



## **ЭВОЛЮЦИЯ ПРОТЯЖЕННЫХ ЭЛЕКТРОННЫХ ПОТОКОВ, ФОКУСИРУЕМЫХ АКСИАЛЬНО-СИММЕТРИЧНЫМИ МАГНИТНЫМИ ПОЛЯМИ**

*В.Д. Журавлева, С.П. Морев, В.В. Пензяков, В.И. Роговин*

Рассмотрены протяженные электронные потоки, фокусируемые однородным или периодическим магнитным полем в пролетных каналах, при начальном значении радиуса пучка существенно отличающегося от равновесного. Показано, что при учете нелинейных эффектов, обусловленных пространственным зарядом или магнитным полем, многоскоростному электронному потоку присуща самоорганизация, при которой колебания как отдельных частиц пучка, так и огибающих с различным процентным содержанием тока пучка проявляют свойства, подпадающие под определения хаотических колебаний. Обсуждаются вопросы, связанные с получением компактных в радиальном направлении электронных потоков.

### **Введение**

Учет нелинейных эффектов при фокусировке протяженных электронных пучков аксиально-симметричными магнитными полями приводит, даже при использовании простейших моделей, описывающих поведение электронного пучка в магнитном поле, к обнаружению сложных видов колебаний (см., например, [1]).

Достаточно хорошо изучена транспортировка неламинарных (многоскоростных) электронных пучков с отличным от нуля фазовым объемом при малых отклонениях параметров таких пучков от равновесных [2,3].

Постановка работ, связанных с получением предельно достижимых параметров пучков в сочетании с противоречащими друг другу требованиями, предъявляемыми к системам, формирующим такие пучки (например, высокая компрессия пучка по площади и малые величины ускоряющих напряжений), вызывает интерес к исследованию транспортировки многоскоростного пучка в магнитном поле при воздействии существенно нелинейных электрических и магнитных полей.

Наименее изученной к настоящему времени является пространственная эволюция многоскоростного пучка в аксиально-симметричном магнитном поле при значительном начальном отклонении параметров пучка от равновесных.

Рассмотрение этих вопросов и составляет предмет предлагаемой работы.

### **1. Постановка задачи**

Многоскоростной электронный пучок рассматривается как ансамбль взаимодействующих через поле пространственного заряда нелинейных

осцилляторов. Для расчетов используется квазигидродинамическая модель, в рамках которой пучок разбивается на дискретные кольцевые слои [4]. Модель допускает пересечение отдельных слоев, позволяя учесть тем самым эффект неламинарности. Система дифференциальных уравнений, описывающих движение центров слоев  $R$  по длине пролетного канала  $z$  имеет следующий вид [5-6]:

$$R''_n = \frac{E(R)}{\dot{Z}_n^2} + R_n(\theta'_n)^2 - \frac{\eta_0^* R_n \theta'_n B_z(R, z)}{\dot{Z}_n} - \frac{\eta_0^* \theta'_n R_n R'_n B_r(R, z)}{\dot{Z}_n}, \quad (1)$$

где

$$\theta'_n = \left( \frac{\eta_0^* B_z(R, z)}{2} - \frac{C}{R_n^2} \right) \cdot \frac{1}{\dot{Z}_n}, \quad n = 1, 2, \dots, N,$$

$$\dot{Z}_n = \left[ \frac{2}{1 + (R'_n)^2 + (R_n \theta''_n)^2} \right]^{1/2}, \quad \theta''_n = 1/2^{1/2} \left( \frac{\eta_0^* B_z(R, z)}{2} - \frac{C}{R_n^2} \right),$$

$$\eta_0^* = \eta_0 B_a^2 R_{\text{кан}}^2 / 8 U_0.$$

$B_z, B_r$  - продольная и радиальная компоненты индукции магнитного поля;  $\eta_0$  - отношение заряда к его массе;  $B_a$  - амплитуда индукции магнитного поля;  $U_0$  - ускоряющее напряжение;  $C$  - параметр, пропорциональный величине магнитного поля на катоде;  $E(R)$  - поле, создаваемое пространственным зарядом;  $R_{\text{кан}}$  - радиус пролетного канала. Штрихи обозначают дифференцирование по продольной координате  $Z$ .

