



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 **молионный**.

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

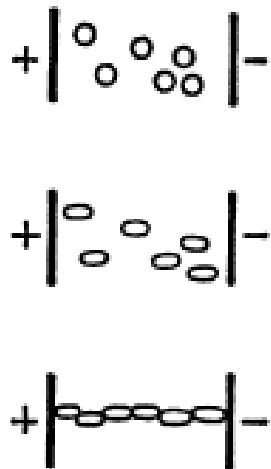


Рис. 11.11. К пояснению теории Геманта:

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 ($110 - 120^{\circ}\text{C}$), 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 25 Ом. Мостик сохраняется около часа, а при пропускании тока – и более длительное время.

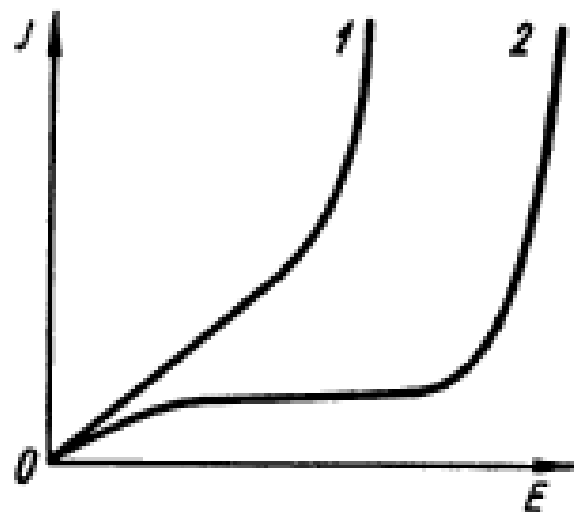


Рис. 11.8. Зависимость плотности электрического тока от напряженности поля в примесных (1) и предельно чистых (2) жидких диэлектриках.

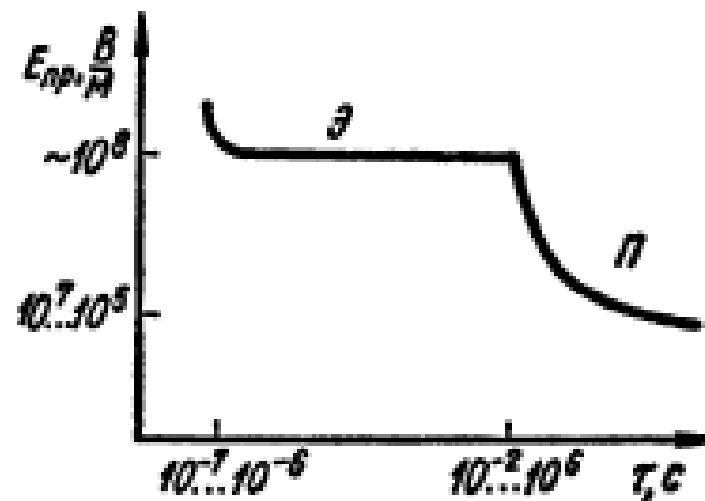


Рис. 11.9. Вольт-секундная характеристика пробоя жидкого диэлектрика:

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 жидки диэлектриках формируется за сравнительно большой промежуток времени ($10^{-2} - 10^5$ с).

