

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования  
«Уфимский государственный авиационный технический университет» (ФГБОУ ВО «УГАТУ»)



# ТЕХНИКА ВЫСОКОГО НАПРЯЖЕНИЯ

## ЛЕКЦИЯ 1

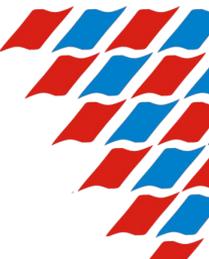
Лобанов Андрей Владимирович





# Введение

Высоковольтное оборудование – это особый вид электрических устройств и механизмов, выполняющих коммутацию, преобразование, а также распределение электроэнергии с высокой величиной напряжения, выше 1000 Вольт.

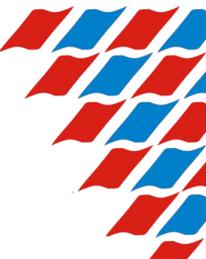




# Введение

***Все высоковольтное оборудование можно разделить на две основные группы:***

1. Источники электроэнергии высокого напряжения. Это всевозможные генераторы электроэнергии, электростанции, работающие по разным принципам (гидро-, а также теплового преобразования).
2. Распределительные подстанции служащие для доставки и распределения напряжения между потребителями, а также изменения его величины. Также этой группе относятся и электрические машины, работающие на напряжении выше 1000 Вольт.

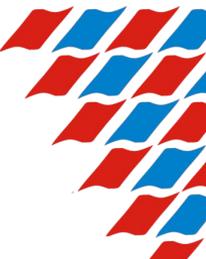


# Введение

## Высоковольтное оборудование подстанций и распределительных устройств

*Перечень самых распространенных его элементов:*

- 1. Трансформаторы.** Служат для понижения или повышения величины переменного напряжения за счет взаимоиндукции. Они не имеют вращающихся частей, кроме, естественно, дополнительной системы их вентиляции, так как при работе возможен их перегрев;

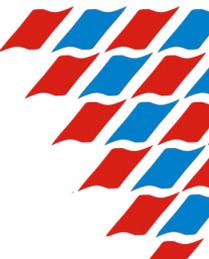
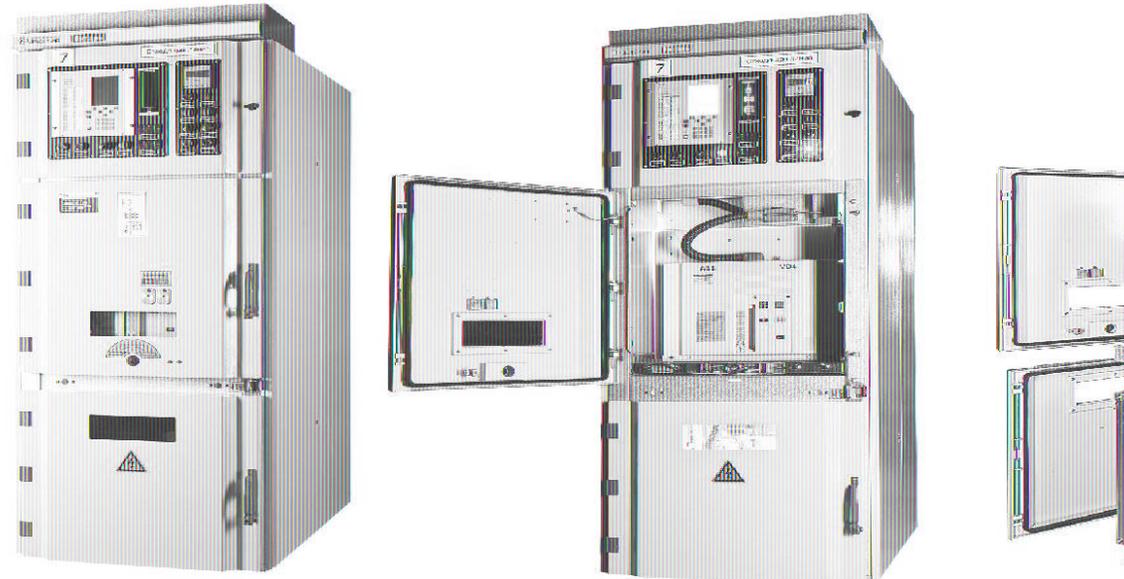


# Введение

## Высоковольтное оборудование подстанций и распределительных устройств

*Перечень самых распространенных его элементов:*

**2. Ячейки КРУ (комплектно распределительные устройства).** Они рассчитаны на определенную величину напряжения и тока, которые нельзя превышать. Выполнены в виде шкафов, соединенных в один ряд. По назначению они бывают вводные, секционные и распределительные, которые непосредственно питают или другие подстанции потребителей или же непосредственно высоковольтные электрические машины.

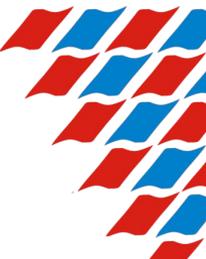
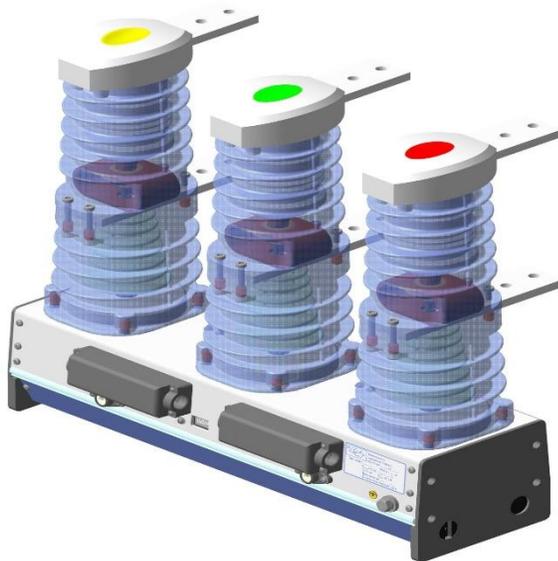


# Введение

## Высоковольтное оборудование подстанций и распределительных устройств

*Перечень самых распространенных его элементов:*

**3. Выключатели.** Они устанавливаются как в ячейках КРУ, так и снаружи на открытых распределительных устройствах (ОРУ). Они могут включать и отключать напряжение даже под нагрузкой. В их цепи заведены всевозможные релейные защиты.

