

УДК 537.533

## ЧИСЛЕННОЕ РЕШЕНИЕ САМОСОГЛАСОВАННОЙ ЗАДАЧИ РАСЧЕТА ЭЛЕКТРОННЫХ ПУШЕК В ПРИКАТОДНОЙ ОБЛАСТИ МЕТОДОМ ИТЕРАЦИЙ

*М. А. Монастырский, В. А. Тарасов*

Институт общей физики РАН, Москва, Россия

*А. Г. Муравьев*

ГП НИИ ЭИО, Москва, Россия

*В статье разработан алгоритм численного решения самосогласованной задачи расчета электронных пушек в прикатодной области методом итераций, свободный от каких-либо априорных предположений о характере формирования электронного пучка в прикатодной области. Разработанный алгоритм и построенная на его основе компьютерная программа обеспечивают устойчивое решение задачи для различных конфигураций катода (выпуклой, вогнутой и плоской) в различных режимах. В качестве теста получено хорошее соответствие между численными результатами и известным аналитическим решением для плоского одномерного диода. Исследованы особенности формирования электронного пучка вблизи краев эмиттера.*

### Введение

Наибольшие трудности расчета электронных пушек возникают при анализе прикатодной области. Сложность расчета этой области связана прежде всего с существованием в ней потенциальной ямы, обусловленной наличием пространственного заряда, который существенно влияет на формирование электронного пучка. В подавляющем большинстве работ по расчету электронных пушек применяются те или иные аналитические аппроксимации решения самосогласованной задачи в прикатодной области. В частности, весьма популярными являются модели плоского сферического и цилиндрического диодов [1, 2]. Следует отметить, что указанные модели не позволяют адекватно описать характер формирования пучка в электронных пушках с достаточно

сложной геометрией электродов. Например, в работах [3, 4] предполагается, что токоотбор с катода подчиняется закону "трех-вторых", который не учитывает эмиссионную способность катода, распределение термоэлектронов по скоростям, зависимость энергии электронов от температуры и наличия минимума потенциала вблизи поверхности катода, что приводит к существенным ошибкам [5].

В работе [6] из области решения самосогласованной задачи выделяется прикатодная область, размер и форма которой корректируются в процессе расчета. Данная область разбивается на ряд плоских концентрических диодов и расчет производится с учетом начальных скоростей электронов в каждом из полученных диодов. В работе [7] решение самосогласованной задачи осуществляется фазовым методом, погрешность которого обусловлена допущениями, принятыми при выводе функциональной зависимости текущих координат и скоростей электронов от начальных скоростей на катоде. В работе [8] предлагается решать самосогласованную задачу путем как релаксации объемного заряда, так и плотности тока эмиссии, или методом постепенного включения источников.

Цель данной работы состоит в построении численного алгоритма и компьютерной программы, свободных от каких-либо априорных предположений о характере формирования электронного пучка в прикатодной области.

Выполнение работы проходило в несколько этапов. На первом этапе рассмотрен принципиальный вопрос о сходимости метода итераций самосогласованной задачи расчета электронных пушек в прикатодной области. Анализ результатов решения одномерной задачи для плоского диода показал, что разработанный алгоритм, основанный на решении уравнения Пуассона методом прогонки [9] и интегральном расчете плотности пространственного заряда, обеспечивают устойчивое решение задачи в различных режимах работы, включая режим запираания. При этом плотность тока эмиссии, положение минимума потенциала и его величина с хорошей точностью совпали с известным аналитическим решением для плоского одномерного диода [10].

На втором этапе работы была предпринята попытка разработать итерационный алгоритм и построить программу для одно- и двумерных (плоских) задач на основе решения уравнения Пуассона методом прогонки и расчета плотности пространственного заряда путем прямого расчета траекторий. Эта попытка также оказалась удачной. Процесс итераций сходился, и анализ расчетов показал, что плотность тока эмиссии, положение минимума потенциала и его величина в пределах заданной точности совпадают с аналитическим решением задачи для плоского диода. Разработанный алгоритм позволил получить устойчивое самосогласованное решение двумерной задачи при различных конфигурациях катода (выпуклой, вогнутой и плоской).

Третий этап заключался в обобщении разработанного алгоритма применительно к осесимметричному случаю и исследованию особенностей формирования электронного пучка вблизи краев эмиттера.

