

ФОРМИРОВАНИЕ И НЕЛИНЕЙНАЯ ДИНАМИКА СЖАТОГО СОСТОЯНИЯ ВИНТОВОГО ЭЛЕКТРОННОГО ПУЧКА С ДОПОЛНИТЕЛЬНЫМ ТОРМОЖЕНИЕМ

© 2013 г. Е. Н. Егоров*, А.А. Короновский*, **, С. А. Куркин*, А. Е. Храмов*, **

* Саратовский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского, Россия

** Саратовский государственный технический университет им. Ю.А. Гагарина, Россия

e-mail: evgeniy.n.egorov@gmail.com

Поступила в редакцию 09.03.2013 г.

Окончательный вариант получен 19.06.2013 г.

Представлены результаты численного моделирования и анализа формирования и нелинейной динамики сжатого состояния в винтовом электронном потоке в виркаторе с источником электронов в виде магнетронно-инжекторной пушки и с дополнительным торможением электронов. Выявлены области управляющих параметров, где реализуется сжатое состояние в такой системе, а также проанализированы особенности динамики исследуемой системы. Показано, что возникновение сжатого состояния в винтовом нерелятивистском электронном потоке в системе с торможением сопровождается возникновением низкочастотной продольной динамики пространственного заряда.

DOI: 10.7868/S0367292113110048

1. ВВЕДЕНИЕ

Важная задача современной вакуумной и плазменной электроники – исследование образования и нелинейной динамики виртуального катода (ВК) в интенсивных электронных потоках (см., например, монографии [1–3], обзоры [4–7], а также литературу к ним). Интерес к этой задаче обусловлен как фундаментальной важностью исследований сложного поведения распределенных пучково-плазменных и электронно-волновых систем, так и прикладным значением, связанным с разработкой мощных источников электромагнитного излучения на ВК-виркаторов и их различных модификаций [3, 8–11].

Одно из перспективных и активно развиваемых направлений – изучение *сжатых состояний пучков* (ССП) [7, 12–15], в частности, в работах [16, 17] авторы обосновывают применение СПП для коллективного ускорения ионов. Сжатое состояние пучка или, как его еще называют, распределенный виртуальный катод, характеризуется высокой плотностью и малой кинетической энергией электронов потока в некоторой области пространства взаимодействия [12]. В мощных системах пучково-плазменной электроники, содержащих релятивистские электронные пучки, для реализации СПП используют составное пространство дрейфа из труб разного радиуса, так что в первой трубе дрейфа, с меньшим радиусом, ток пучка ниже критического тока возникновения ВК, а в другой, с большим радиусом, – выше. Вся система помещается в сильное продольное маг-

нитное поле, так что движение пучка оказывается близким к одномерному. Нестационарный ВК формируется на входе во вторую трубу дрейфа большего радиуса, в результате в первой трубе с меньшим радиусом, где ток пучка ниже предельного вакуумного тока [7, 13], устанавливается двухпотокное состояние пучка, а затем образуется СПП. Область СПП является распределенным в пространстве дрейфа ВК и характеризуется сложной собственной динамикой частиц потока, а также разнообразными сценариями его установления [7, 18]. Важно заметить, что для формирования СПП необходима протяженная область пространства взаимодействия, в которой ток пучка оказывается ниже критического значения, чтобы ВК формировался на выходе из этой протяженной секции дрейфа электронного пучка виркатора.

Следует добавить, что формирование ВК на выходе из протяженной секции возможно достичь как путем скачка диаметра пролетного канала [7], так и с помощью дополнительного торможения пучка. В связи с этим отметим, что ранее была предложена и экспериментально реализована модификация виркатора, в которой нестационарный ВК формируется в интенсивном (с высоким первеансом) нерелятивистском электронном потоке за счет дополнительного торможения электронов [19–21]. В данном приборе, называемом также генератором с электронной обратной связью [11, 22, 23], за счет дополнительного торможения электронов существует возможность

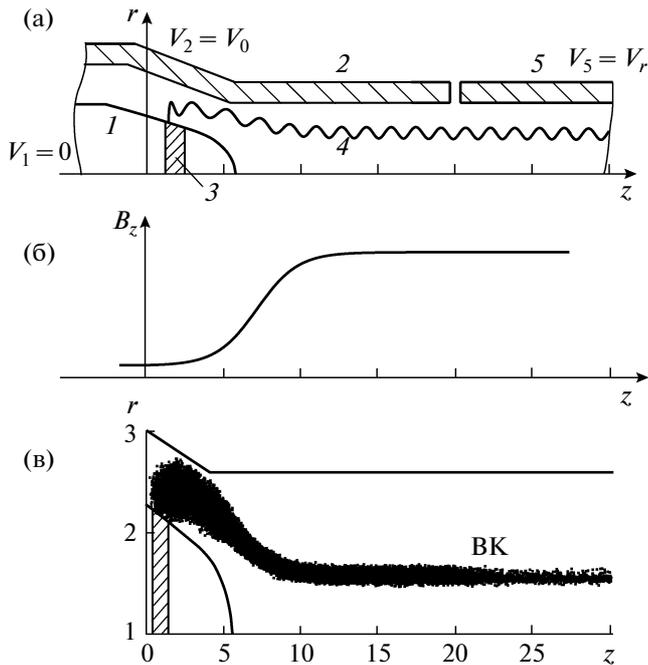


Рис. 1. Схема магнетронно-инжекторной пушки: 1 – катод, 2 – ускоряющий электрод, 3 – эмитирующий пояс, 4 – электронный поток, 5 – тормозящий электрод (а). Предполагается, что катод заземлен $V_1 = 0$, ускоряющее напряжение подается на электрод 2: $V_2 = V_0$, на тормозящий электрод подается напряжение $V_5 = V_r < V_2$. Распределение продольной составляющей магнитного поля B_z в пространстве дрейфа (б). Характерная конфигурация винтового электронного пучка в режиме образования виртуального катода (в).

снизить стартовый ток, необходимый для формирования нестационарного колеблющегося ВК. Ввиду сходства процессов образования и колебаний ВК в системе без торможения и с торможением можно ожидать, что в последней также возможно установление ССП. Более того, можно предположить, что использование дополнительного торможения пучка для формирования ССП может быть более эффективным, так как позволит за счет изменения тормозящей разности потенциалов дополнительно управлять динамикой системы. Цель данной работы – детальное исследование возможности и особенностей процесса возникновения режима ССП в винтовом нерелятивистском электронном потоке с дополнительным торможением пучка.

2. ИССЛЕДУЕМАЯ МОДЕЛЬ

Исследование формирования сжатого состояния пучка за счет дополнительного торможения электронов проводилось на примере низковольтного виркатора с источником электронов в виде

магнетронно-инжекторной пушки (МИП) [24, 25]. Выбор системы с МИП определен тем, что для формирования ССП необходимо сильное внешнее продольное магнитное поле, которое препятствует поперечному движению электронов пучка в сжатом состоянии и расширению пучка за счет сил пространственного заряда, что автоматически реализуется в электронно-оптической системе МИП. Кроме того, электронный пучок, формируемый МИП, обладает высоким первенством, что делает МИП эффективным источником электронов для низковольтных виркаторов [19, 22, 26–28].

