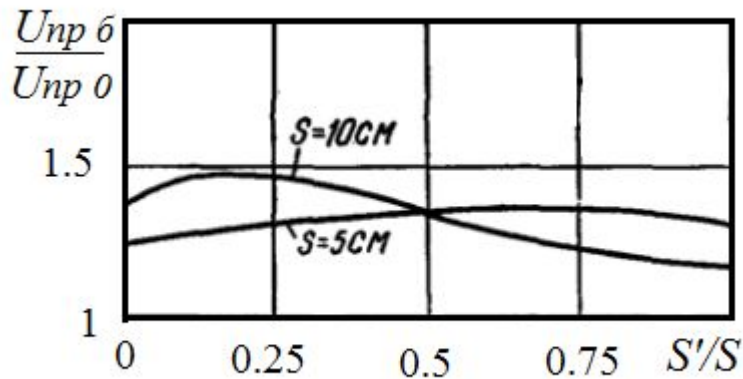


Внутренняя изоляция высоковольтного электроэнергетического оборудования

Внутренняя изоляция – изоляция токоведущих и заземленных элементов конструкций внутри корпусов различных установок и оборудования высокого напряжения – трансформаторов, силовых конденсаторов, реакторов, электрических машин, токопроводов и т.п.

Маслобарьерная изоляция

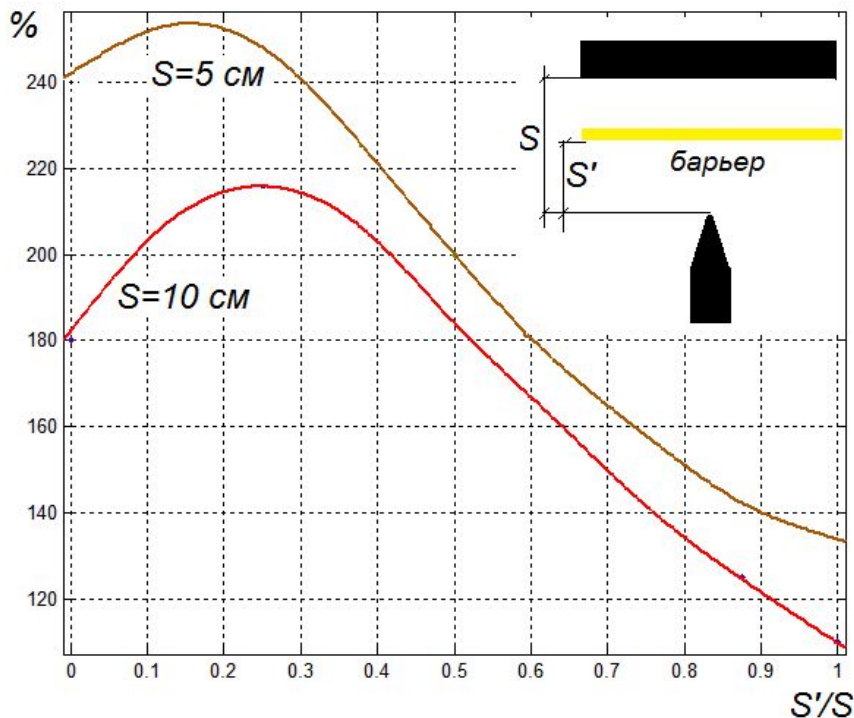
МБИ - Изоляционная конструкция в которой масляные изоляционные промежутки чередуются твердыми диэлектрическими перегородками – барьерами из электро-картона. Применяется в силовых трансформаторах, маслонаполненных вводах и других аппаратах



Главный эффект при $\omega = 50$ Гц – барьер препятствует образованию цепочек из примесей, содержащихся в изоляционном масле. При импульсном напряжении эффект барьера незначителен

