

УДК 621.315

## ИССЛЕДОВАНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК И СТРУКТУРЫ НАНОСЕКУНДНЫХ ИМПУЛЬСНЫХ РАЗРЯДОВ В ВОЗДУХЕ

ГУРБАНОВ Э.Д., ГАШИМОВ А.М., ГУРБАНОВ К.Б.,  
БОНДЯКОВ А.С., ГУСЕЙНЛИ А.Я.

*Институт Физики НАН Азербайджана*

Исследование характеристик наносекундных импульсных разрядов имеет огромное значение для разработки и создания устройств по очистке газовых выбросов, возникающих при работе химических производств, бытовых предприятий.

Опыт эксплуатации имеющихся пилотных установок, использующих наносекундный разряд, показывает высокие энергозатраты на очистку, уменьшение которых требует оптимизации режима разряда и усовершенствования устройств, его создающих [1].

Для эффективной работы очистных устройств 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 и влияния на нее внешних условий. В данной статье исследуются структурные характеристики импульсного наносекундного разряда в воздухе в системе электродов игла-плоскость, достаточно близкой к электродам “провод-цилиндр” в технологической установке по очистке газа.

Экспериментальная установка (рис.1) включает в себя кабельный генератор импульсов напряжения, создающий импульсы прямоугольной формы. Генератор состоит из двух отрезков кабеля 1-2 и разрядника 3. Кабели от источника положительного высокого постоянного напряжения заряжаются до тех пор, пока не пробьется разрядник. После срабатывания разрядника кабели перезаряжаются, формируя на выходе генератора импульс напряжения. К выходу генератора подсоединен высоковольтный омический делитель 5 с суммарным коэффициентом деления 17940. С низковольтного плеча делителя сигнал подается на высокочастотный осциллограф типа ТЕКТРОНИХ – TDS 754D.

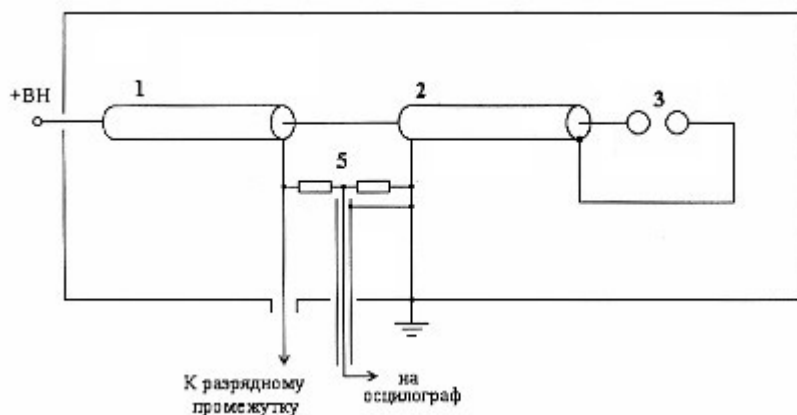


Рис.1. Схема генератора импульсов напряжения

Электродная система игла-плоскость рис.2 состоит из двух алюминиевых дисков диаметром 300 мм, расположенных параллельно друг к другу. В центре одного из дисков закреплен цилиндрический алюминиевый держатель длиной 50 мм и диаметром 20 мм.

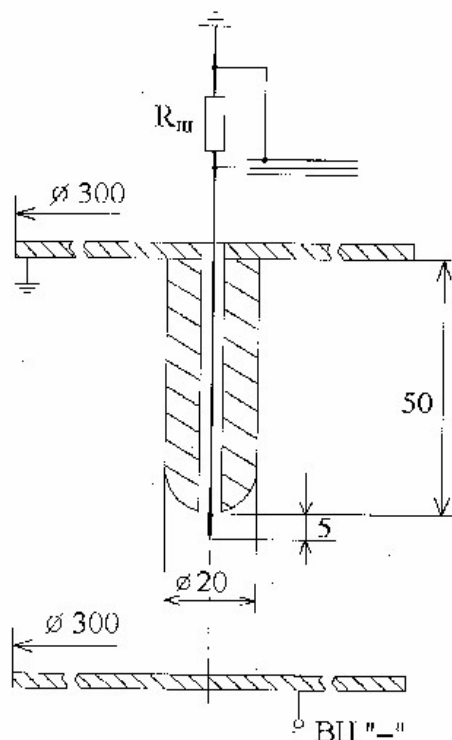


Рис.2. Электродная система “игла-плоскость”

Внутри держателя и изолированно от него вставлен коронирующий электрод из нержавеющей стали, выступающий из держателя на 5 мм. Радиус иглы составляет 100 мкм. Межэлектродное расстояние изменяется в пределах 80-165 мм перемещением верхнего диска вверх или вниз. При подаче на нижний диск отрицательного импульса напряжения с острия стартует положительная стримерная корона. Форма импульса напряжения приведена на рис.3.

