

ТЕХНИКА ВЫСОКИХ НАПРЯЖЕНИЙ.

Пробой жидких и твердых диэлектриков

ЖИДКИЕ ДИЭЛЕКТРИКИ

Жидкие диэлектрики

Жидкие диэлектрики обладают значительно **более высокой электрической прочностью** по сравнению с газами.

Применение в качестве высоковольтной изоляции в разнообразных устройствах: трансформаторах, кабелях, передающих линиях, конденсаторах, выключателях, разрядниках и т. д.

Жидкие диэлектрики можно классифицировать по их природе на следующие группы:

- 1) **углеводороды минеральные** - продукты перегонки нефти и каменного угля (трансформаторное, конденсаторное и др. масла);
- 2) **углеводороды растительные** (касторовое, льняное и другие масла);
- 3) **хлорированные углеводороды ароматического ряда** (хлордифенил, совтол) ((+) - высокая термическая устойчивость, электрическая стабильность, негорючесть, (-) - токсичность);
- 4) **кремнийорганические соединения** (нетоксичны и экологически безопасны, не вызывают коррозии металлов, обладают очень низкой гигроскопичностью и морозостойкостью).

Свойства диэлектриков

Вид диэлектрика	ρ , Ом·см	ϵ	$\operatorname{tg}\delta$
Неполярные	$\geq 10^{18}$	1,8...2,5	$\approx 0,001$ (1, 4)
Слабополярные	$\approx 10^{11} \dots 10^{12}$	$> 2,5$	$\approx 0,01$ (2)
Сильнополярные	$\approx 10^7 \dots 10^8$	> 5	$\approx 0,1$

Важнейшие посторонние примеси в жидких диэлектриках:

- а) вода;
- б) газы;
- в) волокна целлюлозы;
- г) углерод;
- д) продукты разложения используемого жидкого диэлектрика.

На **пробой** жидких диэлектриков существенное влияние оказывает множество факторов, которые могут, как **понижать пробивное напряжение** (загрязнения, увлажнение и др.), так и **увеличивать** его (очистка, давление, барьеры и т.д.).

Основные факторы, изменяющие $U_{пр}$:

- 1) **загрязнение и увлажнение** (увеличение загрязненности масла снижает $U_{пр}$, ничтожное количество влаги ($< 0,03\%$) резко снижает $U_{пр}$);
- 2) **вязкость** (уменьшение вязкости уменьшает $U_{пр}$);
- 3) **температура** (с увеличением температуры $U_{пр}$ уменьшается; на импульсном напряжении это влияние незначительное; для технически чистого масла зависимость $U_{пр} = f(T, C)$ носит сложный характер);

- 4) **давление** (для технически чистого масла увеличение давления приводит к увеличению $U_{ПР}$, т.к. увеличивается давление в газовых пузырьках);
- 5) **наличие барьеров** (барьеры могут существенно повысить $U_{ПР}$, особенно в резконеоднородном поле);
- 6) **время действия напряжения** (с увеличением времени воздействия напряжения $U_{ПР}$ уменьшается; чем чище диэлектрик, тем меньше это влияние; на импульсном напряжении коэффициент импульса в несколько раз больше, чем для газовых диэлектриков);
- 7) **форма, площадь электродов и расстояние между ними** (форма электродов создает поля разной степени неоднородности при $S = const$, чем больше коэффициент неоднородности, тем ниже $U_{ПР}$; с увеличением площади электродов $U_{ПР}$ уменьшается; увеличение расстояния увеличивает $U_{ПР}$);
- 8) **полярность электродов при несимметричной их форме** (при отрицательной полярности пробивные напряжения больше, чем при положительной; этот эффект тем больше, чем более полярен диэлектрик).

Пробой жидких диэлектриков - явление сложное, что объясняется сложным составом жидких диэлектриков и многими факторами, влияющими на развитие пробоя (загрязнение, форма, размеры и материал электродов, температура, давление и др.)

Для хорошо очищенных жидкостей величина электрической прочности достигает 1000 кВ/см.

Влияние влаги и микропримесей

Пробой жидких диэлектриков

Влага в масле может находиться в трех состояниях:

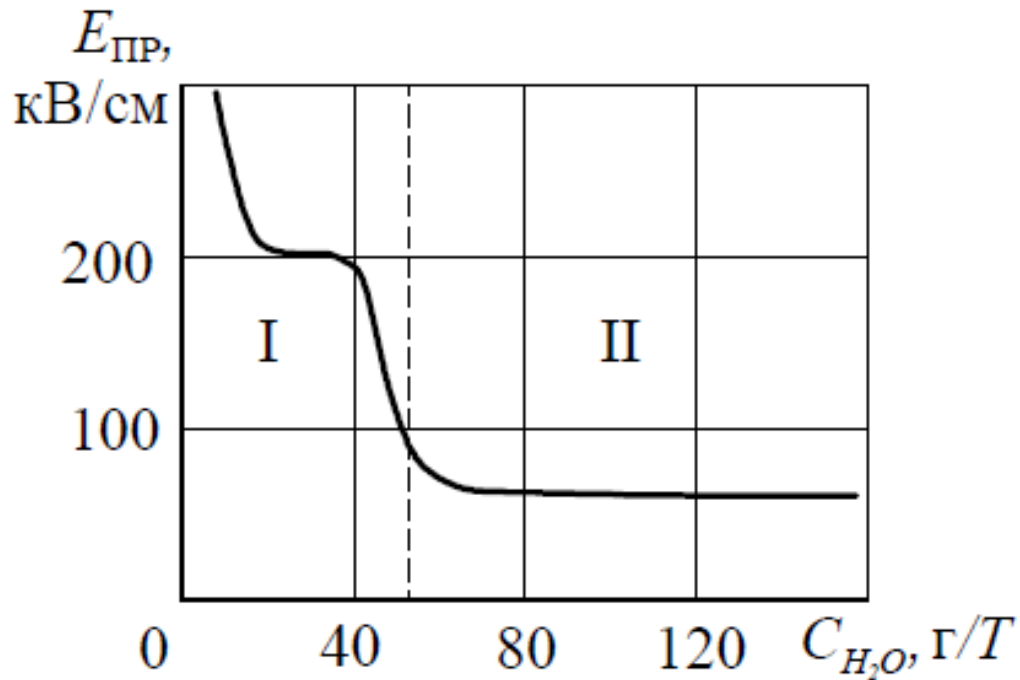
- в молекулярно-растворенном виде,
- в виде эмульсии (мелкие шарики воды размером 2...10 мкм)
- в виде водяного отстоя на дне бака.

Вследствие большой диэлектрической проницаемости (для воды $\epsilon = 80$, для волокон целлюлозы $\epsilon = 6,4$) частички влаги и волокна втягиваются в область наибольшей напряженности электрического поля, поляризуются и вытягиваются вдоль силовых линий поля.

Это приводит к образованию «мостиков», которые увеличивают локальную плотность тока, способствуют нагреву, сильному увеличению местной напряженности поля в местах разрыва мостиков, вследствие чего начинаются местные ионизационные процессы и может произойти пробой всего межэлектродного промежутка.

Влияние влаги и микропримесей

Пробой жидких диэлектриков



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

*I — зона растворимости влаги,
II — эмульгированная влага*

Особенно резкое уменьшение разрядных напряжений происходит при наличии в масле гигроскопических загрязнений в виде волокон бумаги, картона, пряжи - значительно облегчается образование проводящих мостиков.

Эти загрязнения проникают в масло в процессе эксплуатации из элементов твердой изоляции, находящихся в масле.

