



# ПОВЕДЕНИЕ МАТЕРИАЛОВ В СИЛЬНЫХ ПОЛЯХ

# ПРОБОЙ ЖИДКИХ ДИЭЛЕКТРИКОВ

Жидкие диэлектрики - молекулярные жидкости, удельное электрическое сопротивление которых превышает  $10^{10}$  Ом см. Как и твердые диэлектрики, жидкие диэлектрики поляризуются в электрических полях: для них характерна **электронная** и **ориентационная поляризация**.

В жидких диэлектриках бывают два основных механизма электропроводности: **ионный** и **молекулярный**.

**Ионная электропроводность** определяется диссоциацией молекул жидкости, а также содержанием различных примесей или загрязнений, которые часто встречаются на практике, так как жидкости легко загрязняются.

Вода в жидком диэлектрике может быть в трёх состояниях: а) **молекулярно - растворённое**; б) в виде **эмульсии**, то есть в виде мельчайших капель, находящихся в жидком диэлектрике во взвешенном состоянии; в) в виде **избыточной воды**, не удерживающейся в эмульсии, выпадающей из неё.

Вода в жидком диэлектрике может переходить из одного состояния в другое при изменении температуры за счёт изменения растворяющей способности диэлектрика.

При повышении температуры растворяющая способность увеличивается и эмульсионная вода полностью или частично переходит в молекулярно растворённое состояние, а избыточная вода – в эмульсионное в зависимости от значения температуры.

При понижении температуры происходит обратный процесс.

Гигроскопичность жидкости зависит от её состава и от наличия полярных молекул. Полярные молекулы, как правило, отличаются большой активностью, поэтому полярные жидкости легче смешиваются с различными примесями и загрязнениями.

Разные газы по-разному растворяются в жидкости. Эта их способность обычно определяется в процентах по объёму (коэффициент растворимости).

Коэффициент растворимости в масле для некоторых газов:

воздух	- 9.4;
азот	- 8.6;
кислород	- 16;
углекислый газ	- 120;
водород	- 7.

Легче диссоциируют молекулы, обладающие чисто ионными связями, так называемые гетерополярные. Диссоциация молекул жидкости происходит и без воздействия электрического поля; установлено, что **отношение количества диссоциированных молекул в данном объёме жидкостей к их общему количеству**, называемое степенью диссоциации, **зависит от относительной диэлектрической проницаемости жидкости**.

Полярные жидкости, имеющие большую диэлектрическую проницаемость, имеют повышенную степень диссоциации и повышенную собственную проводимость.

У **жидкостей неполярных**, например нефтяного электроизоляционного масла, собственная проводимость очень мала из-за слабой способности молекул углеводородов к диссоциации. У таких жидкостей электропроводность в основном носит **примесный характер**, а проводимость зависит как от свойств примеси, так и от её содержания в диэлектрике.

**Полярные жидкости** особенно чувствительны к примесям. Это объясняется тем, что степень диссоциации молекул примесей в жидкости с большой относительной диэлектрической проницаемостью выше, чем в жидкости с малой диэлектрической проницаемостью. В связи с такой особенностью полярных жидкостей у них часто бывает затруднительно отделить собственную проводимость от примесной.

## Молионная электропроводность

Коллоидные частицы переносятся электрическим полем к электроду определённого знака (при определённом напряжении). Для коллоидных частиц примесной жидкости знак заряда частицы зависит от соотношения относительных диэлектрических проницаемостей основной жидкости и примесей.

Если относительная диэлектрическая проницаемость примеси меньше, чем основной жидкости, то частицы примеси заряжаются отрицательно, в противном случае – положительно.

При молионной электропроводности со временем частицы загрязнений сосредотачиваются у электродов, и таким образом происходит очистка жидкостей от загрязнений. При переменном напряжении вследствие непрерывного изменения направления движения коллоидных частиц эффект очистки от них не наблюдается. Вследствие эффекта очистки с течением времени после включения постоянного напряжения удельное сопротивление жидкости увеличивается.

# ОСОБЕННОСТИ ПРОБОЯ ЖИДКИХ ДИЭЛЕКТРИКОВ

Пробой жидких диэлектриков может быть вызван разными процессами, определяющимися в основном состоянием жидкости, степенью её дегазации и чистотой.

Как и в газах, в жидкостях в неоднородных электрических полях наблюдаются формы пробоя: неполный пробой – корона, искровой и дуговой разряд.

Развитие пробоя начинается с формирования **оптических неоднородностей** в межэлектродном пространстве: в местах образования будущих каналов пробоя жидкость становится малопрозрачной.

Такие оптические неоднородности связаны с образованием в жидкости газовых пузырей, вызванных её разогревом токами эмиссии, автоионизацией молекул и ёмкостными токами.

## Теория А. Геманта

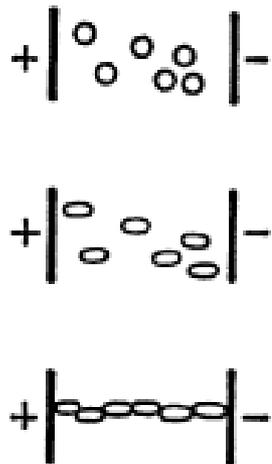


Рис. 11.11. К пояснению теории Геманта:

деформация сферической капельки воды в сильном электрическом поле и образование мостика между электродами.

