

Коаксиальная система с плазмогенерирующим эмиттером на поверхностном разряде

ЛАЗУКИН А.В., КРИВОВ С.А.

Рассмотрена проблема, связанная с разработкой перспективных технологий по управлению газодинамическими воздушными потоками, очистке загрязнений из воздуха, с поверхности материалов и т.д. Представлены экспериментальные и теоретические данные по вольт-амперным характеристикам в коаксиальной системе эмиттер–коллектор при наличии поверхностного разряда на эмиттере. Приводятся также расчетные кривые по распределению напряженности поля в исследуемой системе при наличии объемного заряда разной плотности.

К л ю ч е в ы е с л о в а: коаксиальная электродная система, диэлектрический барьерный разряд, вольт-амперная характеристика, аналитический расчет, эксперимент

Поверхностный диэлектрический барьерный разряд является основой для создания ряда перспективных технологий. Это такие современные технологии, как управление газодинамическими воздушными потоками [1], удаление загрязнений различной природы из воздуха [2] и с поверхности материалов [3, 4], агrobiологические технологии [5] и т.д. Дополнительные возможности для перспективных технологий, связанные с движением потоков заряженных частиц, возникают при использовании в конструкциях с поверхностным диэлектрическим барьерным разрядом дополнительного высоковольтного электрода, расположенного над поверхностью плазмы [6, 7]. К этому электроду, который часто называют коллектором, движется поток ионов, вытягиваемых из слоя плазмы поверхностного разряда. При этом по аналогии с названием коллектор (коллектор заряда), слой плазмы можно назвать эмиттером ионов (плазменным эмиттером заряда). Ионы, знак заряда которых противоположен знаку напряжения, приложенного к коллектору, обеспечивают протекание на коллектор электрического тока, увеличивающегося с увеличением приложенного напряжения.

В ряде опубликованных работ [8–12] приведены экспериментальные зависимости этого вытягиваемого из плазмы тока от приложенного к коллектору напряжения в плоскопараллельном поле. Зависимость тока на коллектор от напряжения, приложенного к нему, начинается от нуля и пропорциональна квадрату вытягивающего напряжения $I \sim U^2$. К другим характеристикам трехэлектродной системы (кроме тока, вытягиваемого из зоны плазмы поверхностного разряда) относится распределение потенциала и напряженности электрического поля в промежутке между электродами. Вид зави-

симости напряженности поля для плоского промежутка, полученной теоретически в [11, 12]:

$$E = 1,5 E_{\text{cp}} \sqrt{\frac{x}{d}},$$

согласно которой напряженность поля в промежутке плавно увеличивается от нуля над поверхностью плазменного эмиттера до $1,5 E_{\text{cp}}$ у коллектора (где $E_{\text{cp}} = U / d$ – средняя напряженность поля в промежутке). Экспериментального подтверждения полученному теоретически выражению не приводится.

В статье приведены описание принципа работы конструкции и анализ электрофизических характеристик коаксиальной электродной системы с плазменным эмиттером на поверхностном диэлектрическом барьерном разряде (ПДБР). Для этого последовательно рассматриваются три задачи: первая – это проведение экспериментального исследования вольт-амперных характеристик представленной коаксиальной системы при разных знаках напряжения высоковольтного коллектора и различной конфигурацией питания плазмогенерирующего эмиттера; вторая – теоретический расчет распределения напряженности поля в промежутке между плазменным эмиттером и высоковольтным коллектором; третья – подтверждение прямыми экспериментальными измерениями теоретических расчетов напряженности электрического поля.

Коаксиальная трехэлектродная система выбрана по двум соображениям: первое – последовательное инженерное усложнение электродной системы «плоский конденсатор с плазменным эмиттером» до «коаксиала с плазменным эмиттером» и его возможное использование далее в технологиях зарядки и осаждения частиц; второе – проведение экспериментальной проверки расчетного распределения напряженности электрического поля в проме-

жутке с объемным зарядом — прямым зондовым методом.

Схема экспериментального стенда для исследования электрофизических характеристик коаксиальной электродной системы с плазменным эмиттером на ПДБР приведена на рис. 1.

