , то и  $U_{\text{ПР}} = \text{const}$ .

Т.е.  $U_{\text{ПР}}$  газов является функцией произведения  $h \cdot p$ .

*В неоднородном поле:*

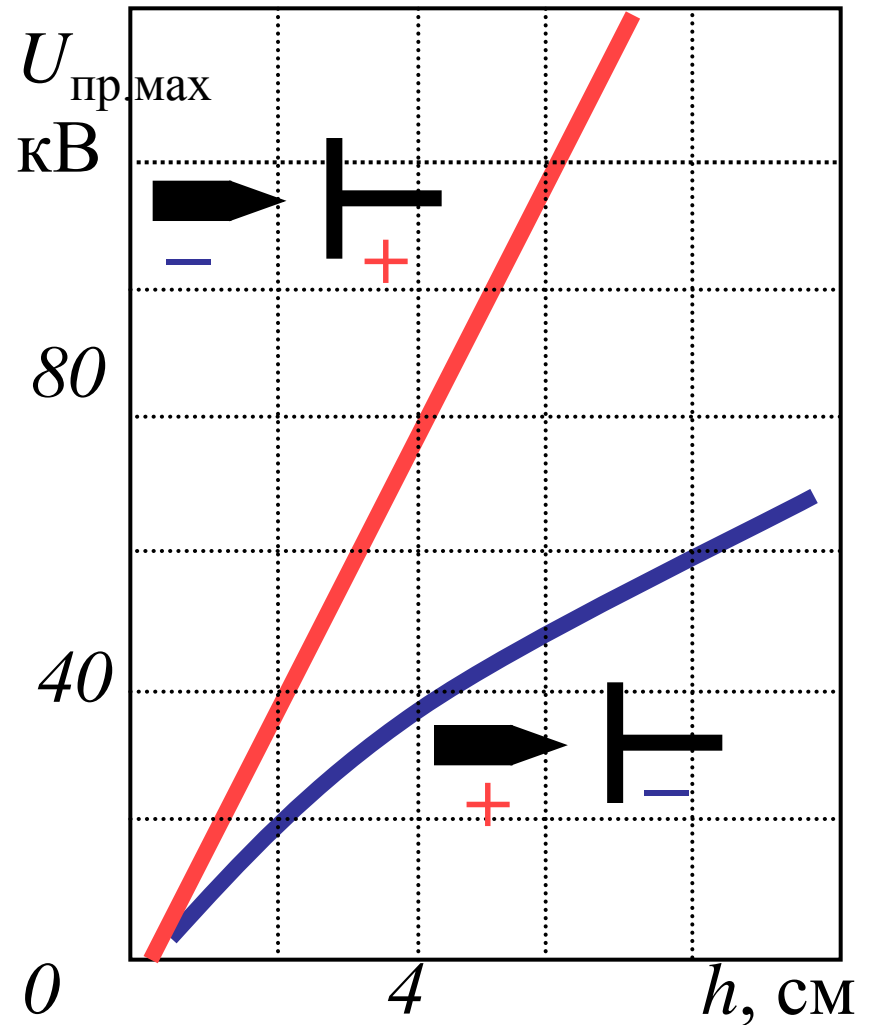
В местах, где  $E$  достигает критических значений, возникают частичные разряды в виде *короны*. При возрастании напряжения корона переходит в *искровой разряд и дугу*.

Величина  $U_{\text{ПР}}$  газа зависит от расстояния между электродами, от полярности электродов и от частоты поля.

Зависимость  $U_{\text{пр}}$  воздуха от расстояния между электродами:

При положительной полярности на игле,  $U_{\text{пр}}$  меньше, чем при обратной полярности.

