

УДК 537.533

Моделирование геометрии электродных систем высоковольтного тлеющего разряда, формирующих профильные электронные пучки

И. В. Мельник

Национальный технический университет Украины "Киевский политехнический институт",
Киев, Украина

Предложена физико-математическая модель геометрии электронно-оптических систем высоковольтного тлеющего разряда (ЭОС ВТР), формирующих профильные электронные пучки. В основу модели положены известные физические принципы, используемые при моделировании газоразрядных источников электронов, формирующих электронные пучки с точечным фокусом. При записи математических соотношений учтены особенности пространственной симметрии моделируемых ЭОС. При построении модели ЭОС положение границы плазмы определялось исходя из одномерной модели разряда и пересчитывалось с учетом занимаемого плазмой объема исходя из пространственной геометрии ЭОС. Приведены результаты моделирования электрического поля для электродных систем, формирующих дисковые и трубчатые электронные пучки. Теоретически исследовано влияние геометрических параметров ЭОС на положение границы плазмы и ее эмиссионные свойства.

Газоразрядные электронные пушки с анодной плазмой находят применение в промышленности при реализации ряда технологических операций в низком и среднем вакууме, включая сварку, пайку, нанесение покрытий, отжиг малогабаритных изделий. При этом важными преимуществами газоразрядных источников электронов по сравнению с традиционными термокатодными являются устойчивость работы в широком диапазоне давлений, нечувствительность к составу газовой среды, надежность и долговечность холодного катода [1, 2]. Мощность газоразрядных электронных пушек может составлять от сотен ватт до десятков и сотен киловатт, при этом максимальная удельная мощность электронного пучка достигает 10^6 Вт/см². Важным преимуществом газоразрядных электронных пушек как технологического инструмента является также простота управления током электронного пучка, которое может осуществляться путем изменения давления газа в области горения разряда [1] и электрическим путем за счет изменения плотности разрядной плазмы при подаче соответствующего потенциала на управляющий электрод [3].

Особый интерес представляет использование в промышленности газоразрядных электронных пушек с анодной плазмой, формирующих профильные электронные пучки со сложной трехмерной пространственной геометрией, включая дисковые и трубчатые пучки [1]. Применение в промышленности таких электронных пушек позволяет осуществлять высокопроизводительную моноимпульсную электронно-лучевую сварку и пайку деталей сложной формы в крупносерийном и массовом производстве. При этом уменьшается не только время сварки, но и время выведения технологического оборудования на рабочий режим за счет реализации процесса сварки в низком и среднем вакууме.

Несмотря на указанные преимущества, эффективная разработка газоразрядных источников электронов,

формирующих профильные электронные пучки, и их внедрение в промышленность сдерживаются из-за отсутствия методов математического моделирования электродных систем и соответствующих средств автоматизированного проектирования [4]. Математические модели основных физических процессов, протекающие в высоковольтном тлеющем разряде, рассмотрены и систематизированы [1], и на их основе разработана эффективная методика моделирования электронно-оптических систем газоразрядных пушек, формирующих пучки с точечным фокусом [5]. В основу разработанной методики положен метод трубок тока [6], измененный и модифицированный для учета элементарных процессов взаимодействия частиц в разрядном промежутке. В предложенном методе граница плазмы в ЭОС ВТР рассматривалась как источник ионов и прозрачный для электронов электрод с фиксированным потенциалом. Была разработана простая аналитическая методика определения положения границы плазмы в режиме больших токов разряда, когда ее форма повторяет форму поверхности катода [2, 7].

Принципиально можно с помощью предложенной методики анализировать и ЭОС ВТР с более сложной пространственной геометрией, однако особенности симметрии их электродных систем требуют пересмотра и коррекции некоторых аналитических соотношений, полученных в работах [5, 7]. При этом для пушек, формирующих трубчатые электронные пучки, сохраняется цилиндрическая симметрия электродной системы и изменяется только методика расчета положения и формы границы плазмы, а для пушек, формирующих дисковые пучки, имеет место сферическая симметрия, что приводит к необходимости переписать конечноразностные аналоги уравнения Пуассона для точек, лежащих в плоскости симметрии моделируемой ЭОС.

В статье рассматривается методика моделирования положения границы плазмы и распределения электри-

ческого поля в электродных системах пушек ВТР, формирующих профильные электронные пучки. В предложенной методике, основанной на теоретических предположениях, приведенных в работе [7], положение границы анодной плазмы определяется из одномерной модели разряда и пересчитывается для реальной геометрии ЭОС с учетом занимаемого плазмой объема.

Общие принципы численного моделирования распределения потенциала и положения анодной плазмы в электронно-оптических системах высоковольтного тлеющего разряда

Численное моделирование распределения потенциала в ЭОС ВТР проводилось путем решения конечно-разностного уравнения Пуассона в соответствующей системе координат, выбор которой зависит от пространственной симметрии электродной системы. Например, для используемой при моделировании ЭОС ВТР, формирующих электронные пучки с точечным фокусом, цилиндрической системы координат конечно-разностный аналог уравнения Пуассона записывается в виде [5, 6, 11]

$$U^n(i, k) = \omega [C_a U^{n-1}(i+1, k) + C_b U^{n-1} \times (i, k+1) + C_d U^n(i-1, k) + C_d U^n(i, k-1) + C_p \rho^{n-1}(i, k) / \epsilon_0] + (1-\omega) U^{n-1}(i, k), \quad (1)$$

где $C_a = C_c = 0,25 / h_z^2$; $C_b = (1+1/2k) / h_r^2$; $C_d = (1-1/2k) / h_r^2$ — для точек, не лежащих на оси; $C_a = 4/6h_r^2$; $C_c = 0$; $C_b = C_d = 1/6h_z^2$ — для точек, лежащих на оси;
 n — номер текущей итерации по потенциалу;
 i и k — номера текущих рассматриваемых узлов по продольной и радиальной координатам, соответственно;
 ω — параметр, зависящий от геометрии ЭОС и влияющий на скорость сходимости итераций по потенциалу;
 h_r — шаг дискретизации по оси r ;
 h_z — шаг дискретизации по оси z .

