

## ИССЛЕДОВАНИЕ ИНТЕГРАЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК УНИПОЛЯРНОГО КОРОННОГО РАЗРЯДА БАРЬЕРНОГО ТИПА

© 2004 В.П. Шорин<sup>1</sup>, И.А. Бакулин<sup>2</sup>, О.А. Журавлев<sup>1</sup>, А.В. Ивченко<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Самарский государственный аэрокосмический университет

<sup>2</sup> Самарский филиал Физического института им. П.Н.Лебедева РАН

Приведены результаты экспериментальных исследований влияния скорости перемещения диэлектрика на развитие коронного разряда барьерного типа. Анализируется процесс формирования усредненной поверхностной плотности зарядов в зависимости от скорости диэлектрика, а также приведена качественная картина распределения потенциала поверхностных зарядов.

Широкое применение коронного разряда в технике принципиально ограничено его малой мощностью. Сила тока в короне сдерживается пространственным зарядом внешней области разряда. На эту область приходится значительная доля падения потенциала в разрядном промежутке. К числу основных способов интенсификации разрядного процесса стало применение микропроводов [1], а также введение газового потока в межэлектродный промежуток [2]. Другим перспективным направлением решения данной проблемы явилось применение движущего диэлектрика для адсорбции объёмного заряда и его переноса на заземленный электрод [3, 4].

В работах [3–6], посвященных исследованию газового разряда в промежутке между катодом с сильно неоднородным полем и движущейся диэлектрической подложкой, рассматривались вопросы повышения эффективности ионизационных процессов применительно к рабочим камерам лазеров атмосферного давления и плазмохимических генераторов. В процессе исследований было установлено, что диэлектрическая пленка в результате поляризации в высоковольтном поле становится активным аккумулятором образующегося объёмного заряда, выполняя функцию распределенного сопротивления. Это способствует повышению однородности тока при формировании поверхностного разряда и изменению условий его перехода в контрагированную фазу. Предложенная физическая модель рассматривает протекающий процесс

как совокупность коронного разряда на острейшем электроде и поверхностного разряда, возникающего при переносе зарядов к токосъёмному электроду за счёт перемещения поляризованного диэлектрика.

Для аналитического описания процесса формирования зарядовых рельефов на поверхности диэлектрика можно воспользоваться моделью, предложенной в работе [7]. Система уравнений, объединяющая процессы переноса зарядов во внешней области коронного разряда с поверхностными процессами, выглядит следующим образом:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = -\operatorname{div} \vec{j}, \quad (1)$$

$$\rho = (n^+ z^+ - n^- z^-) e, \quad (2)$$

$$\vec{j} = (\mu^+ n^+ z^+ + \mu^- n^- z^-) e \vec{E}, \quad (3)$$

$$\operatorname{div}(\vec{E}) = \frac{\rho}{\epsilon_0 \epsilon}, \quad (4)$$

$$\frac{\partial \sigma}{\partial t} = -j_z. \quad (5)$$

Здесь:  $\mathbf{r}$  - объёмная плотность зарядов;  $\mathbf{j}$  - плотность тока,  $n^+, n^-$  - объёмная концентрация ионов соответствующего знака;  $\mu^+, \mu^-$  - подвижности ионов;  $e$  - элементарный заряд;  $\epsilon_0$  - электрическая постоянная;  $\mathbf{j}_z$  - нормальная составляющая плотности тока;  $\sigma$  - поверхностная плотность зарядов на диэлектрической подложке.

После некоторых допущений ( $n^+ \ll n^-, \mu^+$

$=\mu, \epsilon=1$ ) и ряда преобразований уравнение, характеризующее изменение объемной плотности заряда, приобретает вид:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = \frac{\mu \rho^2}{\epsilon_0} + \mu \vec{E} \cdot \text{grad} \rho, \quad (6)$$

которому в приближении стационарности процесса соответствует:

$$\frac{\rho^2}{\epsilon_0} + \vec{E} \cdot \text{grad} \rho = 0 \quad (7)$$

В итоге для определения профиля зарядов на поверхности диэлектрика необходимо знание распределения электрического поля вблизи поверхности подложки, аналитический расчет которого является самостоятельной и далеко нетривиальной задачей.

Цель настоящей работы заключалась в экспериментальном исследовании характера взаимодействия коронного разряда с формируемым на поверхности диэлектрика зарядом в зависимости от скорости перемещения диэлектрической подложки и сопротивления межэлектродного промежутка. Кроме того, в задачу входило качественное исследование распределения потенциала на поверхности диэлектрика.

