

12

## **Возникновение сжатых состояний винтового электронного потока в системе с торможением**

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

Саратовский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского  
Саратовский государственный технический университет  
им. Ю.А. Гагарина  
E-mail: evgeniy.n.egorov@gmail.com

*В окончательной редакцию 1 марта 2013 г.*

Обсуждается вопрос о возникновении сжатого состояния интенсивного винтового электронного потока с дополнительным торможением, находящегося в режиме образования виртуального катода, приводятся результаты численного моделирования формирования сжатого состояния. Показано, что в системе с торможением в режиме сжатого состояния могут наблюдаться продольные колебания плотности пространственного заряда пучка.

В настоящее время большой интерес представляют исследования образования и нелинейной динамики виртуального катода (ВК) в интенсивных электронных потоках (см., например, обзоры [1–3] и 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 [4].

Одним из перспективных и важных направлений исследований здесь является изучение сжатых состояний пучков (ССП) [3,5–7], которые характеризуются высокой плотностью и малой скоростью электронов потока в некоторой области пространства взаимодействия. Для реализации СПП обычно используются составное пространство дрейфа из труб разного радиуса, так что в первой трубе с меньшим радиусом дрейфа ток пучка ниже критического тока возникновения ВК, а в другой с большим радиусом — выше. Вся система помещается в сильное продольное магнитное поле. СПП образуется в первой области, где ток пучка

ниже предельного вакуумного тока [3,6], за счет формирования в пучке нестационарного отражающего электроны ВК во второй трубе дрейфа с большим радиусом. Область ССП фактически является распределенным в пространстве дрейфа ВК и характеризуется сложной собственной динамикой частиц потока, а также разнообразными сценариями его установления [3,8]. В работе [9] авторы обосновывают применение ССП для коллективного ускорения ионов.

Следует отметить, что для формирования ССП необходима протяженная область пространства взаимодействия, в которой ток пучка ниже критического значения, так чтобы ВК формировался на выходе из этой секции прибора. Этого можно достичь как путем скачка радиуса пролетного канала [3], так и с помощью дополнительного торможения пучка. Ранее была предложена и реализована модификация генератора на ВК, в которой ВК формируется в интенсивном (с высоким первеансом) электронном потоке за счет дополнительного торможения электронов [10,11]. В данном приборе за счет дополнительного торможения электронов существует возможность снизить стартовый ток, необходимый для формирования нестационарного колеблющегося ВК. Ввиду сходства процессов образования ВК в системе без торможения и с торможением можно ожидать, что в последней также возможно установление ССП. Целью данной работы стало исследование возможности и особенностей процесса возникновения режима ССП в винтовом нерелятивистском электронном потоке с дополнительным торможением пучка.

Исследование сжатого состояния пучка проводилось на примере виркатора с источником электронов в виде магнетронно-инжекторной пушки (МИП) [12]. Выбор системы с МИП определен тем, что для формирования ССП необходимо приложение значительного внешнего магнитного поля, что реализуется в данной системе. Кроме того, МИП обладает высоким первеансом, что делает ее эффективным источником электронов для оптимизации работы генератора с электронной обратной связью [12,13].

Численное моделирование процессов в МИП проводилось с помощью разработанной ранее 2.5D-мерной математической модели, основанной на самосогласованной системе уравнений движения и уравнения Пуассона для нахождения самосогласованного поля пространственного заряда [14]. Моделирование динамики электронного потока проводилось методом крупных частиц (PIC-метод).

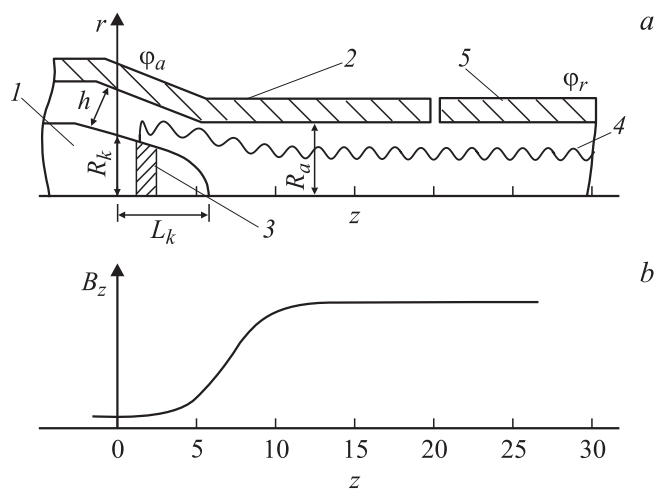
Схематическое изображение геометрии изучаемой в численной модели системы представлено на рис. 1, *a*. Рассматривалась аксиально-симметричная модель исследуемой системы. В работе моделировалась верхняя полуплоскость плоскости сечения  $(r, z)$  пространства дрейфа между катодом 1 и анодом 2. Заштрихованная область на катоде 1 соответствует эмитирующей полоске МИП 3, на котором формируется электронный поток 4. Камера дрейфа разбивается на две части, и на правую часть 5 камеры подается тормозящий потенциал, меньший потенциала анода  $\varphi_r < \varphi_a$ .