В состав стенда входят электродные системы и измерительные элементы. Высоковольтный коллектор представляет собой конструкцию из металлического цилиндрического электрода 1 с внутренним диаметром 60 мм и охранных электродов 2 и 3, которые выполнены с закруглением по радиусу 60 мм для устранения краевых эффектов. Все эти элементы находятся под одним потенциалом U_k и отделены друг от друга тонкими диэлектрическими кольцами 4 и 5. Измеритель тока коллектора I_k подключен к центральной секции коллектора. Для оценки влияния краевых эффектов в экспериментах использовались центральные секции различной длины — 67, 134 и 201 мм. Было установлено, что существует точная линейная связь между значением тока и длиной измерительной (центральной секции) с незначительным (менее 2%) отклонением. Это позволяет рассматривать токовые экспериментальные данные в виде удельного тока на единицу длины электрода и использовать их в дальнейшем в теоретическом расчете напряженности электрического поля в промежутке между электродами. Конструкция плазмогенерирующего эмиттера, который расположен соосно с коллектором, состоит из стержневого электрода 6 круглого сечения с диаметром $d=2$ мм (центральный электрод); цилиндрического керамического или стеклянного диэлектрика 7 с отверстием под центральный электрод с толщиной стенки 0,5–1,5 мм; внешнего электрода плазменного эмиттера 8 («плазмогенерирующий электрод»), выполненного из навитой на диэлектрик полосы из тонкой фольги или круглой тонкой проволоки. Элементы эмиттера могут подключаться к высоковольтному высокочастотному источнику двумя способами (форма напряжения источника синусоидальная, частота питания 14 кГц, напряжение до 3 кВ). Первый способ — «прямое включение» — плазмогенерирующий электрод заземлен, на центральный электрод подано высокочастотное переменное напряжение. Именно эта схема подключения для определенности изображена на рис. 1. Второй способ включения — «обратное включение» — центральный электрод заземлен, на плазмогенерирующий подано высокое напряжение. В том и другом случае плазма будет присутствовать на внешней поверхности диэлектрической трубки и будет источником ионов для тока на коллектор. Металлический электрод 9 диаметром

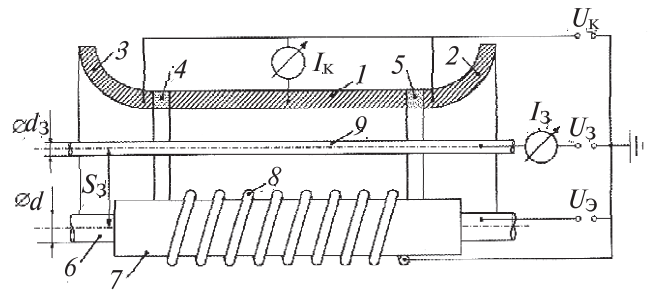


Рис. 1. Схема экспериментального стенда

$d_3 = 1,6$ мм, который располагается параллельно оси коаксиальной системы на разных расстояниях от нее S_3 , используется в зондовых измерениях напряженности электрического поля. В процессе зондовых измерений он подключается к измерителям тока и напряжения зонда I_3 и U_3 .

Приведем для сравнения ряд существенных отличий функционирования коаксиальной системы с ПДБР от традиционной коаксиальной системы с коронным разрядом на цилиндрическом проводе, изображенных на рис. 2.

Коаксиальная система с коронным разрядом (рис. 2,а). При подаче на электроды системы напряжения U коронный разряд на проводе отсутствует до напряжения зажигания разряда U_0 (U_0 — начальное напряжение). При повышении напряжения на коронирующем проводе до значения U_0 напряженность поля на проводе достигает значения E_0 (E_0 — начальная напряженность для соответствующего провода в соответствии с формулой Пика). При превышении значения напряжения U более U_0 между электродами протекает ток коронного разряда

$$I_k \approx kG_1 U(U - U_0).$$

Здесь k — подвижность ионов соответствующего знака; G_1 — геометрический коэффициент для конкретной электродной системы [13].

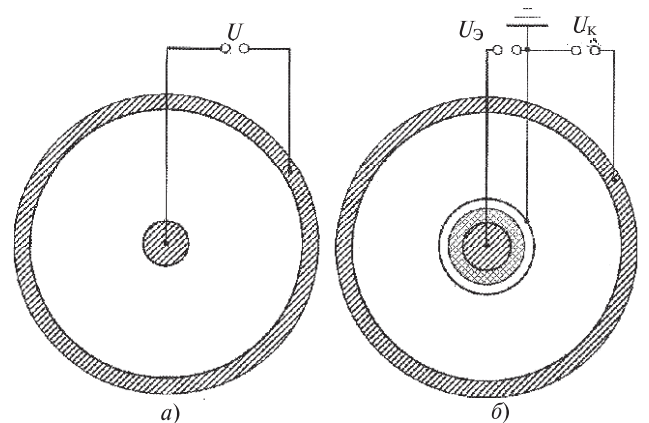


Рис. 2. Традиционная коаксиальная коронирующая система с проводом (а) и коаксиальная система с ПДБР (б)

При этом на поверхности коронирующего про- вода напряженность не изменяется и остается при- мерно равной начальной E_0 .