Известно, что важный элемент при моделировании ЭОС ВТР — определение положения и формы подвижной границы анодной плазмы, которая в ВТР является источником положительных ионов, движущихся в разрядном промежутке по направлению к катоду, и может рассматриваться как электрод с фиксированным потенциалом [5]. Существует несколько методов определения положения и формы границы анодной плазмы при анализе самосогласованной электронно-ионной оптики ВТР.

1. Решение самосогласованной задачи по определению распределения потенциала и положения подвижной плазменной границы исходя из условия равновесия давления силы электрического поля и кинетического

давления частиц в плазме на границе раздела, которое в общем случае описывается соотношением

$$\left(\frac{\partial \varphi}{\partial n} \right)^2 \Big|_{r \in \Gamma} = f(p), \quad (2)$$

где $\frac{\partial \varphi}{\partial n}$ — изменение потенциала в окрестности границы плазмы по нормали к кривой, описывающей эту границу;
 r — рассматриваемый элементарный участок границы плазмы;
 p — кинетическое давление электронного газа в плазме.

При физических условиях горения ВТР решение уравнения (2) для равновесия границы анодной плазмы будет иметь вид [6, 7]

$$\frac{\epsilon_0 E_p^2}{2} = n_e k T_e, \quad (3)$$

где E_p — электрическое поле возле границы плазмы;
 n_e — концентрация электронов в плазме;
 T_e — температура электронов.

Решение уравнения (3) для реальных геометрий электродов в ЭОС ВТР затруднительно, и в ряде случаев сходимости итераций по потенциалу с учетом перемещения плазменной границы удается добиться только для значений шага интегрирования $h_r \approx h_z \leq 10^{-5} \cdot L$, где L — продольный размер электродной системы. Поэтому методика определения положения плазменной границы, основанная на численном решении уравнения (3), используется только в сложных вычислительных экспериментах, которые проводятся с использованием компьютеров большой мощности. Такая методика неприменима в практике инженерного моделирования, где задачи моделирования и проектирования реальных устройств тесно пересекаются между собой, вследствие чего необходимо получать решение поставленных проектировщиком модельных задач в считанные секунды для обеспечения интерактивного режима работы [4] при оптимизации геометрии плазменных ЭОС.

2. Положение и форма границы плазмы определяются экспериментальным путем как светлая область разрядного промежутка на фотографиях разряда. При этом в ходе численного моделирования форма плазменной границы может описываться с помощью полиномов или сплайнов. Достоинство такого подхода состоит в достаточно точном отображении экспериментальных данных, описывающих положение и форму плазменной границы. По результатам анализа электронных изображений разряда с использованием методов распознавания образов формируются базы данных, в которых устанавливается соответствие между геометрическими параметрами ЭОС и параметрами плазмы с использованием методов аппроксимации данных и прогнозирования [4]. Поэтому, если есть хорошая выборка экспериментальных данных по положению плазменной границы для данного типа ЭОС ВТР, использование этого подхода в практике инженерного

моделирования является наиболее предпочтительным. Однако при разработке электронных пушек ВТР с известными электронно-оптическими свойствами, например пушек повышенной мощности, такой подход малоэффективен, поскольку формирование обширной библиотеки электронных изображений разрядного промежутка требует проведения сложных и дорогостоящих экспериментальных исследований.

3. Положение границы плазмы определяется на предварительном этапе приближенно, исходя из более простых моделей разряда, а затем пересчитывается для реальной геометрии ЭОС с учетом занимаемого плазмой объема. При этом наиболее простой является методика, предложенная в работе [7], в соответствии с которой первоначальная оценка положения плазменной границы проводится для эквивалентной одномерной модели разрядного промежутка из соотношения [8]

$$d_{kp} = L - \frac{I_{dis}}{Q_{e0} \left(\chi\gamma + \sqrt{\frac{m_i}{m_e}} \right) - \frac{5\mu_{i0}kT_e}{R^2 p_{ao}^2 e} \sqrt{\frac{m_i}{kT_i}}}, \quad (4)$$

где I_{dis} — ток разряда;

L и R — длина и поперечный размер разрядного промежутка, соответственно;

p_{ao} — приведенное давление в области горения разряда;

m_e и m_i — масса электрона и ионов газа, соответственно;

Q_{e0} — усредненное значение коэффициента поперечного сечения перезарядки электронов;

χ — коэффициент среднего удлинения траекторий электронов в области анодной плазмы;

γ — коэффициент отражения электронов от поверхности анода.

Если физические условия горения ВТР, в частности плотность тока с поверхности плазмы и ее эмиссионная площадь, в одномерной и реальной моделируемой ЭОС совпадают, то плотность плазмы и, соответственно, занимаемый ею объем тоже будут одинаковы [1, 8]. Использование предложенной методики при моделировании ЭОС ВТР, формирующих электронные пучки с точечным фокусом, позволило сделать вывод о том, что для максимальных токов разряда, при которых граница плазмы параллельна поверхности катода, расхождение между теоретическими и экспериментальными данными, описывающими положение плазменной границы, не превышало нескольких процентов [7]. Потенциал плазмы в ЭОС ВТР определяется из соотношений [7, 8]

$$A(\varphi^*) = \frac{1}{4} \left[\sqrt{1 + \frac{2q\varphi^*}{kT_e}} + e^{-\frac{2q\varphi^*}{kT_e}} - 2 \right];$$

$$\left. \left(\frac{\partial \varphi}{\partial n} \right) \right|_{r \in \Gamma} = \sqrt{\frac{n_e k T_e}{\epsilon_0 A(\varphi^*)}},$$

где n_e — концентрация электронов в плазме;

T_e — температура электронов;

q — заряд ионов плазмы;

φ^* — приэлектродный потенциал, зависящий от состава используемого газа, значение которого лежит в пределах нескольких вольт;

$A(\varphi^*)$ — полуэмпирическая функция приэлектродного потенциала.

Тогда объем, занимаемый плазмой, можно вычислить из простого соотношения

$$V_{dis} = \pi R^2 d_p,$$

где d_p — размер области, занимаемой анодной плазмой.

Для расчета объема анодной плазмы в ЭОС ВТР с цилиндрической симметрией можно использовать известное соотношение для вычисления объема фигуры вращения [9]

$$V_n = \int_a^b r^2(z) dx, \quad (5)$$

где $r(z)$ — аналитическая функция, описывающая геометрию границы плазмы;

a и b — пределы интегрирования.

