

УДК 537.523.3:537.212

К ОПРЕДЕЛЕНИЮ ТОЛЩИНЫ ЧЕХЛА КОРОНЫ**БАХТАЕВ Ш.А.***ОО «Ассоциация ученых и изобретателей Республики Казахстан «Табигат-Ая»»*

Вопросы определения и расчета толщины коронирующего слоя (чехла) коронного разряда являются актуальными для описания ионизационных явлений в чехле короны, так как существующие зависимости толщины чехла (d) короны от силы тока разряда и размеров коронирующего электрода играют существенную роль в процессах электросинтеза в коронном разряде. В связи с этим, авторами предложен и разработан ряд методов для определения толщины коронирующего слоя и выполнено сравнение полученных значений с известными данными [1].

Известен способ определения толщины чехла коронного разряда в коаксиальных цилиндрических электродах по интенсивности свечения чехла короны, измеряемой фотоэлектрическим или фотографическим методами [2]. При этом оказалось, что толщина коронирующего слоя (чехла) не зависит от приложенного напряжения и представляется в виде $1,56 r_0^{0,65}$, где r_0 – радиус центрального электрода в см.

Предложенному способу при фотоэлектрическом измерении присущи следующие недостатки, которые существенно снижают точность определения толщины чехла короны:

- максимальный уровень измеренной кривой распределения яркости чехла по радиусу отличается от уровня края чехла более, чем 10^3 раз;

- ввиду применения УФ-линз преимущественно измеряется свечение внутренней части чехла короны, где протекает интенсивная ионизация и возбуждение атомов и молекул газа, что приводит к неопределенности границы края чехла короны.

При фотографическом методе измерения из-за необходимости принятия специальных мер еще больше усложняется измерительная аппаратура, что приводит к снижению точности определения толщины чехла короны [3].

1. Разработан метод для определения толщины чехла коронного разряда, в котором исходными являются условия самостоятельности разряда при общепринятых аппроксимациях:

$$\alpha / p = f(E / p) \quad (1)$$

для атмосферного воздуха при давлении p , где E – напряженность поля, α – первый ионизационный коэффициент Таунсенда, который равен среднему числу новых электронов, создаваемых первичными и вторичными электронами при прохождении их 1 см пути в направлении электрического поля. Кроме того, приняты следующие допущения [4]:

А. Напряженность поля на поверхности коронирующего электрода непосредственно в момент зажигания коронного разряда E_0 не зависит от расстояния до внешнего электрода.

Б. Напряженность электрического поля на расстоянии d от поверхности коронирующего электрода E_i , примерно равна той, при которой происходит пробой в однородном поле:

$$E_i = 31 \text{ кВ/см}$$

В. Напряженность поля E непосредственно перед моментом зажигания разряда распределена по гиперболическому закону и для случая электродов в виде концентрических цилиндров записывается следующим образом:

$$Er = E_0r_0 \quad \text{или} \quad E_1r_1 = E_0r_0, \quad (2)$$

где r_0 – радиус коронирующего провода, r_1 – радиус коронирующего слоя ($d=r_1-r_0$).

Рассмотрим зажигание коронного разряда как осуществление условия самостоятельности лавинного разряда

$$\gamma \left[\exp \left(\int_{r_i}^{r_0} \alpha dr \right) - 1 \right] = 1 \quad (3)$$

в некотором слое воздуха, заключенном между поверхностью коронирующего провода и цилиндрической поверхностью, проведенной в той точке промежутка, где напряженность поля в момент зажигания коронного разряда равна E_i . Физический смысл такого рассмотрения понятен и учитывает первые два принятых выше допущения. Здесь γ – второй коэффициент Таунсенда, который означает среднее число вторичных электронов из катода в результате γ – процессов на его поверхности (положительные ионы, фотоны и метастабильные атомы). Для расчета (3) может быть принято табличное значение $\gamma = 1 \cdot 10^{-4}$, которое близко соответствует данным известных авторов [5].

Третье допущение позволяет определить пределы интегрирования в уравнении (3), когда известны или установлены значения E_i и r . Затем, подставляя в уравнение (3) значения α/p , выраженные через E/p , и решая его, определим радиус коронирующего слоя, т.е. толщину чехла короны $d = r_1 - r_0$.