Коаксиальная система с ПДБР (рис. 2,б). При подаче напряжения U_K на коллектор электродной системы (внешний электрод) возможны две раз- личные физические модели: первая – если напря- жение на плазмогенерирующий электрод не подано ($U_э=0$), то поверхностный разряд отсутствует и ток на коллектор отсутствует. Распределение напря- женности электрического поля в коаксиальной системе соответствует электростатическому распре- делению по аналогии с системой по рис. 2,а; вто- рая – напряжение на электроды поверхностного разряда подано, и плазма поверхностного разряда присутствует. Интенсивность горения разряда за- висит от значения плазмогенерирующего напряже- ния $U_э$, геометрии электродов и характеристик ди- электрического барьера. При наличии в такой си- туации высокого напряжения на коллекторе U_K в промежутке начинает протекать ток (ионы «вытя- гиваются» из плазмы ПДБР). На поверхности плаз- менного эмиттера напряженность снижается из-за объемного заряда, внедренного в промежуток. При этом зависимость тока коллектора от напряжения коллектора должна иметь вид

$$I_K \approx kG_2 U_K^2.$$

При этом, поскольку к электродам приложено два независимых напряжения различного вида, то будет иметь место зависимость тока коллектора от приложенного к электродам эмиттера напряже- ния:

$$I_K \approx kG_3 U_э (U_э - U_{0э}).$$

Здесь $U_э$ – действующее значение высокочастотно- го напряжения, приложенного к эмиттеру; $U_{0э}$ – начальное напряжение зажигания разряда на эмит- тере.

При этом, поскольку возможны четыре различ- ных комбинации из знаков напряжения питания коллектора и схем подключения высокочастотного питания эмиттера, имеем четыре группы различ- ных вольт-амперных характеристик: 1-я и 2-я – прямые схемы включения плазмогенерирующего напряжения при отрицательном и положительном коллекторе соответственно; 3-я и 4-я – обратные схемы включения плазмогенерирующего напряже- ния при отрицательном и положительном коллек- торе соответственно.

Таким образом, решение первой задачи заклю- чается в экспериментальном получении группы вольт-амперных характеристик. Эксперименталь- ные зависимости указанных ранее вольт-амперных характеристик приведены на рис. 3.

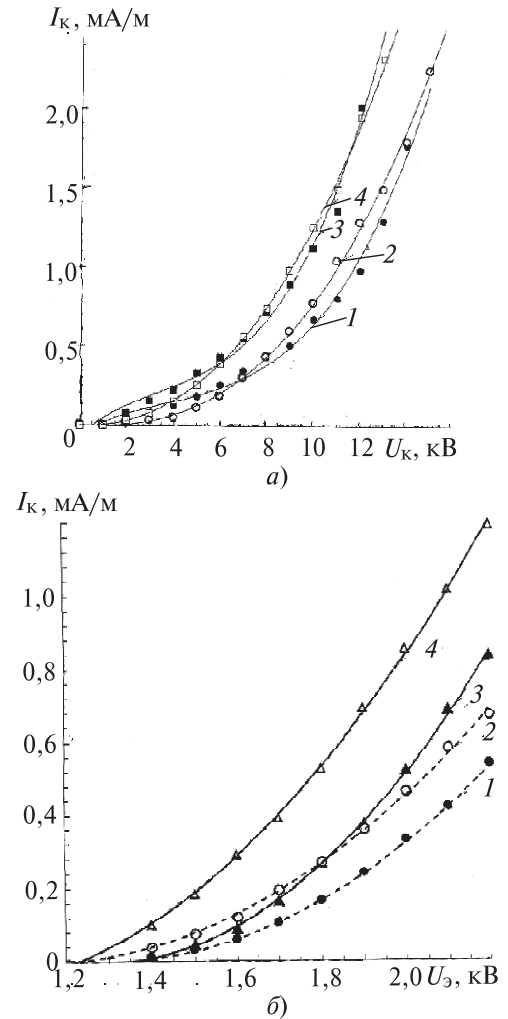


Рис. 3. Зависимости удельного тока на коллектор от напряже- ния: а – на коллекторе $I_K = f(U_K)$; б – на плазмогенериру- ющем эмиттере $I_K = f(U_э)$: 1 – прямое включение, отрицатель- ная полярность; 2 – то же, положительная полярность; 3 – об- ратное включение, отрицательная полярность; 4 – то же, поло- жительная полярность

Для удобства представления данных различных экспериментов на всех графиках приведен удель- ный ток на единицу длины коллектора (удельный ток на коллектор).