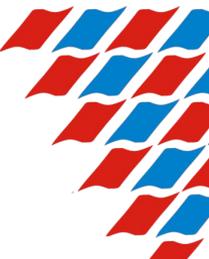


# Введение

## Высоковольтное оборудование подстанций и распределительных устройств

*Перечень самых распространенных его элементов:*

**4.Разъединители.** Предназначены для создания видимого, а значит и надежного разрыва при отключении определенного участка цепи.



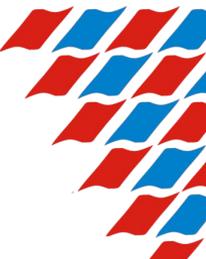


# Введение

## Высоковольтное оборудование подстанций и распределительных устройств

*Перечень самых распространенных его элементов:*

**5.Короткозамыкатели, а также отделители.** Изготовлены и применяются для преднамеренного замыкания высоковольтной линии на землю, для защиты людей и участков цепи от повреждений при пробое опасного напряжения. Устанавливаются только в цепях с заземленной нейтралью.

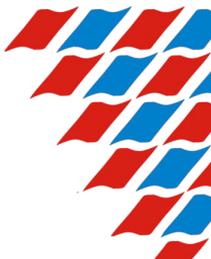


# Введение

## Высоковольтное оборудование подстанций и распределительных устройств

*Перечень самых распространенных его элементов:*

**6.Разрядники.** Они являются устройствами, ограничивающими величину напряжения при атмосферных явлениях (грозы с молниями) и коммутациях.

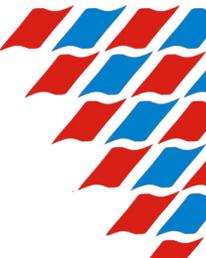


# Введение

## Высоковольтное оборудование подстанций и распределительных устройств

*Перечень самых распространенных его элементов:*

**7.Реакторы.** Может быть дугогасящий, токоограничивающий. В цепях постоянного тока применяются сглаживающие реакторы для снижения пульсации, выпрямленного преобразователем, тока.

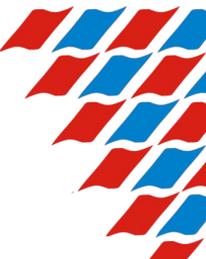


# Разряды в газах, жидкостях и твердых диэлектриках

## Конфигурация электрических полей

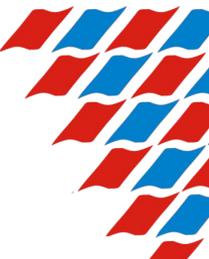
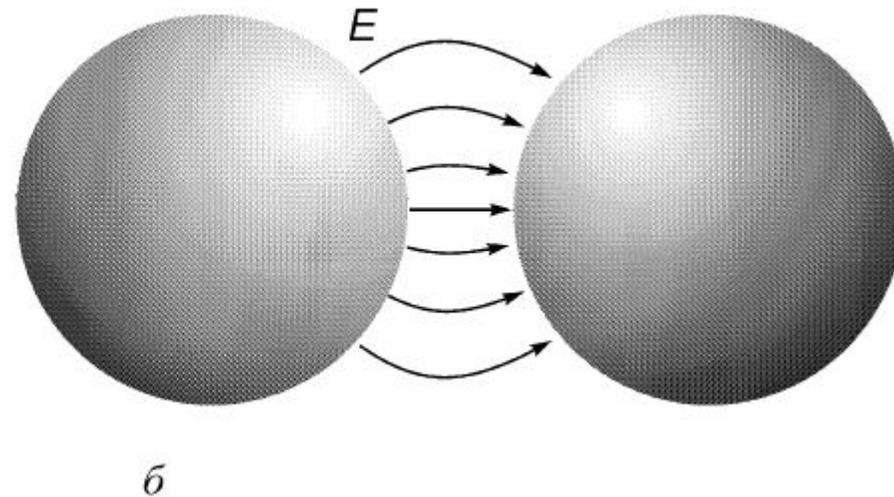
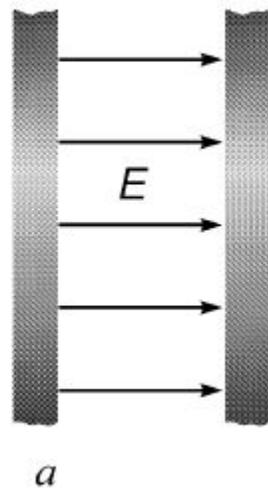
Изолируемые электроды – шины распределительных устройств, провода линий электропередач, наружные токоведущие части электрических аппаратов и т.д.  
Форма электрического поля влияет на ЭЛЕКТРИЧЕСКУЮ ПРОЧНОСТЬ и ПРОБИВНОЕ НАПРЯЖЕНИЕ.

Формы полей	Коэффициент неоднородности поля, Кн
Однородное	1
Слабонеоднородно е	$\leq 3$
Резконеоднородно е	$> 3$



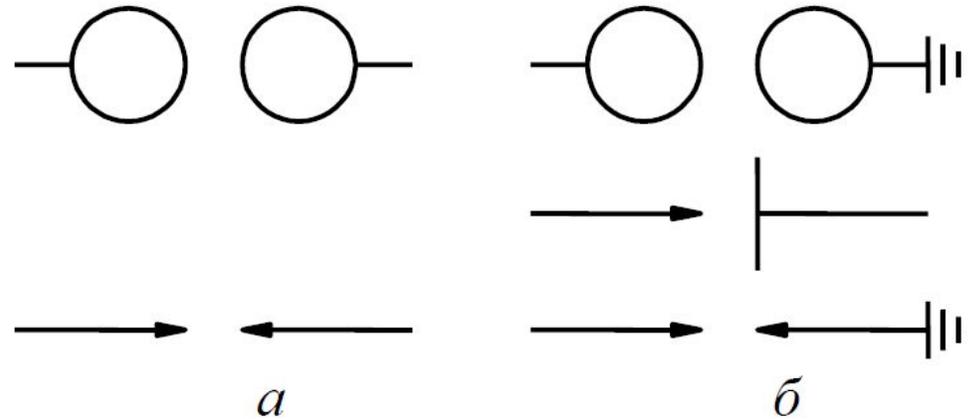
# Разряды в газах, жидкостях и твердых диэлектриках

