

# ЛЕКЦИЯ 1

---

## Электрическая изоляция

# ЛИТЕРАТУРА

- «Техника высоких напряжений» под редакцией М.В. Костенко, Москва, изд. «Высшая школа», 1973г.
- «Расчет и конструирование электрокерамических конструкций», В.Н. Синявский, Москва, изд. «Энергия» 1977 г.
- «Расчет и конструирование систем электрической изоляции», В.С. Дмитриевский, Москва, изд. «Энергоиздат» 1987 г.

- **Электрическая изоляция** – это устройство, которое обеспечивает надежное электрическое разобщение элементарных токоведущих элементов, находящихся под разными потенциалами и их механическое закрепление.
- Также изоляция может обеспечивать теплоотвод (жидкие диэлектрики) и герметизацию от окружающей среды.
- Изоляция электроустановок может быть разделена на **внешнюю и внутреннюю**. Такое разделение связано со специфическими особенностями и большими различиями внешней и внутренней изоляции.

# ВНЕШНЯЯ ИЗОЛЯЦИЯ

- К **внешней изоляции** установок высокого напряжения относятся изоляционные промежутки между электродами, в которых роль основного диэлектрика выполняет воздух. (воздушные промежутки между проводами ЛЭП, шинами распределительных устройств и др.)
- **Внешнюю изоляцию** также образуют промежутки в воздухе вдоль поверхности изоляторов.

# ОСОБЕННОСТИ ВНЕШНЕЙ ИЗОЛЯЦИИ

- Электрическая прочность внешней изоляции **зависит от атмосферных условий**: давления, температуры и влажности воздуха. На разрядные напряжения изоляторов наружной установки существенно влияют также загрязнения их поверхности и атмосферные осадки.
- Основной диэлектрик внешней изоляции — атмосферный воздух **не подвержен старению**, т.е. независимо от воздействующих на изоляцию напряжений и режимов работы оборудования его средние характеристики остаются неизменными.
- Воздух **восстанавливает** свою **электрическую прочность** после устранения причины пробоя.

# ВНУТРЕННЯЯ ИЗОЛЯЦИЯ

- **Внутренней изоляцией** называются части изоляционной конструкции, не имеющие прямых контактов с атмосферным воздухом. Здесь изолирующей средой являются жидкие, твердые, газообразные диэлектрики или их комбинации, (сюда относятся: изоляция обмоток трансформаторов и электрических машин, изоляция кабелей, конденсаторов, герметизированная изоляция вводов и др.)

## ОСОБЕННОСТИ ВНУТРЕННЕЙ ИЗОЛЯЦИИ.

- Электрическая прочность внутренней изоляции практически не зависит от атмосферных и климатических условий, поскольку не имеет непосредственного контакта с атмосферным воздухом.
- **Внутренняя изоляция подвержена старению.** (Изоляция разрушается из-за протекающих электрохимических реакций, под действием частичных разрядов, при повышении температуры).
- **Пробой** твердой и комбинированной изоляции - явление необратимое, приводящее к выходу из строя электрооборудования

При проектировании изоляционных конструкций электрическая прочность внутренней изоляции должна быть больше внешней. Должно выполняться соотношение:

$$U_{пр} \approx 1,6 U_{пер}, \quad \text{где}$$

$U_{пр}$  – пробивное напряжение внутренней изоляции

$U_{пер}$  – напряжение перекрытия внешней изоляции.



# ВИДЫ ВНУТРЕННЕЙ ИЗОЛЯЦИИ

В установках высокого напряжения и оборудования энергосистем используется несколько видов внутренней изоляции. Наиболее широкое распространение получили:

1. Бумажно-пропитанная (бумажно-масляная),
2. Маслобарьерная изоляция,
3. Изоляция на основе слюды,
4. Пластмассовая изоляция
5. Газовая изоляция

# БУМАЖНО-ПРОПИТАННАЯ ИЗОЛЯЦИЯ (БПИ).

- Исходными материалами служат специальные электроизоляционные бумаги и минеральные (нефтяные) масла или синтетические жидкие диэлектрики.
- БПИ применяется в секциях силовых конденсаторов, в высоковольтных вводах (проходных изоляторах), силовых кабелях, в изоляции трансформаторов.
- После намотки бумаги изоляция подвергается вакуумной сушке при температуре 100-120 °С. Затем под вакуумом производится пропитка бумаги тщательно дегазированным маслом.



Намотка бумаги на трубу



Термовакuumная сушка



Сборка ввода с БМИ



Вакуумная обработка.  
Заливка и пропитка маслом

## Бумажно-маслянный ввод



Внутренняя бумажно-масляная изоляция является основной конструктивной частью ввода.

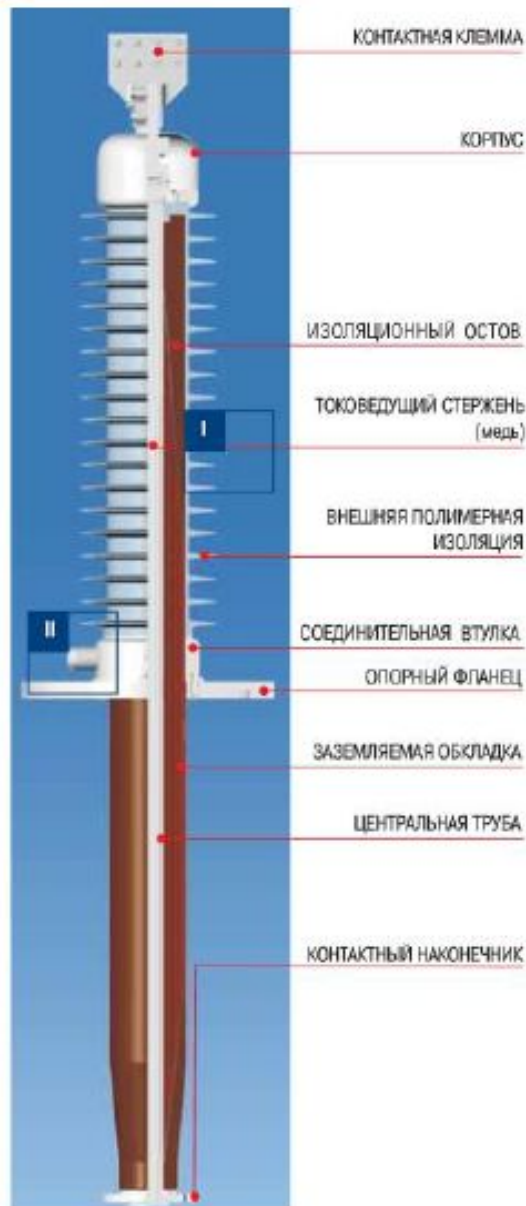
Представляет собой размещенный в масле изоляционный остов, который формируется намоткой на центральную или намоточную трубу электроизоляционной бумаги с разделением на слои проводящими уравнивающими обкладками.

## Бумажно-маслянный ввод



Ввод 1150 кВ без верхнего и нижнего экранов

### Вводы с RIP-изоляцией



Не содержат масла и могут устанавливаться под любым углом.

В качестве внешней изоляции помимо традиционной фарфоровой покрышки по желанию заказчика может устанавливаться изолятор из силиконовой резины, что обеспечивает высокую ударпрочность и сейсмостойкость.

**RIP-изоляция** (*resin impregnated paper* - бумага пропитанная смолой) – изоляционный материал, полученный на основе высушенной в вакууме и пропитанной эпоксидной смолой бумаги.

Применяется в электротехнических установках среднего и высокого напряжения.