### Описание установки

Исследование коронного разряда, сформированного в воздушной среде атмосферного давления, проводилось на экспериментальной установке, разработанной в СГАУ. Основными элементами установки являются два электрода ножевого типа, объединяемых в общую разрядную цепь движущимся диэлектрическим слоем (рис. 1).

Катод 1 имел радиус кривизны рабочей кромки 50 мкм и протяженность 15 мм. В качестве диэлектрической подложки 2 использовалась лента из полиэтилентерефталата (лавсан), имеющая ширину рабочей поверхности 42 мм и толщину слоя  $d=0,2$  мм. Лента располагалась на боковой поверхности металлического ротора 3 шириной 40 мм и радиусом  $R=50$  мм. Анод 4 был выполнен в виде заземленного электрода с радиусом рабочей кромки 50 мкм и имел протяженность 37мм. Электроды 1 и 4 размещались на расстоянии 90 мм относительно друг друга вдоль

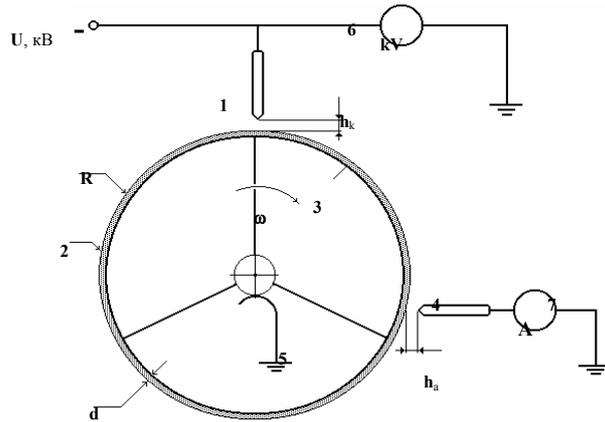


Рис. 1. Схема экспериментальной установки

по образующей поверхности ротора. Величина зазора между катодом и поверхностью диэлектрика составляла  $h_k=1,5$ мм. Ширина промежутка между диэлектриком и анодом в ходе экспериментов принимала следующие фиксированные значения:  $h_a=(1,5; 1,0; 0,5)$  мм.

Вращательное движение ротора задавалось электродвигателем с плавной регулировкой угловой скорости в диапазоне  $(0÷8000)$ об/мин. Измерение скорости вращения ротора с диэлектрическим слоем проводилось часовым тахометром ТЧ10-Р (относительная погрешность  $\delta=1\%$ ). Для эффективной поляризации диэлектрика ротор заземлялся посредством скользящего электрода 5.

Величина напряжения  $U_k$ , подаваемого от источника питания на катод, контролировалась посредством электростатического киловольтметра 6 типа С197 ( $\delta=1\%$ ). Измерение разрядного тока проводилось в анодной цепи микроамперметром 7 типа М2003-М1 ( $\delta=2,5\%$ ). При исследовании профиля распределения потенциала на поверхности диэлектрика с помощью зонда использовался также электростатический киловольтметр типа С50 ( $\delta=1\%$ ).

### Экспериментальные результаты

В первый момент появления на катоде высокого напряжения  $U_k$  отрицательной полярности в промежутке между электродом 1 и движущимся диэлектриком 2 возникает униполярный коронный разряд. В процессе его развития на поверхности движущегося диэлектрического слоя формируется область отрицательного заряда, электрическое поле которого препятствует пространственному

дрейфу образующихся в разряде отрицательных ионов в направлении токоёмного электрода (анода), расположенного по ходу движения диэлектрика. Однако, начиная с некоторой пороговой величины напряжения на катоде  $U_{пр}$ , потенциал поверхностных зарядов становится достаточным для инициирования на токоёмном электроде ещё одного разряда коронного типа (формируется “положительная корона”). В результате при участии движущегося диэлектрика осуществляется переход униполярного коронного разряда в фазу разряда с двумя коронирующими электродами. При этом проводимость внешней области разряда становится величиной зависимой от скорости переноса заряда диэлектрической подложкой и параметров, характеризующих её ёмкость.

В ходе исследований данного процесса проводились измерения вольт-амперных характеристик (ВАХ), а также зависимости тока коронного разряда от скорости перемещения  $V$  диэлектрической подложки для каждого из приведенных значений разрядного промежутка  $h_a$ . Скорость перемещения диэлектрика изменялась в пределах от 2,28 до 5,04 м/сек.