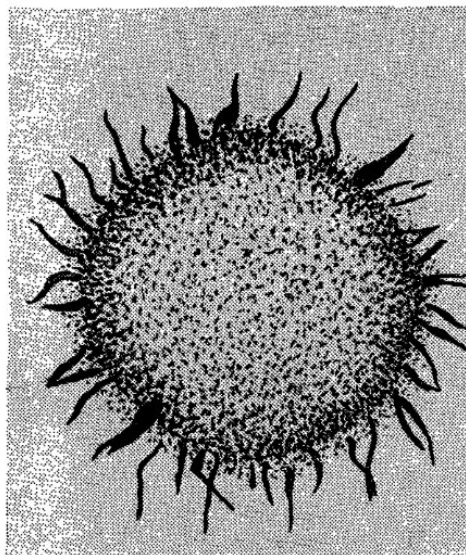
Влияние положения барьера (S') на увеличение электрической прочности масляного промежутка (S) в однородном электрическом поле $\omega = 50$

$U_{пр}/U_{пр0}$



Пробой масляного промежутка.

Внешне проявляется как частичный разряд с критическим уровнем кажущегося заряда $q = 10^{-6} - 10^{-5} Кл$

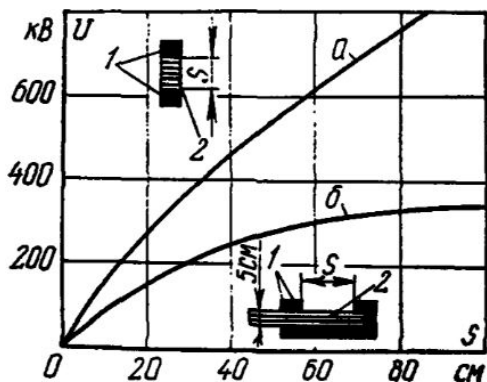


«Черные следы» на картоне в результате критических частичных разрядов

Коэффициент импульса маслобарьерной изоляции $K_i = 1.35 - 2.05$

Влияние барьера на электрическую прочность масляного промежутка в сильно неоднородном поле U 50 Гц

Разряд в масле вдоль поверхности твердого диэлектрика



1 – электроды
2 – твердый диэлектрик
 U 50 Гц

Коронный и скользящий разряды в масле интенсивностью большей 10^{-9} Кл недопустимы, т.к. разлагают масло и целлюлозу

Маслобарьерная изоляция. Ползущий разряд

Малоинтенсивные ч.р. возникают в месте контакта твердых диэлектрических элементов в масляных прослойках

$$\frac{E_{мп}}{E_{\delta}} = \frac{\epsilon_{д}}{\epsilon_{мп}} = \frac{4.5}{2.3} \cong 2$$

$$q_x = 10^{-12} - 10^{-10} \text{ Кл}$$

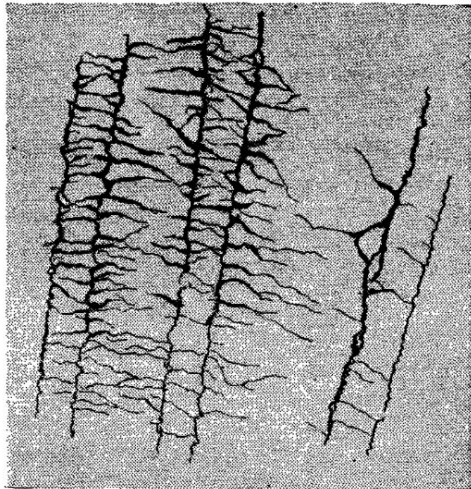
Не приводит к быстрому разрушению изоляции, выделяющийся газ успевает растворяться в масле

Кратковременное действие ЧР $q_x = 10^{-9} \text{ Кл}$

Приводит к нерастворимому газу, адсорбируемому на поверхности твердого диэлектрика - «белый след» - исчезает при прекращении ЧР