*Твердая RIP-изоляция - это бумажный остов из электроизоляционной бумаги и пропитанный специальным эпоксидным компаундом под вакуумом намотанный на проводник из алюминия или меди.*

*В процессе намотки в остов закладываются уравнивающие обкладки для выравнивания электрического поля.*

*Пропитка под вакуумом полностью исключает наличие газовых включений в остове, что позволяет получить высокие изоляционные характеристики RIP-изоляции.*

Отличительными особенностями RIP изоляции по сравнению с изоляцией RBP являются небольшие диэлектрические потери (0,25-0,45) и низкий уровень частичных разрядов. **Это позволяет считать RIP изоляцию лучшей внутренней изоляцией для трансформаторных вводов на сегодняшний день.**

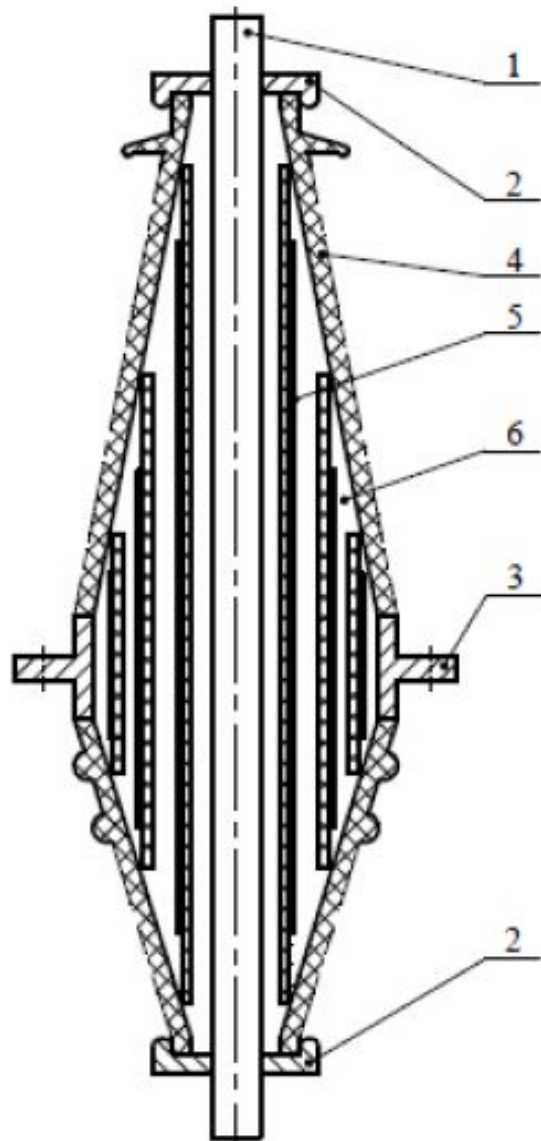
# МАСЛО-БАРЬЕРНАЯ ИЗОЛЯЦИЯ (МБИ).

- Основу этой изоляции составляет трансформаторное масло. Оно обеспечивает хорошее охлаждение конструкции за счет самопроизвольной или принудительной циркуляции.
- В состав МБИ входят и твердые диэлектрические материалы – электрокартон, кабельная бумага и др. Из электрокартона выполняют барьеры а слоями кабельной бумаги покрывают электроды. Электроды сложной формы покрывают тонким слоем полимерного материала.
- Барьеры повышают электрическую прочность МБИ на 30-50%, разделяя изоляционный промежуток на ряд узких каналов, они ограничивают количество примесных частиц, которые могут приближаться к электродам и участвовать в инициировании разрядного процесса.



- Технология изготовления МБИ включает сборку конструкции, сушку ее под вакуумом при температуре 100-120°C и заполнение (пропитку) под вакуумом дегазированным маслом.
- К достоинствам МБИ относятся сравнительная простота конструкции и технологии ее изготовления, интенсивное охлаждение активных частей оборудования (обмоток, магнитопроводов), а также возможность восстановления качества изоляции в эксплуатации путем сушки конструкции и замены масла.
- Недостатками МБИ являются меньшая, чем у бумажно-масляной изоляции электрическая прочность, пожаро- и взрывоопасность конструкции, необходимость специальной защиты от увлажнения в процессе эксплуатации.
- МБИ используется в качестве главной изоляции в силовых трансформаторах с номинальными напряжениями от 10 до 1150 кВ, в автотрансформаторах и реакторах высших классов напряжения.

## Маслобарьерный ввод



Конструктивная схема  
маслобарьерного ввода:

- 1 — токопровод (стержень),
- 2 — высоковольтный фланец,
- 3 — заземленный фланец,
- 4 — фарфоровая рубашка,
- 5 — барьеры с обкладками,
- 6 — масло

Электрическое поле выравнивается  
металлическими обкладками  
(фольга на барьерах).

В результате  $U_{пр}$  повышается в ~ 2,5 раза.

# ИЗОЛЯЦИЯ НА ОСНОВЕ СЛЮДЫ

- Слюда имеет очень высокую электрическую прочность (до 1000 кВ/мм), обладает стойкостью к воздействию частичных разрядов и высокой нагревостойкостью.
- Благодаря этим свойствам, слюда является незаменимым материалом для **изоляции статорных обмоток крупных вращающихся машин.**
- Основными исходными материалами служат микалента или стеклослюдинитовая лента.