Начальные данные для решения системы уравнений (1) могут задаваться либо табличным способом, либо по формулам

$$R_n = p (R_{\text{max}}/P), \quad p = 1, 2, \dots, P,$$

$$R'_n = \gamma_1 R_n + \gamma_2 R_n^3 + l \Delta R', \quad l = 0, \pm 1, \pm 2, \dots, \pm L, \quad N = P(2L+1). \quad (2)$$

Токи каждого слоя определяются соотношением

$$\Delta I_n = \frac{(2p-1) \exp(-\alpha_1 p^2 - \alpha_2 l^2 - \alpha_3 p^2 l^2)}{\sum_{p,l} (2p-1) \exp(-\alpha_1 p^2 - \alpha_2 l^2 - \alpha_3 p^2 l^2)} \quad (3)$$

Коэффициенты  $\gamma_1, \gamma_2, \Delta R'$  позволяют имитировать начальные нелинейность и разброс поперечных скоростей электронов, а  $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$  начальное распределение плотности тока в поперечном сечении пучка.

В рамках данной статьи рассматриваются пучки, сформированные с магнитоизолированного катода, в пренебрежении азимутальным разбросом скоростей. Поле, создаваемое пространственным зарядом, определяется по теореме Гаусса. Алгоритм вычисления поля пространственного заряда и меры, связанные с уменьшением «машинных шумов» подробно изложены в [6].

Для анализа характера колебаний для каждой реализации вычислялись фазовые портреты и радиальные значения огибающих тока пучка, содержащие заданный процент общего тока. Кроме этого вычислялись распределение плотности тока в поперечном сечении пучка, а также первый и второй моменты функции распределения ансамбля осцилляторов: средние углы наклона пучка по радиусу

$$\overline{R'} = \sum \Delta I R'_n / \sum \Delta I \quad (4)$$

и распределение «температуры» пучка по радиусу

$$\overline{R'^2} = \sum \Delta I (R'_n - \overline{R'})^2 / \sum \Delta I. \quad (5)$$

## 2. Результаты расчетов

Численное моделирование транспортировки электронного пучка в пролетном канале проводилось для прямоугольного и колоколообразного распределения плотности тока по радиусу пучка как при наличии разброса электронов по углам наклона, так и в отсутствие разброса. Нелинейность электрических или магнитных полей в области электронной пушки имитировалась заданием на входе в рассматриваемую область нелинейного распределения углов наклона электронов в зависимости от их радиуса. Зависимость  $R'(R)$ , представленная на рис. 1, характерна, например, для пучка, прошедшего через окно сеточной структуры или через анодное отверстие пушки.

В ходе проведения расчетов были выявлены следующие закономерности.

**а. Динамика неламинарного пучка с нулевым фазовым объемом в однородном магнитном поле.** В ходе эволюции неламинарный пучок с нулевым фазовым объемом занимает на фазовой плоскости конечную область со сложной структурой вне зависимости от уровня фокусирующего магнитного поля. Сильная нелинейность в начальном распределении углов наклона различных слоев пучка (рис. 1) или в начальном распределении плотности тока в поперечном сечении пучка (рис. 2, а) приводит к достаточно быстрому образованию ненулевого эффективного фазового объема пучка - «остова» пучка, в котором сосредоточена существенная (более 80%) часть тока пучка, и «спиралеобразных хвостов», вращающихся около центральной части пучка - «ореол» пучка. После образования центральной части фазового объема, колебания «остова» пучка могут быть хорошо описаны с помощью уравнения для огибающей многоскоростного пучка с ненулевым фазовым объемом [3], содержащего всего одно дополнительное по сравнению с ламинарной теорией фокусировки пучка слагаемое, пропорциональное фазовому объему пучка.

Колебания периферийной части пучка не оказывают существенного влияния на остов, а спиральные хвосты постепенно рассеиваются. Характерно преобразование плотности тока в поперечном сечении пучка к колоколообразному распределению с пьедесталом (рис. 2, б), часто наблюдаемое в ЭОС, в которых пушки имеют сеточную структуру.

При достаточно высоком уровне магнитного поля ( $B = 2.02$  Вб) удастся получить пучок, размеры которого не нарастают ни в пространстве координат, ни в фазовом пространстве (рис. 3), на длинах расчета характерных для современных приборов О - типа.