Рассматривается пробой жидкого диэлектрика, содержащего влагу в виде эмульсии. Согласно расчётам Геманта под действием электрического поля капельки влаги вытягиваются, приобретая форму эллипсоидов. При достаточно большой напряжённости поля вытянутые эллипсоиды соединяются между собой, в результате чего в образовавшемся при этом канале происходит разряд. Экспериментально установлено, что при повышении напряжения в жидкости, содержащей растворённый газ, перед пробоем появляются газовые пузырьки. В результате пробивное напряжение таких жидкостей значительно падает с понижением давления или с приближением к температуре кипения, то есть в условиях, облегчающих образование газовых пузырьков.

Причины образования газовых пузырьков рассматривались в теориях Н. Эдлера, П.А.Флоренского, Ф.Ф.Волькенштейна.

## Теория Эдлера

Вблизи электрода имеется слой жидкости с повышенным удельным сопротивлением, содержащий микроскопические зародыши газовых пузырьков. При прохождении тока через этот слой в сильном электрическом поле выделяется такое количество тепла, что при некотором напряжении указанный слой нагревается до температуры кипения, происходит **интенсивное газовыделение и наступает пробой**. В электроизоляционных маслах, температура кипения которых выше температуры разложения (110 – 120<sup>0</sup>С), появление газовых пузырьков перед пробоем может быть связано не с испарением жидкости, а с **химическим разложением** под влиянием нагревания. Кроме того, образование пузырьков и их рост могут происходить под действием газового разряда. В этом случае повышается удельный вес, возрастает вязкость масла, увеличивается температура вспышки

Обработка масел воздействием разрядов называется **вольтализацией**

## Теория Я.И.Френкеля

Изучался пробой жидких диэлектриков, содержащих **металлические частицы**. Было установлено, что сначала частицы приобретают положительный заряд, движутся к катоду, покрывая его толстым рыхлым слоем. Приобретая у катода отрицательный заряд, многие из них движутся к аноду, а с течением времени всё пространство между электродами оказывается заполненным агрегатами частиц, образующих мостики. После этого может произойти пробой. После пробоя частицы с электродов осыпаются на дно сосуда, а между электродами наблюдается тонкая нить – мостик из частиц, сопротивление которой составляет около 250 Ом. Мостик сохраняется около часа, а при пропускании тока – и более длительное время.

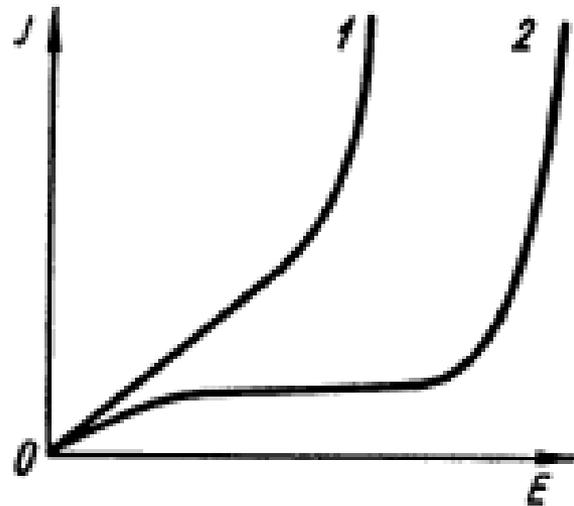


Рис. 11.8. Зависимость плотности электрического тока от напряженности поля в примесных (1) и предельно чистых (2) жидких диэлектриках.

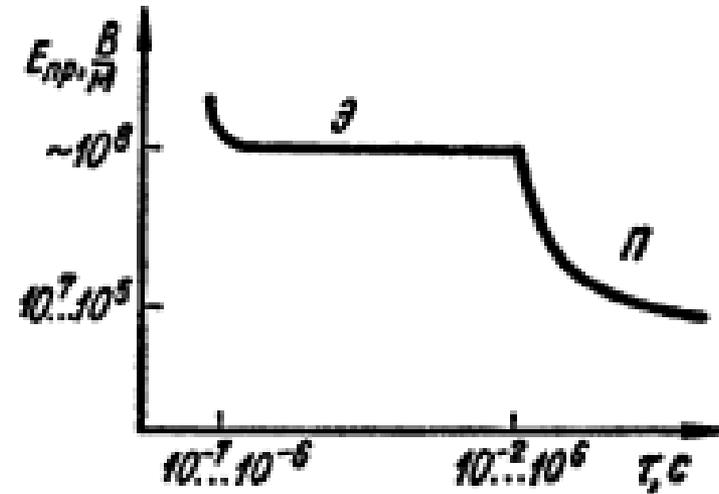


Рис. 11.9. Вольт-секундная характеристика пробоя жидкого диэлектрика:

Э — область электронного пробоя,  
 П — область примесного пробоя.