# КОНСТРУКЦИЯ ИЗОЛЯЦИИ СТАТОРНОЙ ОБМОТКИ СОВРЕМЕННЫХ ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН

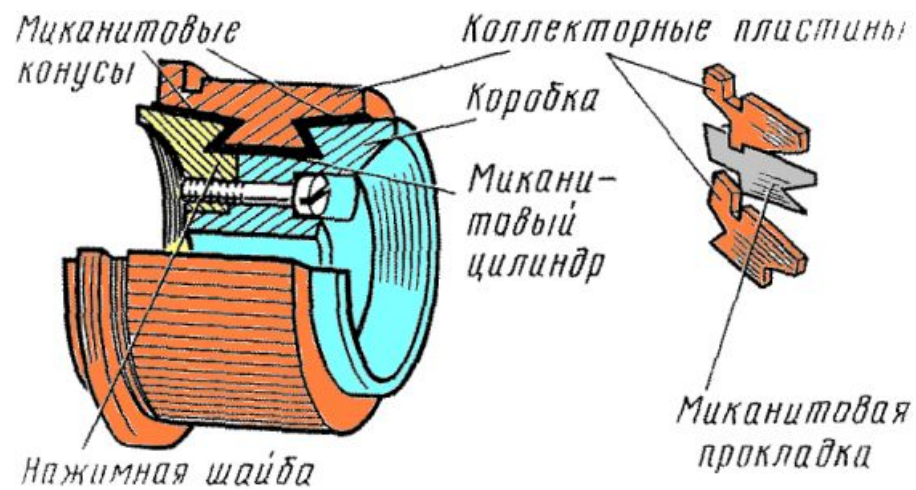
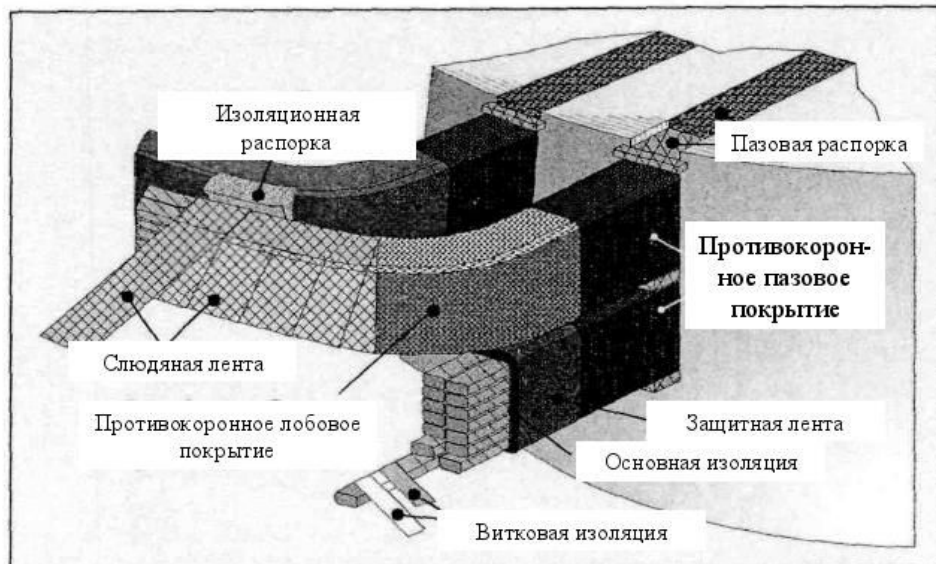
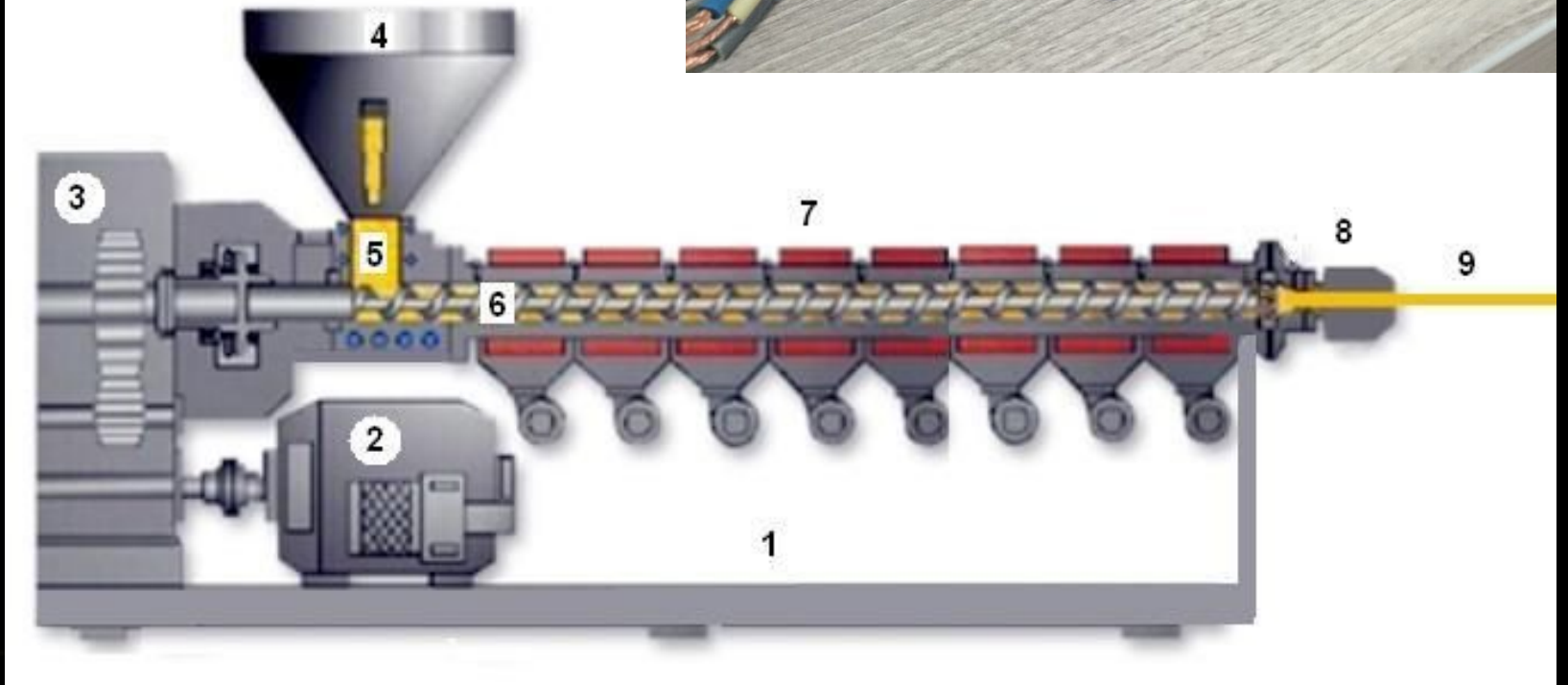


Рис. 18. Коллектор тягового двигателя

# ПЛАСТМАССОВАЯ ИЗОЛЯЦИЯ

- Пластмассовая изоляция в промышленных масштабах используется в изоляции проводов и кабелей, в том числе и силовых на напряжения до 220 кВ.
- Основным диэлектрическим материалом в этих случаях является полиэтилен и поливинилхлорид и др.



# ГАЗОВАЯ ИЗОЛЯЦИЯ.

- Для выполнения газовой изоляции в высоковольтных конструкциях используется элегаз.
- Электрическая прочность элегаза в нормальных условиях примерно в 2,5 раза выше прочности воздуха (89 кВ/см).
- При увеличении давления электрическая прочность элегаза возрастает почти пропорционально давлению и может быть выше прочности жидких и некоторых твердых диэлектриков.
- Элегаз используется в выключателях, кабелях и герметизированных распределительных устройствах (ГРУ) на напряжения 110 кВ и выше и является весьма перспективным изоляционным материалом.

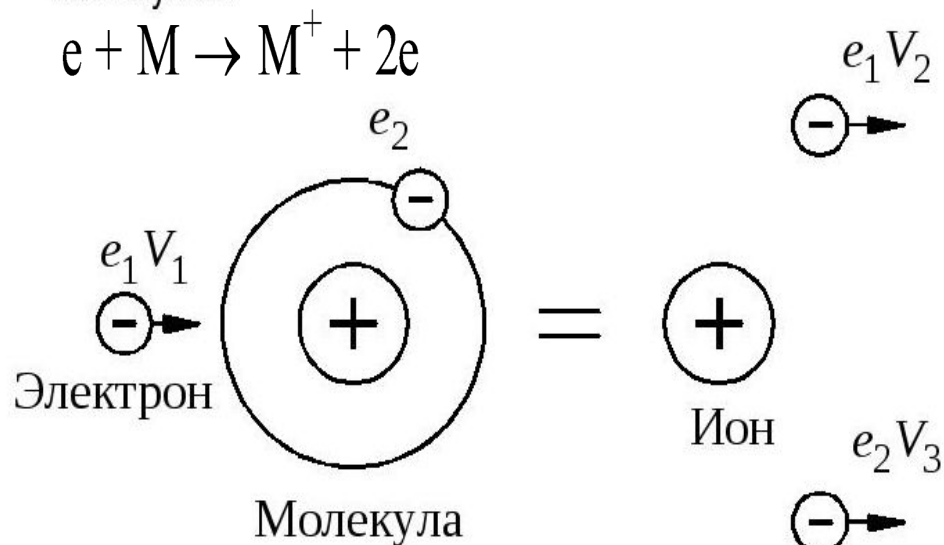
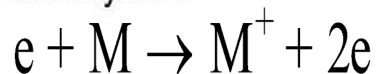
# ПРОЦЕССЫ, ПРОИСХОДЯЩИЕ ПРИ ПРОБОЕ ГАЗА

---



# УДАРНАЯ ИОНИЗАЦИЯ

- **Ударная ионизация** – образование иона при соударении электрона с нейтральными атомом или молекулой.



Если в газе между двумя электродами появляется свободный электрон, то, набирая энергию при движении к аноду, согласно условию

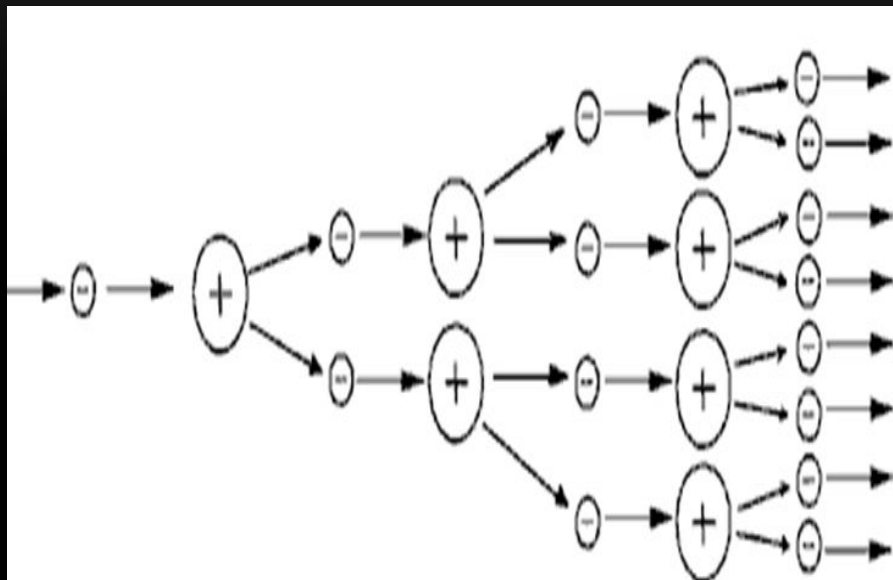
$$W_E = eE\lambda$$

он может ионизировать атом или молекулу газа при столкновении.