Единичный пробой масляного канала $q_x = 10^{-7} - 10^{-5} \text{ Кл}$

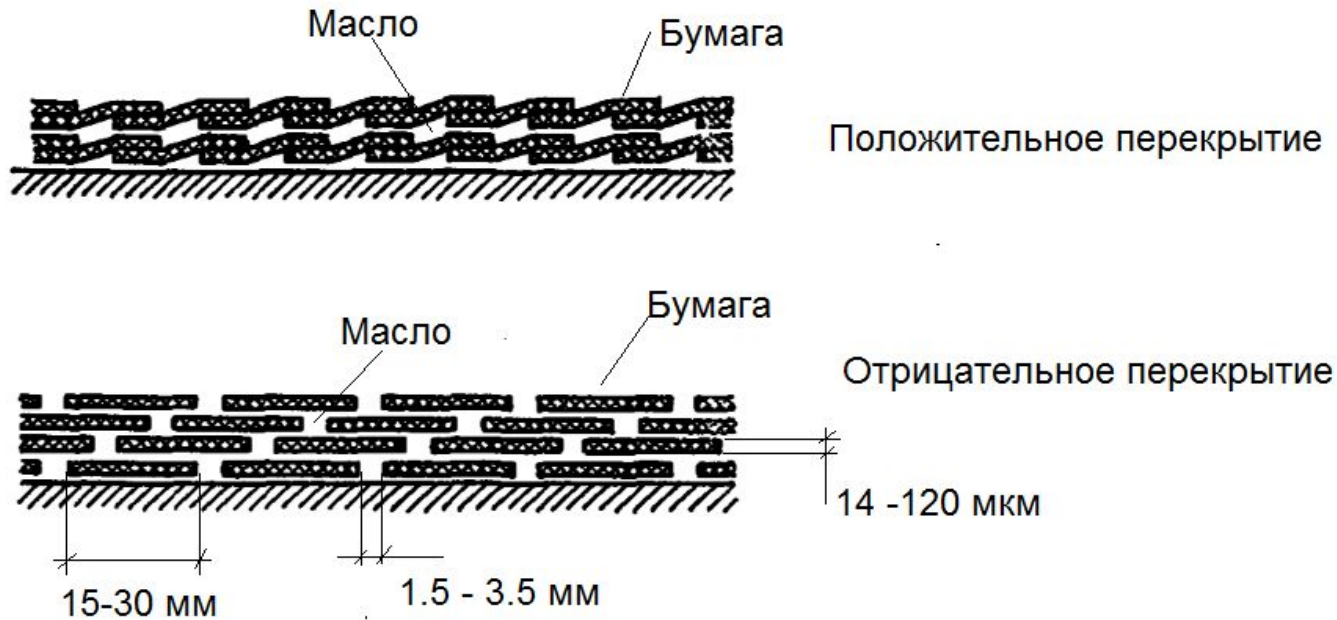
Дает старт ползущему разряду, т.к. создает науглероженную проводящую область на поверхности картона. Каналы повышенной проводимости прорастают вдоль барьера.



Следы развития ползущих разрядов на поверхности цилиндрического изолирующего барьера высоковольтного трансформатора.

В процессе развития ползущего разряда регистрируются ЧР $q_x = 10^{-8} - 10^{-6} \text{ Кл}$

