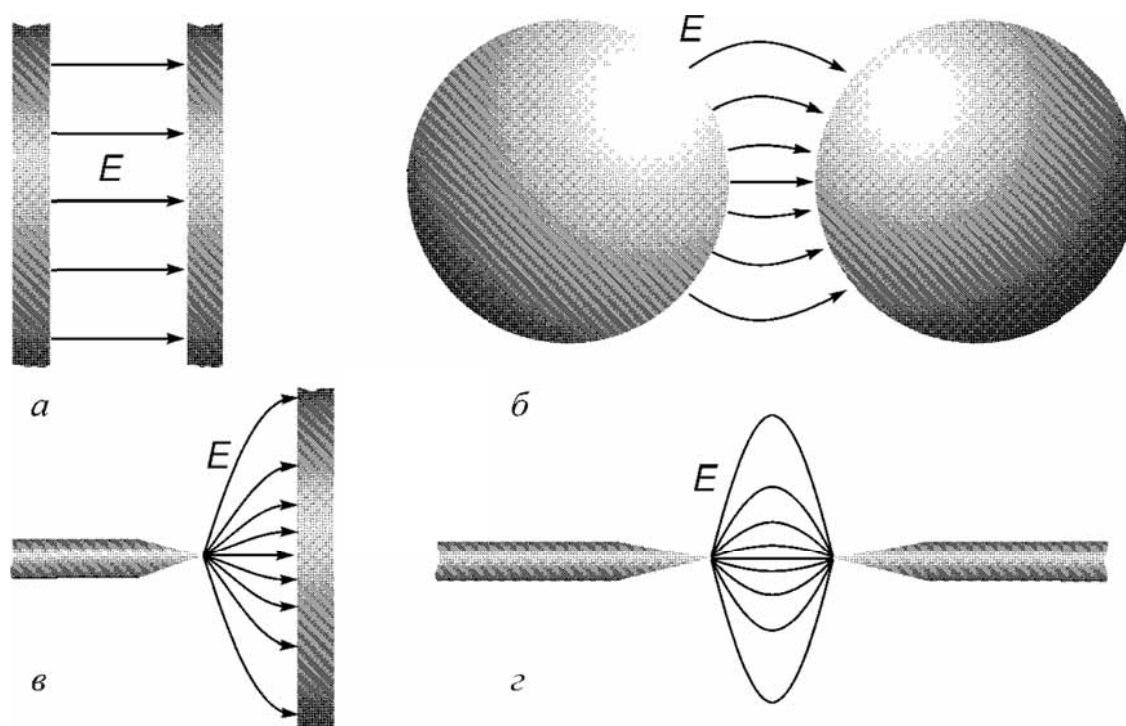


1. РАЗРЯД В СЛАБНЕОДНОРОДНОМ ПОЛЕ

Цель работы: изучение влияния неоднородности электрического поля на разрядное напряжение в слабнеоднородном поле.

1. Краткие сведения

Атмосферный воздух является самым распространенным диэлектрическим “материалом” для создания внешней изоляции энергетического оборудования и электрических аппаратов. Изолируемые электроды располагаются на определенных расстояниях друг от друга и от земли и укрепляются в заданном положении с помощью изоляторов. Разрядное напряжение воздушного промежутка зависит от конфигурации электрического поля между электродами и давления, температуры и влажности воздуха. В связи с этим знание процессов, сопровождающих нарушение электрической прочности воздуха, является весьма важным.