Происходит при энергии электрона, большей  $W_u$ .

Газ	O2	N2	CO2	SF6	H2
$W_u$ , эВ	12,5	15,8	14,4	19,3	15,4

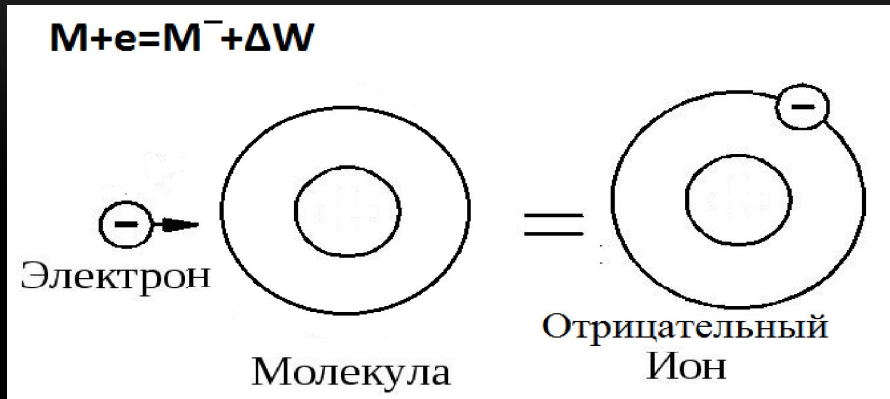
# ФОРМИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОННЫХ ЛАВИН



## ***ЛАВИНА ЭЛЕКТРОНОВ***

- Интенсивность размножения электронов в лавине характеризуется ***коэффициентом ударной ионизации  $\alpha$***  который равен числу ионизаций, производимых электроном на единице длины пути в по направлению электрического поля.

# ЗАХВАТ ЭЛЕКТРОНА



- Коэффициент захвата элегаза равен 120 1/см

$\Delta W$  - энергия, освобождающаяся при захвате, равная энергии связи электрона с молекулой.

$\eta = \frac{1}{L_3}$  - коэффициент захвата,

где  $L_3$  - средняя длина пробега электрона до его захвата.

Коэффициент захвата показывает долю захваченных электронов от общего количества на единичном пути. В основном зависит от вида газа.

- Процессы ударной ионизации могут носить лавинообразный характер при условии

$$\alpha_{\text{эф}} = \alpha - \eta > 0$$

$\alpha_{\text{эф}}$  - Эффективный коэффициент ионизации

- Количество электронов, которое образуется в лавине длиной  $x$  можно определить

$$N = e^{\alpha_{\text{эф}} x}$$

# ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ В ГАЗАХ

## ФОТОИОНИЗАЦИЯ

- **Фотоионизация** - это ионизация в результате поглощения молекулой квантов лучистой энергии, т.е. фотонов.
- Энергия фотона выражается формулой  $w=h\nu$ , где  $\nu$  - частота излучения;  $h$ - постоянная Планка.

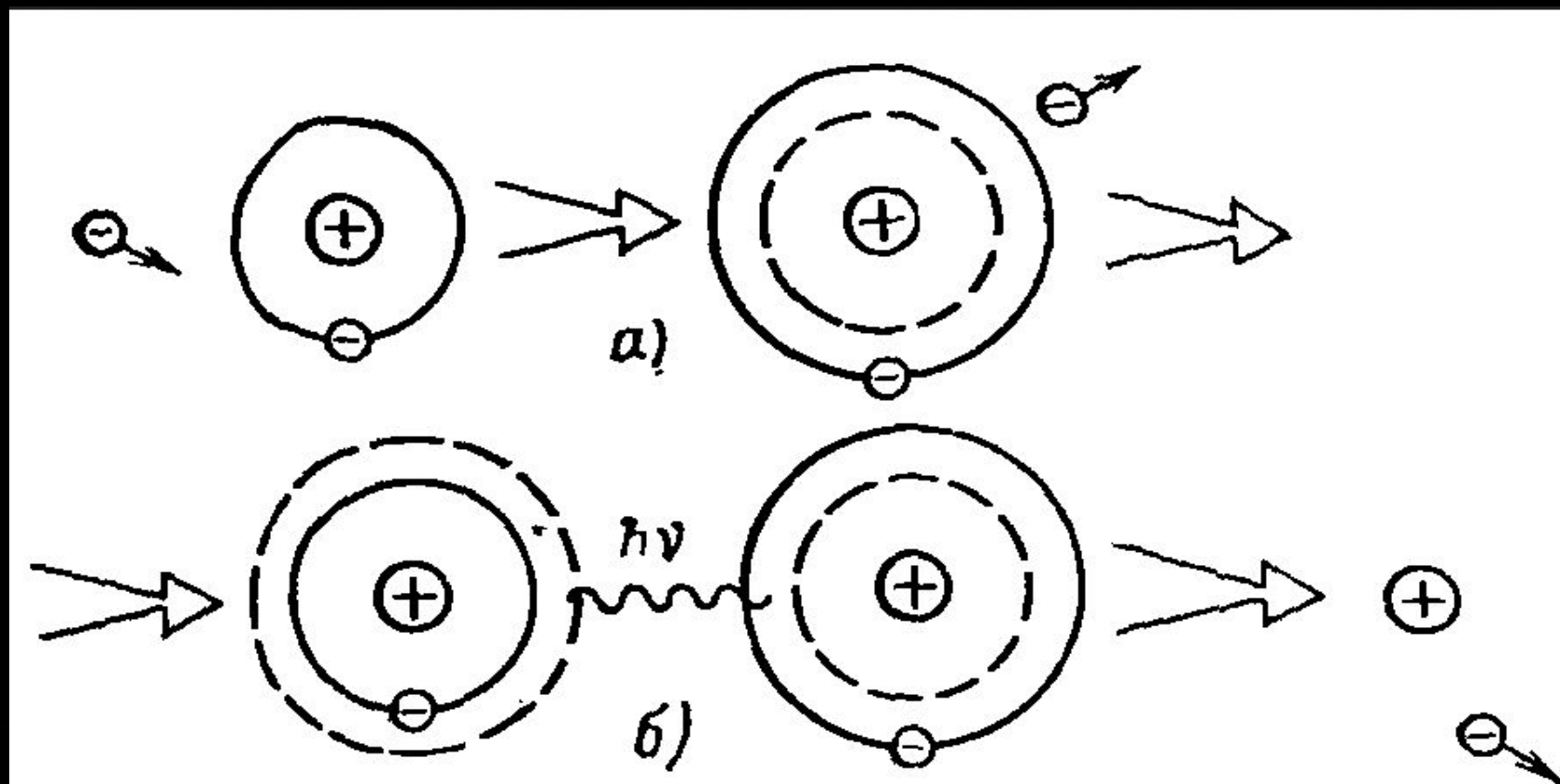
Тогда условие ионизации выражается формулой

$$h\nu_{\text{и}} \geq U_{\text{и}}$$

- В газовом разряде источником фотонов, способных к ионизации, служат не только внешние излучатели, но и сами молекулы, участвующие в газовом разряде.
- Процесс ионизации вторичными фотонами играет решающую роль в формировании искрового разряда.

- .

- Электрон в результате соударения возбуждает молекулу, при возвращении электрона на устойчивую орбиту излучается фотон, ионизирующий другую возбужденную молекулу.



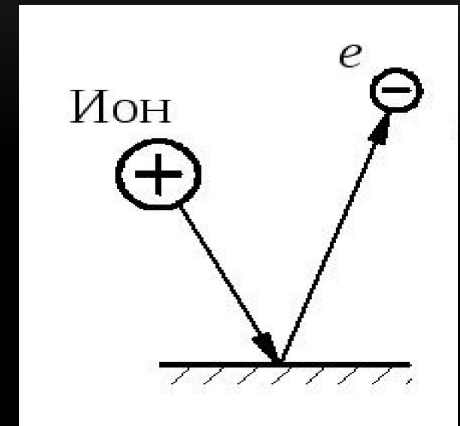
## ПРИЭЛЕКТРОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ ВТОРИЧНАЯ ИОНИЗАЦИЯ НА КАТОДЕ.

