

ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОЕ МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ



© 2022 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.

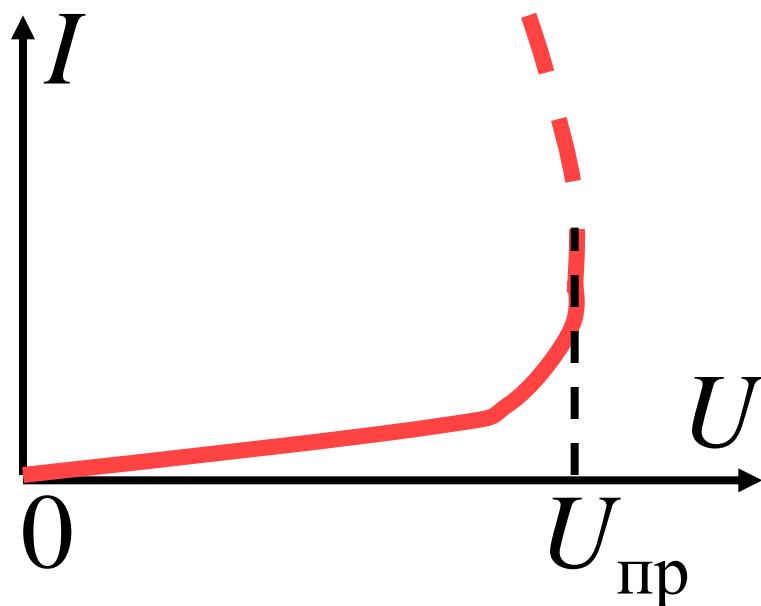
ПРОБОЙ ДИЭЛЕКТРИКОВ

- **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*.

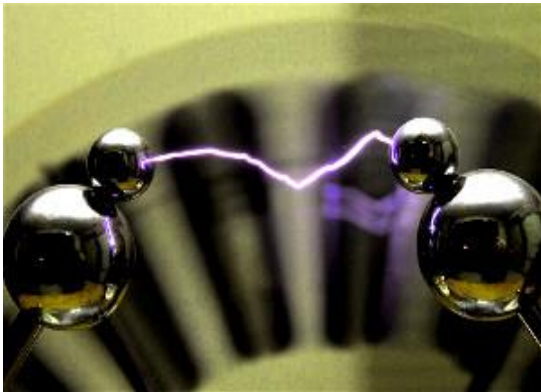
Отношение $U_{\text{пр}}$ к номинальному напряжению, называют *коэффициентом запаса электрической прочности*.

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

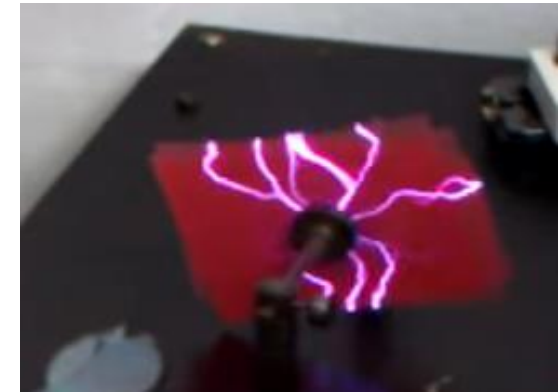
При *кратковременных импульсах* пробой происходит *при больших напряжениях*, чем в случае *постоянного* или *длительно приложенного переменного напряжения*.



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 виды пробоя:

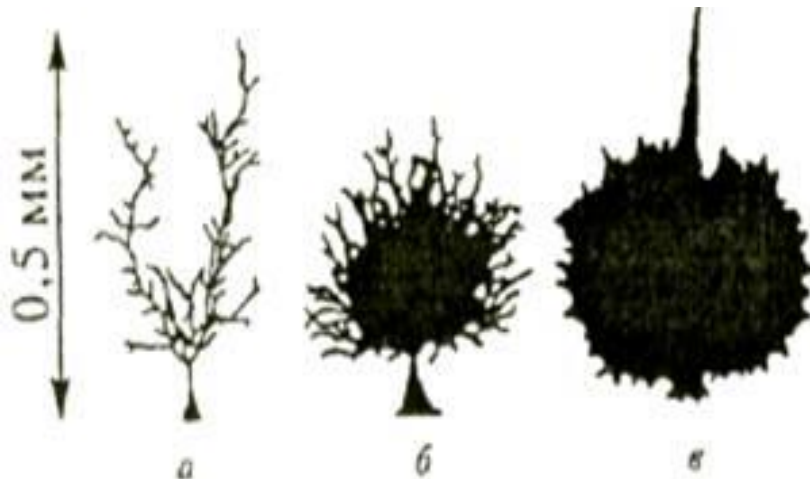
электрический, тепловой, электрохимический.