Аппроксимация зависимостей, приведенных на рис. 3,а, выполнена в упрощенной форме Дейча $I_K \approx kG_2 U_K^2$ с геометрическим коэффициентом

$$G_2 = \frac{8\pi\epsilon_0}{R^2 \ln\left(\frac{R}{r_0}\right)} \left(1 - B \sqrt{\frac{R}{r_0}}\right).$$

Аппроксимация зависимостей, приведенных на рис. 3,б, выполнена в форме $I_K = kG_3 U_э (U_э - U_{0э})$ с геометрическим коэффициентом

$$G_3 = \frac{8\pi\epsilon_0}{R^2 \ln\left(\frac{R}{r_0}\right)} \left(1 + C \sqrt{\frac{R}{r_0}}\right).$$

Аппроксимации зависимостей отличаются безразмерными параметрами B и C :

Схема подключения	Значение параметра	
	B	C
1-я	0,14	12,2
2-я	0,18	7,9
3-я	0,10	21,0
4-я	0,12	13,0

При аппроксимации использованы соответствующие значения подвижности ионов $k_+ = 2,1$ и $k_- = 2,24 \text{ см}^2/\text{Вс}$.

При этом экспериментально определены значения начального напряжения зажигания разряда на эмиттере $U_{0э}$, которые зависят от полярности коллектора и составляют: для отрицательной полярности $U_{0э} = 1,3 \text{ кВ}$, для положительной полярности $U_{0э} = 1,2 \text{ кВ}$ (действующие значения).

Второй задачей, которая рассматривается в статье, является теоретический расчет электрического поля с объемным зарядом в промежутке между коллектором и плазмогенерирующим эмиттером. Для прямых схем включения напряжения на эмиттере теоретический расчет может быть проведен аналитически и его расчетная система приведена на рис. 4.

Формулировка расчетной задачи выглядит следующим образом. При подаче соответствующего напряжения на электроды $U_э > U_{0э}$ на эмиттере возникает плазма поверхностного разряда и при $U_к > 0$ в межэлектродном промежутке появляется объемный заряд. После возникновения плазмы разряда поле между электродами описывается в стационарном состоянии традиционной системой дифференциальных уравнений:

$$\Delta\varphi = -\frac{\rho}{\varepsilon_0}; \tag{1}$$

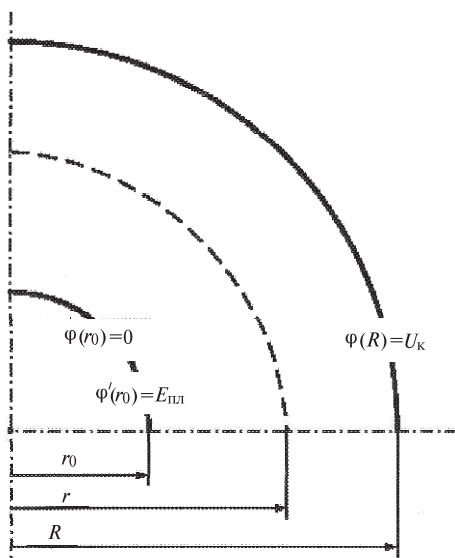


Рис. 4. Расчетная коаксиальная схема для рассматриваемой задачи

$$\vec{E} = -\Delta\varphi; \tag{2}$$

$$\text{div}\vec{j} = 0; \tag{3}$$

$$\vec{j} = k\rho\vec{E}, \tag{4}$$

где φ – потенциал; ρ – плотность объемного заряда; \vec{j} – плотность тока; k – подвижность ионов соответствующего знака; ε_0 – диэлектрическая постоянная; \vec{E} – напряженность электрического поля.

Система (1)–(4) для частного случая коаксиальных цилиндров имеет решение при учете, что напряженность поля зависит только от текущего радиуса, а именно:

$$\frac{1}{r} \frac{d}{dr}(rE) = \rho / \varepsilon_0. \tag{5}$$

Краевые условия рассматриваемой задачи: потенциалы на поверхностях электродов

$$(\varphi)_{r=r_0} = 0; (\varphi)_{r=R} = U_к \tag{6}$$

и напряженность поля на границе зоны ионизации плазмы, которая по аналогии с коронным разрядом может быть задана непосредственно у поверхности плазмогенерирующего электрода

$$(E)_{r=r_0} = E_{пл}. \tag{7}$$

Уравнение неразрывности (3) записывается в виде

$$I = 2\pi rJ, \tag{8}$$

где I – удельный ток на коллектор (на единицу длины электрода).

Используя уравнение (4), получим:

$$\rho = I / 2\pi r k E. \tag{9}$$

Подставив выражения (8) и (9) в (5), получим уравнение с разделяющимися переменными:

$$\int_{r_0}^r r E d(rE) = \frac{I}{2\pi\varepsilon_0 k} \int_{r_0}^r \frac{r}{r^2} dr, \tag{10}$$

где r – текущий радиус.