Влияние давления

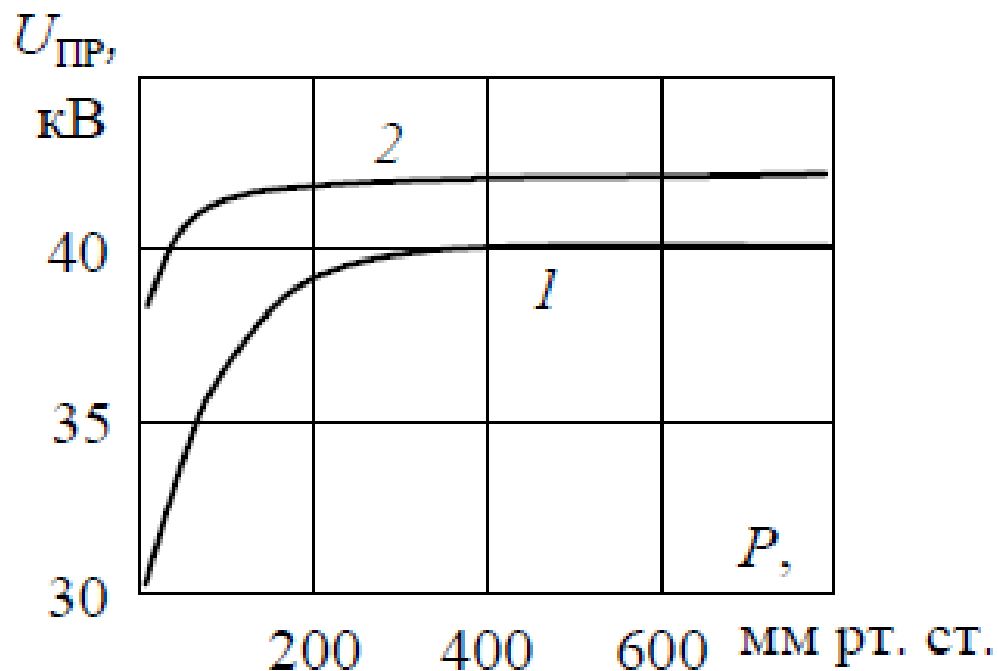
Пробивное напряжение как технических, так и очищенных жидких диэлектриков при промышленной частоте 50 Гц сильно зависит от давления.

Это связано с наличием и образованием в жидкости при высоком напряжении пузырьков газа, являющихся очагами развития пробоя.

Электрическая прочность газа сильно зависит от давления (**закон Пашена**).

Влияние давления

Пробой жидких диэлектриков



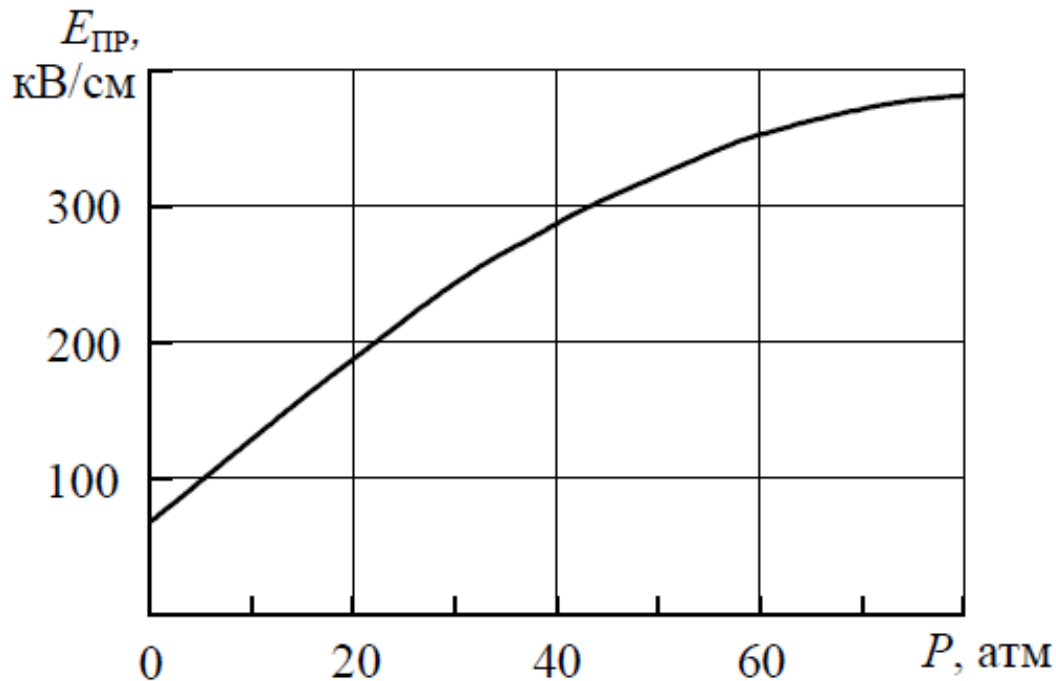
Зависимость пробивного напряжения трансформаторного масла от давления:

*1 — недегазированное масло;
2 — дегазированное масло*

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 (большое влияние газообразных примесей).

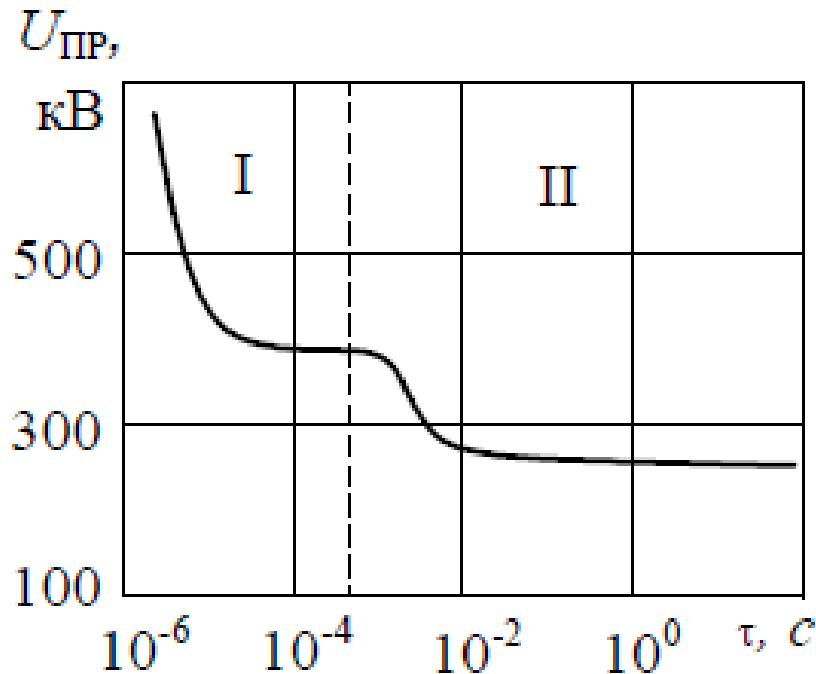
Влияние давления



Зависимость пробивного напряжения парафинового масла от давления (50 Гц)

При давлениях выше атмосферного электрическая прочность масла увеличивается - наличие газа в масле и его влияние на электрическую прочность масла.