При **малых экспозициях** пробой носит электронный характер. Величина пробивной напряженности  $E_{пр}$  имеет порядок  $10^7$  В/м.

При **больших экспозициях** для технически чистых жидких диэлектриков значения пробивной напряженности могут различаться в широких пределах ( $10^7 - 10^5$  В/м)

## Электронный пробой жидкости

Время формирования канала пробоя и стадия потери электрической прочности занимают менее  $10^{-6}$  с. Это свидетельствует об **однолавинном характере пробоя**.

Предполагается, что начальные электроны, образующие лавину, инжектируются в жидкий диэлектрик из катода. При исследовании пробоя жидких диэлектриков с катодами из разных металлов наблюдалась **корреляция между работой выхода электрона и пробивной напряженностью**.

Вследствие высокой (по сравнению с газом) плотности жидкости длина свободного пробега электронов, производящих ударную ионизацию, существенно меньше, что объясняет значительно более высокую пробивную напряженность изолирующей жидкости (на два порядка) по сравнению с газом при нормальных условиях.

**Однолавинный электронный пробой** в жидких диэлектриках в ряде случаев развивается в виде дискретных «прыжков» лидера (стримероподобное образование). Ступенчатые перемещения лидера сопровождаются короткими и быстро следующими друг за другом вспышками света (фотоионизация в объеме жидкости перед пробоем)

Скорость распространения канала пробоя от анода к катоду – порядка  $10^5$  м/с.

## Примесный пробой жидкости

Примесный пробой в жидких диэлектриках формируется за сравнительно большой промежуток времени ( $10^{-2} - 10^5$  с).

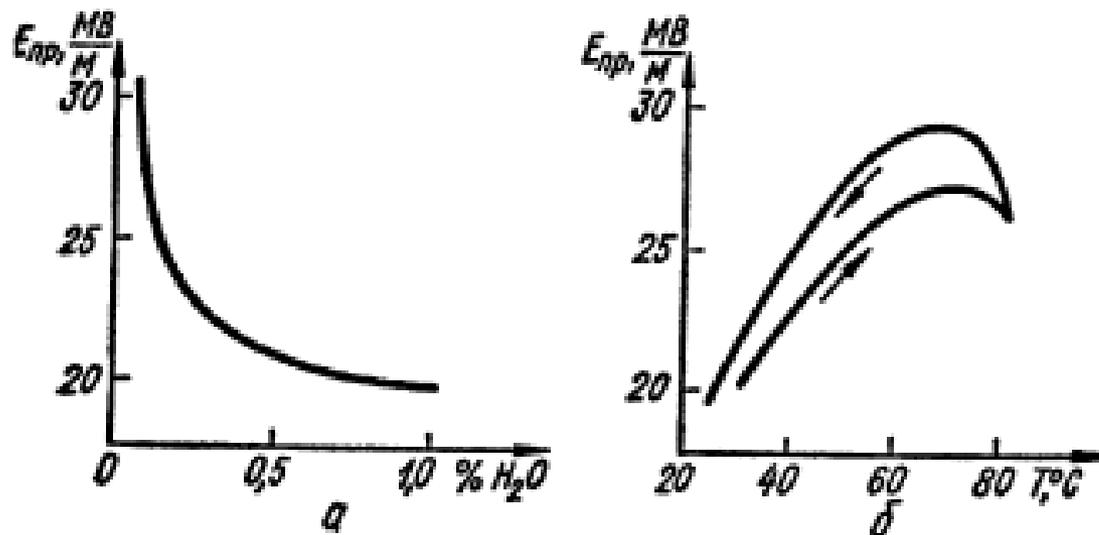


Рис. 11.10. Зависимость пробивной напряженности увлажненного трансформаторного масла от процентного содержания воды (а) и температуры (б).

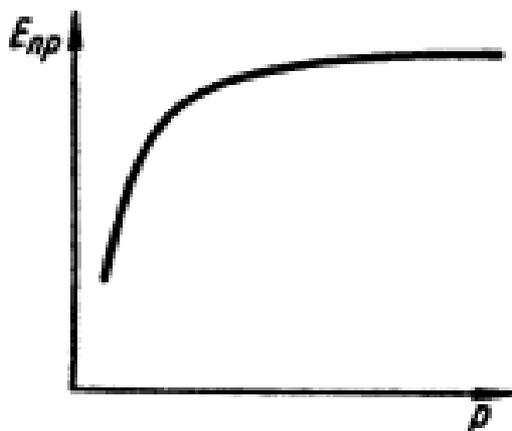


Рис. 11.12. Зависимость от давления пробивной напряженности изолирующей жидкости, содержащей растворенный газ.

Жидкость при обычных давлениях несжимаема. Увеличение давления, однако, повышает растворимость газа в жидкости и затрудняет образование газовых пузырьков, поэтому наблюдается повышение  $E_{пр}$ .

Газовые пузырьки, как правило, выделяются на границе электрод – жидкость (именно в этой области понижена энергия для образования зародыша новой (газовой) фазы), но могут появляться и в объеме жидкости.