Расчет положения границы плазмы производится также исходя из соответствия площади ее эмиссионной поверхности геометрическим параметрам эквивалентной модели разряда, при этом в системах с цилиндрической симметрией площадь поверхности границы анодной плазмы можно определить как площадь поверхности вращения [9]

$$S_n = \int_a^b r(z) \sqrt{1 + (r'(z))^2} dz. \quad (6)$$

При проектировании электродных систем ВТР со сложной геометрией целесообразно проводить предварительные оценки положения плазменной границы для максимальных токов разряда в соответствии с третьим методом, а затем использовать экспериментальные данные для доводки ЭОС в соответствии со вторым методом, описанным выше. Можно также использовать предварительные оценки, полученные с помощью третьего метода, для задания начального положения границы плазмы при моделировании плазменных ЭОС путем численного решения самосогласованной задачи по определению распределения потенциала и положения плазменной границы исходя из условия ее равновесия.

В статье предлагаются и анализируются аналитические соотношения и графические зависимости, характеризующие положение плазменной границы в ЭОС ВТР, формирующих профильные электронные пучки. Полученные зависимости могут быть использованы проектировщиками электронно-лучевого оборудования для предварительной оценки положения границы плазмы.

Моделирование геометрии ЭОС газоразрядной пушки, формирующей трубчатый электронный пучок

Типичная схема ЭОС газоразрядных электронных пушек, формирующих трубчатые электронные пучки [2], приведена на рис. 1. Очевидно, что такая геометрия ЭОС обладает цилиндрической симметрией, и конечноразностная форма уравнения Пуассона, используемая для анализа распределения потенциала в системе с приведенной геометрией, записывается в виде (1). Для ЭОС, геометрия которой приведена на рис. 1, эмпирическим путем в ходе вычислительных экспериментов был выбран параметр релаксации 1,12, близкий к значению 1,125, полученному ранее для геометрии ЭОС ВТР, формирующих короткофокусные электронные пучки с точечным фокусом [5].

Основные геометрические параметры рассматриваемой электродной системы приведены на рис. 2.

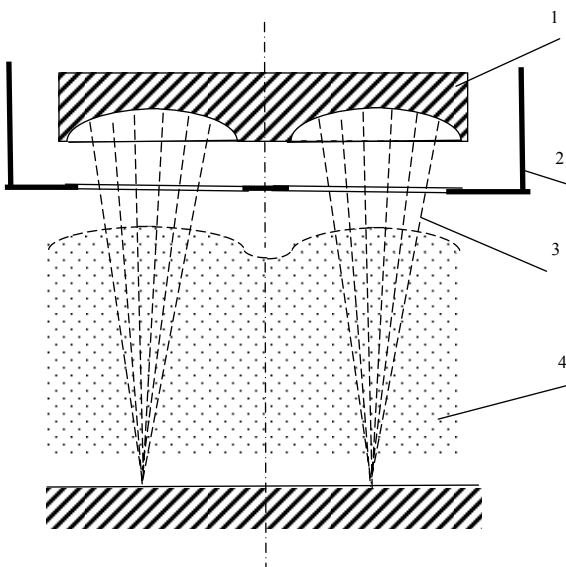


Рис. 1. Схема электродной системы пушек ВТР, формирующей трубчатые электронные пучки:

- 1 — катод; 2 — анодная апертура; 3 — электронный пучок;
- 4 — анодная плазма

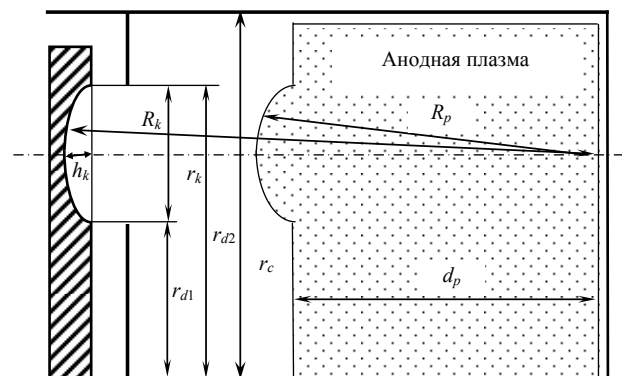


Рис. 2. Геометрические параметры ЭОС ВТР, формирующих трубчатый электронный пучок:

- R_k — радиус тороидальной поверхности катода; r_c — поперечный размер электродной системы; r_k — радиальный размер тороидальной эмиссионной поверхности катода;
- r_{d1} — внутренний радиус диафрагмы; r_{d2} — внешний радиус диафрагмы;

мы; d_n — высота анодной плазмы; R_p — радиус тороидальной части поверхности границы плазмы

Для определения положения и формы границы анодной плазмы в рассматриваемой ЭОС можно воспользоваться формулами (4)—(6). При этом для поиска аналитической функции $r(z)$, описывающей форму плазменной границы, представим ее геометрию в виде тела вращения в цилиндрической системе координат, как показано на рис. 3, и введем следующие аналитические зависимости, характеризующие взаимосвязи между геометрическими параметрами ЭОС, приведенными на рис. 2,

$$h_k = R_k - \sqrt{R_k^2 - r_k^2}; \quad R_k = \frac{d_p R_k}{R_k - h_k}. \quad (7)$$

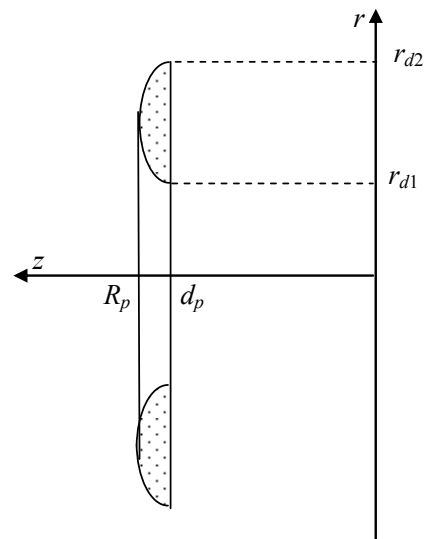


Рис. 3. Описание геометрии тороидальной эмиссионной поверхности анодной плазмы, возникающей в ЭОС ВТР, формирующих трубчатый электронный пучок как тела вращения в цилиндрической системе координат

