

Пробой диэлектриков

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

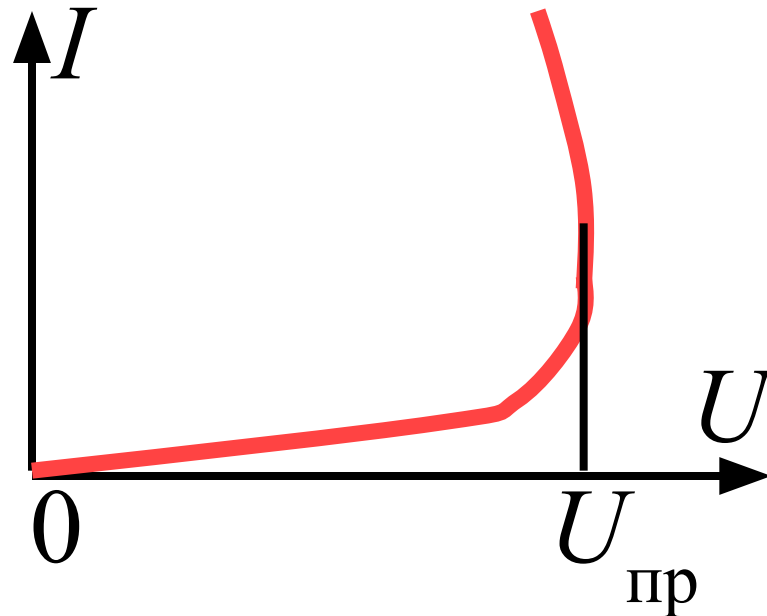
Пробой может быть

полным, неполным, частичным, поверхностным.

Пробивным напряжением $U_{пр}$

называется минимальное приложенное к образцу диэлектрика напряжение, приводящее к его пробое.

Вольтамперная характеристика электрической изоляции:



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

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

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

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

При медленном увеличении напряжения, $U_{пр}$ называют

статическим пробивным напряжением.

При воздействии импульсов –

импульсным пробивным напряжением.

Отношение импульсного пробивного напряжения диэлектрика к статическому называют

коэффициентом импульса, который > 1 .

Электрическая прочность —
напряженность однородного
электрического поля,
приводящая к пробоею:

$$E_{\text{ПР}} = U_{\text{ПР}} / h$$

Пробой газов

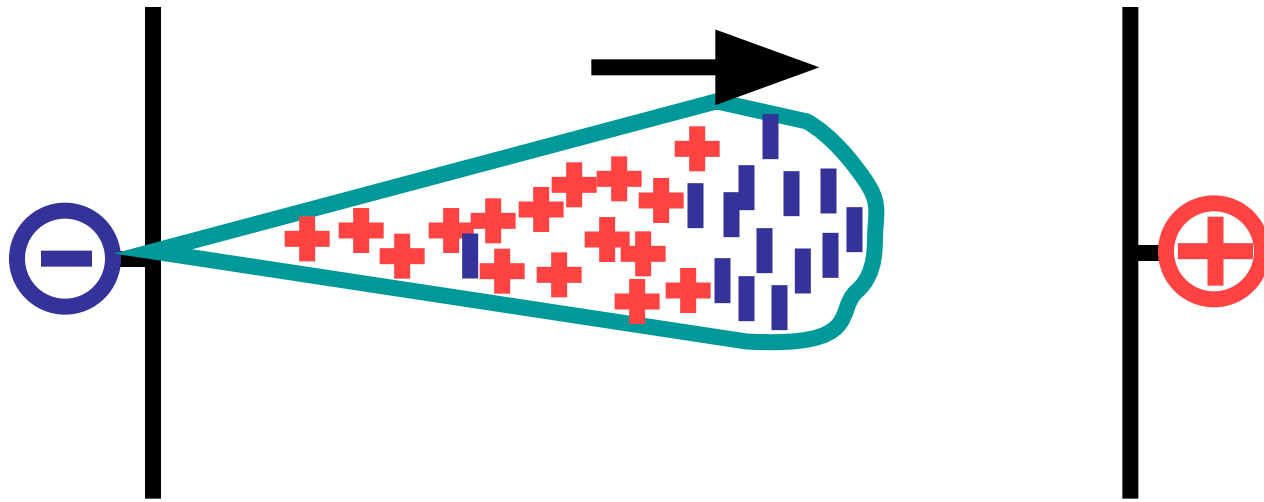
В поле E , заряженные частицы между двумя соударениями приобретают энергию $W=qlE$.

