

**В.Г.Кузнецов**, член-корр. НАН Украины (Ин-т электродинамики НАН Украины, Киев),  
**А.М.Гашимов**, **Э.Д.Курбанов** (Ин-т физики НАН Азербайджана, Баку)

## ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ НАНОСЕКУНДНОГО СТРИМЕРНОГО РАЗРЯДА МЕТОДОМ ЭЛЕКТРОГРАФИИ

*Исследовано влияние диэлектрических пластин, расположенных параллельно оси разрядного промежутка, на формирование и структуру наносекундного стримерного разряда в системе электродов “стержень-плоскость”. Показано изменение электрических характеристик импульсного разряда, геометрических размеров стримерного канала и головок стримеров при различных расстояниях между диэлектриком и коронирующим электродом и параметрах диэлектрика. Установлено, что процесс ветвления стримерного канала происходит как вдоль силовых линий, так и в радиальном направлении, вызванном за счет смещения максимальной точки напряженности поля на электроде с малым радиусом кривизны в сторону диэлектрической пластины.*

*Досліджено вплив діелектричних пластин, розміщених паралельно осі розрядного проміжку, на формування та структуру наносекундного стримерного розряду в системі електродів “стрижень-площина”. Показано зміну електричних характеристик імпульсного розряду, геометричних розмірів стримерного каналу та головок стримерів при різних відстанях між діелектриком і коронуючим електродом та параметрах діелектрика. Встановлено, що процес розгалуження стримерного каналу відбувається як вздовж силових ліній, так і у радіальному напрямку, спричиненому зміщенням максимальної точки напруженості поля на електроді з малим радіусом кривизни у бік діелектричної пластини.*

Необходимость очистки газовых выбросов, возникающих при сжигании топлив, при работе химических производств, бытовых предприятий и животноводческих комплексов требует установки очистных сооружений, использующих газовый разряд. В последние годы получили распространение устройства, в которых процесс очистки газа идет в стримерной зоне положительного импульсного наносекундного разряда [2]. Отсутствие нагрева газа, простота реакционной камеры, легкая масштабируемость установки делают эту технологию очень привлекательной по сравнению с другими методами очистки (каталитический, термический и др.). Приводимые в литературе данные о характеристиках наносекундного стримерного разряда показывают, что для эффективной работы очистного устройства необходимо максимальное заполнение объема реакционной камеры стримерными каналами при их интенсивном ветвлении, что обеспечивает наибольшую эффективность образования химически активных частиц, участвующих в очистке газа. Для снижения затрат энергии необходимо обеспечить минимальную длительность импульса приложенного напряжения, при котором напряжение снимается сразу после пересечения промежутка стримерной зоной разряда. Кроме того, необходимо обеспечить отсутствие пробоя разрядного промежутка. Решение всех указанных задач невозможно без знания структуры стримерной зоны разряда, скорости движения ее фронта в разрядном промежутке и влияния на эти характеристики внешних условий. В реальных электроустановках очень часто встречаются изоляционные промежутки с диэлектрическими элементами. Поэтому важно также знать закономерности развития разряда в присутствии диэлектрика. При наличии в разрядном промежутке вставок из твердого диэлектрика свойства разряда изменяются. Это касается различных характеристик разряда, таких как, начальное напряжение, время запаздывания зажигания разряда, амплитуды и длительности импульса тока, пробивного напряжения и др. Большинство работ, посвященных влиянию диэлектрика на характеристики разряда, проводились с использованием импульсов напряжения микросекундной длительности [3,6,7]. Помимо этого, есть работы, в которых рассмотрен разряд при постоянном напряжении и поджигании разряда с помощью наносекундного импульса малой амплитуды [4,5] и лазера [8].

Настоящая статья посвящена исследованию структурных характеристик положительного импульсного наносекундного стримерного разряда в электродной системе “игла-плоскость”, характерной для технологической установки по очистке воздуха.

Для проведения экспериментов использовался кабельный генератор импульсов напряжения, создающий на выходе импульсы прямоугольной формы с амплитудой 67 кВ, длительностью фронта 50 нс и длительностью импульса 350 нс. Электродная система состояла из двух алюминиевых дисков, диаметром 300 мм, расположенных параллельно друг другу. В центре одного из дисков был закреплен цилиндрический алюминиевый держатель длиной 50 мм и диаметром 20 мм, закругленный с одной стороны до полусферы. Внутри держателя и изолированно от него был вставлен коронирующий электрод из нержавеющей стали, выступающий из держателя на 5–7 мм. В качестве коронирующего электрода использовалась игла с радиусом округления 100 мкм. Расстояние между кончиком иглы и нижней плоскостью изменялось в пределах 30–165 мм перемещением верхнего диска вверх или вниз. При подаче на нижний диск отрицательного импульса напряжения с коронирующего электрода стартовала положительная стримерная корона. Для регистрации импульса напряжения и тока разряда использовался цифровой запоминающий осциллограф Textronix TDS-754D, имеющий четыре входа и полосу пропускания 500 МГц. Он был помещен внутри металлического заземленного экрана. Запуск осциллографа осуществлялся от сигнала, снимаемого с антенны, помещенной внутри экрана разрядного промежутка.

Для определения структурных параметров стримерной короны при межэлектродных расстояниях –  $L \sim 100 \div 165$  мм применялся метод электрографии. Для получения электрограмм в разрядный промежуток на различных расстояниях –  $b \sim 0,3 \div 9$  мм от коронирующего электрода параллельно его оси помещались тонкие диэлектрические пластины различной толщины и диэлектрической проницаемости. Перед каждым новым использованием пластины с ее поверхности удалялся оставшийся заряд по методике, описанной в [8]. Для проявления осевшего на пластину заряда применялся тонер для лазерных принтеров HP 1100. Он представлял собой мелкозернистый порошок черного цвета. Пластина посыпалась небольшим количеством порошка, а затем подвергалась воздействию вибрации. При ее наклонении порошок медленно перемещался по поверхности пластины и оседал в местах расположения заряда. Полученная таким образом картина структуры стримерной короны позволяла наблюдать ветвящуюся картину разряда и анализировать параметры отдельных головок стримеров и стримерных каналов.

При внесении в разрядный промежуток диэлектрической пластины изменяются условия развития разряда. Степень влияния зависит от того, каким образом установлен барьер. Изучение структуры стримерного разряда должно проводиться при таком расположении пластины, при котором влияние ее на характеристики разряда минимально.

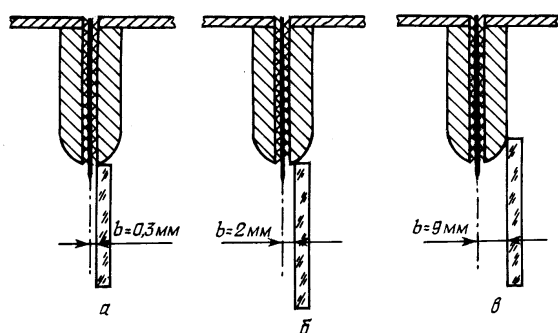


Рис. 1

Для работы были выбраны пластины из оргстекла толщиной 1,5 мм с установкой их в разрядный промежуток в трех вариантах (рис. 1): вплотную (*a*) к боковой поверхности иглы ( $b=0,3$  мм), на расстоянии  $b=2$  мм (*б*) и  $b=9$  мм (*в*) от нее. На рис. 2 показаны осциллограммы тока разряда при длине промежутка  $L=135$  мм и различных вариантах установки пластины в промежутке: 1 – на расстоянии  $b=9$  мм от оси промежутка; 2 – на расстоянии  $b=2$  мм; 3 – пластина расположена вплотную к игле ( $b=0,3$  мм).

При установке пластины вплотную к боковой поверхности кривая тока разряда существенно изменяется. Амплитуда тока возрастает в среднем в 2 раза.

Кривая тока достигает амплитудного значения менее чем за 5 нс (в чисто воздушном промежутке – за 35–40 нс), затем идет спад по экспоненциальному закону. При установке пластины на расстоянии 9 мм от иглы характеристики разряда не претерпевают сколько-нибудь заметных изменений. Однако в этом случае поверхности пластины достигают лишь отдельные ветви, по которым сложно составить представление о структуре разряда. При установке пластины на расстоянии 2–3 мм от иглы характеристики разряда изменяются незначительно. Амплитуда тока разряда повышается в среднем на 10%, так же, как и интеграл тока разряда. Форма кривой тока также практически не изменяется по сравнению с разрядом в чисто воздушном промежутке.

Таким образом, при использовании электрографии необходимо устанавливать пластину не ближе 2 мм от коронирующего электрода. В противном случае происходит существенное изменение характеристик разряда.

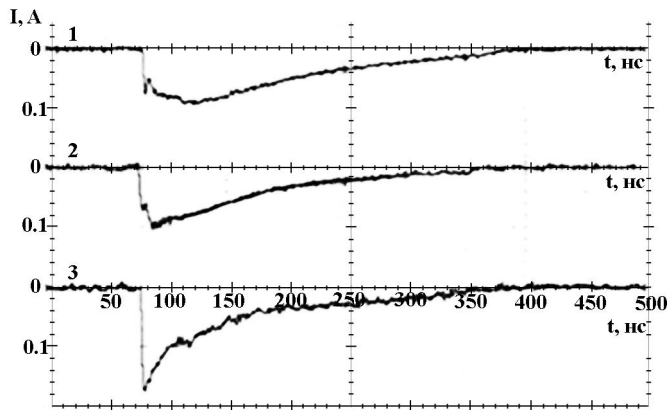


Рис. 2

в среднем в 2 раза для оргстекла и в 2,9 раз для керамики. Проявленные электрограммы позволяют сравнить картину осевшего заряда и оценить различие в структуре поверхностной части разряда для различных материалов. На рис. 4 показаны электрограммы, полученные на пластинах из оргстекла толщиной 1,5 мм, 9 мм (а, б) и на керамической пластине толщиной 1,5 мм. Как видно из рисунка, на более толстой пластине из оргстекла след разряда имеет большие габариты, чем на тонкой, а поверхность ее более плотно заполнена каналами и головками стримеров, особенно по периметру стримерной зоны. На керамике разряд имеет на 10–20 % большие размеры, чем на пластине из оргстекла, при этом картина разряда другая: интенсивность ветвления разряда меньше и каналы стримеров проявляются гораздо ярче, чем на пластинах из оргстекла.

Таким образом, с увеличением толщины и диэлектрической проницаемости диэлектрика влияние барьера на параметры разряда возрастает. Поэтому для электрографии целесо-

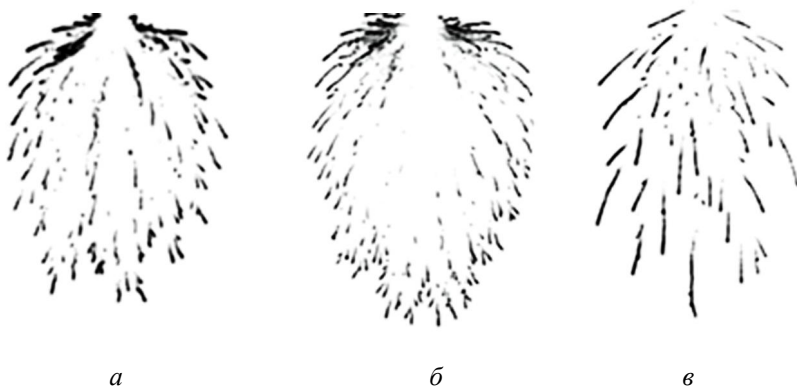


Рис. 4

образно использовать тонкие (не более 2 мм) пластины с возможно меньшим значением  $\epsilon$ . Исследование структуры наносекундного разряда при малых межэлектродных расстояниях  $L \sim 30 \div 60$  мм проводилось одновременно с использованием интегральных снимков, полученных с помощью CCD камеры и метода электрографии. На рис. 5 показаны фотографии разряда при различной длине промежутка с указани-

ем параметров тока. В зависимости от длины промежутка и в силу статистического характера развития разряда фотографии демонстрируют различное количество стримерных ветвей. При  $L=45$  мм,  $E_{cp}=7,7$  кВ/см,  $I_m=72$  мА,  $\tau_f/\tau_{imp}=16/340$  нс почти все стримеры, включая боковые ветви, пересекают разрядный промежуток и достигают противоположного электрода (рис 5, а). Когда напряженность поля меньше 7 кВ/см ( $E_{cp} = 6,7$  кВ/см,  $L=53$  мм,  $I_m=51$  мА,  $\tau_f/\tau_{imp}=14/180$  нс), только развивающиеся вблизи оси промежутка стримерные каналы доходят до плоскости, в то время как боковые стримеры проходят лишь около половины длины промежутка (рис. 5, б). Если же длина промежутка

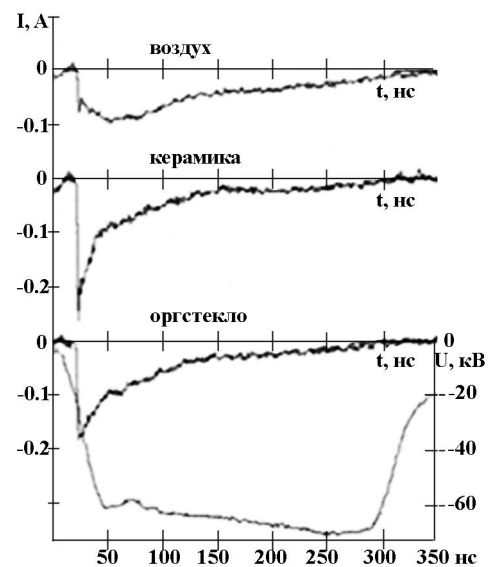


Рис. 3

образно использовать тонкие (не более 2 мм) пластины с возможно меньшим значением  $\epsilon$ .

Исследование структуры наносекундного разряда при малых межэлектродных расстояниях  $L \sim 30 \div 60$  мм проводилось одновременно с использованием интегральных снимков, полученных с помощью CCD камеры и метода электрографии. На рис. 5 показаны фотографии разряда при различной длине промежутка с указани-

превышает 53мм ( $L=56$  мм,  $I_m=28$  мА,  $\tau_f/\tau_{imp}=17/130$  нс), то есть средняя напряженность поля меньше 6,5 кВ/см ( $E_{cp}=6$  кВ/см), то стримерная зона не пересекает разрядный промежуток (рис 5, в).

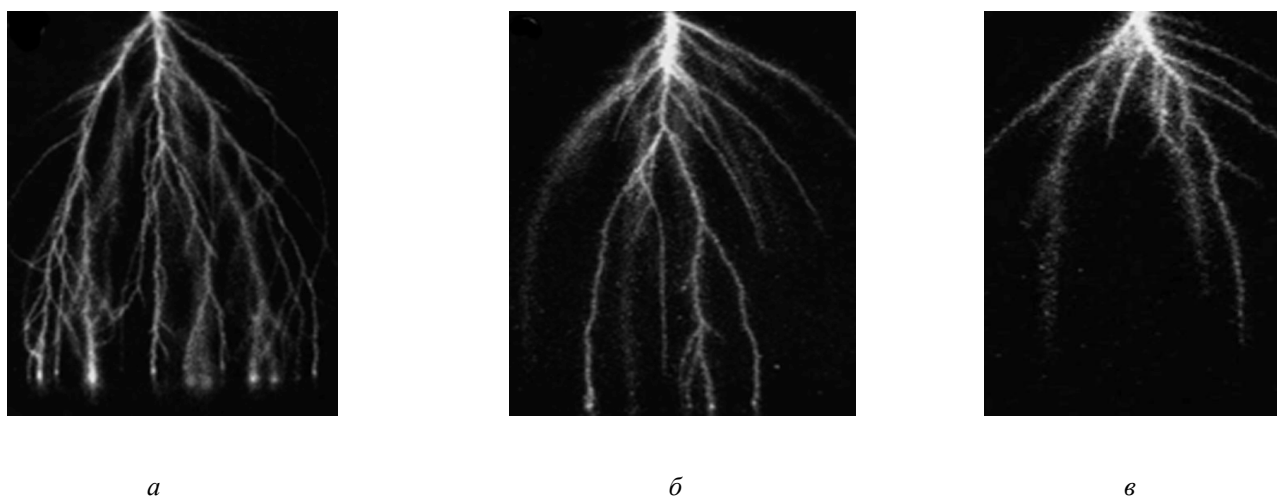


Рис. 5

При длине промежутка  $L=36$  мм (рис. 6, а) и  $L=31$  мм (рис. 6, б) в области иглы появляются короткие каналы, яркость которых на порядок больше яркости стримерных каналов. Их длина составляет 0,5–1 см, а количество колеблется в пределах 2–4.

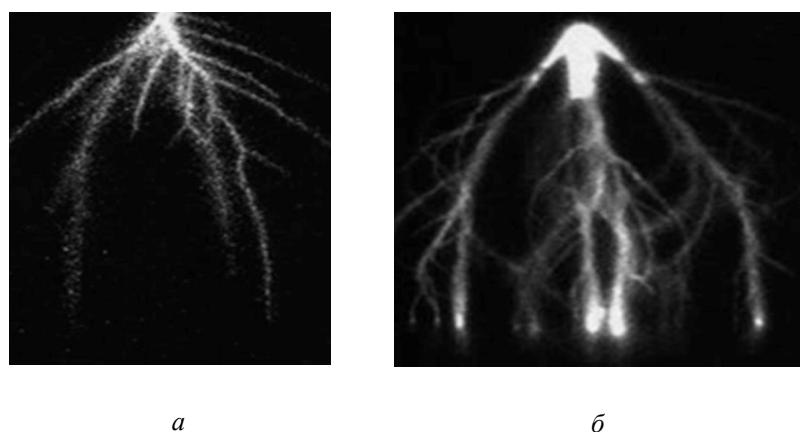


Рис. 6

На фотографиях разряда видно, как стримеры берут начало от ярких каналов, непосредственно примыкающих к коронирующему электроду. Многие авторы называют эти каналы “стеблем”, а отходящие от них многочисленные стримеры – “короной”.

На рис. 7 показаны фотографии структуры стримерной короны при разряде вдоль пластины из оргстекла, полученные с помощью CCD-камеры (а) и электрографии (б). Следует отметить, что эти два метода регистрации разряда дополняют друг друга. CCD-камера позволяет

получить изображение области разряда, примыкающей к игле, в то время как на электрограмме эта область не проявляется. С другой стороны, электрография дает более четкое изображение головок стримеров и множества коротких ветвей, которые практически не видны или совсем неразличимы на фотографиях. Высокая четкость изображения на электрограммах головок стримеров и примыкающих к ним каналов позволила измерить их размеры. Проведенные измерения показали, что диаметр головки стримера составляет 100–150 мкм, диаметр канала стримера на расстоянии 1 мм от головки равен 150–200 мкм, на расстоянии 3 мм и далее – 200–300 мкм. Изображение следа стримера проявляется неравномерно: головка представляет собой плотную черную точку, от которой отходят две полосы порошка – границы канала стримера. Центральная часть канала проявляется слабо, однако оказывается темнее, чем фон электрограммы. Можно сделать вывод, что избыточный положительный заряд в канале стримера распределен неравномерно: концентрация его мала на оси стримера и возрастает к боковой границе канала.

Как видно из рисунков, получаемое на пластине изображение стримерной короны представляет собой сильноветвящуюся структуру с множеством отдельных ветвей, заканчивающихся головками. Следы стримеров можно разбить на три части. Сначала идет сильно проявленная область *A* головки и прилегающий к ней канал длиной около 0,5 см. Затем область *B* канала стримера, в которой четко видны проявленные границы стримерного канала и слабо проявлена его центральная часть. Длина ее лежит в пределах 0,5–1,8 см. И, наконец, область *C*, в которой границы канала стримера размыты или не видны. Однако эти области наблюдаются не всегда. Фактически, количество наблюдаемых областей зависит от длины следа стримера.



*a*



*б*

Рис. 7

Все три области хорошо просматриваются в длинных следах стримеров, проходящих вдоль оси промежутка. Для стримеров, развивавшихся от кончика иглы практически перпендикулярно оси промежутка, характерно наличие первой и второй областей. У коротких ответвлений присутствует только первая область. Ответвления с одного и того же стримера могут образовываться довольно часто, однако не всегда попытка ветвления приводит к образованию самостоятельного стримера. На фотографиях такие ответвления практически не заметны, так как излучение разряда дает менее четкую картину каналов, чем электрограммы. Отдельная ветвь из центральной области электрограммы, от которой отходят четыре ответвления на длине 3,5мм, так и не развилась в самостоятельные ветви. Следует также отметить, что развитие стримерной зоны идет не только вдоль оси промежутка, но и в радиальном направлении. Причем, на границе стримерной зоны есть отдельные стримеры, развивающиеся почти перпендикулярно оси промежутка. Это говорит о большой плотности стримерных каналов и большом избыточном заряде головок, что в общем итоге приводит к значительному расталкиванию головок.

Выше было сказано, что наличие диэлектрика в разрядной зоне и его расположение относительно коронирующего электрода влияют на развитие стримеров в области сильного поля. В работе [6] приводятся результаты расчета, показывающие возрастание максимальной напряженности поля на коронирующем электроде в присутствии диэлектрической пластины (см.таблицу).

| Параметры расчета                    | $E_{max}$ , кВ/см | $\alpha$ , град. |
|--------------------------------------|-------------------|------------------|
| Промежуток без пластины              | 640               | 0                |
| Оргстекло, $h=1,5$ мм, $\delta=2$ мм | 647               | 3                |
| Оргстекло, $h=1,5$ мм, $\delta=0$ мм | 700               | 17               |
| Оргстекло, $h=6$ мм, $\delta=2$ мм   | 820               | 26               |
| Керамика, $h=1,5$ мм, $\delta=0$ мм  | 860               | 32               |
| Керамика, $h=1,5$ мм, $\delta=2$ мм  | 670               | 10               |

Из таблицы видно, что в присутствии пластины из оргстекла толщиной 1,5 мм, установленной вплотную к игле, значение максимальной напряженности возрастает с 640 кВ/см до 700 кВ/см. На рис. 8 показана качественная картина смещения точки *M* с максимальной напряженностью поля на угол  $\alpha$  в сторону пластины толщиной  $h$ , расположенной на расстоянии  $b$  от стержня.

Точка максимальной напряженности на поверхности иглы *M* смещается так, что угол между осью промежутка и отрезком, соединяющим центр сферической части иглы и точку с максимальной напряженностью поля, составляет 17°. В аналогичном случае с пластиной из керамики, угол смещения составляет 32°, а значение максимальной напряженности поля составляет 860 кВ/см. При установке пластины на расстоянии 2 мм от иглы ее влияние на картину поля вблизи коронирующего электрода очень незначительно.

В случае с пластиной из оргстекла максимальная напряженность поля в промежутке увеличивается с 640 кВ/см до 647 кВ/см, с пластиной из керамики – до 670 кВ/см. Углы смещения точки на поверхности иглы с максимальной напряженностью поля составляют 3° и 10°, соответственно. Расчет с установкой в

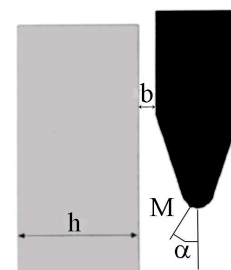


Рис. 8

промежуток пластины из оргстекла толщиной 6 мм показывает, что влияние толщины пластины на искажение поля вблизи иглы велико. Максимальная напряженность поля на игле в этом случае составляет 820 кВ/см, а угол смещения точки с максимальной напряженностью составляет 26°.

Таким образом, анализ изображений разряда, полученных совместно с помощью фотографирования и электрографии, показал, что эти два метода регистрации дополняют друг друга (рис. 7). Их совместное использование позволяет получить новую информацию о структуре разряда. CCD-камера дает изображение области разряда, примыкающей к игле, в то время как электрография дает более четкое изображение головок стримеров и множества коротких ветвей, которые практически неразличимы на фотографиях. Следует отметить, что практически всегда в местах ветвления стримера происходит искривление основного канала. Это происходит независимо от того, где развивается рассматриваемый стример: на фронте стримерной зоны, на боковой части или около коронирующего электрода. Это дает основание считать, что ветвление стримера происходит на его головке, и поле заряда головки ответвившегося стримера искривляет траекторию основного стримера. Выявлено, что при развитии вдоль поверхности пластины стример испытывает влияние поля поляризации пластины, что приводит к увеличению его поперечного размера. Кроме того, следует учитывать растекание заряда по поверхности пластины, которое также может приводить к увеличению поперечного размера проявленных следов головки и канала стримера. Показано, что увеличение толщины диэлектрика приводит как к усилению поля на коронирующем электроде, так и к усилению поля поляризации барьера, влияющего на развивающиеся вдоль его поверхности стримеры. Поэтому при увеличении толщины барьера растет амплитуда тока разряда и увеличивается интенсивность ветвления поверхностной части разряда.

1. *Иванов А.В.* Применение электрографии для исследования объемных и поверхностных зарядов. / Автореферат дисс. на соискание ученой степени канд. техн. наук. – Москва, 1971.

2. *Кудяков К.И., Кужекин И.П., Мусагалиев С.Г.* и др. Перспективы развития источников питания установок для очистки газов от экологически вредных примесей / Сб. научн. ст. «Теория и практика электрических разрядов в энергетике». Под ред. А.Ф. Дьякова. – Пятигорск: Из-во ЮЦПК РП "Южэнерготехнадзор", 1997. – С. 277 – 286.

3. *Abdel-Salam M., Weiss P., Lieske B.* Discharges in Air from Point Electrodes in the Presence of Dielectric Plates, Experimental Results // IEEE Transactions on Electrical Insulation. – 1992. – Vol.27. – № 2. – Pp. 309 – 319.

4. *Allen N.L., Mikropoulos P.N.* Influence of Insulator Profile on Streamer Propagation. // High Voltage Engineering Symp. IEE, 1999. – Pp. 3.15.S5–3.18.S5.

5. *Allen N.L., Mikropoulos P.N.* Profile Effect on Surface Flashover in a Uniform Field. // High Voltage Engineering Symp. IEE, 1999. – Pp. 3.216.P3–3.219.P3.

6. *Gallimberty, Marchesi G., Niemeyer L.* Streamer corona at an insulator surface // 7-th Intern. Symp. on High Voltage Engineering. Dresden, 1991. – № 41.10. – Pp. 47 – 50.

7. *Gao L., Gomes C., Cooray V., Roman F.* Comparison of long sparks in air over an insulator surface. // High Voltage Engineering Symp. IEE, 1999. – Pp. 3.31.S5–3.34.S5.

8. *Gaxiola E.H.R., Wetzer J.M.* Prebreakdown Phenomena along Insulator Surfaces in Dry Air. // High Voltage Engineering Symp. IEE, 1999. – Pp. 3.171.P3–3.174.P3.

Надійшла 25.06.09