Схематическое изображение МИП приведено на рис. 1а. Система исследуется в предположении аксиальной симметрии, на рис. 1а приведено сечение рассматриваемой системы плоскостью (r, z) . В исследуемой схеме катод (обозначен цифрой 1) и ускоряющий электрод (анод, обозначен цифрой 2) выполнены в виде соосных, конусообразных электродов, вставленных один в другой. На катоде имеется эмитирующий пояс 3. Эмитирующий пояс является источником электронов для винтового электронного потока 4.

Для реализации дополнительного торможения электронного потока рассматривалось двухсекционное пространство дрейфа, как показано на рис. 1а. Первая часть трубы (электрод 2) выполняет роль ускоряющего электрода МИП, а также эквипотенциального пространства дрейфа пучка при удалении от катода. Вблизи катода в области сильно неоднородного магнитного поля и ускоряющего поля, определяемого электродом 2 с напряжением V_0 , происходит формирование винтового электронного потока. На вторую часть трубы дрейфа (электрод на рис. 1а) подается тормозящий потенциал $V_5 = V_r$, меньший потенциала анода $V_5 < V_2$. Этот электрод будет выполнять роль тормозящего электрода. Пространство пушки от катода до тормозящего электрода – пространством взаимодействия рассматриваемого виркатора.

Математическая модель для описания формирования пучка с помощью МИП и динамики пространственного заряда винтового пучка представляет собой 2.5-мерную самосогласованную систему уравнений движения заряженных частиц и уравнения Пуассона [29, 30]. Уравнения движения заряженных частиц в присутствии электрического и магнитного полей в цилиндрической системе координат записывается в виде

$$\begin{aligned} \frac{dP_r}{dt} - \frac{P_\theta^2}{r\gamma} &= E_r + \frac{P_\theta B_z}{\gamma}, \\ \frac{dP_\theta}{dt} + \frac{P_\theta P_r}{r\gamma} &= \frac{P_z B_r}{\gamma} - \frac{P_r B_z}{\gamma}, \\ \frac{dP_z}{dt} &= E_z - \frac{P_\theta B_r}{\gamma}, \end{aligned} \quad (1)$$

где $\mathbf{P} = (P_r, P_\theta, P_z)^T = \gamma \mathbf{u}$ – вектор импульса частицы, γ – релятивистский фактор, $\mathbf{u} = (u_r, u_\theta, u_z)^T$ – вектор скорости, $\mathbf{E} = (E_r, 0, E_z)^T$ – вектор напряженности электрического поля, $\mathbf{B} = (B_r, 0, B_z)^T$ – вектор индукции магнитного поля. В исследуемом случае рассматривается низковольтная схема виркатора, поэтому мы пренебрегаем собственными магнитными полями электронного потока, т.е. полагаем $B_\theta = 0$.

В системе уравнений (1) и далее используются следующие безразмерные величины: потенциал ϕ электрического поля, плотность заряда ρ , пространственные координаты z и r и время t , а также все перечисленные выше, которые связаны с размерными величинами следующим образом:

$$\begin{aligned} v' &= (2\eta V_0)^{1/2} u, & P' &= m_e (2\eta V_0)^{1/2} P, \\ z' &= h z, & r' &= h r, \\ t' &= \frac{t}{\eta B_0}, & \rho' &= \rho_0 \rho, & V' &= V_0 \phi, \\ E' &= (2\eta V_0)^{1/2} B_0 E, & B' &= B_0 B. \end{aligned}$$

Штрихом обозначены соответствующие размерные величины, $\eta = e/m_e$ – удельный заряд покоящегося электрона, ρ_0 – статическая (невозмущенная) плотность заряда на входе в пространство взаимодействия генератора. Величина $h = 3$ мм представляет собой характерный пространственный масштаб МИП, который в нашем случае удобно выбрать как расстояние от катода пушки до ускоряющего электрода. Величина разности потенциалов, на которую проводилась нормировка в ходе численных расчетов, составляет $V_0 = 1000$ В, а величина магнитного поля – $B_0 = 100$ Гс. Выбор этих величин обусловлен характерными значениями ускоряющего потенциала и величины магнитного поля, которые используются в экспериментальном макете низковольтного виркатора [19, 22, 26, 31].

Для нахождения распределения плотности пространственного заряда $\rho(r, z)$ в пространстве взаимодействия использовалось билинейное взвешивание частиц в цилиндрической системе координат – метод “облака в ячейке” (СИС-метод) [32]. При движении в пространстве дрейфа крупные частицы выводятся из системы при пересечении выходного конца $z = L$, а также в случае оседания частиц на поверхности катода или анода.

Поле пространственного заряда в пространстве взаимодействия рассчитывалось с помощью уравнения Пуассона с учетом граничных условий и распределения плотности $\rho(z, r)$ пространственного заряда электронов пучка. С учетом аксиаль-

ной симметрии ($\partial/\partial\theta = 0$) уравнение Пуассона в безразмерных переменных записывается в виде

$$\frac{1}{r} \frac{\partial \phi}{\partial r} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial r^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial z^2} = \alpha^2 \rho(z, r), \quad (2)$$

где

$$\alpha = h \left(\frac{|\rho_0|}{V_0 \epsilon_0} \right)^{1/2}$$

– безразмерный управляющий параметр, пропорциональный корню квадратному из тока пучка \sqrt{I} и эквивалентный параметру Пирса α в теории диода Пирса [33–38], ϵ_0 – диэлектрическая постоянная вакуума. Граничные условия для уравнения Пуассона (2) имеют вид

$$\begin{aligned} \phi_1 = 0, & \quad \phi_2 = \phi_a, & \phi_5 = \phi_r, \\ \left. \frac{\partial \phi}{\partial r} \right|_{r=0} = 0, & \quad \left. \frac{\partial \phi}{\partial z} \right|_{z=L} = 0, \end{aligned} \quad (3)$$

где ϕ_1 , ϕ_a и ϕ_r – безразмерные потенциалы катода, анода (первой секции трубы дрейфа) и тормозящего электрода (второй секции трубы дрейфа), L – длина системы. Последнее условие системы (3) соответствует открытому пространству на правой границе системы.

Разность потенциалов на электродах 2 и 5: $\Delta\phi = \phi_2 - \phi_5 = \phi_a - \phi_r$ также является важным управляющим параметром системы, характеризующая степень надкритичности в системе. Так, при $\Delta\phi = 0$ мы имеем дело с эквипотенциальным пространством дрейфа (классический виркатор). Хорошо известно [19, 20, 39], что в низковольтной системе с торможением (низковольтный виркатор) виртуальный катод формируется в электронном пучке при некотором критическом значении $\Delta\phi = \Delta\phi_c > 0$.