Известные эмпирические формулы зависимости (1) не могут быть использованы для определения α/p в ионизационной области (чехол) униполярной короны на микропроводе, когда значения E/p меняются непрерывно от высоких (вплоть до 500) до низких значений (30 – 40 В/см·мм рт.ст.). В этом случае необходимо воспользоваться методом кусочной аппроксимации определения значений α/p в различных диапазонах изменений значений E/p в коронирующем слое. Для этого условие (3) удобно переписать в виде:

$$\int_{r_0}^{r_i} \alpha dr = \ln \frac{1+\gamma}{\gamma}$$

и, подставляя его в виде суммы интегралов с обратным порядком слагаемых, получим:

$$\int_{r_0}^{r_i} \alpha dr + \int_{r_3}^{r_2} \alpha dr + \dots + \int_{r_0}^{r_1} \alpha dr = \ln \frac{1+\gamma}{\gamma}, \quad (4)$$

где участки интегрирования (r_1-r_2) , (r_2-r_1) и т.д., вплоть до поверхности коронирующего электрода, где E_0 и r_0 , соответствуют эмпирическим зависимостям $\alpha/p = f(E/p)$ в этом отдельном диапазоне изменений E/p . Воспользуемся экспериментальной кривой этой зависимости, построенной по данным [5].

Первый участок кривой, когда E/p меняется от 35 до 165, соответствует эмпирической формуле Таунсенда [5]:

$$a/p = 8 \exp\left(-\frac{236,7}{E/p}\right). \quad (5)$$

Остальная часть кривой состоит из отдельных прямолинейных отрезков, которые, каждый в отдельности, описываются следующими эмпирическими формулами [6]:

При $165 < E/p < 325 \text{ В/см мм рт. ст.}$:

$$a/p = 0,016E/p - 0,58. \quad (6)$$

При $325 < E/p < 415 \text{ В/см мм рт. ст.}$:

$$a/p = 0,013E/p + 0,475. \quad (7)$$

При $425 < E/p < 500 \text{ В/см мм рт. ст.}$:

$$a/p = 0,0094E/p + 2,1. \quad (8)$$

несоответствие которых с экспериментальными данными, взятыми из [4], не превышает 2%, что также относится к точкам сшивания прямолинейных отрезков между собой.

Аналитическая форма суммы интегралов (4) в явном виде для аппроксимаций зависимостей $a/p = f(E/p)$ типа (5-8) будет:

$$\int_{r_2}^{r_i} 8p \cdot \exp(-236,7p/E) dr + \int_{r_3}^{r_2} (0,016E - 0,58p) dr + \int_{r_4}^{r_3} (0,013E - 0,475p) dr + \int_{r_0}^{r_4} (0,0094E + 2,1p) dr = \ln \frac{1+\gamma}{\gamma}, \quad (9)$$

где пределами интегрирования служат $r_2(165) = E_i r_i / 165p$, $r_3(325) = E_i r_i / 325p$, $r_4(415) = E_i r_i / 415p$. Заменяя $E = E_i r_i / r$, подставляя значение $E_i = 31 \text{ кВ/см}$, $p = 760 \text{ мм рт ст.}$, $\gamma = 1 \cdot 10^{-4}$ и, решая уравнение (9) относительно r_i , находим выражение для чехла короны:

$$r_i = \frac{1 + 172r_0}{-35 - 32 \ln r_0}, \quad (10)$$

которое позволяет определить расчетные значения толщины чехла короны d [6].

2. Одним из возможных подходов к исследованию коронного разряда является изучение особенностей его характеристик при приложении к разрядному промежутку одновременно высоковольтного постоянного и малого по величине высокочастотного (ВЧ) переменного напряжения. Зондирование переменным напряжением высокой частоты с малой амплитудой позволяет исследовать динамические характеристики коронирующего промежутка и, в частности, определить зависимости ВЧ-проводимости коронного разряда от частоты переменного напряжения. Этим методом удалось установить области частот аномальной проводимости короны, тесно связанные с основными физическими параметрами зоны коронирующего слоя (чехла короны) [6].