## Постановка задачи

Если заданы конфигурация и потенциалы электродов, температура катода и плотность тока насыщения, задача расчета электростатических электронных пушек сводится к решению известной системы уравнений в межэлектродном пространстве:

$$\Delta U = -\frac{1}{\epsilon_0} \rho(\vec{r}),$$

$$U|_{\Omega} = U_0.$$

$$\vec{r} = \frac{e}{m} \nabla U(\vec{r}),$$

$$\begin{cases} \vec{r}(0) = \vec{r}_0 \\ \dot{\vec{r}}(0) = \vec{v}_0 \end{cases}$$

$$\rho(\vec{r}) = \int f(\vec{r}, \vec{v}) \delta(\vec{r} - \vec{r}(\tau_0, \vec{v})) d\tau_0 d\vec{v}$$

Здесь  $U$  — электростатический потенциал;  $\rho(\vec{r})$  — плотность пространственного заряда;  $U_0$  — потенциал на границе  $\Omega$  расчетной области;  $\vec{r}_0, \vec{v}_0$  — соответственно, положение и скорость частицы на эмиттере;  $f(\vec{r}_0, \vec{v}_0)$  — заданное начальное распределение частиц по координатам и скоростям.

Требуется найти вольт-амперную характеристику рассчитываемой пушки, а также самосогласованные распределения электростатического потенциала, плотности пространственного заряда и плотности тока в межэлектродном пространстве.

В данной работе в качестве поверхности катода допускается произвольная достаточно гладкая осесимметричная поверхность, удовлетворяющая следующему условию: любая прямая, параллельная оси симметрии  $Oz$  пересекает эту поверхность только один раз (рис. 1).

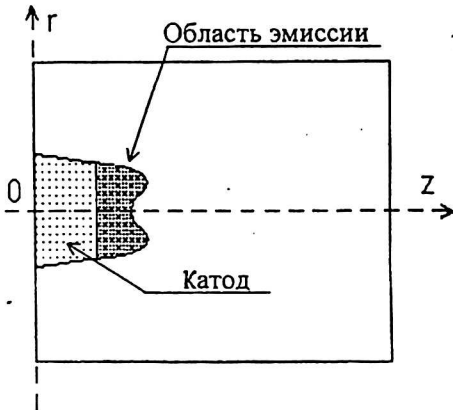


Рис. 1. Общий вид расчетной области

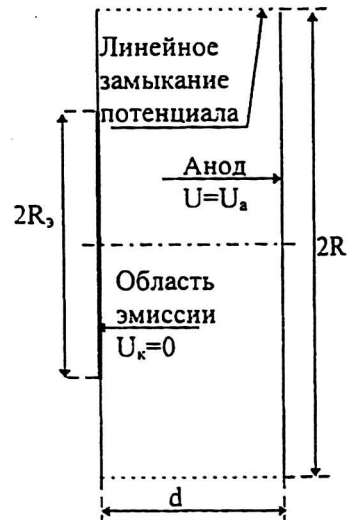


Рис. 2. Плоский диод с конечным размером эмиттера

$$\begin{cases} \vec{r}(0) = \vec{r}_0 \\ \vec{v}(0) = \vec{v}_0 \end{cases}$$

$$\rho(\vec{r}) = \int f(\vec{r}, \vec{v}) \delta(\vec{r} - \vec{r}(\vec{r}_0, \vec{v})) d\vec{r}_0 d\vec{v}$$

Здесь  $U$  — электростатический потенциал;  $\rho(\vec{r})$  — плотность пространственного заряда;  $U_0$  — потенциал на границе  $\Omega$  расчетной области;  $\vec{r}_0, \vec{v}_0$  — соответственно, положение и скорость частицы на эмиттере;  $f(\vec{r}_0, \vec{v}_0)$  — заданное начальное распределение частиц по координатам и скоростям.

Требуется найти вольт-амперную характеристику рассчитываемой пушки, а также самосогласованные распределения электростатического потенциала, плотности пространственного заряда и плотности тока в межэлектродном пространстве.

В данной работе в качестве поверхности катода допускается произвольная достаточно гладкая осесимметричная поверхность, удовлетворяющая следующему условию: любая прямая, параллельная оси симметрии  $Oz$  пересекает эту поверхность только один раз (рис. 1).