Сравнение ВАХ (рис.2,3) показало, что с увеличением скорости переноса объёмного заряда наблюдается увеличение угла наклона ВАХ, что эквивалентно росту проводимости внешней области. При этом наличие линейных участков у графиков свидетельствуют о том, что параметры разряда в соответствующих интервалах изменений напряжения  $U_k$  целиком определяются транспортными возможностями диэлектрика. Однако сопоставление относительных величин изменений проводимости внешней области и скорости  $V$  диэлектрика выявило некоторое их несоответствие, несмотря на кажущийся прямо пропорциональный характер связи данных параметров. Так, например, для промежутка на аноде 0,5 мм увеличение скорости перемещения слоя на 72% (с  $V_1=2,93$  м/сек до  $V_4=5,03$  м/сек) приводит к повышению проводимости внешней области только на 63%. Окончательным подтверждением того, что связь между данными величинами не носит строго линейный характер, стали пря-

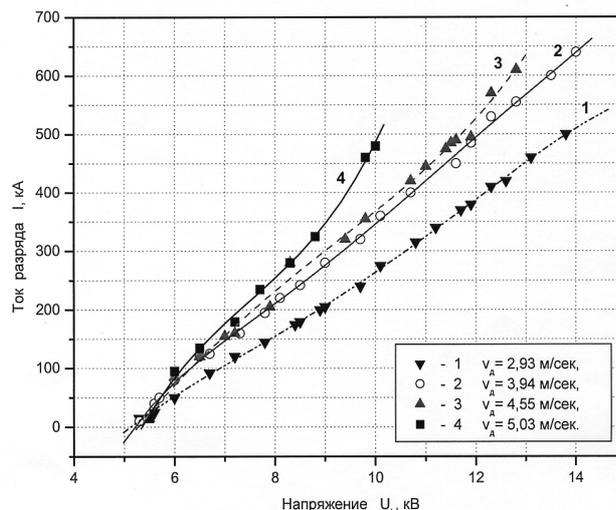


Рис. 2. Вольт-амперные характеристики разряда при разных скоростях перемещения диэлектрика  $V$  и промежутке на аноде  $h_a=1$  мм

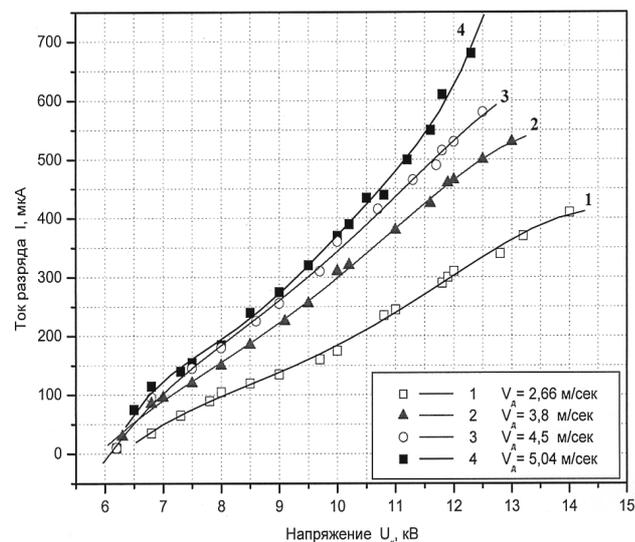


Рис. 3. Вольт-амперные характеристики разряда при разных скоростях перемещения диэлектрика  $V$  и промежутке  $h_a=0,5$  мм

мые измерения зависимостей тока разряда  $I$  от скорости движения  $V$  диэлектрика (рис.4).

Практически на всех графиках на рис.4 можно отметить несколько больший угол наклона для начальных участков кривых до точки перегиба, которая находится в интервале скоростей 2,0–2,5 м/сек.