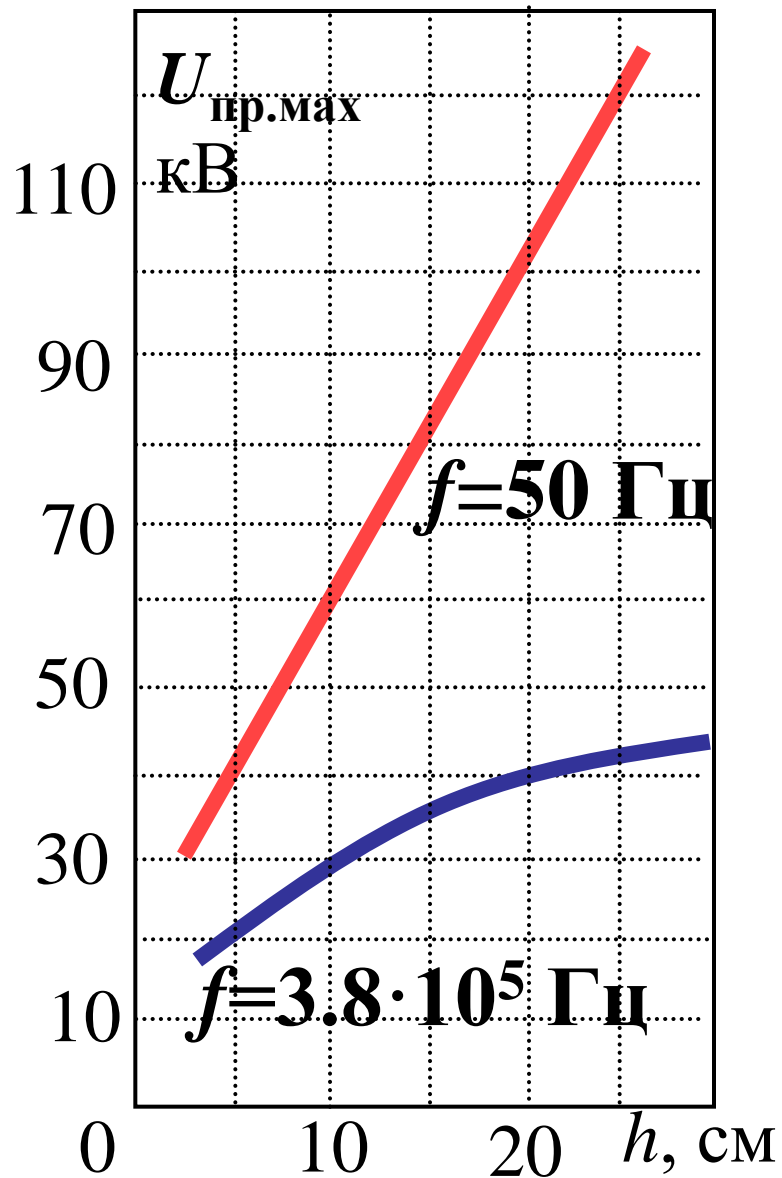
Это объясняется образованием у иглы положительного объемного заряда, содействующего развитию пробоя.





В отличие от пробоя газа в однородном поле, в неоднородном поле *при высоких частотах  $U_{ПР}$  меньше, чем при постоянном напряжении* или напряжении технической частоты.

При высоких частотах напряжение появления короны, почти совпадает с  $U_{ПР}$ . В этом случае  $U_{ПР}$  слабо возрастает с увеличением расстояния между электродами.



Зависимость  $U_{\text{пр}}$  воздуха от расстояния между электродами в неоднородном поле при разных частотах.

При н.у., постоянном напряжении и расстоянии между электродами 1 см электрическая прочность воздуха  $E_{\text{пр}} = 3 \text{ МВ/м}$ .

# Пробой жидких диэлектриков

К *жидким диэлектрикам* относятся масла: трансформаторное, конденсаторное, кабельное, фторорганическое и кремнийорганические жидкости, хлорированные углеводороды.

Различают *предельно чистые* и *технически чистые диэлектрики*, содержащие различные виды загрязнений (влага, пузырьки воздуха, волокнистые включения, твердые загрязнения).

*Электрическая прочность технических жидкостей* определяется *видом и концентрацией примесей*, мало зависит от структуры молекул самой жидкости.

В жидкостях может наблюдаться как *тепловой*, так и *электрический пробой*.

# Пробой жидких диэлектриков

Механизм пробоя и электрическая прочность жидких диэлектриков зависят от *чистоты*.

При кратковременном воздействии, пробой *тщательно очищенных жидкостей* связан с *ударной ионизацией* и *холодной эмиссией* с катода (плотность упаковки молекул выше, чем у газов).

$E_{\text{ПР}} \sim 100 \text{ МВ/м}$ , на 2 порядка выше, чем у газов.