- Для многих видов разряда пробой всего промежутка возможен только в том случае, если кроме ионизации в объеме газа, имеет место и так называемая **вторичная ионизация на катоде**, обеспечивающая воспроизводство заряженных частиц в связи с их уходом из промежутка.
- Процессы освобождения электронов с катода под действием других частиц, появившихся в результате ударной ионизации (ионов, возбужденных атомов, фотонов) называют процессами **вторичной ионизации на катоде**.
- Определяется работой выхода электрона из металла.

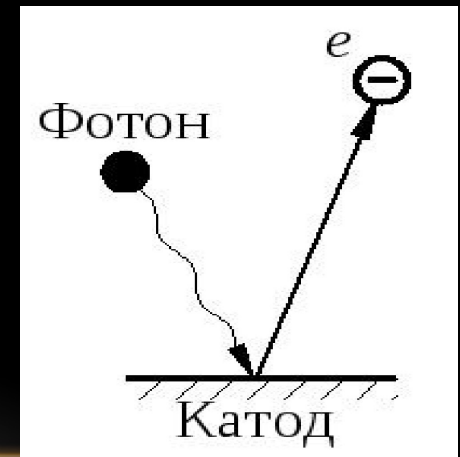
Me	Cu	Ni	W	Al
$W_{\text{вых}}, \text{эВ}$	4,4÷5,24	5,03	4,5	2,5÷2,8

## ПРОЦЕССЫ ВТОРИЧНОЙ ИОНИЗАЦИИ НА КАТОДЕ:

а) Выбивание электронов под действием бомбардировки поверхности катода положительными ионами, ускоренными в электрическом поле. (ион-электронная эмиссия)



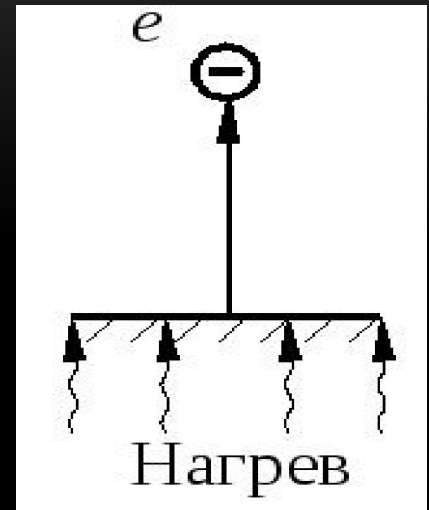
б) Поверхностная фотоионизация (фотоэлектронная эмиссия). Происходит при падении на поверхность катода фотонов достаточно высокой энергии;



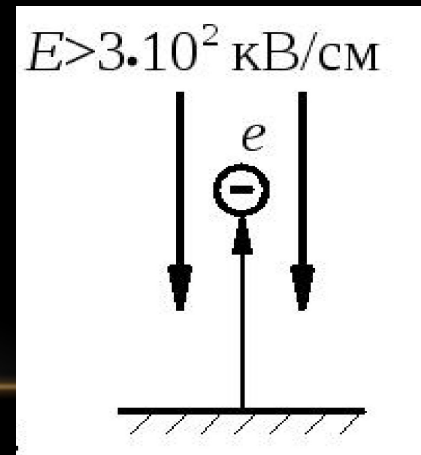


## ТАКЖЕ НА ЭЛЕКТРОДАХ МОЖЕТ ВОЗНИКАТЬ:

в) **Термическая эмиссия** электронов из катода – это эмиссия, при которой свободные электроны в металле за счет его нагрева приобретают энергию, достаточную для преодоления поверхностного потенциального барьера;



г) **Автоэлектронная эмиссия** (холодная эмиссия) заключается в том, что электроны под действием сил электрического поля вырываются из катода. Автоэлектронная эмиссия происходит при напряженностях поля вблизи катода  $10^6$  В/см.



# ВТОРИЧНАЯ ИОНИЗАЦИЯ. КОЭФФИЦИЕНТ ВТОРИЧНОЙ ИОНИЗАЦИИ

- Фотоионизация в объеме газа и на катоде, а также освобождение электронов при бомбардировке катода положительными ионами происходят как следствие ударной ионизации и называются процессами вторичной ионизации. Соответственно, появившиеся в результате этих процессов электроны называются вторичными.
- Число вторичных электронов пропорционально числу актов ударной ионизации. **Коэффициент пропорциональности  $\Upsilon$  называется коэффициентом вторичной ионизации.** Значение  $\Upsilon$  зависит от природы и давления газа, материала катода и напряженности электрического поля, а также оттого, какой процесс вторичной ионизации превалирует.

# ТЕРМОИОНИЗАЦИЯ

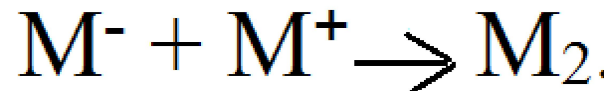
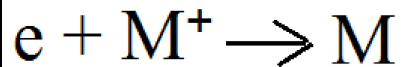
- При достаточно высокой температуре электроны и молекулы могут приобрести энергию достаточную для ионизации.
- Величина этой кинетической энергии определяется для молекулы выражением
- $W = \frac{3}{2} kT$ ,
- где  $W$  – кинетическая энергия теплового движения для молекулы;  $k$  – постоянная Больцмана;  $T$  – температура.
- Процесс термоионизации играет определяющую роль в столбе электрической дуги, температура которого составляет от 4000 до 15000 К.

# ДИССОЦИАЦИЯ МОЛЕКУЛ

- Еще одним видом неупругого столкновения электронов с молекулами газа является столкновение приводящее к диссоциации молекулы, при котором молекула распадается на отдельные атомы или группы атомов. В общем виде эта реакция записывается как
  - $e + M_2 \rightarrow M + M + e.$
- Этот процесс имеет большое значение как для развития разряда, так и при технологическом использовании электрических разрядов, когда в разряде получают частицы определенного сорта.
- Энергии диссоциации молекул обычно выше энергии электронного возбуждения и ниже энергии ионизации молекулы. При столкновении электронов с молекулой с ее диссоциацией электрон теряет энергию, что препятствует его участию в ионизации и затрудняет развитие разряда, но продукты диссоциации могут принимать участие в цепочке последующих реакций, включая химические превращения, на которых и основывается электротехнология.

# РЕКОМБИНАЦИЯ

- Рекомбинация - Взаимная нейтрализация положительных и отрицательных частиц.
- Помимо ионизации, при которой возникают новые электроны и ионы, в ионизованном газе идет обратный процесс - воссоединение заряженных частиц при их столкновениях с образованием нейтральных молекул.



# САМОСТОЯТЕЛЬНЫЙ РАЗРЯД.

- Для образования лавины необходим хотя бы один начальный электрон.
- В том случае, когда начальные электроны непрерывно воссоздаются, лавинный процесс не прекращается.
- Начальные электроны могут создаваться внешними ионизаторами, в этом случае разряд называется несамостоятельным.
- Воссоздание начальных электронов может происходить и за счет ионизационных процессов в самой лавине. В этом случае процесс носит самоподдерживающийся характер, и разряд называется самостоятельным.
- Для того, чтобы разряд стал самостоятельным и мог существовать в отсутствие внешнего ионизатора, необходимо, чтобы в результате развития первоначальной лавины появлялся по крайней мере один вторичный электрон, способный создать новую лавину. Таким образом, условие самостоятельности разряда можно записать в общем виде как

- 
- где  $L$  - расстояние между электродами.

$$\gamma \cdot \exp\left(\int_0^L \alpha dx\right) \geq 1$$

# МЕХАНИЗМЫ ПРОБОЯ ВОЗДУШНОГО ПРОМЕЖУТКА.

## ЛАВИННЫЙ МЕХАНИЗМ РАЗВИТИЯ ПРОБОЯ

- Происходит при малых расстояниях – меньше 2 см и при низких давлениях, гораздо меньших атмосферного.
- В разреженных газах каждая лавина ведет к нарастанию числа начальных электронов, инициирующих следующую лавину. В результате в каждой последующей лавине возрастает число ионизаций. Этот процесс нарастает по экспоненциальному закону, пока промежуток между электродами не заполнится хорошо проводящей плазмой, состоящей из положительных ионов, оставшихся от предыдущих лавин, и электронов образованных последней лавиной. Таким образом, в разреженных газах разряд носит многолавиновый характер. Из-за высокой разреженности газа основную роль во вторичной ионизации, создающей новые начальные электроны, играет фотоионизация с катода. Поэтому на разрядное напряжение промежутка заметно влияет материал катода, характеризуемый потенциалом поверхностной ионизации.