Для качественного анализа динамики роста барьерного заряда на диэлектрической подложке можно воспользоваться экспериментальной зависимостью  $\sigma=f(V)$ , связывающей поверхностную плотность зарядов со скоростью перемещения слоя относительно разрядной зоны. Среднее значение поверхно-

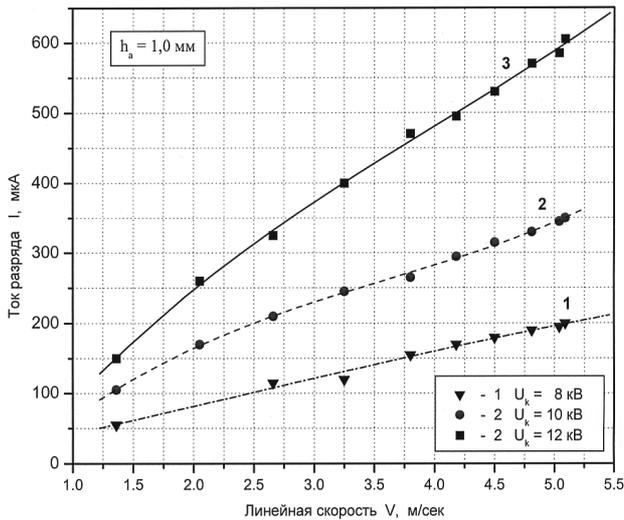


Рис. 4. Зависимость тока разряда I от скорости перемещения диэлектрика V

стной плотности заряда, доставляемого диэлектриком на токосъёмный электрод, оценивалось по формуле:

$$\sigma_{cp} = \frac{I}{V \cdot l}, \tag{8}$$

где l - поперечный размер поверхностного разряда.

За ширину разрядной зоны принималось среднее значение между длинами рабочих участков катода и анода.

Анализ графиков на рис.4 в соответствии с (8) показал, что существует некоторое значение скорости ( $V_1 \cong 2,3$  м/сек), при которой на диэлектрической подложке реализуется максимальная поверхностная плотность зарядов. Дальнейшее повышение скорости движения диэлектрика приводит к медленному снижению формируемой поверхностной плотности заряда, которая при скорости  $V_4 = 5,03$  м/сек уменьшается примерно на 9% по отношению к максимуму. Эта величина соответствует отмеченной ранее разнице между повышением проводимости внешней области разряда и ростом скорости переноса заряда.

Проводя дальнейший анализ ВАХ при скорости перемещения диэлектрического слоя порядка ~5 м/сек (рис.2, 3 кривые 4), необходимо отметить следующую тенденцию в развитии разряда: стадия линейного роста тока от прикладываемого напряжения сменяется быстро растущей зависимостью нелинейного характера. Причем этот про-

цесс, по мере уменьшения сопротивления анодного промежутка, наступает при относительно низком напряжении на катоде. По-видимому, потенциал поверхностных зарядов при данной скорости перестает играть роль фактора, ограничивающего развитие ионизационных процессов в катодном слое. В результате с ростом напряжения на фоне коронного разряда на поверхности диэлектрика появляется и стремительно развивается кистевой разряд.

Кроме того, сравнивая ВАХ разряда, полученные при одинаковой скорости перемещения диэлектрической подложки ( $V \sim 4,5$  м/сек), но с разным значением расстояния между анодом и подложкой (рис.5), нельзя не отметить следующие факты. Понижение величины напряжения зажигания с уменьшением  $h_a$  (с  $U_{пр} = 8,5$  кВ при  $h_a = 1,5$  мм до  $U_{пр} = 5,5$  кВ при  $h_a = 0,5$  мм) является вполне очевидным, поскольку связано с соответствующим изменением сопротивления газового промежутка. Более значимым, на наш взгляд, является то обстоятельство, что кривые 2 и 3 (рис.5) для анодных промежутков 0,5 мм и 1,0 мм с повышением энерговыделений практически сливаются в единый график тогда, как на стадии зажигания разряда они существенно расходятся. Отсюда, а также, основываясь на результатах [8], можно предположить, что с ростом мощности разряда существенно возрастает роль коротковолнового излучения в формировании проводимо-