Из рис. 3 кроме этого следует, что на начальной стадии эволюции пучка происходит его быстрая перестройка, при которой радиус границы пучка за несколько колебаний нарастает до равновесного значения. Характер такого нарастания не может быть получен с помощью расчетов, использующих модель граничного электрона [1].

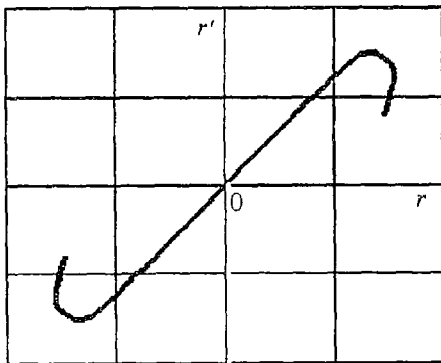


Рис. 1. Распределение углов наклона в электронном пучке на выходе из электронной пушки

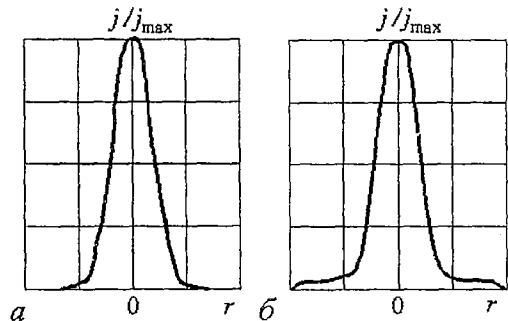


Рис. 2. Распределение плотности тока в поперечном сечении пучка: а -  $Z=0$ ; б -  $Z=Z_{\text{кон}}$