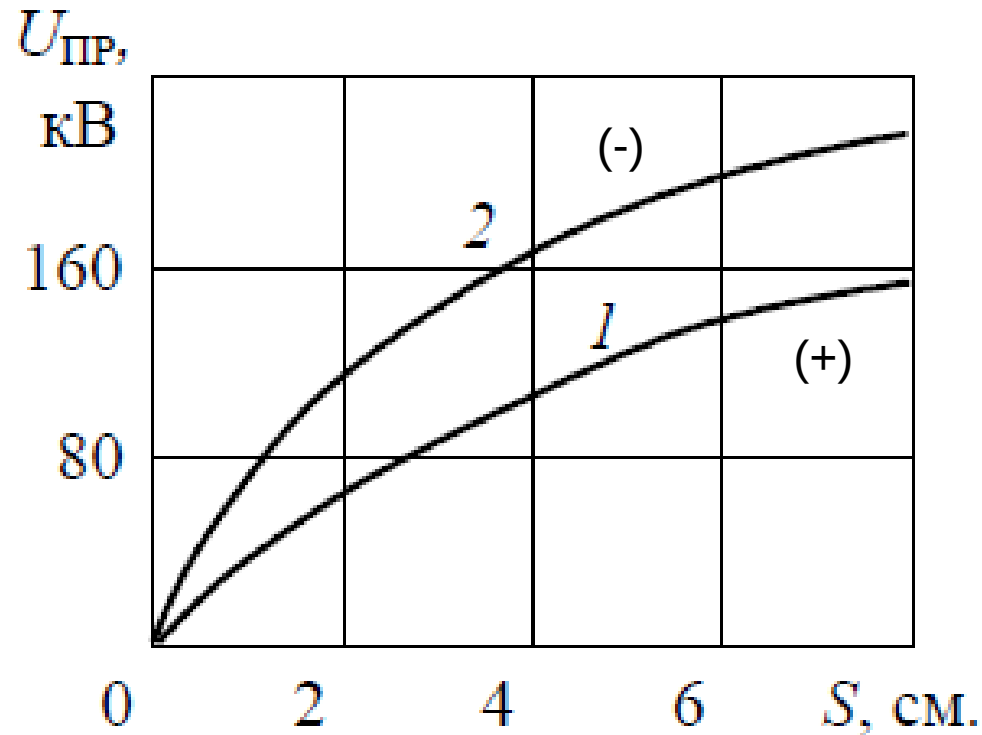
Влияние времени воздействия напряжения



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

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.

При длительном воздействии напряжения (область II) присутствие влаги, газа, загрязнений в жидком диэлектрике сильно снижает его электрическую прочность.
Пробой наступает вследствие образования цепочек из мелких поляризованных частиц включений, которые вытягиваются вдоль силовых линий. Эти цепочки образуют проводящий канал, по которому протекает ток, разогревающий воду и прилегающую к каналу жидкость до кипения. Пробой жидкости происходит по образовавшемуся газовому каналу.



Зависимость пробивного напряжения от расстояния между электродами и полярности для трансформаторного масла, электроды острие-плоскость:

1 – положительная полярность острия;

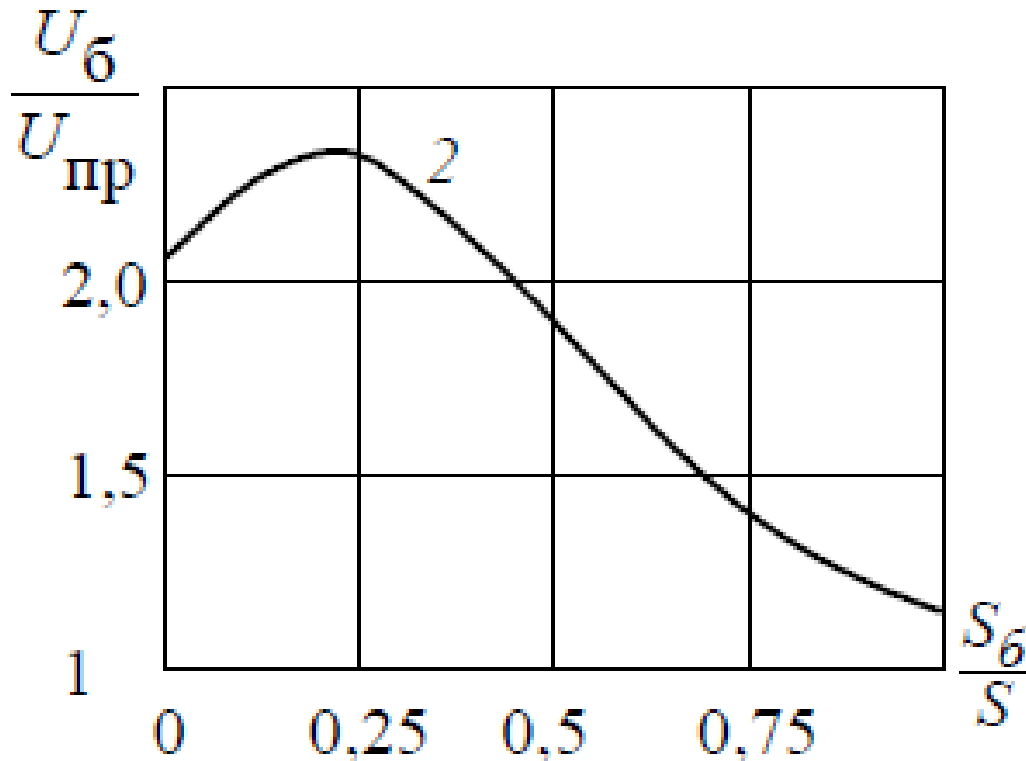
2 — отрицательная полярность острия;

напряжение постоянное

Барьерный эффект

Пробой жидких диэлектриков

Барьеры из твердого изоляционного материала, устанавливаемые в масле между электродами, весьма широко применяются для повышения электрической прочности масляной изоляции.



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

Барьер непроницаем для ионов жидкости. Ионы двигаясь от одного электрода к другому, оседают на барьере, «растекаются» по его поверхности и заряжают ее. 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.

ТВЕРДЫЕ ДИЭЛЕКТРИКИ

Электрическая прочность твердой изоляции выше, чем газообразной и жидкой $U_{пр\,тв} > U_{пр\,ж} > U_{пр\,г}$.

Неорганические изоляционные материалы

Эти материалы получают из глинистых продуктов путем спекания при высокой температуре.

1) Фарфор (280 - 350 кВ/см)

Фарфор представляет собой силикат алюминия, в его состав входят 40 - 50 % каолина и глины (пластификатора), 20 - 30% оксида алюминия и 30% полевого шпата.

2) Стеатит (380 - 500 кВ/см)

Силикат магния. Затруднительная обработка, вызванная отсутствием связующего материала, является причиной того, что изделия из стеатита имеют малые размеры, и поэтому для изготовления больших изоляторов на высокие напряжения предпочитают использовать фарфор.

Стеатит по сравнению с фарфором обладает лучшими механическими характеристиками и меньшими диэлектрическими потерями.

Фарфор в электроэнергетике используется в качестве изоляции воздушных линий электропередачи, газовых выключателей. Из него изготавливаются опорные изоляторы разъединителей и сборных шин, вводы силовых трансформаторов, изоляционные конструкции измерительных трансформаторов напряжения и тока, изоляционные корпуса оборудования и т.д.

Твердые диэлектрики

3) Стекло (100 – 480 кВ/см)

Получаются путем спекания различных оксидов. Наибольшее значение при изготовлении стекол имеют диоксид кремния в виде кварцевого песка, триоксид бора и оксиды металлов: палладия, алюминия, натрия, калий, барий и др.

*При изготовлении стекол широко применяются более 500 видов разнообразных добавок. Например, **бесщелочное электротехническое стекло** (содержание щелочи менее 0,8%), обладающее малой электропроводностью.*

Стекла применяются в концевых разделках кабелей, при изготовлении вводов, конденсаторов, тарельчатых изоляторов воздушных линий электропередачи.