С учетом соотношений (7) функция $r(z)$, описывающая тороидальную поверхность тела вращения, приведенную на рис. 3, запишется в виде

$$r(z) = \sqrt{k_2 + z^2 + 2k \sqrt{\left(\frac{d_p R_k}{R_k - h_k}\right)^2 - z^2}}, \quad (8)$$

где для упрощения введены следующие коэффициенты:

$$k = r_{d1} - \frac{d_p R_k \sqrt{R_k^2 - R_k h_k}}{(R_k - h_k)^2},$$

$$k_2 = k^2 - R_p^2 = \left[r_{d1}(R_k - h_k) - d_p R_k \left(\frac{\sqrt{R_k^2 - R_k h_k}}{R_k - h_k} - 1 \right) \right] \times \left[r_{d1}(R_k - h_k) - d_p R_k \left(1 - \frac{\sqrt{R_k^2 - R_k h_k}}{R_k - h_k} \right) \right] / (R_k - h_k)^2. \quad (9)$$

Тогда производную функции $r(z)$ можно записать в виде

$$r'(z) = \frac{2z \left[1 + \frac{2k}{\sqrt{\left(\frac{d_p R_k}{R_k - h_k} \right)^2 - z^2}} \right]}{\sqrt{k_2 + z^2 + 2k \sqrt{\left(\frac{d_p R_k}{R_k - h_k} \right)^2 - z^2}}}. \quad (10)$$

С учетом полученных зависимостей (7)—(10) для функций $r(z)$ и $r'(z)$ и соотношения (6) можно записать уравнение для определения площади тороидальной поверхности границы анодной плазмы

$$S_p(z) = \int_{\frac{d_p(R_k - h_k)}{R_k}}^{d_p} \sqrt{k_2 + z^2 + 2k \sqrt{\left(\frac{d_p R_k}{R_k - h_k} \right)^2 - z^2}} \times \sqrt{1 + \frac{2z \left[1 + \frac{2k}{\sqrt{\left(\frac{d_p R_k}{R_k - h_k} \right)^2 - z^2}} \right]}{\sqrt{k_2 + z^2 + 2k \sqrt{\left(\frac{d_p R_k}{R_k - h_k} \right)^2 - z^2}}}} dz. \quad (11)$$

Аналитического решения для уравнения (11) не существует. Зависимости $S_p(z)$, полученные путем численного интегрирования уравнения (11) для разных геометрических параметров моделируемой электродной системы, приведены на рис. 4. Полученные графические зависимости позволяют установить взаимосвязь между параметрами реальной ЭОС и параметрами эквивалентной модели при задании плотности тока с поверхности анодной плазмы. С учетом полученных зависимостей объем, занимаемый анодной плазмой, можно вычислить из соотношения

$$V_p = \pi r_c^2 + \int_{\frac{d_p(R_k - h_k)}{R_k}}^{d_p} \left(k_2 + z^2 + 2k \sqrt{\left(\frac{d_p R_k}{R_k - h_k} \right)^2 - z^2} \right)^2 dz = \pi r_c^2 + k_2 d_p \left(\frac{2R_k - h_k}{R_k} \right) + \frac{d_p^3}{3} - \frac{1}{3} \left(\frac{d_p(R_k - h_k)}{R_k} \right)^3 - \frac{k}{2} \left(\frac{d_p(R_k - h_k)}{R_k} \right)^2 \left(\arccos \left(\frac{R_k - h_k}{R_k} \right) - \arccos \left(\frac{h_k}{R_k} \right) \right) - k d_p^3 \sqrt{\frac{R_k}{R_k - h_k} - 1}. \quad (12)$$

Графические зависимости объема, занимаемого анодной плазмой, от ее высоты, полученные с использованием соотношения (12), приведены на рис. 5. На рис. 6 приведена картина распределения электрического поля для одного из вариантов моделируемой ЭОС без учета пространственного заряда. Анализ полученных результатов моделирования будет проведен ниже.

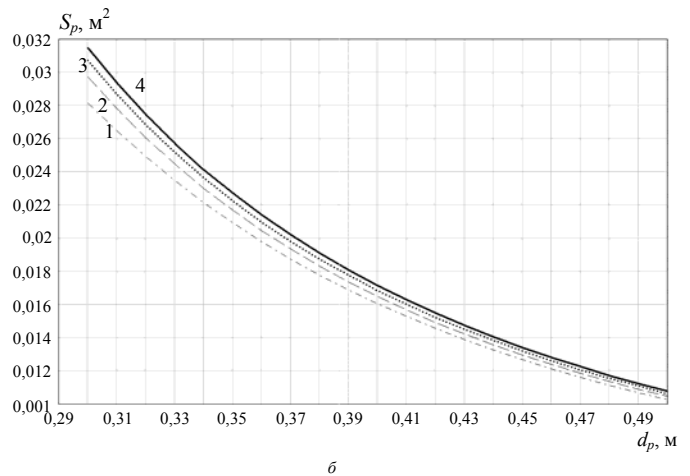
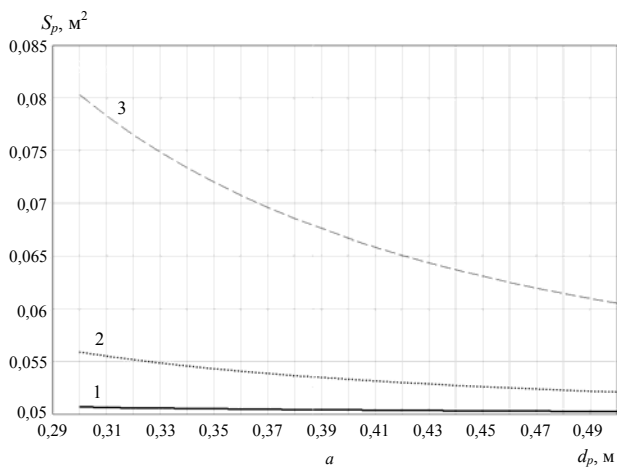