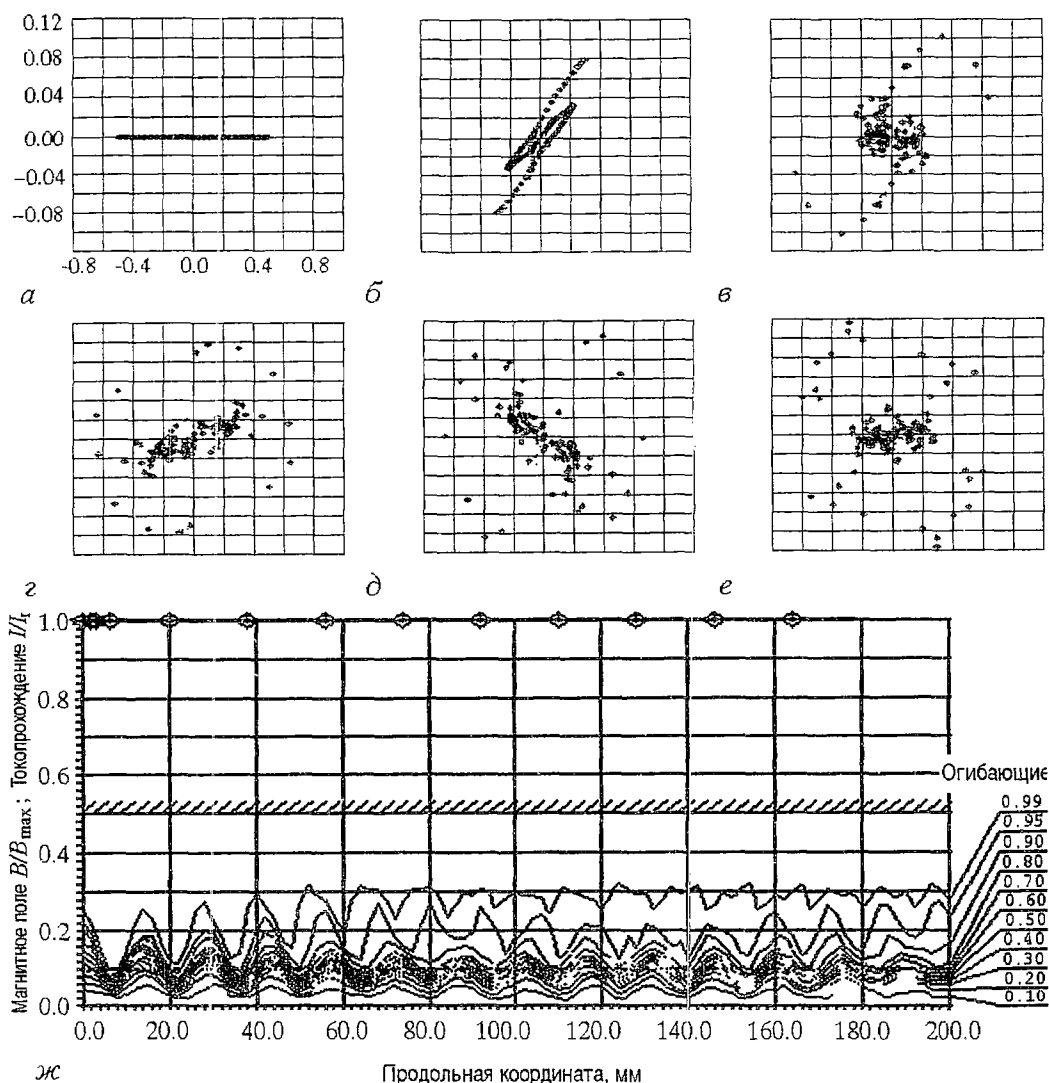


Рис. 3. Эволюция фазового портрета и расчет огибающих неламнарного пучка с начальным фазовым объемом равным 0 при фокусировке однородным магнитным полем: а -  $Z = 0$ ; б -  $Z = 10$ ; в -  $Z = 50$ ; г -  $Z = 100$ ; д -  $Z = 150$ ; е -  $Z = 200$ , а-е - представление в координатах  $(r, r)$ ; ж - в координатах  $(r, z)$ ;  $p = 50$ ;  $L = 0$ ;  $R_{max} = 0,5$ ;  $\gamma_1 = \gamma_2 = 0$ ;  $\alpha_1 = 0,00127$ ;  $\alpha_2 = 0$ ;  $\alpha_3 = 0$  (изображения дополнены симметричным образом для  $R < 0$ ); ток пучка - 200,0 мА, потенциал - 10000 В, магнитное поле ( $B_{max}$ ) - 2000 Гс, микропервекс - 0,2000, диаметр канала - 1,50 мм, токопорождение - 1,000

**б. Динамика неламнарного пучка с нулевым фазовым объемом в МПФС.** Эволюция неламнарного электронного пучка с нулевым фазовым объемом в МПФС происходит по сценарию, представленному в предыдущем разделе за исключением случаев фокусировки пучка при параметрах магнитного поля  $\alpha$ , попадающих в зону неустойчивости Матъе. При  $\alpha > 0,67$  пучок интенсивно оседает на стенки пролетного канала, так что по прошествии двух периодов МПФС остается менее 50% тока пучка. В дальнейшем происходит практически полное выбывание электронов пучка (рис. 4).

**в. Динамика пучка с ненулевым фазовым объемом в однородном магнитном поле.** Эволюция многоскоростного пучка в однородном магнитном поле существенно отличается от эволюции неламнарного пучка с нулевым фазовым объемом. Наиболее характерной чертой является образование на фазовой плоскости устойчивой спиральной структуры (рис. 5).