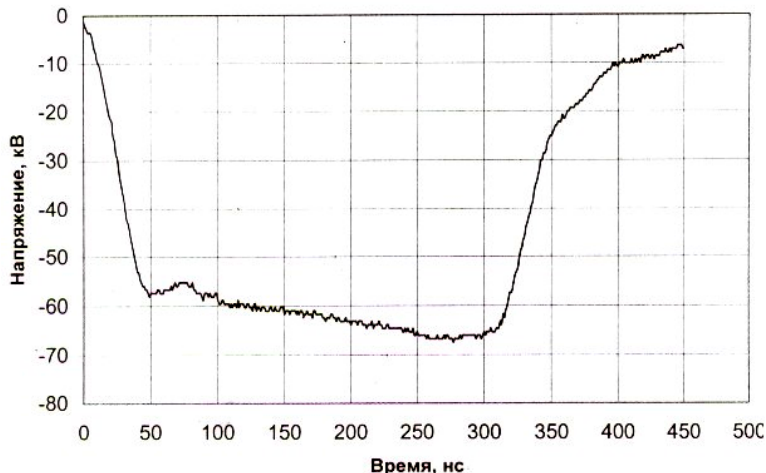


Рис.3. Форма импульса напряжения генератора

Из рисунка видно, что за время около 50 не напряжение возрастает до 57 кВ, затем в течение 250 не достигает 67 кВ и далее спадает до нуля. Длительность импульса определяется от начала роста напряжения до полуспада и составляет 350 не.

Для изучения структуры стримерного разряда нами были проведены эксперименты в системе электродов игла-плоскость при межэлектродном расстоянии 116 мм с расположением на расстоянии 2мм от острия параллельно оси промежутка диэлектрических пластин различной толщины (керамика, ситалл, поликор). Следует отметить, что в работе [4] были проведены такого рода эксперименты с пластинами из оргстекла и керамики толщиной 1,5 мм с расположением их на различных расстояниях от иглы. Было выявлено, что на расстоянии от коронирующего электрода не ближе 2 мм пластины оказывают незначительное влияние на характеристики разряда и возможно судить о его структуре по проявленным электрограммам. Именно поэтому мы располагали диэлектрические пластины на расстоянии 2мм от коронирующего электрода.

На рис.4 приведены осциллограммы тока разряда в чистом воздухе и при установлении диэлектрических пластин различной толщины. Для регистрации тока измерялось падение напряжения на измерительном сопротивлении (шунте) [2], включенном в разрядную цепь.