В *загрязненных и технически чистых жидкостях* пробой связан с *движением и перераспределением частиц примесей* (эмульсии и суспензии).

$E_{\text{ПР}} \sim 10\text{-}70 \text{ МВ/м}$

# Пробой жидких диэлектриков

*Тепловой пробой* наиболее вероятен в жидкостях, содержащих *примеси*.

Теория теплового пробоя связывает *пробой технических жидких диэлектриков* с частичным перегревом жидкости и вскипанием ее в местах *наибольшего количества примесей*, приводящих к образованию *газового мостика* между электродами.

В жидкостях может наблюдаться как *тепловой*, так и *электрический пробой*.

# Пробой жидких диэлектриков

*Электрический пробой* жидких диэлектриков наиболее вероятен в *предельно очищенных жидкостях* и может быть рассмотрен так же, как и в газах.

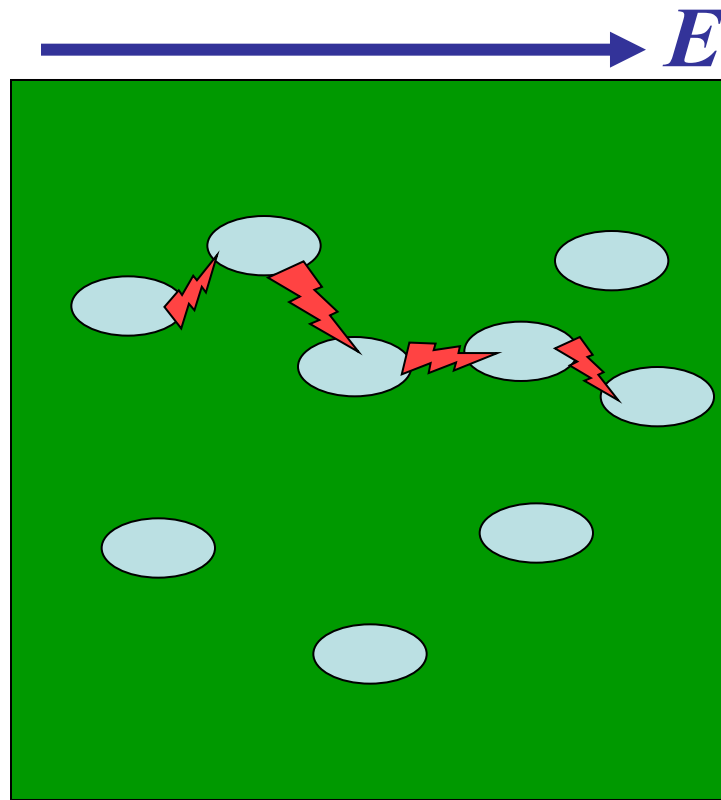
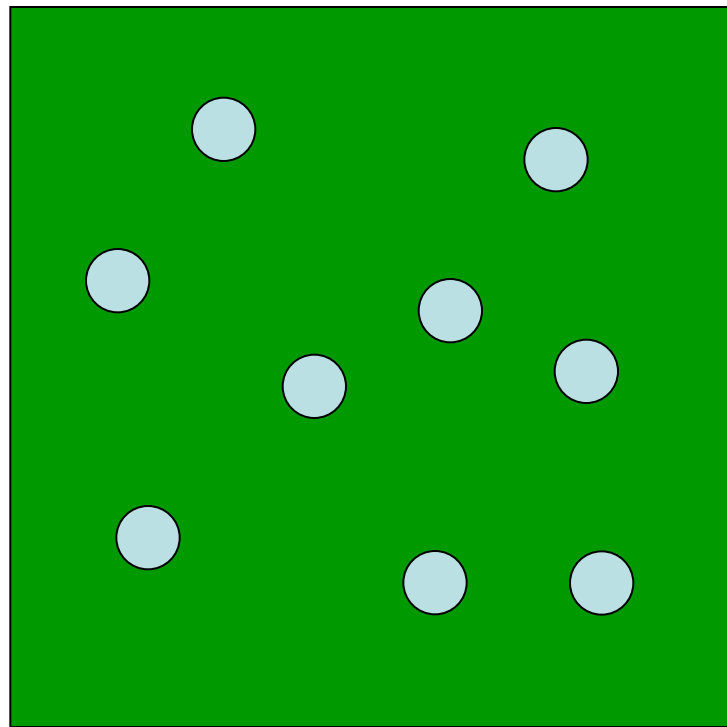
Но в жидкостях, *за счет большей плотности*, резко *уменьшается длина свободного пробега*  $\lambda$  электронов.

