

## РЕЗУЛЬТАТЫ ЗОНДОВЫХ ИЗМЕРЕНИЙ ПОТЕНЦИАЛА НА ПОВЕРХНОСТИ ДИЭЛЕКТРИКА В ПРОМЕЖУТКЕ С УНИПОЛЯРНЫМ КОРОННЫМ РАЗРЯДОМ

© 2003 В.П. Шорин, О.А. Журавлев, А.В. Ивченко

Самарский государственный аэрокосмический университет

Приведены результаты регистрации распределения потенциала на поверхности односторонне фольгированной диэлектрической пленки в поле отрицательной короны постоянного напряжения при изменении ширины разрядного промежутка. С помощью методов электрографической визуализации зарядовых рельефов и зондовых измерений показано, что с увеличением высоты игольчатого коротрона наблюдается возрастание потенциала на периферии зарядового пятна. При этом в средней части радиуса зарядового пятна происходит снижение градиента потенциала на подложке. Полученные результаты способствуют развитию физической модели зарядовых рельефов, играющих определяющую роль в стабилизации газоразрядных процессов униполярной барьерной короны.

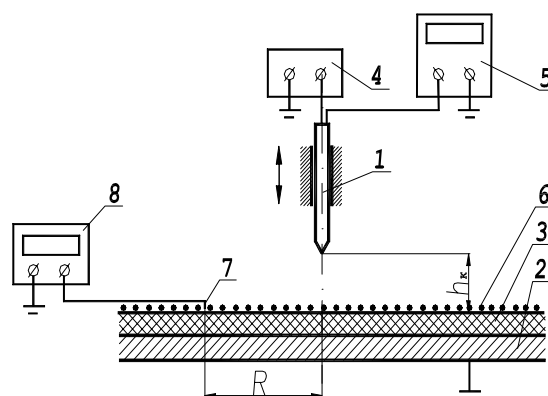
Задача о распределении потенциала на поверхности диэлектрического барьера в поле униполярного коронного разряда (УКР), формируемого в электродной системе “игольчатая плоскость”, актуальна для построения моделей разрядов, ограниченных диэлектриком. Так, в работе [1] для барьерной короны отмечается эффект трансформации внешней разрядной зоны, выражающийся в растекании коронного разряда по поверхности диэлектрика. Ранее аналогичный результат для УКР был получен в [2], где процесс расширения внешней зоны коронного разряда был установлен на основании изучения закономерностей продвижения радиальных электрографических структур на поверхности подложки. Попытка аналитического описания наблюдаемого процесса непрерывного расширения порошковых структур в поле затухающего УКР была предпринята в [3].

В настоящей работе приведены результаты регистрации распределения потенциала на поверхности диэлектрической подложки, расположенной в поле отрицательной короны постоянного напряжения  $U_k$  при изменении ширины разрядного промежутка  $h_k$ .

Эксперименты по регистрации потенциала производились на установке, схема которой приведена на рис. 1. Коронирующий электрод-игла 1 располагался над поверхностью заземленного металлического экрана 2, на который помещалась диэлектрическая поли-

имидная пленка 3 толщиной  $d=40$  мкм. Коротрон 1 устанавливался с возможностью вертикального перемещения, в результате которого изменялась ширина разрядного промежутка  $h_k$ . Перемещение коротрона 1 осуществлялось с помощью микрометрического винта с точностью установки 0,1 мм.

Напряжение на коронирующий электрод подавалось от высоковольтного источника питания 4 и контролировалось с помощью электростатического вольтметра 5 типа С-197. Границы зарядового рельефа на диэлектрике визуализировались с помощью предва-



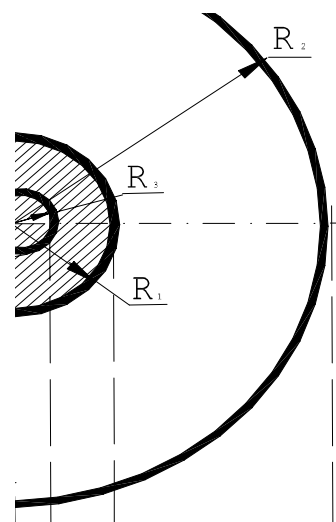
**Рис.1.** Схема экспериментальной установки: 1-коронирующий электрод-игла; 2- металлический экран; 3- диэлектрик; 4-высоковольтный блок питания; 5- электростатический вольтметр С-197; 6-монослой электрографического порошка; 7-контактный зонд; 8-электростатический вольтметр С-95/8 или С-95/3

рительно нанесенного монослоя проявляющего порошка 6, частицы которого представляли собой стеклянные шарики  $\text{Ø}60$  мкм. Наличие на диэлектрике порошковых уплотнений могло приводить к экранированию получаемого зарядового рельефа, что ограничивает применение бесконтактных электроиндукционных методов [4]. Поэтому величина потенциала зарядовой структуры, выявленной на диэлектрике электрографическим методом, контролировалась с помощью контактного зонда 7, подключенного к электростатическому вольтметру 8.

Контактный зонд был выполнен в виде цилиндрического проводника  $\text{Ø}2$  мм, имеющего изоляцию на образующей. Для предотвращения развития коронного разряда с торца измерительный наконечник имел скругление радиусом 1 мм. В случае измерения потенциала при наличии на коронирующем электроде напряжения зонд подключался непосредственно к электростатическому вольтметру С-95/8 с измерительным диапазоном от 0 до 3 кВ (рис.1). Исследование распределения потенциала остаточных зарядовых структур выполнялось аналогичным образом при применении электростатического вольтметра С-95/3 с пределом измерения до 150В.

В исходном положении коротрон 1 устанавливался на расстоянии  $h_k \leq 0,5$  мм от поверхности диэлектрической подложки 3, после чего на него подавалось напряжение  $U_k = -6-8$  кВ. При наличии монослоя проявляющего порошка на диэлектрике под коротроном формировалась электрографическая кольцевая структура с  $R_1 = 15-20$  мм (рис.2). Структура частично была свободная от частиц проявляющего порошка и имела на границе порошковое уплотнение.

Следующий этап эксперимента состоял в равномерном подъеме коронирующего электрода над поверхностью диэлектрика. Такое перемещение коротрона отображалось в поверхностном слое порошка в виде непрерывно расширяющегося фронта кольцевой структуры. Стабилизация границ кольцевой структуры происходила после прекращения подъема коронирующего электрода. О масштабе процесса дают представление следу-



**Рис.2.** Характерные границы электрографических структур на поверхности диэлектрика:  $R_1 = 15-20$  мм - радиус кольцевой структуры сформированной при  $h_k \leq 0,5$  мм и  $U_k = -8$  кВ;  $R_2 \approx 40$  мм - радиус внутренней границы кольцевой структуры после подъема коротрона на  $h_k = 3$  мм;  $R_3 = 5-7$  мм - радиус пятна разрядки диэлектрика на коротрон после снятия напряжения

ющие данные: при напряжении  $U_k = -8$  кВ и  $h_k = 3$  мм внешний фронт кольцевой структуры имел радиус  $R_2 \approx 40$  мм (см. рис.2).

При исследовании распределения потенциала на поверхности диэлектрика определенный интерес представляют результаты измерения потенциала на границе зарядовой структуры, что связано с наличием здесь полярных концевых эффектов [5].

Регистрация потенциала производилась следующим образом. После выявления границ зарядового пятна по возникающим порошковым уплотнениям, без снятия напряжения с коронирующего электрода, производилась поточечная регистрация потенциала на диэлектрической подложке. При измерении зонд перемещался радиально от периферии к центру зарядовой структуры. Зарегистрировав напряжение в конкретной точке, зонд разряжали прикосновением к заземленному экрану, после чего производилось следующее измерение. Взаимное положение зонда и коротрона контролировалось по нанесенной на металлический экран координатной сетке с точностью позиционирования  $\pm 1$  мм.

Аналогичные измерения потенциала

осуществлялись для остаточной зарядовой структуры, возникающей после снятия напряжения с коротрона. Характерно, что в момент снятия напряжения с игольчатого электрода с помощью заземленной штанги под электродом формировался круг радиусом  $R_3=5-7$  мм свободный от порошка (рис.2). Это связывалось с разрядом части осажденного зарядового рельефа непосредственно на коронирующий электрод.

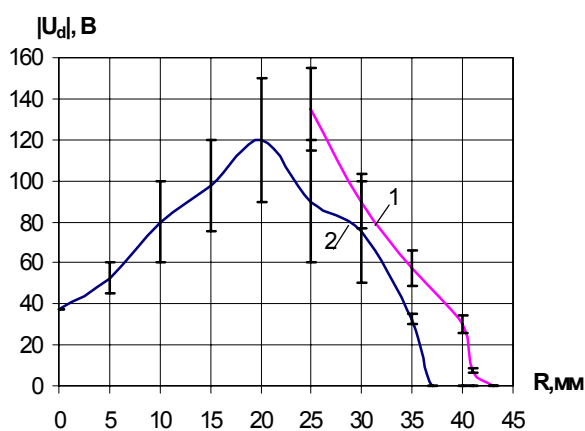
Проводимые измерения показали, что при работающем коронирующем электроде порошковые уплотнения на границе кольцевой структуры имели потенциал  $|U_d|=30-35$ В (рис.3). Характерно, что при снятии напряжения с межэлектродного промежутка наблюдалось смещение потенциальной границы внутрь выявленного электрографическим методом зарядового пятна. Величина смещения границы составляла 5-10 мм (рис.3) после выключения короны с  $U_k=-8$  кВ и  $h_k=3$  мм. Из рис.3 следует, что распределение потенциала на границе зарядовой структуры представляет собой быстро нарастающую функцию, для определения граничных значений которой требуется использование зонда с измерительным электродом меньшего диаметра (50-100 мкм).

Сравнение результатов зондовых измерений потенциала для формируемого коронной и остаточных зарядовых рельефов (рис.3) показывает, что на радиусе  $R=25-30$

мм значения измеряемых величин имеют перекрывающиеся поля допусков. Это позволяет рассматривать здесь потенциал диэлектрика в поле коронного разряда и остаточной зарядовой структуры как близкие по величине значения. Большие погрешности зондовых измерений здесь связаны с тем, что показания при регистрации потенциала изменялись во времени. В момент касания зондом поверхности диэлектрической пленки величина потенциала принимала максимальное значение. Кроме того, на максимальную величину потенциала при работающем коротроне оказывало влияние усилие прижима зонда к поверхности диэлектрика. После касания диэлектрика в течение нескольких секунд наблюдалось снижение показаний вольтметра, что можно связать с наличием токов утечки в измерительной цепи.

Дальнейшее проникновение контактного зонда в глубь зарядовой структуры при наличии  $U_k$  на коротроне ограничивалось предельным значением шкалы применяемого вольтметра С-95/3. Кроме того, при установке измерительного электрода на радиусе  $R \leq 25$ мм (рис.3, кривая 1) наблюдалась трансформация порошковой структуры, связанная с дальнейшим продвижением порошковых уплотнений от коротрона на участке зонда. Со временем граница этого продвижения выравнивалась, приобретая очертания новой кольцевой или эллиптической структуры. Величина смещения внешней границы при этом достигала 10-15 мм. Потенциал уплотнений вновь образованной структуры составлял, как и у предшествующей структуры, 30-40 В.

Результаты измерения потенциала остаточных зарядов показали (см. рис.3, кривая 2) на наличие при  $R \approx 20$  мм максимума, обусловленного процессами разрядки диэлектрика на игольчатый электрод при снятии высокого напряжения. Однако координаты максимума потенциала  $U_d$  не совпадают с полученной на диэлектрике с помощью проявляющего порошка области с радиусом  $R_3$  (рис.2). Координаты границы максимума  $U_d$  находились на уровне первичной порошковой структуры радиусом  $R_1$ . Полученный результат свиде-



**Рис.3.** Изменение потенциала  $U_d$  на поверхности диэлектрика в зависимости от расстояния  $R$  до оси разряда: 1-при включенном коротроне ( $U_k=-8$  кВ); 2-после снятия напряжения с коротрона

тельствует о том, что разряд зарядового рельефа на коротроне затрагивает значительную область поверхности подложки, а возникновение порошковой структуры с радиусом  $R_3$  обязано скорее газодинамическим, нежели электрофизическим процессам [6].

Дальнейшие исследования распределения потенциала на поверхности диэлектрика при включенном коротроне производились без нанесения проявляющего порошкового слоя. Зонд подключался к киловольтметру С-95/8. Измерения потенциала производились при изменении высоты коротрона в диапазоне  $h_k=5-20$  мм с шагом 5 мм.

Обнаружено, что с увеличением высоты коротрона происходит возрастание величины потенциала на периферии зарядовой структуры (рис.4). По мере увеличения высоты коронирующего электрода с 5 мм до 20 мм потенциал на радиусе  $R=100$  мм возрастал от 300 В до 1 кВ. При этом граница поверхностного потенциала с  $U_d \approx 3$  кВ смещалась соответственно от  $R=10$  мм до  $R=30-40$  мм. Зарегистрированные распределения на рис.4 позволили выявить области с повышенным градиентом потенциала. Так, для кривой 1 ( $h_k=5$  мм) потенциал  $U_d$  в области  $R=30-40$  мм изменяется от 2,08 до 1,26 кВ. Кривая 2 ( $h_k=10$  мм) является более полой с небольшим градиентом в области  $R=50-60$  мм, где  $U_d$  изменяется от 1,89 до 1,57 кВ. При  $h_k=15$  мм максимальный градиент потенциала на-

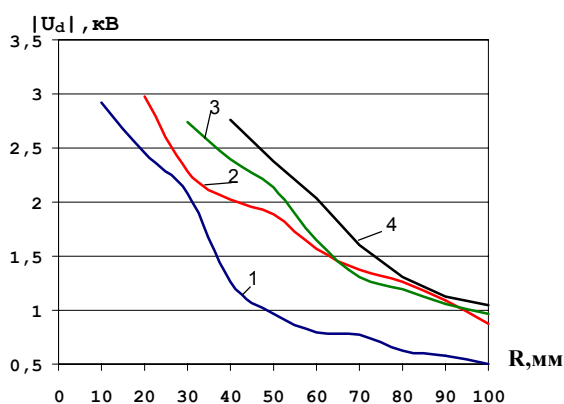
блюдался в диапазоне  $R=50-70$  мм и составлял 0,83 кВ. График 4 представляет собой пологую кривую с достаточно равномерно спадающим потенциалом.

Из полученных результатов можно сделать вывод о том, что поле в разрядном промежутке по мере увеличения величины  $h_k$  от 5 до 20 мм не ослабляется, и стремится к выравниванию. Из рис.4 видно, что при определенных значениях радиуса  $R$  возможно существенное усиление тангенциальной составляющей поля  $E_t = dU_d/dx$  в разрядном промежутке.

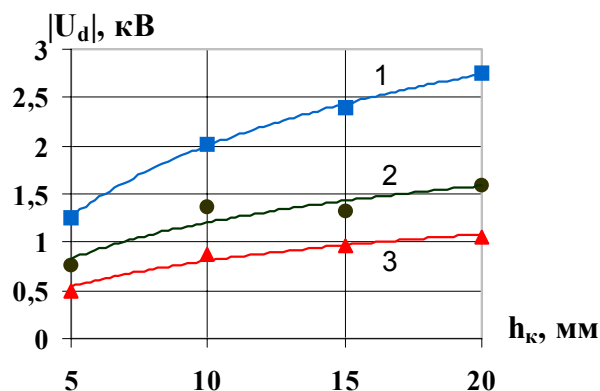
Характерным фактом является то, что это усиление проявляется в центральной части интервала  $R [0,100\text{мм}]$ , а не на внешней границе распределения  $U_d(R)$ .

На рис.5 даны зависимости  $U_d(h_k)$ , построенные на основании результатов, приведенных на рис.4. Из рис.5 видно, что для заданных значений  $R$  с увеличением высоты подъема коротрона  $h_k$  величина потенциала  $U_d$  существенно возрастает. При этом распределение  $U_d=U_d(h_k)$  можно аппроксимировать функцией следующего типа  $U_d=k_1 \times \ln(h_k)+k_2$ , с погрешностью не хуже 13%. Здесь  $k_1$  и  $k_2$  некоторые константы.