Бумажно-масляная изоляция

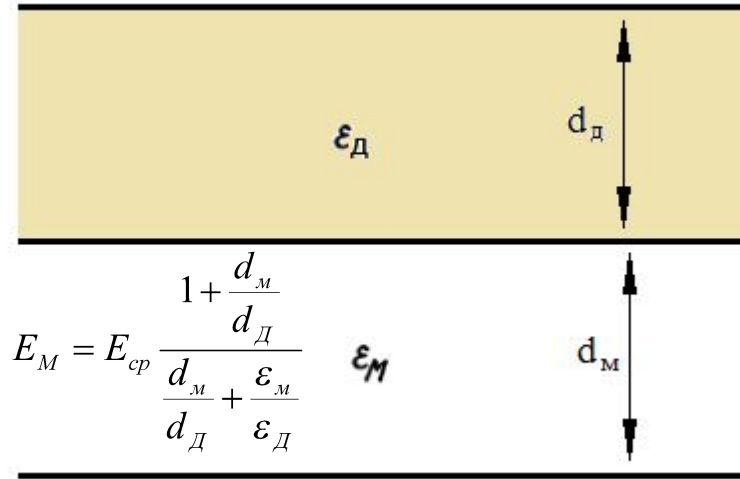
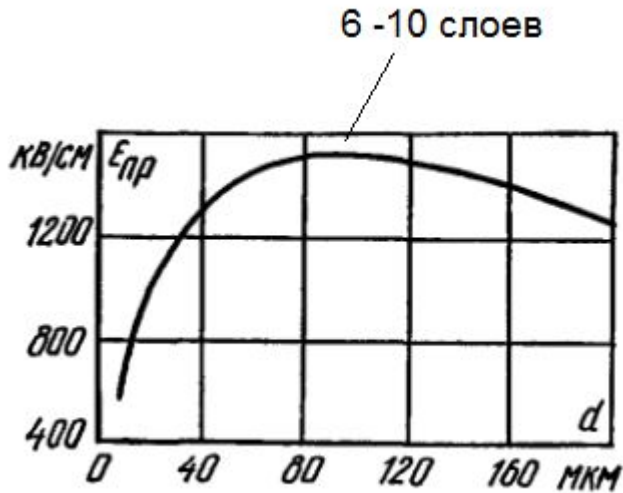


Область применения: отводы силовых и измерительных трансформаторов, силовые кабели

Технология. Исходные материалы – кабельная бумага, листовая изоляция (КОН-1), кабельное масло, трансформаторное масло. Операции: 1) Намотка 2) Сушка под вакуумом 130 град.С 3) Пропитка под вакуумом 0.1 -100 Па.

Электрические характеристики. Кратковременная электрическая прочность $\sim U$ 50-120 кВ/мм

$= U$ 100-250 кВ/мм Коэффициент импульса $K_i = 1.3 - 2$



Зависимость электрической прочности БМИ от толщины

Эквивалентная схема двухслойного диэлектрика

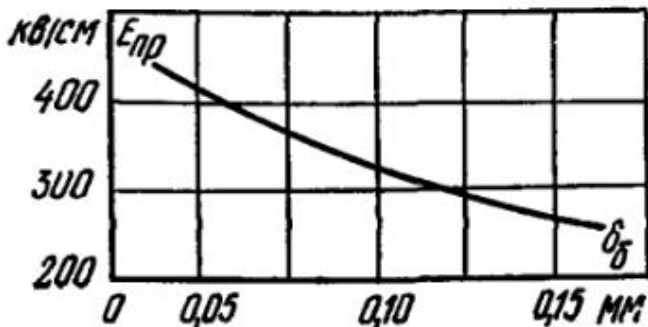
Листовая изоляция $\frac{d_M}{d_D} \ll 1$ $E_M = E_{cp} \frac{\epsilon_D}{\epsilon_M} = E_{cp} \frac{4.5}{2.3} \cong 2E_{cp}$

При $\frac{d_M}{d_D} = const$ $E_M = const$

Ленточная изоляция $\frac{d_M}{d_D} \cong 1$ $E_M = E_{cp} \frac{2}{1 + \frac{\epsilon_M}{\epsilon_D}} = E_{cp} \frac{2}{1 + \frac{2.3}{4.5}} \cong 1.3E_{cp}$

$d_D \downarrow \Rightarrow d_M \downarrow \Rightarrow E_{пр} \uparrow$

Целесообразно применение тонкой бумаги



Зависимость пробивной напряженности БМИ от толщины бумаги при ~ U

Анизотропия электрической прочности БМИ:

$$E_{np \perp} \cong (2 - 3) E_{np \parallel}$$

Частичные разряды в бумажно-масляной изоляции

Начальные ЧР возникают в масляных прослойках и местах усиления поля – кромки и микровыступы электродов. Газовыделение: водород – малое, количество растворяется в масле без образования пузырьков

$$q_x = 10^{-15} - 10^{-14} \text{ Кл.}$$

Первые ЧР возникают в области резко неоднородного поля и d [мм]