Магнитное поле в системе задается в аналитическом виде, исходя из условия параксиальности, т.е. $B_z(r, z) \approx B_z(0, z) = B_z$. При этом продольная B_z и поперечная B_r составляющие магнитного поля задаются следующими выражениями:

$$\begin{aligned} B_z(z) &= \left[\frac{1}{2} \tanh \left(\frac{8(z - 0.5(z_0 + z_k))}{z_0 - z_k} \right) + \frac{1}{2} \right] \times \\ &\quad \times (B_0 - B_k) + B_k, \\ B_r(r, z) &= -2r \frac{B_0 - B_k}{z_0 - z_k} \times \\ &\quad \times \left[1 - \tanh \left(\frac{8(z - 0.5(z_0 + z_k))}{z_0 - z_k} \right) \right]. \end{aligned} \quad (4)$$

Компоненты магнитного поля (4) получены, исходя из условия $\nabla \cdot \mathbf{B} = 0$. Распределение продольной компоненты магнитного поля B_z приведено на рис. 1б в безразмерных координатах. Отношение $\sigma = B_0/B_k$ выступает в качестве управляюще-

го параметра, который определяет перепад величины магнитного поля от области инжекции пучка (катода) до пространства дрейфа системы. Значение $\sigma = 1$ соответствует постоянной величине магнитного поля по всей длине системы, включая пространство дрейфа. Увеличение этого параметра соответствует формированию в системе магнитной ловушки для электронов винтового пучка. В работе данный параметр σ был выбран равным $\sigma = 2.7$.

На рис. 1в приведена характерная конфигурация нерелятивистского винтового электронного потока в режиме формирования ВК в данной конфигурации магнитной ловушки. Стрелкой и буквами “ВК” обозначен отражательный нестационарный виртуальный катод, который образуется в области электрода 5.

Уравнение Пуассона интегрировалось с помощью стандартной пятиточечной разностной схемы [32]. Параметры численной схемы (шаги пространственной сетки Δr и Δz , шаг по времени Δt) выбирались, исходя из условий $\Delta r < r_l = v_{\perp}/\omega_c$ и $\Delta z < \Lambda = v_{\parallel}/\omega_c$. Здесь v_{\perp} и v_{\parallel} — поперечная и продольная компоненты скорости электронов соответственно, ω_c — циклотронная частота электронов. Величина шага по времени Δt выбиралась как $\Delta t \ll T_c = 2\pi/\omega_c$. Численное моделирование осуществлялось с помощью программного комплекса для моделирования процессов в генераторах с электронной обратной связью, подробно описанного в работе [30].

Рабочие параметры пушки в ходе численного моделирования выбирались согласно работе [40], посвященной экспериментальному исследованию сложной динамики винтового пучка, формируемого МИП. В численном эксперименте плотность тока пучка составляла величину, примерно равную $j_0 = 4.7$ А/см² (задается параметром α), при ускоряющем напряжении в 2000 В и ведущем магнитном поле $B_k = 300$ Гс (в области катода) и $B_0 = 800$ Гс в пространстве дрейфа. При моделировании МИП также учитывался максвелловский закон распределения полных тепловых скоростей инжектируемых электронов так, как это подробно описано в нашей работе [30].

3. ФОРМИРОВАНИЕ СЖАТОГО СОСТОЯНИЯ ВИНТОВОГО ПУЧКА В СИСТЕМЕ С ТОРМОЖЕНИЕМ

Рассмотрим результаты численного моделирования процессов образования в винтовом электронном потоке сжатого состояния при торможении пучка. Многопараметрическое исследование показало, что в рассматриваемой системе наблюдается установление ССП в определенной обла-

сти значений управляющих параметров. Рассмотрим механизм установления ССП более подробно.

На рис. 2 приведены фазовые портреты электронного пучка в безразмерных координатах (z , v_z) и пространственные распределения усредненной по радиусу нормированной плотности пространственного заряда $\langle \rho(z) \rangle_R = \int \rho(z, r) dr/R$ (R — радиус трубы дрейфа) для различных моментов времени ($t_1 < t_2 < t_3 < t_4$). Моменты времени t_i были выбраны таким образом, чтобы продемонстрировать различные характерные стадии формирования ССП в винтовом пучке.

Так, на рис. 2б видно, что в начале образования ССП (момент времени t_1) существенные сгущения пространственного заряда наблюдаются как около магнитной ловушки (стрелка на рисунке), так и около тормозящего электрода в области ВК (стрелка VK). На фазовом портрете пучка эти сгущения соответствуют “перемычкам”, отмеченным соответствующими стрелками на рис. 2а (момент времени t_1). До момента полного установления ССП уплотнения и разряжения пространственного заряда демонстрируют сложную динамику во времени, попеременно сменяя друг друга или появляясь одновременно.

На следующем этапе формирования ССП область повышенной плотности пространственного заряда около тормозящего электрода начинает расширяться в пространстве от ВК в сторону катода МИП (рис. 2а, моменты времени t_2 и t_3). Одновременно с этим плотность заряда в области магнитной ловушки уменьшается, заряженные частицы либо оседают на электродах (катоде и аноде), либо уходят в область пространства дрейфа. В результате в протяженной области пространства взаимодействия формируется электронное облако, состоящее из частиц с малыми скоростями, в котором устанавливается равномерное распределение плотности пространственного заряда (см. рис. 2, момент времени t_4), которое и соответствует ССП.

Как уже отмечалось во Введении, ССП представляет собой распределенный ВК. На фазовом портрете, соответствующем сжатому состоянию (рис. 2а (момент времени t_4)), видно, что продольная скорость электронов в пучке в области такого протяженного ВК не превышает максимального значения $|v_z| \approx 0.5$. Также на рис. 2а (t_4) видно, что в области катода ССП не наблюдается, так как продольные скорости v_z электронов пучка здесь значительно выше, вплоть до величин порядка $|v_z| \approx 1$, хотя плотность заряда в области эмиттера выше, чем в области ССП (см. рис. 2б,

