

УДК 5 37.533

**ТЕОРИЯ МНОГОПУЧКОВЫХ ЭЛЕКТРОННО-ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ***В. А. Сыровой*

РГНЦ "Всероссийский электротехнический институт", Москва, Россия

*Представлен обзор результатов по методам расчета многопучковых систем с взаимодействующими микропучками, включающий теорию нерелятивистской системы с крупноструктурной управляющей сеткой; релятивистского инжектора с распределением потенциала на оси триодного типа при отсутствии внешнего магнитного поля; однослойных релятивистских систем в произвольно ориентированном внешнем магнитном поле.*

**НЕРЕЛЯТИВИСТСКАЯ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКАЯ СИСТЕМА  
С КРУПНОСТРУКТУРНОЙ УПРАВЛЯЮЩЕЙ СЕТКОЙ**

Первой работой, посвященной синтезу многопучковой системы с взаимодействующими нерелятивистскими микропучками и крупноструктурной управляющей сеткой, потенциал которой близок к естественному, была работа [1], целиком основанная на параксиальной теории.

В пространстве между искривленным катодом и сеткой взаимодействием микропучков можно пренебречь и описывать каждый микропоток в рамках параксиальной теории течений, симметричных относительно нормали к катоду в точке старта. Распространяясь между сеткой и анодом, микропучки начинают взаимодействовать, причем этот эффект учитывается с помощью модели эффективного осесимметричного макропучка, интегральные параметры которого совпадают с параметрами совокупности микроструй. Для описания макропотока также используются соотношения параксиальной теории. Зная поле макропучка, можно рассчитывать эволюцию микроструй между сеткой и анодом на основании параксиальной теории пучков с искривленной осью и круглым сечением [2]. При этом оси микроструй совпадают с траекториями макропотока.

В рамках параксиального подхода эммитирующая поверхность описывается параболоидом вращения; с той же точностью как макро-, так и микрокатоды можно аппроксимировать фрагментами сферической поверхности, которая является более технологичной.

Управляющей функцией при синтезе макропучка является распределение потенциала  $\varphi$  на оси системы:

$$U = \varphi(0, z) = (1 - e^{-P})^{4/3}, \quad P = P_3 z^{3/3} + P_6 z^{6/3} + P_9 z^{9/3}. \quad (1)$$

Здесь  $P$  — положительно определенный полином, коэффициенты  $P_3, P_6$  которого регламентированы условиями полного пространственного заряда, а  $P_9$  — формально свободный параметр. Его значение, однако, целесообразно назначить из условия нулевой кривизны  $k_1=0$  траектории на катоде, что соответствует известной связи между кривизной и градиентом плотности тока эмиссии

$$k = \frac{1}{5} \frac{\Delta J}{J}. \quad (2)$$

В параксиальной теории  $J = \text{const}$  и  $\nabla J = 0$ . Управляющим параметром синтеза макропучка является кривизна микрокатода.

Положение управляющей сетки определяется эквипотенциалью с соответствующим значением  $\varphi$ . Расчет макропучка дает также величину поля  $E$  на сетке, которая входит в распределение потенциала на оси макропучка, обеспечивая плавное сопряжение  $\varphi$  с полем макропотока за счет затухающего экспоненциального члена

$$U = (1 - e^{-P})^{4/3} + Ez(1 - e^{-cz^2}), \quad c = \text{const}. \quad (3)$$

Коэффициенты полинома  $P$  в (3) рассчитываются исходя из параметров микропучка.

При решении задачи о синтезе микропучка возникают сложности в связи с тем, что микроперванс  $P_\mu$  потока принимает значения 3—4, в то время как в обычной практике параксиальная теория имеет дело с  $P_\mu \sim 1$ . Эти трудности были преодолены за счет введения вместо  $z$  деформированной продольной координаты  $\xi$ , отсчитываемой от поверхности катода, и формулировки параксиальных уравнений не на оси симметрии микропучка, а на границе потока. Последняя мера позволяет уравнивать условия для расчета двух узких областей: области, занятой пучком, и полосы, в которой решается внешняя задача по определению формирующих электродов.

На рис. 1 приведены примеры расчета макропотока и микропучка. В силу того, что вблизи управляющей сетки поперечные градиенты малы, микропучки из различных слоев имеют одинаковые параметры. На рис. 2 представлена полная картина трехслойной многопучковой системы с числом струй в слоях 1, 7, 19 от микрокатодов до канала транспортировки.

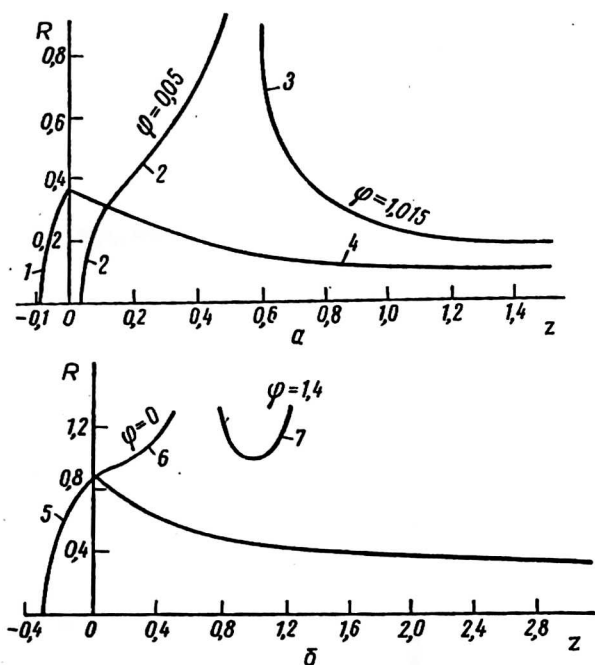


Рис. 1. Конфигурация макропучка (а) и микропучка (б):

- 1 — псевдокатод; 2 — эквипотенциаль идеальной управляющей сетки; 3 — анод макропучка;
- 4 — граница макропучка; 5 — микрокатод; 6 — эквипотенциаль ячейки теневого сетки;
- 7 — эквипотенциаль ячейки управляющей сетки