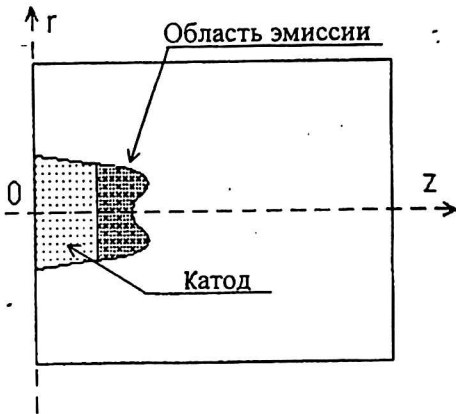


Рис. 1. Общий вид расчетной области

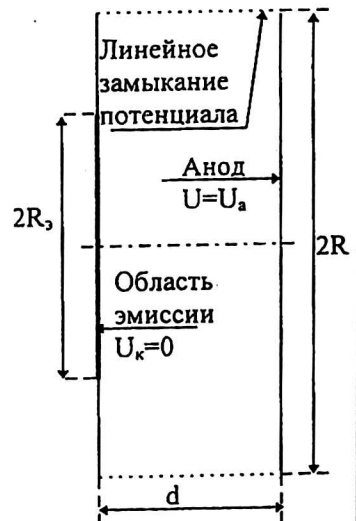


Рис. 2. Плоский диод с конечным размером эмиттера

Рассматриваемая расчетная область, в которой ищется решение самосогласованной задачи, слева ограничена катодом, справа — анодом, имеющим заданный потенциал  $U_a$ , а также цилиндрической боковой поверхностью с линейным распределением потенциала. Потенциал катода предполагается равным нулю (рис. 1—3).

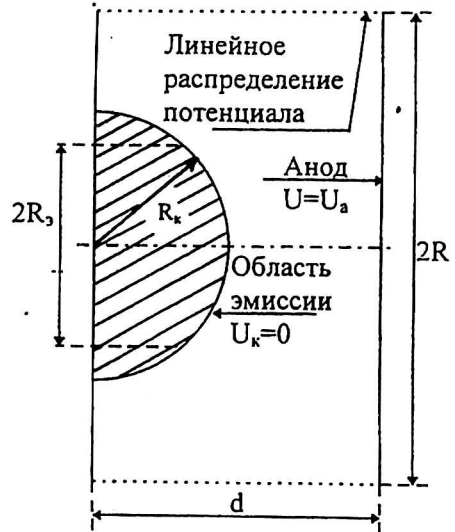


Рис. 3. Диод со сферическим катодом

Таким образом, характерными заданными величинами в рассматриваемой задаче являются температура катода, плотность тока насыщения, геометрические параметры конфигурации катода, потенциал анода, размер прикатодной области и области эмиссии.

### Алгоритм решения задачи

Ниже приводится краткое описание основных вычислительных процедур, реализующих численное решение поставленной самосогласованной задачи. Расчетная область покрывается прямоугольной сеткой с узлами  $(i, j)$ ,  $i = 1, \dots, N; j = 1, \dots, M$ . На  $k$ -й итерации алгоритма рассчитывается электростатический потенциал  $U_k(z, r)$  методом попеременных прогонок [9] (на первой итерации  $\rho$  полагается равным нулю) и находится минимум потенциала по всем точкам сетки:

$$\min U_k = \min_{(i,j) \in \Omega} (U_k^{i,j}).$$

На всех итерациях, кроме первой, выполняется релаксационное преобразование сеточного потенциала по формуле:

$$U_k(i, j) = \lambda_k U_k(i, j) + (1 - \lambda_k) U_{k-1}(i, j),$$

где  $\lambda_k$  — значение параметра релаксации на  $k$ -й итерации.

На первых четырех итерациях параметр релаксации сохраняется постоянным. На последующих итерациях происходит изменение параметра релаксации в соответствии со следующим правилом: если значение минимума потенциала на последних трех итерациях ведет себя монотонно, т. е.

$$\min U_k > \min U_{k-1} > \min U_{k-2} \quad \text{или} \quad \min U_k < \min U_{k-1} < \min U_{k-2}, \quad (1)$$

то параметр релаксации не изменяется. Если же ни одно из условий (1) не выполняется, то параметр релаксации умножается на заданный коэффициент, меньший единицы (в представленных нами экспериментах этот коэффициент выбирался равным золотому сечению 0,618). Уменьшение параметра релаксации позволяет погасить колебания решения задачи на последующих итерациях.

Далее рассчитывается совокупность электронных траекторий в зависимости от положения  $r_0$  индивидуальной частицы на эмиттере, ее начальной энергии  $E$  и двух углов  $\gamma$  и  $\varphi$ , определяющих ориентацию вектора начальной скорости. После этого на заданной сетке определяется плотность пространственного заряда в соответствии с [1].

Абсолютная погрешность решения самосогласованной задачи по полю на  $k$ -й итерации оценивается по формуле:

$$\Delta_k = \max_{(i,t) \in \Omega} (|U_k(i,j) - U_{k-1}(i,j)|).$$

Если  $\Delta_k$  оказывается меньше заданной величины  $\Delta_0$ , то итерации прекращаются и задача считается решенной; в противном случае происходит переход к следующей итерации.

Указанный алгоритм был реализован в виде компьютерной программы на языке C++. Визуализация результатов осуществлялась с помощью графического пакета, разработанного В. А. Тарасовым.