*Рис. 1. Различные конфигурации электрического поля:
а – однородное; б – слабнеоднородное; в, г – резкнеоднородное*

Электрические поля разделяют на однородные, слабнеоднородные и резкнеоднородные (рис. 1). В однородном поле его напряженность постоянна вдоль силовых линий. Слабнеоднородным можно назвать поле, в котором напряженность изменяется вдоль силовых линий не более чем в 2–3 раза. При бóльших значениях изменения напряженно-

сти электрического поля имеем резконеоднородное поле. Степень неоднородности электрического поля между электродами характеризуется коэффициентом неоднородности K_H , который равен отношению максимальной напряженности $E_{\text{макс}}$ к средней напряженности $E_{\text{ср}}$ поля между электродами:

$$K_H = \frac{E_{\text{макс}}}{E_{\text{ср}}}. \quad (1)$$

Средняя напряженность есть отношение напряжения, приложенного к электродам U к расстоянию между электродами S :

$$E_{\text{ср}} = \frac{U}{S}. \quad (2)$$

Максимальная напряженность зависит от формы, размеров электродов, способа их подключения и расстояния между ними. Рассмотрим промежуток между двумя электродами в газе с однородным полем. Если в этом промежутке появился электрон, то, двигаясь к аноду, при достаточной напряженности электрического поля он может при столкновении ионизировать молекулу газа. В результате этого появляется новый свободный электрон, который вместе с начальным ионизирует новые молекулы, и число свободных электронов непрерывно нарастает. Процесс роста числа электронов, движущихся к аноду, получил название лавины электронов. Интенсивность размножения электронов в лавине количественно характеризуется коэффициентом ударной ионизации α , численно равным числу ионизаций, производимых одним электроном на пути в 1 см по направлению электрического поля.

В однородном поле число электронов в лавине:

$$n = e^{\alpha x}, \quad (3)$$

где n – число электронов в лавине; x – расстояние, пройденное лавиной; α – коэффициент ударной ионизации.

$$\alpha = \frac{0,2}{\delta} (E - 24,5\delta)^2, \quad (4)$$

где δ – относительная плотность воздуха, E – напряженность поля [кВ/см],

$$\delta = \frac{P \cdot T_0}{P_0 \cdot T}, \quad (5)$$

где P и T – давление и температура в условиях опыта, P_0 и T_0 – нормальные атмосферные условия, $P_0 = 760$ мм рт. ст., $T_0 = 293$ К.

Под действием внешних ионизаторов (космические частицы, радиоактивное излучение земли, ультрафиолетовое излучение солнца) в промежутке между электродами непрерывно возникают свободные первичные электроны, которые дают начало лавинам электронов. После достижения лавиной анода процесс может прекратиться, особенно при небольшой длине промежутка. Для поддержания лавинного процесса должен появиться хотя бы один вторичный эффективный электрон, вызывающий появление новых лавин. Такой электрон может образоваться вновь в результате действия внешнего ионизатора, в этом случае разряд называется несамостоятельным. Если же вторичный эффективный электрон возникает даже в отсутствие внешнего ионизатора, разряд называется самостоятельным. При самостоятельной форме разряда лавинный процесс возобновляется, поскольку сама первичная лавина создает условия для его возобновления:

- 1) оставшиеся после прохождения лавины положительные ионы, двигаясь к катоду, бомбардируют его и вызывают эмиссию электронов из катода;
- 2) возбужденные атомы и молекулы, образующиеся наряду с ионизацией, испускают фотоны, которые могут приводить как к фотоионизации в объеме промежутка, так и к фотоэмиссии электронов из катода. Образующиеся таким образом вторичные электроны приведут снова к образованию лавин в разрядном промежутке.

Условие самостоятельности разряда в однородном поле можно записать

$$\gamma \cdot e \alpha S \geq 1, \quad (6)$$

где S – расстояние между электродами; γ – коэффициент вторичной ионизации. Напряжение, при котором в промежутке выполняется условие самостоятельности разряда, называют начальным напряжением. В процессе развития лавины непрерывно увеличивается число электронов и положительных ионов, при этом напряженность электрического поля на фронте лавины возрастает, а в задней ее части уменьшается (рис. 2). При прохождении лавиной некоторого критического пути $x_{кр}$ напряженность в задней части лавины уменьшается настолько, что становится невозможной ударная ионизация. Находящиеся в хвосте лавины отставшие электроны вместе с положительными ионами создают плазменное образование, дающее начало возникновению стримерного канала. В зависимости от условий стример может быть связан с электродом или не связан. Характерной его особенностью в любом случае является наличие избыточного заряда на конце, создающего местное усиление электрического поля и обеспечивающего непрерывное удлинение плазменного канала.