Если $W \geq W_{и}$, то возможен пробой, где $W_{и}$ энергия ионизации молекулы газа.

Начальная напряженность поля $E_{НАЧ}$ — значение напряженности, при которой в данном газе (при данных P и T) начинается *ударная ионизация*.

Пробой газа зависит также от степени однородности электрического поля.

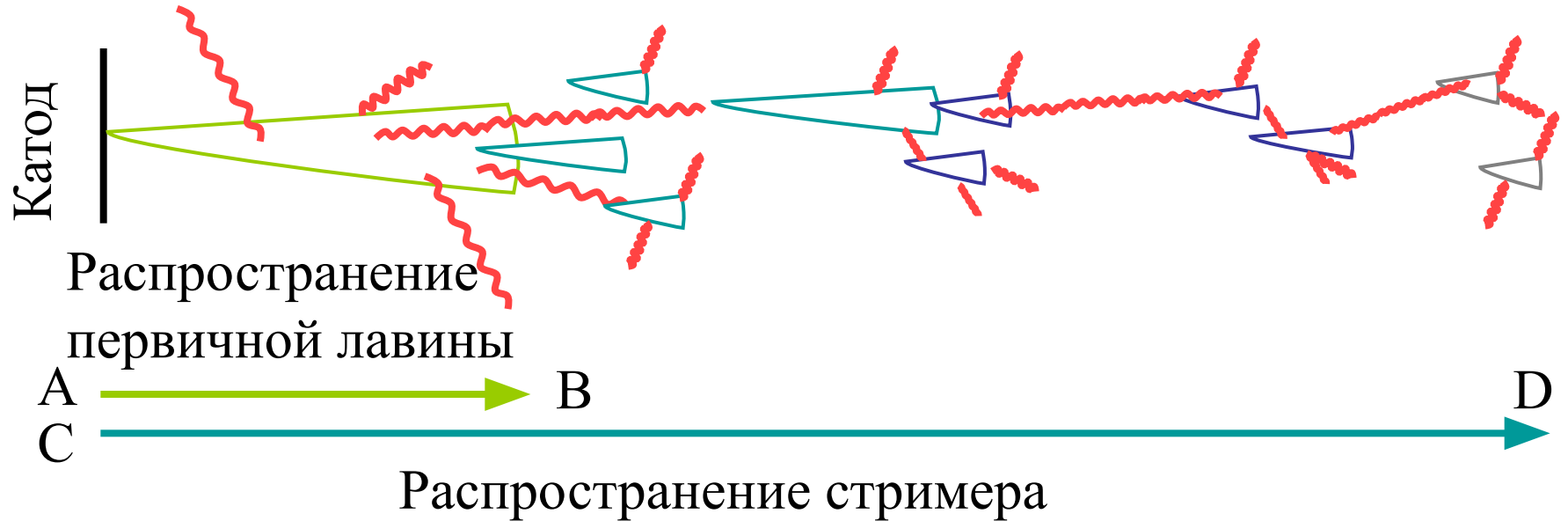
Лавинный механизм пробоя газа – ударная ионизация



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.