### Анализ численных результатов

Для тестирования работы программы рассматривалась простейшая осесимметричная система с плоским катодом, изображенная на рис. 2. Линейные размеры электродов выбирались таким образом, чтобы на оси симметрии обеспечить хорошее приближение к задаче одномерного диода, а именно:  $R = 5$  см,  $d = 5$  мм,  $R_3 = 3$  см. Ток насыщения  $j_n = 0,16$  А/см, температура катода  $T = 2400$  К, потенциал анода  $U_a = 2,56$  В. Разбиение межэлектродного пространства производилось на равномерной сетке с числом ячеек 100 по оси  $z$  и 80 по  $r$ . Область эмиссии разбивалась на 50 равновеликих отрезков, при этом длина элементарного отрезка эмиссии составляла 0,625 мм и равнялась шагу сетки по радиусу. На первой итерации значимая часть энергетического спектра максвелловского распределения термоэлектронов  $0 \leq E \leq 10kT$  разбивалась равномерно с шагом  $0,5 kT$ ; на последующих итерациях энергетический спектр разбивался на три части: на отрезках  $[0,5 kT]$  и  $[8 kT, 12 kT]$  шаг разбиения составлял  $0,25 kT$ , на отрезке  $[5 kT, 8 kT]$  —  $0,125 kT$ , т. е. всего 60 разбиений по энергии. На первой итерации бралось 4 разбиения по углу  $\gamma \in [0, \pi / 2]$ , а на последующих — 8. Соответственно количество разбиений по углу  $\varphi \in [0, 2\pi]$  на первой итерации составляло 30, на последующих — 80. Таким образом, на первой итерации рассчитывалось 48 000 траекторий и 960 000 — на всех последующих.

Точное решение задачи для одномерного диода с указанными выше начальными данными представлено в работе [2], из которой следует, что в рассматриваемом случае самосогласованная плотность тока составляет  $j_T = 1,64 \cdot 10^{-4}$  А/см<sup>2</sup>, положение минимума потенциала  $z_{\min T} = 0,7325$  мм, его величина  $U_{\min T} = 1,424$  В. Отметим, что расчет по закону "трех-вторых" в этом случае дает плотность тока эмиссии, равную  $0,3686 \cdot 10^{-4}$  А/см<sup>2</sup>.

Оценки погрешности численного решения рассматриваемой задачи с использованием приведенного выше алгоритма за двадцать итераций следующие: по полю в расчетной области —  $\Delta_{20} = 0,01168$  В; по плотности тока на оси симметрии (по сравнению

с точным решением для одномерного диода) —  $|j - j_T| / j_T = 0,1$ , по положению минимума потенциала —  $|z_{\min} - z_{\min T}| / z_{\min T} = 0,025$ ,  $|z_{\min} - z_{\min T}| / d = 0,004$ , по его величине —  $|U_{\min} - U_{\min T}| / U_{\min T} = 0,001$ . Расчеты показали, что для оценки сходимости по полю удобнее пользоваться относительной величиной

$$\delta_k = \frac{\Delta k}{\lambda_k (U_{\max k} - U_{\min k})},$$

которая на 20-й итерации составила 0,023.

В табл. 1, характеризующей сходимость итерационного процесса, приведены основные расчетные характеристики рассматриваемой задачи на различных итерациях.

Таблица 1  
Сходимость итерационного процесса в задаче о плоском диоде

Номер итерации $k$	Плотность тока на поверхности катода $j \cdot 10^4, \text{A/cm}^2$	Значение минимума потенциала $U_{\min}, \text{В}$	Координата точки минимума потенциала		Значение параметра релаксации $\lambda$	Относительная погрешность расчета поля $\delta$
			$z_{\min}, \text{мм}$	$r_{\min}, \text{мм}$		
1	1611,5	0,0000	0,00	0,00	0,618	1,67
4	$-3,26 \cdot 10^{-6}$	-77,21	2,25	16,9	0,618	2,53
8	1,622	-1,461	1,15	16,9	0,618	1,05
12	1,432	-1,4291	0,75	2,5	0,2360	0,0476
16	1,496	-1,4275	0,70	15,0	0,0557	0,0186
20	1,4795	-1,4265	0,70	15,0	0,01315	0,0231

Из этой таблицы видно, что, начиная примерно с восьмой итерации, процесс сходимости стабилизировался. При этом положение минимума потенциала по оси  $z$  с высокой точностью совпало с аналитическим решением задачи для плоского диода, в то время, как положение минимума по  $r$  смещено к краю области эмиссии. Численные эксперименты показали, что  $r$ -координата точки минимума является наиболее неустойчивой характеристикой, существенно зависящей от способа дискретизации начальных параметров задачи. С другой стороны, эксперименты показали, что глубина потенциальной ямы практически постоянна по всей ее радиальной длине, что и объясняет отмеченную выше неустойчивость.