Проинтегрировав (10), получим:

$$E(r) = \sqrt{\frac{I}{2\pi\varepsilon_0 k} \left(1 - \frac{r_0^2}{r^2} \right) + \left(\frac{E_{пл} r_0}{r} \right)^2}. \tag{11}$$

При выводе выражения для напряженности граничное условие (7) может быть сформулировано из двух предельных подходов, которые количественно отличаются наличием объемного заряда в промежутке (что эквивалентно относительно большему или меньшему току, вытягиваемому из плазмы разряда). Первый подход предполагает невысо-

кую плотность объемного заряда ρ в промежутке и соответственно незначительное искажение напряженности поля над поверхностью плазмогенерирующего электрода. В этом случае напряженность электрического поля может быть

$$E_{\text{пл}}(r_0) = \frac{U_{\text{к}}}{r_0 \ln \frac{R}{r_0}}, \quad (12)$$

что соответствует значению электростатической напряженности на поверхности плазмогенерирующего электрода.

Второй подход предполагает наличие в пределе такого объемного заряда ρ , который существенно снижает электростатическую напряженность над поверхностью плазмы вплоть до нуля. В этом предельном случае выражение для распределения напряженности поля

$$E(r) = \sqrt{\frac{I}{2\pi\epsilon_0 k} \left(1 - \frac{r_0^2}{r^2}\right)}. \quad (13)$$

Выражения (11) и (13) имеют различия в области, близкой к электроду с плазмой. И чем более развит поверхностный разряд или чем больше ток, вытягиваемый из плазмы поверхностного разряда, тем на большей части межэлектродного промежутка напряженность становится равной

$$E(R) = \sqrt{\frac{I}{2\pi\epsilon_0 k}}.$$

Этот результат должен быть проверен экспериментально с использованием описанного ранее стенда методом зондовых измерений. Исследование электрических полей с объёмным зарядом с помощью метода зондовых характеристик является прямым экспериментальным методом [13]. Данный метод отработан и успешно используется для изучения поля внешней зоны униполярной короны. Методика в своей принципиальной части справедлива для электрических полей любого типа, однако на практике используется главным образом для изучения плоскопараллельных и коаксиальных полей.

Данный метод заключается в том, что на зонд (металлическое тело), помещённый в исследуемую точку поля, подается напряжение относительно заземленного электрода и снимается вольт-амперная характеристика зонда (зависимость тока зонда от напряжения на нём). Например, при исследовании внешней области коронного разряда в системе электродов провод–плоскость в качестве зонда можно использовать провод, размещённый параллельно коронирующему электроду или в рассмат-

риваемой коаксиальной системе — параллельно плазмогенерирующему эмиттеру. Зонд помещается в точки: 12,5; 15,0; 17,5; 20,0; 22,5; 25,0; 27,5 мм от центра коаксиальной системы. На зонд подаётся напряжение от источника постоянного напряжения, измеряемое киловольтметром, ток зонда измеряется микроамперметром. Для снятия зондовых характеристик напряжение на зонде плавно поднимают и контролируют, чтобы напряжение на внешнем цилиндре и высокочастотное напряжение оставалось постоянным. Результатом данного эксперимента является подаваемое напряжение на зонд и ток зонда, по которым строятся ВАХ зонда для различных точек пространства.

Для получения корректных результатов зонд не должен вносить искажения в исследуемое поле:

- 1) размеры зонда должны быть пренебрежимо малы по сравнению с расстоянием до основных электродов;
- 2) зонд и подвод к нему напряжения должны располагаться вдоль эквипотенциали поля;
- 3) напряжение, подаваемое на зонд, не должно существенно отличаться от потенциала точки поля, в которую помещён зонд.

Вольт-амперные характеристики, полученные с помощью зонда, состоят из линейной и криволинейной частей (рис. 5). По данной характеристике можно найти: потенциал поля $U_{\text{изм}}$ в точке измерения (по точке пересечения продолжения линейной части зондовой характеристики с осью абсцисс) и произведение подвижности ионов на их плотность $k\rho$ (по тангенсу наклона линейной части) [13].

При этом традиционный вид зондовых характеристик для коронного разряда [13] «зеркально» отличается от характеристик, полученных для исследуемой системы. При этом попытки поместить зонд на расстояния менее 8–10 мм от плазмы приводят к нестабильным показаниям и пробоям с плазмогенерирующего электрода на зонд. Очень близко к коллектору зонд начинает экранировать поток ионов с обратной стороны зонда, что приводит к снижению ВАХ и снижению измеренного значения потенциала более чем на 20–30%. Так что традиционная реализация метода зондовых харак-

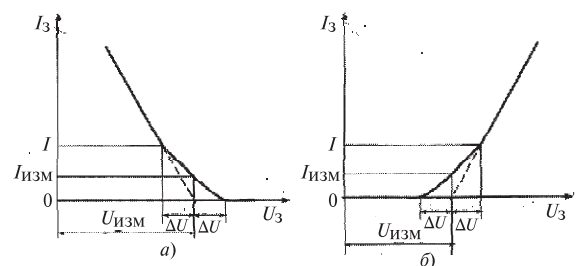


Рис. 5. Вольт-амперная характеристика зондов: а — для коронного разряда [13]; б — для исследуемой системы

теристик в крайних областях межэлектродного промежутка приводит к некорректным результатам.