Конфигурация электрических полей

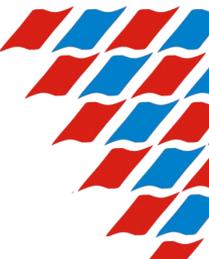


# Разряды в газах, жидкостях и твердых диэлектриках

## Форма электрических полей



*а – симметричная система электродов;  
б – несимметричная система электродов*



# Разряды в газах, жидкостях и твердых диэлектриках

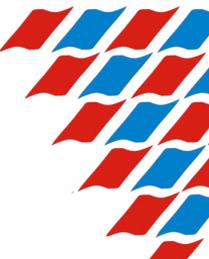
Ионизационные процессы в газе

$$\lambda = \frac{1}{Z}$$

Длина свободного пробега

↔ Концентрация частиц

↔ Давление  
↔ Температура

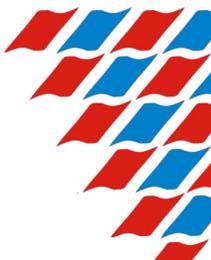


# Разряды в газах, жидкостях и твердых диэлектриках

Процессы возникновения и исчезновения заряженных частиц в газе

1. Считаем электроны частицами и не учитываем волновые свойства
2. Атом называется устойчивым, когда его электроны находятся на наименьших стационарных орбитах.
3. Переход одного или нескольких электронов на более удаленные орбиты называется возбуждением атома ( $10^{-10}$ с). Возвращение в исходное состояние самопроизвольное с излучением фотона.
4. Свободный электрон – это электрон оторвавшийся от атома, поглотившего энергию ионизации. (положительный ион и свободный электрон)

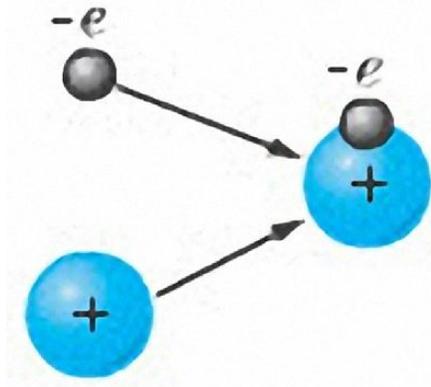
Газ	Минимальная энергия, эВ	
	возбуждения	ионизации
N <sub>2</sub>	6,1	15,5
N	6,3	14,5
O	7,9	12,5
O <sub>2</sub>	9,1	13,6
H <sub>2</sub> O	7,6	12,7



# Разряды в газах, жидкостях и твердых диэлектриках

Процессы возникновения и исчезновения заряженных частиц в газе

ИОНИЗАЦИЯ+РЕКОМБИНАЦИЯ=РАВНОВЕСНОЕ  
СОСТОЯНИЕ



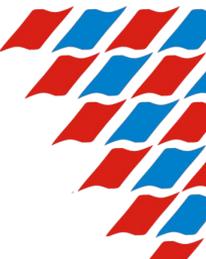
Рекомбинация – процесс взаимной нейтрализации заряженных частиц

$$K_{\text{ион}} = \frac{n_{\text{ион}}}{N_{\Sigma}},$$

где  $K_{\text{ион}}$  – коэффициент степени ионизации газа;

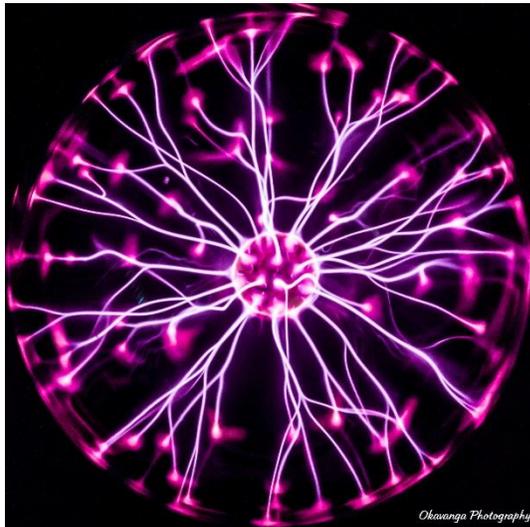
$n_{\text{ион}}$  – концентрация ионизированных частиц;

$N_{\Sigma}$  – общая концентрация частиц ( $N_{\Sigma} \approx 10^{22}$  атомов на  $\text{см}^3$ ).

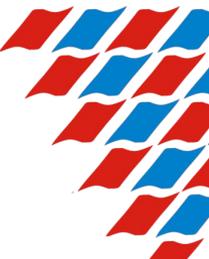


# Разряды в газах, жидкостях и твердых диэлектриках

Процессы возникновения и исчезновения заряженных частиц в газе



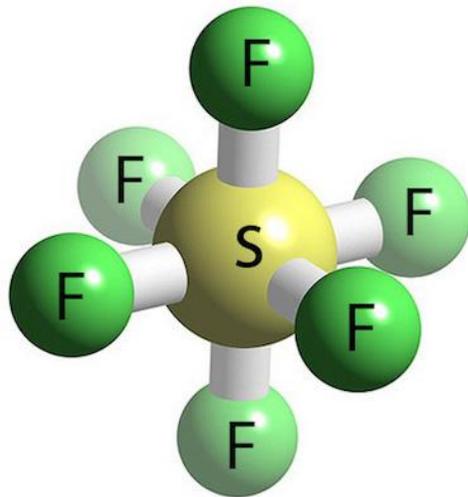
Плазма – форма существования вещества при температуре 5000К, в которой большая часть атомов и молекул ионизирована и концентрация отрицательных и положительных частиц примерно одинакова.



# Разряды в газах, жидкостях и твердых диэлектриках

Процессы возникновения и исчезновения заряженных частиц в газе

Газы в которых возможно образование отрицательных ионов называются  
**ЭЛЕКТРООТРИЦАТЕЛЬНЫМИ**



## Элегаз ( $\text{SF}_6$ )

Бесцветный газ, без запаха, в 5 раз тяжелее воздуха, химически не активен (не горит и не поддерживает горения)

$U_{\text{прSF}_6} \sim 85$  кВ/см

При  $T < 500$  °С не разлагается

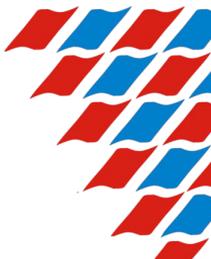
Удельная теплоёмкость в 3,7 раза больше чем у воздуха, при  $T \sim -60$  °С сжижается

Электроотрицательный газ, хороший акустический изолятор ( $V_{\text{зв}} \sim 100$  м/с)