Методика определения зависимости ВЧ-проводимости (q_d) коронного разряда от частоты переменного напряжения была следующей: сначала измерялся емкостной ток через коронно-разрядный промежуток при подаче переменной составляющей напряжения во всем диапазоне частот (от 0,2 до 1,5 МГц). Затем на коронно-разрядный промежуток подавался высокий потенциал и при определенной, заранее установленной

величине постоянного тока коронного разряда производилось измерение суммарного сигнала – переменной составляющей тока в том же диапазоне частот. Соответствующая емкостная составляющая тока вычиталась из суммарной, и по этой разности строились кривые ВЧ-проводимости короны в зависимости от частоты переменного напряжения. ВЧ-проводимость коронирующего промежутка определялась отношением значения переменной составляющей тока короны к величине приложенного переменного напряжения.

При построении частотной зависимости ВЧ-проводимости короны по арифметической разности между суммарным током и током смещения (емкостной) было установлено, что значения q_d могут быть больше или меньше, или равны значению ВЧ-проводимости разрядного промежутка при отсутствии постоянного тока короны (q_e).

Для нас наибольший интерес представляет область частот, когда $q_d = q_e$, что, в первую очередь, связано с электронной составляющей тока в чехле коронного разряда. В этом случае как бы наступает резонанс плазмы в чехле короны, т.е. сопротивление зоны чехла короны на переменном напряжении становится минимальным (резонанс напряжения) и значение q_e сравнивается с q_e . Установлено, что частота f_0 , при которой $q_d - q_e = 0$, очень чувствительна к изменениям толщины коронирующего электрода и тока коронного разряда. Это означает, что f_0 , в первую очередь, будет зависеть от значения скорости дрейфа электронов, их плотности и изменения длины свободного пробега электронов в коронирующем слое разрядного промежутка.

Исходя из полученных экспериментальных данных и теоретических выкладок, для положительной короны в цилиндрической системе электродов была выведена расчетная формула для толщины коронирующего слоя (чехла):

$$L_e = \sqrt{\frac{0,7K_e U_0}{f_0 \ln(R/r_0)}}, \quad (11)$$

где r_0 и R – радиусы коронирующего и внешнего электродов, см; K_e – подвижность электронов в чехле короны, $\text{см}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$; f_0 – резонансная частота при $q_d = q_e$, Гц; U_0 – действующее значение переменного напряжения, В.

Таким образом, при постоянстве значения тока коронного разряда и известных значениях R , r_0 , U_0 , K_e и f_0 выведенная расчетная формула позволяет определить толщину чехла короны для данной конфигурации электродов. При других размерах и формах электродной системы также выводится расчетная формула для определения L_e , исходя из распределения электрического поля и зоны дрейфа электронов в коронирующем слое с учетом расположения границы чехла короны в области с напряженностью поля 31 кВ/см (минимальное пробойное напряжение между электродами на расстоянии 1 см).

Для определения толщины чехла короны использованы разрядные камеры в виде цилиндра диаметром от 2 до 36 мм, а центральным коронирующим электродом служили микропроволоки из вольфрама диаметром от 5 до 50 микрон (мкм). От генератора типа ГС-100И подается в камеру переменное синусоидальное напряжение с регулируемой частотой от 200 кГц до 1,5 МГц. Высокое напряжение в камеру подается от высоковольтного источника типа ВС-23. Параметры выходного переменного напряжения измеряются на нагрузке 1 кОм с помощью осциллографа ДЭСО-2, вольтметра ВЗ-2А и измерителя частоты ЧЗ-22. Ток короны устанавливался предварительно по микроамперметру А1244 класса 0,2, который затем отключался с целью исключения влияния паразитных емкостей и наводок на точность измерения основного сигнала. Амплитуда переменного высокочастотного напряжения выбиралась в пределах от 2 до 100 В в зависимости от крутизны характеристики положительной короны и геометрических размеров разрядного промежутка.

Значение f_0 ($q_d = q_e$) для данной конфигурации электродов и при постоянстве характеристик коронного разряда (постоянство тока разряда и атмосферных условий) находится следующим образом: сначала определяются зависимости ВЧ-проводимости разрядного промежутка (q_e – емкостная) от частоты переменного напряжения при отсутствии коронного разряда. Затем, строятся зависимости ВЧ-проводимости при присутствии коронного разряда (q_d) и по совпадению $q_d = q_e$ находят значение f_0 , которое является расчетным значением для определения толщины чехла коронного разряда.

Экспериментальные значения f_0 были определены для коронного разряда в цилиндрической системе электродов, когда $R=0,2$ см, $U_0=10$ В, $I=20$ мкА, а для $K_e=540$ см²/(В·с) принято его среднее значение в чехле короны при нормальных условиях атмосферного воздуха в Алматы ($p=690$ мм рт.ст., $T=20$ °С). В таблице приведены полученные значения f_0 для различных r_0 и расчетные значения толщины чехла короны L_e , а для сравнения представлены значения L_e , рассчитанные по известной формуле $1,56 r_0^{0,56}$.

$r_0, \text{см}$	$5 \cdot 10^{-4}$	$15 \cdot 10^{-4}$	$30 \cdot 10^{-4}$	$50 \cdot 10^{-4}$
$f_0, \text{Гц}$	$1450 \cdot 10^3$	$1250 \cdot 10^3$	$810 \cdot 10^3$	$300 \cdot 10^3$
$L_e, \text{см}$	$20,63 \cdot 10^{-3}$	$24,15 \cdot 10^{-3}$	$30,1 \cdot 10^{-3}$	$56,13 \cdot 10^{-3}$
$1,56 r_0^{0,56}, \text{см}$	$11,1 \cdot 10^{-3}$	$22,82 \cdot 10^{-3}$	$28,02 \cdot 10^{-3}$	$52,4 \cdot 10^{-3}$
$d, \text{см}$	$50 \cdot 10^{-3}$	$58 \cdot 10^{-3}$	$70 \cdot 10^{-3}$	$88 \cdot 10^{-3}$

Данные таблицы показывают, что резонанс плазмы чехла короны наступает при различных частотах в зависимости от значения r_0 , которое определяет, в первую очередь, величину толщины коронирующего слоя (чехла) коронного разряда. Как и следовало ожидать, значения L_e , полученные по предлагаемому способу, несколько превышают для того же ряда радиусов r_0 известные данные L_e [7].

В таблице приведены значения d , рассчитанные по формуле (10), которые получены исходя из начального напряжения зажигания коронного разряда, когда выполняется условие самостоятельности лавинного разряда (3). В этом случае d имеет более высокие значения по сравнению с другими данными, что объясняется дальним распределением электронных лавин, чем принятая граница коронирующего слоя (31 кВ/см) по второму допущению.

-
1. *Бахтаев Ш.А.* «Процессы коронного разряда на микроэлектродах и электротехнологические аппараты с их использованием», докт. дисс., Алматы, АИЭС, 2004.
 2. J. Phys.D: Appl. Phys., 15 (1982), pp.639-653.
 3. *Джусварлы Ч.М., Горин Ю.В., Мехтизаде Р.Н.* Коронный разряд в электроотрицательных газах. Баку, Элм, 1988, 144 с.
 4. *Бортник И.М.* К обоснованию формулы Пика //Журнал технической физики, 1964, т.34, №4, с.131-136.
 5. *Лёб Л.* Основные процессы электрических разрядов в газах. Пер. с англ. М.-Л., Гостехиздат, 1950, 672 с.
 6. *Бахтаев Ш.А.* Коронный разряд на микропроводах. АлмаАта, Наука, 1984, 208с.
 7. Способ определения толщины чехла короны, Предпатент РК. Бахтаев Ш.А., Боканова А.А., Ермагамбетов С.Б. и др. Бюлл. №2, 16.02.2004.

TAC BOŞALMASI ÖRTÜYÜNÜN QALINLIĞININ TƏYİNİ

BAXTAYEV Ş.A.

Ümumi qəbul olunmuş aproksimasiya üzrə qazboşalmasının sərbəstliyi ilkin şərt olduğu halda tac boşalmasının örtüyünün təyin edilməsi üsulu işlənmişdir.

DEFINITION OF THICKNESS OF A CORONA DISCHARGE JACKET

BAKHTAYEV Sh.A.

The method for definition of thickness of a corona discharge jacket is developed in which conditions of the discharge independence at the standard approximations are initial.