Е-стекло используется прежде всего в виде волокна для изготовления стеклопластиков (стекловолокон). Материалы на основе стекловолокна обладают хорошими механическими свойствами.

Стекловолоконными нитями бандажируются обмотки электрических машин и укрепляются пакеты стали в трансформаторах.

Стеклоткань используется для механического упрочнения изоляционных плат и труб для камер выключателей.

Стекловолоконный стержень является несущей частью стеклоэпоксидных подвесных изоляторов.

4) Слюда (120 - 350 кВ/см)

Природный минерал, образованный различными химическими соединениями. Кристаллы слюды обладают способностью под действием механической нагрузки расщепляться по определенным кристаллографическим плоскостям.

В технике высоких напряжений преимущественно используется только слюда, которая при расщеплении дает крупные пластинки овальной или многоугольной формы толщиной от 0,02 до 0,10 мм. Для изготовления конденсаторов применяется так называемая блочная слюда с пластинами толщиной от 0,18 до 0,76 мм.

Слюда обладает термостойкостью вплоть до 600°C, ее температура плавления составляет 1200 - 1300°C. Слюда стойка к воздействию дуги, масла, облучения, противостоит тлеющим разрядам.

*Применяемые в ТВН пластинки слюды скрепляются, например, силиконовой или эпоксидной смолой, в результате чего образуются пластины или трубы стабильной формы (**миканит**), или наклеиваются на подложку из бумаги или стеклошелка - образуются гибкие полосы (**микафолий**).*

***Миканит** применяется для изоляции коллекторных пластин электрических машин, цоколей ламп, элементов крепления электродов в электронных лампах, каркасов и т.д.*

***Микафолий** применяется при изготовлении изоляции асинхронных двигателей, обмоток генераторов и сухих трансформаторов (высокие теплостойкость, механическая прочность, негорючесть, устойчивость при воздействии масла и влаги)*

Высокомолекулярные полимерные изоляционные материалы

По отношению к нагреву полимеры подразделяют на *термопластичные* и *термореактивные*.

Термопластичные – ПЭ, Полистирол, фторопласт (250 – 600 кв/см)

Термореактивные – эпоксидные компаунды (250 – 600 кв/см)

Термопластичные полимеры ([полиэтилен](#), [полипропилен](#), [полистирол](#)) при нагреве размягчаются, даже плавятся, а при охлаждении затвердевают. Этот процесс обратим.

Термореактивные полимеры при нагреве подвергаются необратимому химическому разрушению без плавления. Молекулы термореактивных полимеров имеют нелинейную структуру, полученную путём [сшивки](#) (например, [вулканизация](#)) цепных полимерных молекул.

Упругие свойства термореактивных полимеров выше, чем у термопластов, однако, термореактивные полимеры практически не обладают текучестью, вследствие чего имеют более низкое напряжение разрушения.

Высокомолекулярные полимерные изоляционные материалы

Эластомеры

Силиконовая резина - материал, получаемый путем вулканизации силиконового каучука.

Силиконовый каучук не окисляется, стоек к воздействию озона, света, жиров и хлорированных дифенилов.

Силиконовая резина горячей вулканизации применяется в качестве изоляции жил и оболочек кабелей, используемых в технике связи и электроснабжении, для уплотнений вводов в аппараты с жидкой средой и изготовления изоляции проводов и защитных колпаков распределителей в системах зажигания двигателей внутреннего сгорания.

Самоклеящиеся ленты из борсодержащей силиконовой резины используются в качестве изоляции кабелей.

Важнейшей областью применения силиконовой резины в технике высоких напряжений является изготовление подвесных изоляторов для воздушных линий электропередачи, состоящих из стеклотекстолитового стержня, устойчивого к растяжению, и экранов.

Органические материалы

Бумага и картоны (100 – 500 кВ/см)

Фибра (35 – 70 кВ/см)

Гетинакс и текстолит (160 – 200 кВ/см)

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 (полярный-неполярный, $\text{tg}\delta$, ϵ , γ и др.);
- 6) температуры.

Различают три вида пробоя твердого диэлектрика:

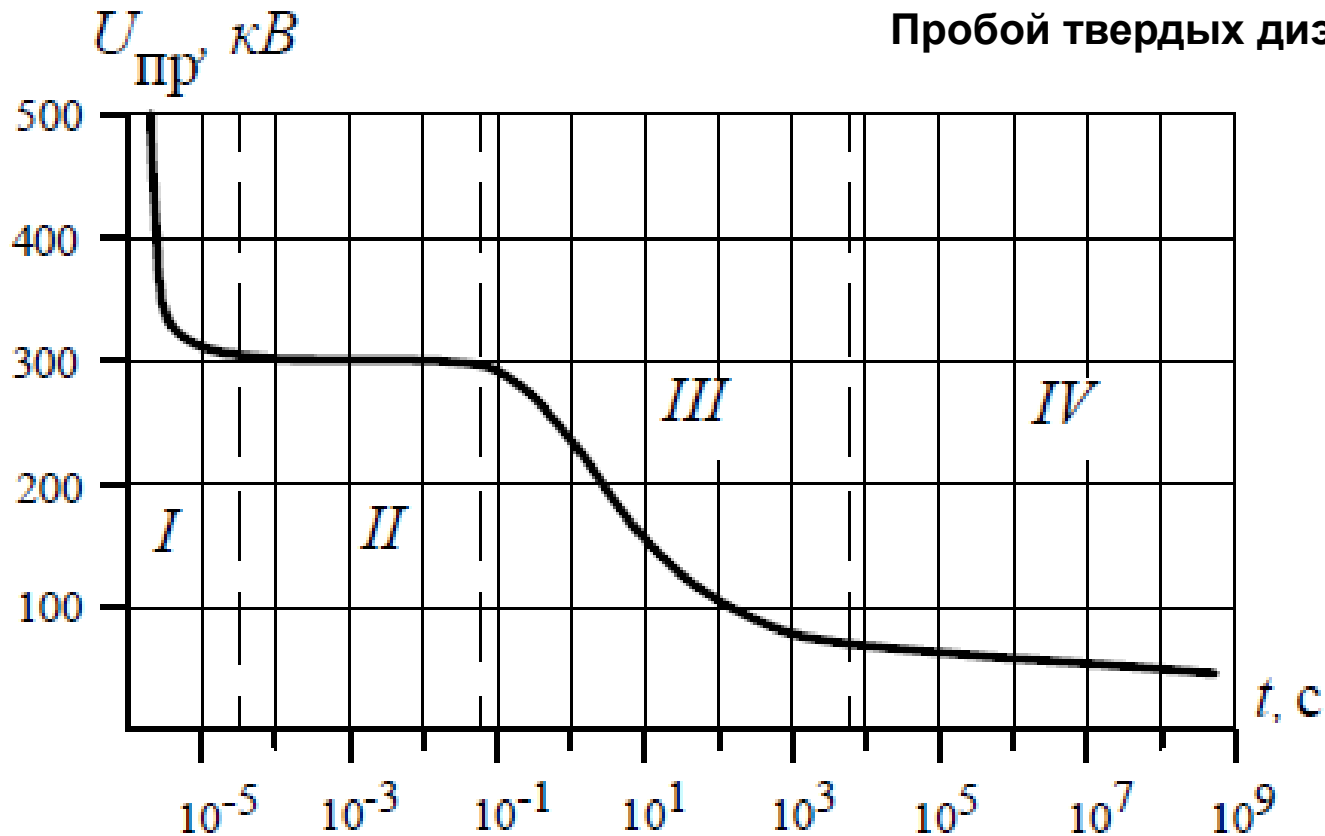
- 1) электрический — $E \sim 10^2 - 10^3 \text{ кВ/мм}$;
- 2) тепловой — $E \sim 10 - 10^2 \text{ кВ/мм}$;
- 3) старение — $E \sim 10 \text{ кВ/мм}$ и менее.