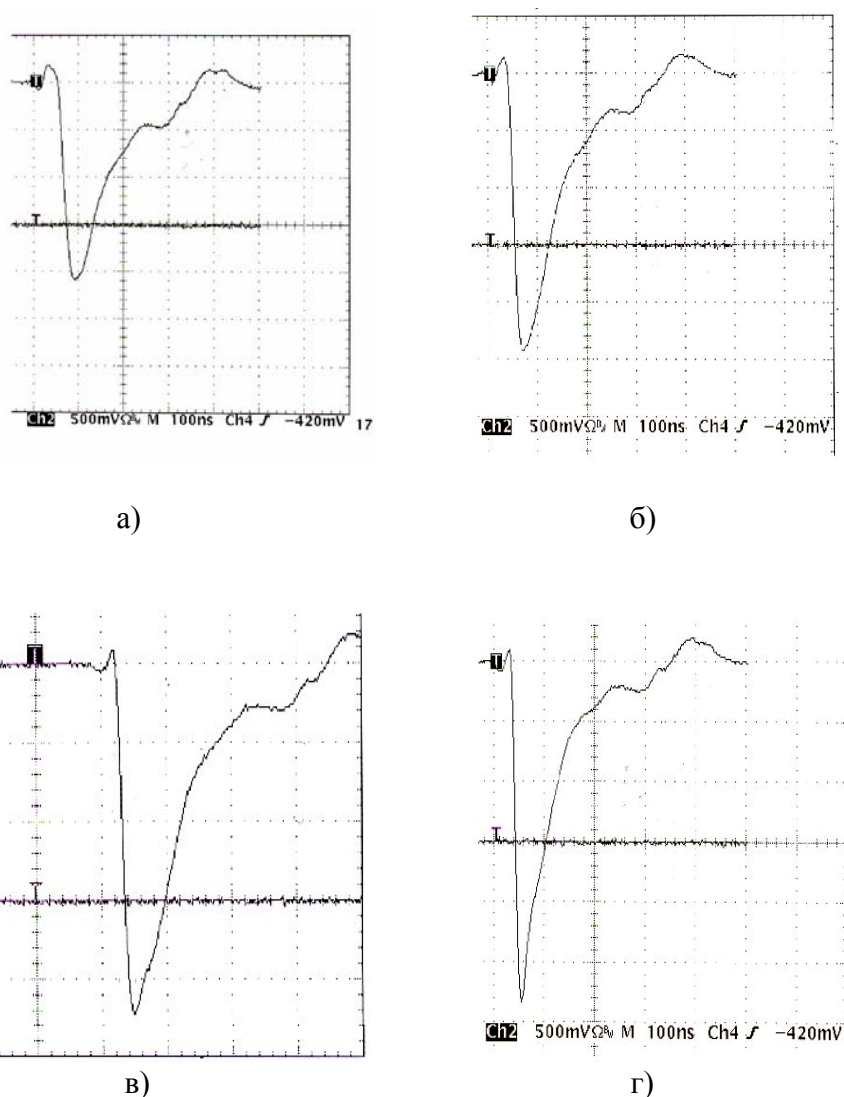


Рис 4. Осциллограммы тока разряда: а – воздух, б – ситалл (0,5 мм), в – ситалл (1 мм), г – поликор (1 мм).

Из рисунков видно, что амплитуда тока разряда в чистом воздушном промежутке составляет 0,2 А. При наличии в промежутке диэлектрических пластин амплитуда тока разряда незначительно повышается до 0,3-0,4 А в зависимости от поверхностной структуры диэлектрика и его толщины. Ниже приведена таблица 1 с данными осцилло-

грамм тока разряда.

Таблица 1

Материал	Толщина мм	Межэлектродное расстояние мм	Расстояние от иглы мм	Амплитуда тока А	Развертка нс/дел	Чувствительность мВ/дел
Воздух		116	2	0,25	100	500
Керамика	0,5	116	2	0,3	100	500
Керамика	0,96	116	2	0,35	100	500
Ситалл шершавый	0,98	116	2	0,25	100	500
Поликор гладкий	1	116	2	0,28	100	500
Ситалл гладкий	0,5	116	2	0,26	100	500
Керамика гладкая	1	116	2	0,4	50	500
Керамика коричневая	1	116	2	0,3	50	500

Как видно из таблицы, амплитуда тока разряда при установлении диэлектрических пластин возрастает на 10-30 %. Пик тока разряда вызван перемещением головок первых стримеров в области с максимальной напряженностью поля. Спустя несколько не головки стримеров попадают в поле менее 10 кВ/см, что приводит к резкому спаду тока. Можно отметить, что с незначительным увеличением толщины диэлектрика до 1мм амплитуда тока разряда возрастает до 0,3А. Полагаем, что увеличение толщины диэлектрика приводит не только к усилению поля на коронирующем электроде, но и к усилению поля поляризации пластины и соответственно на развивающиеся вдоль ее поверхности стримеры. Присутствие пластин различной толщины приводит к некоторому искажению поля вблизи иглы, в результате чего максимальная напряженность на поверхности иглы смещается с оси промежутка в сторону диэлектрической пластины. Причем, это происходит во всех случаях независимо от расстояния нахождения барьера относительно острия. Для диэлектриков с толщиной > 2 см силовые линии поля сильно искажаются и направляются в сторону барьера, и разряд при этом развивается только по поверхности диэлектрика (без объемной части). Надо заметить, что с уменьшением расстояния между иглой и диэлектриком или увеличением его толщины напряженность поля у острия сильно возрастает. Также следует отметить, что рост амплитуды тока разряда зависит не только от увеличения поля на коронирующем электроде, но и обусловлено повышенной емкостью каналов стримеров и дополнительными процессами ионизации и прилипания с участием материала диэлектрика, его химическим составом и структурой поверхности.

С целью изучения структуры разряда были проявлены электрограммы, которые позволяют сравнить картину заряда, осевшего на пластине и оценить различия в структуре поверхностной части разряда для различных диэлектрических барьеров. Одной из первых работ по применению электрографии при исследовании импульсной стримерной короны является работа [3]. Однако в ней недостаточно проработан вопрос о влиянии диэлектрика на характеристики разряда.

Как видно из электрограмм рис.5, на более толстых пластинах след разряда имеет большие габариты и поверхность пластины более плотно заполнена каналами и головками стримеров, в особенности по периметру стримерной зоны.



Рис 5. Электрограммы разряда для промежутка игла плоскость: а – ситалл (0,5 мм), б – ситалл (1 мм), в – керамика (1 мм), г – поликор (1 мм).

Следует отметить, что каналы стримеров на керамических платинах проявляются очень ярко. По полученным электрограммам также возможно определить размеры стримерной зоны (длины и ширины), размеров головок и каналов стримеров. В работе [4] эти измерения были проведены на пластинах из оргстекла и керамики толщиной 1,5 мм и их зависимость от средней напряженности поля в промежутке. Было показано, что с увеличением  $E_{ср}$  длина и ширина стримерной зоны увеличивается.

Из электрограмм видно, что на разных материалах характер ветвления стримеров в радиальном направлении и вдоль силовой линии поля различен. Также варьируются размеры головок и стримерных каналов на различных расстояниях от коронирующего электрода. Интенсивность ветвления по всей длине промежутка неодинакова: она максимальна в области острия и снижается по мере удаления от него. Также видно, что происходит искривление основного канала, что говорит о ветвлении на головке стримера.

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 об избыточном заряде головок, что приводит к их значи-

тельному расталкиванию. Также наблюдается увеличение длины стримерной зоны в сравнении с ее шириной. Таким образом, электрография дает четкое изображение головок стримеров и множества коротких ветвей. Во всех случаях наблюдается искривление основного канала стримера в местах ветвления. 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.

Как уже отмечалось, при развитии вдоль поверхности пластины стример испытывает влияние поля поляризации пластины, которое приводит к увеличению его поперечного размера. Кроме того, нельзя не учитывать растекание заряда по поверхности пластины, которое также может приводить к увеличению поперечного размера проявленных следов головки и каналов стримеров. Следует отметить, что данные по размерам стримеров методом электрографии имеют большую значимость для моделирования стримерной короны. Интенсивность ветвления стримеров зависит от напряженности поля в промежутке. При большой напряженности поля образование новых стримеров происходит на протяжении всего развития разряда. При уменьшении напряженности поля интенсивное ветвление происходит только в области коронирующего электрода, а в большей части промежутка развиваются одиночные, практически не ветвящиеся стримеры. Расчеты показали, что ветвление стримеров происходит на протяжении всего развития разряда, когда  $E_{cp} > 7,4$  кВ/см. При этом напряженность поля в основной части промежутка должно быть  $> 6,5$  кВ/см.

Нами также были проведены эксперименты по изучению структуры осевшего заряда на пластины из оргстекла толщиной 1,9мм, расположенной поперек разрядного промежутка на различных расстояниях от острия (116мм и 103мм). Проявленные электрограммы свидетельствуют о возрастании площади осевшего на пластины заряда при меньшем межэлектродном расстоянии, количества дошедших до поверхности стримеров, а также об интенсивности их ветвления на поверхности пластины. Данные электрограмм приведены в таблице 2.