Рассматривая полученный результат, необходимо отметить, что выявленная тенденция изменения потенциала носит нетривиальный для традиционного коронного разряда характер.



**Рис.4.** Измерения поверхностного потенциала  $U_d$  по радиусу  $R$  зарядового пятна при напряжении на коротроне  $U_k = -8$  кВ и различных значениях высоты подъема  $h_k$  электрода:  $h_k=5$  мм; 2-10 мм; 3-15 мм; 4-20 мм



**Рис.5.** Изменение потенциал подложки  $U_d$  при увеличении высоты коротрона  $h_k$  с  $U_k = -8$  кВ на заданных расстояниях  $R$  от оси разряда: 1- $R=40$  мм; 2-70 мм; 3-100 мм

## Выводы

1. Сопоставлено распределение потенциала на поверхности односторонне фольгированной полиимидной пленки толщиной 40 мкм с регистрируемыми электрографическими картинками порошковых структур в поле униполярного коронного разряда. Получен характер изменения потенциала на внешней границе зарядовой структуры как при наличии высокого напряжения на коронирующем электроде, так и после его снятия. Экспериментально выявлен факт существенного снижения потенциала на порошковых уплотнениях внешней границы остаточной зарядовой кольцевой структуры, в то время как для коротрона с рабочим напряжением -8 кВ эта величина составляла по модулю 30-40 В.

2. Показано, что процесс растекания униполярного коронного разряда вдоль диэлектрической подложки при увеличении высоты подъема коротрона от 0,5 мм до 20 мм сопровождается ростом уровня потенциала поверхности диэлектрика на расстоянии до 100 мм от оси разряда. При этом в средней части радиуса зарядового пятна наблюдается снижение градиента потенциала на подложке.

Работа поддержана грантом РФФИ № 02-02-17172.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Акишев Ю.С., Демьянов А.В., Каральник В.Б. и др.* О сходстве и различии барьерной короны с классическими разрядами – барьерным и коронным // Тез. докл. XI конфер. по физике газового разряда. Рязань: РГРТА, 2002. Ч.1.
2. *Журавлев О.А., Федосов А.И., Марков В.П., Ивченко А.В.* Формирование стабилизирующих газовый разряд прибарьерных слоев в стационарной системе электродов острие - диэлектрическая пленка – экран/Деп. в ВИНТИ №865-В98 от 25.03.98.
3. *Шорин В.П., Журавлев О.А., Федосов А.И. и др.* Разработка модели поверхностной волны зарядов затухающего коронного разряда//Известия Самарского научного центра РАН. 1999. №1.
4. *Арсенев Ю.Д., Герштейн Г.М., Грищенко В.Л. и др.* Приборы неразрушающего бесконтактного контроля электрофизических параметров электрографических слоев (ЭФС)//Тез. докл. Всес. научно-технич. конфер. “Электрография-88”. М.,1988. Ч.1.
5. *Голиков Ю.К., Серебров Л.А., Уткин К.Г.* О структуре эффективной плотности поверхностного заряда на диэлектрике и электрического поля//ЖТФ. 1969. Т.39. №5.
6. *Журавлев О.А., Кислицев А.В., Кусочек А.П. и др.* Применение электрографического метода для исследования газодинамических процессов скользящего разряда // Тез. докл. IV всес. конфер. “Кинетические и газодинамические процессы в неравновесных средах”. М., 1988.

## THE PROBE MEASUREMENTS RESULTS OF DIELECTRIC SURFACE POTENTIAL IN A GAP WITH SINGLE-CHARGER CORONA DISCHARGE

© 2003 V.P. Shorin, O.A. Zhuravlev, A.V. Ivchenko

Samara State Aerospace University

The potential distribution on dielectric film surface is registered at presence negative single-charge corona for different discharge gap. It was shown that the increase of the needle-shaped cathode height lead to increase of a potential at peripherals of a charge spot which accomplished by the decrease of potential gradient on dielectric surface. The obtained results may be facilitate additional stabilization of gas-discharge processes in unipolar barrier corona.