**Характеристики твердой изоляции, которые могут быть
востребованы в процессе ее эксплуатации**

Характеристики изоляции

Эл. харак- теристики	Мех. харак- теристики	Тепловые ха- рактеристики	Хим. харак- теристики	Прочие
$U_{пр}$ $U_{пер}$ $U_{раб}$ $U_{сухо\ разр}$ ρ_V, ρ_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 расш.	Стабильность Раствори- мость Действие на др. диэлектр.	Удельный вес Абсорбция влаги Действие об- луч. Микроорга- низмы и др.

Пробой твердых диэлектриков



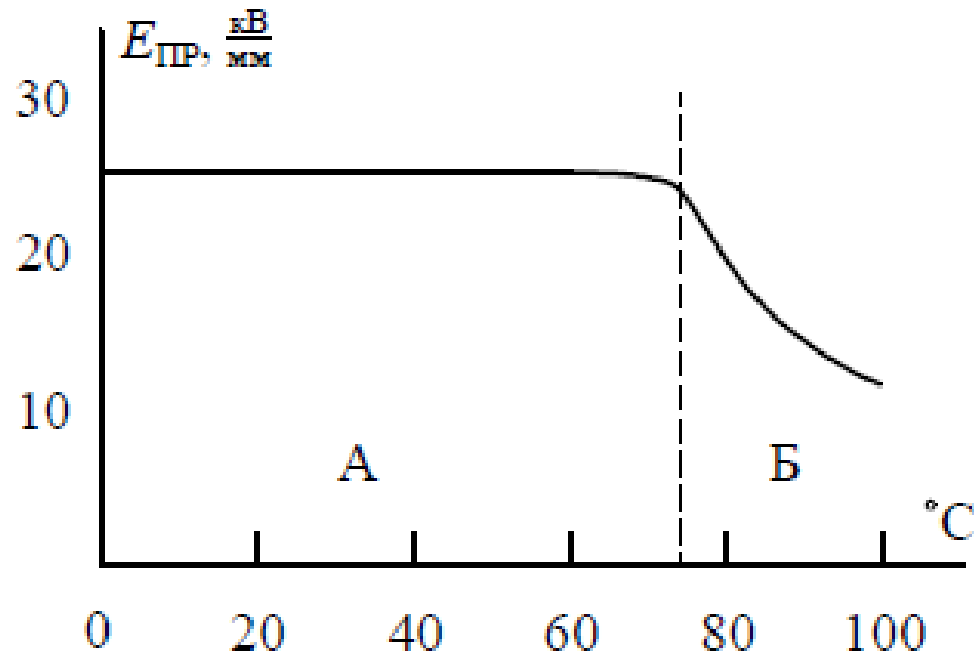
Области I и II соответствуют **электрическому пробою** (резкое возрастание пробивного напряжения в I области обусловлено запаздыванием развития разряда относительно времени приложения напряжения).

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.

Электрическая прочность *$E_{пр}$ твердой изоляции* *возрастает* с уменьшением ее толщины и особенно быстро в области микронных толщин.

Этот эффект используют в изоляции конденсаторов, кабелей, вводов и др.

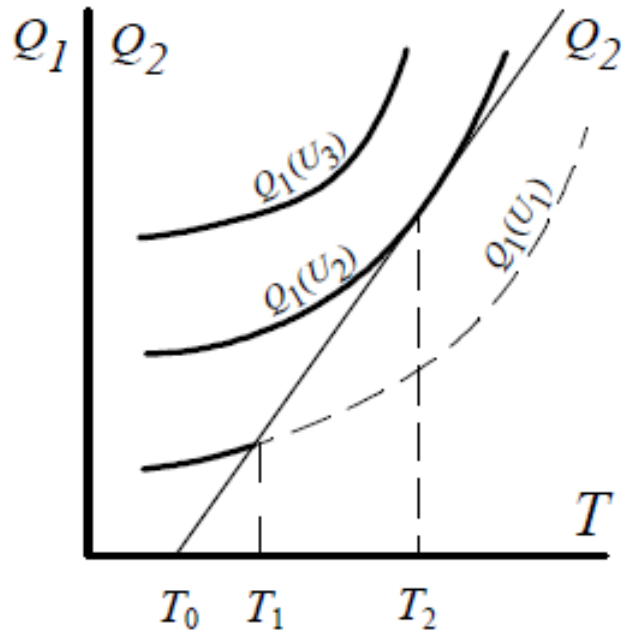


Зависимость пробивного напряжения от температуры для фарфора (напряжение 50 Гц)

РАЗВИТИЕ ТЕПЛОВОГО ПРОБОЯ

$$U_{\text{д}} \rightarrow I_{\text{д}} \rightarrow T_{\text{д}} \uparrow \rightarrow \gamma \uparrow \text{ и } \text{tg } \delta \uparrow \rightarrow I_{\text{д}} \uparrow \rightarrow T_{\text{д}} \uparrow \text{ и т. д.}$$

γ — проводимость изоляции



Изменение выделенного Q_1 и отводимого Q_2 тепла в изоляции при разных U :

Q_1 — тепло, выделенное в изоляции за счет джоулевых и диэлектрических потерь

Q_2 — отводимое от изоляции тепло в окружающую среду

$$Q_1 = \omega C \operatorname{tg} \delta U^2$$

$$Q_2 = k S (T - T_0)$$

ω — угловая частота;

C — емкость изделия;

$\operatorname{tg} \delta$ — диэлектрические потери в изоляции;

k — коэффициент теплопередачи;

S — площадь поверхности изоляции;

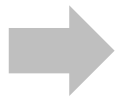
T_0 — температура окружающей среды;

T — температура внутри диэлектрика.

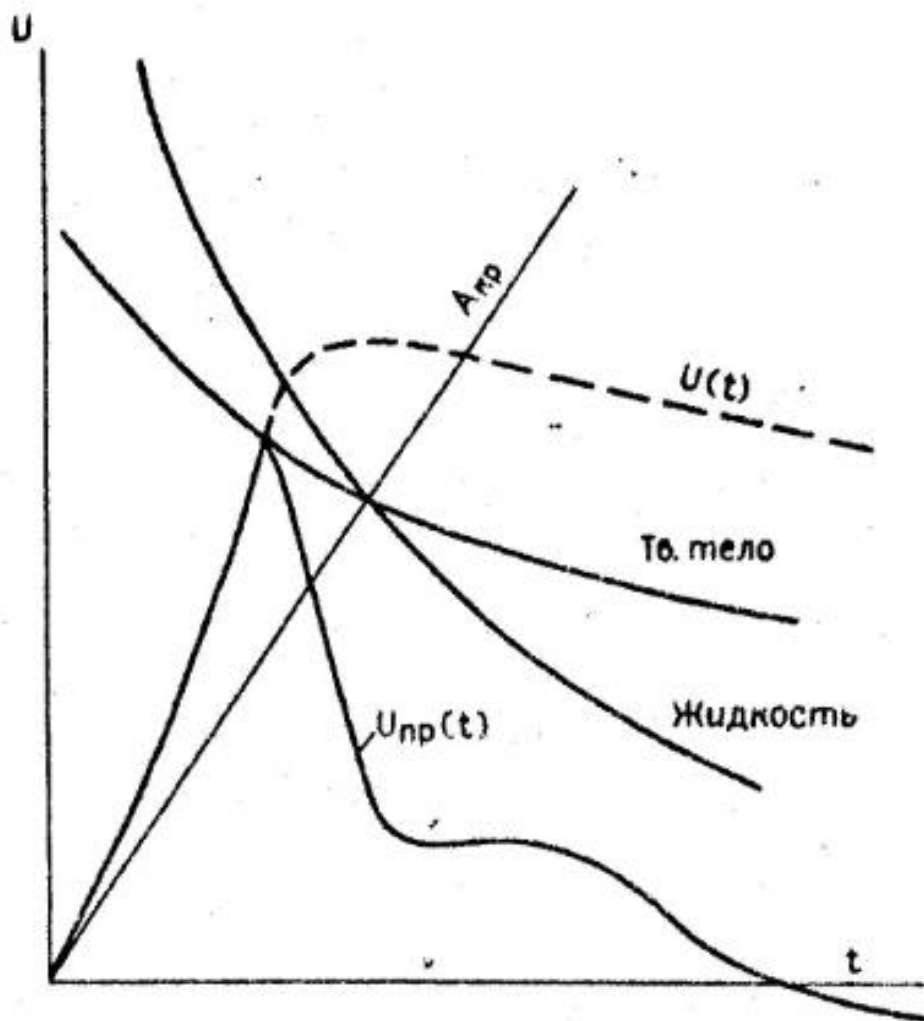
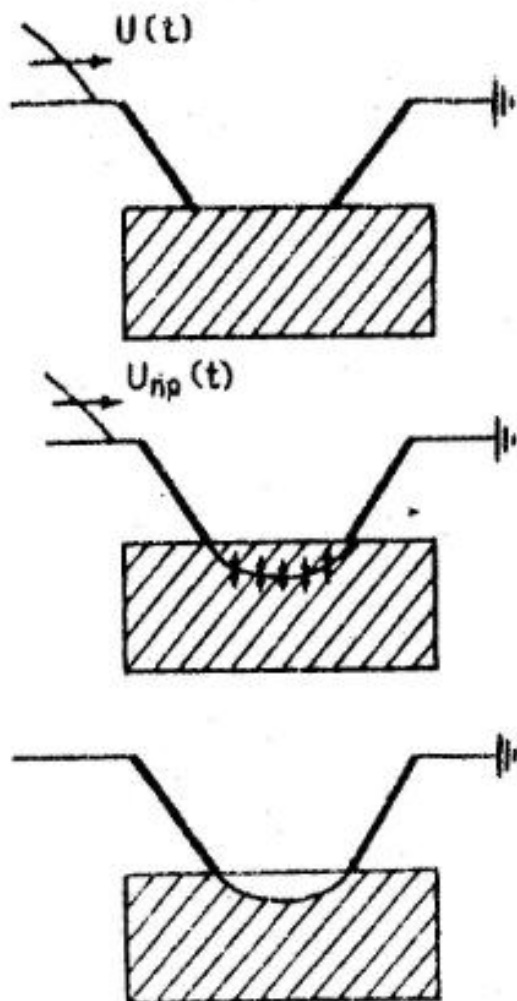
Для U_1 при $T_1 + \Delta T - Q_2 > Q_1$ — нет нагрева.

Для U_2 при $T_2 + \Delta T - Q_2 < Q_1$ — тепловой пробой.

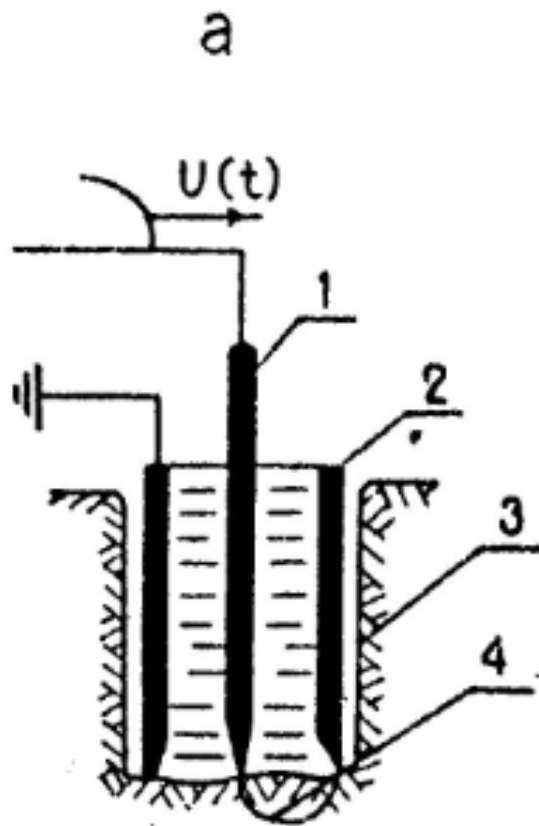
Для U_3 — всегда тепловой пробой.

T_2 — точка теплового равновесия.  Рабочая температура $T_{\text{раб}} < T_2$

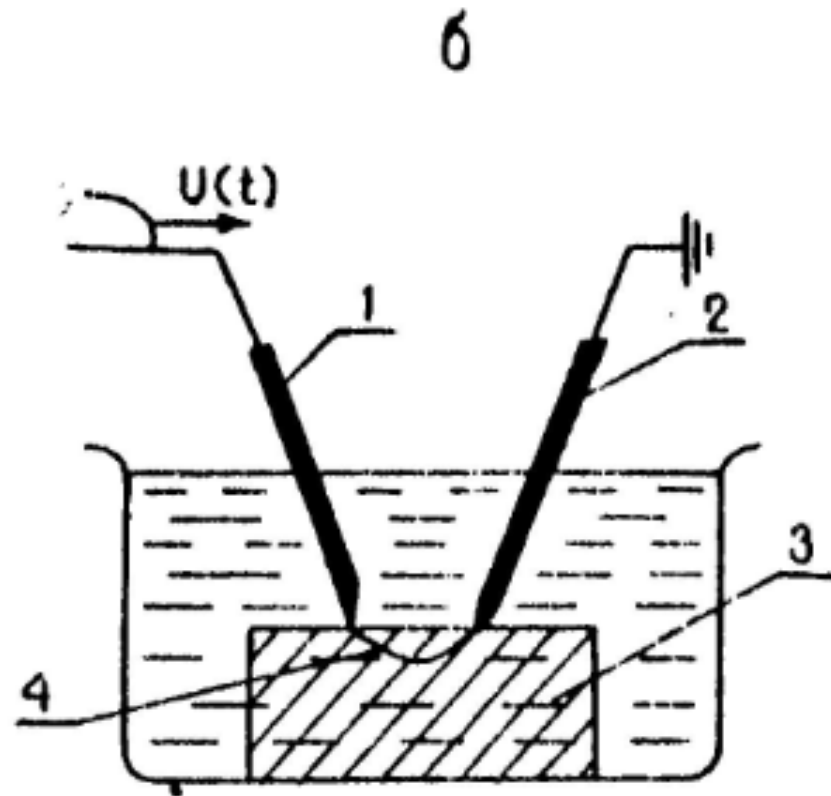
Принцип электроимпульсного разрушения



Принципиальные схемы применения электроимпульсного разрушения твердых тел



а) Бурение

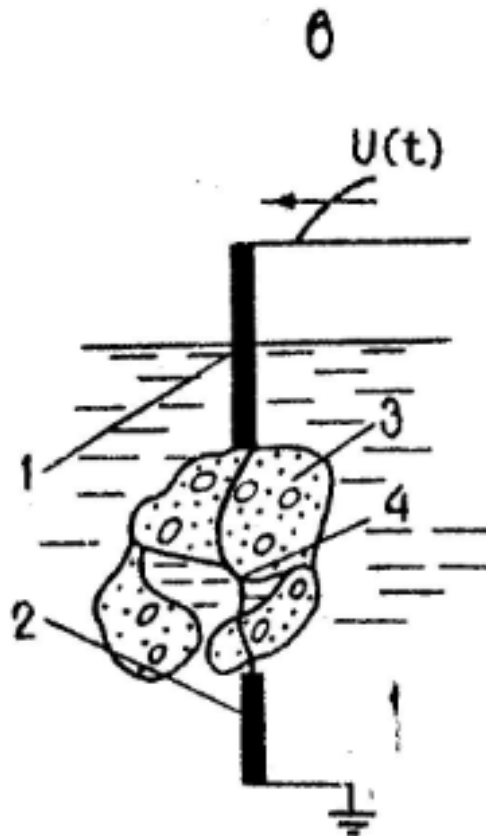


б) Резание

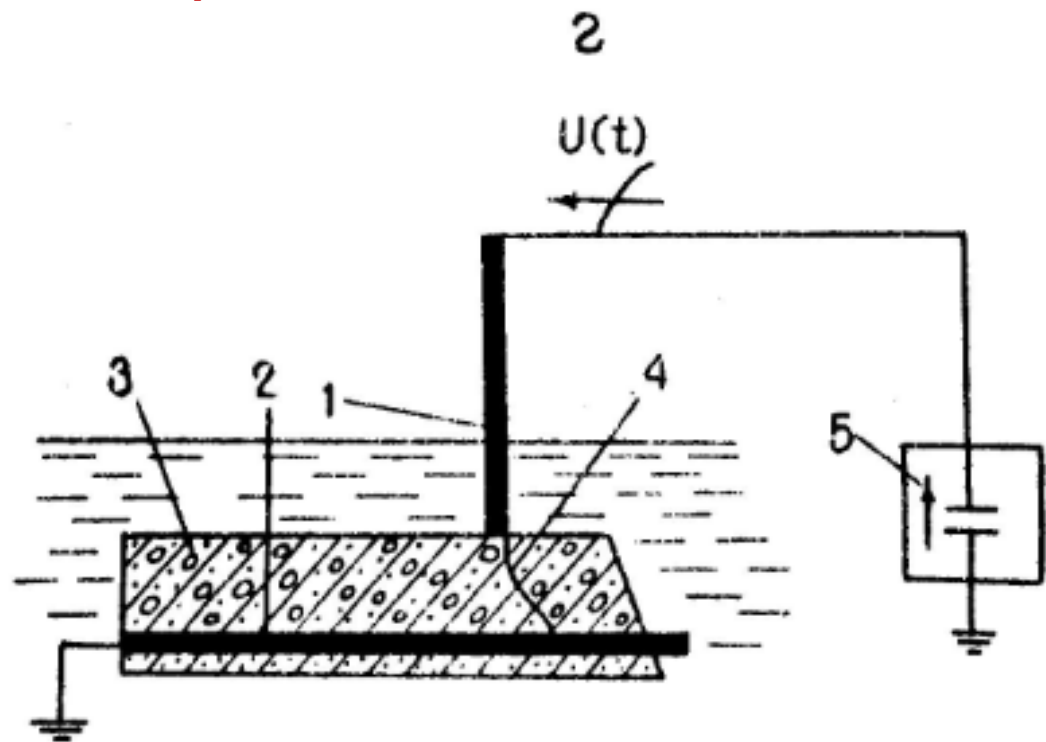
- 1) В/в электрод,
- 3) Разрушаемый материал
- 5) Источник импульсного напряжения

- 2) Заземленный электрод
- 4) Искровой разряд

Принципиальные схемы применения электроимпульсного разрушения
твердых тел



а) Дробление

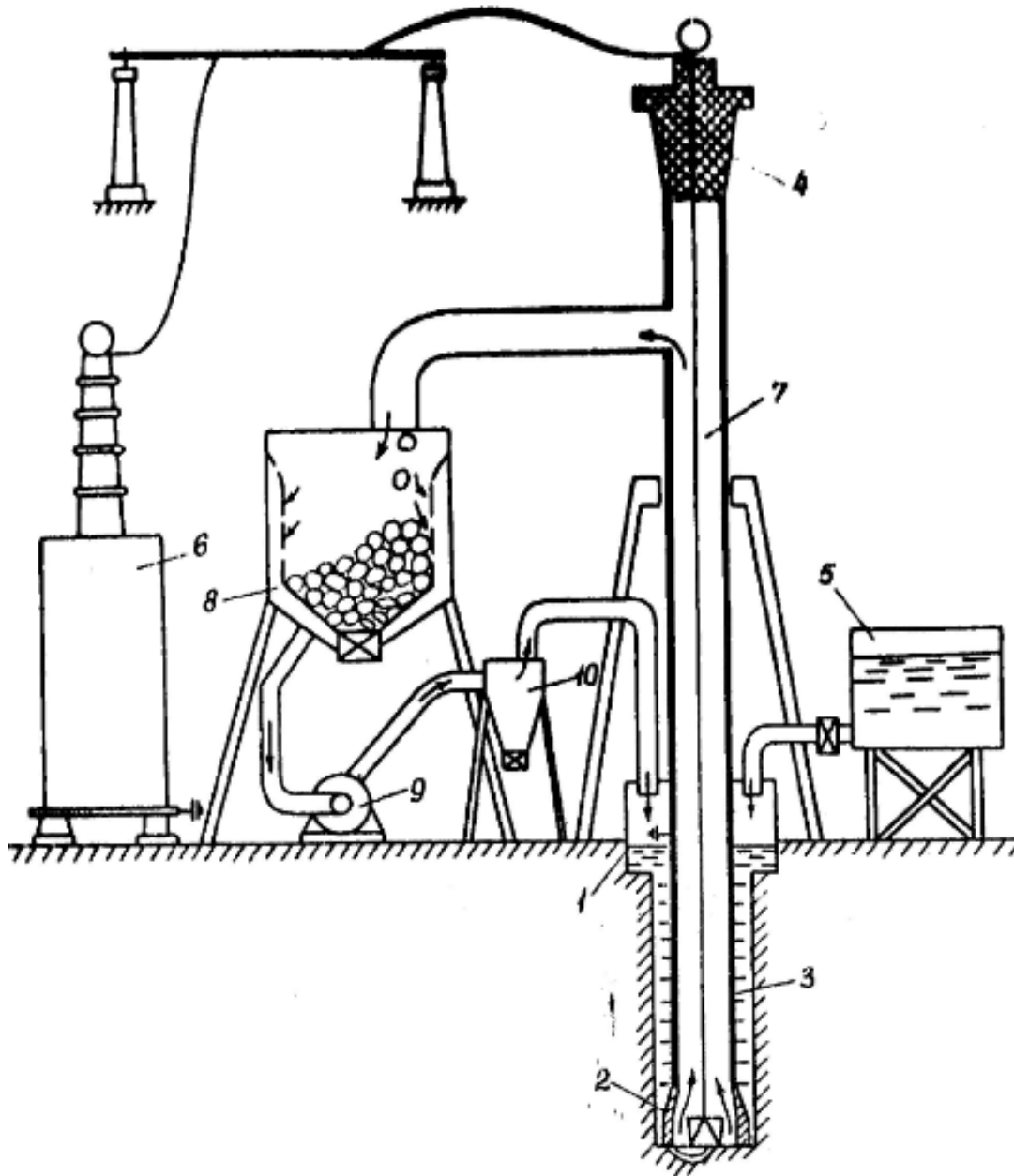


б) Разрушение ЖБИ

- 1) В/в электрод,
- 3) Разрушаемый материал
- 5) Источник импульсного напряжения