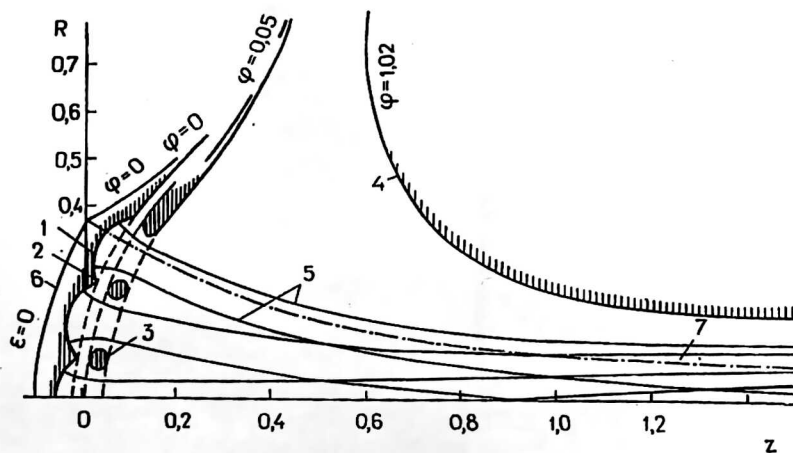


Рис. 2. Электронно-оптическая система для пучка с крупноструктурной управляющей сеткой:

- 1 — ячейка микрокатода; 2 — теньевая сетка маска; 3 — управляющая сетка; 4 — анод;
- 5 — граница микропучков; 6 — псевдокатод; 7 — граница макропучка

### МНОГОПУЧКОВЫЙ РЕЛЯТИВИСТСКИЙ ИНЖЕКТОР

В отличие от [1] в многопучковом релятивистском инжекторе крупноструктурная сетка используется для реализации существенно триодного распределения потенциала (рис. 3, а). Основная идея [1] о макропучке, описывающем взаимодействие микроструй, и о расчете эволюции последних между сеткой и анодом сохраняется, но получает новое содержание. Теперь речь идет о синтезе непараксиального релятивистского макропотока с собственным азимутальным магнитным полем. При отсутствии внешнего магнитного поля траектории макропотока и, следовательно, оси микроструй остаются плоскими кривыми.

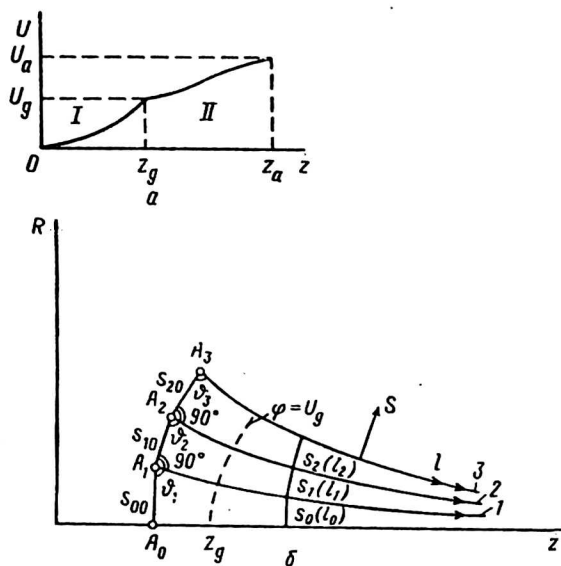


Рис. 3. Триодное распределение потенциала на оси многопучкового релятивистского инжектора (а); алгоритм синтеза непараксиального макропучка за счет сшивания нескольких узких полос (б)

В работе [3] предложено синтезировать непараксиальный макропоток за счет сращивания решения в узких областях, первая из которых описывается приосевой, а последующие — приповерхностной асимптотикой. В [1] отмечалось, что стартовая поверхность макропотока (псевдокатод) расположена на значительном расстоянии от несущей микрокатоды поверхности макрокатода и что поэтому макропучку можно рассчитывать и при эмиссии, ограниченной температурой, что позволит расширить возможности оптимизации. В [3] сделан дальнейший шаг в этом направлении. В многопучковых системах с компрессией существует начальная область, где взаимодействие микропучков пренебрежимо мало. До сечения, которое мы назовем сечением начала взаимодействия и положение которого будет обсуждаться ниже, понятие макропучка не имеет физического смысла. Для его формализации может быть принята любая модель, удобная с точки зрения решения конечной задачи оптимизации макропотока. Такой моделью является инжекция пучка с произвольными условиями выстрела, которые выступают в качестве управляющих параметров при оптимизации и которые не имеют отношения к условиям термоэмиссии.

Эволюция микропучков в [3] оценивалась в том же приближении, что и в [1] (круглые, но уже релятивистские пучки с искривленной осью). Это приближение относится к недостаткам [3], как и алгоритмы двукратного численного дифференцирования, использованные для сращивания решения в отдельных полосах при синтезе макропотока, точностью которых может вызывать сомнения в адекватности результатов, особенно в случае пучков с высокой компрессией. Что касается квазиаксиально-симметричного приближения при расчете микроструй, то в периферических частях непараксиального макропотока возникают квадруполи, приводящие к деформации первоначально круглого сечения.

Подчеркнем, что модели [1, 3], хотя речь в них и шла о распространении микропучка в известном поле макропотока, в силу представления о микропучке как о пучке с круглым сечением, были сформулированы с формальной точки зрения как задачи синтеза, т. е. задачи Коши с начальными данными. Эта постановка традиционна при рассмотрении параксиальной теории и обычно противопоставляется прямым постановкам, характерным для программ траекторного анализа,

хотя примеры прямых постановок с использованием параксиальных уравнений приведены в [2].

Методические недостатки [3] устранены в работе [4], где численное дифференцирование было исключено из алгоритмов синтеза, а эволюция микроструи рассматривалась как прямая задача о распространении пучка с деформируемым эллиптическим сечением в заданном внешнем поле макропотока.

Рис. 3, б иллюстрирует способ синтеза макропучка. Алгоритм сводится к задаче вспомогательной ломаной линии (эмиттера)  $A_0A_1A_2\dots$ , звенья которой  $s_{00}, s_{10}, s_{20}, \dots$  определяют начальную ширину слоев, а углы выстрела  $\vartheta_1, \vartheta_2, \dots$  зависят от величин  $s_{00}^1, s_{10}^1, s_{20}^1, \dots$ , представляющих собой производные траекторных функций по длине дуги  $l$  базовой кривой каждого слоя: для приосевой полосы это ось  $z$ , для слоя толщины  $s_1(l_1)$  это траектория 1 (внешняя граница приосевого пучка) и т.д.