- ✓ *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

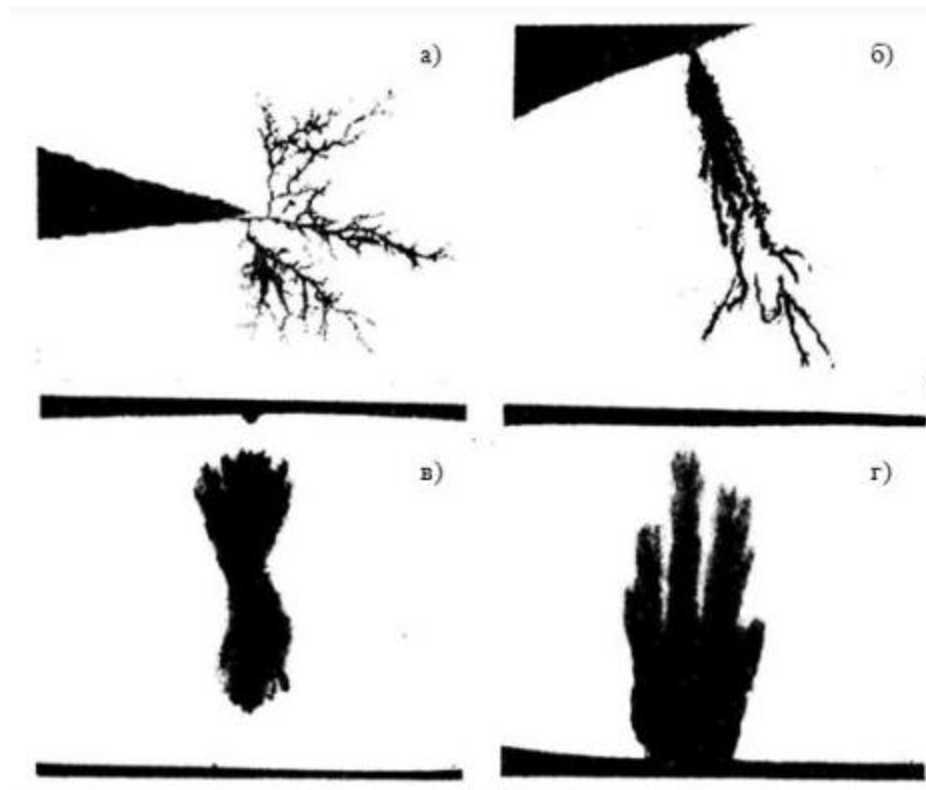
✓ *Электрохимический пробой* — пробой, обусловленный химическими процессами, приводящими к изменениям в диэлектрике под действием электрического поля.

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 ДИЭЛЕКТРИКОВ



Триингообразования (образование дендритов) в полимерной изоляции :

а - триинг электрического происхождения, полученный в лаборатории ВНИИКП;

б - триинг электрического происхождения, выявленный в пробитом кабеле;

в - триинг водного происхождения, полученный в лаборатории ВНИИКП (триинг типа "бант");

г - триинг водного происхождения, выявленный в пробитом кабеле (триинг типа "веер")

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).

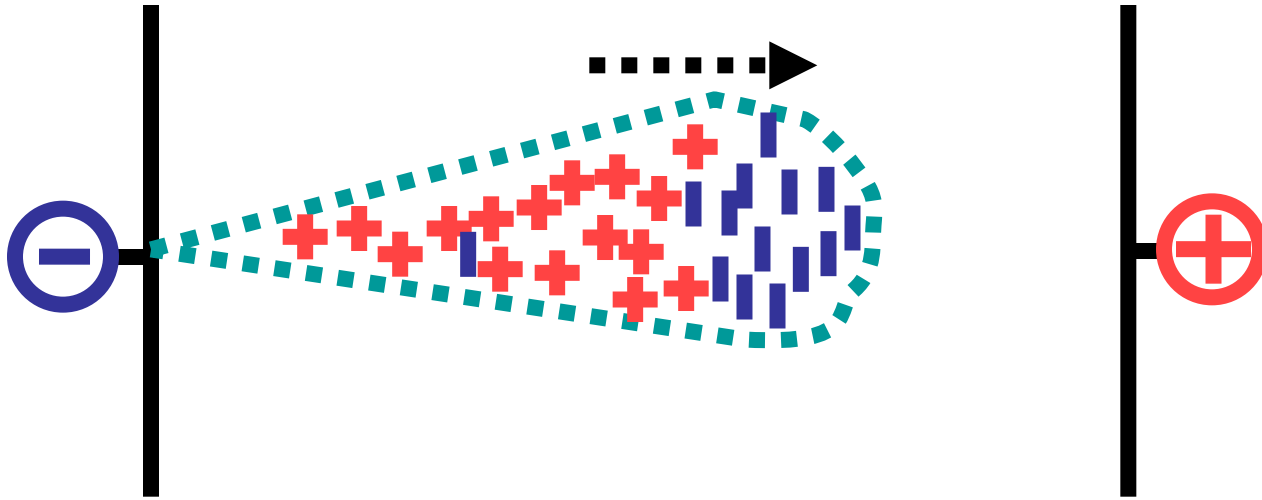
Начальная напряженность поля $E_{нач}$ — значение напряженности, при которой в данном газе (при данных P и T) начинается *ударная ионизация* (столкновение эл-на с нейтральной молекулой, чтобы выбить эл-н).

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*.

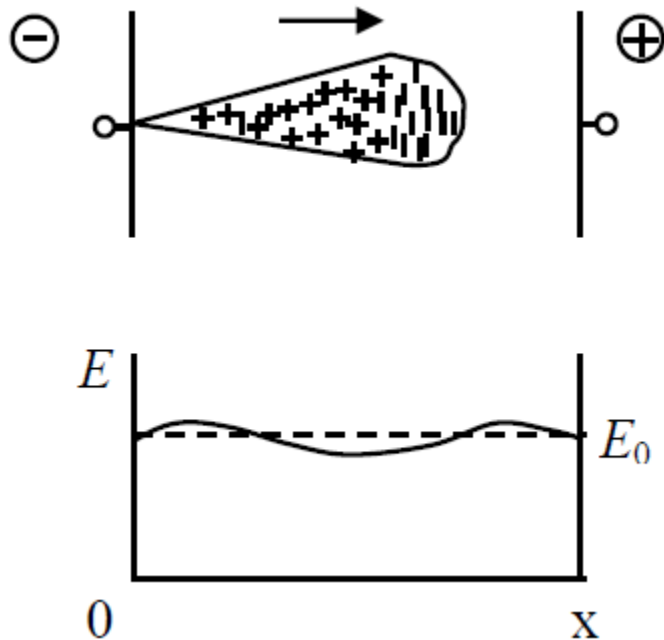
Образовался *проводящий канал* – система отключилась, *сработала защита*:

- 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*:

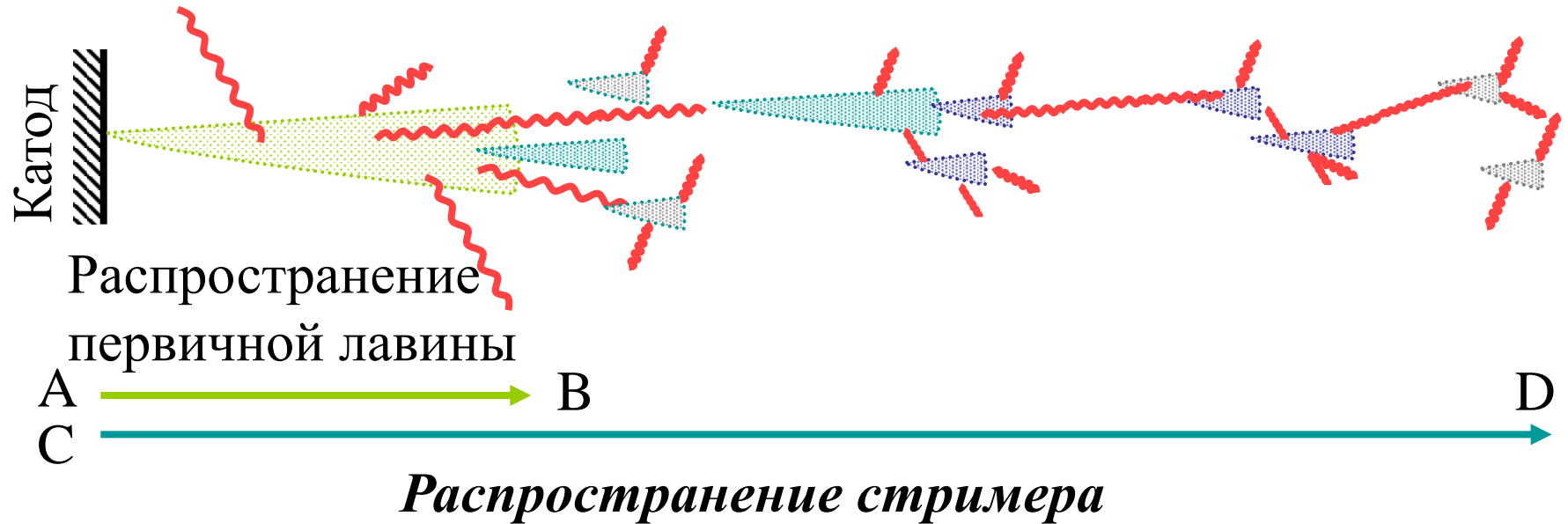
- *через сутки* – *все* электроны и ионы *прорекомбинируют*;
- *через несколько минут* – останутся *нерекомбинированные* электроны и ионы.



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 **лавинный поток** положительно заряженных частиц, направленный **к катоду**.

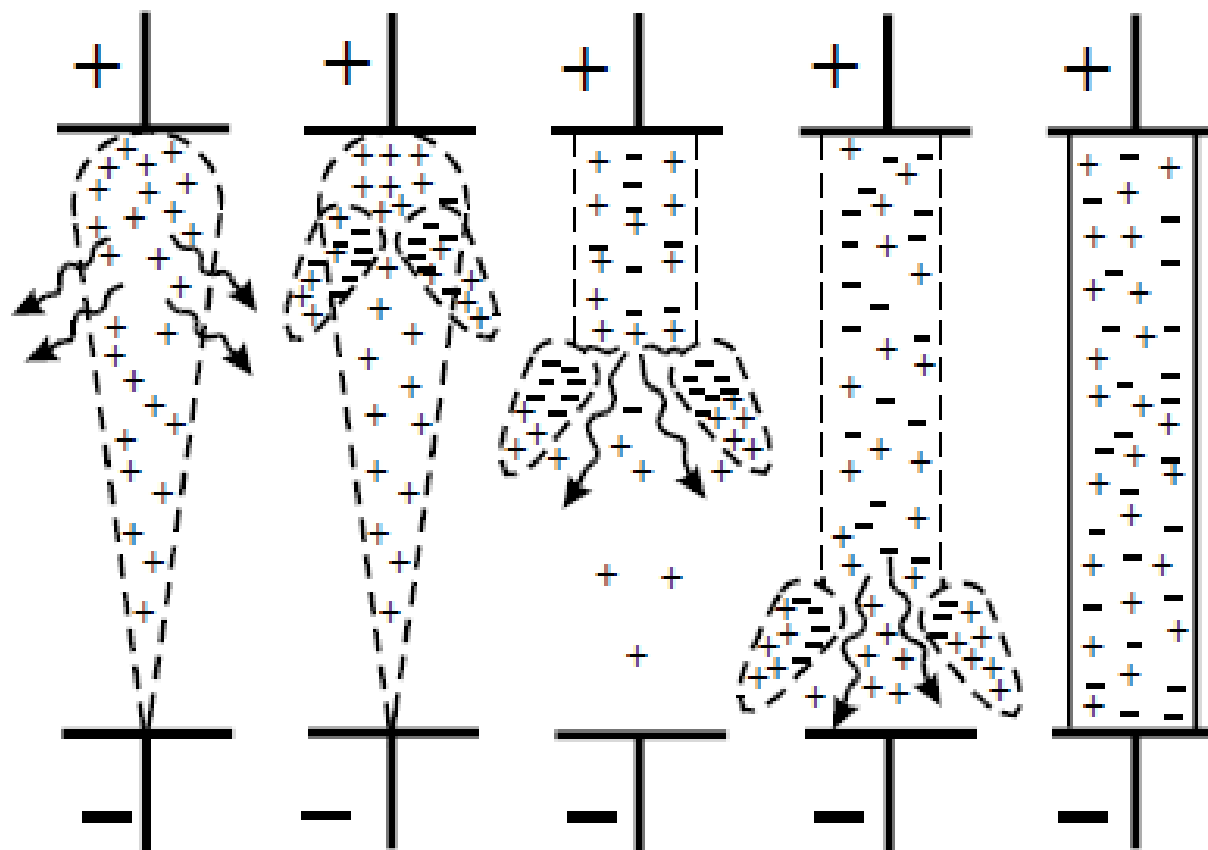


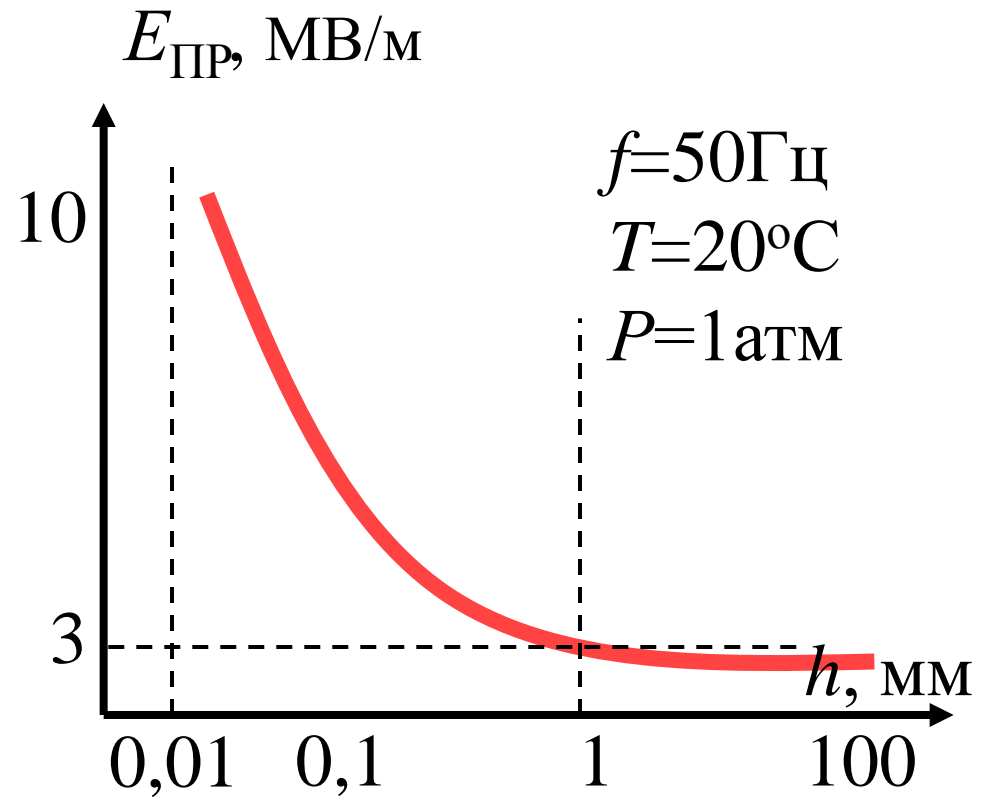
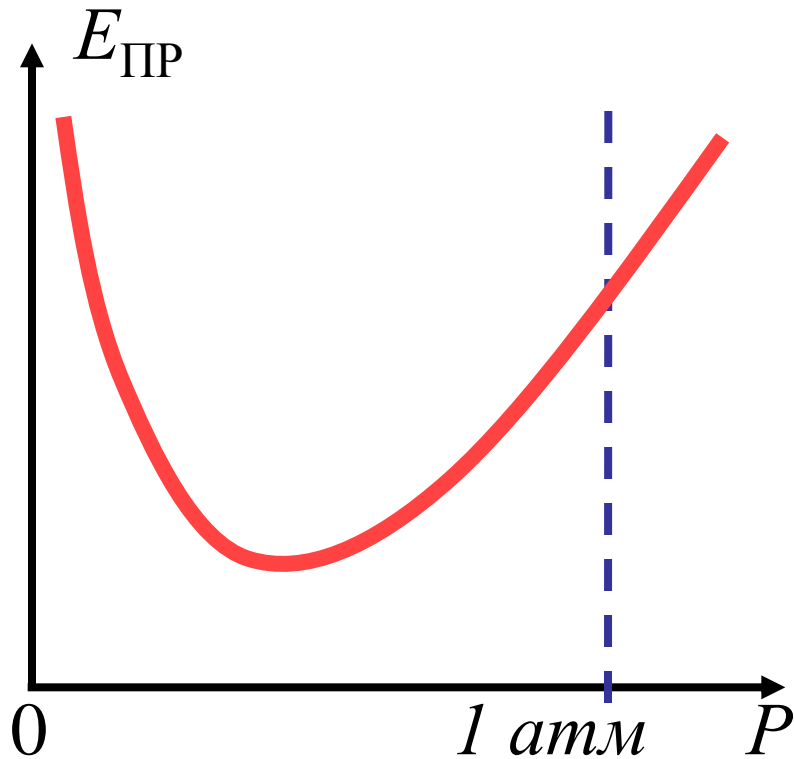
Схема возникновения и развития положительного стримера.

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 $E_{\text{пр}}$ 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:

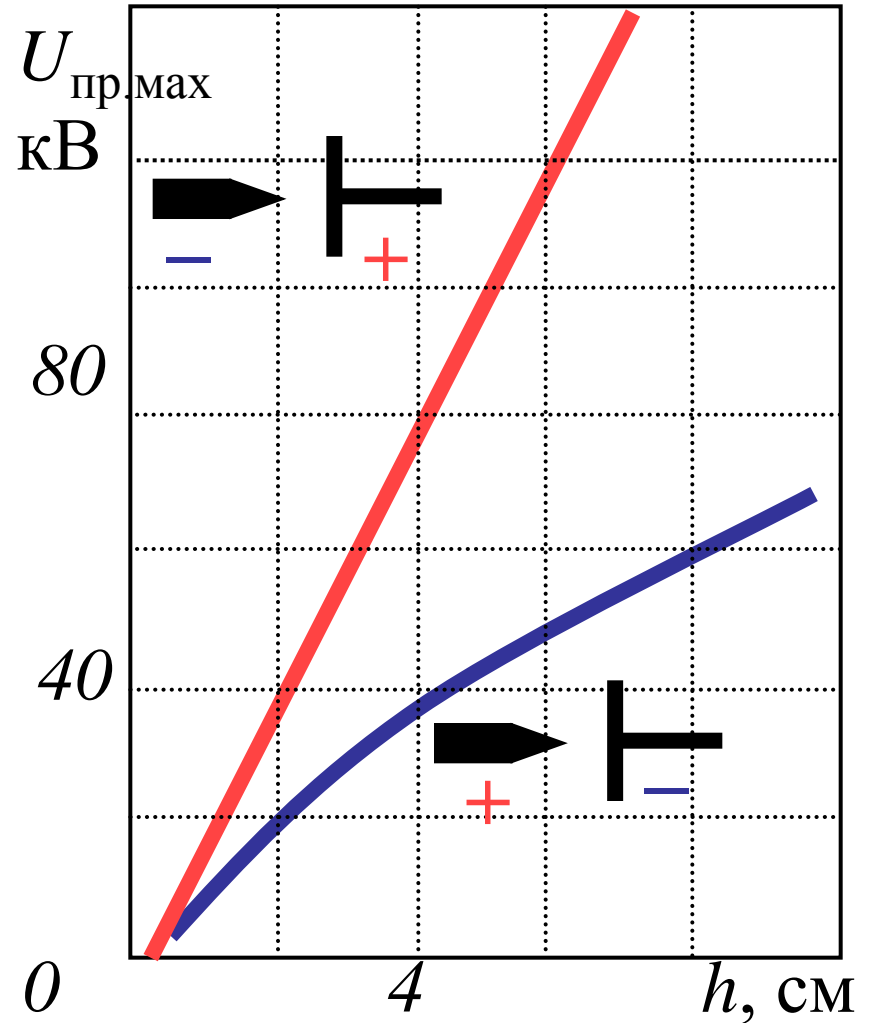
В местах, где E достигает критических значений, возникают частичные разряды в виде *короны*. При возрастании напряжения корона переходит в *искровой разряд и дугу*.

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:

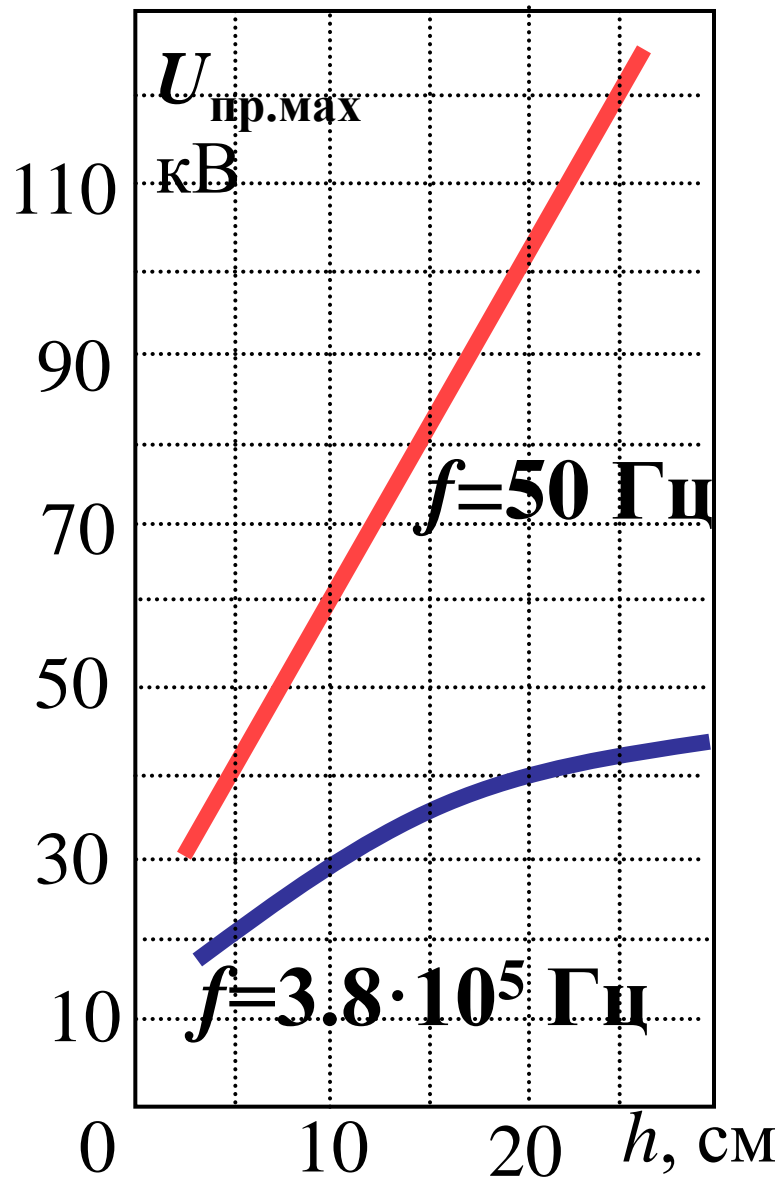
При положительной полярности на игле, $U_{\text{пр}}$ меньше, чем при обратной полярности.

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.

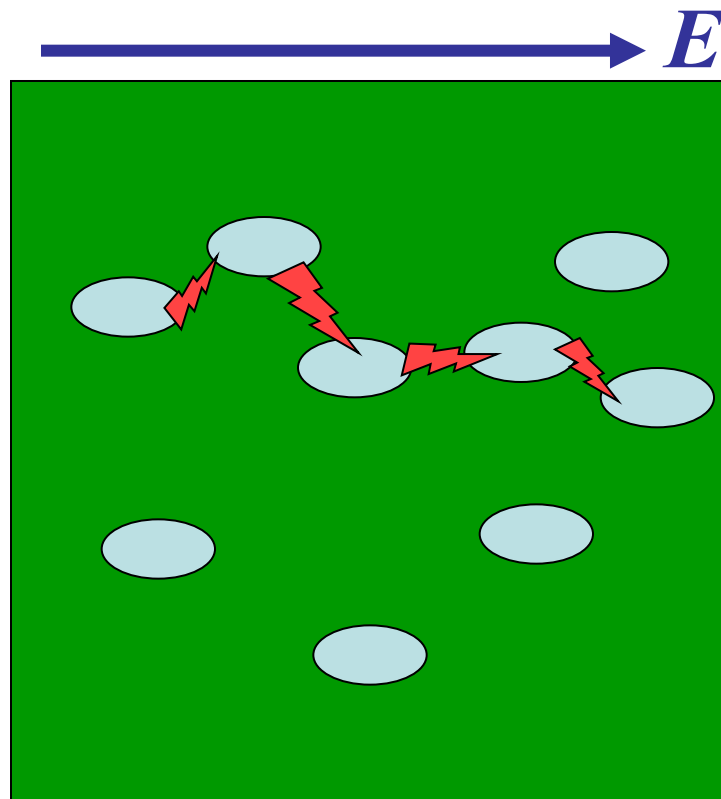
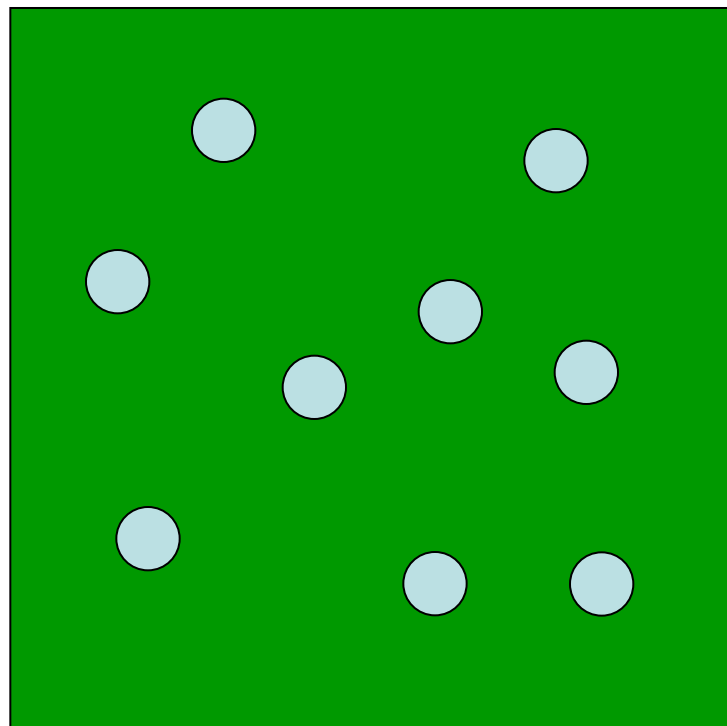
Но в жидкостях, *за счет большей плотности*, резко *уменьшается длина свободного пробега* λ электронов.