Критерием перехода лавины в стример является соизмеримость напряженности электрического поля, создаваемого лавиной электронов или положительными ионами в ее следе, и напряженности внешнего поля, создаваемого приложенным между электродами напряжением. Ионизация прекращается ($\alpha \leq 0$), если $E \leq b\delta$ (для воздуха $b = 24,5$ кВ/см, см. (4)). Напряженность в задней части лавины равна

$$E = E_0 - E_{л}, \quad (7)$$

где E_0 – напряженность внешнего поля; $E_{л}$ – напряженность, создаваемая лавиной.

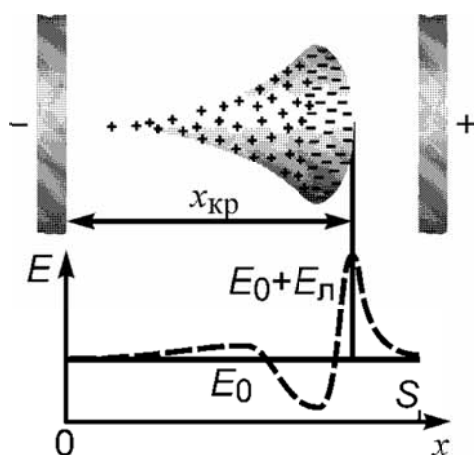


Рис. 2. Искажение электрического поля в промежутке между электродами, создаваемое лавиной:
 E_0 – напряженность внешнего поля;
 $E_{л}$ – напряженность поля, создаваемая лавиной

Тогда критерий перехода лавины в стример запишется как

$$(E_0 - E_{л}) \leq b\delta. \quad (8)$$

Напряженность $E_{л}$ определяется по формуле

$$E_{л} = \frac{e \cdot n}{4\pi \cdot \epsilon_0 \cdot r^2}, \quad (9)$$

где e – заряд электрона; n – число электронов в лавине; $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м – электрическая постоянная; r – радиус лавины.

В однородном поле условие самостоятельности разряда выполняется при начальном напряжении, которое всегда совпадает со статистическим разрядным напряжением. В слабонеоднородных полях эффективный коэффициент ударной ионизации $\alpha_{эфф} > 0$ практически по всей длине промежутка, поэтому при выполнении самостоятельности разряда промежуток пробивается, и начальное напряжение также равно разрядному.

Типовым промежутком со слабонеоднородным полем является промежуток между двумя шарами, который получил широкое распространение в мировой практике как универсальный прибор для измерения амплитудных значений постоянного, переменного и импульсного напряжения. Установлено, что для соблюдения точности измерений в пределах $\pm 3\%$ максимально допустимое значение отношения S/D (D – диаметр шара) при измерениях не должно превышать 0,5. В этом случае неоднородность поля невелика и в первом приближении его можно считать квазиоднородным ($K_n \approx 1$). При увеличении расстояния между шарами ($S/D > 0,5$) неоднородность поля (и соответственно K_n) возрастает и заметно влияет на величину разрядного напряжения, что позволяет оценить коэффициент неоднородности электрического поля. Напряженность поля в этом случае имеет максимальное значение на поверхности электродов, а минимальное – в середине промежутка.

2. Порядок работы

1. Ознакомиться с устройством испытательной установки, схема которой представлена на рис. 3.