Приосевой слой может быть описан параксиальным уравнением, которое в естественной релятивистской нормировке имеет вид

$$\tilde{V}^2 s_0'' + \tilde{V} \tilde{V}' s_0' = \frac{1}{2} (\sigma_0 - N_0) s_0, \quad (4)$$

$$\tilde{V} = (1 + U)V, \quad \sigma = (1 + U)^{-1} \rho, \quad 1 + U = (1 - V^2)^{-1/2}.$$

Здесь и ниже  $V, \tilde{V}$  — скорость и импульс на оси;  $\rho, \delta$  — плотность пространственного заряда и скалярная плотность;  $N$  — эффективный “фон”;  $J$  — плотность тока на эмиттере. Для  $\rho, N$ , потенциала  $\phi$  и азимутального магнитного поля  $H_\psi$  на внешней границе слоя имеем

$$\rho_0 = \frac{J_0 s_{00}^2}{V s_0^2}, \quad N_0 = (1 + U) U'', \quad \phi_0 = U + \frac{1}{4} (\rho_0 - U'') s_0^2, \quad H_{\psi_0} = \frac{J_0 s_{00}^2}{2 s_0}. \quad (5)$$

Приповерхностная асимптотика  $n$ -го слоя определяется уравнением [5]

$$\tilde{V}_n^2 s_n'' + \tilde{V}_n \tilde{V}_n' s_n' = (\sigma_n - N_n) s_n, \quad s_n' \equiv \frac{ds_n}{dt_n}. \quad (6)$$

Параметры потока в кольцевом слое описываются соотношениями

$$\rho_n = \frac{R_n(0) J_n s_{n0}}{(RV_s)_n}, \quad H_{\psi n} = [(k_2 \Omega_\psi + \rho V) s]_n,$$

$$N_n = \left[ \frac{1+U}{R} (RU)' + k_1(2k_1 - k_2) \tilde{V}^2 + 2k_1 \tilde{V} \Omega_\psi + \Omega_\psi^2 - E_s^2 \right]_n, \quad (7)$$

$$E_{s_n} = \left[ (1+U) k_1 V^2 + V \Omega_\psi \right]_n, \quad \phi_n = \left[ U + E_s s + \frac{1}{2} (\rho - \bar{N}) s^2 \right]_n,$$

$$\bar{N}_n = \left[ \frac{1}{R} (RU)' - TE_s \right]_n, \quad T = k_1 + k_2.$$

Здесь  $k_1, k_2$  — главные кривизны базовой поверхности;  $\Omega_\psi, E_s$  — азимутальное магнитное и нормальное электрическое поле на ней. Роль базового потенциала  $U_n$  и внешнего по отношению к слою магнитного поля  $\Omega_{\psi n}$  играют потенциал и собственное магнитное поле предыдущего слоя, вычисленные на его границе:

$$U_n = \Phi_{n-1}, \quad \Omega_{\Psi n} = (H_{\Psi})_{n-1} \quad (8)$$

Сопряжения решения на границе слоев осуществляется с помощью аналитического дифференцирования уравнения и параметров потока в предыдущей полосе.

На рис. 4 приведены результаты синтеза макропучка с током 325 А, потенциалом сетки 100 кВ, потенциалом анода 400 кВ при микропервеансе 1,3 в приближении четырех полос при линейной компрессии 7,02 (потенциал нормирован на 511 кВ). Пунктиром отмечены оси микроструй. Крупноструктурная сетка имела четыре концентрических слоя отверстий, число которых по слоям равно 1, 6, 12, 18. Формирующие электроды рассчитаны на основе координатных разложений [6].

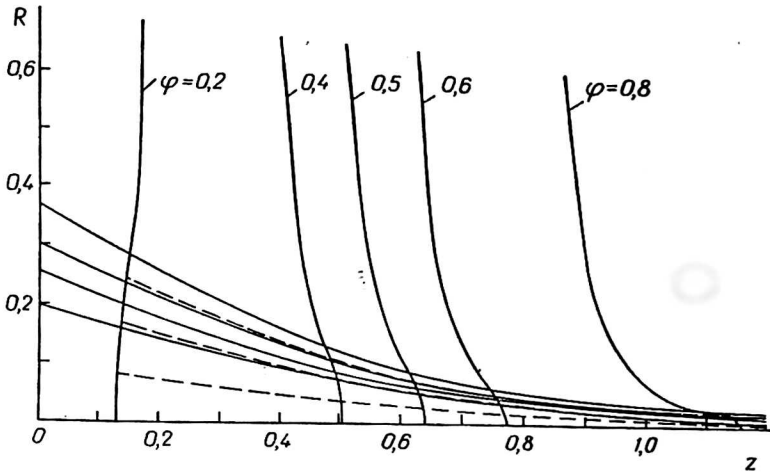


Рис. 4. Результаты синтеза макропучка в приближении четырех полос; ток — 325 А, потенциал сетки — 100 кВ, потенциал анода — 400 кВ, микропервеанс — 1,3, линейная компрессия — 7,02

Расчет микропучков представляет меньшую проблему, чем в [1], так как их микропервеанс не превышает единицы; в качественном отношении результаты близки к изображенным на рис. 1.

Осесимметричное электрическое поле макропотока для микропучка с искривленной осью теряет свою симметрию: в системе  $l, s, q$ , связанной с траекторией центрального электрона (длина дуги, нормаль, бинормаль к оси), потенциал макропотока имеет квадрупольный член  $\frac{1}{2} A (s^2 - q^2)$ . Кроме того микропучок

распространения на фоне среды с ненулевым значением  $\text{rot } \vec{H}$ , обусловленным током макропучка. В результате проблема о распространении микроструи между сеткой и анодом формулируется как прямая задача об эволюции параксиального пучка в заданном внешнем поле. Мы обсудим эту проблему более подробно в следующем разделе, а пока заметим, что поле макропотока для релятивистского инжектора обладает особенностью, выражающейся в трансформации круглого сечения микропучка в эллипс, не сопровождающейся поворотом относительно оси.

Полуоси  $\alpha, \nu$  удовлетворяют уравнениям

$$\ddot{\alpha} = \left[ \frac{1}{2} \frac{\rho + \rho_M}{1+U} - \frac{1+U}{R} (RU')' - k_1(2k_1 - k_2) \tilde{V}^2 - 2k_1 \tilde{V} \Omega_{\Psi} - \Omega_{\Psi}^2 + E_s^2 \right] \alpha, \quad (9)$$

$$\ddot{\nu} = \left[ \frac{1}{2} \frac{\rho + \rho_M}{1+U} - \frac{1+U}{R} RU' - k_1 k_2 \tilde{V}^2 \right] \nu, \quad \ddot{\alpha} \equiv \tilde{V} (\tilde{V} \alpha)'$$

Уравнение для  $\alpha$  совпадает с уравнением (6) для осесимметричного слоя, в котором в качестве скалярной плотности фигурирует полусумма скалярных плотностей микро- и макропучка, а при  $\rho_M \rightarrow \rho$  (коэффициент заполнения стремится к единице) тождественно ему. При том же переходе влияние пространственного заряда на расширение в азимутальном направлении полностью устраняется.