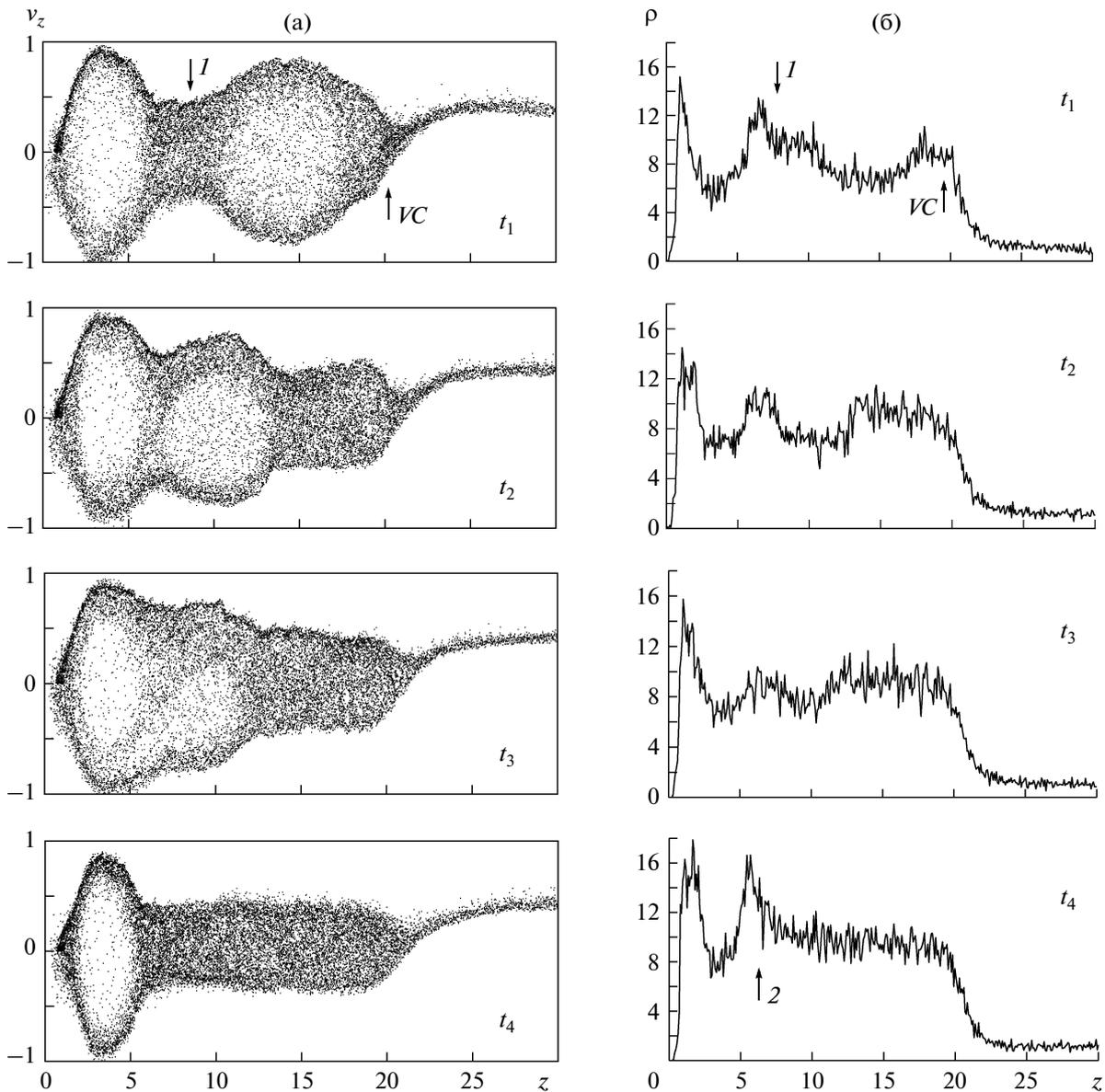


Рис. 2. Фазовые портреты пучка в координатах (z, v_z) для различных моментов безразмерного времени ($t_1 = 956$, $t_2 = 1075$, $t_3 = 1314$, $t_4 = 1553$) в безразмерных единицах (а). Пространственное распределение усредненной по радиусу плотности пространственного заряда ρ для тех же моментов времени (б). Стрелками отмечены: область скопления замедленных частиц вблизи магнитной ловушки (стрелки 1, 2) и область отрагательного ВК (стрелка VC). Рисунок построен при $\alpha = 1.6$, $\Delta\phi = 1.6$.

момент времени t_4). Это связано с тем, что вблизи катода электроны пучка ускоряются в поле анода, при этом абсолютная величина их продольной скорости будет зависеть от фазы вращения в магнитном поле. Также происходит увеличение продольной скорости пучка при выходе из магнитной ловушки. Все это препятствует формированию ССП в этой области.

В исследуемой системе, следуя классификации работы [7], ВК можно отнести к типу отрагательного ВК. Кроме того, из-за наличия в системе

магнитной ловушки в области катода и значительного разброса электронного потока по тепловым скоростям, свойственному МИП, (который усиливается при движении вращающихся электронов вдоль пространства дрейфа [24]) здесь присутствуют признаки магнитного и теплового ВК [7]. Однако последние выражены намного слабее. Покажем это, используя рис. 3, на котором приведены характерные траектории заряженных частиц в координатах (z, t) до установления ССП (рис. 3а) и уже в сжатом состоянии

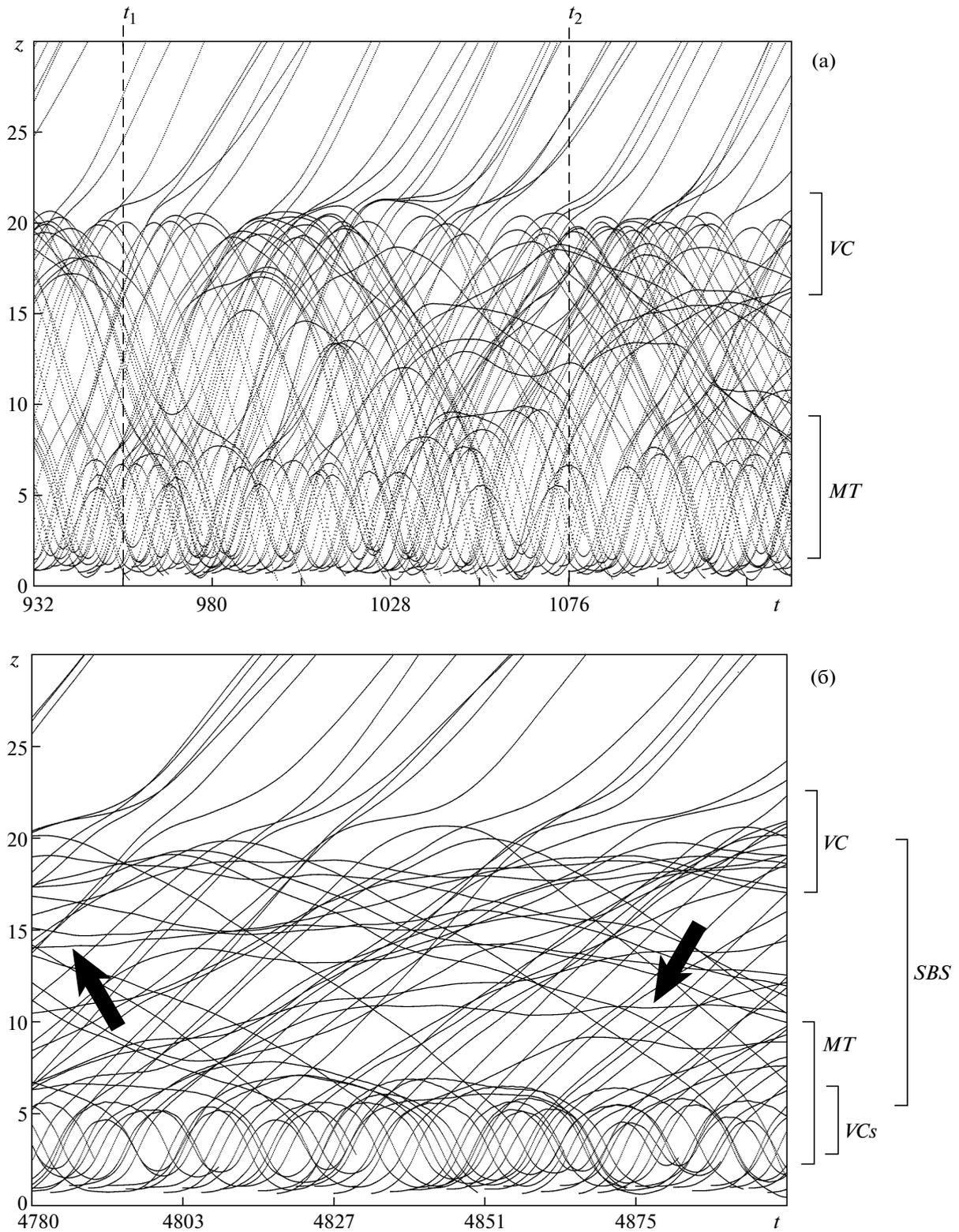


Рис. 3. Траектории заряженных частиц в координатах (z, t) : до момента установления ССП (а) (моменты времени t_1 и t_2 совпадают с соответствующими моментами на рис. 2); для пучка, находящегося в режиме сжатого состояния (б). Скобкой VC обозначена область возникновения отражательного ВК; MT – область магнитной ловушки; VC_s – область отражения от нижней границы ВК в сжатом состоянии; SBS – область сжатого состояния; стрелками обозначены траектории метастабильных частиц в потоке.