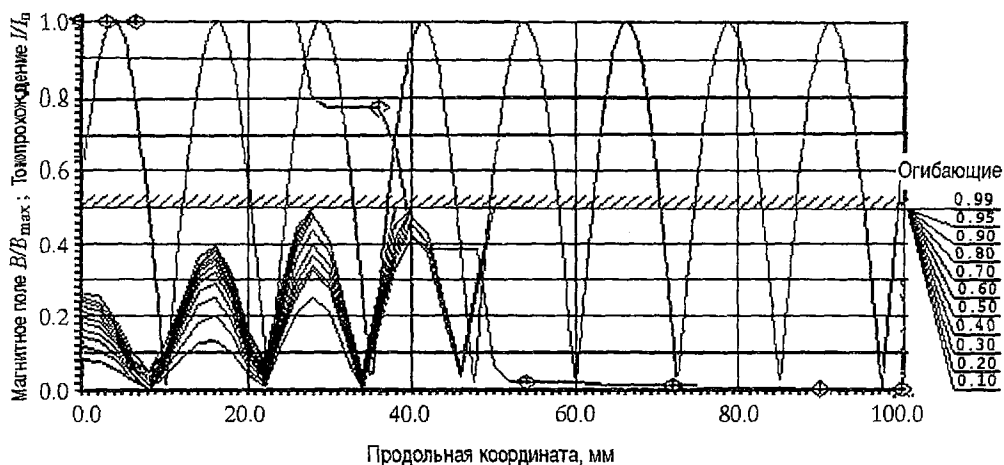


Рис. 4. Расчет огибающих неламнарного пучка в МПФС, ток пучка - 200.0 мА, потенциал - 10000 В, магнитное поле ( $B_{\max}$ ) - 2121 Гс, микропервеанс - 0.2000, диаметр канала - 1.50 мм, токопрохождение - 0.000