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 А. Геманта).



Критерий А. Геманта:

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

Пробой жидкого диэлектрика

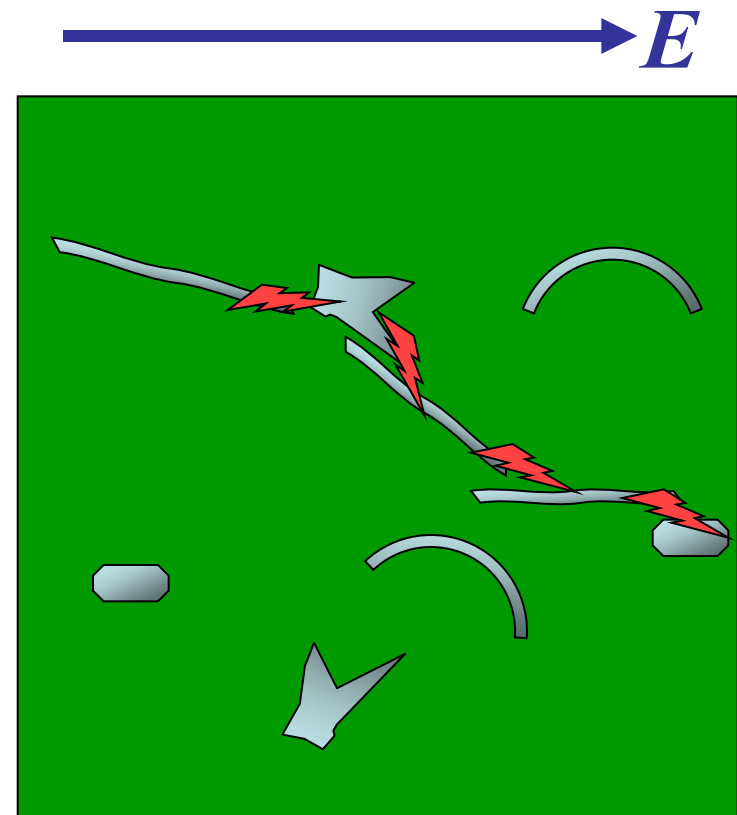
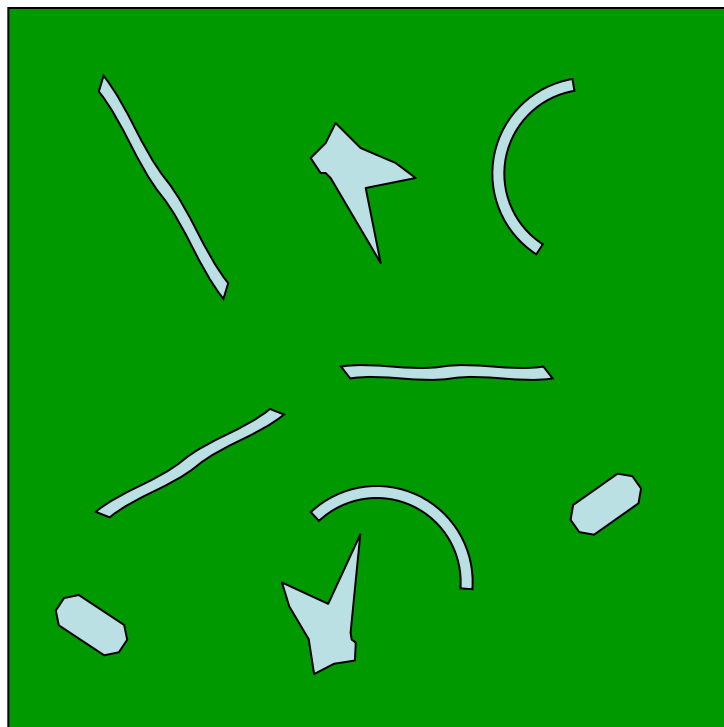
Частицы *поляризуются*, втягиваются в промежуток между электродами, образуется *мост* (обладает более высокой проводимостью).

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.

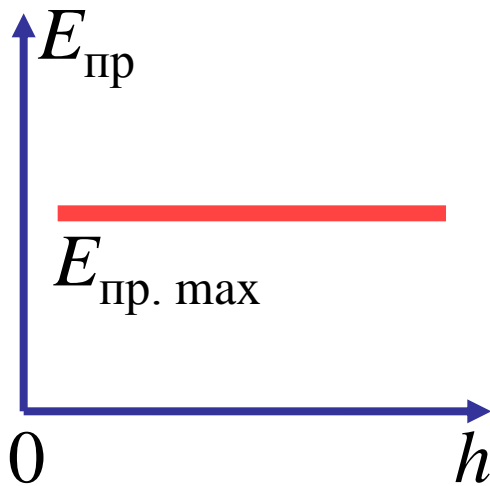
Электрический пробой

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

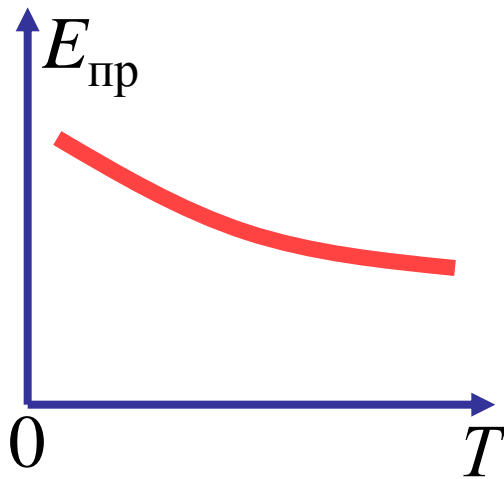
Наблюдается в *однородных диэлектриках* с малым $tg\delta$, когда исключено влияние электропроводности, отсутствует ионизация газовых включений.

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.

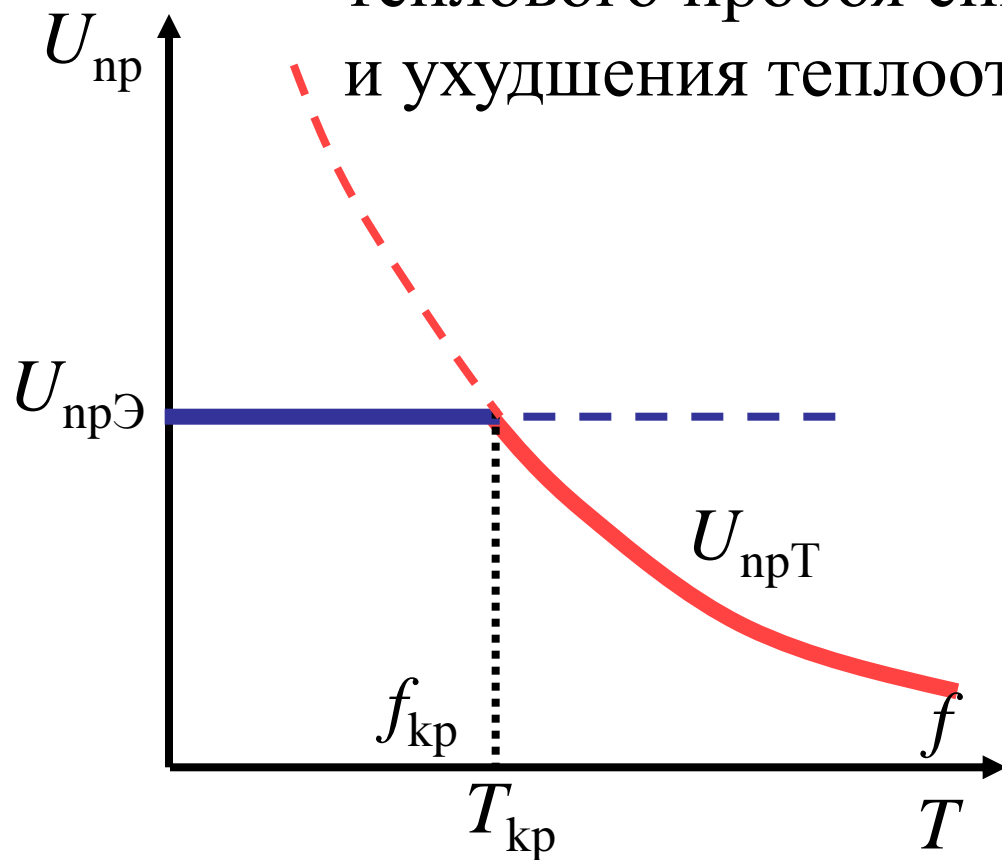
$$U_{np} = \sqrt{\frac{k \cdot S \cdot (T_{кр} - T_0)}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot C \cdot \operatorname{tg} \delta}}$$

$\operatorname{tg} \delta$ 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.



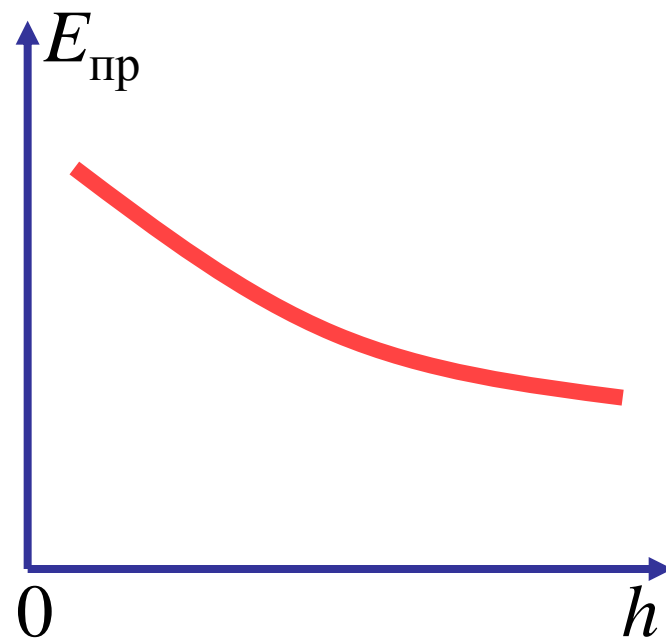
С изменением f или T может изменяться механизм пробоя диэлектрика. $f_{кр}$ (или $T_{кр}$), зависит от свойств диэлектрика, условий теплоотвода, времени приложения напряжения, характеристик эл. поля.

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

$U_{прТ} < U_{прЭ}$
тепловой
пробой

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 $E_{\text{пр}}$* .