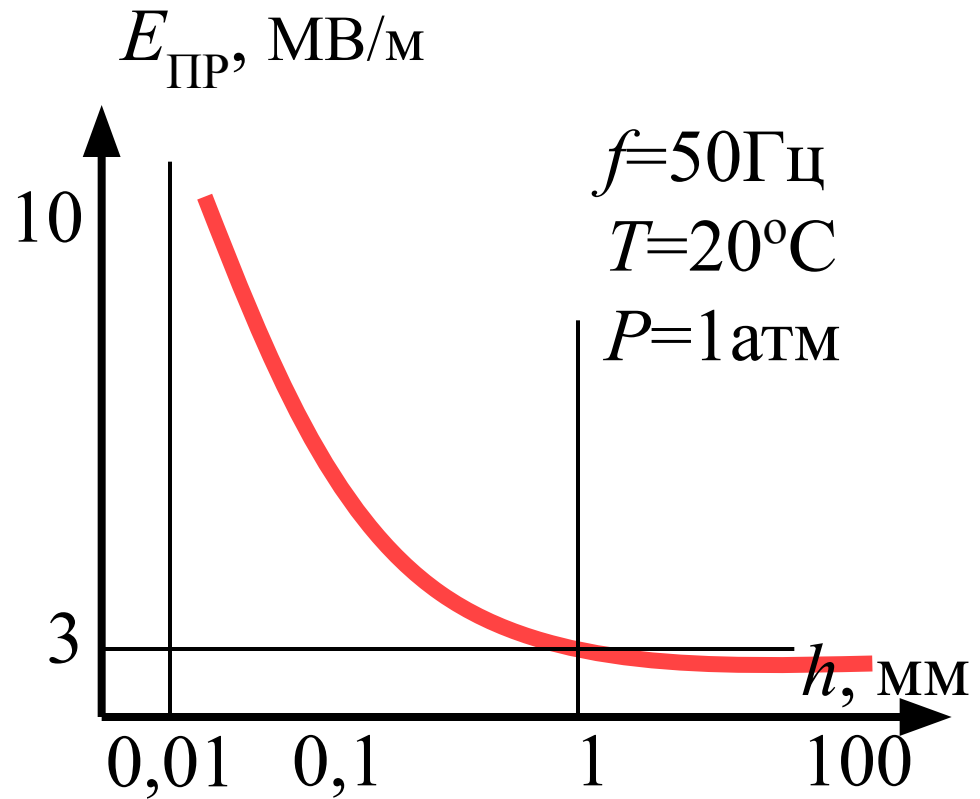
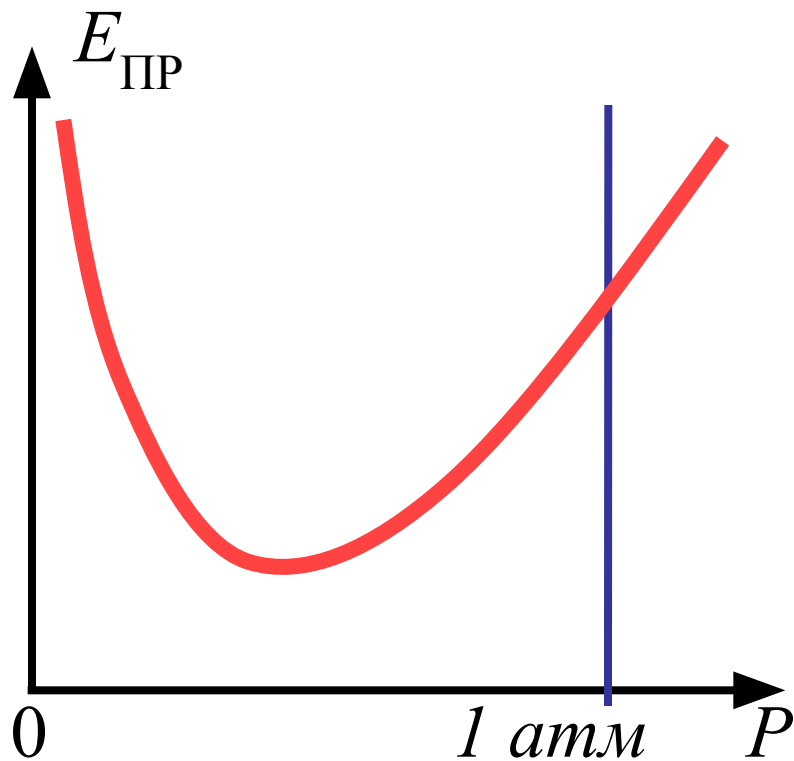
Лавинно-стримерный механизм пробоя газа – совместное действие поля пространственного заряда лавины и фотоионизации в объеме газа.