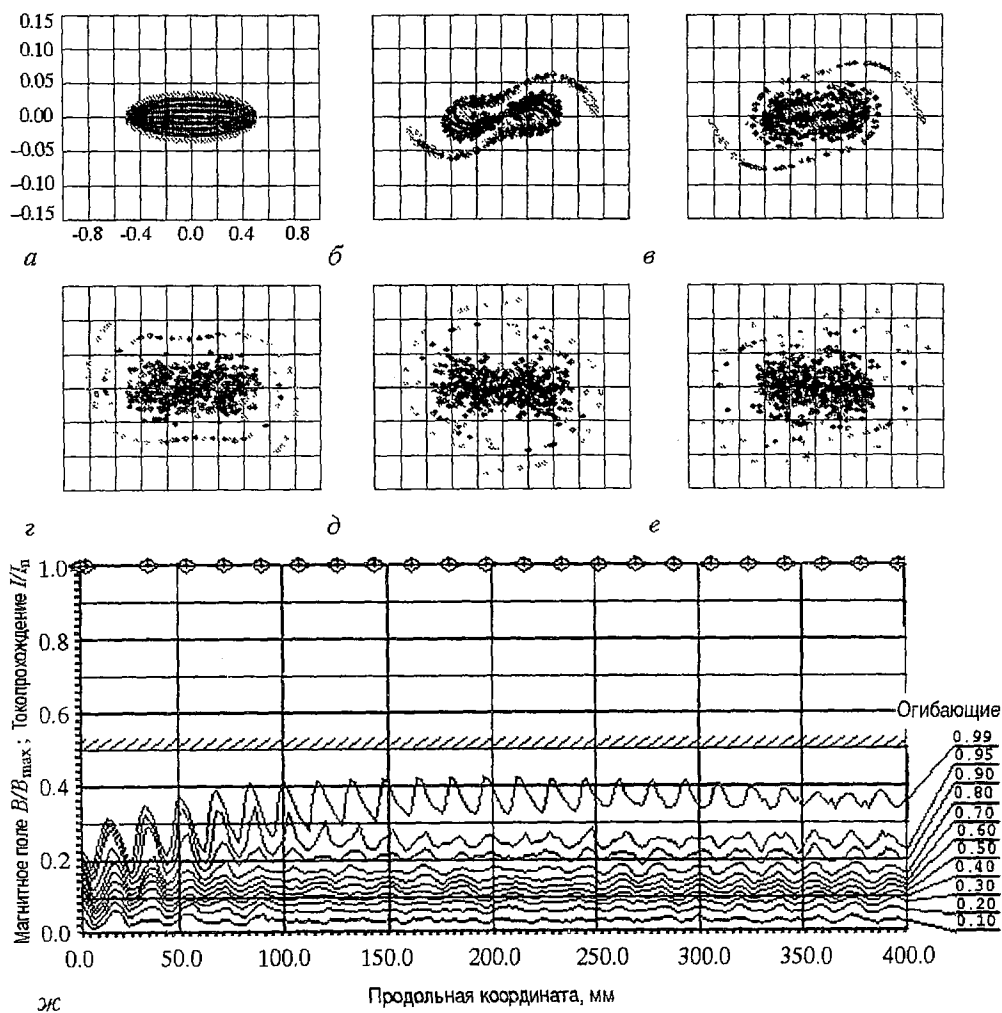


Рис. 5. Эволюция фазового портрета и расчет огибающих электронного пучка с ненулевым фазовым объемом в однородном магнитном поле: а -  $Z = 0$ ; б -  $Z = 50$ ; в -  $Z = 100$ ; г -  $Z = 200$ ; д -  $Z = 300$ ; е -  $Z = 400$ ; а - е - представление в координатах  $(r', r)$  ж - в координатах  $(r, z)$   $P = 29$ ;  $L = 4$ ;  $R_{\max} = 0.5$ ;  $\gamma_1 = \gamma_2 = 0$ ;  $\Delta R' = 0.00875$ ;  $\alpha_1 = 0.00127$ ;  $\alpha_2 = 0$ ;  $\alpha_3 = 0$ ; ток пучка - 200.0 мА, потенциал - 10000 В, магнитное поле ( $B_{\max}$ ) - 1500 Гс, микропервеанс - 0.2000, диаметр канала - 1.50 мм, токопрохождение - 1.000

Центральная часть пучка оказывает как бы стабилизирующее действие на ветви спиральной структуры. Спиральная структура является долгоживущей, хотя внутри нее наблюдаются быстрые изменения фазовой плотности. Отдельные частицы пучка, в частности, граничные частицы эффективного фазового объема могут уходить внутрь его, и наоборот, внутренние частицы могут выходить в спиральные хвосты. После нескольких колебаний система релаксирует к равновесному состоянию, при котором центральная часть фазового объема становится малоподвижной. Чем ближе исходное состояние пучка к равновесному, тем в меньшей степени развивается спиральная структура на фазовой плоскости.

**2. Динамика многоскоростного пучка в МПФС.** Эволюция многоскоростного пучка в МПФС происходит по сценарию, описанному в п. 6 с особенностями, вызываемыми наличием зон неустойчивости. Введение нелинейной радиальной зависимости магнитного поля, приводит к увеличению его фокусирующего действия и, как следствие этого, к уменьшению средних значений огибающих пучка.

### 3. Обсуждение результатов расчетов

В ходе расчетов были проанализированы также эволюции первого и второго моментов функции распределения частиц пучка. Оказалось, что средние углы наклона в пучке с увеличением длины пролетного канала постепенно уменьшаются, а распределение «температуры» в пучке стремится к постоянной величине. Распределение плотности тока в поперечном сечении пучка стремится к колоколообразному при различных начальных распределениях.

В работе [7], в которой многоскоростной электронный пучок рассматривался как непрерывная среда, была получена система уравнений для моментов функции распределения в ортогональной криволинейной системе координат, имеющая в рассматриваемом случае следующий вид

$$\begin{aligned} \partial(\rho v_z)/\partial z &= 0, & \partial(v_z^2 + v_\theta^2 - 2\eta\phi)/\partial z &= 0, \\ \partial(v_\theta - \eta\hat{A})/\partial z &= 0, & \partial T_{rr}/\partial z &= 0, & \partial T_{\theta\theta}/\partial z &= 0, \\ \partial(\rho r T_{rr})/\partial r - \rho(T_{\theta\theta} + v_\theta^2) &= \eta\rho v_\theta \partial(r\hat{A})/\partial r + \eta\rho r \partial\phi/\partial r, \end{aligned} \quad (6)$$

где  $\rho$  - плотность пространственного заряда,  $v_z$ ,  $v_r$ ,  $T_{rr}$ ,  $T_{\theta\theta}$  - компоненты средних скоростей и «температуры» в соответствующих направлениях,  $\hat{A}$  - единственная, отличная от нуля компонента векторного магнитного потенциала,  $\phi$  - потенциал, создаваемый пространственным зарядом,  $\eta = e/m$  - удельный заряд электрона.

При допущении условий  $T_{rr} = T_{\theta\theta} = T(r)$  из системы уравнений для плотности пространственного заряда следует выражение

$$\rho = \rho(0)T(0)/T(r)\exp(-\int 1/T(r) \partial(v_\theta^2/2 + \eta\phi)/\partial r dr), \quad (7)$$

которое при  $T = \text{const}$  вводится как априорное в статистической теории Пирса - Уолкера [8].

Таким образом, решение детерминированной системы (1) проявляет свойства, характерные для равновесного состояния многоскоростного пучка, полученные с помощью статистического подхода.