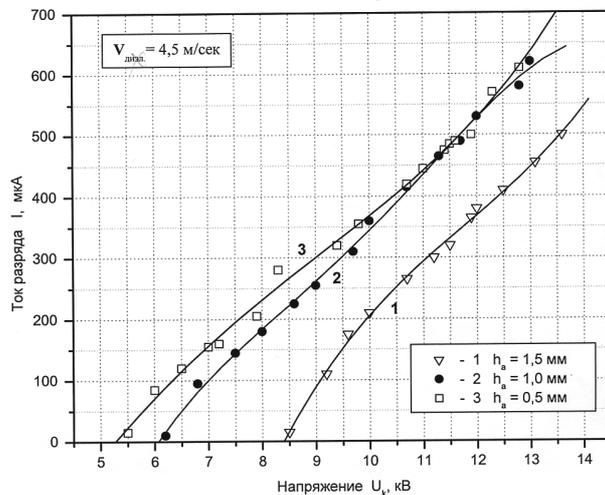
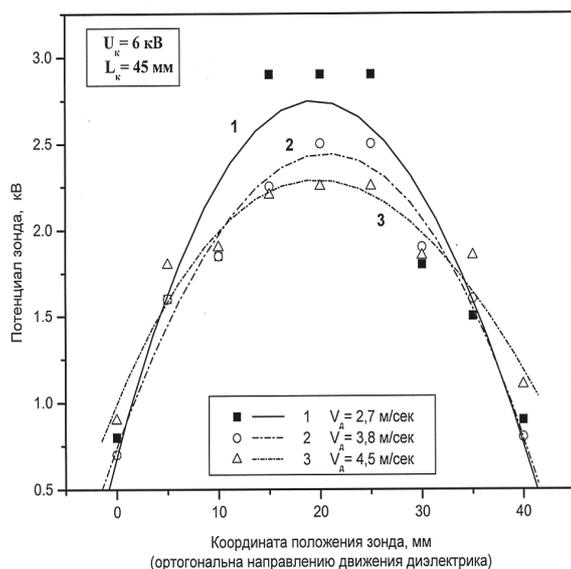


Рис.5. Вольт - амперные характеристики разряда при скорости движения диэлектрика  $V = 4.5$  м/с и различных значениях промежутка  $h_a$



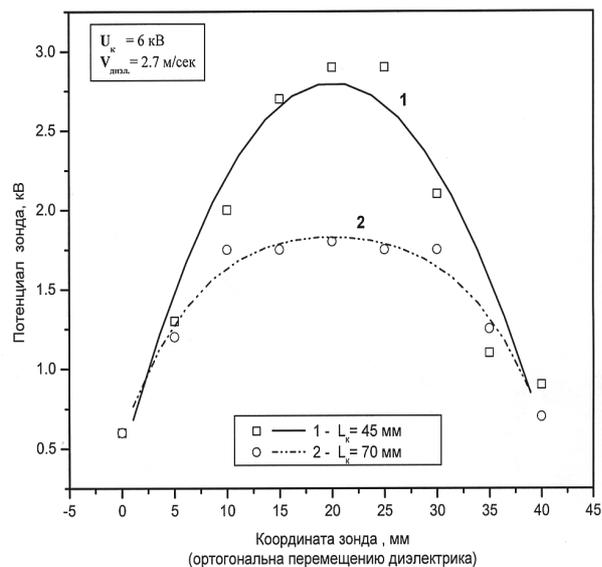
**Рис. 6.** Распределение потенциала  $\varphi$  по ширине слоя диэлектрика на расстоянии  $L=45$  мм от катода при  $U_k=6$  кВ и изменении скорости  $V$  подложки

сти анодной области разряда

Для получения качественной картины распределения барьерного заряда на поверхности диэлектрика было проведено исследование профилей наведенного потенциала  $\varphi$  методом зондового сканирования заряженной поверхности в поперечном относительно разряда направлении для разных  $V$  перемещения диэлектрика. Из рис.6 видно, что поверхностные заряды оседают на всей поверхности диэлектрической подложки, однако имеется ярко выраженная неоднородность в распределении по ширине несущего слоя. Максимум потенциала находится непосредственно на оси симметрии ленты и плавно убывает при смещении к краю (величина краевых потенциалов составляет примерно 20% от максимума).

Кроме этого можно отметить, что при увеличении скорости перемещения диэлектрика отчетливо наблюдается уменьшение центрального максимума потенциала поверхности. Диэлектрик не успевает зарядиться до первоначального потенциала при данной мощности разряда.

В случае фиксированной скорости движения диэлектрика наблюдается аналогичное изменение профиля потенциала поверхности при перемещении вдоль образующей ротора (рис.7). При удалении от катода центральный максимум потенциала убывает, что, по-видимому, вызвано дрейфом зарядов на



**Рис. 7.** Распределение потенциала  $\varphi$  по ширине слоя диэлектрика для двух расстояний  $L$  от катода при  $U_k = 6$  кВ и скорости подложки  $V=2.7$  м/с

границы диэлектрического слоя.

## Выводы

Исследование коронного разряда во взаимодействии с адсорбированными на поверхности зарядами показало, что движущийся диэлектрический слой, выполняя функцию распределенного пространственного сопротивления, является эффективным средством управления параметрами разряда.