(рис. 3б). Пространственно-временные диаграммы на рис. 3 построены для движения частиц в продольном направлении, так как циклотронное вращение частиц в сильном продольном магнитном поле не оказывает сильного влияния на представление динамики потока в продольном направлении (рис. 3, фактически, является картиной траекторий движения ведущих центров).

На рис. 3а приведены траектории частиц до момента установления в пучке сжатого состояния. Скобкой *MT* на рис. 3 показана область магнитной ловушки, скобкой *IC* – область образования отражательного ВК, которая находится в окрестности второго электрода с тормозящим потенциалом ϕ_2 . При движении от катода заряженные частицы попадают в область магнитной ловушки. На рис. 3а хорошо видно, что здесь происходит отражение частиц обратно в сторону катода. Тем не менее часть потока проходит через магнитную ловушку, при этом значительно уменьшается их продольная v_z скорость (что отражается на пространственно-временной диаграмме в уменьшении наклона траекторий частиц), и попадает в область тормозящего электрода 5, где прошедший поток образует нестационарный отражательный ВК. Таким образом, в области между катодом и ВК образуется многопоточное состояние пучка. Интенсивное отражение частиц в области магнитной ловушки (область *MT*) можно объяснить совместным действием поля ловушки и торможением в поле пространственного заряда пучка, который начинает накапливаться между катодом и ВК.

Для понимания физических процессов при формировании ССП полезно сопоставить пространственно-временную диаграмму движения частиц (рис. 3а) и фазовые портреты пучка на рис. 2а (моменты времени t_1 и t_2 , до момента формирования ССП). Для удобства сопоставления на рис. 3а штриховыми линиями выделены соответствующие моменты времени. Видно, что в момент безразмерного времени $t_1 = 956$, когда на фазовом портрете пучка появляется сгущение электронов *I* (рис. 2а, момент времени t_1) на рис. 3а наблюдается также уплотнение траекторий частиц с меньшими продольными скоростями v_z в той же области пространства $z \in (5, 8)$. От этого электронного сгустка происходит отражение частиц с положительными скоростями ($v_z > 0$) в сторону катода, частицы с большими энергиями преодолевают данную область и уходят к ВК в область тормозящего электрода. Существуют также частицы, возвращающиеся от ВК (их продольная скорость $v_z < 0$), которые теперь отражаются от области $z \in (5, 8)$ обратно к ВК. Фазовому портрету на рис. 2а (t_2) соответствует мо-

мент времени $t_2 = 1075$, также отмеченный на рис. 3а. Здесь наибольшее сгущение траекторий и замедление частиц наблюдается только около ВК, что соответствует началу формирования сжатого состояния пучка на фазовом портрете на рис. 2а (t_2) в области $z \in (15, 20)$.

На рис. 3б приведены траектории частиц в координатах (z, v_z) для винтового пучка, перешедшего после длительного переходного процесса в сжатое состояние, область которого отмечена на рисунке как *SBS*. Здесь, как и в предыдущем случае, наблюдается интенсивное отражение частиц в сторону катода в области магнитной ловушки *MT*. В итоге, в режиме ССП в системе с неоднородным магнитным полем в области катода и источником электронов в виде МИП формируется вторичный плотный электронный сгусток в области пространства $z \approx 5.5$ (обозначен скобкой *ICs*), чему соответствует пик на распределении плотности пространственного заряда, отмеченный на рис. 2б в момент времени t_4 стрелкой 2. Большая часть отраженных частиц при этом оседает на катоде, часть – на ускоряющем аноде, а оставшиеся частицы попадают в потенциальную яму между катодом и вторичным сгустком *ICs*, совершая близкие к периодическим колебания. В данном случае интенсивное отражение частиц в области *ICs* связано, в первую очередь, с тем, что на координату $z \approx 5.5$ приходится левая граница распределенного ВК (соответствующего области ССП) (см. рис. 2а, момент времени t_4). В области отражения частиц от ВК, отмеченной на рис. 3 скобкой *IC*, расположена правая граница распределенного ВК. В результате между областями *IC* и *ICs* пространства взаимодействия накапливаются частицы с малой продольной скоростью v_z – образуется ССП. Частицы в этой области дрейфуют с малой скоростью (относительно начальных скоростей пучка) как в прямом, так и обратном направлениях. Кроме того, в области ССП существует большое число метастабильных частиц с малой продольной скоростью (две из них отмечены стрелками на рис. 3). Накопление большого числа частиц с малыми продольными скоростями и, как следствие, рост плотности пространственного заряда облегчает отражение потока от области магнитной ловушки вблизи катода и, в свою очередь, способствует формированию сжатого состояния винтового пучка.

Процесс установления ССП в винтовом пучке в системе с неоднородным магнитным полем вблизи катода (для формирования винтового пучка) и с дополнительным торможением потока в целом схож с аналогичным процессом в пучках в составной трубе дрейфа с секциями различного радиуса, где была обнаружена волна переключе-

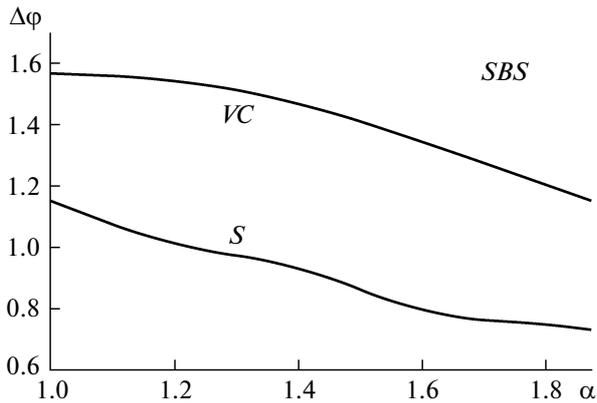


Рис. 4. Карта режимов на плоскости управляющих параметров (α , $\Delta\phi$). Область, обозначенная *S*, соответствует области значений параметров, при которых не возникает ВК; *IC* – область возникновения ВК; *SBS* – область значений параметров, при которых в винтовом пучке формируется сжатое состояние.

ния двухпоточкового состояния пучка в ССП [16]. Однако в данном случае местом возникновения двухпучковой неустойчивости является область нестационарного ВК. В случае винтового пучка в системе с торможением волна переключения не столь ярко выражена, а процесс установления ССП может значительно корректироваться в зависимости от значений управляющих параметров (параметр пространственного заряда пучка α и тормозящая разность потенциалов $\Delta\phi$).