По результатам зондовых измерений потенциалов построены распределения напряженности электрического поля в рассматриваемой коаксиальной системе с ПДБР по принципу $E_i = \Delta U_i / \Delta r_i$. Пример распределения напряженности электрического для режима измерений $U_{\text{э}} = 2,2$ кВ и $U_{\text{к}} = -10$ кВ приведен на рис. 6. Экспериментальные измерения на рис. 6 нанесены в виде точек и демонстрируют хорошее совпадение с теоретическими расчетами в большей части промежутка. При этом остается существенная неопределенность со значением напряженности поля в области вблизи плазмогенерирующего электрода. Реальное значение этой напряженности $E_{\text{пл}}$ должно находиться в области между значением электростатической напряженности при $r=r_0$ в данном случае $E_{\text{пл}}(r_0) = E_{\text{эл.ст}} = 17,91$ кВ/см (при $r_0 = 2,1$ мм и $U_{\text{к}} = 10$ кВ): это – кривая 2, и значением, равным нулю при $r=r_0$ (кривая 3 рис. 6).

Прояснить сложившуюся неопределенность возможно при использовании еще одного условия для теоретической модели, не вошедшего в систему уравнений (1)–(4). А именно, интеграл от напряженности по всему промежутку должен дать значение приложенного напряжения между коллектором и эмиттером:

$$\int_{r_0}^R E dr = U_{\text{к}}. \quad (14)$$

Сложность реализации такого подхода заключается в том, что аналитическое выражение для этого интеграла от (11) известно [14], но решить его аналитически относительно $E_{\text{пл}}(r_0)$ не удастся. Поэтому воспользуемся определением $E_{\text{пл}}(r_0)$ из решения уравнения (13) в обратном порядке, используя численное интегрирование в пакете MATLAB.

Интеграл от кривой 3 (при $E_{\text{пл}}(r_0)=0$) дает значение $U_{\text{к}} = 8,032$ кВ, что существенно ниже 10 кВ, подаваемого на коллектор. Интеграл от кривой 2, в свою очередь, дает $U_{\text{к}} = 13,65$ кВ, что также не соответствует приложенному напряжению. Методом итераций, меняя $E_{\text{пл}}(r_0)$ в диапазоне $0 \div 17,91$ кВ/см, добиваемся выполнения условия (14). При этом напряженность поля над поверхностью плазмы получается равной 8,8 кВ/см.

Скорректированное распределение напряженности в промежутке (4) еще более точно соответствует экспериментальным точкам и является корректным решением задачи определения напряженности электрического поля в коаксиальной системе с плазменным эмиттером.

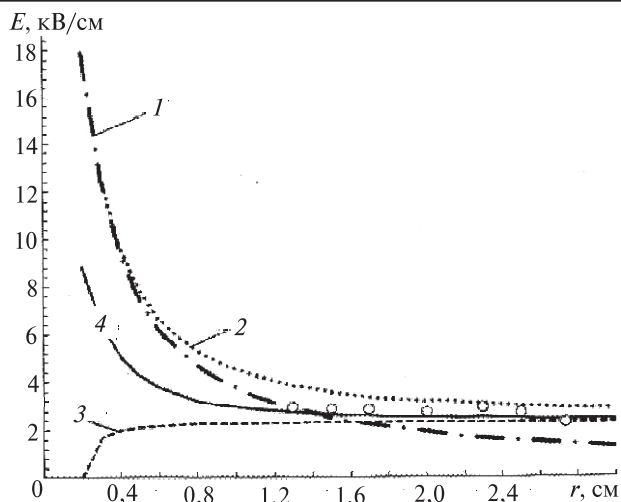


Рис. 6. Распределение напряженности электрического поля в коаксиальной системе с плазменным эмиттером: 1 – электростатическая напряженность поля в отсутствие поверхностного разряда; 2 – расчет по (11) с учетом (12); 3 – расчет по (13); 4 – скорректированное распределение напряженности; O – эксперимент

Заключение. Экспериментально и теоретически исследована коаксиальная электродная система с плазменным эмиттером на поверхностном разряде. Получены выражения для основных электрических характеристик системы – напряженности электрического поля в межэлектродном промежутке и вольт-амперных характеристик: зависимости тока коллектора от напряжения на коллекторе и зависимости тока коллектора от напряжения на плазмогенерирующем эмиттере. Показано, что распределение напряженности электрического поля в промежутке между плазменным эмиттером и высоковольтным коллектором в коаксиальной электродной конфигурации близко к однородному. В рассмотренных условиях область неоднородности (рост напряженности при приближении к плазменному эмиттеру ионов) ограничена 30% промежутка. Построенная расчетная модель позволяет сделать выводы о том, что с ростом удельного тока эту область можно будет сократить, а напряженность в промежутке повысить. Равномерное распределение поля важно для систем управления движением заряженных частиц в блоках коаксиальных электрофильтров с зарядным устройством на ПДБР.