При задании начальных значений параметров крупных частиц (2) - (3) близкими к равновесным значениям (7) формируется пучок, в котором любая крупная частица колеблется с большими пульсациями, а любая огибающая имеет малые пульсации. Пучок имеет компактную в радиальном направлении структуру (рис. 6).

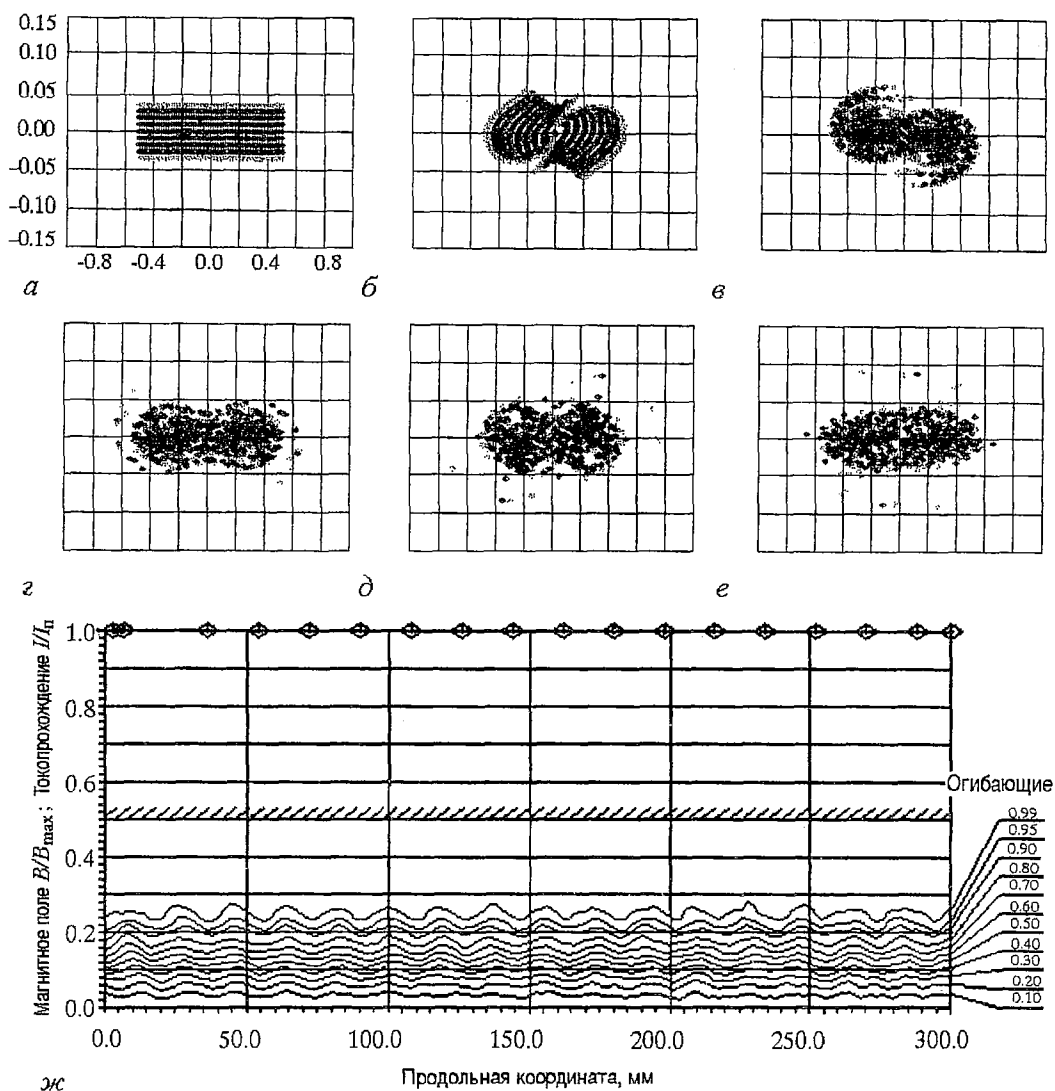


Рис. 6. Расчет многоскоростного пучка с параметрами близкими к равновесным  $P = 29$ ;  $L = 4$ ;  $R_{max} = 0.5$ ;  $\gamma_1 = \gamma_2 = 0$ ;  $\Delta R' = 0.008$ ;  $\alpha_1 = 0.0051$ ;  $\alpha_2 = 0$ ;  $\alpha_3 = 0$ ; ток пучка - 200.0 мА, потенциал - 10000 В, магнитное поле ( $B_{max}$ ) - 1500 Гс, микропервеканс - 0.2000, диаметр канала- 1.50 мм, токопрохождение - 1.000