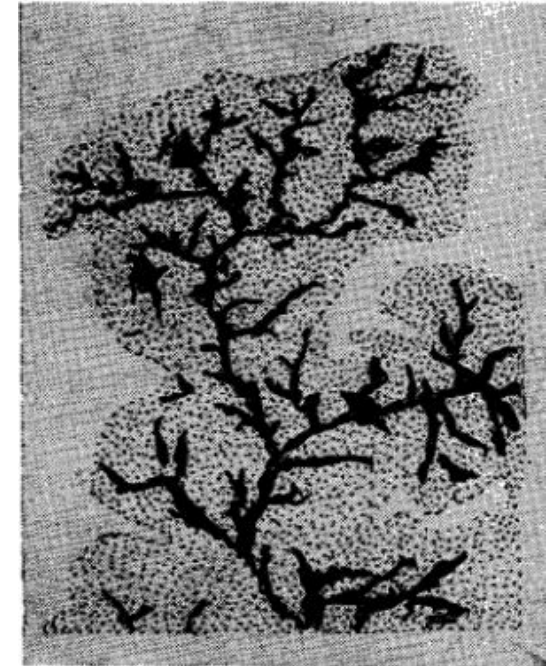
зависят от толщины диэлектрика

$$E_{нЧР} = Ad^{-0.58} \text{ [кВ / мм]}$$

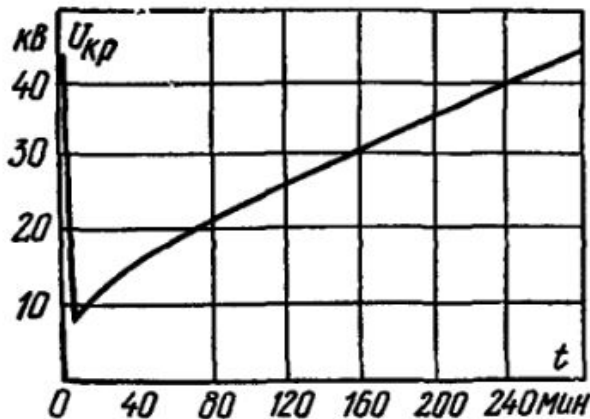
Марка бумаги	A
КОН-1, 10 мкм	3.8
К-12, 120 мкм	7

Критические ЧР - микропробои газовых полостей, скользящие разряды от края электрода. КЧР- разлагают масло и целлюлозу. Интенсивное газообразование $H_2, CH_4, C_2H_2, CO_2, CO$

Образование пены → эмульсия → Ветвистый разряд



Следы ветвистого разряда в слоях БМИ



$$E_{критЧР} = Ad^{-0.58} \text{ [кВ / мм]}$$

Марка бумаги	A
КОН-1, 10 мкм	10
К-12, 120 мкм	18

Изменение напряжений возникновения критически ЧР в процесс «отдыха» изоляции

Некоторые другие виды бумажно-пропитанной и комбинированной изоляции

Применяемые наряду с нефтяным маслом для пропитки жидкие диэлектрики:

Хлорированные дифенилы (совол, совтол, пропиточные жидкости на их основе) – не стабильны при воздействии температуры и ультрафиолетового излучения.
Полярные высокотоксичные жидкости, устойчивы к действию ЧР.
загрязнению

Пропиточные материалы высокой вязкости: масляно-канифольный компаунд (10-30 % масла) склонны к образованию газовых полостей при термических циклах