# СТРИМЕРНЫЙ МЕХАНИЗМ РАЗВИТИЯ ПРОБОЯ

- Происходит при больших расстояниях и больших давлениях. Такой пробой сопровождается ростом стримера. Начало образования стримера происходит после образования первичной лавины. Заряд первичной лавины сильно искажает исходную картину электрического поля, и последующие лавины образуются рядом с первичной.
- **Стримером называется** токопроводящий канал, состоящий из положительных ионов и электронов, движущихся через этот канал. Диаметр стримера примерно равен доли миллиметра. Этот канал испускает большое количество фотонов (светится) и выглядит в виде искры. Скорость удлинения стримера на порядок больше скорости движения электронов – примерно  $10^8 \div 10^9$  см/с. Такая скорость вызвана тем, что стример удлиняется в основном за счёт фотоионизации.
- При достижении стримером противоположного электрода появляется канал пробоя. Разряд может перейти в стадию дугового разряда, если мощность источника напряжения позволяет получить токи больше  $1 \div 100$  А. Такой механизм справедлив для однородного поля и расстояния менее 1 м.
- Т.е. при больших расстояниях, в плотных газах разряд протекает в однолавиновой форме, переходящей в стримерную. Основную роль в образовании вторичных лавин играет фотоионизация в объеме газа.



- а) Начальная лавина оставляет положительный объемный заряд
- б) За счет излучения начальной лавины появляются вторичные электроны, порождающие вторичные лавины.
- в) Эти лавины втягиваются в облако положительного объемного заряда. Образуется плазменный канал - стример
- г) Канал стримера является проводящим, имеет избыточный положительный заряд и представляет собой как бы выступ на поверхности анода. Сильно искажая электрическое поле, что способствует появлению новых вторичных лавин.
- д) Канал стримера удлиняется, стример перекрывает весь промежуток и происходит пробой.

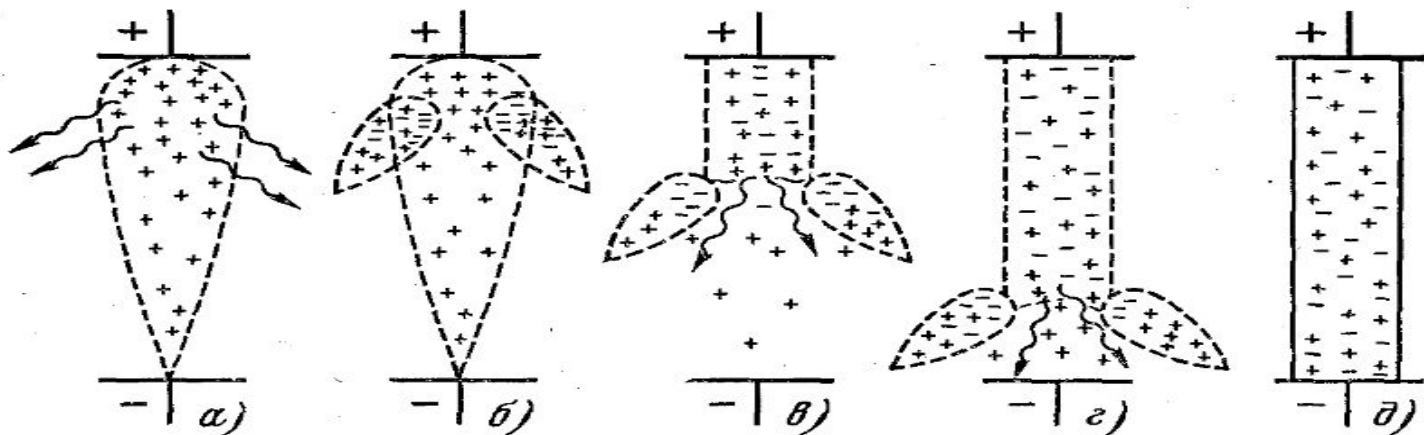


Рис. 2-7. Возникновение и развитие анодного стримера.

# МЕТОДЫ РЕГУЛИРОВАНИЯ ЭЛ. ПОЛЯ

---

Коэффициент неоднородности поля

- **Регулирование электрического поля** заключается в уменьшении напряженности поля в местах с повышенной неоднородностью.
- **Коэффициент неоднородности электрического поля**  $k_n$  - отношение максимального значения напряженности электрического поля в изоляционном промежутке к среднему значению напряженности электрического поля:

- $$K_n = \frac{E_{\max}}{E_{\text{ср}}}$$

## Выравнивать электрическое поле можно

### 1. Изменяя геометрию конструкции:

Подбор радиусов кривизны, скругление острых кромок, применение расщепленных проводов.

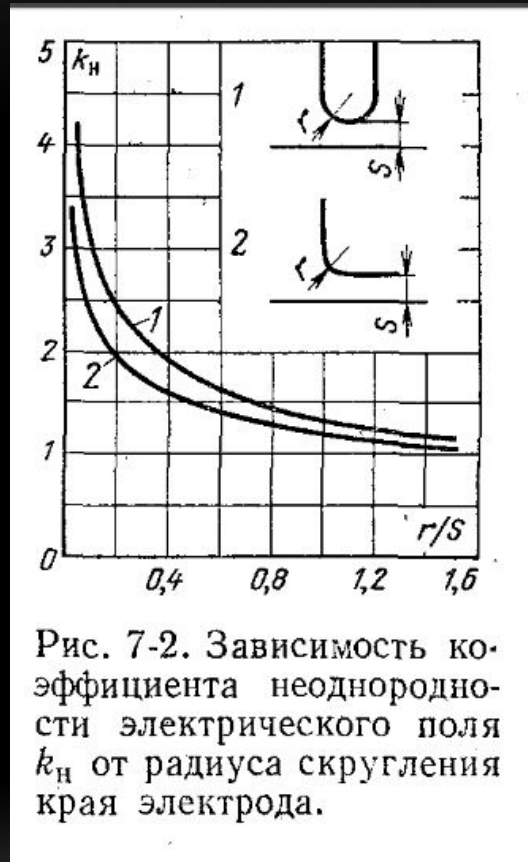
### 2. Повышения активную проводимость отдельных участков изоляции, что приводит к уменьшению падения напряжения на них:

Подбор материалов с различной проводимостью, использование активных делителей напряжения, применение полупроводящих экранов, применение коронирующих электродов.

### 3. Емкостные способы, основанные на увеличении емкости тех участков, где необходимо снизить падение напряжения.

Градирование изоляции по диэлектрической проницаемости, применение внутренних и внешних экранов, использование конденсаторных обкладок, емкостных делителей напряжения.