4. НЕЛИНЕЙНАЯ ДИНАМИКА СЖАТОГО СОСТОЯНИЯ ВИНТОВОГО ПУЧКА

Рассмотрим результаты исследования нелинейной динамики винтового пучка в сжатом состоянии при изменении управляющих параметров.

На рис. 4 приведена карта режимов на плоскости управляющих параметров (α , $\Delta\phi$). Область, обозначенная на рис. 4 как *S*, соответствует области значений параметров, при которых в системе не возникает ВК. В данном режиме наблюдается полное прохождение пучка через пространство дрейфа. Увеличение тормозящей разности потенциалов $\Delta\phi$ или безразмерного тока пучка α приводит к накоплению заряда в пространстве дрейфа системы. Это приводит к тому, что в электронном потоке возникает нестационарный ВК. Соответствующая область на карте режимов отмечена как *IC* (см. рис. 4). При дальнейшем увеличении значений параметров в системе наблюдается установление ССП (область *SBS*, рис. 4). Обсудим характер установления сжатого состояния винтового пучка в зависимости от параметров, используя рис. 5, на котором

приведены типичные временные реализации колебаний потенциала $\phi(t)$ на выходе пространства взаимодействия для трех значений тормозящей разности потенциалов и их спектры мощности.

Обратимся к рис. 5а, который построен для значений управляющих параметров $\Delta\phi = 1.1$ и $\alpha = 1.6$. При этих значениях параметров в системе реализуется отражательный ВК без формирования ССП. В этом режиме наблюдаются интенсивные колебания, близкие к шумовым. Как видно из рис. 5а, временная реализация $\phi(t)$ и спектр колебаний (справа на рис. 5а) в этом случае соответствуют шумовым колебаниям, которые определяются сложной динамикой ВК в пучке с большим разбросом электронов по скоростям (см., например, [26]). Значительный разброс электронов по скоростям определяется использованием в качестве источника электронов МИП, которая обеспечивает высокий первеанс пучка, но одновременно и значительный разброс электронов по продольным скоростям. Спектр мощности колебаний равномерно зашумлен в низкочастотной области, без ярко выраженных пиков.

На рис. 5б приведена временная зависимость $\phi(t)$ и спектр мощности для тормозящей разности потенциалов $\Delta\phi = 1.3$. Значения параметров, для которых построена эта зависимость, соответствуют границе разделения двух режимов – колебаний отражательного ВК и режима ССП. Этот режим отличается, во-первых, тем, что накопленный в области ВК пространственный заряд возрастает за счет увеличения тормозящего потенциала. Во-вторых, в спектре колебаний потенциала на фоне шумового пьедестала появляется низкочастотная спектральная компонента (см. спектры колебаний на рис. 5а и б). При увеличении тормозящей разности потенциалов в потоке формируется сжатое состояние (рис. 5в). В этом случае на временной реализации $\phi(t)$ отчетливо видны низкочастотные колебания потенциала относительно некоторого среднего значения на фоне шумовых колебаний. Интенсивность колебаний растет с ростом тормозящего потенциала (или с ростом тока пучка). Следует также отметить, что в спектре мощности появляется ярко выраженная низкочастотная спектральная компонента, а также хорошо заметна ее вторая гармоника.

Исследования показали, что причина возникновения низкочастотных колебаний в режиме ССП – продольная динамика в пучке. На рис. 6 приведены зависимости нормированной плотности пространственного заряда пучка $\langle \tilde{\rho}(z, t) \rangle_R$ в пространстве и времени для пучка с отражательным ВК (рис. 6а) и в сжатом состоянии (рис. 6б). Плотность заряда показана интенсивностью се-

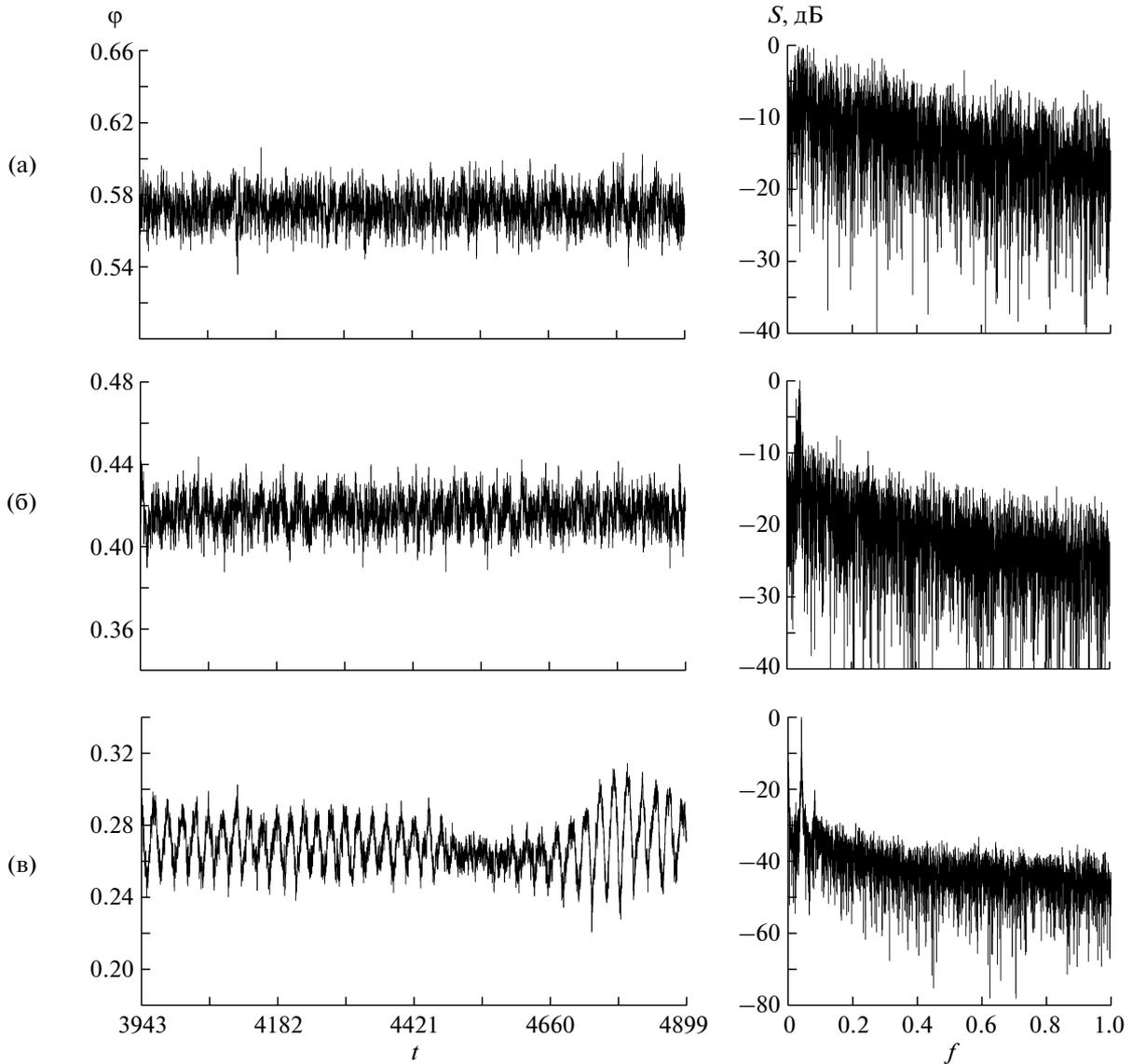


Рис. 5. Зависимость потенциала пространства дрейфа от времени (в нормированных единицах) для трех значений тормозящей разности потенциалов (слева) и их спектры (справа). Параметр пространственного заряда $\alpha = 1.6$; тормозящая разность потенциалов: $\Delta\phi = 1.1$ (а); $\Delta\phi = 1.3$ (б); $\Delta\phi = 1.5$ (в).