Работа выполнена при поддержке Фонда содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере по программе «УМНИК» в рамках договора №10593ГУ2/2016 от 13.10.2016 г.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Moreau E. Airflow control by non-thermal plasma actuators. – J. Phys. D; Appl. Phys., 2007, vol. 40 pp. 605–636.
- Jolibois J., Takashima K., Mizuno A. Application of a non-thermal surface plasma discharge in wet condition for gas exhaust treatment: NOx removal. – Journal of Electrostatics, June

2012, vol. 70, iss. 3, pp. 300–308: <http://dx.doi.org/10.1016/j.elstat.2012.03.011>.

3. **Sláma J., Kríha V.** Inhibition of candida albicans growth on surfaces treated by dielectric barrier discharge with various barriers. — Acta Polytechnica, 54(4), 290–294, 2014doi:10.14311/AP.2014.54.0290

4. **Grabowski M., Hoiub M., Balcerak M., Kalisiak S., Dąbrowski W.** Decontamination of black pepper powder using dielectric barrier discharge systems in atmospheric pressure.— Book of Contributions 14th Intern. Symposium on High Pressure Low Temperature Plasma Chemistry (HAKONE XIV), September 21–26, 2014 (Zinnowitz, German), pp 1–4.

5. **Dobrin D., Magureanu M., Mandache N. and Ionita M.D.** The effect of non-thermal plasma treatment on wheat germination and early growth. — Innovative Food Science and Emerging Technologies, 2015, vol. 29, pp. 255–260.

6. **Masuda Senich, Washizu Masao, Mizuno Akira, Akutsu Kensuke.** Boxer-Charger a novel charging device for high resistivity powders. — Conf. Rec. of IEE/IAS, 1978, Annual Conf. pp. 16–22.

7. **Sokolova M., Hulka L., Pietsch G.J.** Influence of a Bias Voltage on the characteristics of Surface Discharge in Dry Air. — Plasma Process. Polym., 2005, 2, pp. 162–169.

8. **Kiss E., Masuda S.** On effect of D.C. bias voltage on ionic current and ozone production of surface discharge type ozoniser. — Journal of Electrostatics, 1989, 23, pp. 179–188.

9. **Соколова М.В., Первеев А.И., Митин А.Н.** Факторы, определяющие эффективность поверхностного разряда как источника заряженных частиц. — Сб. Материалов Всероссийской (с международным участием) конференции «Физика низкотемпературной плазмы» (ФНТП-2014), т. 1. — Казань: Изд-во Казанского национального исследовательского технического университета, 2014, с. 140–144.

10. **Лазукин А.В., Кривов С.А.** Использование электродных систем с поверхностным электрическим барьерным разрядом в качестве эмиттеров тока. — Электричество, 2016, № 2, с. 4–11.

11. **Небогаткин С.В., Хасая Р.Р., Хомич В.Ю., Ямщиков В.А.** Новый подход к получению направленных потоков заряженных и нейтральных частиц в газе, основанный на эффекте «электрического ветра». — Прикладная физика, 2009, № 4, с. 111–117.

12. **Мошкунев С.И., Небогаткин С.В., Ребров И.Е., Хомич В.Ю., Ямщиков В.А.** Система прокачки газовых смесей лазеров с использованием высокочастотного барьерного разряда. — Квантовая электроника, 41, 2011, № 12, с. 1093–1097.

13. **Верещагин И.П., Левитов В.И., Мирзабекян Г.З., Пашин М.М.** Основы электрогазодинамики дисперсных систем. — М.: Энергия, 1974, 480 с.

14. **Тиходеев Н.Н.** Дифференциальное уравнение униполярной короны и его интегрирование в простейших случаях. — ЖТФ, т. XXV, вып. 88, 1955, с. 1449–1457.

[11.01.2017]

А в т о р ы: **Лазукин Александр Вадимович** окончил Институт электроэнергетики Московского энергетического института (МЭИ) — ныне Национальный исследовательский университет (НИУ) «МЭИ» в 2011 г. Научный сотрудник кафедры техники и электрофизики высоких напряжений (ТЭВН) НИУ «МЭИ».