# СКРУГЛЕНИЕ КРАЕВ ЭЛЕКТРОДОВ, ПОДБОР РАДИУСОВ КРИВИЗНЫ



# ПОЛУПРОВОДЯЩИЕ ПОКРЫТИЯ

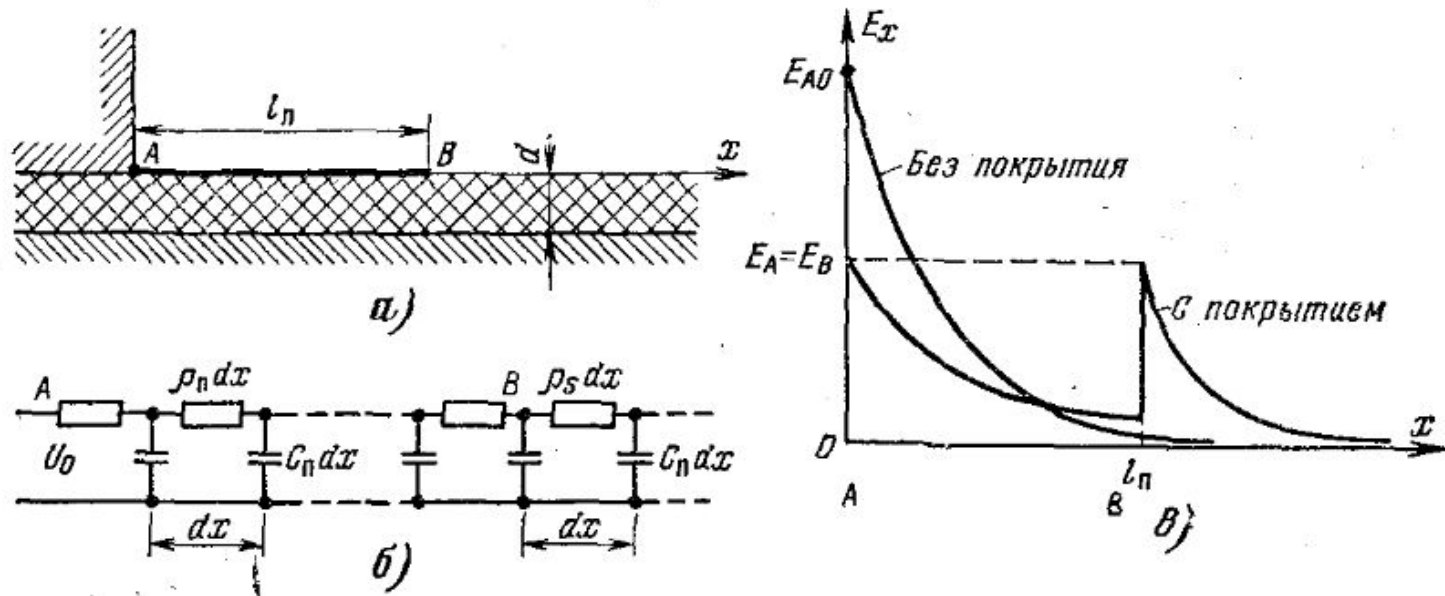


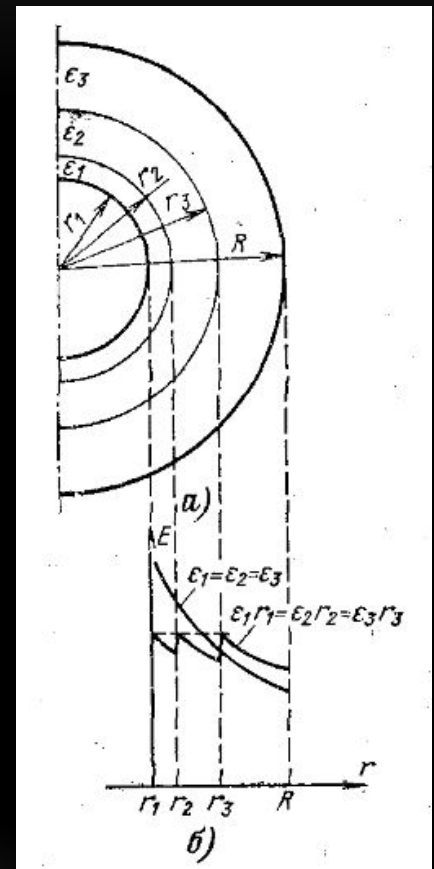
Рис. 7-3. Регулирование электрического поля с помощью полупроводящего покрытия.

а — устройство изоляции (на участке АВ — покрытие); б — схема замещения; в — изменение напряженности  $E_x$  вдоль поверхности твердой изоляции.

# ГРАДИРОВАНИЕ ИЗОЛЯЦИИ

Рис. 7-5. Регулирование электрического поля путем градирования изоляции.

*а* — схема градированной изоляции; *б* — изменение напряженности в изоляции без градирования и при градировании.

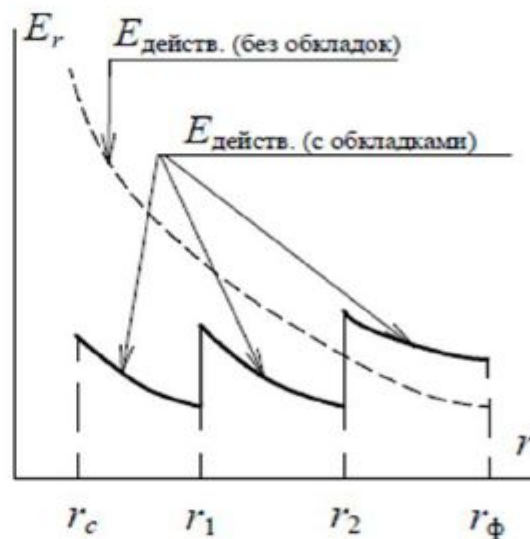
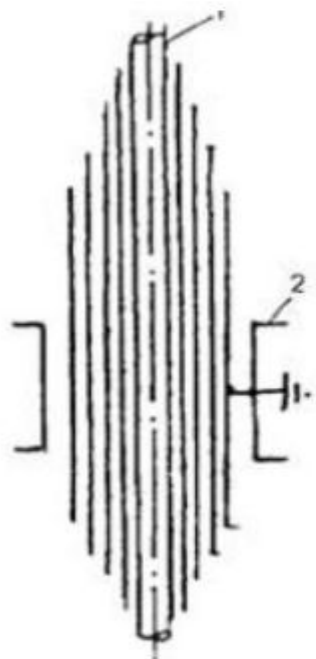