рого цвета: более темные участки соответствуют бóльшей величине пространственного заряда. При построении рис. 6 плотность пространственного заряда определялась как $\langle \tilde{\rho}(z, t) \rangle_R = \langle \rho(z, t) \rangle_R - \langle \rho(z) \rangle_{R, T}$, где $\langle \rho(z) \rangle_{R, T} = \int \langle \rho(z, t) \rangle_R dt / T$ – постоянная составляющая плотности пучка в каждой точке пространства, полученная усреднением плотности заряда по отрезку времени T , на котором строился рис. 6.

На рис. 6а приведена картина распределения плотности заряда для значений управляющих параметров, для которых в системе реализуется отражательный ВК $\alpha = 1.6$, $\Delta\phi = 0.9$ без формирования ССП (область *ИС* на рис. 4). Видно, что при

$z \approx 22.5$ в системе формируется ВК, чему соответствует область повышенной плотности пространственного заряда (область обозначенная *ИС* на рис. 6а). Также повышенная плотность пространственного заряда наблюдается в области эмиттирующего пояaska пушки ($z \in (1, 2)$). Это связано с накоплением заряда в электронном облаке около катода. Приведенная картина является достаточно типичной для систем с отражательным ВК в системе с торможением [5, 6, 20, 39]).

На рис. 6б приведена картина распределения плотности заряда для значений управляющих параметров, для которых в системе реализуется ССП: $\alpha = 1.6$, $\Delta\phi = 1.6$ (см. карту параметров на

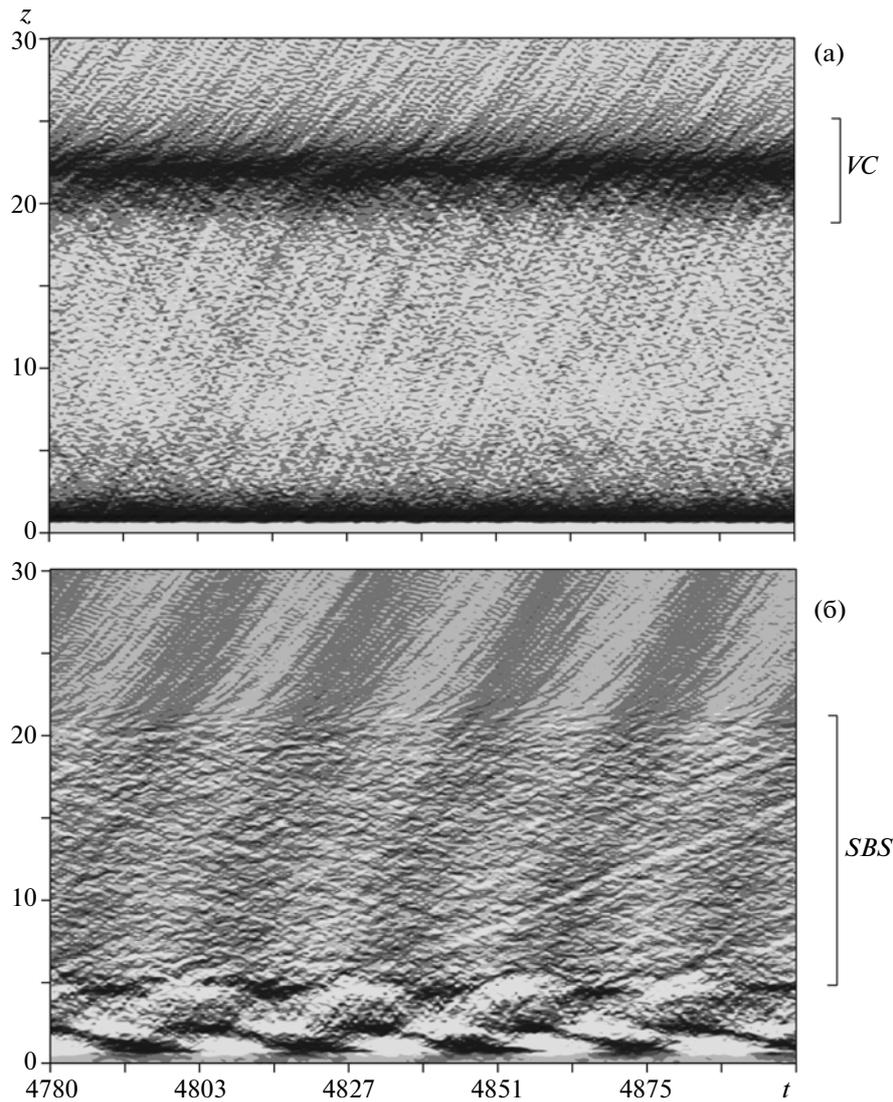


Рис. 6. Зависимость плотности пространственного заряда пучка $\langle \tilde{\rho}(z,t) \rangle_R$ в пространстве и времени для пучка с отражательным ВК: $\alpha = 1.6$, $\Delta\varphi = 0.9$ (а) и в сжатом состоянии: $\alpha = 1.6$, $\Delta\varphi = 1.6$ (б). Плотность заряда показана интенсивностью цвета: более темные участки соответствуют большей величине пространственного заряда.

рис. 4). Видно, что на рисунке прослеживаются колебания пространственного заряда в области магнитной ловушки (см. область VC на рис. 3б), что выражается на рис. 6б как чередование по времени черных и белых пятен в области $z \in (0, 5)$. Плотность заряда около катода значительно выше плотности в области ССП, поэтому колебания пространственного заряда около катода происходят с большей амплитудой, чем в остальном пространстве. В области ССП (отмеченного на рисунке скобкой SBS), наблюдаются сложные хаотические колебания пространственного заряда с малой амплитудой, определяемые неупорядоченным движением как отдельных заряженных частиц, в том числе и метастабильных [7], так и

плотных сгустков частиц, формируемых при отражении потока в областях магнитной ловушки и ВК.

Также на рис. 6б вдоль пространства взаимодействия отчетливо видны чередующиеся во времени светлые и темные полосы, начинающиеся от области магнитной ловушки с координатой $z \approx 5$ до выхода из пространства дрейфа $z = 30$. Частота следования этих возмущений определяется частотой, с которой пространственный заряд накапливается и рассасывается в области $z \approx 5$, т.е. частотой колебаний ВК. Эти возмущения определяют низкочастотные колебания потенциала пространства дрейфа, приведенные на рис. 5в.

Как показывает траекторный анализ (ср. рис. 3б и рис. 6б), в данном режиме продольных колебаний заряда в пучке не возникает пространственных сгустков электронов. Возникновение колебаний потенциала в системе определяется возникновением возмущений плотности пучка в режиме ССП, которые возбуждаются колебаниями в области магнитной ловушки и двигаются вдоль пространства со скоростью волн пространственного заряда. Последнее подтверждается изменением скорости возмущения вдоль пространства дрейфа пучка (областях ССП и области за ВК с различными плотностями электронного облака).