Рис. 4. Зависимость площади эмиссионной поверхности анодной плазмы от высоты плазмы при разных геометрических параметрах электродной системы для пушек ВТР, формирующей трубчатый электронный пучок:

a — $R_k = 0,8$ м, $r_{d1} = 0,4$ м; 1 — $r_k = 0,2$ м; 2 — $r_k = 0,3$ м; 3 — $r_k = 0,4$ м;
 b — $R_k = 0,8$ м, $r_k = 0,4$ м; 1 — $r_{d1} = 0,1$ м; 2 — $r_{d1} = 0,3$ м; 3 — $r_{d1} = 0,5$ м; 4 — $r_{d1} = 0,7$ м

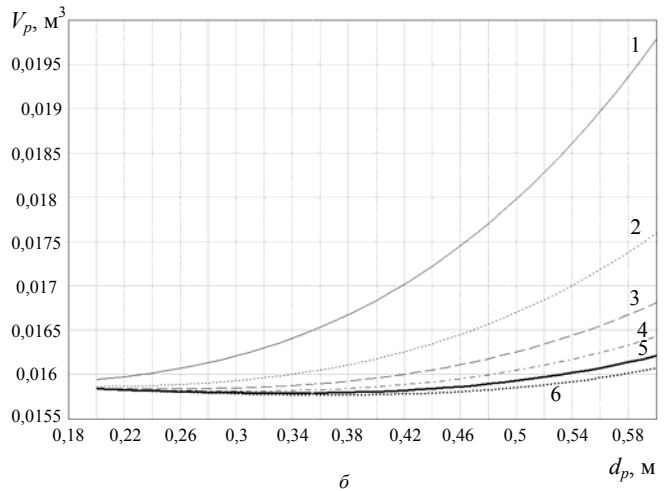
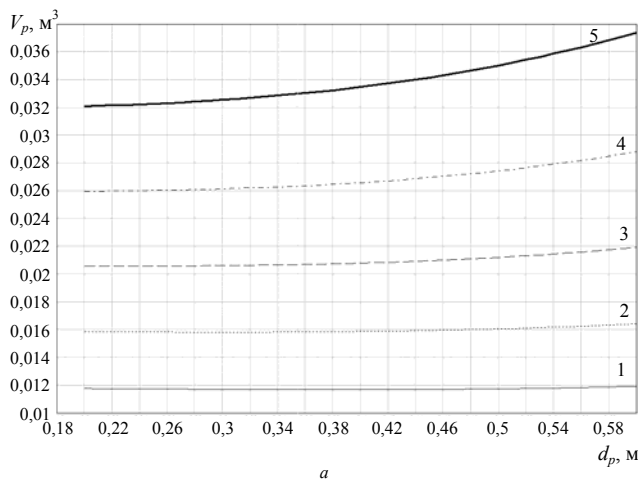


Рис. 5. Зависимость объема, занимаемого анодной плазмой, от высоты плазмы при разных геометрических параметрах электродной системы для пушек ВТР, формирующей трубчатый электронный пучок:

a — $R_k = 0,8$ м, $r_{d1} = 0,2$ м; 1 — $r_k = 0,3$ м, $r_c = 0,6$ м; 2 — $r_k = 0,4$ м, $r_c = 0,7$ м; 3 — $r_k = 0,5$ м, $r_c = 0,8$ м; 4 — $r_k = 0,6$ м, $r_c = 0,9$ м; 5 — $r_k = 0,7$ м, $r_c = 1$ м;
б — $r_{d1} = 0,2$ м, $r_k = 0,4$ м, $r_c = 0,7$ м; 1 — $R_k = 0,5$ м; 2 — $R_k = 0,6$ м; 3 — $R_k = 0,7$ м; 4 — $R_k = 0,4$ м; 5 — $R_k = 0,9$ м; 6 — $R_k = 1$ м

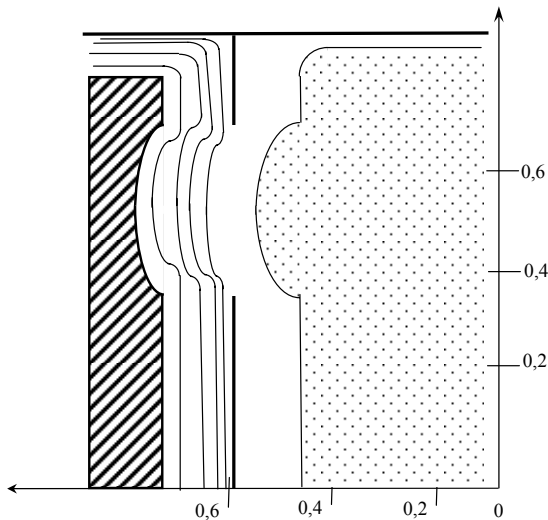


Рис. 6. Распределение электрического поля в моделируемой ЭОС ВТР, формирующей трубчатый электронный пучок
Моделирование геометрии ЭОС газоразрядной пушки, формирующей дисковый электронный пучок

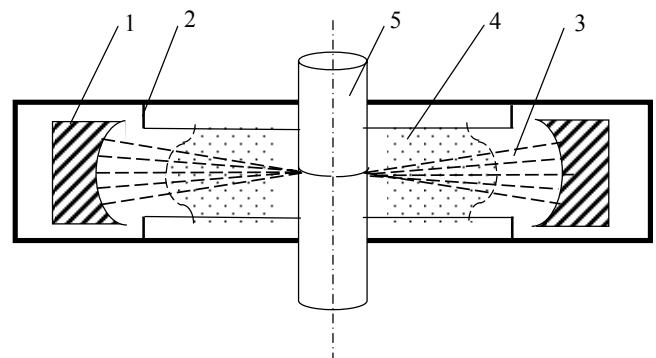


Рис. 7. Схема электродной системы пушек ВТР, формирующей дисковые электронные пучки:
 1 — катод; 2 — анодная апертура; 3 — электронный пучок; 4 — анодная плазма; 5 — обрабатываемое изделие

Схема конструкции пушки ВТР, формирующей дисковый электронный пучок [2], приведена на рис. 7. Такая электродная система имеет не цилиндрическую, а сферическую симметрию, и для моделирования распределения электрического поля в ней удобнее переписать уравнение Пуассона в сферической системе координат, которое с учетом симметрии относительно азимутального угла α запишем в виде

$$\frac{1}{z^2} \frac{\partial}{\partial z} \left(z^2 \frac{\partial \varphi(z, \theta)}{\partial z} \right) + \frac{1}{z^2 \sin \theta} \frac{\partial}{\partial \theta} \left(\sin \theta \frac{\partial \varphi(z, \theta)}{\partial \theta} \right) = \rho, \quad (13)$$

где $\varphi(z, \theta)$ — функция потенциала;
 θ — радиальный угол.