Рис. 4—8 иллюстрируют численное решение самосогласованной задачи для рассматриваемого случая системы с плоским катодом.

На рис. 4 показано распределение осевого потенциала на первой, восьмой, двенадцатой и двадцатой итерациях. Поле линейно на первой итерации, на последующих оно имеет очень глубокий минимум, расположенный в центре пространства катод—анод. Распределения потенциала на двенадцатой и двадцатой итерации почти совпадают, что иллюстрирует сходимость по полю, при этом кривая 20 хорошо совпадает с известным распределением потенциала для одномерного диода.

На рис. 5 показаны осевые распределения плотности пространственного заряда на первой, пятой и двадцатой итерациях. Видно, что практически весь заряд сосредоточен вблизи области эмиссии, на которую оказывает существенное влияние близко расположенная потенциальная яма, глубина которой в самосогласованном режиме составляет 1,4 В. Большая часть электронов в данном случае отражается от потенциальной ямы, и ток в диоде создается лишь небольшой частью электронов “хвоста” максвелловского распределения.

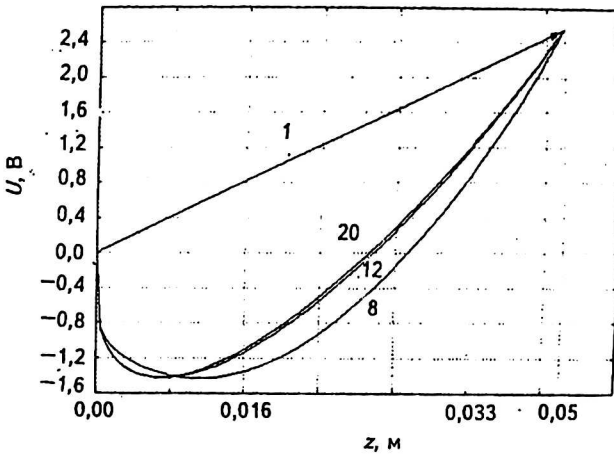


Рис. 4. Осевое распределение потенциала на различных итерациях в задаче о плоском диоде (1, 8, 12 и 20-я итерации)

Рис. 5. Распределение плотности пространственного заряда на оси на 1, 5 и 20-й итерациях в задаче о плоском диоде

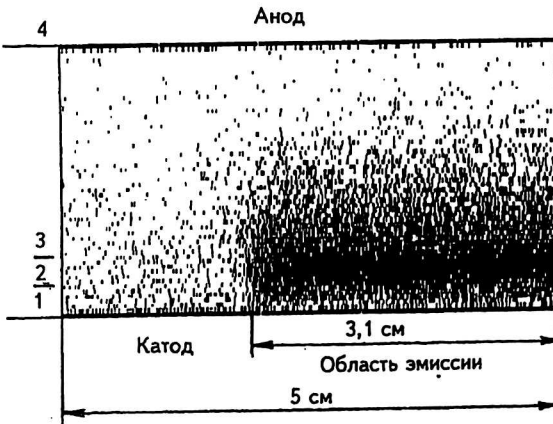
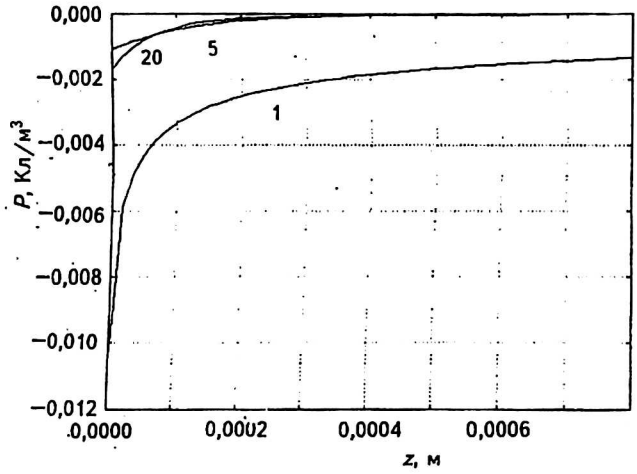


Рис. 6. Пространственное распределение электростатического потенциала в задаче о плоском диоде

Рис. 7. Распределение z-компоненты плотности тока в различных сечениях  $z = \text{const}$  в задаче о плоском диоде:  
 1 —  $z = 0$ ; 2 —  $z = 0,5$  мм;  
 3 —  $z = 1$  мм; 4 —  $z = 5$  мм