На рис. 5 приведены полуоси  $\alpha$ ,  $\nu$  и их отношение  $\alpha/\nu$  для эллипса-сечения при движении вдоль потока. Микропучки первого и второго слоя, распространяющиеся в параксиальном ядре, остаются круглыми [7], зато в периферических слоях значение  $\alpha/\nu$  быстро возрастает. Функции  $\alpha$ ,  $\nu$  при переходе от третьего к четвертому слою почти не изменяются, причем кривые для  $\alpha$  практически совпадают с законом изменения радиуса центрального микропучка (кривая 1), а полуоси  $\nu$  описываются кривой 3. Отметим также относительно слабую деформацию сечения вплоть до  $l = 0,25$ , что свидетельствует о слабости взаимодействия в этой области.

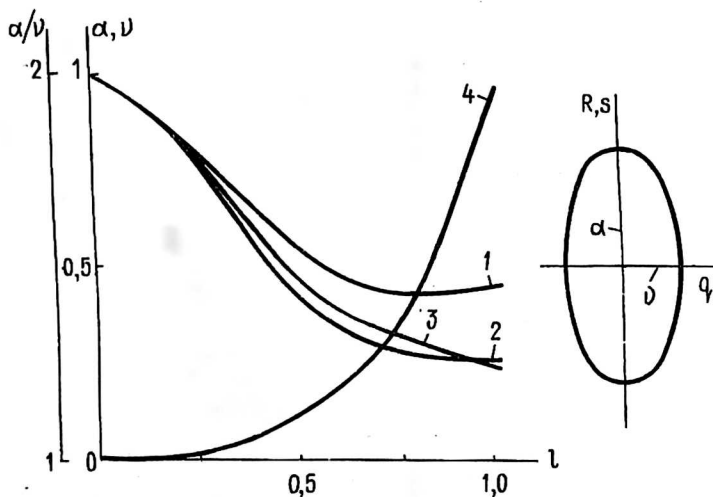


Рис. 5. Конфигурация микрострей для многопучкового релятивистского инжектора:  
 1 — радиус пучка в первом слое и полуось  $\alpha$  для третьего и четвертого слоев;  
 2 — радиус пучка во втором слое; 3 — полуось  $\nu$  для третьего и четвертого слоев;  
 4 — отношение полуосей  $\alpha/\nu$  для третьего и четвертого слоев

### ЭВОЛЮЦИЯ ПРОСТРАНСТВЕННОГО ПАРАКСИАЛЬНОГО ПУЧКА В ЗАДАННОМ ВНЕШНЕМ ПОЛЕ

Общая теория распространения параксиального пучка в заданном внешнем электромагнитном поле, имеющая дело с задачей в прямой постановке (или с задачей анализа), основана на результатах параксиальной теории пространственных релятивистских пучков [8] и сформулирована в [4, 7—10].

На осевой электрон не действуют силы пространственного заряда, поэтому конфигурация оси потока, ее кривизна и кручение рассчитываются исходя из уравнений движения одиночной частицы. Для пучка, сечение которого испытывает однородную деформацию,

$$s = \alpha(l)\xi + \beta(l)\eta, \quad q = \mu(l)\xi + \gamma(l)\eta, \quad (10)$$

где  $\xi$ ,  $\eta$  — значения  $s$ ,  $q$  при  $l = 0$ , а  $\lambda$ ,  $\beta$ ,  $\mu$ ,  $\nu$  — траекторные функции, параксиальная теория [8] дает два соотношения:

$$\begin{aligned} \ddot{D} - 2(\dot{\alpha}\dot{\nu} - \dot{\beta}\dot{\mu}) + \Omega_1(P_0 + D\Omega_1) &= D(\sigma - n), \\ \dot{\beta}\alpha - \dot{\alpha}\beta + \dot{\nu}\mu - \dot{\mu}\nu - D\Omega_1 &= P_0 = \text{const}, \quad D = \alpha\nu - \beta\mu. \end{aligned} \quad (11)$$

Здесь  $n$  — эффективный фон, включающий  $U''$ , квадраты поперечного электрического и магнитного полей, центробежные члены и т. д. Потенциал в пучке описывается формулой

$$\varphi = U + E_x x + E_y y + \frac{1}{2} S_b (x^2 + y^2) + \frac{1}{2} A_b (x^2 - y^2) + E_b xy. \quad (12)$$

Здесь  $x, y$  — координаты в поперечном сечении, получающиеся из  $s, q$  поворотом на угол  $\theta$ , связанный с кручением  $\varpi$  оси

$$\theta = \int \varpi dl.$$

Набор  $l, x, y$  в отличие от  $l, s, q$  определяет ортогональные координаты. Интенсивности квадруполей  $A_b, E_b$  включают вторые производные траекторных функций, интенсивности квадруполей внешнего магнитного поля и члены  $\partial H_y / \partial x + \partial H_x / \partial y, \partial H_y / \partial y$ , отвечающие за собственные поля макропотока. В отличие от них коэффициент  $S_b$  при симметричном члене не зависит от траекторных функций, но выражается через плотность пространственного заряда и параметры потока на оси.

Вычислив квадруполи  $A_f, E_f$  внешнего электрического поля, а также магнитные квадруполи и потребовав выполнения равенств

$$A_b = A_f, \quad E_b = E_f, \quad (13)$$

получаем в дополнение к (11) еще два соотношения для траекторных функций. Уравнения (13) представляют собой условия подстройки формы пучка под внешние поля. Равенство  $S_b = S_f$  может быть выполнено с точностью до пренебрежения пространственным зарядом в  $S_b$ . В [11] показано, что учет этого члена выходит за рамки параксиальной теории приближения.

Дифференцируя второе уравнение (11) и разрешая соотношения (11), (13) относительно вторых производных траекторных функций, имеем

$$\begin{aligned} D\ddot{\alpha} &= \frac{1}{2}(f_2 + f_3)\alpha + f_4\mu, & D\ddot{\nu} &= (f_4 - f_1)\beta + \frac{1}{2}(f_2 - f_3)\nu, \\ D\ddot{\beta} &= \frac{1}{2}(f_2 + f_3)\beta + f_4\alpha, & D\ddot{\mu} &= (f_4 - f_1)\alpha + \frac{1}{2}(f_2 - f_3)\mu. \end{aligned} \quad (14)$$

Правые части  $f_k$  преобразованных уравнений (11), (13) приведены в [10].