Однако итерационные конечно-разностные формулы для уравнения (13) записать нельзя, поскольку при такой записи невозможно обеспечить однородное изменение линейной координаты вдоль угловой азимутальной составляющей. Поэтому, воспользовавшись тем, что рассматриваемая ЭОС имеет плоскость симметрии $r = 0$, $0 \leq \theta \leq 360^\circ$, перейдем к цилиндрической системе координат. Тогда с учетом симметрии системы относительно плоскости $r = 0$, $0 \leq \theta \leq 360^\circ$, коэффициенты уравнения (1) запишем в виде

$$C_a = C_c = 0,25/h_z^2 \Big|_{z \neq 0}; \quad (C_a = 4/6h_r^2, C_c = 0) \Big|_{z=0};$$

$$C_b = C_d = (1 + 1/2k)/h_r^2. \quad (14)$$

Для решения уравнения (1) с коэффициентами, определяемыми по формулам (14), эмпирическим путем в процессе вычислительного эксперимента был выбран параметр релаксации ω , равный 1,3.

Геометрические параметры для ЭОС ВТР, формирующей дисковый электронный пучок, приведены на рис. 8, а на рис. 9 показана функция $r(z)$, описывающая границу плазмы моделируемой ЭОС ВТР в цилиндрической системе координат. В соответствии с приведенной геометрией рассматриваемой ЭОС, исходя из соотношений (5), (6), с учетом того, что соотношения (7), полученные в предыдущем разделе для ЭОС, формирующих трубчатый электронный пучок, остаются в рассматриваемом случае справедливыми, можно записать следующие выражения для площади поверхности анодной плазмы и для ее объема:

$$S_p = 4\pi \int_0^{r_k} \left(\sqrt{r_p^2 - z^2} + \frac{d_p R_k}{R_k - h_k} \right) \sqrt{1 - \frac{z^2}{r_p^2 - z^2}} dz,$$

$$V_p = \pi (r_p^2 - r_d^2) r_k + \pi r_k \left[\left(\frac{d_p (R_k - h_k)}{R_k} \right)^2 + d_p^2 - r_k^2 + \frac{2d_p^2 (R_k - h_k)}{r_k R_k} \left(1 - \arccos \left(\frac{r_k}{2d_p} \right) \right) - \frac{d_p (R_k - h_k)}{R_k} \sqrt{d_p^2 - \frac{h^2}{4}} \right].$$

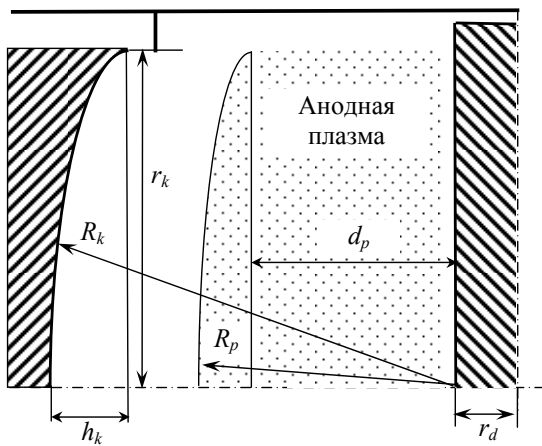


Рис. 8. Геометрические параметры ЭОС ВТР, формирующей дисковый электронный пучок, r_d — радиус обрабатываемого изделия

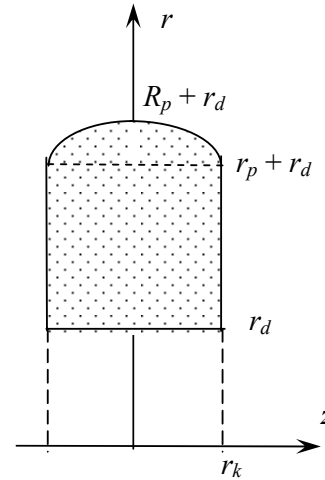


Рис. 9. Описание геометрии анодной плазмы, возникающей в ЭОС ВТР, формирующей дисковый электронный пучок, в цилиндрической системе координат как тела вращения

На рис. 10 приведены зависимости площади эмиссионной поверхности плазмы, а на рис. 11 — объема торoidalной части плазмы от линейных размеров и геометрических параметров моделируемой ЭОС. На рис. 12 приведено распределение электрического поля в моделируемой ЭОС ВТР без учета пространственного заряда.

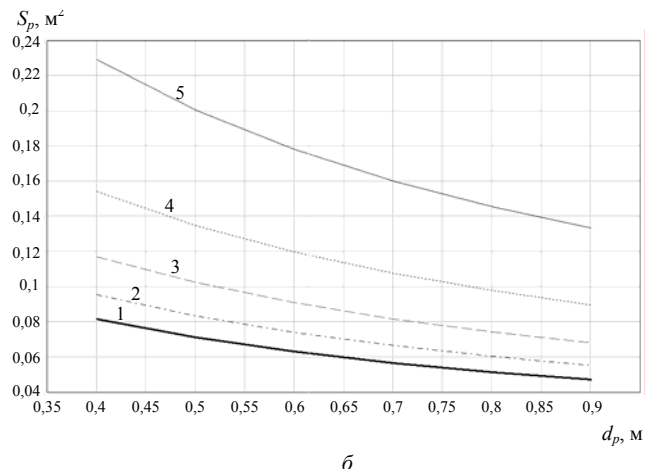
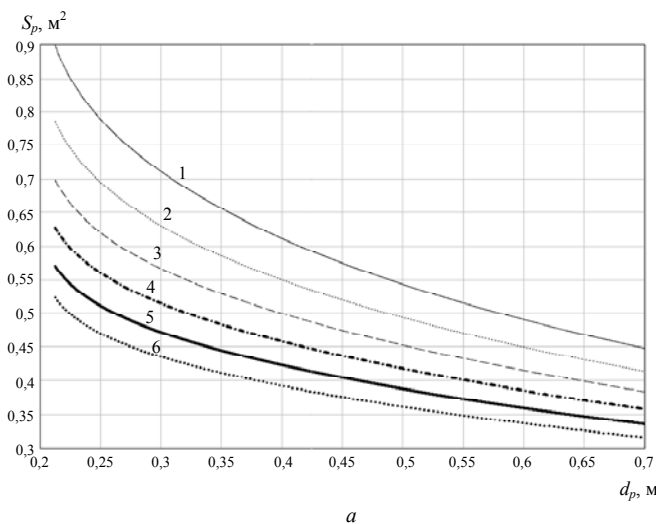