При моделировании МИП учитывался максвелловский закон распределения полных тепловых скоростей инжектируемых электронов. Магнитное поле в МИП в области, где движутся электроны, удовлетворяет условию параксиальности (рис. 1, *b*), при этом в области катода пушки конфигурация поля представляет собой магнитную ловушку (в области катода 1 продольная величина  $B_z$  магнитного поля меньше, чем в области трубы дрейфа).

Параметры пушки для численного моделирования выбирались согласно работе [15] по экспериментальному исследованию сложной динамики пучка, формируемого МИП. В численном эксперименте плотность тока пучка составляла величину, эквивалентную  $j_0 = 4.7 \text{ A/cm}^2$ , при ускоряющем напряжении в 2000 V и ведущем магнитном поле  $B_k = 300 \text{ Gs}$  (в области катода) и  $B_0 = 800 \text{ Gs}$  в пространстве дрейфа. Геометрические параметры пушки были выбраны следующими: длина катода МИП  $L_k = 17.8 \text{ mm}$  (см. обозначения на рис. 1, *a*), радиус катода  $R_k = 7.4 \text{ mm}$ , расстояние между катодом и анодом  $h = 3 \text{ mm}$ , радиус трубы дрейфа  $R_a = 8.4 \text{ mm}$ , общая длина пушки и пространства дрейфа  $L = 90 \text{ mm}$  (на рис. 1, *a* не указана). Далее в статье и на рисунках все величины указаны в нормированных единицах, нормировка геометрических размеров проводилась на величину  $h$ .

Обсудим результаты моделирования данной системы. Исследования показали, что в рассматриваемой модели возможно установление ССП в определенной области управляющих параметров. На рис. 1, *c-f* приведены фазовые портреты электронного пучка в безразмерных координатах  $(z, v_z)$  для различных моментов времени ( $t_1 < t_2 < t_3 < t_4$ ). Моменты времени были выбраны таким образом, чтобы продемонстрировать различные стадии формирования ССП в винтовом пучке.

В области значений продольной координаты  $z$ , соответствующей разрыву 5 пространства дрейфа, из-за введенного дополнительного



**Рис. 1.** *a* — схема магнетронно-инжекторной пушки: 1 — катод, 2 — ускоряющий электрод с потенциалом  $\varphi_a$ , 3 — эмитирующий пояс, 4 — электронный поток, 5 — тормозящий электрод с потенциалом  $\varphi_r$ ,  $L_k = 17.8$  мм,  $R_k = 7.4$  мм,  $h = 3$  мм,  $R_a = 8.4$  мм. Размеры, указанные на рисунке, нормированы на величину  $h$ , масштаб по горизонтальной и вертикальной осям не совпадает. *b* — распределение продольной составляющей магнитного поля  $B_z$  в пространстве дрейфа; *c*, *d*, *e*, *f* — фазовые портреты пучка в координатах  $(z, v_z)$  для различных моментов времени ( $t_1 < t_2 < t_3 < t_4$ ). Стрелками (*c*) отмечены область торможения частиц из-за магнитной ловушки (стрелка *I*) и область ВК (стрелка *VC*).

торможения образуется ВК (стрелка *VC* на рис. 1, *c*). В такой системе, следуя классификации работы [3], ВК можно отнести к типу отражательного ВК. Кроме того, из-за наличия в системе магнитной ловушки в области катода и значительного разброса электронного потока по тепловым скоростям, свойственного МИП (который усиливается при движении электронов вдоль пространства дрейфа [12]), здесь присутствуют признаки магнитного и теплового ВК [3]. Заряженные частицы отражаются в области ВК, в результате чего в области катод МИП — ВК устанавливается двухпотокное состояние.

Как видно на рис. 1, *c*, в начале образования ССП существенные сгущения пространственного заряда могут наблюдаться как около магнит-

