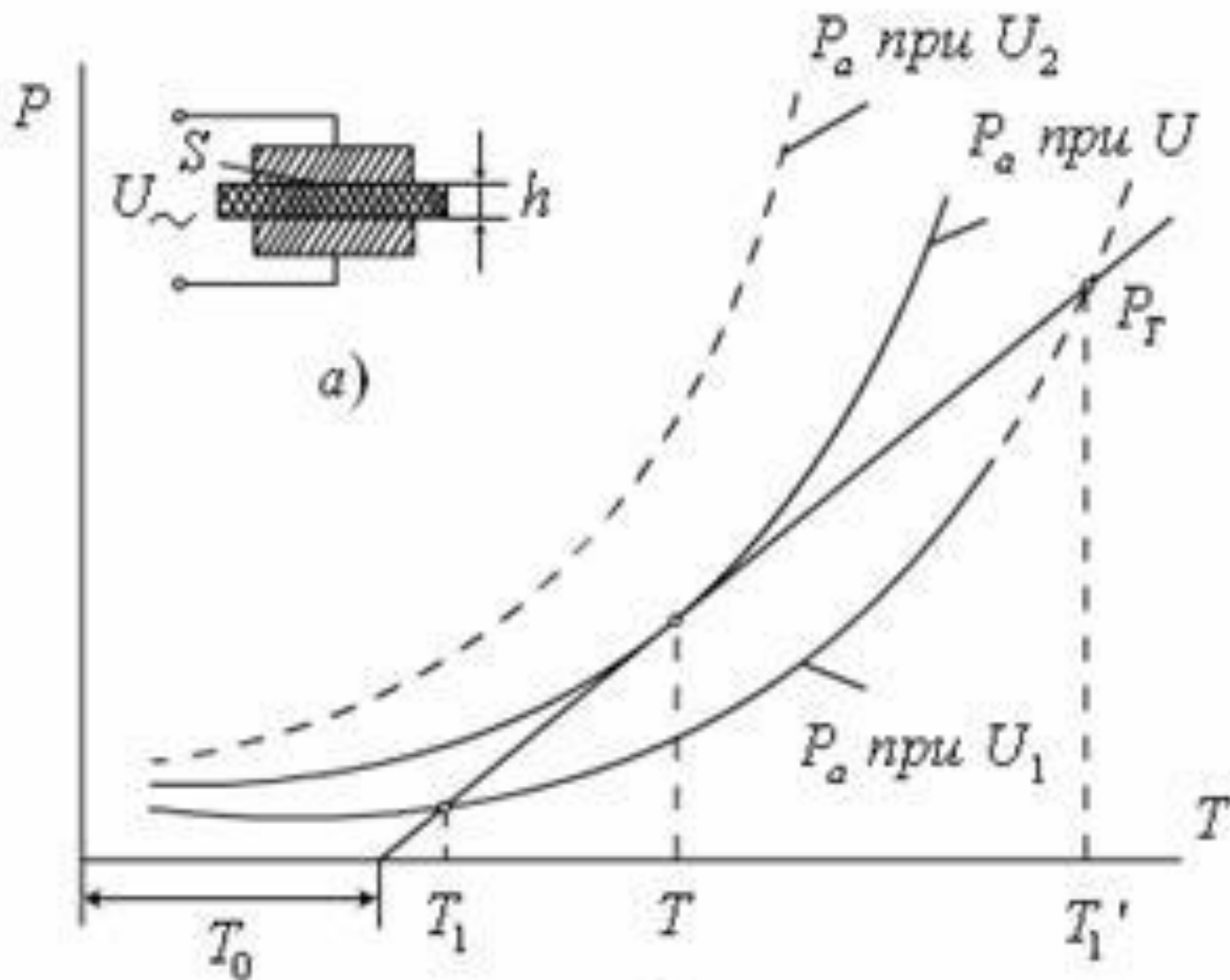


# Тепловой пробой



# Пробой диэлектриков



Пробоем диэлектриков или нарушением его электрической прочности называется потеря им свойств электроизоляционного материала под действием электрического поля.

**$U_{np}$  [кВ]**

– напряжение пробоя, при котором происходит пробой диэлектрика;

**$E_{np}$  [кВ/м]**

– электрическая прочность (напряженность электрического поля), при которой происходит пробой диэлектрика;

$$E_{np} = U_{np}/h$$

**$h$  [м]**

– толщина диэлектрика (для конструкции с однородным полем).

# Воздух



*Воздушный выключатель*

## ***1. Воздух***

при малых  
напряженностях  
электрического  
поля – хороший  
диэлектрик (ЛЭП).  
Применение:  
высоковольтные  
выключатели с  
давлением  $2\div 12$  МПа.

# Элегаз



## 3. Элегаз $SF_6$ (гексафторид)

$E_{прSF_6} > E_{пр}$  воздуха в 2,5 раза.  
Применение: высоковольтные  
выключатели, герметично  
закрытые КРУ, силовые  
трансформаторы.

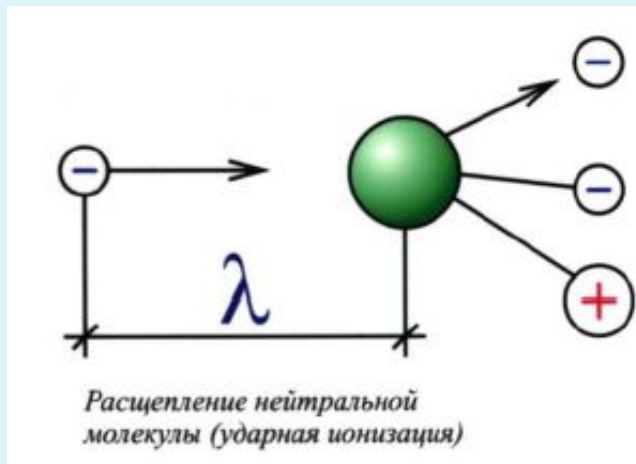


Элегазовый выключатель  
 $U=110кВ$

# Пробой газов



Воздух – элемент изоляции ЛЭП и оборудования подстанций.



Пробой газов обусловлен явлением ударной ионизации, т.е. расщеплением нейтральных молекул электронами, которые разгоняются полем.

$\lambda$  – длина свободного пробега частицы, т.е. среднее расстояние, пройденное заряженной частицей без столкновений.

Пробой газа совершается практически мгновенно, и это явление чисто электрическое. Поэтому все численные данные по пробоем газа относятся к максимальным (амплитудным) значениям напряжения.

# Основные виды ионизации в газах,

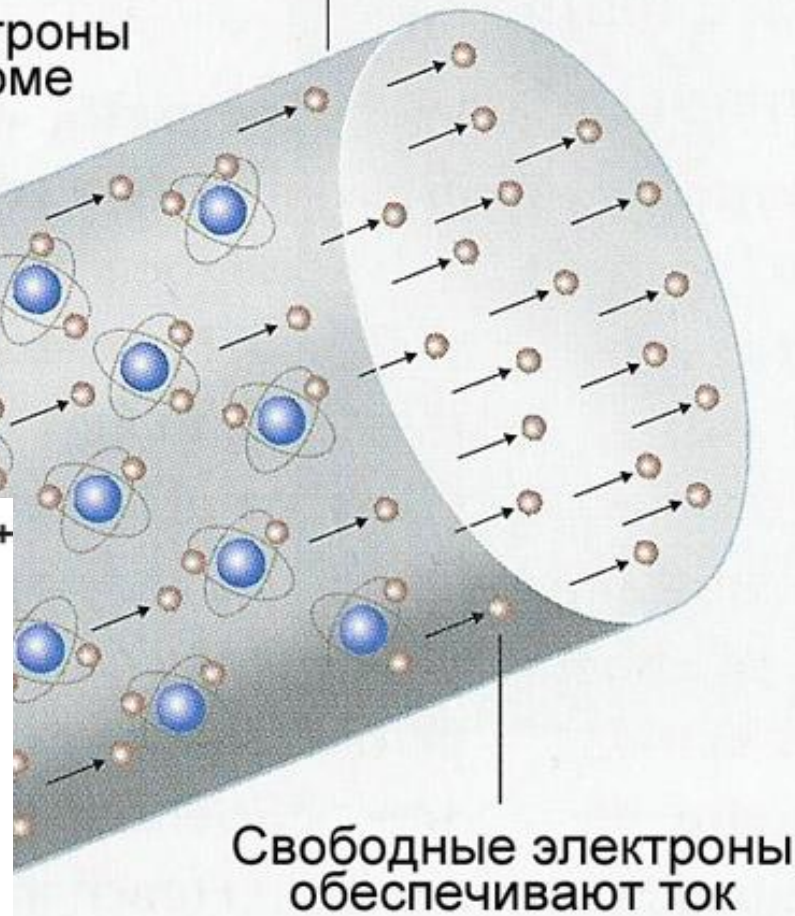
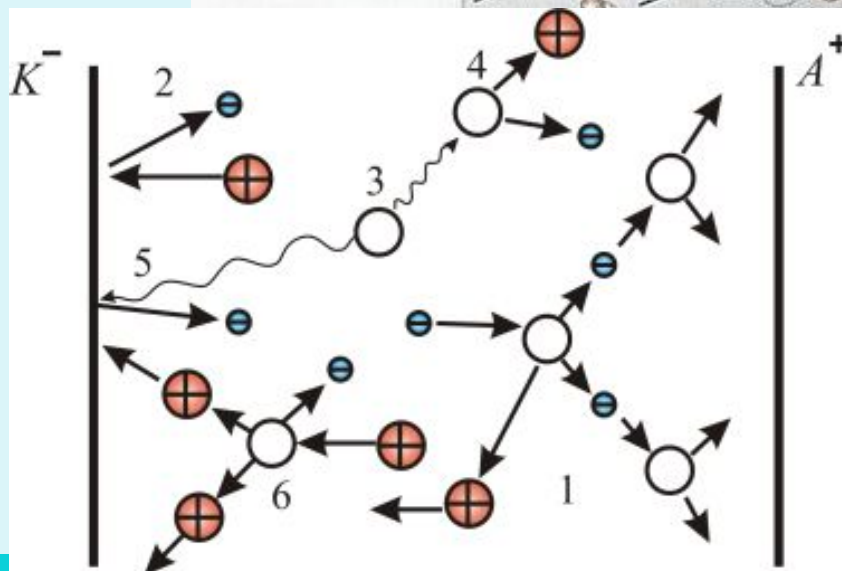
Энерги

Если п

Связанные электроны  
остаются в атоме

Проводник

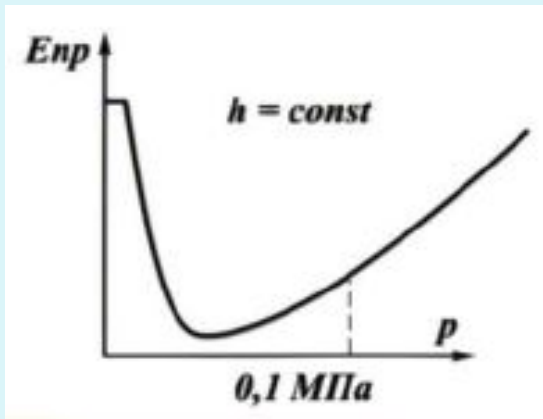
тесос-  
иони-  
спе-  
утно-  
ьтате



ичные  
ины



# Электрическая прочность газа зависит от его плотности, т.е. от давления



Высокую  $E\rho$  при больших давлениях используют в воздушных высоковольтных выключателях.

Большую  $E\rho$  вакуума используют для изготовления вакуумных выключателей, конденсаторов.