Рис. 10. Зависимость площади эмиссионной поверхности анодной плазмы в электронной пушке ВТР, формирующей дисковый электронный пучок, от геометрических параметров электродной системы:

a — $r_k = 0,3$ м; 1 — $R_k = 0,5$ м; 2 — $R_k = 0,6$ м; 3 — $R_k = 0,7$ м; 4 — $R_k = 0,8$ м; 5 — $R_k = 0,9$ м; 6 — $R_k = 1$ м;
б — $R_k = 0,8$ м; 1 — $r_k = 0,1$ м; 2 — $r_k = 0,2$ м; 3 — $r_k = 0,3$ м; 4 — $r_k = 0,4$ м; 5 — $r_k = 0,5$ м; 6 — $r_k = 0,6$ м; 5 — $r_k = 0,7$ м

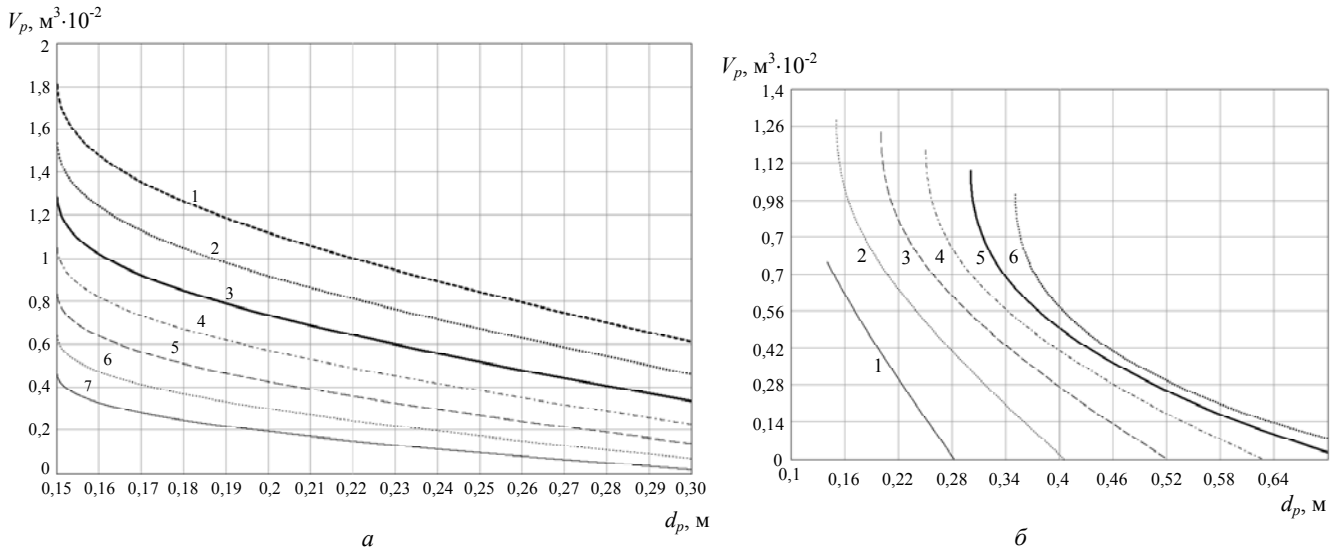


Рис. 11. Зависимость объема, занимаемого тороидальной частью анодной плазмы, от геометрических параметров электродной системы в ЭОС ВТР, формирующих дисковый электронный пучок:

a — $h_p = 0,3$ м; 1 — $R_k = 0,4$ м; 2 — $R_k = 0,5$ м; 3 — $R_k = 0,6$ м; 4 — $R_k = 0,7$ м; 5 — $R_k = 0,8$ м; 6 — $R_k = 0,9$; 7 — $R_k = 1$ м;
б — $R_k = 0,8$; 1 — $h_p = 0,2$; 2 — $h_p = 0,3$; 3 — $h_p = 0,4$; 4 — $h_p = 0,5$; 5 — $h_p = 0,6$; 6 — $h_p = 0,7$

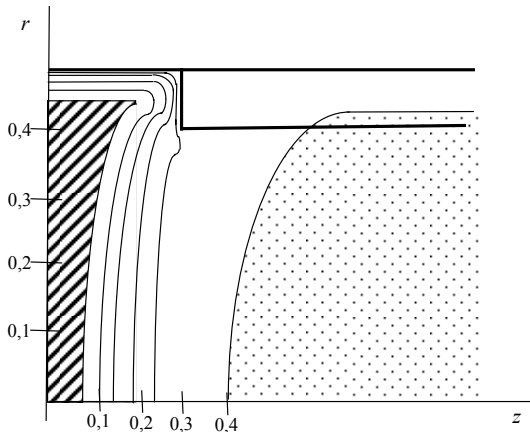


Рис. 12. Распределение электрического поля в моделируемой ЭОС ВТР, формирующей дисковый электронный пучок

Выводы

Из полученных результатов можно сделать выводы о том, что вследствие особенности геометрии рассмотренных ЭОС с увеличением тока разряда при приближении анодной плазмы к катоду уменьшается площадь ее эмиссионной поверхности. Следовательно, рост тока разряда с увеличением давления обусловлен увеличением концентрации ионов в объеме плазмы, а не увеличением площади ее эмиссионной поверхности. Как видно из рис. 4 и 11, изменение площади эмиссионной поверхности плазмы при увеличении ее радиуса кривизны для малых значений размера тороидальной части катода r_k не превышает 10 %, а для больших значений r_k может изменяться в 2—3 раза. С увеличением радиуса тороидальной поверхности катода при сохранении других геометрических параметров ЭОС уменьшаются

площадь эмиссионной поверхности плазмы и объем ее тороидальной части. Однако, как видно на рис. 5, б, в ЭОС, формирующих трубчатый электронный пучок, при больших радиусах катода R_k и малой высоте плазмы наблюдается небольшой спад объема последней при увеличении ее высоты, обусловленный увеличением радиуса тороидальной поверхности R_p . Такие режимы разряда (высота плазмы $d_p \approx 0,1—0,3$ м) соответствуют малым токам и на предварительном этапе оценок параметров ЭОС используются редко. Кроме того, в режиме малых токов разряда граница плазмы неконцентрична поверхности катода, поэтому оценки, проводимые по формуле (12), будут очень неточными [1, 10]. Уточненный анализ геометрии ЭОС ВТР для таких режимов разряда нужно проводить с использованием фотографий разрядного промежутка. Однако из-за малых значений производной функции $V_p(d_p)$ для больших значений радиуса тороидальной поверхности катода R_k при использовании численных методов для решения уравнения (12) необходимо правильно выбирать интервал поиска решения. В этом проектировщикам могут помочь полученные в данной работе графические зависимости, приведенные на рис. 5. Кроме того, для обеспечения более высокой скорости сходимости следует отдавать предпочтение численным методам, в которых не используются производные, например методу простой итерации или методу Стефенсона [11]. Поскольку метод Стефенсона имеет скорость сходимости второго порядка, сходиться он будет быстрее, чем метод простой итерации.

Сравнение результатов, приведенных на рис. 4, 5, 10, 11, с экспериментальными данными, показало, что для больших значений d_n , соответствующих максимальным токам разряда, расхождение теоретических и экспери-

ментальных данных не превышает 10—15 %, что является приемлемым на предварительном этапе проектирования ЭОС ВТР [4]. Примерно такие же результаты были получены ранее и для ЭОС, формирующих пучки с точечным фокусом [10]. Полученные аналитические формулы и графические зависимости, характеризующие положение анодной плазмы для разных геометрических параметров ЭОС и режимов разряда, позволяют на начальном этапе проектирования ЭОС ВТР, формирующих профильные электронные пучки, оценить их электронно-оптические свойства. Значения параметра d_p , характеризующего положение границы анодной плазмы, можно также использовать в качестве начального приближения для более точных теоретических оценок. Знание занимаемого плазмой объема и площади эмиссионной поверхности может быть также полезно при дальнейшем изучении физики ВТР, например, для оценки степени ионизации, электронной и ионной температуры, плотности плазмы и ряда других физических параметров. При анализе и пересмотре конечно-разностных соотношений для метода трубок тока, приведенных в [5], с учетом геометрии ЭОС, формирующих профильные электронные пучки, можно рассчитывать траектории частиц в разрядном промежутке и находить распределение электрического поля с учетом пространственного заряда и процессов элементарного взаимодействия частиц.

Л и т е р а т у р а

1. Завьялов М. А., Крейндель Ю. Е., Новиков А. А., Шантулин Л. П. Плазменные процессы в технологических электронных пушках. — М.: Энергоатомиздат, 1989. — 256 с.

2. Denbnovetsky S. V., Melnyk V. G., Melnyk I. V. High vol-tage glow discharge electron sources and possibilities of its application in industry for realising of different technological operations// IEEE Transactions on plasma science. 2003. V. 31. № 5. October. P. 987—993.

3. Denbnovetsky S. V., Melnik V. I., Melnik I. V., Tugay B. A. Investigation of forming of electron beam in glow discharge electron guns with additional electrode// XVIII-th International Symposium on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum. August 17—21, 1998, Eindhoven, The Netherlands, Proceedings. V. 2. P. 637—640.

4. Denbnovetsky S. V., Felba J., Melnik V. I., Melnik I. V. Model of Beam Formation In A Glow Discharge Electron Gun With A Cold Cathode// Applied Surface Science. 111, 1997. P. 288—294.

5. Ильин В. П. Численные методы решения задач электрофизики. — М.: Наука, 1983. — 334 с.

6. Мельник И. В. Аналитическая оценка положения границы плазмы в электродных системах высоковольтного тлеющего разряда с катодом//Электроника и связь. 2000. № 8. Т. 1. С. 107—109.

7. Трудошин В. А., Пивоварова М. В. Системы автоматизированного проектирования. В 9 кн. — Кн. 4. Моделирование технических объектов: Учеб. пособие для вузов/ Под ред. И. П. Норенкова. — М.: Высшая школа, 1986. — 160 с.

8. Новиков А. А. Источники электронов высоковольтного тлеющего разряда с анодной плазмой. — М.: Энергоатомиздат, 1983. — 96 с.

9. Бронштейн И. Н., Семендяев К. А. Справочник по математике для инженеров и учащихся вузов. — М.: Наука, 1981. — 720 с.

10. Денбновецкий С. В., Мельник И. В. Оценка погрешности моделирования электронно-оптических систем высоковольтного тлеющего разряда// Электроника и связь. 1997. № 2. Ч. 1. Тематический сборник по материалам научно-технической конференции "Проблемы физической и биомедицинской электроники". — Киев, 1997. С. 133—137.

11. Самарский А. А., Гулин А. В. Численные методы. — М.: Наука, 1989. — 432 с.

Статья поступила в редакцию 22 декабря 2005 г.

Modelling a geometry of high-voltage glow discharge electrode systems forming the profile electron beams

I. V. Melnik

Kiev Polytechnic Institute, Kiev, Ukraine

The physical and mathematical model of geometry of high-voltage glow discharge electron-optical systems is offered. The systems are forming the profile electron beams. The results of modelling an electric field for electrode systems forming the disk and tubular beams are given. The influence of geometrical parameters of electron-optical systems on a location of the boundary of plasma and its emissive properties is theoretical explored.