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

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

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



Эмпирический *закон Пащенко*:

если длина разрядного промежутка h и давление газа p изменяются так, что

$$h \cdot p = \text{const}, \text{ то и } U_{\text{ПР}} = \text{const}.$$

Т.е. $U_{\text{ПР}}$ газов является функцией произведения ph .

В неоднородном поле:

В местах, где E достигает критических значений, возникают частичные разряды в виде *короны*.

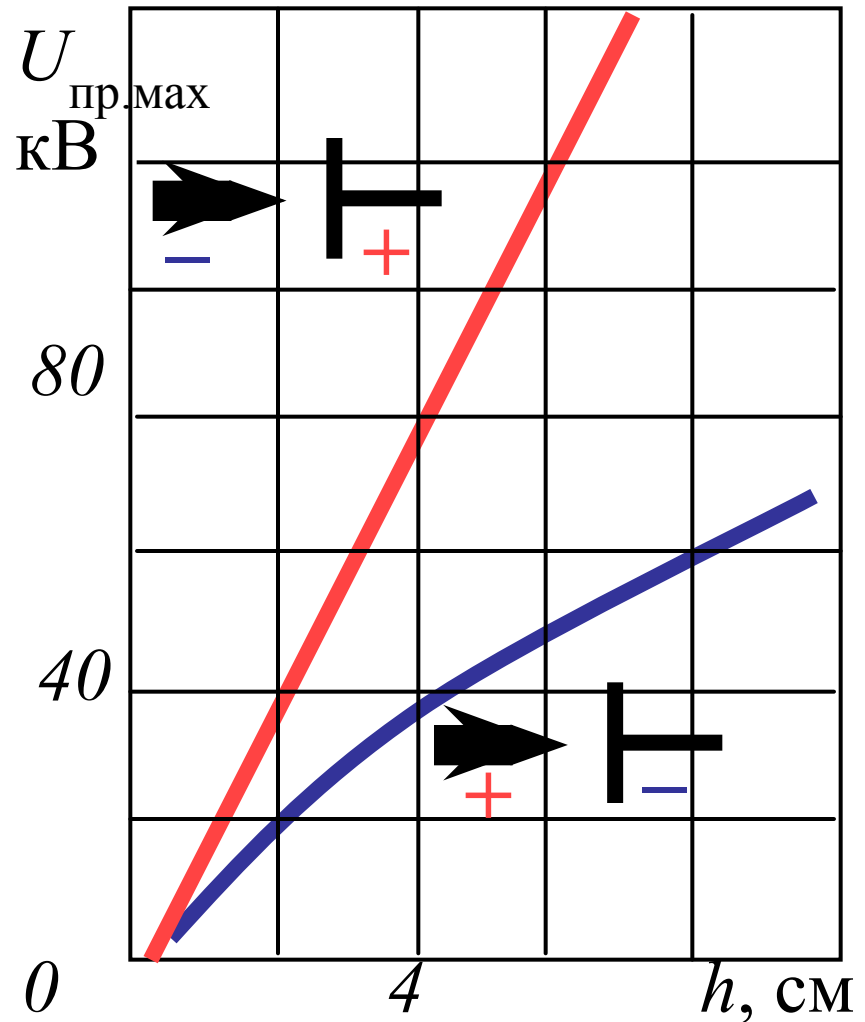
При возрастании напряжения корона переходит в искровой разряд и дугу.

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:

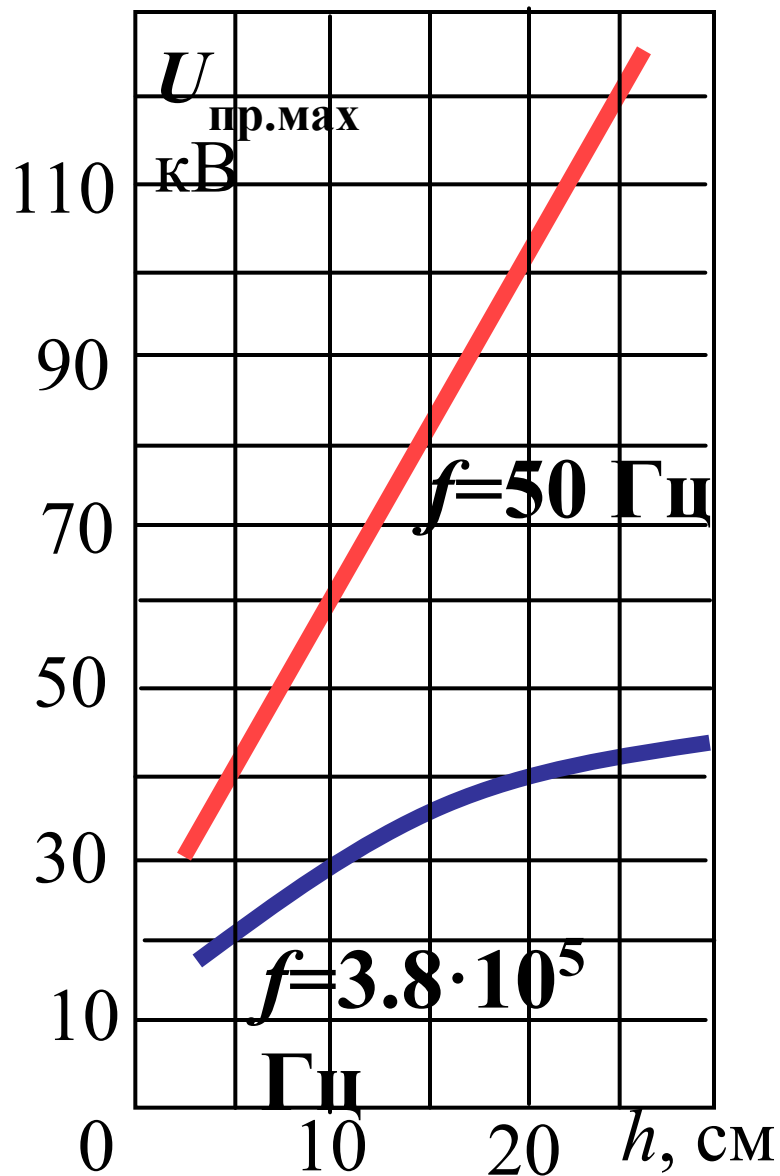
При положительной полярности на игле, $U_{\text{пр}}$ меньше, чем при обратной полярности.

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 $U_{\text{ПР}}$ меньше, чем при постоянном напряжении* или напряжении технической частоты.

При высоких частотах напряжение появления короны, почти совпадает с $U_{\text{ПР}}$. В этом случае $U_{\text{ПР}}$ 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 $E_{\text{пр}} = 3 \text{ МВ/м}$.

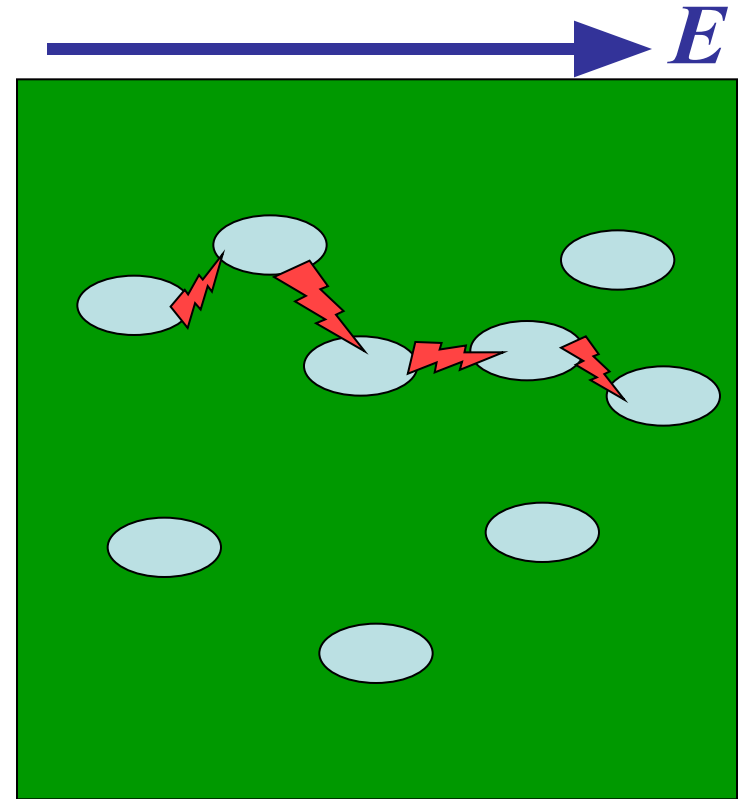
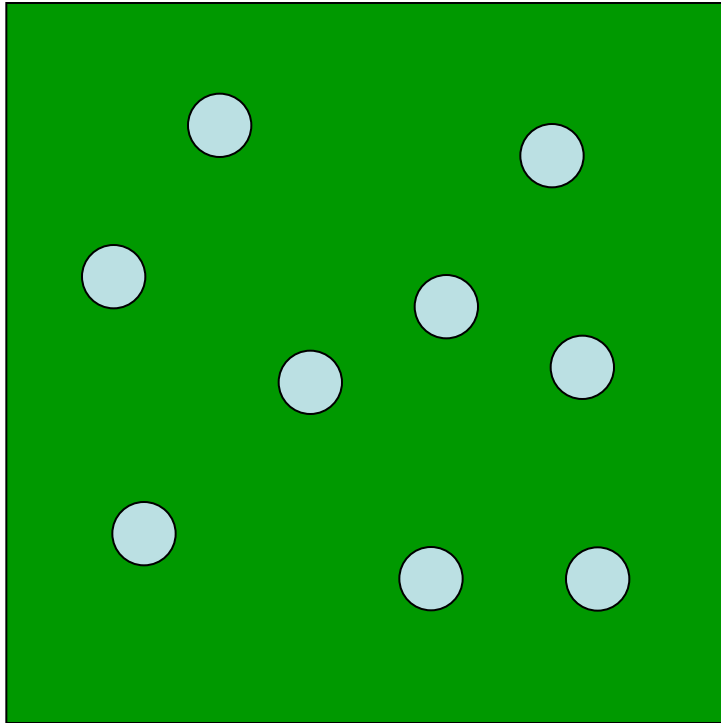
Пробой жидких диэлектриков

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

В *загрязненных и технически чистых жидкостях* пробой связан с движением и перераспределением частиц примесей.

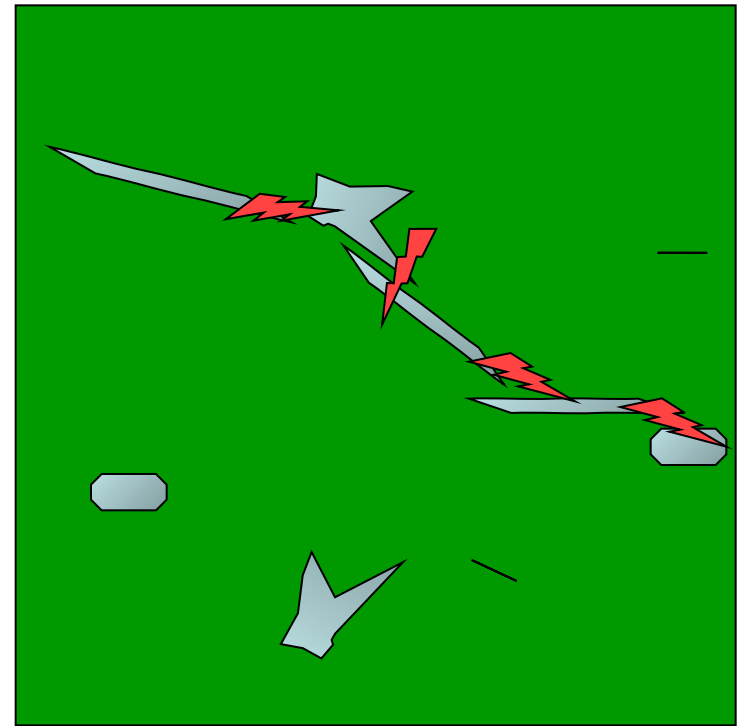
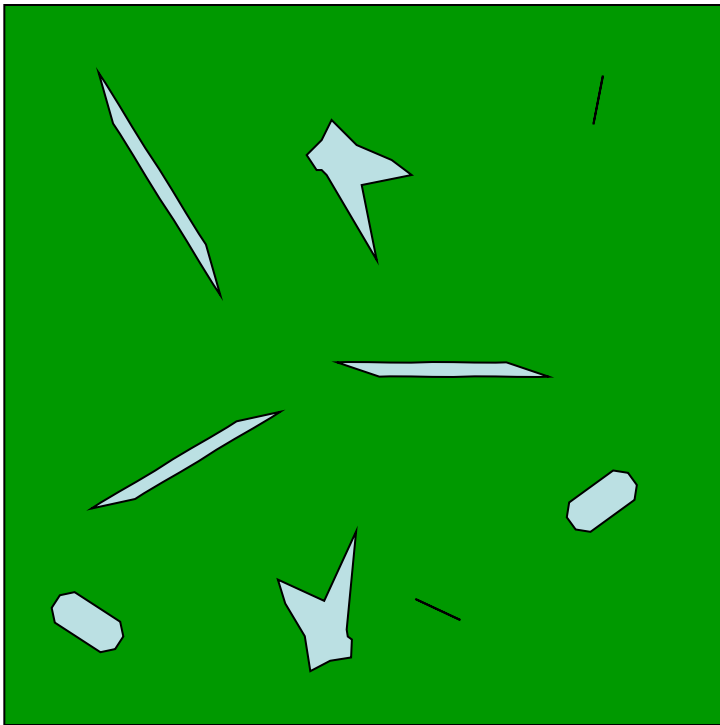
Пробой жидкого диэлектрика с *эмульгированной влагой* (теория Геманта).



Критерий Геманта:

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

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



Пробой твердых диэлектриков

Механизмы пробоя:

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

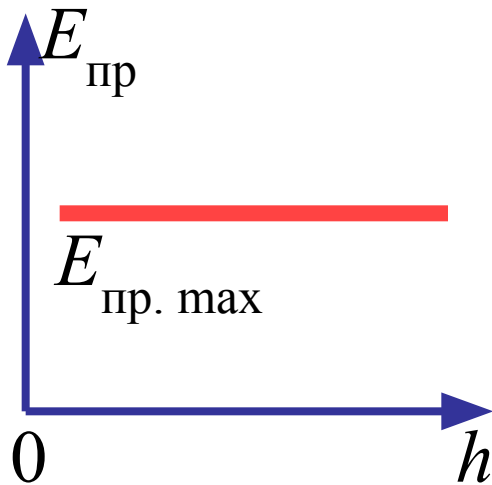
Электрический пробой

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

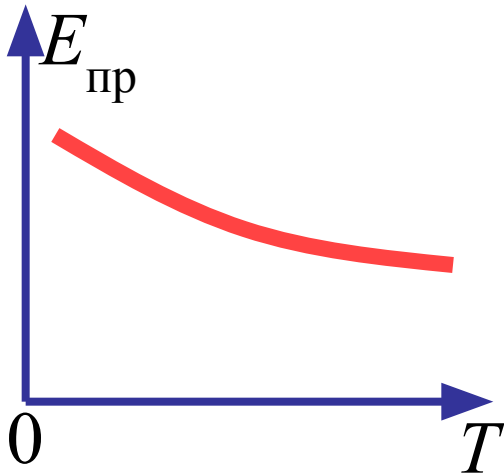
Наблюдается в однородных диэлектриках с малым $tg\delta$.

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

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.