5. ВЫВОДЫ

В работе представлены результаты численного моделирования установления сжатого состояния в интенсивном винтовом электронном потоке в виркаторе с дополнительным торможением электронного пучка.

Было показано, что в такой системе процесс образования ССП начинается с возникновения в пучке отражательного ВК, в результате чего образуется двухпотокное состояние в пучке между реальным и виртуальным катодами. В результате развития неустойчивости встречных потоков, которая характеризуется локальным повышением плотности пространственного заряда и понижением скорости встречных потоков, в системе устанавливается ССП. Были определены области значений управляющих параметров, при которых в системе реализуется ССП. Кроме того, было обнаружено, что для виркатора с дополнительным торможением винтового пучка характерно возникновение продольной динамики пространственного заряда в сжатом состоянии потока.

Исследование выполнено при поддержке министерства образования и науки Российской Федерации (соглашения №№ 14.В37.21.0764, 14.В37.21.1171), грантами РФФИ (12-02-00345 и 12-02-33071), а также Президентской программы поддержки молодых российских ученых (МК-818.2013.2 и МД-345.2013.2).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кузелев М.В., Рухадзе А.А., Стрелков П.С. Плазменная релятивистская СВЧ-электроника. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2002.
2. Трубецков Д.И., Храмов А.Е. Лекции по сверхвысокочастотной электронике для физиков. Т. 1. М.: Физматлит, 2003.
3. Benford J., Swegle J.A., Schamiloglu E. High Power Microwaves. CRC Press, Taylor and Francis, 2007.
4. Рухадзе А.А., Столбецов С.Д., Тараканов В.П. // Радиотехника и электроника. 1992. Т. 37. № 3. С. 385.
5. Селемир В.Д., Алехин Б.В., Ватрунин В.Е. и др. // Физика плазмы. 1994. Т. 20. № 7, 8. С. 689.
6. Дубинов А.Е., Селемир В.Д. // Радиотехника и электроника. 2002. Т. 47. № 6. С. 575.
7. Дубинов А.Е., Ефимова И.А., Корнилова И.Ю. и др. // Физика элементарных частиц и атомного ядра. 2004. Т. 35. № 2. С. 462.
8. Диденко А.Н., Красик Я.Е., Перельгин С.Ф., Фоменко Г.П. // Письма в ЖТФ. 1979. Т. 5. № 6. С. 321.
9. Mahaffey R.A., Sprangle P.A., Golden J., Kapetanakis C.A. // Phys. Rev. Lett. 1977. Т. 39. № 13. С. 843.
10. Трубецков Д.И., Храмов А.Е. Лекции по сверхвысокочастотной электронике для физиков. Т. 2. М.: Физматлит, 2004.
11. Короновский А.А., Трубецков Д.И., Храмов А.Е. Методы нелинейной динамики и хаоса в задачах электроники сверхвысоких частот. Т. 2. Нестационарные и хаотические процессы. М.: Физматлит, 2009.
12. Ignatov A.M., Tarakanov V.P. // Phys. Plasmas. 1994. Т. 1. № 3. Р. 741.
13. Дубинов А.Е. // Письма в ЖТФ. 1997. Т. 23. № 22. С. 29.
14. Дубинов А.Е., Макаров И.В., Садовой С.А. и др. // Письма в ЖТФ. 2011. Т. 37. № 5. С. 81.
15. Донец Е.Д., Донец Е.Е., Сыресин Е.М. и др. // Физика плазмы. 2009. Т. 35. № 1. С. 61.
16. Дубинов А.Е., Селемир В.Д., Тараканов Т.П. // Письма в ЖТФ. 2002. Т. 28. № 4. С. 71.
17. Дубинов А.Е., Корнилова И.Ю., Селемир В.Д. // УФН. 2002. Т. 172. № 11. С. 1225.
18. Барабанов В.Н., Дубинов А.Е., Лойко М.В. и др. // Физика плазмы. 2012. Т. 38. № 2. С. 189.
19. Калинин Ю.А., Короновский А.А., Храмов А.Е. и др. // Физика плазмы. 2005. Т. 31. № 11. С. 1009.
20. Егоров Е.Н., Калинин Ю.А., Короновский А.А. и др. // Известия вузов. Радиофизика. 2006. Т. XLIX. № 10. С. 843.
21. Filatov R.A., Hramov A.E., Bliokh Y.P. et al. // Phys. Plasmas. 2009. V. 16. No. 3. P. 033106.
22. Калинин Ю.А., Стародубов А.В. // ЖТФ. 2010. Т. 80. № 12. С. 80.
23. Hramov A.E., Koronovskii A.A., Kurkin S.A. // Phys. Lett. A. 2010. Т. 374. Р. 3057.
24. Егоров Е.Н., Храмов А.Е. // Письма в ЖТФ. 2010. Т. 36. № 13. С. 38.
25. Егоров Е.Н., Храмов А.Е. // Известия вузов. Прикладная нелинейная динамика. 2011. Т. 19. № 4. С. 40.
26. Калинин Ю.А., Храмов А.Е. // ЖТФ. 2006. Т. 76. № 5. С. 25.
27. Калинин Ю.А., Стародубов А.В. // ЖТФ. 2011. Т. 84. № 6. С. 92.
28. Калинин Ю.А., Стародубов А.В. // Письма в ЖТФ. 2011. Т. 37. № 23. С. 34.

29. Куркин С.А., Короновский А.А., Егоров Е.Н. и др. // Известия вузов. Прикладная нелинейная динамика. 2010. Т. 18. № 6. С. 106.
30. Храмов А.Е., Куркин С.А., Егоров Е.Н. и др. // Математ. моделирование. 2011. Т. 23. № 1. С. 3.
31. Егоров Е.Н., Калинин Ю.А., Короновский А.А., Храмов А.Е. // ЖТФ. 2007. Т. 77. № 10. С. 139.
32. Birdsall C.K., Langdon A.B. Plasma Physics, Via Computer Simulation. N.Y.: McGraw-Hill, 1985.
33. Godfrey B.B. // Phys. Fluids. 1987. V. 30. P. 1553.
34. Kuhn S., Ender A. // J. Appl. Phys. 1990. V. 68. P. 732.
35. Matsumoto H., Yokoyama H., Summers D. // Phys. Plasmas. 1996. V. 3. № 1. P. 177.
36. Hramov A.E., Rempen I.S. // Int. J. Electronics. 2004. V. 91. № 1. P. 1.
37. Hramov A.E., Koronovskii A.A., Rempen I.S. // Chaos. 2006. V. 16. № 1. P. 013123.
38. Ender A., Kuhn S., Kuznetsov V.I. // Phys. Plasmas. 2006. V. 13. P. 113506.
39. Егоров Е.Н., Калинин Ю.А., Короновский А.А. и др. // Радиотехника и электроника. 2007. Т. 52. № 1. С. 51.
40. Калинин Ю.А., Кожевников В.Н., Лазерсон А.Г. и др. // ЖТФ. 2000. Т. 70. № 7. С. 83.