Таблица 2

Материал	Толщина мм	Межэлектродное расстояние мм	Площадь заряда см <sup>2</sup>	Количество стримеров
оргстекло	1,9	116	12	14
оргстекло	1,9	103	50	30

Из таблицы видно, что с незначительным уменьшением межэлектродного расстояния количество дошедших до поверхности пластины из оргстекла стримеров и его ветвлений возрастает более чем в 2 раза. Таким образом, наблюдаемое расширение площади заряда на поверхности диэлектрика с уменьшением межэлектродного расстояния, а также рост количества дошедших до плоскости стримеров и их ветвлений можно объяснить усилением напряженности поля у плоскости и соответственно ростом тока разряда. Итак, в результате проведенных экспериментов и измерений можно сделать следующие основные выводы:

Показано, что при установлении в разрядный промежуток диэлектрических пластин толщиной 0,5-1 мм параллельно оси промежутка на расстоянии 2мм от коронирующего электрода происходит по сравнению с чисто воздушным промежутком незначительное увеличение амплитуды тока разряда. Это связано как с увеличением напряженности поля вблизи острия при наличии диэлектрического барьера, а также дополнительными процессами ионизации и прилипания с участием материала диэлектрика, его химическим составом и структурой поверхности.

Выявлено, что наличие диэлектрика в промежутке приводит в любом случае к

искажению поля вблизи коронирующего электрода независимо от толщины барьера. Отмечено, что с увеличением толщины диэлектрика и уменьшением расстояния до острия (менее 2мм) происходит резкое искажение поля в области иглы, что связано с усилением влияния поля поляризации на поверхности пластины.

С помощью проявленных электрограмм выявлено, что при установке диэлектрических барьеров наблюдается интенсивное ветвление стримеров в области максимальной напряженности поля и менее интенсивное в остальной части промежутка. Отмечено, что процесс ветвления наблюдается при напряженности поля в промежутке  $> 6,5$  кВ/см.

Проявленные электрограммы свидетельствуют об изменении размеров головок и каналов стримеров при наличии в разрядном промежутке диэлектрических пластин.

1. *Кудряков К.И., Кужекин С.Г., Мусагалиев и др.* Перспективы развития источников питания установок для очистки газов от экологически вредных примесей // Теория и практика электрических разрядов в энергетике. – Сб. научн. ст.// Под ред. Дьяконова А.Ф. – Пятигорск: Издательство ЮЦПК РП "Южэнерготехнадзор", 1997. – 277 -286 с.
2. *Шваб А.* Измерения на высоком напряжении: Измерительные приборы и способы измерения. – 2-е изд. Пер. с нем.-М.: Энергоатомиздат, 1986, 264 с.
3. *Иванов А.В.* Применение электрографии для исследования объемных и поверхностных зарядов. Автореферат диссертации на соискание ученой степени к.т.н. Москва, 1971
4. *Тиматков В.В.* Дисс. канд. тех. наук.//Исследование структурных характеристик наносекундного импульсного коронного разряда в электродных системах различной конфигурации. М.: Московский энергетический институт (Технический университет), 2005

## **HAVADA NANOSANIYƏLİ İMPULS BOŞALMALARIN XARAKTERİSTİKALARIN VƏ STRUKTURLARIN TƏDQIQI**

**QURBANOV E.C., HƏŞİMOV A.M., QURBANOV K.B.,  
BONDYAKOV A.S., HÜSEYNLI A.Y.**

Təqdim olunan məqalədə, tacşəkilli impuls boşalmaların xarakteristikaları atmosfer havasında və elektrodlar arası oxla paralel yerləşdirilmiş dielektrik lövhələrin iştirakı ilə tədqiqatlar aparılmışdır. Boşalmaların strukturu elektroqrafik metodla öyrənilmişdir. Boşalmaların cərəyanının osilloqramları verilmiş və dielektrik materialların iştirakı ilə atmosfer hasasına nisbətən boşalma cərəyanının amplitudunun yüksəlməsi və iynəli elektrodla dielektriklərin arasındakı məsafənin elektrik sahə gərginliyinə təsiri göstərilmişdir.

## **EXPLORATIONS OF THE CHARACTERISTICS AND STRUCTURE OF NANOSECOND PULSED DISCHARGES IN AIR**

**GURBANOV E.D., HASHIMOV A.M., GURBANOV K.B.,  
BONDYAKOV A.S., HUSEYNLI A.Y.**

In presented article the characteristics of nanosecond pulsed discharges in air and in dielectric materials presence, placed parallel to axis of interelectrode space are explored. Also by electrographic method the discharges structure was explored. The discharges current oscillograms were given and shown the currents amplitude growth in dielectrics presence in comparison with air ones and influence of distance between the needle electrode and dielectric material on electrical field intensity in discharge gap.