Это приводит к существенному *повышению электрической прочности*  $E_{\text{ПР}}$  по сравнению с газами.

На *электрическую прочность* жидких диэлектриков резкое влияние оказывают *твердые и жидкие примеси*.

В жидкостях может наблюдаться как *тепловой*, так и *электрический пробой*.

# Пробой жидкого диэлектрика с *эмульгированной влагой* (теория Геманта).



## Критерий Геманта:

пробой происходит, когда межэлектродное пространство перекрыто каплями на **60–70%**.

# Пробой жидкого диэлектрика

Частицы *поляризуются*, втягиваются в промежуток между электродами, образуется *мост* (обладает более высокой проводимостью).

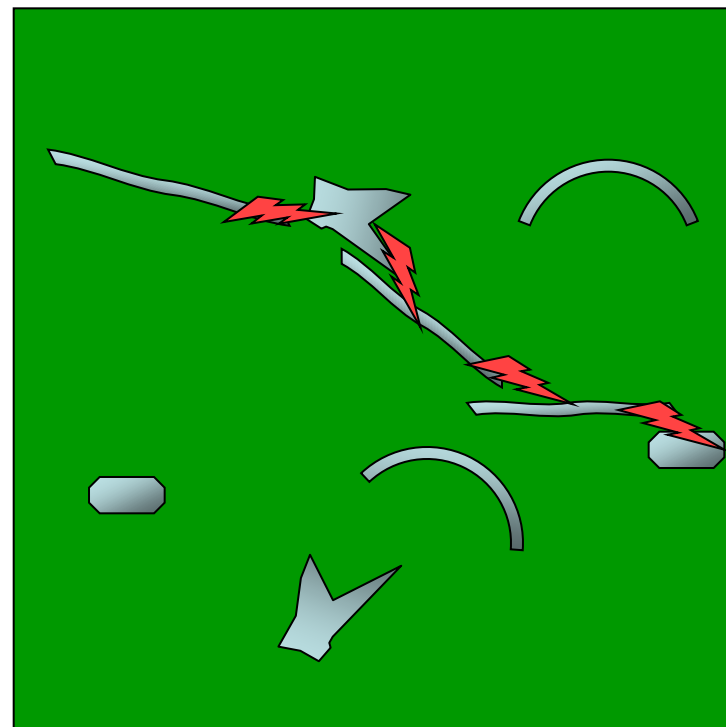
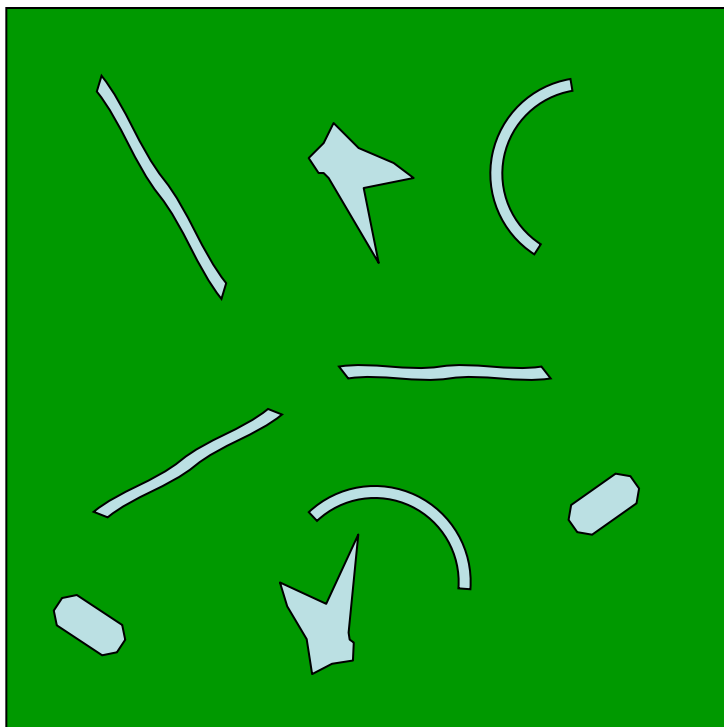
Если частицы перекрывают промежуток на 60-70% - локальный разогрев жидкости, *тепловой пробой*.