- 2) Заземленный электрод
- 4) Искровой разряд

Электроимпульсное разрушение твердых диэлектриков

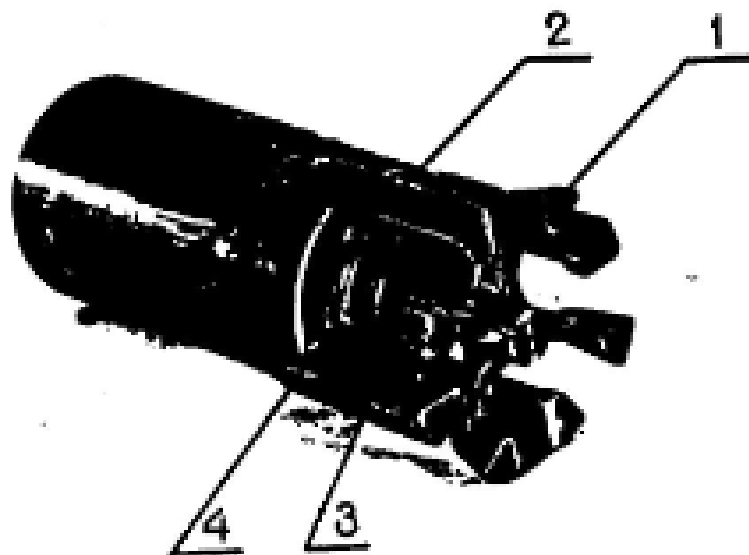


Технологическая схема ЭИ буровой установки

- 1 – кондуктор
- 2 – буровая колонка
- 3 – колонна буровых штанг
- 4 – в/в электрод
- 5 – емкость с промывочной жидкостью
- 6 – источник импульсов
- 7 – токопровод
- 8 – водосборник
- 9 – насос
- 10 – гидроциклон

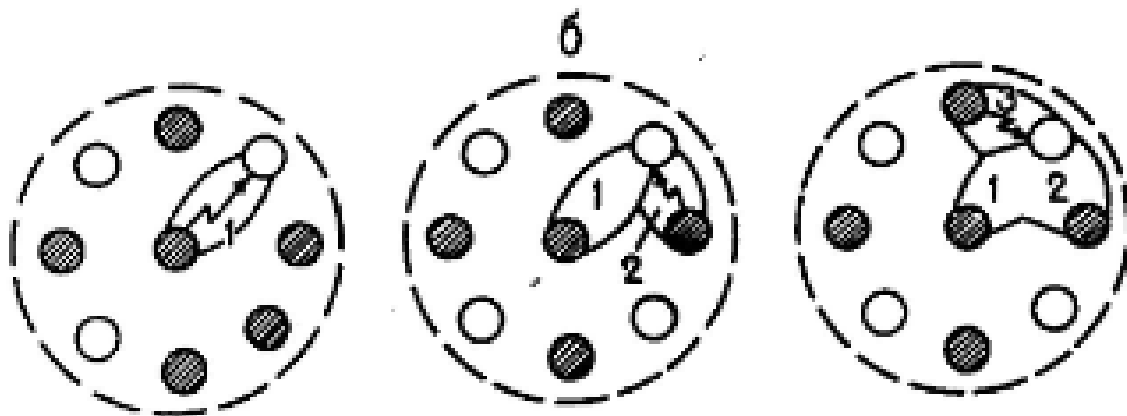
Электроимпульсное разрушение твердых диэлектриков

а

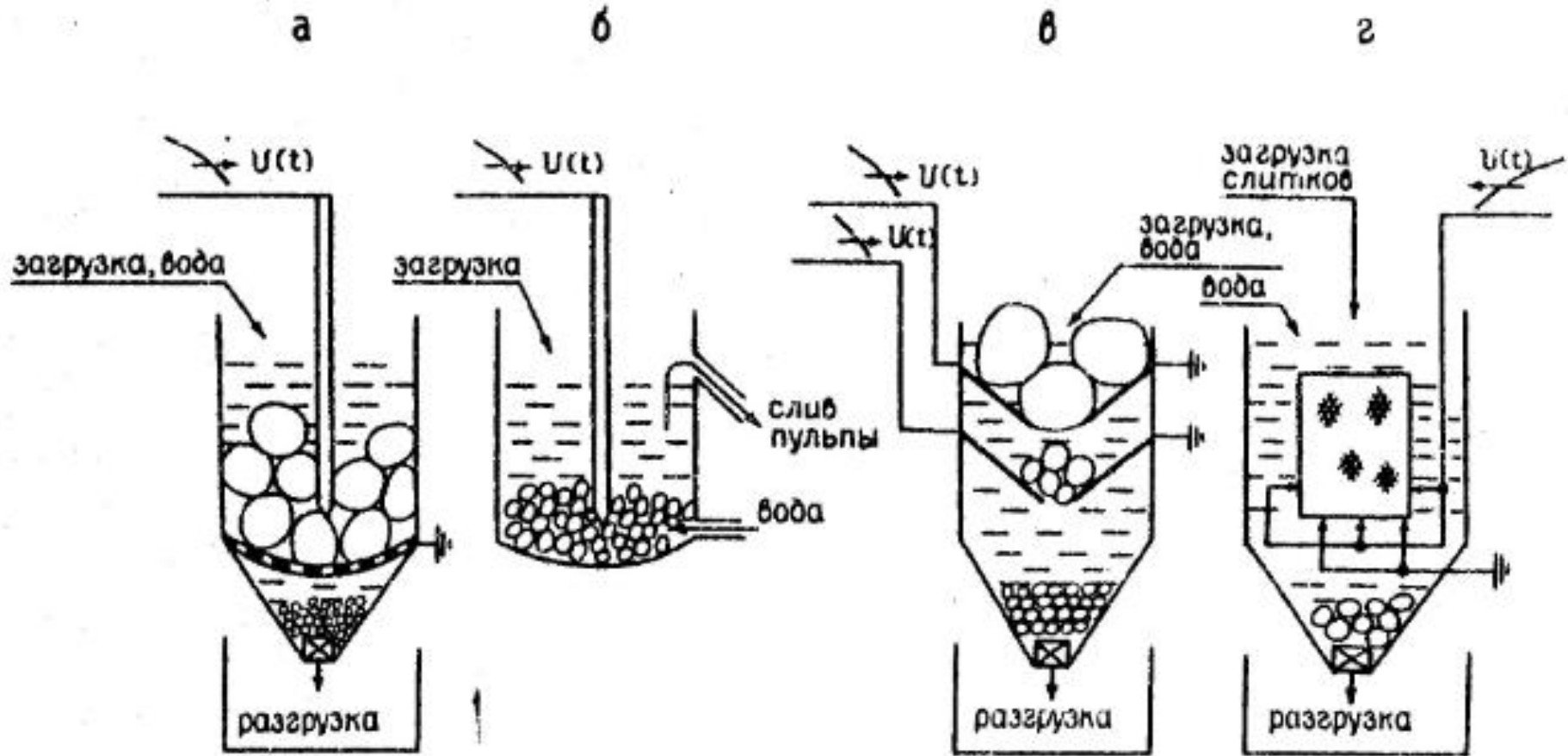


а) буровой наконечник

б) последовательность
пробоя и разрушения забоя
многоэлектродным БН



Электроимпульсное разрушение твердых диэлектриков



Принципиальные схемы электроимпульсного дробления и измельчения материалов, разрушение блоков и слитков