# ПРИМЕНЕНИЕ КОНДЕНСАТОРНЫХ ОБКЛАДОК

Регулирование электрических полей во внутренней изоляции

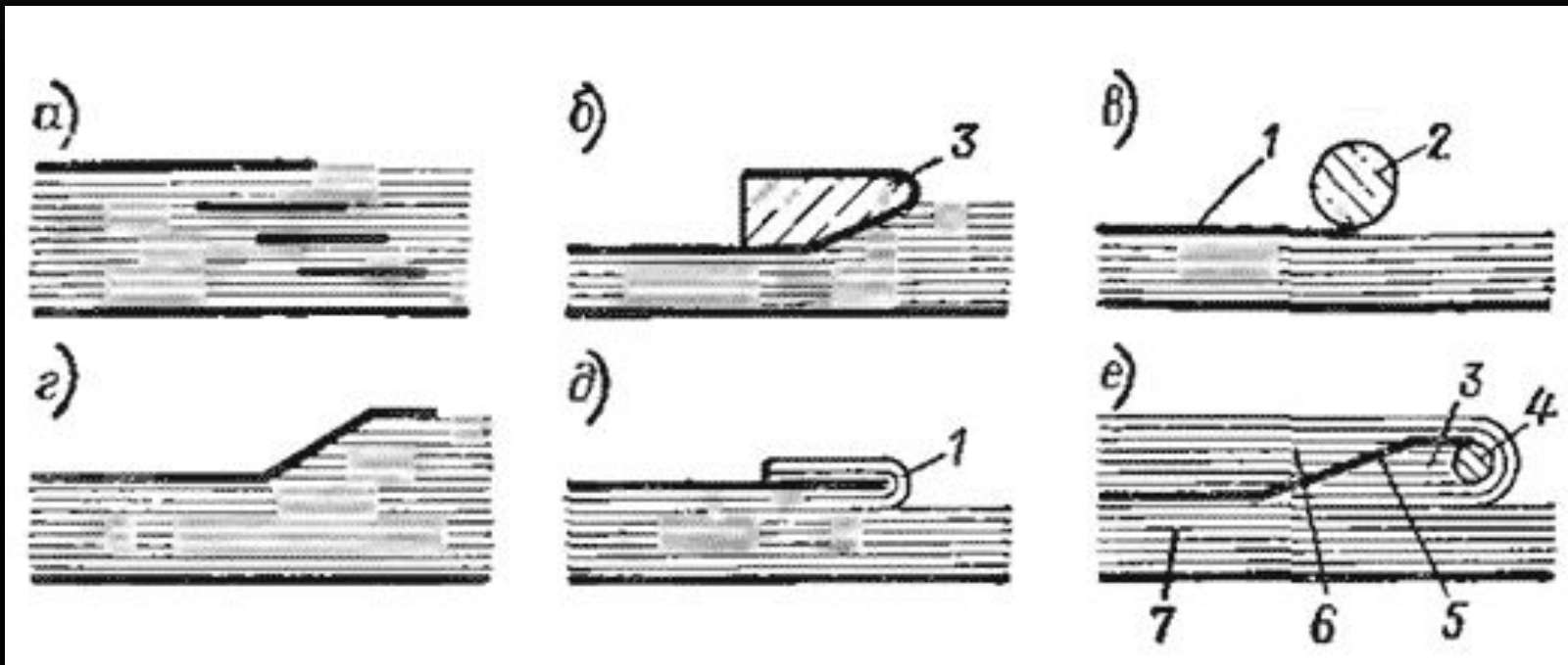
## Применение конденсаторных обкладок

Путем изменения размеров, числа и взаимного расположения конденсаторных обкладок меняется емкость последовательно включенных конденсаторов и **регулируется характер распределения напряжения**



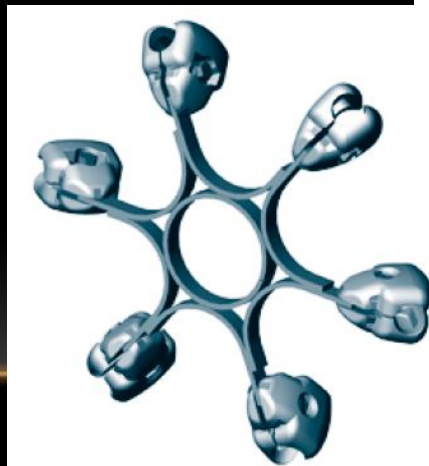
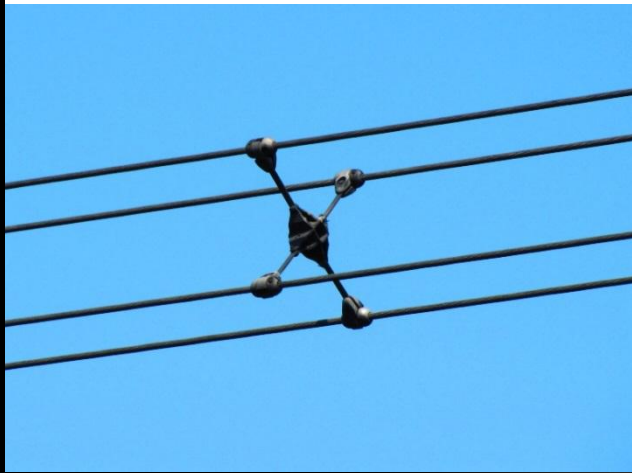
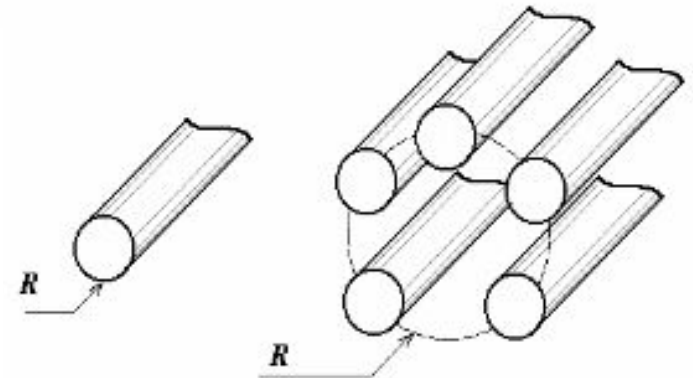


# ЗАВОРАЧИВАНИЕ КРАЯ ОБКЛАДОК



# РАСЩЕПЛЕННЫЕ ПРОВОДА

Расщепление фазы (рис.2.18), то есть применение вместо 1 фазного провода 3÷5 проводов в фазе позволяет увеличить  $R_{\text{эф.фазы}}$  и тем самым погасить развитие короны в ЛЭП на сверхвысокие напряжения. Это уменьшает и потери энергии.



# ЕМКОСТНЫЕ МЕТОДЫ В ГИРЛЯНДЕ ИЗОЛЯТОРОВ

Ёмкостной метод заключается в перераспределении электрического поля по ёмкостям отдельных элементов (частей) ЭИК.

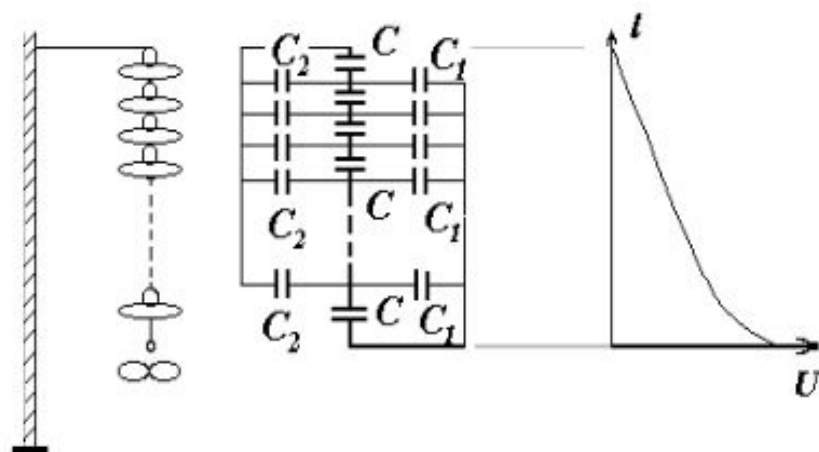


Рис.2.19

В гирлянде подвесных изоляторов (рис.2.19) такое перераспределение поля осуществляется за счёт ёмкости самих изоляторов -  $C$ , ёмкости по отношению к земле -  $C_1$  и ёмкости по отношению к проводу -  $C_2$ .

Так как суммарная ёмкость гирлянды равна  $C_2 = C/n$ , где  $n$  - число эле-

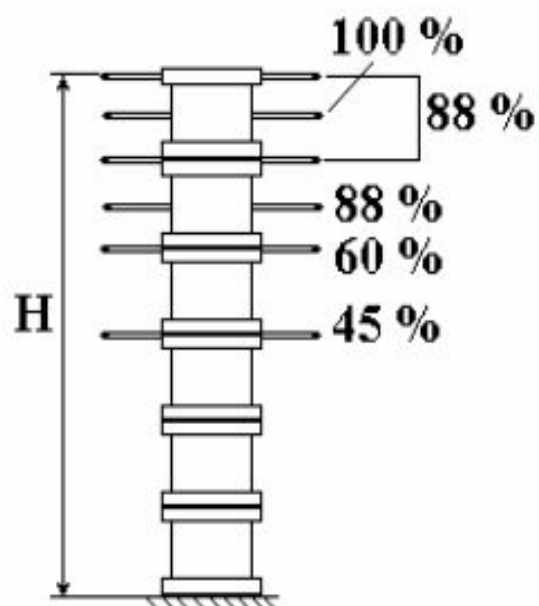
ментов в гирлянде, то  $C_2$  по величине близка к  $C_1$  и  $C_2$ .

Поэтому изменяя ёмкость  $C_1$  и  $C_2$  за счёт специальной арматуры (рогов, колец, восьмёрок), можно изменять характер распределения потенциала по длине гирлянды и тем самым снижать напряжённость поля.



#### 4. Принудительное распределение потенциала

В данном случае для регулирования поля в колонне опорных изоляторов ГИИ и ГИТ используются экраны в виде тороида, на которые принудительно подаётся соответствующий потенциал от самой установки (рис.2.20).



Это приводит к выравниванию поля по длине колонны и повышает напряжение  $E_{кор}$ .

Для тороида:

$$E_{кор} = 1.65m\delta \left(1 + \frac{0.108}{\delta^{0.5} r^{0.38}}\right), \text{ [МВ/м]},$$

где  $r$  – радиус тороида, м.

СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ!