

Дисциплина:

ТЕХНИКА ВЫСОКИХ НАПРЯЖЕНИЙ

Преподаватель:

Соловьев Михаил Александрович,

Доцент кафедры ЭСС ЭНИН

Контакты:

Аудитория 211, гл. корпус

Тел. (3822) 564-530

Эл. почта: solo@tpu.ru

В развитии электроэнергетики важнейшее место занимают **высокие напряжения** – для передачи электроэнергии на большие расстояния.

Огромное значение имеет надежность работы ЛЭП и всего комплекса электрооборудования (генераторов, трансформаторов, коммутационной аппаратуры).

В значительной мере решение этой задачи обеспечивается надежной работой **изоляции электрооборудования** при всех постоянно и кратковременно воздействующих напряжениях.

ТВН представляет собой науку о характеристиках вещества и процессах в нем при экстремальных электромагнитных воздействиях (высоких напряжениях и сильных токах), технологических использованиях данных процессов.

Научным фундаментом курса (ТВН) являются теоретические и экспериментальные данные по электрофизическим процессам в газообразных, жидких и твердых изоляционных средах.

На этом базируется возможность создания надежной изоляции электрических систем.

Кроме этого, надежность изоляции обуславливается грамотной эксплуатацией, ограничением всех видов воздействий (перенапряжений) на нее и своевременно проведенными испытаниями.

После изучения дисциплины студент **должен**:

- 1) **Знать виды электрической изоляции оборудования высокого напряжения, воздушных ЛЭП, электрооборудования станций и подстанций.**
- 2) **Овладеть методами профилактических испытаний изоляции, методами защиты изоляции электрооборудования от набегающих волн и прямых ударов молнии.**
- 3) **Уметь выполнить расчеты по оценке уровня и показателя грозоупорности воздушных линий.**
- 4) **Организовать техническое обслуживание и безопасную эксплуатацию установок высокого напряжения.**

Изучение дисциплины включает рассмотрение 4-х основных разделов:

1) Электрический разряд в газовых, жидких и твердых диэлектриках (физика и теория, факторы, влияющие на разрядное напряжение, коронный разряд, разряд по поверхности и др.)

2) Испытательные установки в измерение высоких напряжений

3) Изоляция и испытание изоляции установок высокого напряжения (устройство и расчет воздушных ЛЭП, кабелей, трансформаторов, конденсаторов, электрических машин. Координация изоляции в элементах энергосистемы. Профилактика изоляции).

4) Перенапряжения в электрических системах и методы защиты оборудования (внутренние перенапряжения, дуговые, коммутационные, атмосферные (молния и грозозащита)).

Основные свойства и характеристики внешней изоляции

Внешняя изоляция - воздушные промежутки, внешние поверхности твердой изоляции (изоляторов), промежутки между контактами разъединителей.

Внутренняя изоляция – изоляция обмоток трансформаторов, электрических машин, кабелей, вводов.

Разряды в газах

Основные свойства и характеристики внешней изоляции

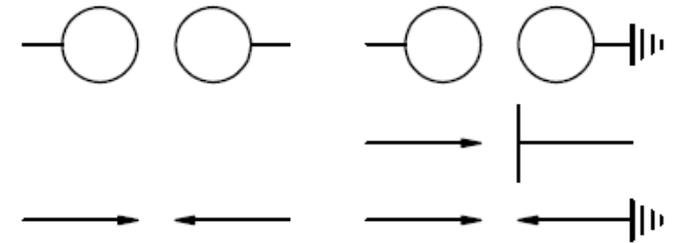
Основным материалом для создания внешней изоляции является атмосферный воздух.

Изоляционные расстояния по воздуху зависят от:

- **значения и формы воздействующего напряжения**
- **электрической прочности воздуха (30 кВ/см для ОП).**

Классификация электрических полей:

- однородное (ОП),
- неоднородное (НП),
- резконеоднородное (РНП).



В резконеоднородных полях $E_{пр}$ воздуха составляет:

- для $S=1-2$ м - до 5 кВ/см,
- для $S=10-20$ м - до 1,5 – 2,5 кВ/см.

Упр = f(ρ, T, влажности воздуха)

Нормальные условия:

$T_0=293$ К, $\rho_0 = 101,3$ кПа (760 мм.рт.ст.)

Отн. Влажность = 11г/м³

Свойства газов

$$N = \frac{P}{k \cdot T}$$

концентрация частиц газа

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

длина свободного пробега

$$U = K \cdot E$$

скорость дрейфа частиц в электрическом поле

$$\frac{K_e}{K_u} = \frac{U_e}{U_u} = \sqrt{\frac{m_u}{m_e}} = 227$$

подвижность частиц

$$k_{\text{эл}} \approx 400 \frac{\text{см}^2}{\text{В} \cdot \text{с}} \text{ — подвижность электронов;}$$

$$k_{\text{ион}} \approx 2 \frac{\text{см}^2}{\text{В} \cdot \text{с}} \text{ — подвижность ионов;}$$

Плазма – газ в котором значительное количество частиц ионизировано.

Ионизационные процессы в газе

Энергии возбуждения и ионизации газов

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

Объемная и поверхностная ионизации.

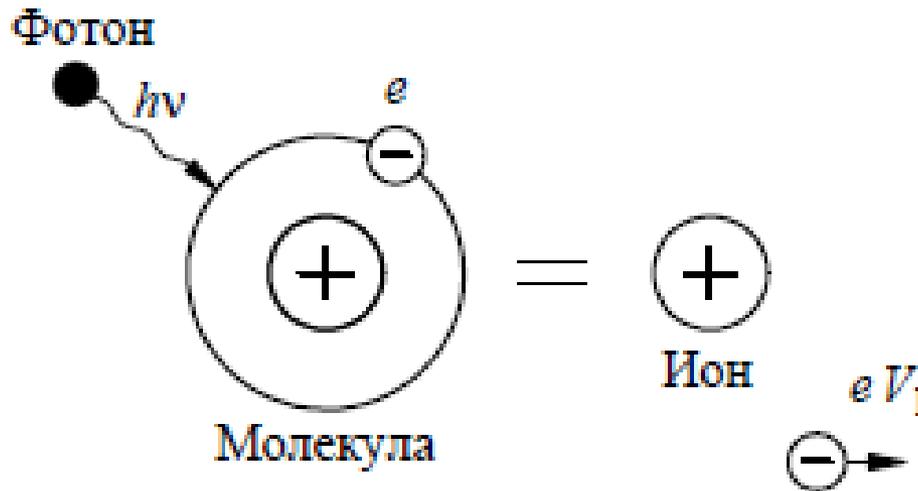
Объемная ионизация — образование заряженных частиц в объеме газа между электродами.

Поверхностная ионизация — излучение (эмиссия) заряженных частиц с поверхности электродов.

Объемная ионизация подразделяется:

- 1) ударная ионизация;
- 2) ступенчатая ионизация;
- 3) фотоионизация;
- 4) термоионизация.

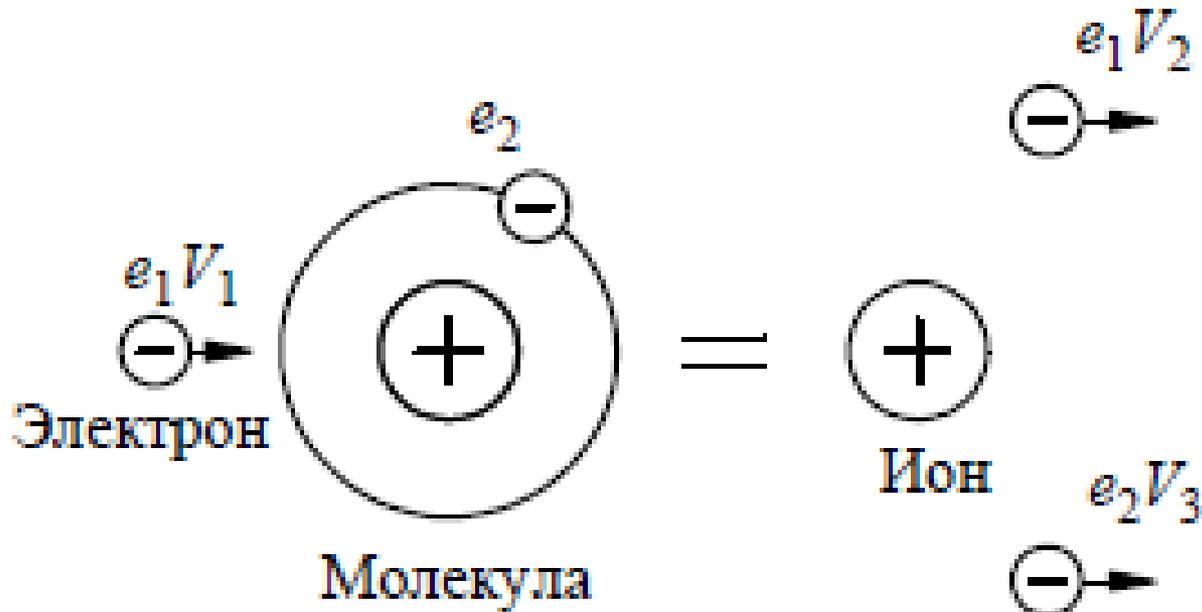
Схемы объемной ионизации газа: фотоионизация



$$h\nu \geq W_{\text{И}}$$

h — постоянная Планка,
 ν — собственная частота фотона.

Схемы объемной ионизации газа: ударная ионизация



$$\frac{m_1 \cdot V_1^2}{2} \geq W_{\text{И}} \quad \text{условие ионизации}$$

Разряды в газах

$$\alpha = \frac{1}{\lambda} \cdot e^{\left(-\frac{x_u}{\lambda}\right)}$$

коэффициент ударной ионизации – число ионизаций, осуществляемых одним электроном на единичном пути (характеризует интенсивность размножения электронов)

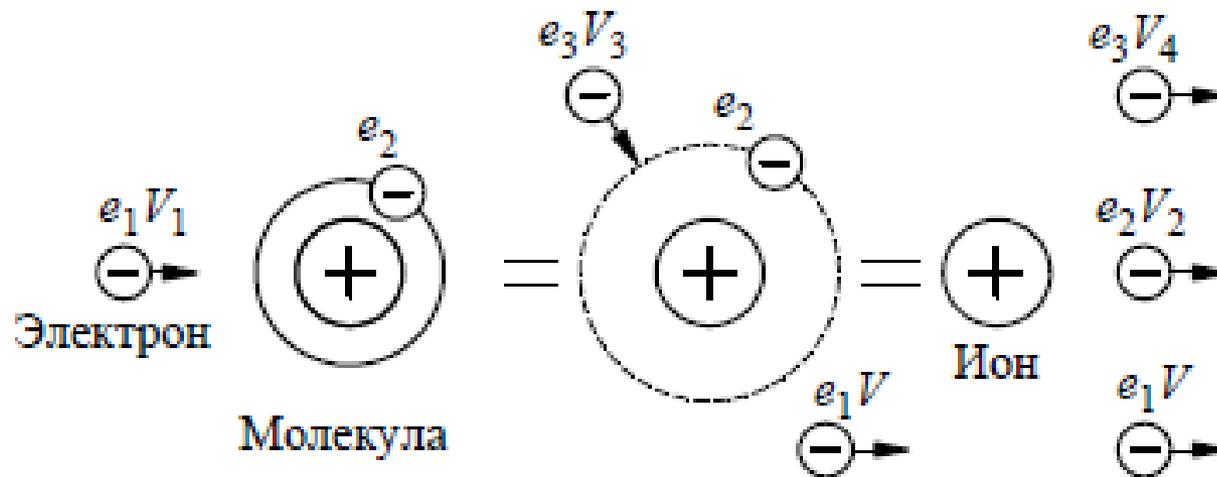
$$\lambda = \frac{1}{z}$$

длина свободного пробега

$$x_u = \frac{W_u}{e \cdot E}$$

расстояние, которое должен преодолеть электрон, чтобы накопить энергию, достаточную для ионизации

Схемы объемной ионизации газа: ступенчатая ионизация



$$\frac{m_1 \cdot V_1^2}{2} + \frac{m_1 \cdot V_3^2}{2} \geq W_{\text{И}}$$

ТЕРМОИОНИЗАЦИЯ

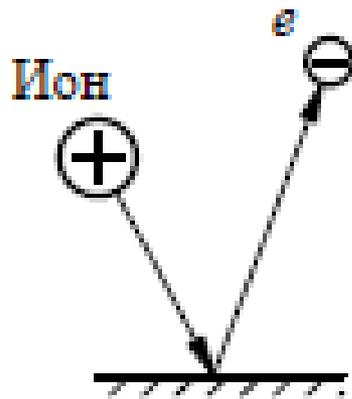
Термоионизация обусловлена тепловым состоянием газа и может происходить в результате следующих актов:

- 1) освобождение электрона при соударениях между атомами и молекулами при высоких температурах**
- 2) фотоионизация нейтральных атомов и молекул, возбужденных в результате теплового взаимодействия при высоких температурах**
- 3) ионизация при столкновении электрона с нейтральным атомом или молекулой при высоких температурах**

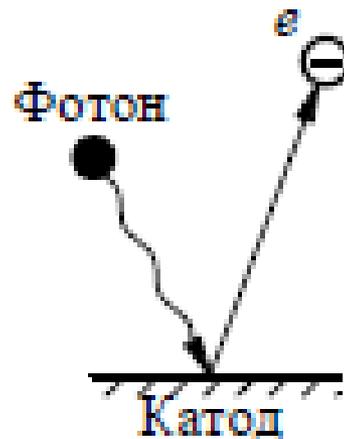
Схемы поверхностной ионизации:

а) ионизация ионом,
в) термоионизация,

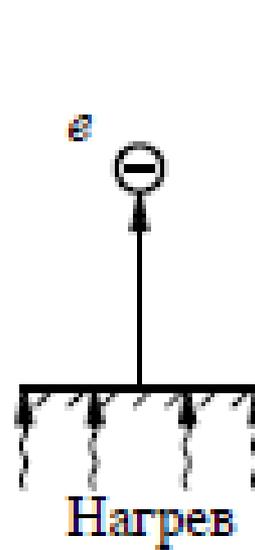
б) ионизация квантом света,
г) автоэлектронная ионизация
(эмиссия)



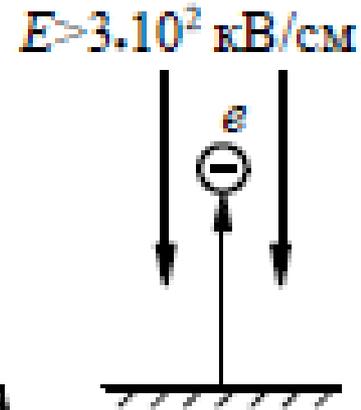
а)



б)



в)

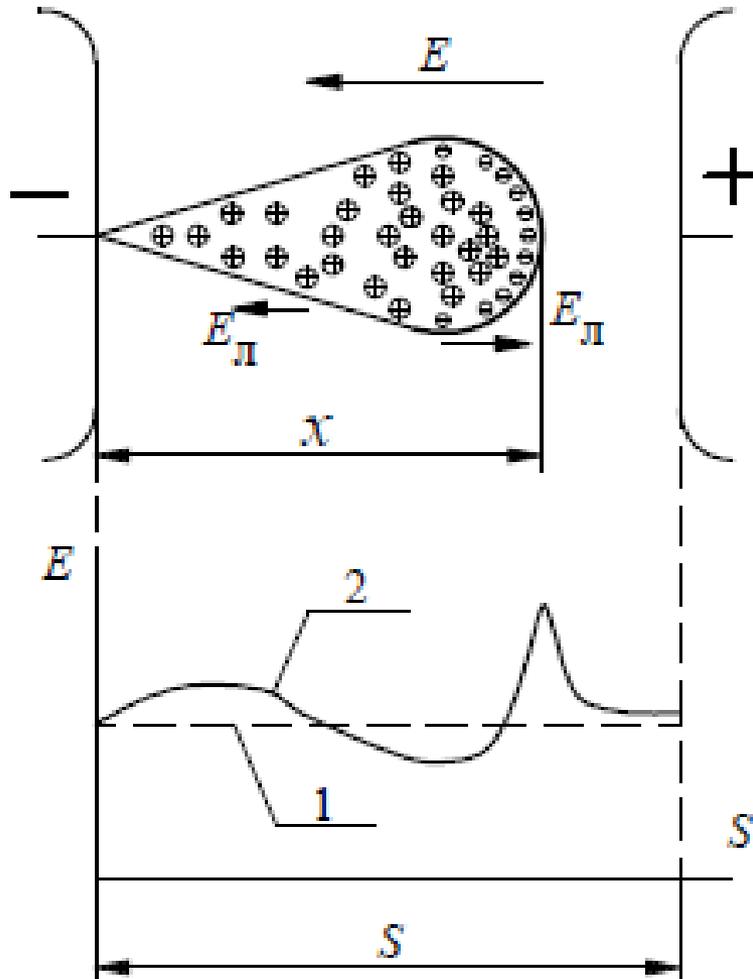


г)

ЛАВИНА ЭЛЕКТРОНОВ

Разряды в газах

Лавина электронов – процесс роста числа свободных электронов вследствие процессов ударной ионизации в газе



$$n_{кр} = 10^7 \div 10^9$$

число электронов при переходе лавины в стример

Искажение электрического поля в промежутке, создаваемое лавиной:
1 — средняя напряженность без лавины;
2 — результирующая напряженность

Условие самостоятельности разряда

Если благодаря внешнему ионизатору вблизи катода непрерывно возникают свободные электроны, в промежутке всё время будут образовываться лавины, движение которых обусловит ток между электродами.

Однако когда электроны вблизи катода создаются только внешним ионизатором, ток в промежутке прекратится, если убрать внешний ионизатор, а электроны и ионы созданных ранее лавин уйдут на электроды. Такой процесс называется **несамостоятельным**.

Для того чтобы процесс был **самостоятельным** и мог существовать при отсутствии внешнего ионизатора, **необходимо, чтобы взамен каждого ушедшего с катода электрона был создан новый вторичный электрон за счёт, так называемой вторичной ионизации**.

Условие самостоятельности разряда

Вторичная ионизация может осуществляться тремя различными способами:

а) за счёт освобождённых электронов из катода при ударе о его поверхность положительных ионов начальной лавины

Дойдя до катода, положительные ионы могут передавать свою энергию (кинетическую и потенциальную) электронам металла, некоторая часть которых при этом преодолевает потенциальный барьер и покидает катод. Таким образом, при бомбардировке катода положительными ионами лавины вблизи него образуются новые - вторичные электроны.

б) за счёт фотоионизации на поверхности катода, осуществляемой излучением из начальной лавины.

Электроны на своём пути осуществляют не только ионизацию, но и возбуждение атомов газа (переход одного или нескольких электронов атома с близких от атомного ядра орбит на более удалённые).

Поскольку энергия возбуждения меньше энергии ионизации, то число возбуждённых частиц всегда превышает число ионизированных частиц. Возбуждённые состояния являются неустойчивыми, поэтому возбуждённые атомы самопроизвольно переходят в нормальное состояние, выделяя при этом кванты излучения (фотоны). Попадая на катод, это излучение способно выбивать из него вторичные электроны.

в) за счёт фотоионизации в объёме газа излучением лавины.

Этот процесс может иметь существенное значение для газовых смесей, в которых энергия возбуждения одного газа превышает энергию ионизации другого газа.

Условие самостоятельности разряда

$$\gamma(\exp aS-1) \geq 1$$

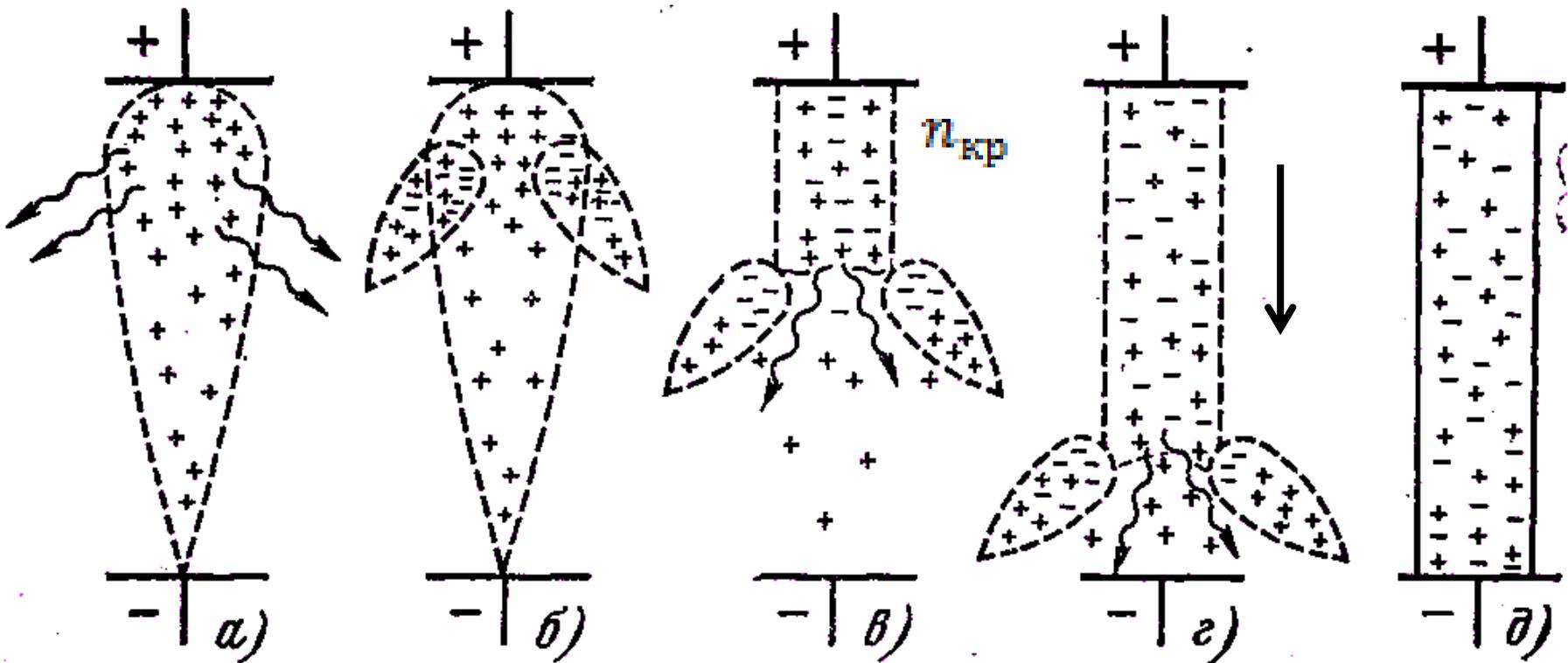
γ – обобщённый коэффициент вторичной ионизации, учитывающий:

- 1) число электронов, в среднем выбиваемых с катода одним ионом,
- 2) фотоионизацию на катоде
- 3) фотоионизацию в объёме газа

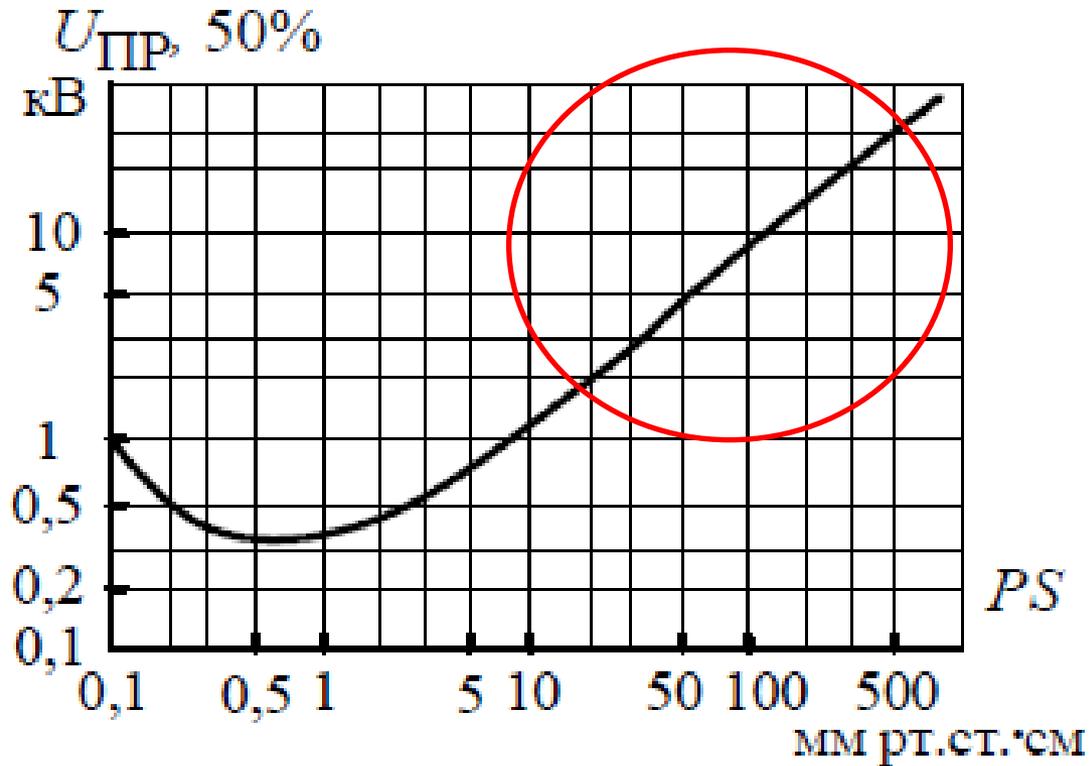
aS – общее число эффективных ионизаций, осуществляемых электроном на пути между электродами

Если $\gamma(\exp aS-1)$ будет даже незначительно превышать единицу, число развивающихся в промежутке лавин будет непрерывно возрастать!

Возникновение и развитие анодного стримера



Закон Пашена



Графическое отображение закона Пашена для воздуха

$$U_{\text{ПР}} = \frac{B_0 \cdot P \cdot S}{\ln \frac{A_0 \cdot P \cdot S}{\ln \left(1 + \frac{1}{\gamma} \right)}}$$

$$U_{\text{ПР}} = f(P \cdot S)$$

$$\alpha = \frac{1}{\lambda} \cdot e^{\left(-\frac{x_{\text{ПР}}}{\lambda} \right)}$$

Закон Пашена

Закон Пашена в виде формулы указанной на предыдущем слайде справедлив при нормальной температуре. **Изменение температуры действует обратно изменению давления и должно учитываться при расчетах.**

$$U_{\text{пр}} = f\left(\frac{P \cdot S}{T}\right),$$

Закон Пашена с учетом изменения температуры

$$U_{\text{пр}} = f(\delta \cdot S),$$

$$\delta = \frac{T_0}{T} \cdot \frac{P}{P_0} = 0,386 \frac{P}{T},$$

$$U_{\text{пр. д}} = U_{\text{пр. расч}} \cdot \delta,$$

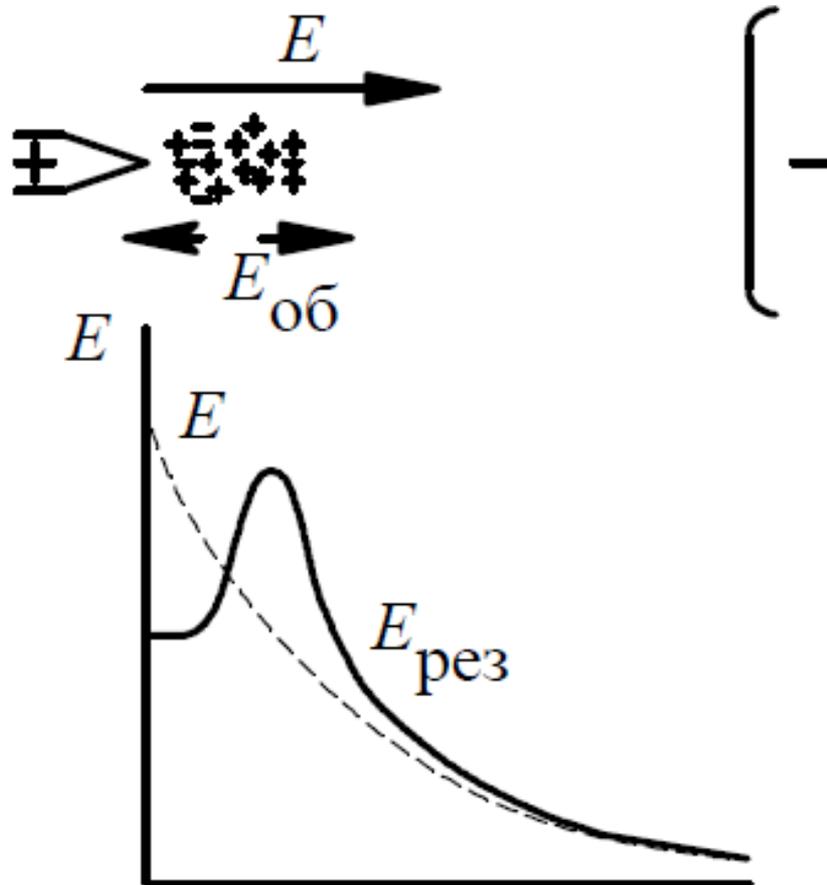
где $U_{\text{д}}$ – пробивное напряжение, приведенное к действительным условиям измерения;

$U_{\text{расч}}$ – пробивное напряжение, полученное при расчете по формуле Пашена.

На основании закона Пашена могут быть предложены способы повышения пробивного напряжения газов:

- 1) **увеличение давления больше атмосферного;**
- 2) **уменьшение давления до значений, меньших, чем давление, соответствующее минимуму, вплоть до вакуума.**

Разряд в неоднородных полях (эффект полярности)



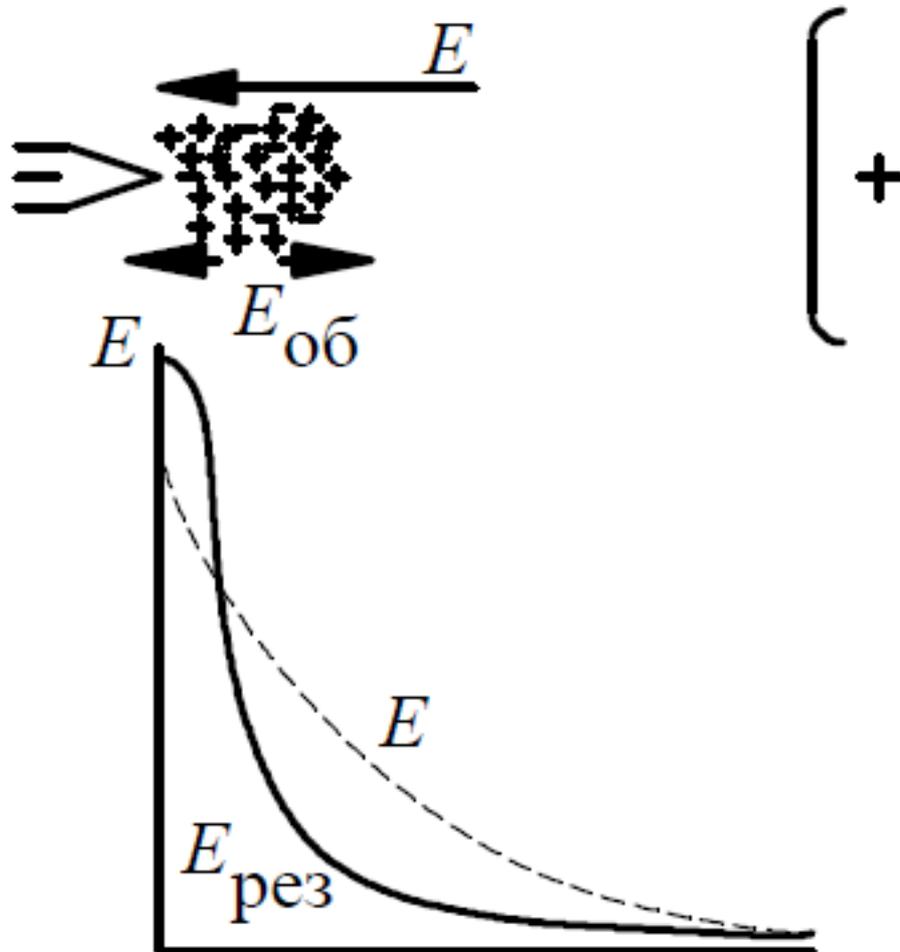
Положительные заряды лавины будут располагаться на головке стримера и создавать область повышенной напряженности во внешнем пространстве.

Наличие области сильного поля обеспечивает образование новых лавин, электроны которых втягиваются в канал стримера постепенно удлиняя его.

Стример прорастает к катоду, вызывая пробой промежутка при сравнительно малой величине разрядного напряжения.

Разряды в газах

Разряд в неоднородных полях (эффект полярности)



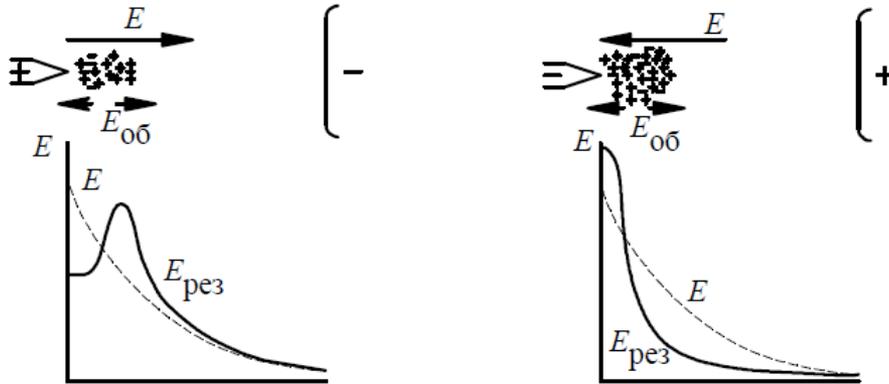
Положительные ионы лавин образуют объемный заряд у острия - он будет увеличивать E непосредственно у острия и уменьшать в остальной части промежутка. Увеличение поля у острия приводит к усилению эмиссии электронов с поверхности катода, которые, смешиваясь с положительным объемным зарядом, образуют у катода зародыш катодного стримера.

Вследствие большого числа начальных лавин у катода плазменный канал здесь представляет собой более или менее однородный слой с радиусом кривизны большим, чем у острия. Электрическое поле выравнивается и E во внешней области уменьшается.

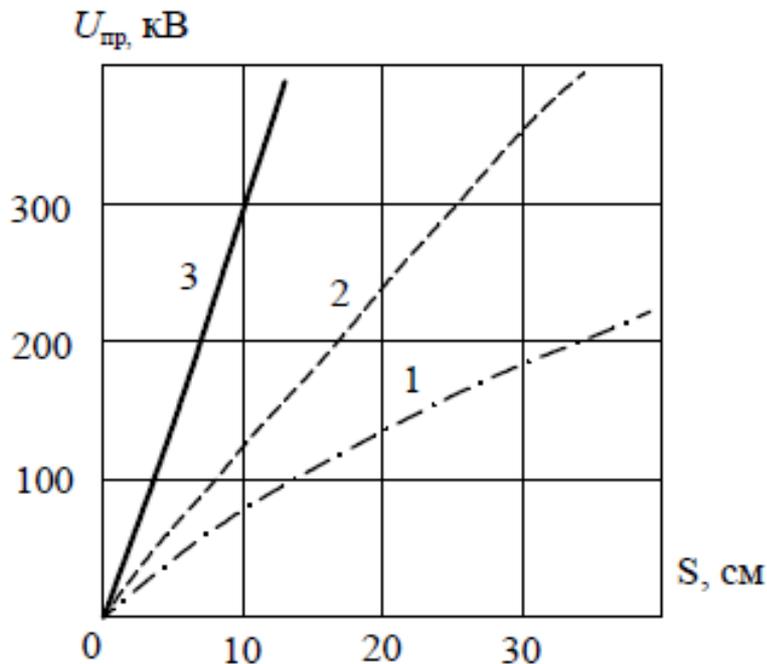
Уменьшение E во внешнем пространстве приводит к тому, что для дальнейшей ионизации в этой части промежутка необходимо значительно увеличить разность потенциалов между электродами.

Разряд в неоднородных полях (эффект полярности)

Разряды в газах



Развитие стримера при отрицательном острие происходит с большими трудностями, поэтому разрядное напряжение при отрицательной полярности острия больше, чем при положительной полярности (в 2–2,5 раза).



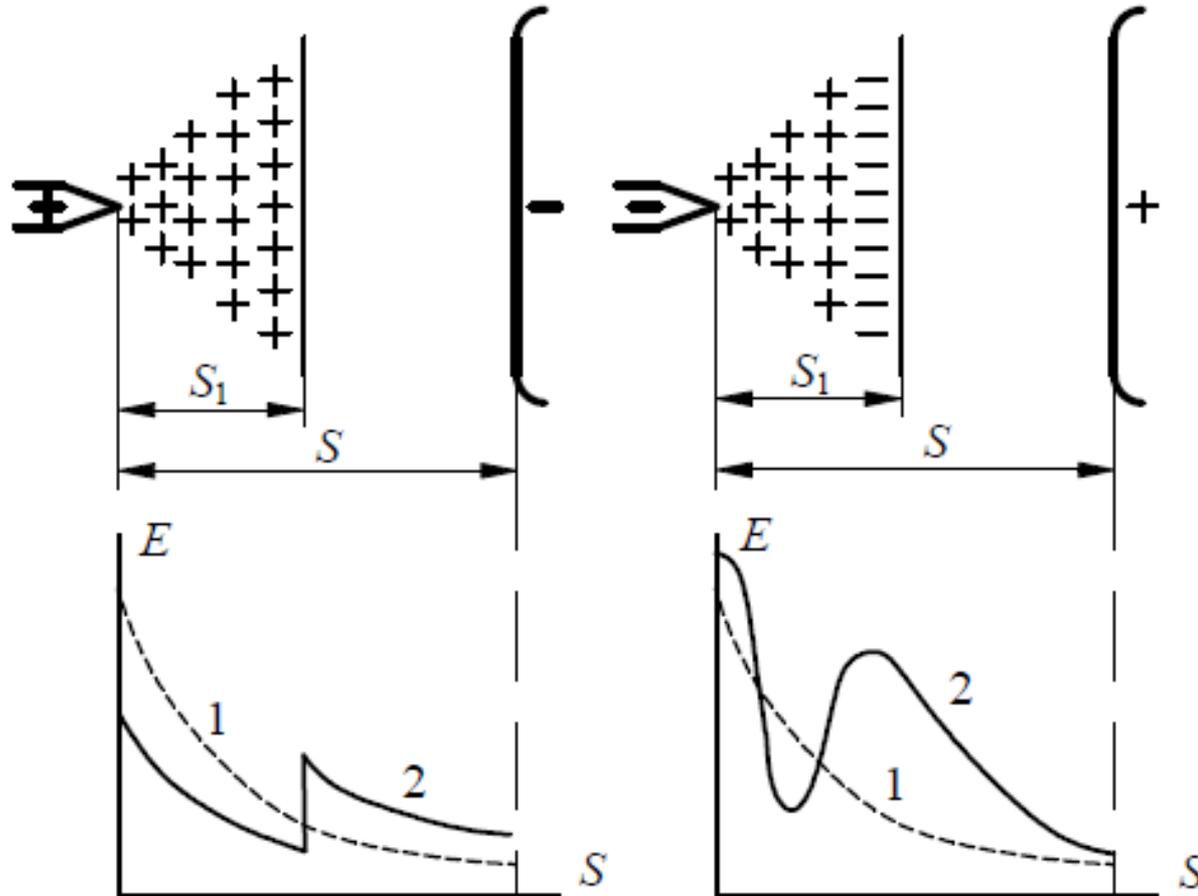
Зависимость пробивного напряжения от расстояния между электродами стержень-плоскость на импульсном напряжении:
1 — положительная полярность острия;
2 — отрицательная полярность острия;
3 — однородное поле

Существенное влияние **объемного заряда** на развитие разряда в промежутке с резконеоднородным полем используется на практике для увеличения разрядных напряжений изоляционных промежутков.

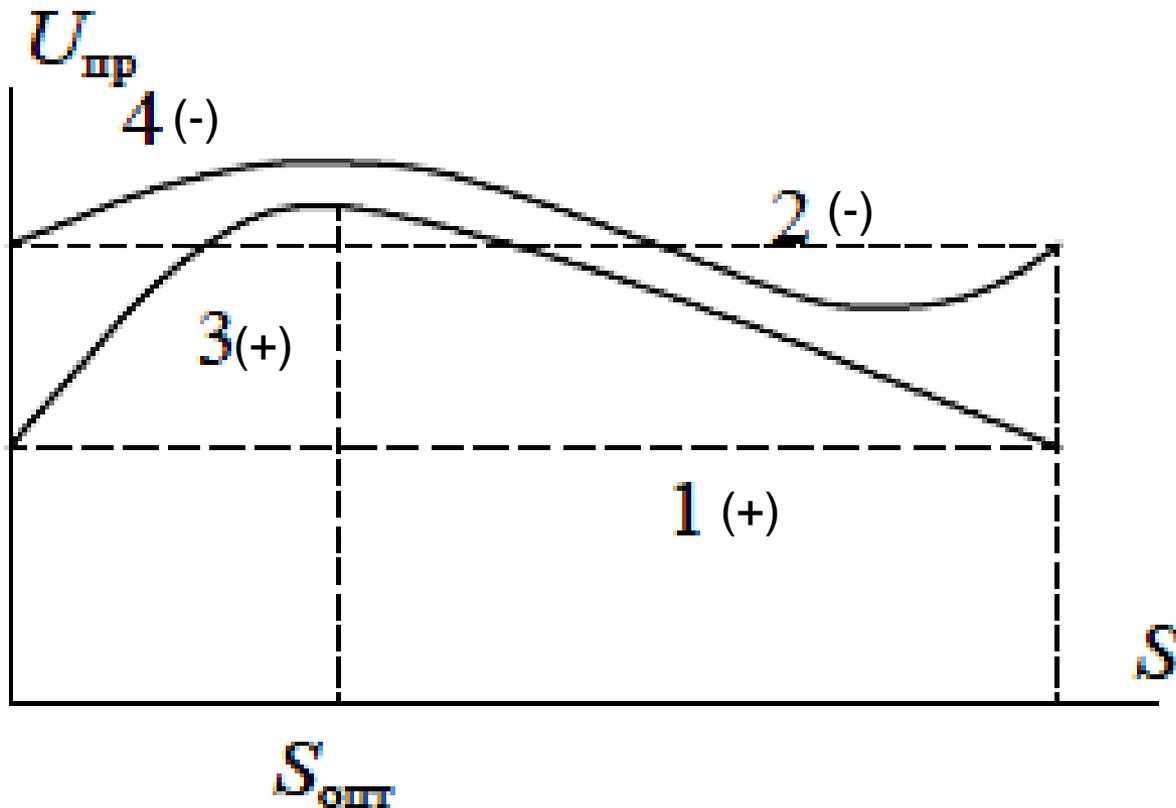
Это увеличение достигается помещением в промежуток барьеров из твердого диэлектрика (электрокартон, гетинакс и др.).

Барьерный эффект

Разряды в газах



Распределение напряженности поля в межэлектродном промежутке при наличии барьера:
а) — положительная полярность стержня; б) — отрицательная полярность стержня;
1 — распределение напряженности поля без барьера;
2 — распределение напряженности поля с барьером



Влияние барьера на пробивное напряжение газового промежутка

- при положительной (1, 3) полярности напряжения
- при отрицательной (2, 4) полярности напряжения

- 1, 2 — пробивное напряжение промежутка без барьера;
- 3, 4 — пробивное напряжение промежутка с барьером

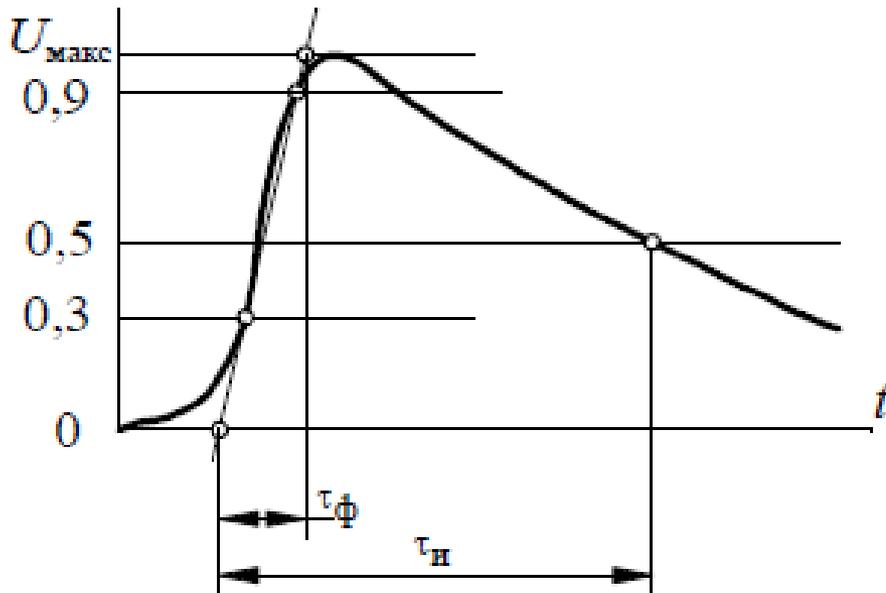
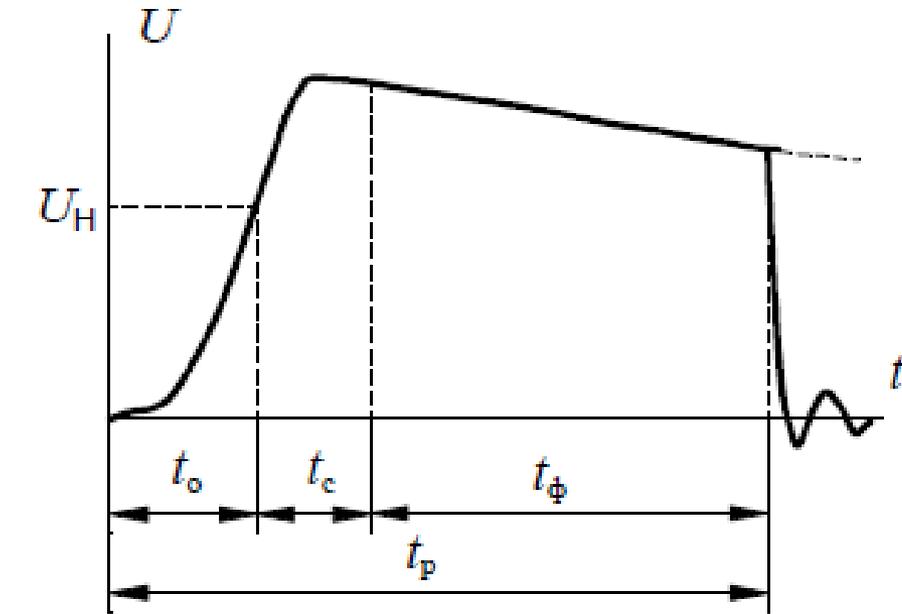
Разряды в воздухе при постоянном и переменном напряжениях

Развитие разряда происходит за время значительно меньшее, чем полупериод приложенного переменного напряжения (50 Гц),
поэтому **разрядные напряжения воздушных промежутков при постоянных и переменных промежутках одинаковы.**



Разряды в газах (ВСХ)

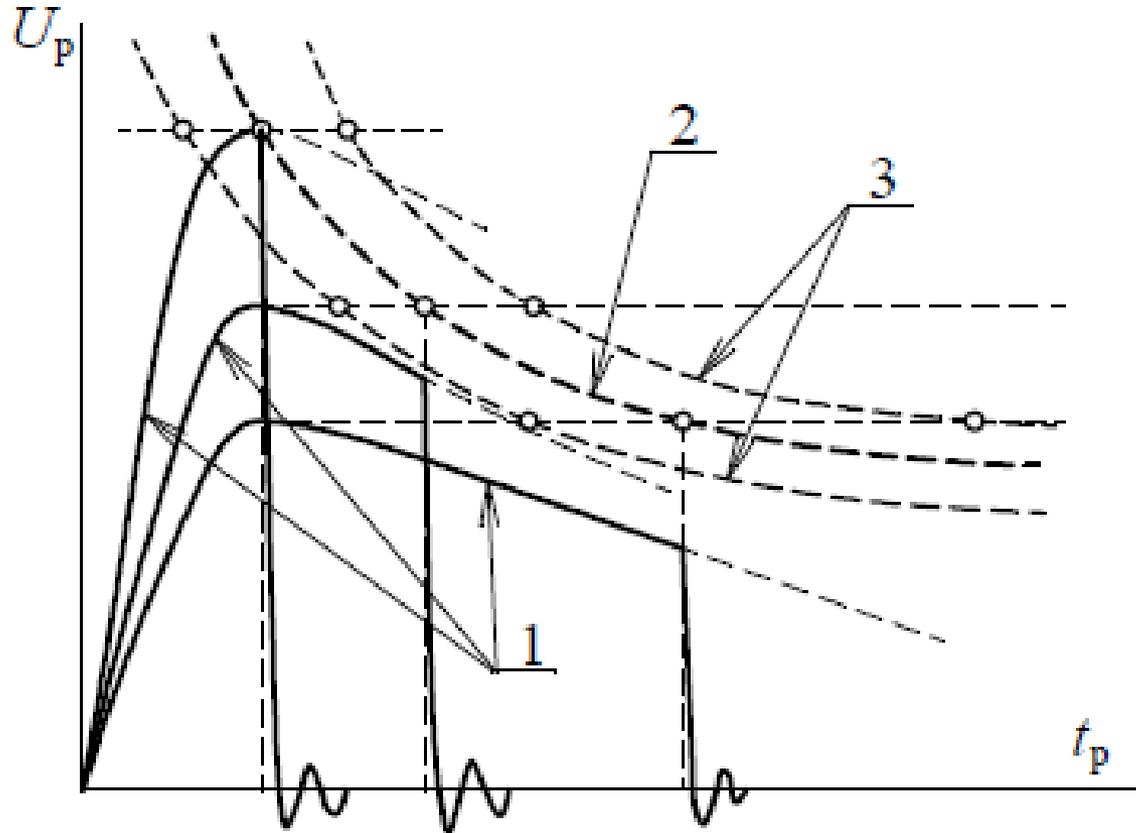
$$t_p = t_o + t_c + t_{\phi}$$



Стандартный
грозовой импульс с
длительностью фронта
(возрастания напряжения)
 $T_{\phi} = 1,2 \pm 0,4$ мкс и
длительностью импульса
 $T_u = 50 \pm 10$ мкс
обозначается 1,2/50 мкс



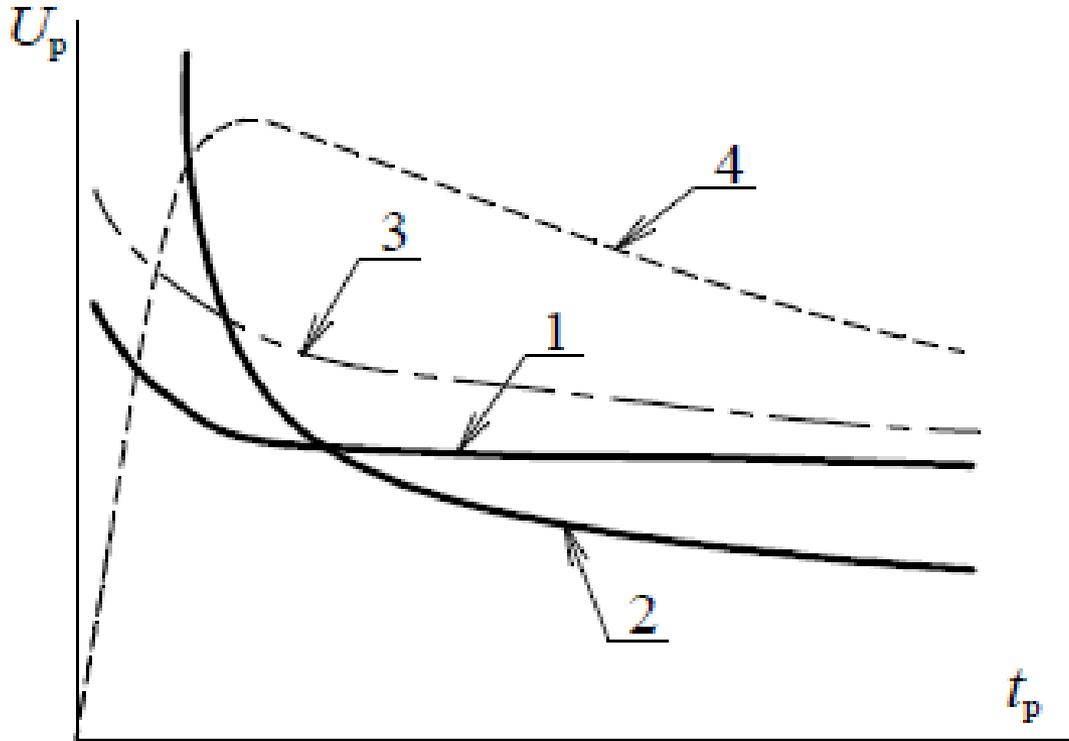
Методика экспериментального определения вольт-секундной характеристики



1 — импульс напряжения; 2 — кривая средних значений пробивного напряжения;
3 — границы разброса пробивных напряжений



Разряды в газах



Вольт-секундные характеристики широко используются для **координации изоляции высоковольтного оборудования**, т. е. для защиты от воздействия грозовых и коммутационных перенапряжений.

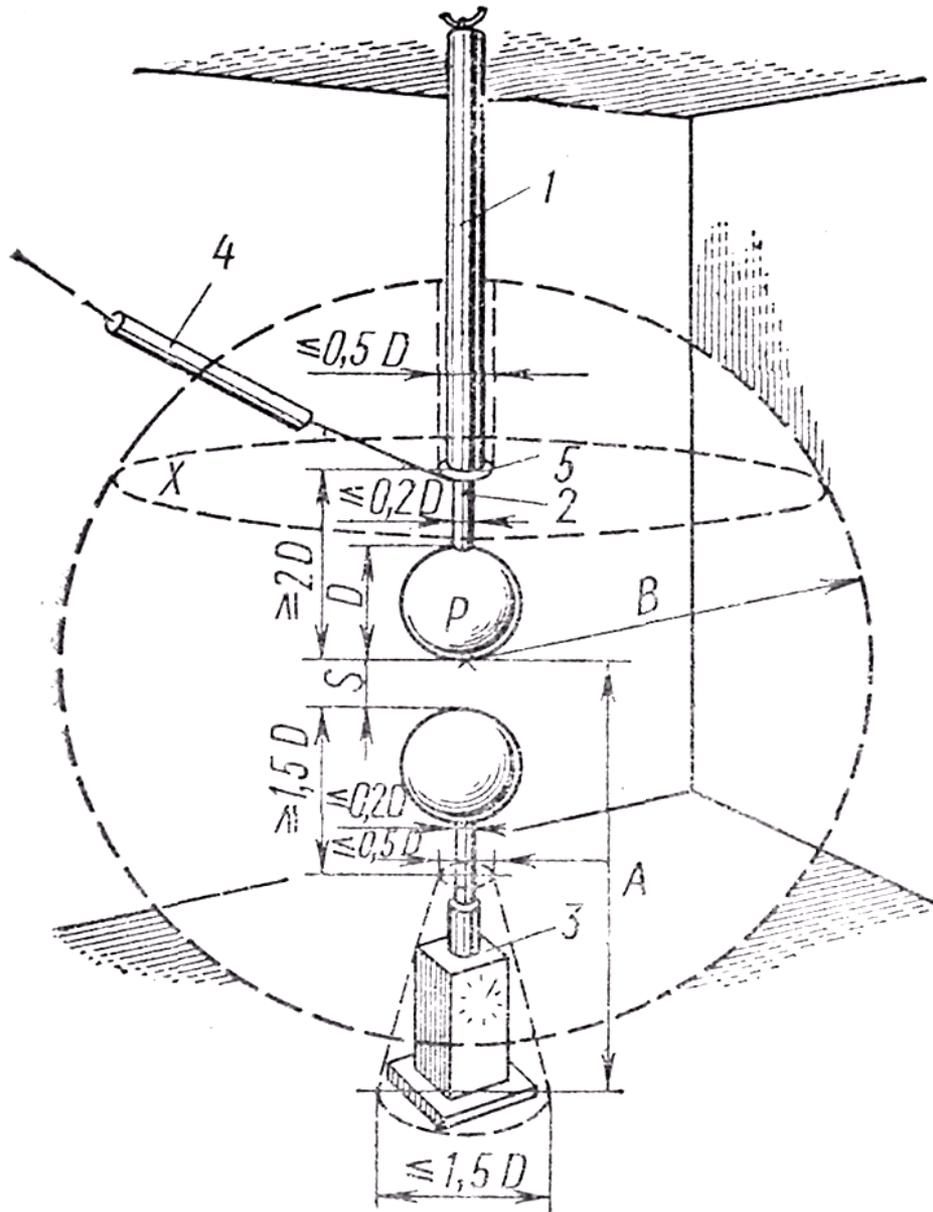
Для этого параллельно защищаемому объекту включается воздушный разрядник (например, вентильный разрядник) с пологой ВСХ.

Надежная защита будет обеспечиваться, если **ВСХ разрядника (кривая 1) лежит ниже ВСХ защищаемого оборудования (кривая 3) во всем диапазоне времен воздействующего напряжения**

ВСХ защитных разрядников и изоляции:

- 1 — *ВСХ вентильного разрядника (однородное поле);*
- 2 — *ВСХ трубчатого разрядника (резконеоднородное поле);*
- 3 — *ВСХ защищаемого объекта;*
- 4 — *импульс напряжения*

Разряды в газах

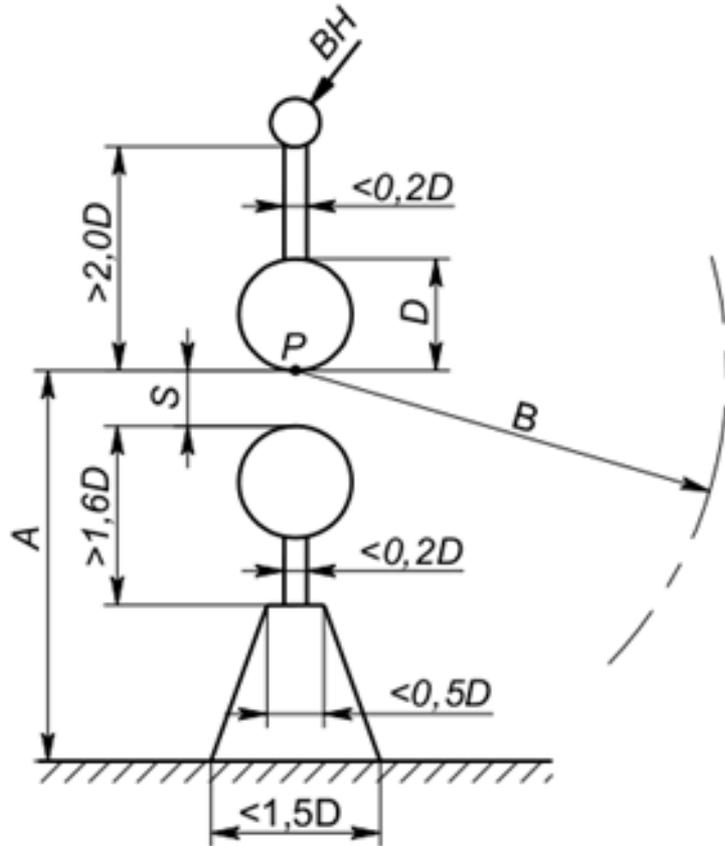


Стандартный шаровой разрядник вертикального типа:

- 1 — поддерживающая изоляционная конструкция;
- 2 — стержень, на который насажен шар;
- 3 — механизм управления и его максимальные размеры;
- 4 — провод высокого напряжения с последовательно,
- 5 — экран для улучшения распределения поля и его максимальные размеры;
- P* — точка искрообразования на шаре высокого напряжения;
- A* — расстояние от точки *P* до заземленной плоскости;
- B* — радиус шаровой поверхности, внутри которой не должны находиться посторонние предметы; *D* — диаметр шара;
- S* — расстояние между шарами



Разряды в газах



Расстояния от измерительных шаров до поверхности земли и до посторонних предметов

Диаметр шаров D , см	Наименьшее значение A	Наибольшее значение A	Наименьшее значение B
6,25	$7D$	$9D$	$14D$
10-15	$6D$	$8D$	$12D$
25	$5D$	$7D$	$10D$
50	$4D$	$6D$	$8D$
75	$4D$	$6D$	$8D$
100	$3,5D$	$5D$	$7D$
150	$3D$	$4D$	$6D$
200	$3D$	$4D$	$6D$

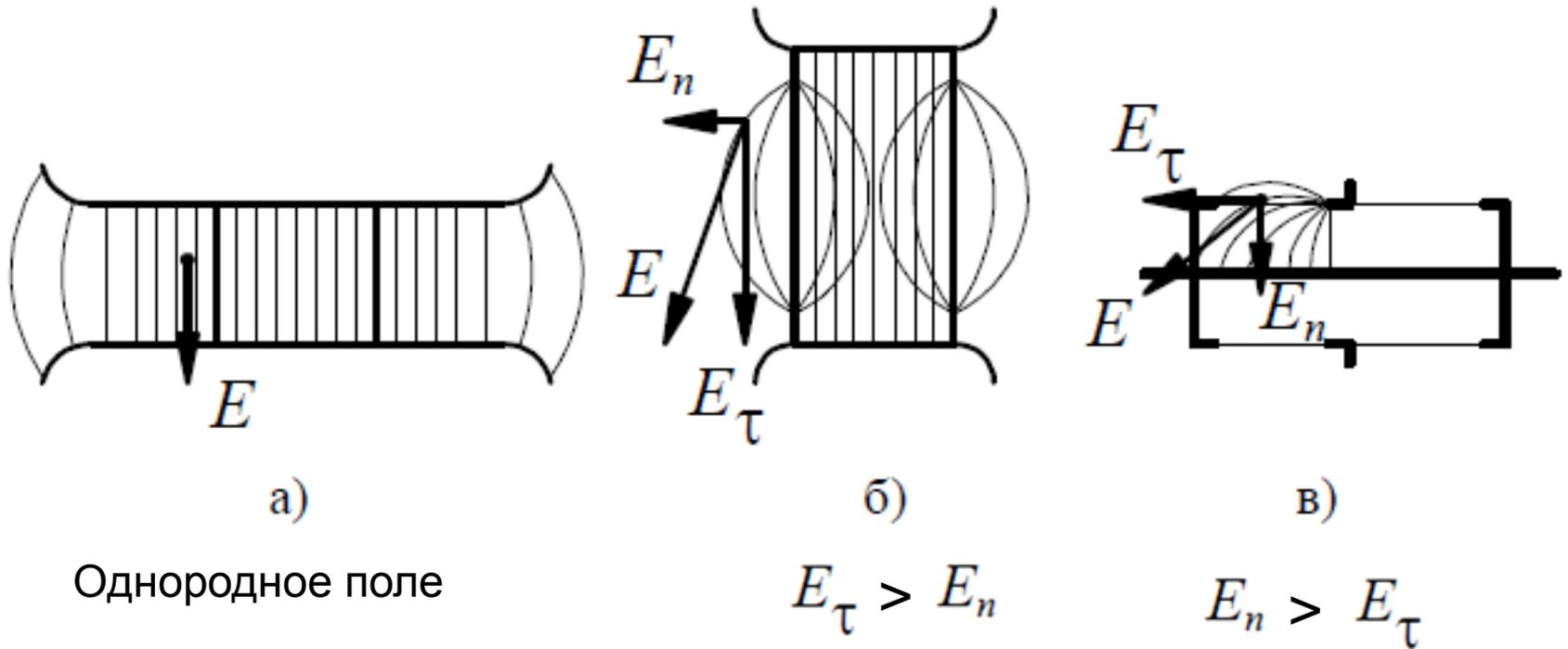
Эскиз стандартных измерительных шаров (вертикальное включение):

ВН - провод от источника измеряемого напряжения;

P - точка максимальной напряженности на поверхности незаземленного шара.



Разряд в воздухе по поверхности изоляторов



Характерные конструкции воздушных промежутков с твердым диэлектриком

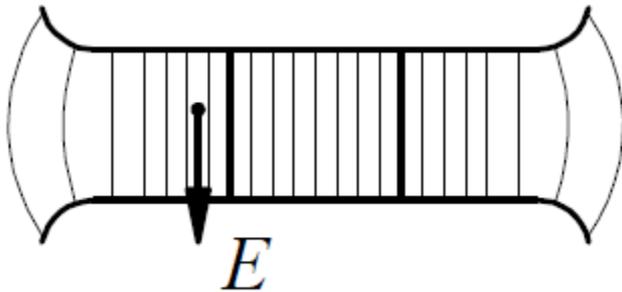
Разряд в воздухе по поверхности изоляторов

В изоляционной конструкции электрическая прочность промежутка с диэлектриком меньше, чем чисто воздушного промежутка.

Это связано с адсорбцией влаги из окружающего воздуха на поверхности диэлектрика, а также с микроразорами между твердым диэлектриком и электродом. Поверхность всех тел во влажном воздухе покрыта тончайшей пленкой воды.

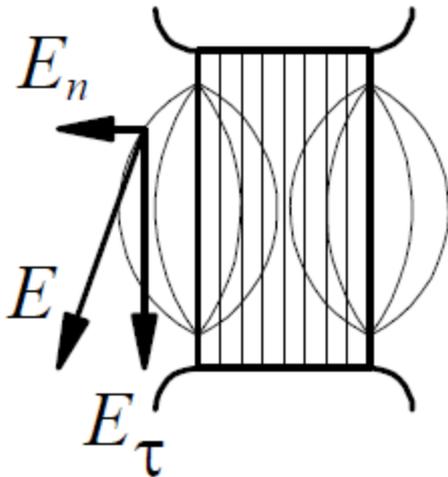
Ионы, образующиеся в этой пленке под действием электрического поля, перемещаются к электродам. В результате этого поле вблизи электродов усиливается, а в середине промежутка ослабляется.

Усиление поля у электродов приводит к снижению электрической прочности промежутка. Это снижение тем больше, чем гигроскопичнее диэлектрик.





Разряд в воздухе по поверхности изоляторов



В изоляционной конструкции поле неоднородное, следовательно, разрядное напряжение меньше, чем в однородном поле.

Влияние гигроскопичности диэлектрика и микрозазоров здесь выражено слабее, так как электрическое поле и без того существенно неоднородно.

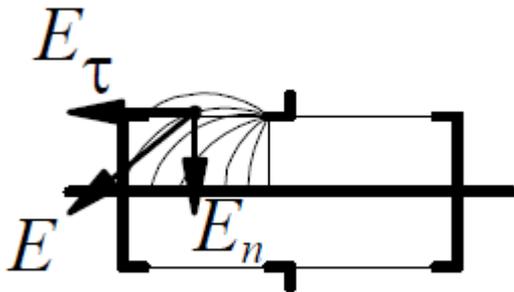
При достаточно большой неоднородности поля в этой изоляционной конструкции возникает коронный разряд. Далее образуется стриммер, его длина со временем возрастает, что приводит к перекрытию изолятора с необратимой потерей им электрической прочности.



Разряд в воздухе по поверхности изоляторов

Электрическая прочность этой конструкции еще меньше.

Каналы стримеров, развивающихся вдоль поверхности диэлектрика, имеют значительно большую емкость по отношению к внутреннему (противоположному) электроду, чем в конструкции с преобладанием тангенциальной составляющей поля.



Через стримерные каналы проходит сравнительно большой ток. При определенном значении напряжения ток возрастает настолько, что температура стримерных каналов становится достаточной для термической ионизации.

Термически ионизированный канал разряда, развивающегося вдоль поверхности диэлектрика, называют каналом **скользящего разряда**.

Скользящий разряд

Длина канала **скользящего разряда** зависит от его проводимости, а следовательно, от значения тока в нем.

Ток зависит от напряжения между электродами, изменения напряжения и **емкости канала стримера относительно противоположного электрода**.

$$l_{\text{СК}} = \chi_1 \cdot C^2 \cdot U^5 \sqrt[4]{\frac{dU}{dt}}$$

χ_1 — коэффициент, определяемый опытным путем;
 C — *удельная поверхностная емкость*
 U — *приложенное напряжение*.

$$C = \frac{\varepsilon \cdot \varepsilon_0 \cdot S}{d} \quad \rightarrow \quad U_p = \chi \cdot L^{0,2} \left(\frac{d}{\varepsilon \cdot \varepsilon_0} \right)^{0,4}$$

Рост длины изолятора дает относительно малое повышение разрядного напряжения. Поэтому для увеличения разрядных напряжений проходных изоляторов уменьшают удельную поверхностную емкость путем увеличения диаметра изолятора у фланца, с которого можно ожидать развития разряда.

Используется также нанесение у фланца полупроводящего покрытия, что способствует выравниванию распределения напряжения по поверхности изолятора - приводит к увеличению разрядных напряжений.

Скользящий разряд

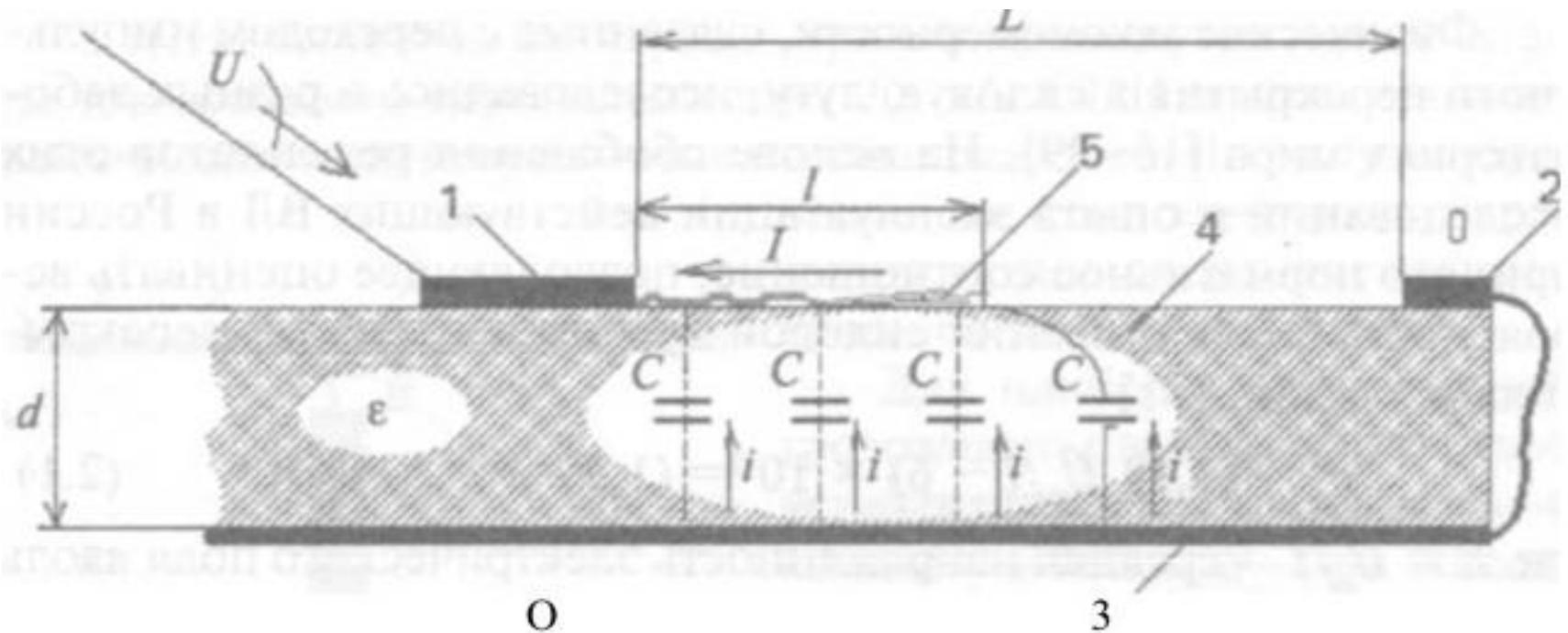


Рис. 2.1 Эквивалентная схема скользящего разряда: 1 — электрод, находящийся под потенциалом U ; 2 — электрод, находящийся под потенциалом 0 ; 3 — проводящая подложка, находящаяся под потенциалом 0 ; 4 — твердая изоляция; 5 — канал разряда



Разряды в газах

Скользкий разряд

<http://tvn-moscow.ru/forum/viewtopic.php?f=48&t=424>

Коронный разряд

Развитие короны при переменном напряжении