## Библиографический список

1. Афанасьева В.В., Лазерсон А.Г. Пространственный хаос и подавление параметрической неустойчивости в системе «электронный пучок - периодическое магнитное поле» // Письма в ЖТФ. 1994. Т. 20, вып.12. С.19.
2. Капчинский И.М. Динамика частиц в линейных резонансных ускорителях. М.: Атомиздат, 1966. С. 400.
3. Морев С.П., Пензяков В.В. Методы расчета электронных пучков с ненулевым фазовым объемом: Обзоры по электронной технике. Сер. Электроника СВЧ. М.: ЦНИИ «Электроника», 1984. Вып.2(1000). 43 С.
4. Молоковский С.И., Сушков А.Д. Интенсивные электронные и ионные пучки. Л.: Ленинградское отд. «Энергия», 1972. С. 272.
5. Калинин Ю.А., Пензяков В.В. Фокусировка неламинарных электронных пучков магнитными полями. // Вопросы радиоэлектроники. Сер. Электроника. 1965. Вып.7. С. 30.

6. Журавлева В.Д., Морев С.П., Пензяков В.В., Роговин В.И. Моделирование многоскоростного электронного пучка в области пролетного канала ЭОС // Электронная техника. Сер.1.Электроника СВЧ. 1989. Вып.7. С. 39.

7. Морев С.П., Пензяков В.В. Расчет многоскоростных пучков: Деп. рук. № 6687/79. Реф. опубл. в МРС ВИМИ «Техника, технология, экономика». Сер. «ЭР». 1979. № 25.

8. Amboss K. The Analysis of Dense Electron Beams Advances in Electronics and Electron Physics. N.-Y.-London, 1969. Vol.26.

ГНПП «Алмаз»

Поступила в редакцию 27.12.94  
после переработки 31.01.95

## ELECTRON BEAM EVOLUTION IN HIGH-FREQUENCY ELECTRONIC VACUUM DEVICES

*W.D. Zhurawleva, S.P. Morev, V.V. Penzyakov, W.I. Rogovin*

Properties of electron beam, focusing by uniform or periodic magnetic fields, are investigated in the case when initial state of beam is quite different from equilibrium. It is shown, that nonlinear space charge field provides conditions for beam's selforganisation in spite of chaotic oscillations of individual electrons. Requirements to electron-optical systems, forming nonlaminar beams with abrupt borders are discussed.



*Журавлева Валентина Даниловна* - родилась в 1946 году. Окончила механико-математический факультет Самаркандского госуниверситета (1968). Область деятельности - разработка программного обеспечения основных функциональных узлов вакуумных приборов СВЧ. Имеет свыше 30 публикаций.



*Морев Сергей Павлович* - родился в 1952 году в г. Свободный Амурской области. Окончил физический факультет Саратовского госуниверситета (1974). Специалист по разработке математических моделей и методов проектирования электронно-оптических систем вакуумных приборов СВЧ О-типа. Автор и соавтор более 60 публикаций по различным аспектам проблем формирования и транспортировки многоскоростных электронных пучков в ЭОС.





*Пензяков Владислав Владимирович* - родился в 1937 году в Саратове. Окончил физический факультет Саратовского госуниверситета (1959). Защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук (1971). Начальник лаборатории в теоретическом отделе ГНПП «Алмаз». Специалист по разработке математического моделирования вакуумных и твердотельных приборов СВЧ. Автор и соавтор более 100 научных статей по указанным направлениям



*Роговин Владимир Игоревич* - родился в 1948 году в городе Фрязино Московской области. Окончил Саратовский госуниверситет (1971). Защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук (1981). С 1980 года начальник лаборатории САПР в теоретическом отделе ГНПП «Алмаз». Область научных интересов - исследование физических процессов в системах электронный пучок - электромагнитная волна применительно к ЭВП СВЧ О - типа. Автор более 70 публикаций.