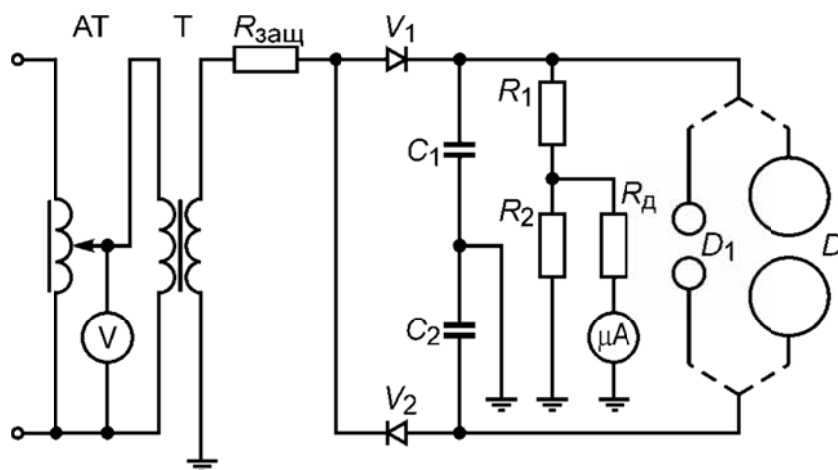


Рис. 3. Схема экспериментальной установки:

AT – автотрансформатор; *T* – высоковольтный трансформатор; *R_{защ}* – защитное сопротивление; *V₁*, *V₂* – выпрямители; *C₁*, *C₂* – фильтр; *R₁*, *R₂* – высоковольтный омический делитель; *R_д* – добавочное сопротивление; *V* – вольтметр; *μA* – микроамперметр; *D*, *D₁* – испытываемые электроды

2. Установить в держатели электродов шары диаметром $D = 12,5$ см.
 3. Между шарами поочередно устанавливать расстояния S (1–5 см), включать установку и плавно увеличивать напряжение до тех пор, пока не произойдет разряд в промежутке. В этот момент фиксировать разрядное напряжение U . Для каждого расстояния S провести три измерения и результаты занести в табл. 1. Рассчитать среднее значение раз-

рядного напряжения $U_{\text{ср}}$ для каждого расстояния S . Во время измерений по п. 3 необходимо выполнять условие $S/D < 0,5$, чтобы поле между шарами оставалось квазиоднородным. Тогда, при некотором допущении, можно принять, что

$$E_{\text{макс}} \cong E_{\text{ср}} = \frac{U_{\text{ср}}}{S}. \quad (10)$$

4. В испытательной установке заменить шары диаметром 12,5 см на шары диаметром $D_1=5$ см. Установить расстояние между шарами на 1–3 см больше величины S в первом опыте п. 3. Включить установку и плавно увеличить напряжение до значения $U_{\text{ср}}$, рассчитанного для первого опыта п. 3, а затем сближать шары до получения между ними разряда. Измерить расстояние между шарами S_1 . Измерения повторять три раза для каждого из расстояний S п. 3, результаты занести в табл. 1.

5. Рассчитать среднее значение расстояния $S_{1\text{ср}}$ для каждого разрядного напряжения $U_{\text{ср}}$. Учитывая, что $E_{\text{ср}} = U_{\text{ср}}/S_{1\text{ср}}$, определить коэффициент неоднородности электрического поля $K_{\text{н}} = E_{\text{макс}}/E_{\text{ср}}$.

Таблица 1

S , см	$D = 12,5$ см						$D = 5$ см					
	U , кВ			$U_{\text{ср}}$, кВ	$E_{\text{макс}}$, кВ/см	$K_{\text{н}}$	S_1 , см			$S_{1\text{ср}}$, см	$E_{\text{ср}}$, кВ/см	$K_{\text{н}}$
	1	2	3				1	2	3			
1						1						
2						1						
3						1						
4						1						
5						1						

3. Содержание отчета

1. Построить на одном графике зависимости $U = f(S)$, $U = f(S_1)$.
2. Построить зависимости $K_{\text{н}} = f(S)$, $K_{\text{н}} = f(S_1)$.
3. Объяснить ход зависимостей $U = f(S)$ и $U = f(S_1)$.
4. Ответить на контрольные вопросы.

4. Контрольные вопросы

1. Что такое коэффициент неоднородности электрического поля?
2. Что называется лавиной электронов?
3. В чем заключается условие самостоятельности разряда в газах?
4. Что называется коэффициентом ударной ионизации?
5. Почему при измерении напряжения используются электроды шар–шар, а не плоскость–плоскость?