Вакуумный выключатель  
10кВ  
ВВПЭ-10



Воздушный выключатель  
220кВ  
ВВБ-220

В электрическом поле заряженная частица приобретает дополнительную энергию –  $W$

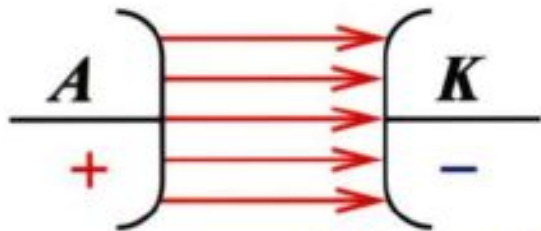
$$W = q \cdot U_\lambda, \text{ где } q - \text{заряд частицы,}$$

$U_\lambda$  – падение напряжения на длине свободного пробега –  $\lambda$

# Пробой газа в однородном поле

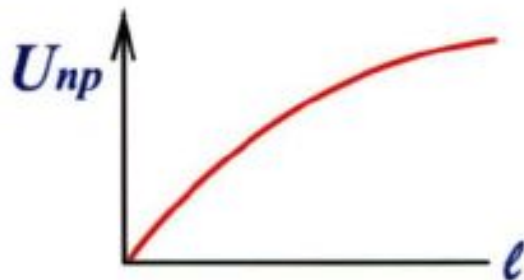
## Однородное электрическое поле

1) между плоскими электродами с закругленными краями;

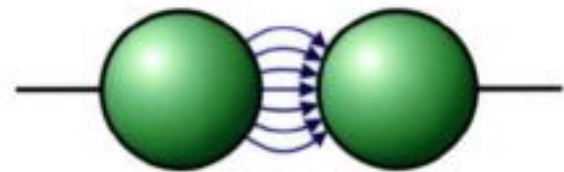


Зависимость  $U_{пр} = f(\ell)$

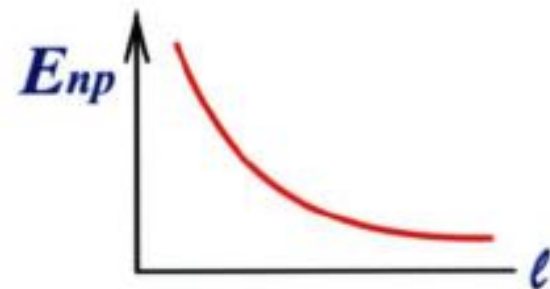
$\ell$  – расстояние между электродами



2) между шарами большого диаметра при малом расстоянии между ними.



Зависимость  $E_{пр} = f(\ell)$

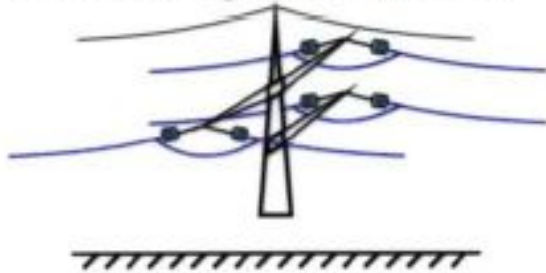




# Пробой газа в неоднородном поле



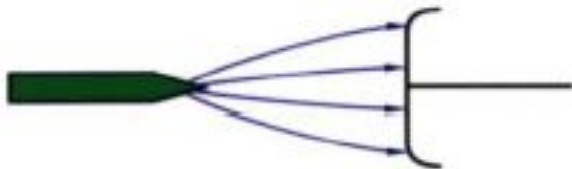
1. Между проводами ЛЭП



2. Между двумя остриями



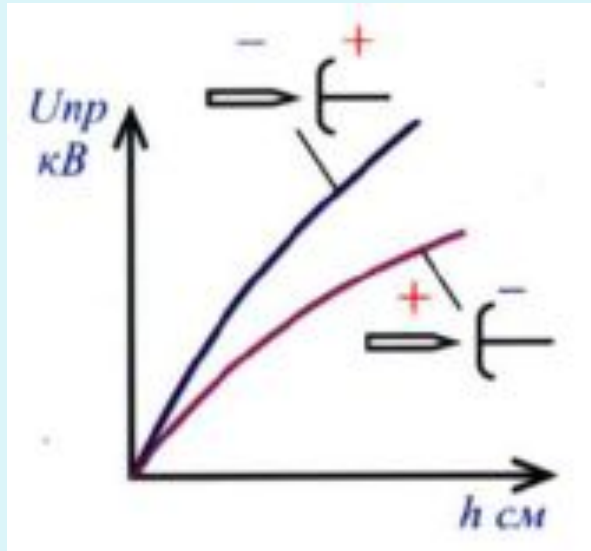
3. Между острием и плоскостью



4. Между шарами при большом расстоянии между ними



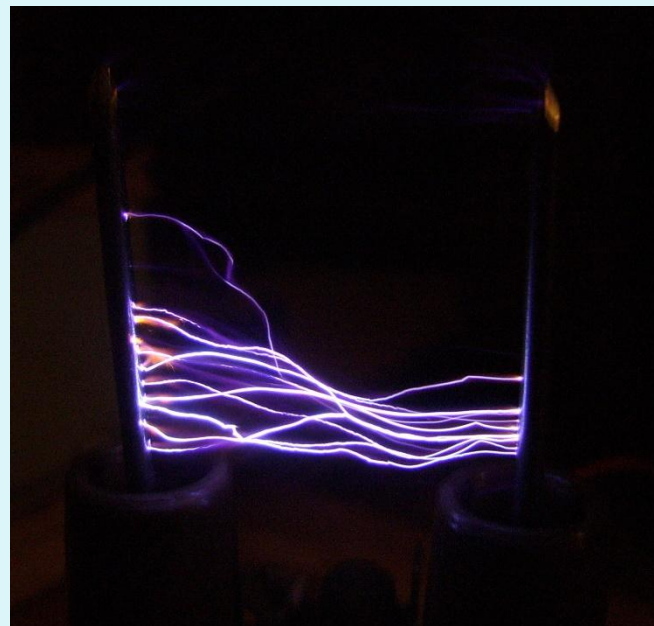
# Пробой газа в неоднородном поле



Зависимость  $U_{пр} = f(h)$  –  
около острия образуется положи-  
тельный объемный заряд

Особенность пробоя в неоднородном поле – возникновение разряда в виде короны с переходом в искровой разряд или дугу.

# Пробой газов



# Электрическая прочность некоторых диэлектриков в газообразном состоянии



Газ	Химическая формула	Молекулярная масса	Температура кипения, °С	Относительная $E_{пр}$ ( $E_{пр.газа}/E_{пр.воздуха}$ )
Гелий	He	4	-268,8	0,06
Водород	H <sub>2</sub>	2	-252,6	0,6
Диоксид углерода	CO <sub>2</sub>	44	-78,3	0,9
Азот	N <sub>2</sub>	28	-195,6	1,0
Фреон 12	CCl <sub>2</sub> F <sub>2</sub>	129	-30	2,4
Элегаз	SF <sub>6</sub>	146	-63,8	2,9
Гексафторциклобутан	C <sub>4</sub> F <sub>6</sub>	162	-5	3,9
Декафторциклопентан	C <sub>5</sub> F <sub>10</sub>	250	22	4,3
Перфтордибутилтетрагидрофуран	C <sub>8</sub> F <sub>16</sub> O	416	101	6,3
Перфтордиметилциклогексан	C <sub>8</sub> F <sub>16</sub>	400	101	8,5
Перфторфенантрен	C <sub>14</sub> F <sub>24</sub>	624	205	10,0

# Пробой жидких диэлектриков



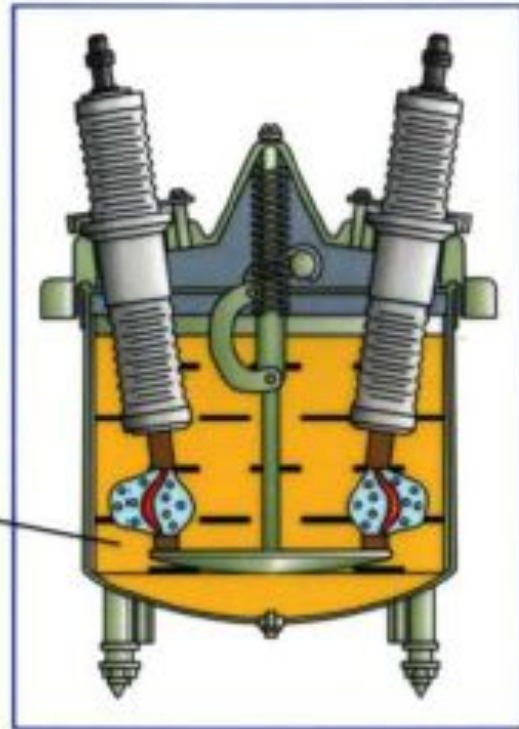
## Три теории пробоя

*1. Для максимально очищенных от примесей жидкостей.*

Причина – вырывание электронов из электродов: электроны производят ударную ионизацию.