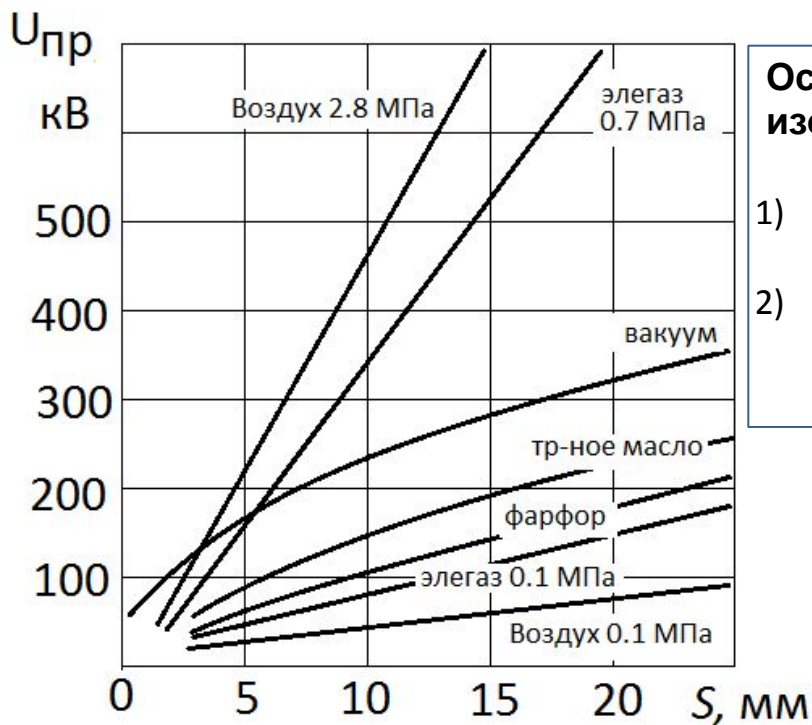
Применяемые наряду с бумагой твердые диэлектрики – полимерные пленки и комбинация пленка-бумага

Газовая изоляция

Преимущества газовой изоляции: низкая проводимость, отсутствие старения, способность к самовосстановлению после пробоя

Недостатки газовой изоляции: относительно низкая электрическая прочность для достижения компактности требуются высокие давления газа

Требования к газовой изоляции: не токсична, химически не активна, не горюча, взрывобезопасна, низкая температура кипения



Особенности воздуха как диэлектрика для внутренней изоляции:

- 1) Недостаточный рост электрической прочности при увеличении давления
- 2) Разлагается под действием короны с образованием химически активных окислов азота, наличие собственного окислителя - кислорода

Пробивное напряжение от расстояния между электродами в однородном поле

Относительная электрическая прочность и температура кипения некоторых газов

Газ	Относительная электрическая прочность $E_{\text{пр}}/E_{\text{пр возд}}$	Точка кипения при нормальном давлении град.С	Примечание
Трихлормонофторметан CCl_3F	3-4	23.8	
Дихлордифторметан CCl_2F_2	2.4-2.5	-28	
Монохлортрихлорметан CClF_3	1.4	-81	
Монохлорпентафторэтан C_2ClF_5	2.8	-38	
Гексафторэтан C_2F_6	1.5-1.8	-78	
Октафторпропан C_3F_8	2.6	-6	
Додекафторпентан C_5F_{12}	3	25	
Гексофторид серы (элегаз) SF_6	2.4-2.5	-63	химически нейтрален
Шестифтористый селен SeF_6	4.5	-49	токсичен
Азот N_2	1	-195.8	
Углекислый газ CO_2	0.9	-78.5	