**Механизм пробоя** напоминает механизм деформации водяной капли: под воздействием электрического напряжения газовые пузырьки деформируются в эллипсоиды, которые сливаются, образуя **газовый мостик между электродами**. Поскольку пробивная напряженность газа меньше, чем напряженность электронного пробоя жидкости, то электрический пробой происходит по газовому мостику, снижая тем самым электрическое напряжение пробоя очищенной жидкости, содержащей растворенный газ.

## Тепловой механизм роста газовых пузырьков в жидкости

На границе раздела жидкость – газ вблизи стенки газового пузырька в сильном поле за счет резкой неоднородности электрического поля повышается температура и происходит «микровскипание» жидкости. Вследствие этого объем газовых пузырьков растет и вероятность образования газовых мостиков повышается.

## Электрохимический механизм роста газовых пузырьков в жидкости

Предполагается, что ионизация в газовом пузырьке, в котором и диэлектрическая проницаемость и электропроводность меньше, чем в окружающей жидкости, приводит к химическому разложению последней.

Поскольку электроизоляционная жидкость по химическому составу чаще всего представляет непредельные углеводороды, то при таком процессе **вольтации** выделяется водород, а также повышается вязкость и молекулярный вес жидкости. Водород увеличивает количество газовых пузырьков и их объем.

Для жидких диэлектриков применимы три теории пробоя: **электрическая, газовая и тепловая.**

### Электрическая теория

Чисто электрический пробой характеризует неполярные жидкие диэлектрики максимально очищенные от примесей. В таких жидкостях под действием электрического поля происходит вырывание электронов с поверхности катода и перемещение их к противоположно заряженному аноду. В связи с тем, что плотность жидкости больше, чем плотность газа, средняя длина свободного пробега электрона в жидком диэлектрике будет меньше, чем в газообразном. Поэтому пробой жидких диэлектриков происходит при более высоких напряжениях, чем пробой газообразных диэлектриков.

Большинство жидкостей содержат в себе примеси. Примеси могут находиться в различных состояниях (пузырьки газа, капельки воды, твердые частицы).

## Газовая теория

Практически все жидкие диэлектрики содержат в себе примеси в виде пузырьков газа. При действии на такие жидкости электрического поля в газовых пузырьках с точки зрения газовой теории пробоя происходит ударная ионизация, в результате чего газовые пузырьки деформируются, приобретая вид вытянутых эллипсоидов, притягиваются друг к другу разноименно заряженными концами и образуют проводящий мостик между электродами, по которому и происходит пробой.

## Тепловая теория

Согласно тепловой теории пробоя жидких диэлектриков, разработанной академиком Н.Н. Семеновым, в местах сосредоточения примесей происходит искажение формы электрического поля, в результате чего в этих местах происходит интенсивный разогрев жидкого диэлектрика, связанный с повышенной мощностью диэлектрических потерь. Это приводит к вскипанию жидкости с образованием многочисленных газовых пузырьков, которые в последствии деформируются и образуют проводящие цепочки между электродами, по которым в последствии и происходит пробой.

## Физические механизмы инициирования (зажигания) разряда

Большой экспериментальный материал по электрическому пробоя жидкостей, накопленный к настоящему времени, подтверждает сделанный ранее вывод о том, что существует несколько различных механизмов пробоя, описать которые единой теорией принципиально невозможно.

Для стадии зажигания разряда можно выделить, как минимум, четыре различных механизма инициирования разряда: 1) *пузырьковый*, 2) *микровзрывной*, 3) *ионизационный*, 4) *электротепловой*.

Решающую роль в *пузырьковом* зажигании разряда играет газ, который существовал на электродах и в жидкости до приложения поля.

Пузырьки размером от единиц до десятков микрон существуют в жидкости, преимущественно на электродах. Под действием электрического поля после достижения на пузырьке падения напряжения  $U_p$  в нем возникают ионизационные процессы (частичные разряды). После разряда поле в пузырьке уменьшается вследствие экранирования осевшими зарядами внешнего поля, что вызывает ослабление либо прекращение ионизационных процессов. Действие электрического поля на осевший заряд приводит к вытягиванию пузырька вдоль поля, а также к продвижению заряда вглубь жидкости со скоростью, определяемой подвижностью носителей заряда.

При *микровзрывном* инициировании разряда события развиваются в следующей последовательности: эмиссия электронов в жидкость (разряд с катода) или ионизация молекул жидкости (разряд с анода) - быстрый локальный разогрев жидкости током, переносимым наведенными носителями заряда, - формирование и движение ударной волны - взрывное парообразование за фронтом ударной волны - ионизация газопаровых пузырьков - зарождение плазменного канала.

Основным условием реализации микровзрывного механизма инициирования является высокая напряженность поля в приэлектродной области, которая достижима при наносекундных длительностях импульса напряжения. Благоприятными факторами для проявления такого механизма инициирования являются также малый радиус закругления инициирующего электрода (единицы - десятки микрон) и малые межэлектродные расстояния (субмиллиметровые).

*Ионизационный* механизм инициирования - зарождение плазменного канала как непосредственное следствие ионизации молекул жидкости за счет автоионизации (анодное инициирование) или ударной ионизации (катодное инициирование). Энерговыделение, фазовый переход первого рода, формирование ударных волн в этом случае являются вторичными процессами.