Парниковый эффект в 10000 больше  $\text{CO}_2$

Потенциал глобального потепления

$\text{GWP} = 24\ 900$



# Разряды в газах, жидкостях и твердых диэлектриках

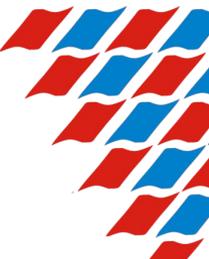
## Виды ионизации

Объёмная ионизация – образование заряженных частиц в объеме газа между электродами

1. Ударная ионизация
2. Ступенчатая ионизация
3. Фотоионизация
4. Термоионизация

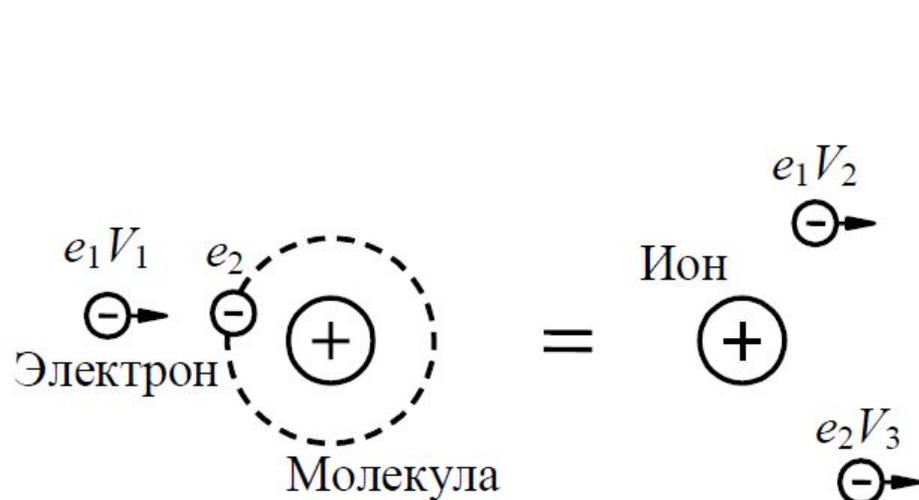
Поверхностная ионизация – излучение заряженных частиц с поверхности электродов

1. Ионизация ионом
2. Ионизация квантом света
3. Термоионизация
4. Автоэлектронная ионизация



# Разряды в газах, жидкостях и твердых диэлектриках

Ударная ионизация- соударение электрона с нейтральным атомом или молекулой

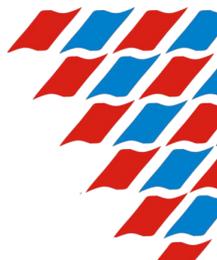


$$\frac{m_{\text{эл}} \cdot V_1^2}{2} \geq W_{\text{И}},$$

где  $m_{\text{эл}}$  – масса электрона;

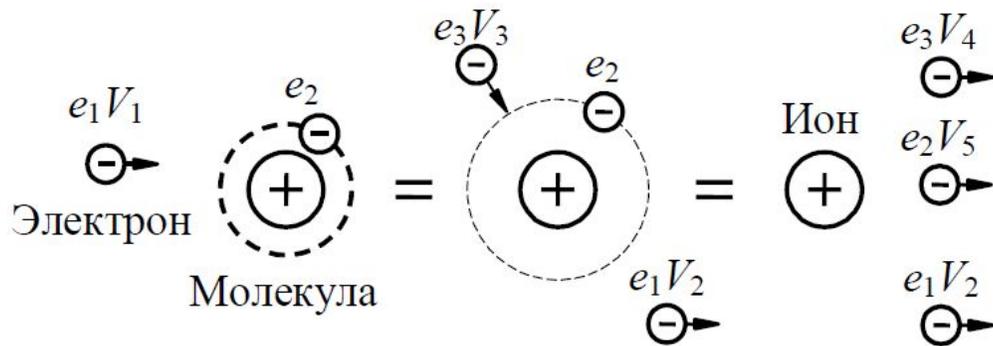
$V_1$  – скорость электрона;

$W_{\text{И}}$  – энергия ионизации молекулы (атома).



# Разряды в газах, жидкостях и твердых диэлектриках

*Ступенчатая ионизация* происходит тогда, когда энергия первого воздействующего на нейтральный атом или молекулу электрона недостаточно для ионизации.

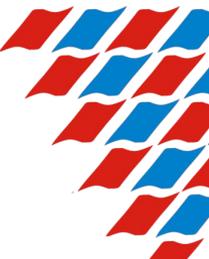


$$\frac{m_{\text{эл}} \cdot V_1^2}{2} + \frac{m_{\text{эл}} \cdot V_3^2}{2} \geq W_{\text{И}},$$

где  $m_{\text{эл}}$  – масса электрона;

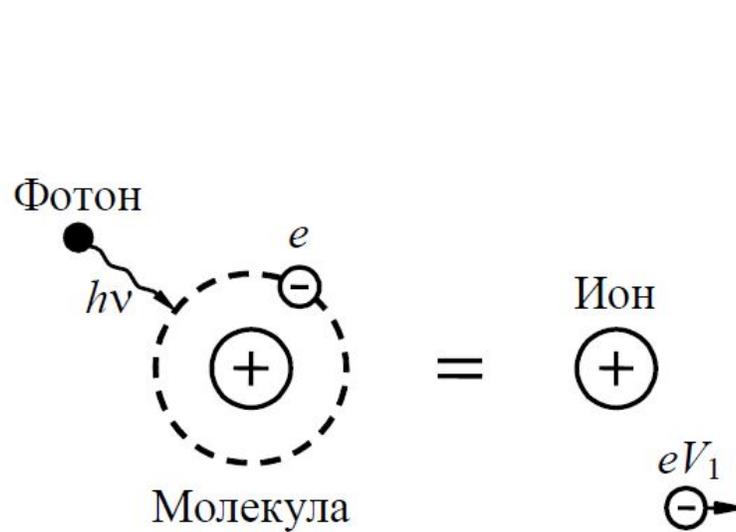
$V_1, V_3$  – скорости электронов;

$W_{\text{И}}$  – энергия ионизации молекулы (атома).



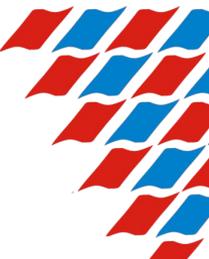
# Разряды в газах, жидкостях и твердых диэлектриках

*Фотоионизации* – соударение фотона с нейтральным атомом или молекулой.



$$h\nu \geq W_{\text{И}},$$

где  $h$  – постоянная Планка;  
 $\nu$  – собственная частота фотона.