Кривов Сергей Анатольевич окончил электроэнергетический факультет МЭИ в 1980 г. В 2000 г. защитил докторскую диссертацию «Разработка научных основ электрической сепарации по проводимости» в МЭИ. Профессор кафедры ТЭВН НИУ «МЭИ».

Elektrichestvo (Electricity), 2017, No. 5, pp. 4–11

DOI:10.24160/0013-5380-2017-5-4-11

The Coaxial System Involving a Plasma Generating Emitter Based on the Surface Discharge Effect

LAZUKIN Aleksandr V. (National Research University «Moscow Power Engineering Institute» (NRU «MPEI», Moscow, Russia) — Scientific researcher

KRIVOV Sergei A. (NRU «MPEI», Moscow, Russia) — Professor, Dr. Sci. (Eng.)

The article addresses the problem concerned with development of prospective technologies for control of gas dynamic air flows, for removing impurities from air, from the surface of materials, etc. Experimental and theoretical data on the volt-ampere characteristics in a coaxial emitter-collector system in the presence corona of discharge on the emitter are presented. Calculated curves characterizing the distribution of electric field strength in the studied system containing a bulk charge of different density are also given.

Key words: coaxial electrode system, dielectric barrier discharge, volt-ampere characteristic, analytic calculation, experiment

REFERENCES

1. **Moreau E.** Airflow control by non-thermal plasma actuators. — J. Phys. D; Appl. Phys., 2007, vol. 40 pp. 605–636.

2. **Jolibois J., Takashima K., Mizuno A.** Application of a non-thermal surface plasma discharge in wet condition for gas exhaust treatment: NOx removal. — Journal of Electrostatics, June 2012, vol. 70, iss. 3, pp. 300–308: <http://dx.doi.org/10.1016/j.elstat.2012.03.011>.

3. **Sláma J., Kríha V.** Inhibition of candida albicans growth on surfaces treated by dielectric barrier discharge with various barriers. — Acta Polytechnica, 54(4), 290–294, 2014doi:10.14311/AP.2014.54.0290

4. **Grabowski M., Hoiub M., Balcerak M., Kalisiak S., Dąbrowski W.** Decontamination of black pepper powder using dielectric barrier discharge systems in atmospheric pressure.— Book of Contributions 14th Intern. Symposium on High Pressure Low Temperature Plasma Chemistry (HAKONE XIV), September 21–26, 2014 (Zinnowitz, German), pp. 1–4.

5. **Dobrin D., Magureanu M., Mandache N. and Ionita M.D.** The effect of non-thermal plasma treatment on wheat germination and early growth. — Innovative Food Science and Emerging Technologies, 2015, vol. 29, pp. 255–260.

6. **Masuda Senich, Washizu Masao, Mizuno Akira, Akutsu Kensuke.** Boxer-Charger a novel charging device for high resistivity powders. — Conf. Rec. of IEE/IAS, 1978, Annual Conf. pp. 16–22.

7. Sokolova M., Hulka L., Pietsch G.J. Influence of a Bias Voltage on the characteristics of Surface Discharge in Dry Air. – Plasma Process. Polym., 2005, 2, pp. 162–169.
8. Kiss E., Masuda S. On effect of D.C. bias voltage on ionic current and ozone production of surface discharge type ozoniser. – Journal of Electrostatics, 1989, 23, pp. 179–188.
9. Sokolova M.V., Perveyev A.I., Mitin A.N. *Sbornik materialov Vserossiiskoi konferentsii «Fizika nizkoterperaturnoi plazmy (ENTP-2014). T. 1 – in Russ. (Collection of materials of the All-Russian Conference «Low-Temperature Plazma Physics», vol. 1.) – Publ. Kazan National Research Technological University, 2014, pp. 140–144.*
10. Lazukin A.V., Krivov S.A. *Elektrichestvo – in Russ. (Electricity), 2016, No. 2, pp. 4–11.*
11. Nevogatkin S.V., Khasaya R.R., Khomich V.Yu., Yamshchikov V.A. *Prikladnaya fizika – in Russ. (Applied Physics), 2009, No. 4, pp. 111–117.*
12. Mokshkunov S.I., Nebogatkin S.V., Rebrov I.Ye., Khomich V.Yu., Yamshchikov V.Ya. *Kvantovaya elektronika – in Russ. (Quantum Electronics), 2011, 41, No. 12, pp. 1093–1097.*
13. Vereshagin I.P., Levitov V.I., Mirzabekyan G.Z., Pashin M.M. *Osnovy elektrogazodinamiki dispersnykh system (Fundamentals of electrogasdynamics disperse systems). Moscow, Publ. «Energija», 1974, 480 p.*
14. Tikhodeyev N.N. *Shurnal tekhnicheskoi fiziki – in Russ. (Journal of Technical Physics), 1955, vol. XXV, iss. 88, pp. 1449–1457.*