Для его реализации условия должны быть еще более "жесткие", чем в предыдущем случае – предельно высокие напряженности поля (порядка  $10^8$  В/см) и очень малые длительности импульса напряжения ( $10^{-8}$  с и менее).

Зажигание заряда по *микровзрывному* и *ионизационному механизмам*, реализуемым в сильно перенапряженных промежутках, сопровождается плавлением и даже сублимацией металла острых электродов с малыми  $r_0$  и микроострий на поверхности электродов с большой площадью "напряженной" поверхности [26, 27]. Наиболее достоверные количественные данные об этом явлении удалось получить для острых электродов с малыми углами конуса ( $8...30^\circ$ ) и радиусами вершины ( $1...10$  мкм). В зависимости от экспериментальных условий (геометрия электрода, вид жидкости, напряженность поля) масса металла, уносимого с острейшего электрода за один, прерванный разряд лежит в пределах  $\sim 10^{-10}...10^{-5}$  г. Часть его переносится на противоположный электрод (в миллиметровых и субмиллиметровых промежутках).

Под *электротепловым* механизмом инициирования разряда будем подразумевать следующую совокупность явлений:

- протекание под действием приложенного поля тока высоковольтной проводимости
- разогрев жидкости в приэлектродных областях с максимальной напряженностью поля
- вскипание жидкости
- ионизация парогазовых полостей
- формирование зачатка плазменного канала.

Этот механизм может реализовываться при больших значениях произведения удельной электропроводности жидкости ( $\gamma$ ) на длительность воздействия напряжения ( $\tau$ ). Поскольку при импульсных воздействиях напряжения  $\tau$  обычно не превосходит нескольких сотен микросекунд, то такой механизм инициирования наиболее вероятен в жидкостях с большой  $\gamma$  - прежде всего в электролитах.

# ПРОБОЙ ЖИДКИХ ДИЭЛЕКТРИКОВ

Жидкие диэлектрики можно классифицировать по их природе на следующие группы:

- 1) **углеводороды минеральные** – продукты перегона нефти и каменного угля (трансформаторное, конденсаторное и др. масла);
- 2) **углеводороды растительные** (касторовое, льняное и другие масла);
- 3) **хлорированные углеводороды** ароматического ряда (хлордифенил, совтол);
- 4) **кремнийорганические соединения.**

## Свойства диэлектриков

Вид диэлектрика	$r$ , Ом·см	$\epsilon$	$\text{tg}\delta$
Неполярные	$\geq 10^{18}$	1,8–2,5	$\approx 0,001$
Слабополярные	$\approx 10^{11} - 10^{12}$	$> 2,5$	$\approx 0,01$
Сильнополярные	$\approx 10^7 - 10^8$	$> 5$	$\approx 0,1$

## Основные факторы, изменяющие $U_{\text{ПР}}$ :

загрязнение и увлажнение (увеличение загрязненности масла снижает  $U_{\text{ПР}}$ , ничтожное количество влаги ( $< 0,03\%$ ) резко снижает  $U_{\text{ПР}}$ );

вязкость (уменьшение вязкости уменьшает  $U_{\text{ПР}}$ );

температура (с увеличением температуры  $U_{\text{ПР}}$  уменьшается; на импульсном напряжении это влияние незначительное; для технически чистого масла зависимость  $U_{\text{ПР}} = f(T^{\circ}\text{C})$  носит сложный характер);

давление (для технически чистого масла увеличение давления приводит к увеличению  $U_{\text{ПР}}$ , т.к. увеличивается давление в газовых пузырьках);

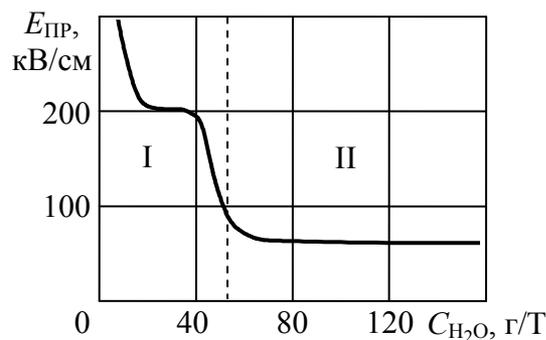
наличие барьеров (барьеры могут существенно повысить  $U_{\text{ПР}}$ , особенно в резконеоднородном поле;

время действия напряжения (с увеличением времени воздействия напряжения  $U_{\text{ПР}}$  уменьшается; чем чище диэлектрик, тем меньше это влияние; на импульсном напряжении коэффициент импульса в несколько раз больше, чем для газовых диэлектриков);

форма, площадь электродов и расстояние между ними (форма электродов создает поля разной степени неоднородности при  $S = \text{const}$ , чем больше коэффициент неоднородности, тем ниже  $U_{\text{ПР}}$ ; с увеличением площади электродов  $U_{\text{ПР}}$  уменьшается; увеличение расстояния увеличивает  $U_{\text{ПР}}$ );

полярность электродов при несимметричной их форме (при отрицательной полярности пробивные напряжения больше, чем при положительной; этот эффект тем больше, чем более полярен диэлектрик).