Изложенный подход позволяет описать тонкую структуру потока, включающую распределение компонент скорости и плотности тока в поперечном сечении.

## ОДНОСЛОЙНАЯ МНОГОПУЧКОВАЯ ЭЛЕКТРОННО-ОПТИЧЕСКАЯ СИСТЕМА

Проблемы, связанные с защитой катода от ионной бомбардировки, приводят к задаче об однослойной релятивистской многопучковой системе в сопровождающем внешнем магнитном поле. В отличие от релятивистского инжектора распределение потенциала в пучке является диодным, а крупнотруктурная сетка отсутствует. В качестве макропотока на этот раз выступает тонкий кольцевой слой.

Решение задачи включает следующие этапы: расчет магнитного поля соленоида или постоянных магнитов при использовании магнитных экранов, который должен обеспечивать существование магнитной силовой линии с нужной компрессией; синтез кольцевого макропотока с найденной силовой линией в качестве образующей базовой поверхности и с уже известным продольным магнитным полем на ней; расчет микропучек между микрокатодом и сечением начала взаимодействия; оценка эволюции взаимодействующих микроструй за этим сечением, которая осуществляется в поле макропотока и в заданном внешнем магнитном поле.

Положение сечения начала взаимодействия можно найти в ходе численного эксперимента. Для этого достаточно сравнить результаты интегрирования системы (14) при  $\rho_M = 0$  (выключенное взаимодействие) и  $\rho_M = \rho$  (максимальное взаимодействие). Сечение, в котором проводится сравнение, является сечением начала взаимодействия, если результаты двух упомянутых расчетов различаются, скажем, примерно на 1 %.

Расчет микропучек осуществляется по тем же алгоритмам, что в ранее рассмотренных электронно-оптических системах.

На рис. 6 приведен пример расчета магнитного поля соленоида магнитным экраном [12].

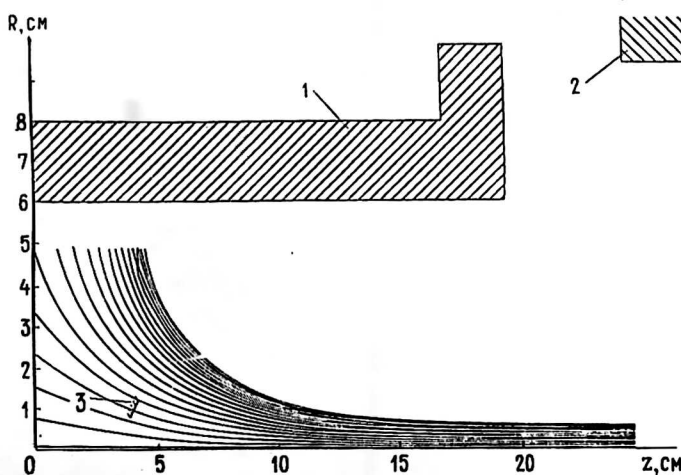


Рис. 6. Оптимизация магнитного поля соленоида при использовании магнитного экрана: 1 — экран; 2 — соленоид; 3 — положение катода

Рис. 7, а иллюстрирует результаты синтеза кольцевого пучка, берущего начало с термо катода [12], а рис. 8, а — макропучок с произвольными условиями инъекции [9]. В первом случае ток пучка составляет 3,5 А при анодном напряжении 20 кВ, во втором — 15 А и 30 кВ, соответственно. Расчеты проводились для нерелятивистских потоков, хотя алгоритмы построены для общего случая. Потенциал на оси задавался в [12] формулой типа (1) с модифицированной формой полинома  $P$ , в котором был добавлен член  $P_{10} l^{10/3}$  (рис. 7, б), в то время как в [9] использовалась сплайн-аппроксимация, сопрягавшаяся с функцией (1) для выполнения прикатодной асимптотики (рис. 8, б).

Идеальные синтезированные электроды макропучка должны быть модифицированы с тем, чтобы придать им технологические очертания. На рис. 9 приведен результат подобных действий. В конечном счете анод аппроксимирован отрезками вертикальной и горизонтальной прямых, сопряженных дугой окружности, а внутренний высоковольтный электрод полностью устранен. В формирующем электроде с потенциалом катода вблизи оси выполнено отверстие для вывода ионов.

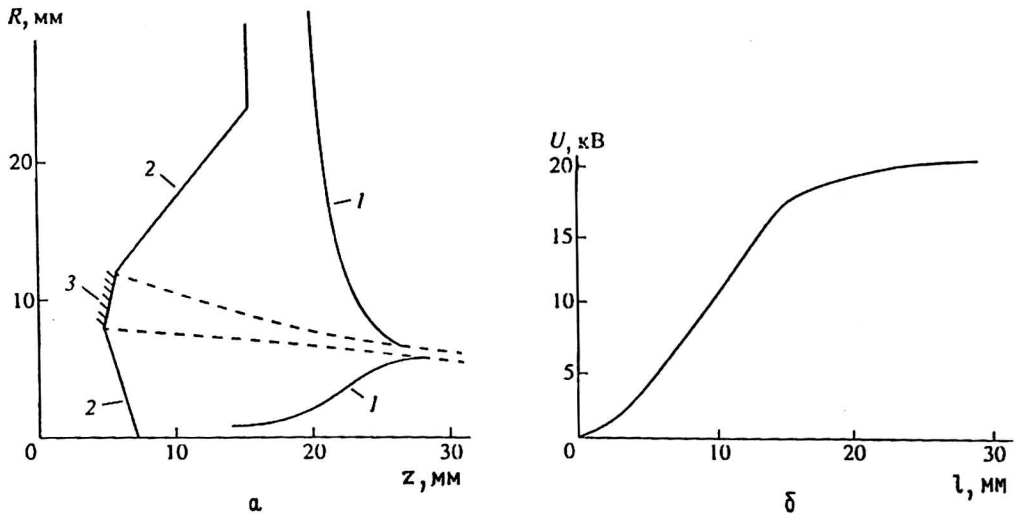


Рис. 7. Результаты синтеза кольцевого макропучка для однослойной многопучковой системы: а — конфигурация потока и формирующих электродов; старт с термокатода, ток — 3,5 А, анодное напряжение — 20 кВ; 1 — электроды с потенциалом анода; 2 — электроды с потенциалом катода; 3 — катод; б — распределение потенциала на базовой поверхности

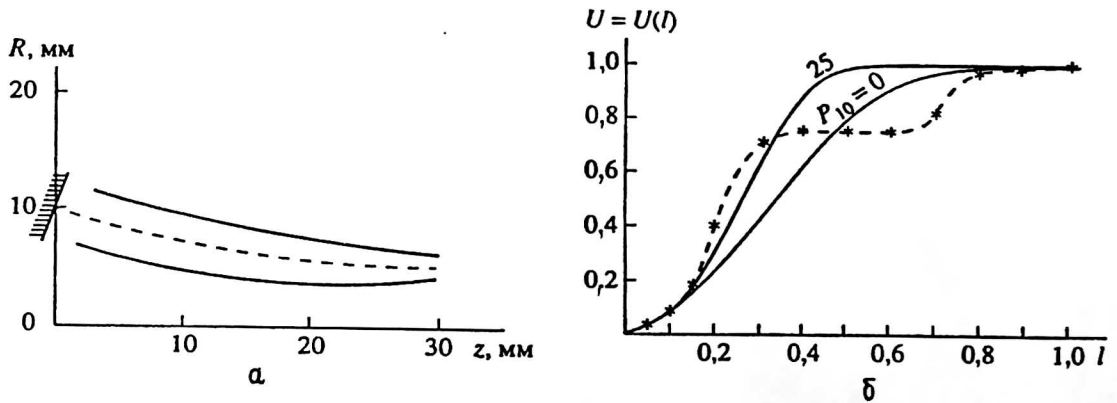


Рис. 8. Результаты синтеза кольцевого макропучка для однослойной многопучковой системы: а — конфигурация макропотока, произвольные условия инжекции, ток — 15 А, анодное напряжение — 30 кВ; б — распределение потенциала на базовой поверхности, получаемое сшивкой прикатодной асимптотики со сплайн-аппроксимацией (пунктир)

В качестве индикатора эффективности технологического варианта электродов использовался [12] пакет ЭРА для расчета электростатических пучков. Естественно ожидать, что поток, слабо отклоняющийся от траекторий идеальной синтезированной электронно-оптической системы в отсутствие магнитного поля, будет близок к соответствующему идеальному варианту и после включения поля соленоида. Результаты расчетов [12] приведены на рис. 10, 11 и обнаруживают соответствие траекторий в системе синтезированных и технологических электродов, удовлетворительное в рамках точности решения задачи в целом. Из рис. 11 видно, что ионный поток фокусируется к оси системы, которая тем самым является защищенной от ионной бомбардировки.

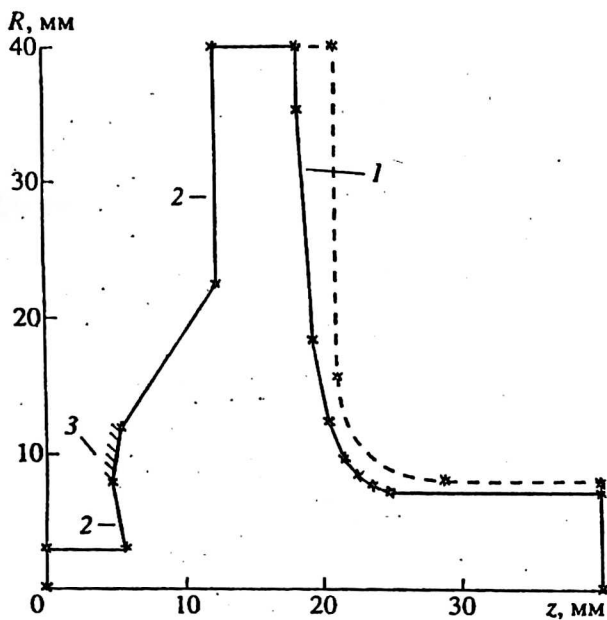


Рис. 9. Придание синтезированным электродам кольцевого макропотока конструктивных очертаний:

1 — электроды с потенциалом анода; 2 — электроды с потенциалом катода; 3 — катод; пунктир — модификация в целях повышения электрической прочности

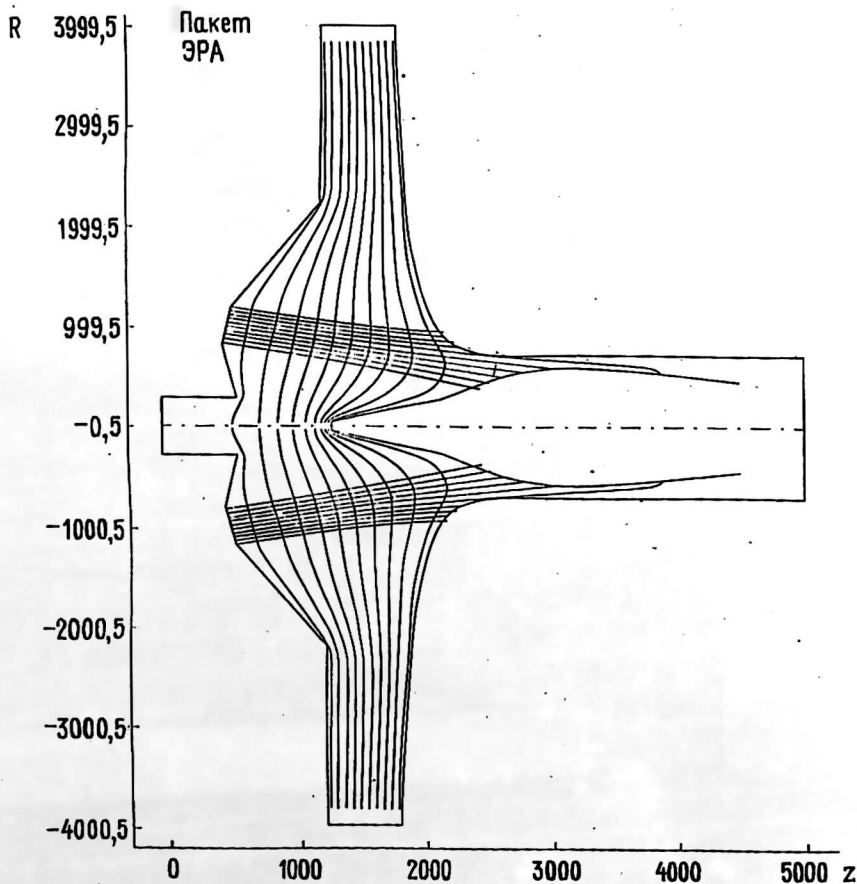


Рис. 10. Использование электростатического пакета ЭРА для оценки эффективности технологических электродов: конфигурация электронного потока для синтезированной электронно-оптической системы