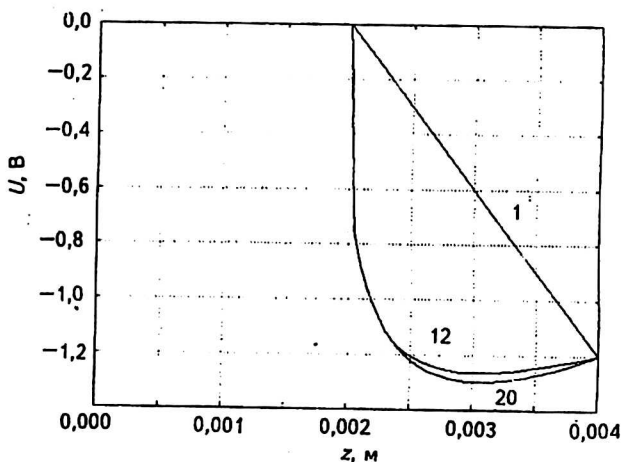
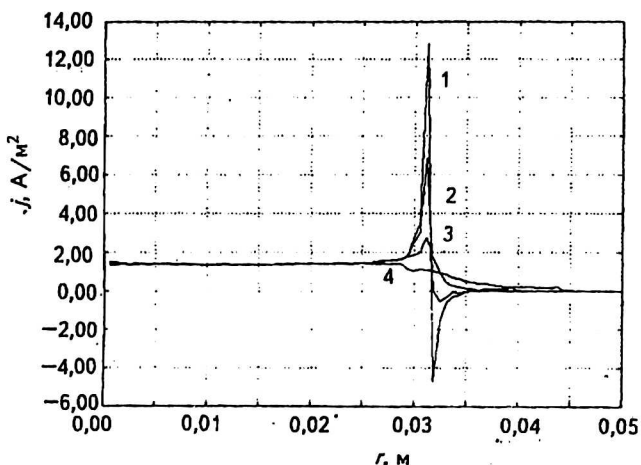


Рис. 8. Осевое распределение потенциала на различных итерациях в задаче со сферическим катодом (1, 12 и 20-я итерации)

Рис. 6 характеризует пространственное распределение потенциала в межэлектродной области. Зачерненная область на этом рисунке соответствует области минимума потенциала, протяженность которой в радиальном направлении практически совпадает с величиной эмиттера. Линия, ограничивающая рис. 6 справа, — ось симметрии.

Распределение z-компоненты плотности тока на двадцатой итерации в сечениях  $z = \text{const}$  (1, 2, 3, 4) показано на рис. 7. Геометрическое распределение соответствующих сечений показано на рис. 6. Вид кривой 1 свидетельствует о том, что плотность тока на поверхности катода практически постоянна вплоть до края эмиттера. Вблизи края эмиттера наблюдается резкое увеличение плотности тока эмиссии примерно на порядок по сравнению с плотностью тока на оси. Такой всплеск плотности тока вблизи края эмиттера объясняется тем, что, как уже указывалось выше, потенциальная яма простирается строго вдоль области эмиссии. Поэтому, чем ближе к краю эмиттера, тем большее количество электронов, обладающих положительной компонентой скорости в радиальном направлении, способно миновать (обогнуть) потенциальный барьер.

Непосредственно за областью эмиссии ток отрицателен. Это объясняется тем, что в рассматриваемой области отсутствует эмиссия электронов, и, одновременно, в эту область возвращаются электроны, отраженные от потенциального барьера.

Следует отметить, что в рассматриваемой задаче размер области, в которой наблюдалось хорошее совпадение с аналитическим решением для одномерного диода, составил около 80 % всего размера эмиттера.

Рассмотрим теперь численные результаты, полученные для расчетной области со сферическим катодом (см. рис. 3). Максимальные размеры расчетной области в  $z$  и  $r$  направлениях, соответственно,  $d = 4$  мм и  $2R = 8$  мм, радиус кривизны катода  $R_k = 2$  мм, размер области эмиссии  $R_s = 0,9 \cdot R_k = 1,8$  мм, температура катода  $T = 2400$  К, ток насыщения  $j_n = 0,16$  А/см<sup>2</sup>, потенциал анода  $U_a = -1,2$  В. Разбиение межэлектродного пространства производилось на равномерной сетке с числом ячеек, равным 80, по осям  $z$  и  $r$ . На первой итерации энергетический спектр разбивался равномерно с шагам  $kT$  (8 разбиений по энергии), на последующих итерациях энергетический спектр разбивался с шагом  $0,5 kT$  (20 разбиений по энергии). На первой итерации бралось 2 разбиения по углу  $\gamma$ , на последующих — 6. Соответственно, количество разбиений по углу  $\phi$  на первой итерации составляло 40, и 80 — на последующих.