### Влияние влаги и микропримесей



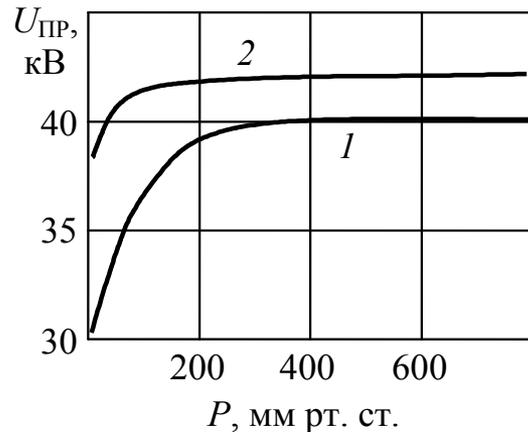
Зависимость электрической прочности трансформаторного  
масла от содержания влаги,  
(грамм/тонна):

I – зона растворимости влаги, II – эмульгированная влага

## Влияние давления

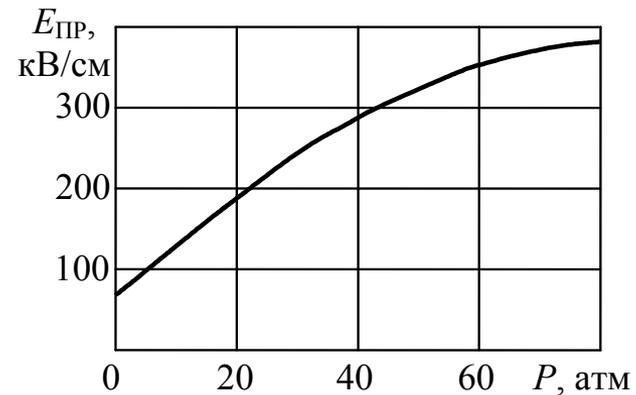
При пониженных давлениях из масла начинают выделяться растворенные в нем газы, и его прочность резко падает. Зависимость пробивного напряжения от давления заметно увеличивается с повышением степени очистки масла (кривая 2), что указывает на большое влияние газообразных примесей.

При давлениях выше атмосферного электрическая прочность масла увеличивается, что также свидетельствует о наличии газа в масле и его влиянии на электрическую прочность масла.



Зависимость пробивного напряжения трансформаторного масла от давления:

- 1 – недегазированное масло;
- 2 – дегазированное масло

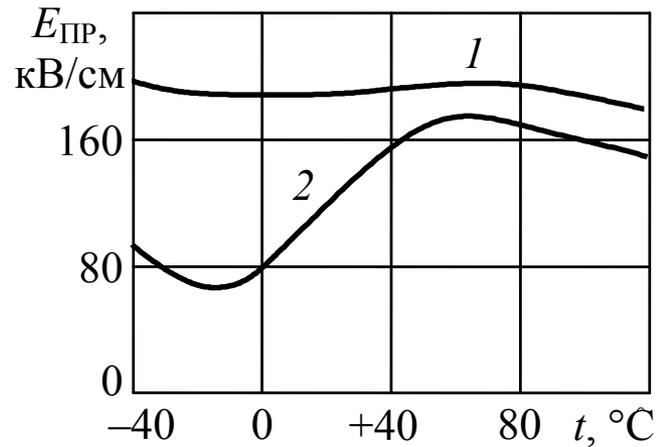


Зависимость пробивного напряжения парафинового масла от давления (50 Гц)

## Влияние температуры

Электрическая прочность жидких диэлектриков в сильной степени зависит от их чистоты. Для чистых сухих жидкостей значительное влияние температуры наблюдается в области интенсивного испарения и кипения.

Снижение температуры от точки максимума приводит к уменьшению  $E_{\text{ПР}}$  до минимума, что связано с переходом растворенной влаги в эмульгированное состояние. Дальнейшее понижение температуры (меньше  $0^{\circ}\text{C}$ ) вызывает замерзание капелек воды и, как следствие, повышение  $E_{\text{ПР}}$ . У льда диэлектрическая постоянная  $\epsilon_{\text{Л}}$  примерно равна диэлектрической постоянной масла  $\epsilon_{\text{М}}$  ( $\epsilon_{\text{Л}} \approx \epsilon_{\text{М}}$ ), что уменьшает влияние влаги на электрическую прочность масла.



Зависимость электрической прочности трансформаторного масла от температуры:

1 – сухое масло; 2 – техническое масло с примесью влаги

**Газ** – в зависимости от условий пробой формируется либо в виде контрагированных (искрового, лидерного, стримерного) канала или в виде квазиобъемного (дуга, тлеющий) разряда при пониженных давлениях.

В нормальных условиях в воздухе  $E_{пр} = 30$  кВ/см

При  $P \geq 1$  атм и при  $E \leq 23$  кВ/см – в промежутке происходят элементарные процессы (устанавливается равновесие) – эмиссия, упругие и неупругие столкновения, прилипание, возбуждение и ионизация атомов, рекомбинация и др.