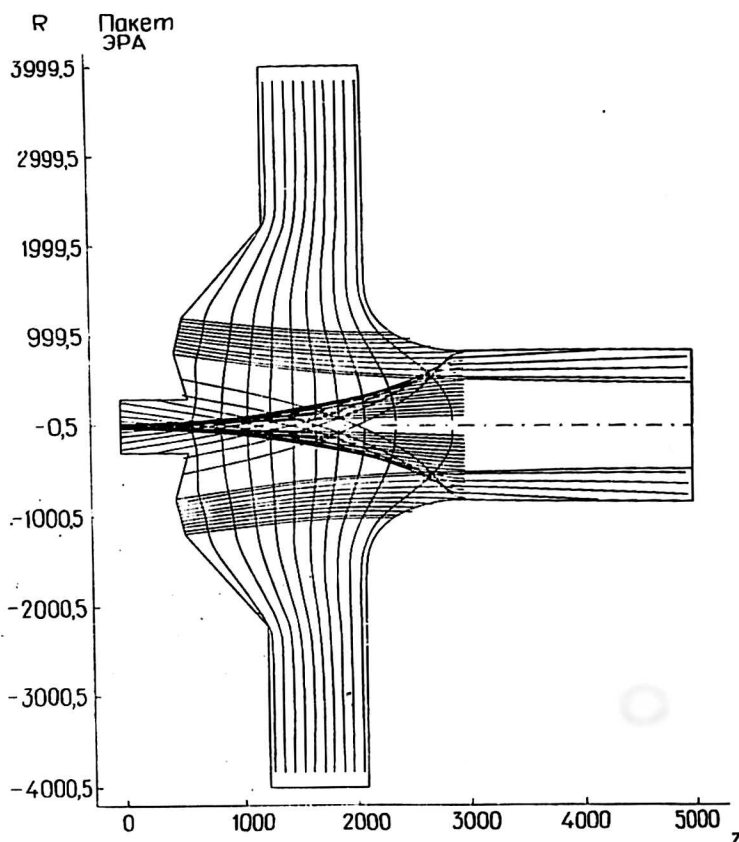


Рис. 11. Использование электростатического пакета ЭРА для оценки эффективности технологических электродов: конфигурация электронного и ионного потока для электронно-оптической системы с технологическими электродами

При достаточной компрессии нулевой формирующий электрод макропотока значительно удален от сечения начала взаимодействия, может оказаться неэффективным и должен быть заменен индивидуальной оптикой для каждого микропучка, подобной изображенной на рис. 2. В этом случае модификациям подвергаются прикатодные электроды микропучек и анод макропотока.

Эволюция микроструй между сечением начала взаимодействия и анодом рассчитывается на основании уравнений (14), содержащих в отличие от (9) внешнее магнитное поле, и имеет более сложный характер, чем в релятивистском инжекторе. Теперь деформация сечения сопровождается его поворотом на угол  $\vartheta$  относительно оси струи. Знание траекторных функций позволяет вычислить как значения полуосей  $a, b$  эллипса-сечения, так и угол поворота  $\vartheta$  [9]:

$$a = \frac{2D^2}{f + b + \delta}, \quad b = \frac{2D^2}{f + b - \delta}, \quad \vartheta = \frac{1}{2} \arctg \frac{2g}{f - b}, \quad (15)$$

$$f = \mu^2 + \nu^2, \quad g = -(\beta\nu + \alpha\mu), \quad b = \lambda^2 + \beta^2, \quad \delta^2 = (f - b)^2 + 4g^2.$$

Зависимости  $a, b, \vartheta$  от  $l$  для микропучка, соответствующего макропотоку рис. 8, а, приведены на рис. 12. Рис. 13 иллюстрирует картину потока в поперечных сечениях, нормальных образующей базовой трубки тока. Видно, что микропучки хорошо заполняют кольцевой слой, в котором работает модель макропотока, что позволяет говорить о завершенности решения задачи о расчете многопучковой системы с выбранными параметрами.

Рис. 12. Эволюция полуосей  $a, b$  эллиптического сечения микроструи и угла поворота сечения относительно оси микропучка  $\vartheta$  для однослойной многопучковой системы во внешнем магнитном поле

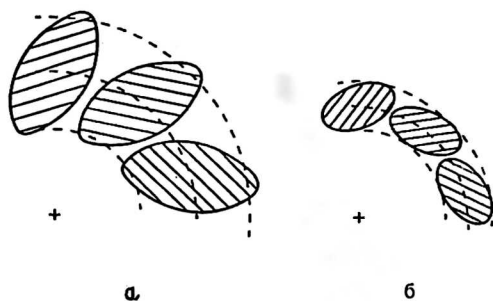
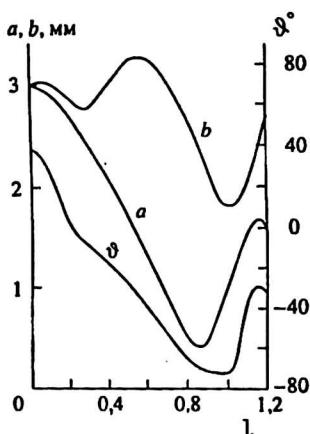


Рис. 13. Поперечные сечения однослойной многопучковой системы плоскостями  $\lambda = \text{const}$ : а -  $\lambda = 0,5$ ; б -  $\lambda = 1$

Знание траекторий функций дает возможность рассчитать и тонкую структуру потока [9], например, распределение радиальной и азимутальной компонент импульса (скорости — в нерелятивистском случае) в поперечном сечении относительно оси пучка  $(\dot{r}, \dot{\theta})$  или продольной оси системы  $(\dot{R}, R\dot{\psi})$ :

$$\begin{aligned} \dot{r} &= \dot{s} \cos \theta + \dot{q} \sin \theta, & r \dot{\theta} &= -s \sin \theta + \dot{q} \cos \theta, \\ \dot{R} &= \dot{x} \cos \psi + \dot{y} \sin \psi, & R\dot{\psi} &= -\dot{x} \sin \psi + \dot{y} \cos \psi, \\ \dot{s} &= \frac{1}{D} [(\dot{\alpha}v - \dot{\beta}\mu)s + (\dot{\beta}\alpha - \dot{\alpha}\beta)q], & & (16) \\ \dot{q} &= \frac{1}{D} [(\dot{\mu}v - \dot{\nu}\mu)s + (\dot{\nu}\alpha - \dot{\mu}\beta)q], \\ \dot{x} &= R'(1 - k_1 s) \tilde{V} + Z' \dot{s}, & \dot{y} &= \dot{q}. \end{aligned}$$

Приведенные выше результаты по поводу однослойных многопучковых систем относились к режиму магнитного сопровождения, для которого геометрия базовой поверхности макропотока и ось микропучка определяются магнитной силовой линией. Неидеальность модели взаимодействия, а также приближенная

реализация формирующих электродов могут приводить к появлению на базовой трубке тока нормальной компоненты магнитного поля. Кроме того, интересно исследовать общий случай, когда речь идет не о малых отклонениях, а о произвольной ориентации внешнего магнитного поля. Подобное рассмотрение реализовано в [10]. Задача описывает наиболее общую ситуацию, в которой может оказаться система взаимодействующих микропучков в осесимметричных внешних полях.