Особенности разряда в элегазе

«Стандартное» условие самостоятельности разряда

$$\frac{\alpha}{\alpha - \eta} [\exp(\alpha - \eta) - 1] \gamma \geq 1$$

Выполняется вблизи $\alpha - \eta \approx 0$

Townsend $\frac{\alpha}{P} = \varphi\left(\frac{E}{P}\right)$

$$\frac{\alpha}{P} - \frac{\eta}{P} = f\left(\frac{E}{P}\right) = 0$$

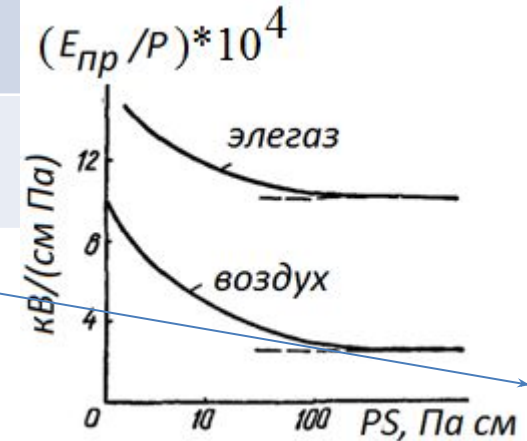
Большая электрическая прочность элегаза обусловлена высоким коэффициентом прилипания η

В практических устройствах

В элегазе $U_{np} [кВ] = 8.9 \cdot 10^{-4} (pS)_{[Па \cdot см]}$

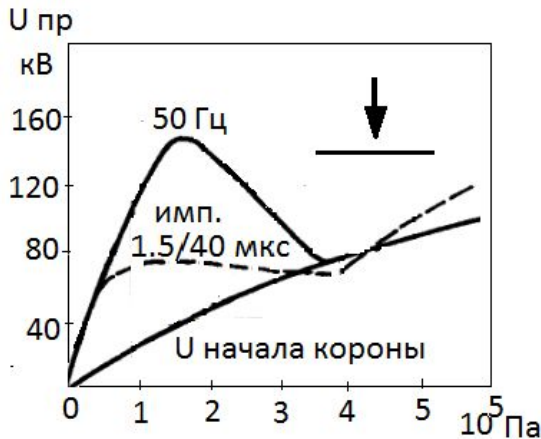
Газ	Начало разряда (E/P) крит кВ/см Па
Воздух	$2.7 \cdot 10^{-4}$
Элега	$8.9 \cdot 10^{-4}$

$\beta \cdot S > 10^5 \text{ Па} \cdot \text{см}$



$E_{np} / P = const$

Аномалии неоднородных полей



Способы преодоления аномалий:

- 1) Исключение сильных неоднородностей полей при конструировании (устранение кромок, экранирование)
- 2) Изолирующие покрытия криволинейных электродов

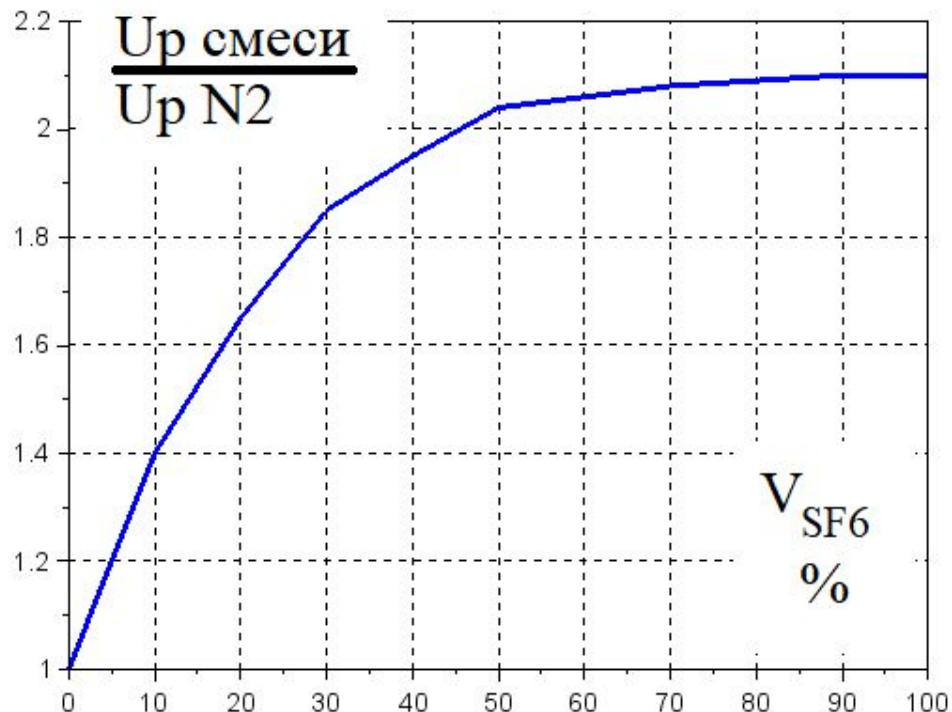
Влияние материала электрода на разрядные напряжения U_p при высоких давлениях : $U_p(\text{Ni}) < U_p(\text{A}) < U_p(\text{сталь})$