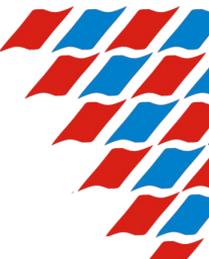




# Разряды в газах, жидкостях и твердых диэлектриках

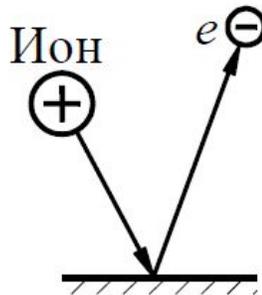
*Термоионизация* обусловлена тепловым состоянием газа и может происходить при:

- 1) освобождения электрона при соударениях между атомами и молекулами при высоких температурах;
- 2) фотоионизации нейтральных атомов и молекул, в результате теплового взаимодействия при высоких температурах;
- 3) ионизации при столкновении электрона с нейтральным атомом или молекулой при высоких температурах.



# Разряды в газах, жидкостях и твердых диэлектриках

Ионизация бомбардировкой поверхности катода положительными ионами  
– вторичная электронная эмиссия

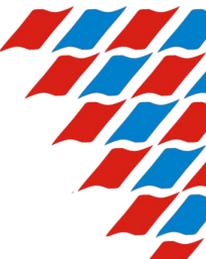


$$\frac{m_{\text{ион}} \cdot V_{\text{ион}}^2}{2} \geq W_{\text{вых}},$$

где  $m_{\text{ион}}$  – масса иона;

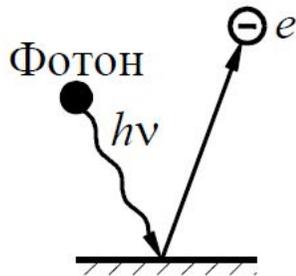
$V_{\text{ион}}$  – скорость иона;

$W_{\text{вых}}$  – энергия выхода электрона;



# Разряды в газах, жидкостях и твердых диэлектриках

Ионизация бомбардировкой поверхности катода фотонами  
- фотоэмиссии (ультрафиолетовый свет, рентгеновское излучение)

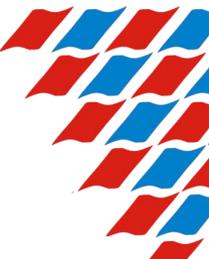


$$h\nu \geq W_{\text{ВЫХ}},$$

где  $h$  – постоянная Планка;

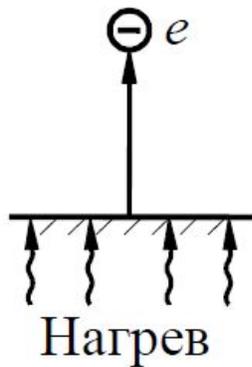
$\nu$  – частота излучения фотона;

$W_{\text{ВЫХ}}$  – энергия выхода электрона;

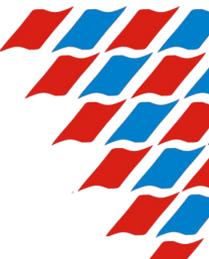
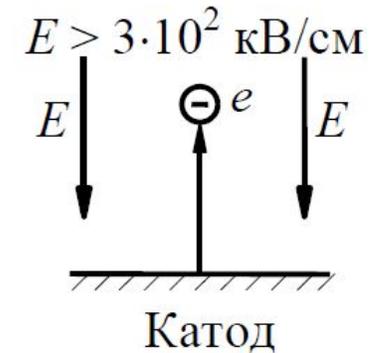


# Разряды в газах, жидкостях и твердых диэлектриках

Нагрева поверхности катода  
– термоэлектронная эмиссия

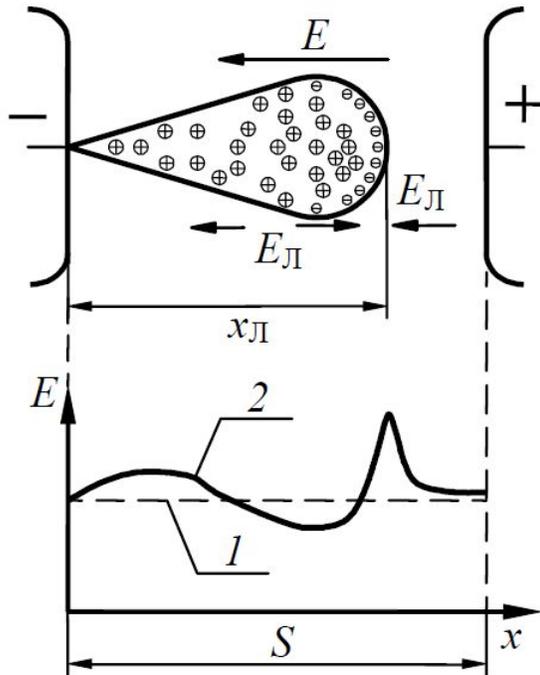


Воздействие на катод внешнего электрического поля  
– автоэлектронная (холодная эмиссия при  $E > 3 \cdot 10^2$  кВ/см.)





# Лавина электронов

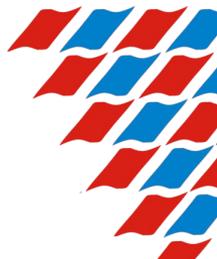


Интенсивность размножения электронов в лавине характеризуется *коэффициентом ударной ионизации  $\alpha$* , равным числу ионизаций, производимых электроном на пути в 1 см по направлению действия электрического поля. Другое название коэффициента ударной ионизации – первый коэффициент Таунсенда.

$$n = n_0 \cdot e^{(\alpha - \eta) \cdot x}.$$

Число электронов в лавине  $n > 10^7$ .

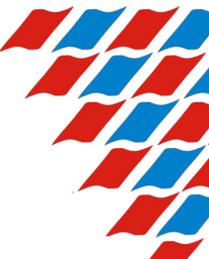
коэффициентом прилипания  $\eta$





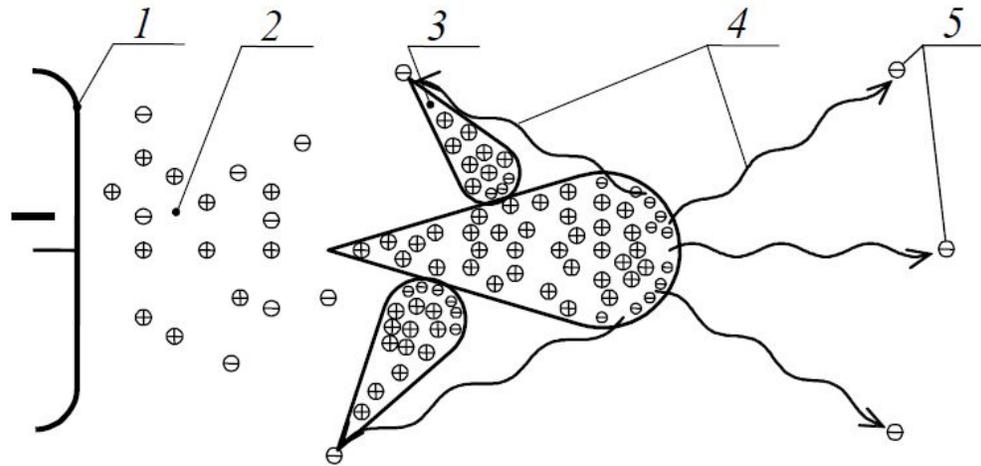
## Условие самостоятельности разряда

После прохождения первой лавины в промежутке лавинный процесс может возобновляться, а может и затухнуть. Для возобновления лавинного процесса нужен хотя бы один *вторичный эффективный электрон*. Если этот электрон получается в результате внешнего ионизатора, разряд называется *несамостоятельным*. Если же вторичный эффективный электрон возникает в результате прохождения первичной лавины, разряд называется *самостоятельным*. Разряд из несамостоятельного может перейти в самостоятельный, если увеличить приложенное к электродам напряжение.



# Образование стримера

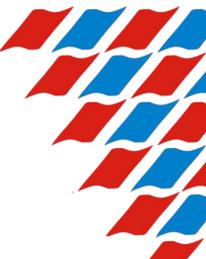
Стример – область с наибольшей плотностью тока, которая, разогреваясь, начинает светиться



- Механизм развития катодного стримера:  
1 – электрод (катод); 2 – канал стримера; 3 – лавины;  
4 – движение фотонов; 5 – электроны за счет фотоионизации

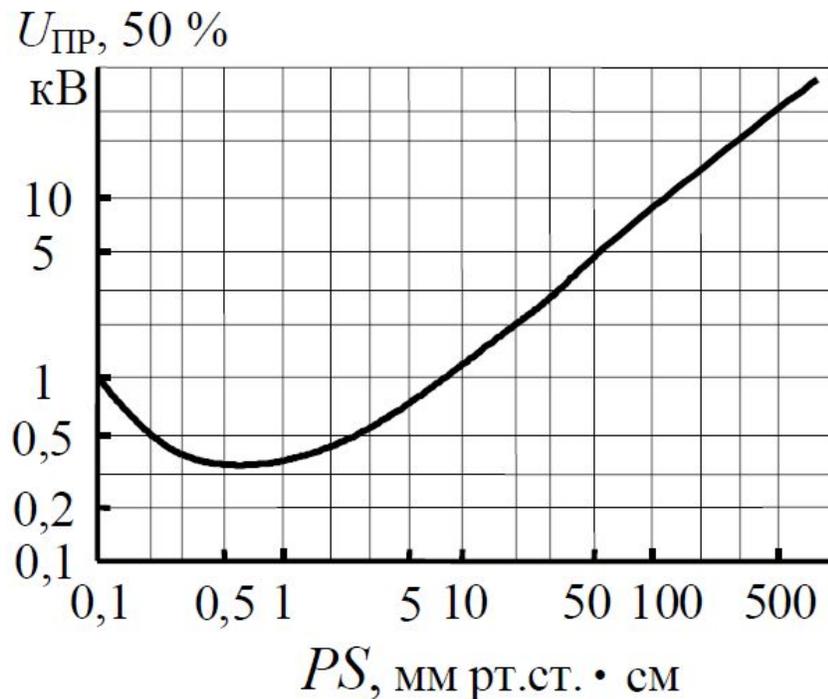
Критерием перехода лавинного разряда в стримерный является критическое число электронов в лавине.

Расчеты показывают, что при числе электронов  $n^{кр} \geq 10^7 - 10^9$  лавина переходит в стример.



# Закон Пашена

$$U_{\text{ПР}} = f(P \cdot S).$$



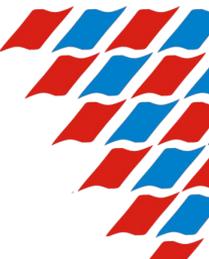
$$U_{\text{ПР}} = f\left(\frac{P \cdot S}{T}\right), \quad \delta = \frac{T_0}{T} \cdot \frac{P}{P_0} = 0,386 \frac{P}{T}, \quad U_{\text{ПР}} = f(\delta \cdot S),$$

$T$  – температура в градусах Кельвина.

$$U_{\text{ПР Д}} = U_{\text{ПР Р}} \cdot \delta,$$

где  $U_{\text{ПР Д}}$  – пробивное напряжение, приведенное к действительным условиям измерения;  $U_{\text{ПР Р}}$  – пробивное напряжение, полученное при расчете по формуле Пашена.

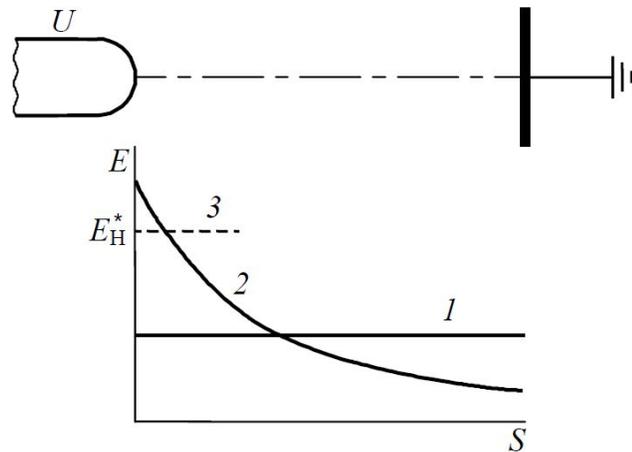
Графическое отображение закона Пашена для воздуха





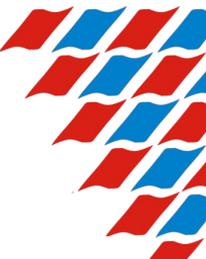
# Разряд в неоднородных полях

Реальные изоляционные промежутки с неоднородным полем: *стержень–стержень, стержень–плоскость, провод–земля* и другие.