Появление нормальной компоненты магнитного поля приводит к тому, что ось микропучка перестает быть плоской кривой и превращается в пространственную спираль, навитую на осесимметричную базовую поверхность (рис. 14). "Плотность намотки" определяется соотношением продольной и азимутальной компонент скорости. Кольцевой слой теперь заполняется микропучками, которые трансформируются из круглых в эллиптические, меняют значения полюсов, дрейфуют по азимуту и проворачиваются относительно пространственной оси. Для кольцевого макропотока при этом необходимо использовать более сложную модель с учетом его закрученности, приводящей к появлению продольного собственного магнитного поля наряду с азимутальным [5, 10].

Существенно трехмерная система, однако, как и ранее, описывается обыкновенными дифференциальными уравнениями с гарантированной точностью, присущей параксиальной теории.

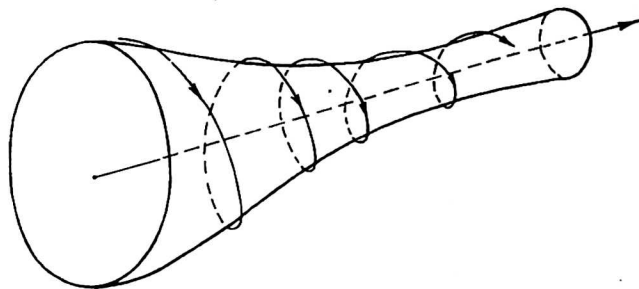


Рис. 14. Базовая поверхность вращения и навитая на нее пространственная спираль — ось микропучка в случае произвольной ориентации внешнего магнитного поля для многолучевых однослойных систем

### З а к л ю ч е н и е

В настоящее время разработаны эффективные алгоритмы расчета многоструктурных релятивистских электронно-оптических систем, основанные на модели макропотока, описывающей взаимодействие микроструй, и теории распространения микропучка в заданном внешнем магнитном поле и самосогласованном поле макропучка. Используемый математический аппарат, сводящийся к обыкновенным дифференциальным уравнениям асимптотической теории, дает возможность решать задачу оптимизации системы, используя такую удобную управляющую функцию, как потенциал на базовой поверхности, аппроксимируемый сплайнами.

Возможность проведения оптимизации и расчета тонкой структуры потока с гарантированной точностью выгодно отличает изложенный подход от трехмерных программ траекторного анализа, в котором не устранены методические недостатки, присущие двумерным пакетам [13, 14].

Модели однослойных многопучковых систем при введении азимутального магнитного поля подходят для описания периферических слоев многопучковой системы типа релятивистского инжектора во внешнем магнитном поле. Принятые для инжектора алгоритмы синтеза непараксиального макропотока допускают обобщение на этот случай. Синтез непараксиальных пучков может быть осуществлен на базе более современного подхода, основанного на использовании геометризованных уравнений пучка [15—18].

Учет частичной компенсации пространственного заряда пучка ионами на определенных участках электронно-оптических систем и канала транспортировки возможен в рамках феноменологической модели неподвижного неоднородного ионного фона [19].

Разработанные алгоритмы пригодны для расчета пространственных релятивистских пучков при отсутствии взаимодействия.

### Л и т е р а т у р а

1. Данилов В. Н., Дроздов С. С. // РЭ. 1977. Т. 22. № 8. С. 1706.
2. Данилов В. Н. // Журн. прикл. механики и техн. физики. 1968. № 5. С. 3.
3. Акимов П. И., Плохов В. В., Сыровой В. А., Федотов А. В., Шантурин Л. П. // Изв. вузов. Радиофизика. 1991. Т. 34. № 3. С. 309.
4. Плохов В. В., Сыровой В. А. // РЭ. 1990. Т. 35. № 12. С. 2582.
5. Сыровой В. А. // Изв. вузов. Радиофизика. 1990. Т. 33. № 12. С. 1391.
6. Сыровой В. А. // РЭ. 1991. Т. 36. № 3. С. 540.
7. Сыровой В. А. // Там же, 1992. Т. 37. № 9. С. 1692.
8. Сыровой В. А. // Там же, 1988. Т. 33. № 7. С. 1492.
9. Неганова Л. А., Плохов В. В., Сыровой В. А. // Там же, 1997. Т. 42. № 4.
10. Сыровой В. А. // Там же. № 6.
11. Сыровой В. А. // Там же, 1996. Т. 41. № 11. С. 1376.
12. Акимов П. И., Неганова Л. А., Осипова Г. П., Плохов В. В., Сыровой В. А. // РЭ. 1996. Т. 41. № 5. С. 619.
13. Акимов П. И., Осипова Г. П., Сыровой В. А. // Журн. вычисл. матем. и матем. физики. 1989. Т. 29. № 3. С. 405.
14. Свешников В. М., Сыровой В. А. // Журн. вычисл. матем. и матем. физики. 1990. Т. 30. № 11. С. 1675.
15. Сыровой В. А. // РЭ. 1996. Т. 41. № 10.
16. Сыровой В. А. // Там же. Т. 42. № 2.
17. Сыровой В. А. // Там же. № 3.
18. Сыровой В. А. // Там же. В печати, 1997.
19. Неганова Л. А., Сыровой В. А. // РЭ. 1992. Т. 34. № 12. С. 2275.

## THEORY OF MULTI-BEAM ELECTRON-OPTICAL SYSTEM

V. A. Syrovoy

RSPC. All-Russia Electrotechnical Institute, Moscow, Russia

*The survey of calculational methods for multi-beam systems with interacting microbeams is presented. This survey includes the theory of non-relativistic system with large-structure ruling grid; the theory of electrostatic relativistic injector with triode-type potential distribution at the axis; the theory of one-layer multi-beam relativistic systems in external magnetic field with arbitrary orientation.*