Влияние диэлектрических покрытий электродов $d=20-250$ мкм

Удельное эл. Сопротивление материала покрытия ρ_n
 Диэлектрическая проницаемость ϵ_n



Применение смесей с Азотом

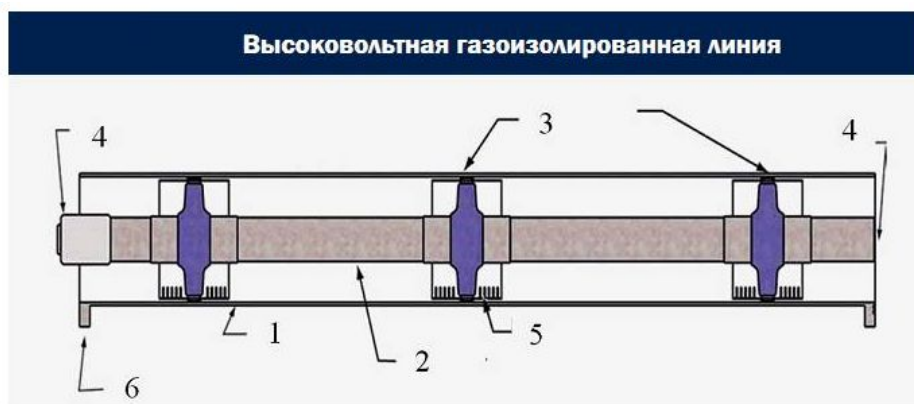


Особенности разряда вдоль поверхности твердого диэлектрика в

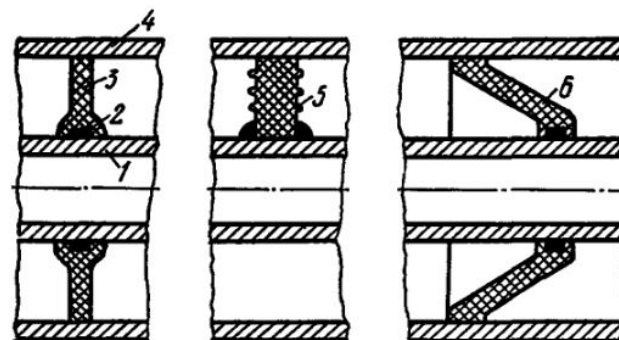
сжатом газе. Эффект: сильная чувствительность к неоднородности поля (см. аномалии)

- 1) Сильное ослабление электрической прочности при наличии мелких неоднородностей поверхности диэлектрика
- 2) Перекрытие по поверхности, вызываемое металлической пылью в корпусе устройства
- 3) Перекрытие по поверхности, вызываемое органическими и водными загрязнениями поверхности твердого изолятора

Примеры изоляционных конструкций с использованием



1 — оболочка, 2 — токоведущая жила, 3 — изоляторы, 4 — контакты, 5 — ловушки частиц, 6 — фланцы



Виды изоляторов для газонаполненных тоководов:

1- токоведущая труба; 2- внутренний экран; изоляторы: 3- дисковый; 5 — стержневой; 6 — конический



Элегазовое КРУЭ 252 кВ

Газонаполненная линия электропередачи