Это проявляется в расширении границы устойчивости протекания коронного разряда, связанного с постоянным оттоком пространственного заряда за счет его осаждения на диэлектрике и дальнейшей транспортировки к токосъёмному электроду. Данный процесс препятствует быстрому нарастанию запирающего потенциала, что позволяет существенно увеличивать мощность коронного разряда.

С другой стороны, при изменении скорости переноса заряда и параметров диэлектрического слоя обеспечивается возможность целенаправленного управления процессом развития разряда.

Полученные данные о распределении заряда на поверхности диэлектрика дают лишь качественное представление об общих тенденциях в изменении зарядового профиля при изменении того или иного задействованного параметра. Тем не менее, однозначно можно утверждать следующее: в области

катода поверхностные заряды максимально сконцентрированы вблизи осевой линии диэлектрического слоя. По мере продвижения в направлении анода проявляется тенденция растекания зарядов в периферийные зоны слоя. Это приводит к снижению величины центрального максимума профиля поверхностного потенциала. Аналогичная тенденция наблюдается и при увеличении скорости перемещения диэлектрической подложки.

Особый интерес представляет область положительного коронного разряда в промежутке  $h_a$ , поскольку она является, по-видимому, мощным источником ионизирующего излучения. Выбирая режим протекания разряда, можно регулировать размеры области поверхности диэлектрика, участвующей в разрядном процессе (практически можно регулировать площадь излучаемой поверхности). При этом в широком диапазоне разрядных мощностей визуально наблюдалась высокая степень однородности поверхностного разряда.

Отмеченные особенности приобретают важное значение в случае использования разряда данного вида при разработке электроразрядных газовых лазеров. Представляется перспективным изучение вопроса об эффективности применения данного разряда в качестве системы предьонизации или устройства для генерации плазменного электрода в ТЕА  $\text{CO}_2$ -лазерах.

Работа поддержана грантом РФФИ № 02-02-17172.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Бахтаев Ш.А.* Коронный разряд на микропроводах и его применение // Тез. докл. II Всес. совещания по физике электрич. пробоя газов. Тарту: 1984.

2. *Акишев Ю.С., Напртович А.П., Трушкин Н.И.* Стационарный тлеющий разряд при атмосферном давлении: физика и применение // Тез. докл. VII конфер. по физике газового разряда. Самара: СГАУ. 1994.
3. *Журавлев О.А., Федосов А.И.* Исследование коронного разряда в газовом промежутке с диэлектрической пленкой на подвижном электроде // Самара: САИ, 1991. Деп. в ВИНТИ №377-В91, 23.01.91.
4. *Журавлев О.А., Федосов А.И.* Некоторые особенности разряда в газовом промежутке с диэлектриком на подвижном электроде // Тез. докл. VI конф. по физике газового разряда. Казань: КАИ, 1992.
5. *Журавлев О.А.* Устройство возбуждения объёмного разряда в плотных газах // Патент 2030046 МКИ НО1 S3/0977. №4842699/25. Бюл. № 6 от 21.02.95 г.
6. *Журавлев О.А., Марков В.П., Федосов А.И., Шорин В.П.* Формирование униполярного газового разряда в промежутке с подвижным электродом и применение его для исследования процессов взаимодействия с поверхностными зарядно-разрядными структурами. Деп. в ВИНТИ, №865-В98 ОТ 25.03.98.
7. *Шорин В.П., Журавлев О.А., Федосов А.И., Ивченко А.В., Марков В.П.* Разработка модели поверхностной волны зарядов затухающего коронного разряда // Известия Самарского научного центра РАН. 1999. №1.
8. *Акишев Ю.С., Грушин М.Е., Дерюгин А.А. и др.* Интегральные и локальные характеристики протяженной положительной короны в воздухе в режиме нелинейных колебаний // Физика плазмы. 1999. Т.25. №11.

## INVESTIGATION OF BARRIER CORONA DISCHARGE INTEGRATION PERFORMANCES

© 2004 V.P. Shorin<sup>1</sup>, I.A. Bakulin<sup>2</sup>, O.A. Zhuravlev<sup>1</sup>, A.V. Ivchenko<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Samara State Aerospace University

<sup>2</sup>Samara Branch of Physics Institute named for P.N. Lebedev of Russian Academy of Sciences

Are represented, experimental researches results of influence speed removing of a dielectric lay on a development of barrier corona discharge. The process forming average surface density of charges from speed of a dielectric is parsed. Diagrams of surface charges potential distribution, are reduced.