Этапы пробоя промежутка:  
коронный разряд в лавинной форме;  
коронного разряда в стримерной форме;  
электрическая дуга.

Зависимость напряженности электрического поля от расстояния между электродами типа стержень–плоскость:  
1 –  $E_{\text{CP}} = f(S) = U/S$ ; 2 –  $E_{\text{max}} = f(S)$ ; 3 –  $E_{\text{H}}^*$  – напряженность возникновения самостоятельной формы разряда





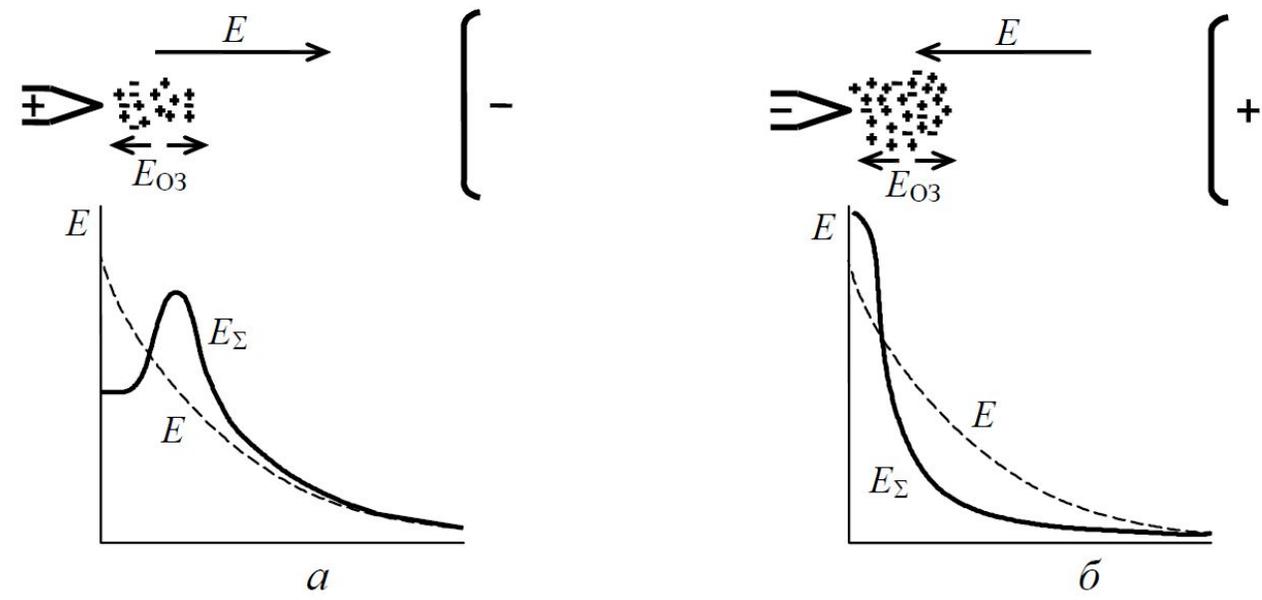
## Эффект полярности

В *слабонеровномерных* полях, где минимальный и средний градиенты напряжения мало отличаются друг от друга, коронное и разрядное напряжения практически совпадают друг с другом, влияние полярности невелико. В *сильнонеровномерном* поле коронное напряжение намного ниже разрядного, полярность при несимметричных электродах существенно влияет на величину разрядного напряжения. В промежутке *острие-плоскость* формирование разряда зависит от полярности острия.

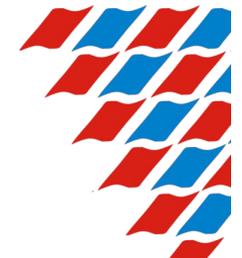




# Эффект полярности

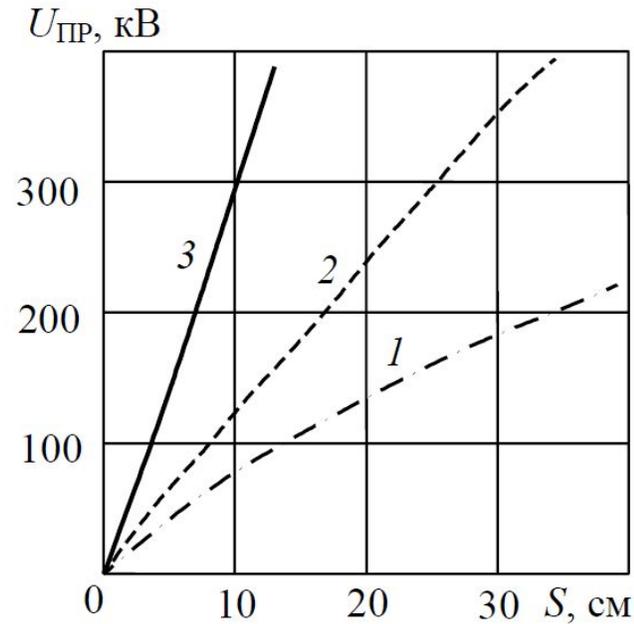


Образование анодного (*a*) и катодного (*b*) стримера:  
*E* – напряженность внешнего поля; *E*<sub>ОЗ</sub> – напряженность поля объемного  
 положительного заряда; *E*<sub>Σ</sub> – результирующая напряженность  
 в промежутке после ионизации

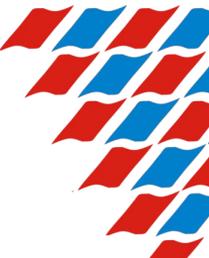




# Эффект полярности



Зависимость пробивного напряжения от расстояния между электродами стержень–плоскость на импульсном напряжении:  
1 – положительная полярность острия; 2 – отрицательная полярность острия; 3 – однородное поле