*Трансформаторное масло*

*Масляный баковый выключатель*



# Пробой жидких диэлектриков

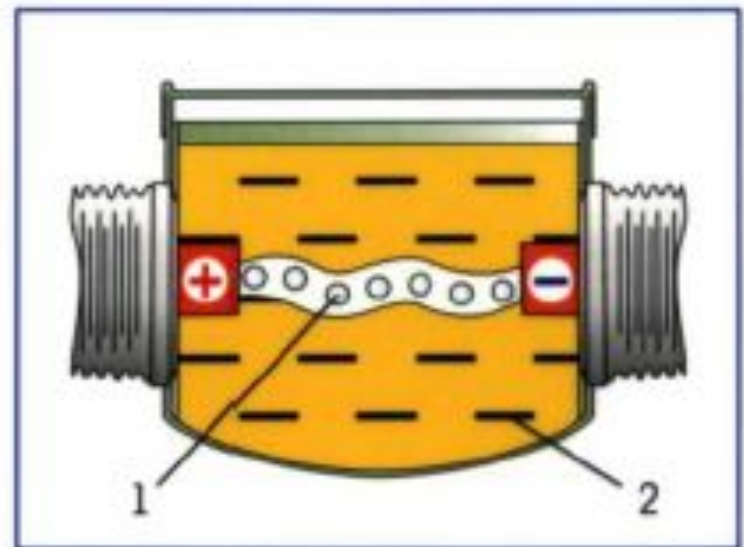


## Три теории пробоя

*II. Для жидкостей с  
пузырьками газа.*

Газ в пузырьках ионизируется,  
образуется газовый канал.

*1 – пузырьки газов;  
2 – трансформаторное  
масло*



# Пробой жидких диэлектриков

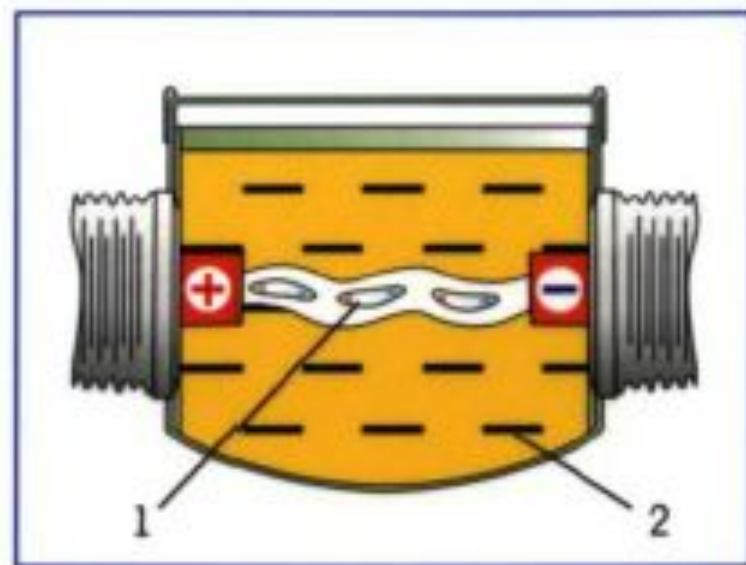


## Три теории пробоя

### *III. Для жидкостей с водой.*

Вода – полярное вещество.  
Вода поляризуется, создает  
цепочки с повышенной  
проводимостью.

*1 – вода;  
2 – трансформаторное  
масло*



# Пробой твердых диэлектриков



**I. Пробой в макроскопических однородных диэлектриках (органических полимерах).**

Причина пробоя – ударная ионизация электронами.

*пробой по поверхности*



**II. Пробой в неоднородных диэлектриках, содержащих газовые включения.**

Причина – ионизация газа. С увеличением толщины диэлектрика усиливается неоднородность структуры и снижается  $E_{пр}$ .