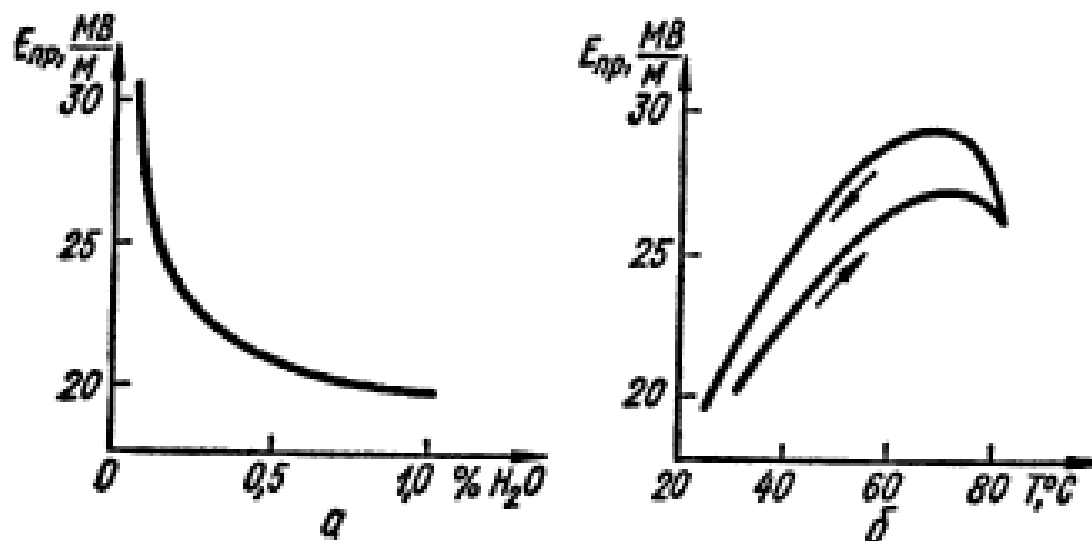


Рис. 11.10. Зависимость пробивной напряженности увлажненного трансформаторного масла от процентного содержания воды (а) и температуры (б).

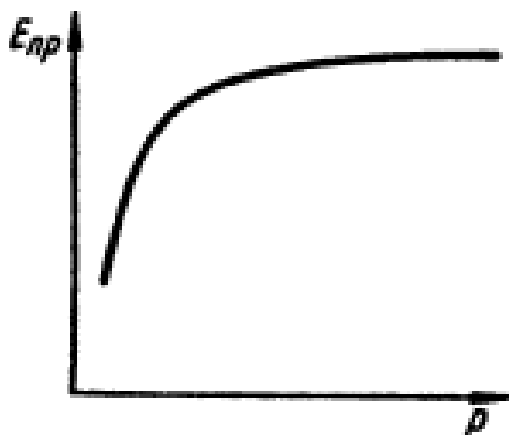


Рис. 11.12. Зависимость от давления пробивной напряженности изолирующей жидкости, содержащей растворенный газ.

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 «миковскипание» 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 проходит пробой.

Физические механизмы инициирования (зажигания) разряда

Большой экспериментальный материал по электрическому пробое жидкостей, накопленный к настоящему времени, подтверждает сделанный ранее вывод о том, что существует несколько раз личных 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). Энерговыведение, 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 острийных 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 острийных 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 острийного 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 (γ) на длительность воздействия напряжения (τ). Поскольку при импульсных воздействиях напряжения τ обычно не превосходит нескольких сотен микросекунд, то такой механизм инициирования наиболее вероятен в жидкостях с большой γ - 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	$r, \text{Ом} \cdot \text{см}$	ϵ	$\text{tg} \delta$
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);

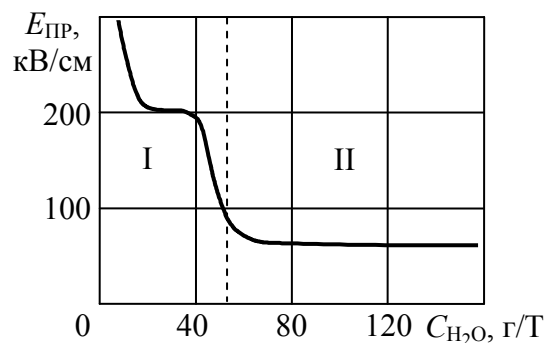
наличие барьеров (барьеры могут существенно повысить $U_{\text{ПР}}$, особенно в резконеоднородном поле;

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 полярна диэлектрик).

Влияние влаги и микропримесей



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

I – зона растворимости влаги, II – эмульгированная влага