# Барьерный эффект

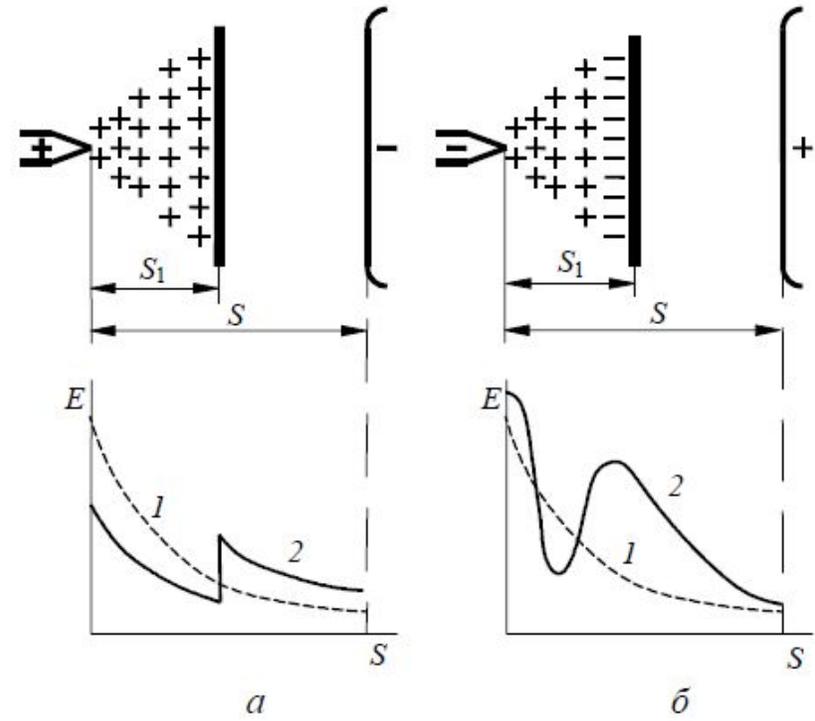
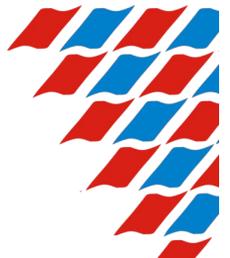


Рис. Распределение напряженности поля в межэлектродном промежутке при наличии барьера:  
*a* – положительная полярность стержня; *б* – отрицательная полярность стержня; 1 – распределение напряженности поля без барьера; 2 – распределение напряженности поля с барьером





# Барьерный эффект

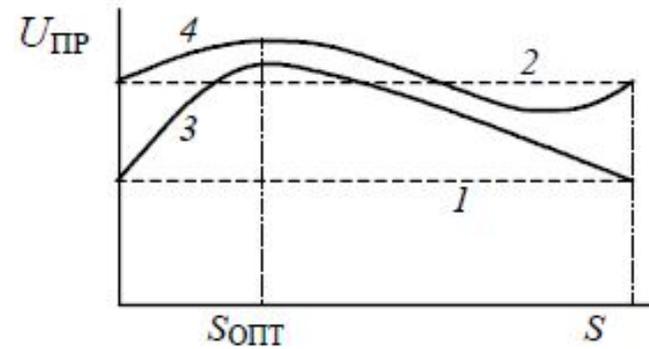
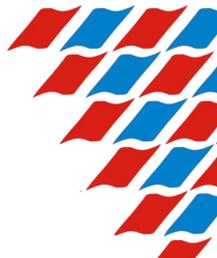
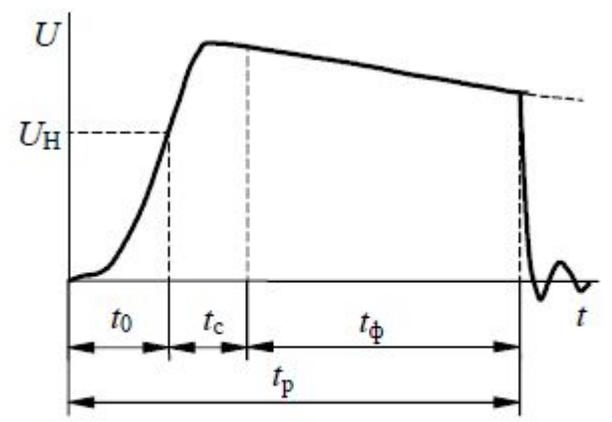


Рис. Влияние барьера на пробивное напряжение газового промежутка при положительной (1, 3) и отрицательной (2, 4) полярностях напряжения: прямые 1 и 2 – пробивное напряжение промежутка без барьера; кривые 3 и 4 – пробивное напряжение промежутка с барьером





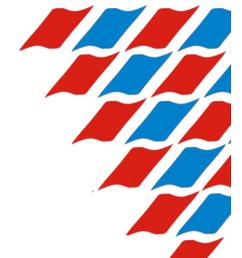
# Влияние времени приложения напряжения на электрическую прочность газовой изоляции



$$t_p = t_0 + t_c + t_\phi.$$

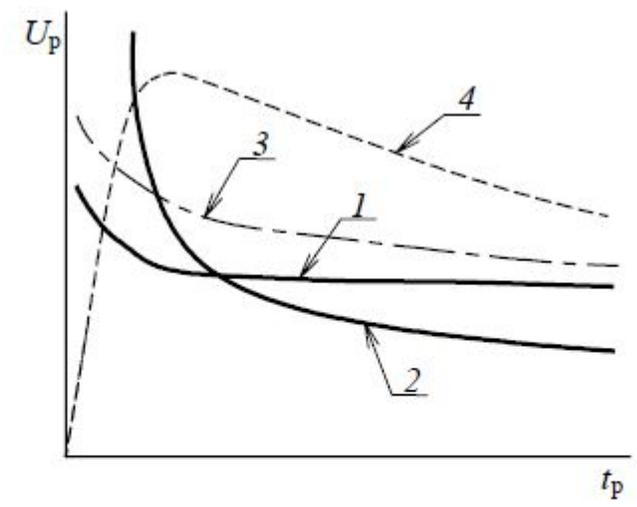
- $t_p$  - время развития разряда;
- $t_0$  - время увеличения напряжения до  $U_H$ ;
- $t_c$  - время ожидания эффективного электрона;
- $t_\phi$  - время формирования разряда

Рис. Временная структура развития разряда на импульсном напряжении





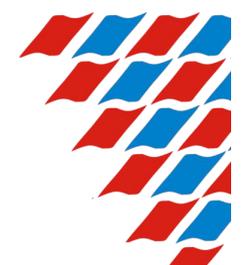
# Влияние времени приложения напряжения на электрическую прочность газовой изоляции



$$K_{\text{ИМП}} = \frac{U_p}{U_{\sim}}$$

коэффициент импульса

Рис. ВСХ защитных разрядников и изоляции:  
1 – ВСХ вентильного разрядника (однородное поле);  
2 – ВСХ трубчатого разрядника (резконеоднородное поле);  
3 – ВСХ защищаемого объекта; 4 – импульс напряжения





Спасибо за внимание!