Если включить повторное напряжение *через несколько минут* (10 мин) – пробой произойдет *при большем напряжении  $U$*  (за счет подсушки).

Температура в начале высокая, жидкость испаряется, происходит самоочистка жидкости, нужно больше капелек, а их меньше из-за высокой  $T$ .



Пробой жидкого диэлектрика с  
*твёрдыми примесями*  
(теория А.Ф. Вальтера)



# Пробой жидкого диэлектрика

Примерно то же самое, что и для жидких примесей.

Если включить повторное напряжение *через несколько минут* (10 мин) – пробой произойдет *при меньшем напряжении  $U$*  (за счет образования продуктов разложения).

Органика частично сгорит – черный дым (сажа – продукт сгорания), твердых частиц будет больше.

*Лавинно-стримерный пробой не может быть* – расстояние мало, квант энергии не сможет распространиться, т.к. *жидкости не прозрачны*.

# Пробой твердых диэлектриков

## Механизмы пробоя:

- ✓ *электрический,*
- ✓ *электротепловой,*
- ✓ *электрохимический,*
- ✓ *ионизационный.*

*Каждый из указанных видов пробоя* может иметь место для одного и того же материала *в зависимости от характера электрического поля* – постоянного или переменного, импульсного НЧ или ВЧ, наличия дефектов, закрытых пор, условий охлаждения, времени воздействия напряжения.

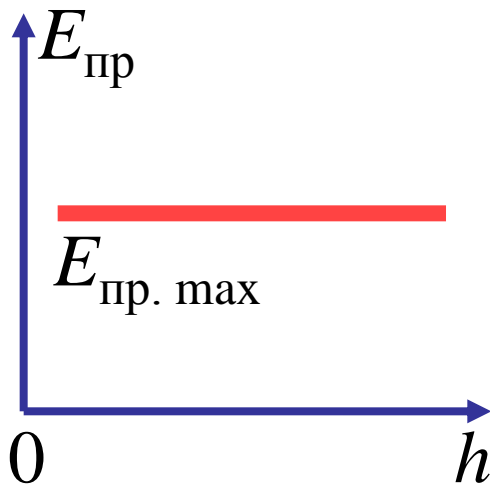
## *Электрический пробой*

обусловлен *ударной ионизацией* или *разрывом связей* между частицами диэлектрика под действием электрического поля.

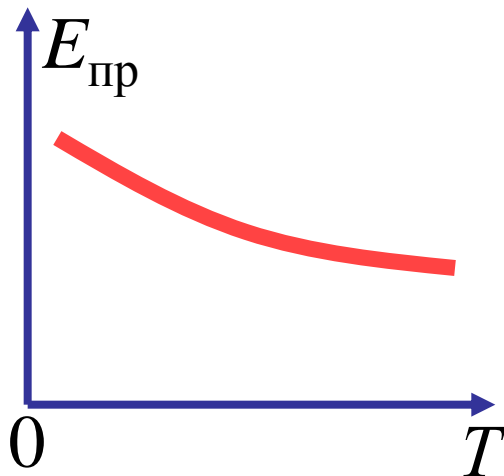
Наблюдается в *однородных диэлектриках* с малым  $\text{tg}\delta$ , когда исключено влияние электропроводности, отсутствует ионизация газовых включений.

Время пробоя  $< 10^{-7} \div 10^{-8} \text{с}$ .

$$E_{\text{ПР}} = 100 \div 1000 \text{МВ/м}$$



$E_{\text{пр}}$  определяется строением диэлектрика (плотностью упаковки, прочностью связей атомов).



$E_{\text{пр}}$  практически не зависит от внешних факторов: температура, частота приложенного напряжения, форма и размеры образца.

## *Тепловой пробой*

возникает, когда количество тепла, выделенного в диэлектрике за счет *диэлектрических потерь*, *превышает* количество *рассеиваемого тепла*.

*Нарушение теплового равновесия* ведет к разогреву материала, расплавлению, растрескиванию, обугливанию и к *разрушению диэлектрика*.

Развитие процессов термического разрушения приводит к *чрезмерному возрастанию* электропроводности и диэл. потерь.

Условие теплового равновесия :

$$P_n = P_p.$$

Мощность, выделяемая в диэлектрике:

$$P_n = U^2 \omega C \operatorname{tg} \delta.$$

Тепло, отводимое от образца:

$$P_p = k S (T - T_0),$$

$k$  – коэффициент теплоотдачи;  $S$  – площадь поверхности изоляционного материала;  $T$  – тем-ра поверхности материала;  $T_0$  – темп-ра окруж. среды.

$$U_{пр} = \sqrt{\frac{k \cdot S \cdot (T_{кр} - T_0)}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot C \cdot \operatorname{tg} \delta}}$$

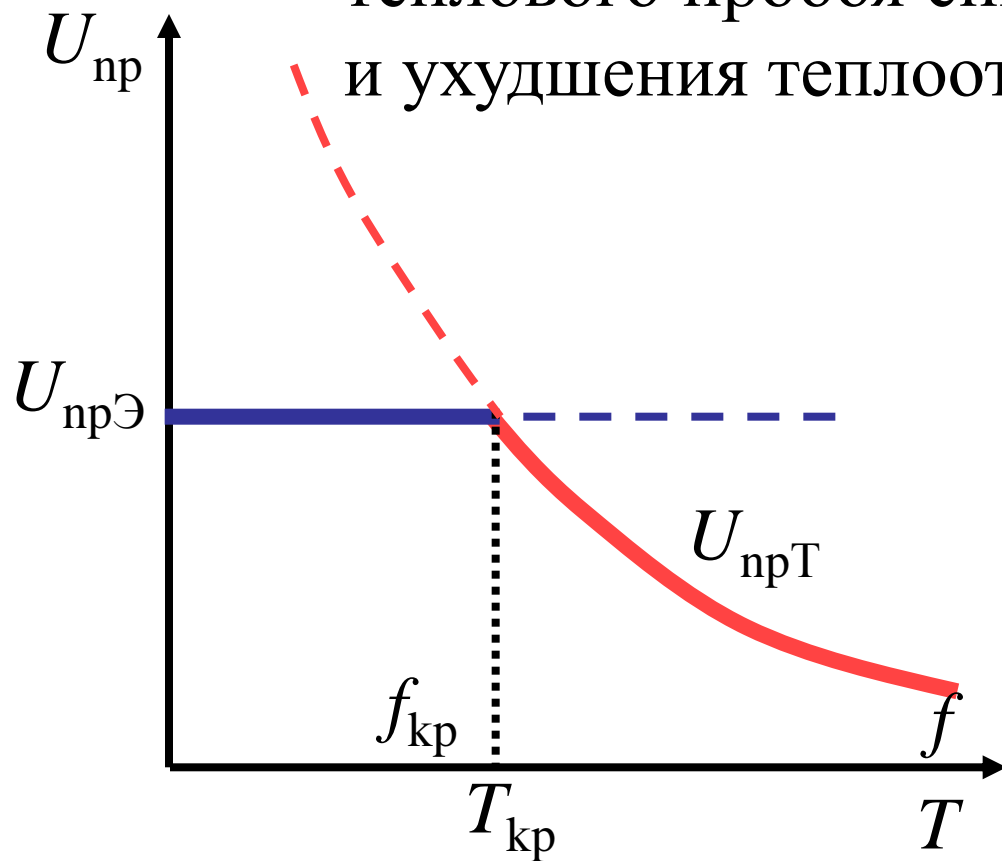
$\operatorname{tg} \delta$  соответствует критической температуре  $T_{кр}$ , при которой выполняется  $P_n = P_p$ .

В отличие от электрического пробоя, напряжение теплового пробоя *зависит от частоты* как  $f^{-1/2}$ .

Т.о.,  $U_{пр}$  снижается на высоких частотах.



С ростом  $T$  электрическая прочность  $E_{прТ}$  при тепловом пробое уменьшается, т.к.  $U_{прТ}$  теплового пробоя снижается за счет роста  $\text{tg}\delta$  и ухудшения теплоотвода.



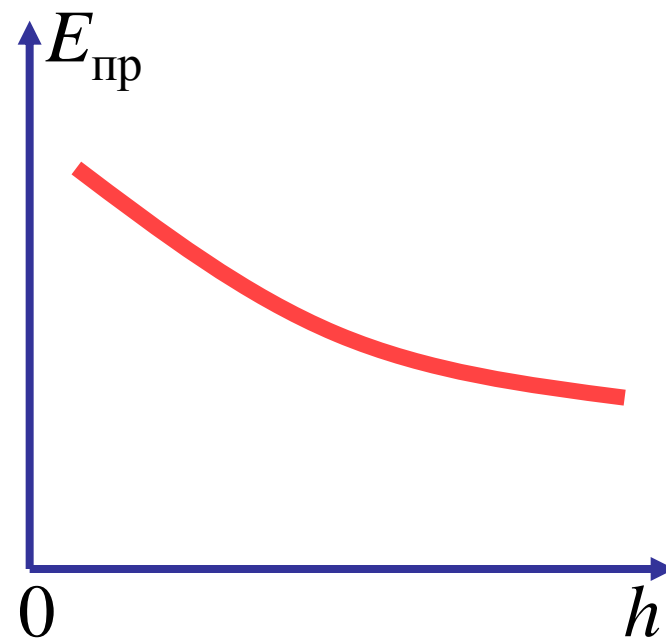
$U_{прТ} > U_{прЭ}$   
электрический  
пробой

$U_{прТ} < U_{прЭ}$   
тепловой  
пробой

С изменением  $f$  или  $T$  может изменяться механизм пробоя диэлектрика.  $f_{кр}$  (или  $T_{кр}$ ), зависит от свойств диэлектрика, условий теплоотвода, времени приложения напряжения, характеристик эл. поля.

При увеличении толщины диэлектрика  $h$ ,  $U_{\text{прТ}}$  возрастает.

Количество выделяемого тепла пропорционально **объему** диэлектрика, а количество отводимого тепла пропорционально **площади** теплообмена. Поэтому при увеличении толщины  $h$ , нагрев диэлектрика за счет потерь возрастает быстрее, чем отвод тепла.



При тепловом пробое электрическая прочность  $E_{\text{прТ}}$  с ростом  $h$  уменьшается.

Низкой электрической прочностью отличаются *диэлектрики с открытой пористостью* (дерево, непропитанная бумага, мрамор).

Эл. прочность их мало отличается от прочности воздуха.

*Увеличить эл. прочность* таких диэлектриков ВОЗМОЖНО:

- *путем заполнения пор жидким диэлектриком* (пропитка маслом).

- *путем наслоения листов непропитанной бумаги* при небольшом числе слоев (1-3).

При большем числе слоев бумаги ухудшаются условия отвода тепла,  $E_{пр}$  падает, возможен *электротепловой пробой*.

# *Электрохимический пробой*

наблюдается при длительном приложении напряжения.

Под действием  $E$ ,  $T$ , кислорода в диэлектрике идет окисление, разрыв связей и другие процессы, приводящие к его **старению**.

Образующиеся низкомолекулярные вещества (щёлочи, кислоты, окислы азота, озон и др.), взаимодействуют с веществом диэлектрика и ускоряют процессы старения.

Эл. старение особенно существенно при воздействии постоянного напряжения. Характеристикой является **время жизни** эл. изоляции или **кривая жизни**.

## *Ионизационный пробой*

обусловлен ионизационными процессами из-за частичных разрядов в диэлектрике.

Характерен для диэлектриков с воздушными включениями.

При больших напряженностях поля в воздушных порах возникает ионизация воздуха, образование озона, ускоренных ионов, выделение тепла. Эти факторы приводят к разрушению изоляции и снижению  $E_{пр}$ .

Наряду с объемным возможен и *поверхностный пробой*: пробой в жидком или газообразном диэлектрике, прилегающем к поверхности твердой изоляции.

Так как  $E_{\text{пр}}$  жидкостей и газов ниже  $E_{\text{пр}}$  твердых диэлектриков, то пробой в первую очередь будет происходить *по поверхности диэлектрика*.

Чтобы *исключить* поверхностный пробой, *поверхность изоляторов делают гофрированной*, а в конденсаторах оставляют не металлизированные *закраины диэлектрика*. Поверхностное  $U_{\text{пр}}$  также *повышают путем герметизации поверхности электрической изоляции* лаками, компаундами, жидкими диэлектриками с высокой  $E_{\text{пр}}$ .