Если  $E \geq 23$  кВ/см – в промежутке образуется эффективный электрон  
→ возбуждение → ионизация → лавина

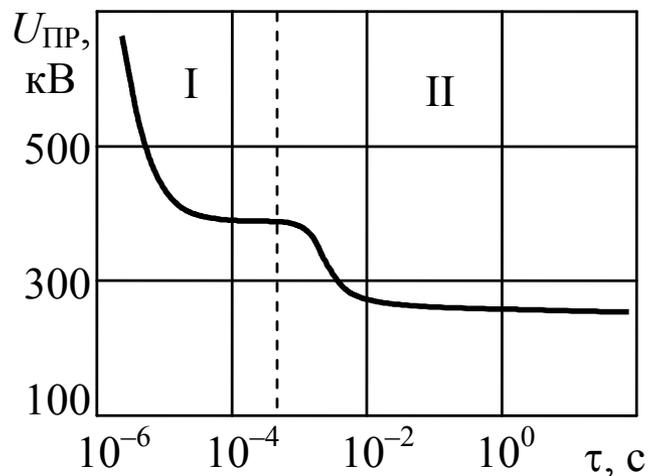
$$N = n_0 \exp\left(\int_0^s (\alpha - \eta) dx\right),$$

При  $N_e \geq 10^6 - 10^7$  1/см<sup>3</sup> несамостоятельный разряд переходит самостоятельный (корона).

## Влияние времени воздействия напряжения

Экспериментальные результаты по пробоем жидких диэлектриков показывают наличие, как минимум, двух областей, связанных с временем воздействия напряжения, появление которых объясняется различными механизмами пробоя.

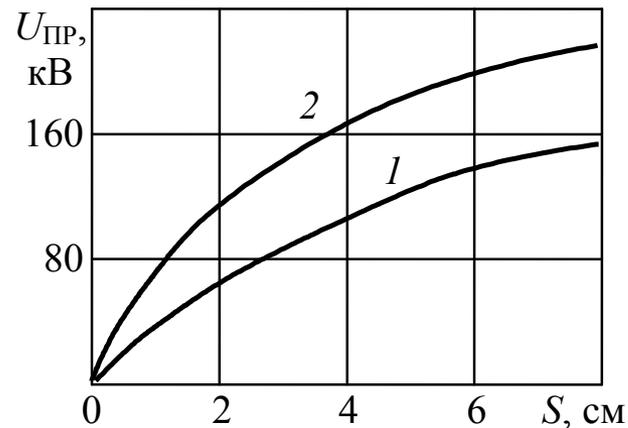
При воздействии импульсов напряжения с длительностью  $\tau < 10^{-4}$  с (область I) влияние примесей значительно ослаблено, т.е. они не успевают переместиться на заметные расстояния. Начальная стадия разряда в жидкости возникает при напряженностях 100 кВ/см. В этом случае начинают проявляться процессы электронной эмиссии. Возможны процессы авто- и термоэлектронной эмиссии с катода, а также процессы автоионизации жидкости у анода. Все перечисленные явления могут участвовать в инициировании разряда.



Зависимость пробивного напряжения от времени воздействия для трансформаторного масла. Электроды: острие–плоскость; расстояние между электродами 20 см; положительная полярность напряжения

## Влияние материала, геометрии электродов, расстояния между ними и полярности

Геометрическая форма электродов создает поля разной степени неоднородности, и чем больше коэффициент неоднородности, тем ниже пробивное напряжение. Даже незначительное увеличение радиуса кривизны электродов в резконеоднородных полях дает более существенное увеличение  $U_{\text{ПР}}$  по сравнению с воздухом.

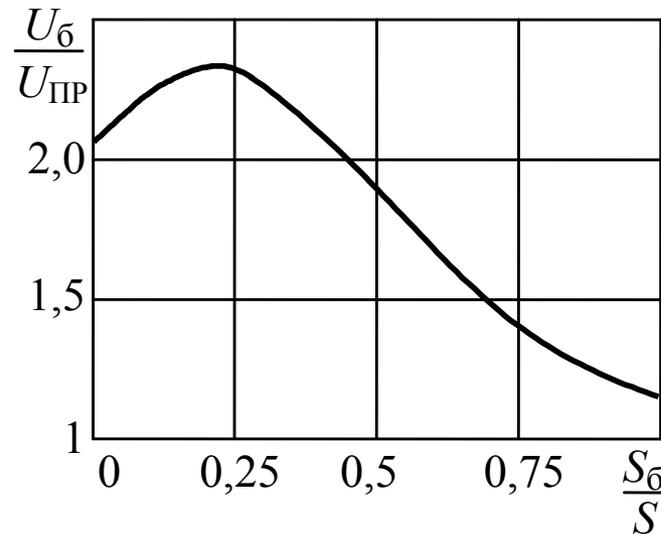


Зависимость пробивного напряжения от расстояния между электродами и полярности для трансформаторного масла, электроды острие–плоскость; напряжение постоянное:

$1$  – положительная полярность острия;  $2$  – отрицательная полярность острия

## Барьерный эффект

При наличии барьеров электрическая прочность разрядного промежутка значительно возрастает. Это обуславливается двумя факторами. Барьер непроницаем для ионов жидкости. Поэтому ионы, двигаясь от одного электрода к другому, оседают на барьере, «растекаются» по его поверхности и заряжают ее. Благодаря этому, электрическое поле в промежутке становится более равномерным, что приводит к увеличению разрядного напряжения. Кроме этого, барьер затрудняет образование сплошных проводящих мостиков из волокнистых веществ, находящихся в масле.



Влияние барьера на пробивное  
напряжение масляного промежутка:  
электроды острие-плоскость; напряжение 50 Гц,  $S = 75$  мм

## 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.

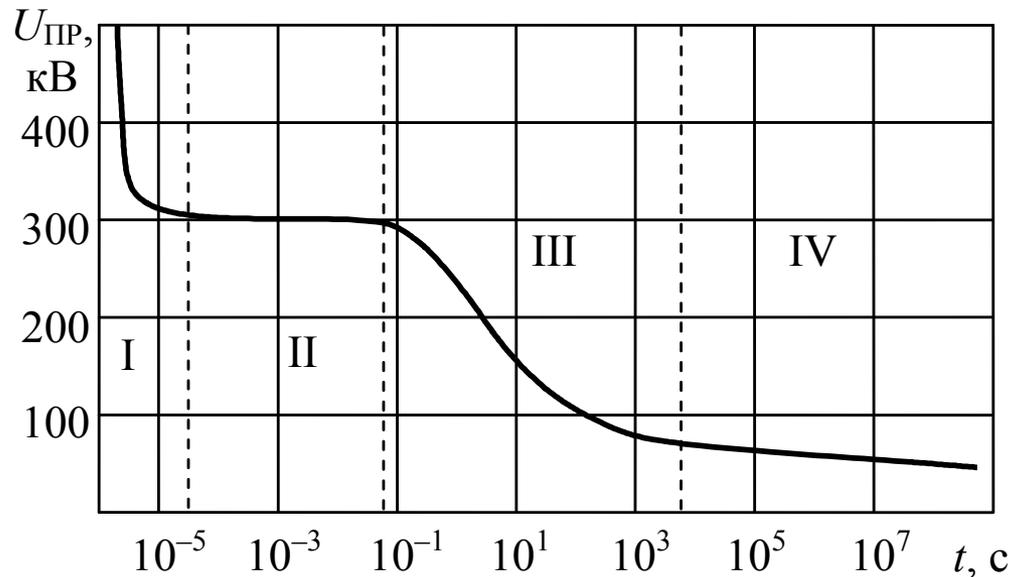
Различают три вида пробоя твердого диэлектрика:

- 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:

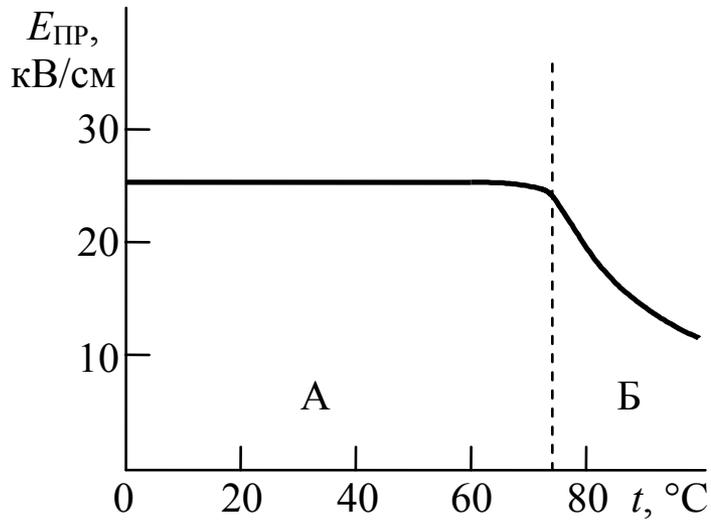
I – электрический пробой, запаздывание развития канала разряда;

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

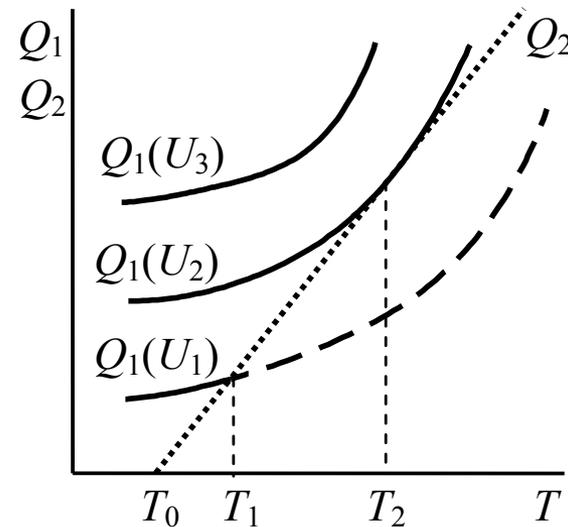
III – тепловой пробой,  $t > 0,1$  с, резкое снижение  $U_{пр}$  во времени;

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	$Q_2 = k S (T - T_0)$