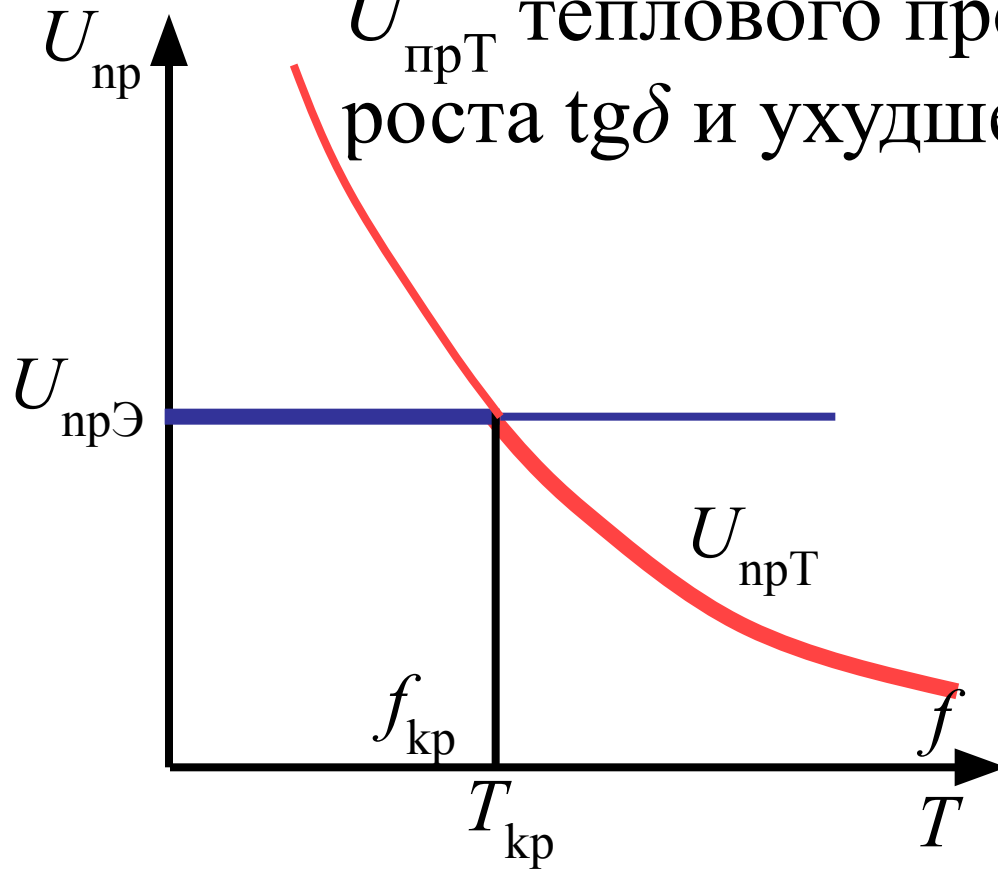
$$U_{пр} = \sqrt{\frac{k \cdot S \cdot (T_{кр} - T_0)}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot C \cdot \operatorname{tg} \delta}}$$

$\operatorname{tg} \delta$ 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.



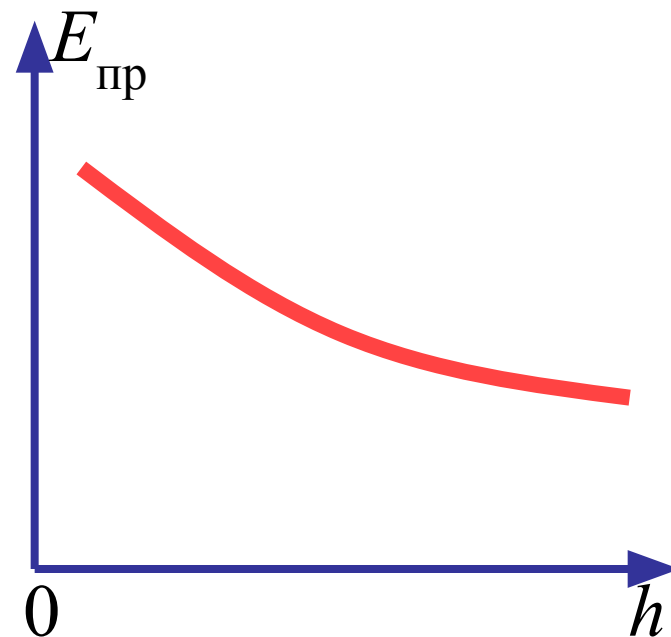
$U_{прТ} > U_{прЭ}$
электрический
пробой

$U_{прТ} < U_{прЭ}$
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, скважности импульсов.

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.

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.

Электрическое старение особенно существенно при воздействии постоянного напряжения. Характеристикой является **время жизни** электрической 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 $E_{\text{пр}}$.

Пробой неоднородных диэлектриков