На двадцатой итерации абсолютная погрешность по полю  $\Delta_{20} = 5,2 \cdot 10^4$  В, а относительная погрешность оказалась равной  $\delta_{20} = 0,007$ .

Табл. 2 характеризует процесс сходимости к самосогласованному решению в рассматриваемой задаче.

Таблица 2

Сходимость итерационного процесса в задаче со сферическим катодом

Номер итерации $k$	Плотность тока на поверхности катода $j \cdot 10^3$ , А/см <sup>2</sup>	Значение минимума потенциала $U_{\min}$ , В	Координата точки минимума потенциала		Значение параметра релаксации $\lambda$	Относительная погрешность расчета поля $\delta$
			$z_{\min}$ , мм	$r_{\min}$ , мм		
1	66,42	-1,2	4,00	0,00	0,618	1,20
4	0,688	-6,57	2,00	2,35	0,618	2,54
8	1,628	-1,352	2,50	2,80	0,236	0,344
12	1,757	-1,338	2,65	2,90	0,146	0,0276
16	1,888	-1,3457	2,70	2,90	0,0901	0,0161
20	1,990	-1,3460	2,70	2,90	0,0557	0,00688

Рис. 8, на котором показаны расчетные осевые распределения потенциала на первой, двенадцатой и двадцатой итерациях, иллюстрирует сходимость по полю. В других сечениях  $r = \text{const}$  качественная картина сходимости по полю аналогичная. Характер распределения поля в расчетной области иллюстрирует рис. 9, аналогичный по смыслу рис. 6.

Характер распределения пространственного заряда показан на рис. 10. Как и в предыдущем случае, большая часть электронов отражается от потенциальной ямы, глубина которой в достаточно протяженной области вблизи эмиттера постоянна и составляет 1,2 В.

Распределения плотности тока на двадцатой итерации в сечениях  $z = \text{const}$  (см. рис. 9) показаны на рис. 11. Сечение 1 расположено за областью эмиссии, поэтому плотность тока в этом сечении отрицательна. В сечениях 2—4 плотность тока монотонно расплывается по радиусу. Как и в предыдущем случае плотность тока эмиссии по катоду увеличивается по мере приближении к краю области эмиссии и достигает величины  $2,3 \cdot 10^{-2}$  А/см<sup>2</sup>, что более чем на порядок превышает величину плотности тока в центре катода. За областью эмиссии ток отрицателен с постепенным приближением к нулю. Как и предыдущем случае отрицательный ток объясняется наличием электронов, отраженных от потенциального барьера.

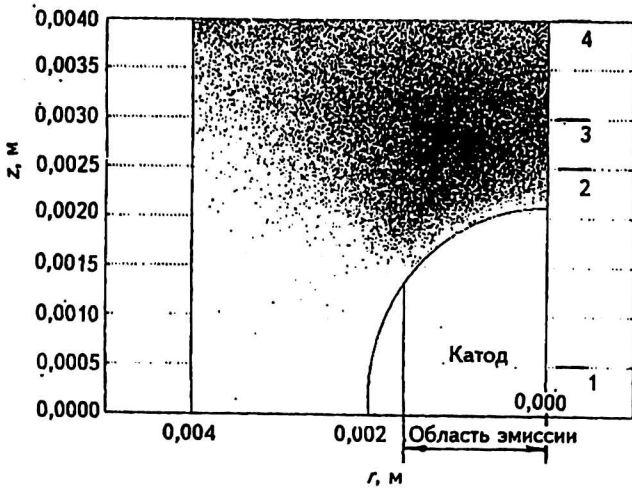


Рис. 9. Пространственное распределение электростатического потенциала в задаче со сферическим катодом

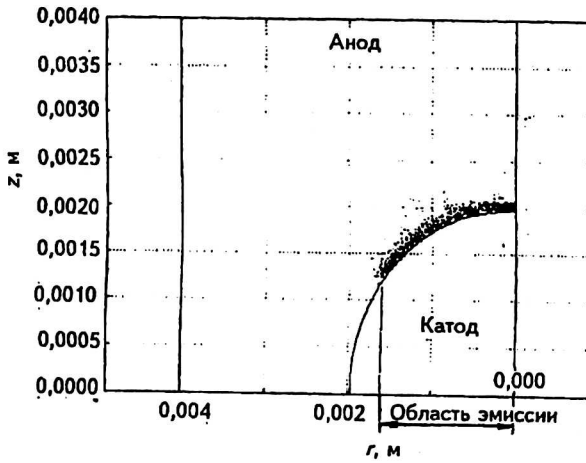


Рис. 10. Распределение пространственное заряда в задаче со сферическим катодом

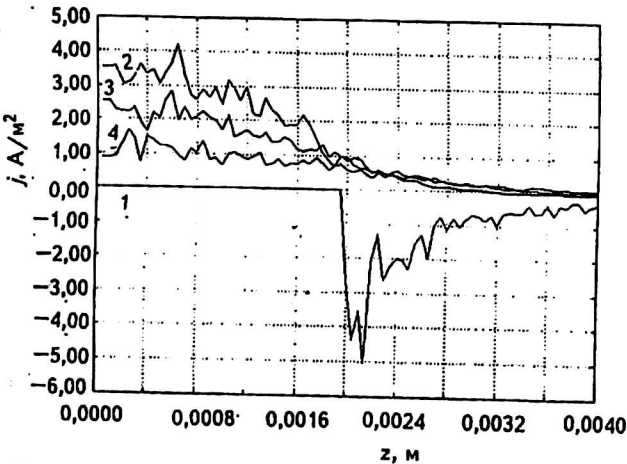


Рис. 11. Распределение z-компоненты плотности тока в различных сечениях  $z = \text{const}$  в задаче со сферическим катодом:

1 —  $z = 0,5$  мм; 2 —  $z = 2,5$  мм; 3 —  $z = 3$  мм; 4 —  $z = 4$  мм

## Заключение

Анализ результатов показывает, что разработанный алгоритм, основанный на решении уравнения Пуассона методом попеременной прогонки и построенная на основе алгоритма программа обеспечивают устойчивое решение задачи для различных конфигураций катода (выпуклой, вогнутой, плоской) в различных режимах работы, включая режим запираания. При приближении конфигурации задачи к одномерному диоду плотность тока эмиссии, положение минимума потенциала и его величина на оси симметрии хорошо сходятся к известному аналитическому решению.

Путем численного моделирования исследованы особенности формирования электронного пучка вблизи краев эмиттера. Показано, что  $z$ -компонента плотности тока резко возрастает в этой области, примерно на порядок превышая соответствующее значение в центре эмиттера. Указанный эффект объясняется тем, что электроны, эмиттированные вблизи краев эмиттера, огибают потенциальный барьер, размер которого в радиальном направлении практически совпадает с размером эмиттера.

## Литература

1. Хокс П., Каспер Э. Основы электронной оптики. — М.: Мир, 1993.
2. Добрецов Л. Н., Гомоюнова М. В. Эмиссионная электроника. — М.: Наука, 1966.
3. Овчинников А. В. Метод анализа потоков заряженных частиц. // Зарубежная радиоэлектроника, 1979. № 5. С. 24-41.
4. Блейвас И. М. и др. Анализ различных машинных программ расчета электронно-оптических систем приборов типа "О". — В кн.: Методы расчета электронно-оптических систем, М., 1977. С. 5-8.
5. Барбарич И. Н., Титов А. А. Использование ЭВМ для проектирования электронно-лучевых приборов. // Изв. ЛЭТИ, 1979. Вып. 246. С. 54-60.
6. Барбарич И. Н., Иванов А. Н., Титов А. А. Устранение неопределенности в расчете объемного заряда в прикатодной области при решении задачи самосогласованного поля. — Рязань, Электроника. 1985. Вып. 5. С. 98-102.
7. Алгоритмы и методы расчета электронно-оптических систем // Сборник научных трудов / Под редакцией В. П. Ильина. — Новосибирск, 1983.
8. Иванов В. Я. Методы автоматического проектирования приборов электроники. Часть 1. — Методы математического моделирования задач электронной оптики. — Новосибирск, 1986.
9. Федоренко Р. П. Введение в вычислительную физику. — М.: Изд-во Моск. физ.-техн. института, 1994.
10. Бурсиан В. Р. // ЖРФХО. 1921. 51, 289; 1. Langmuir, Phys. Rev. 1923. 21, 419.

## NUMERICAL ITERATIVE SOLUTION OF THE SELF-CONSISTENT PROBLEM FOR ELECTRON GUNS IN THE NEAR-CATHODE REGION

*M. A. Monastyrski, V. A. Tarasov*

General Physics Institute of RAS, Moscow, Russia

*A. G. Murav'ev*

Research Institute for Electron and Ion Optics, Moscow, Russia

*In the paper, numerical algorithms and software intended for electron guns computation in the near-cathode region with taking into account space charge effects are developed. These algorithms ensure stable iterative solution of the self-consistent problem for various cathode geometry types (flat, convex, concave, etc.), and for various operation modes. Close correlation between numerical results and the well-known analytical solution for one-dimensional flat diode is achieved. Some peculiarities of electron beam forming at the edges of emitter area are studied.*