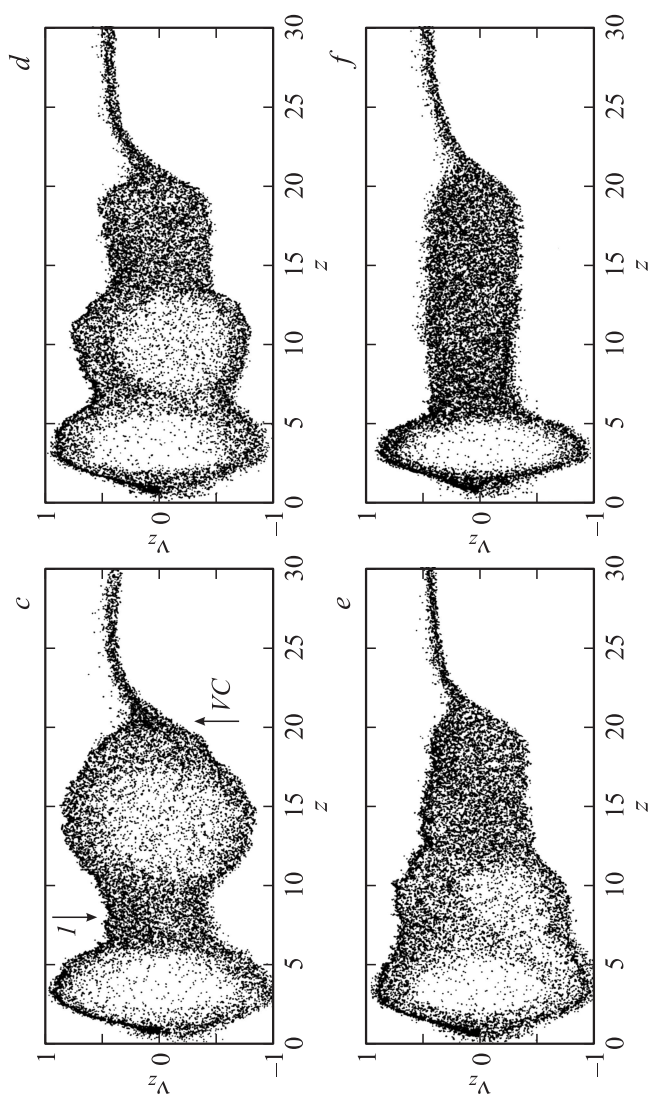


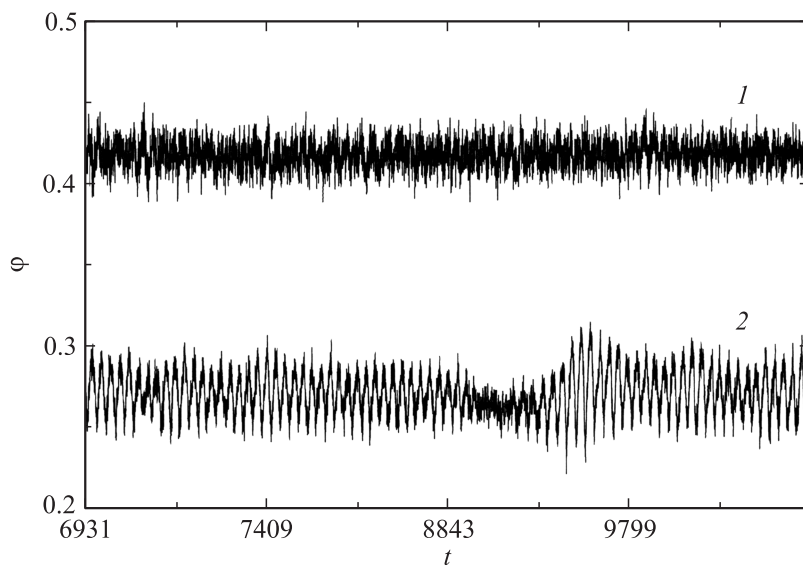
Рис. 1 (продолжение).

ной ловушки, где электроны испытывают дополнительное торможение вследствие действия поля магнитной ловушки (стрелка  $I$  на рисунке), так и около тормозящего электрода в области ВК (стрелка  $VC$ ). До момента полного установления ССП уплотнения пространственного заряда могут возникать и исчезать во времени, попеременно сменяя друг друга или появляясь одновременно.

На следующем этапе во времени область повышенной плотности пространственного заряда около тормозящего электрода начинает разрастаться в пространстве от ВК в сторону катода МИП (рис. 1,  $d$  и  $e$ ). Одновременно с этим плотность заряда в области магнитной ловушки несколько уменьшается, заряженные частицы либо оседают на электродах (катоде и аноде), либо уходят в область пространства дрейфа. В результате в некоторой протяженной области пучка формируется электронное облако, состоящее из частиц с невысокими скоростями, в котором устанавливается равномерное распределение плотности пространственного заряда (рис. 1,  $f$ ), которое и соответствует ССП.

Как уже отмечалось выше, ССП фактически представляет собой распределенный ВК. На фазовом портрете, соответствующем сжатому состоянию (рис. 1,  $f$ ), видно, что продольная скорость электронов в пучке в области такого протяженного ВК не превышает безразмерной величины  $v_z \approx 0.5$ . Скорость нормируется на характерную величину  $v_0$  — продольную скорость электронов у анода, вышедших с катода с нулевой скоростью и ускоренных в поле анода с потенциалом  $\varphi_a$ . Также на рис. 1,  $f$  видно, что в области катода ССП не наблюдается, продольные скорости  $v_z$  электронов пучка здесь значительно выше, хотя плотность заряда в области эмиттера может быть даже выше, чем в области ССП. 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 (до величин порядка  $v_z \approx 1$ ) вследствие выхода из магнитной ловушки. Все это препятствует эффективному установлению ССП в этой области.

Следует отметить, что процесс установления ССП в винтовом пучке с торможением схож с аналогичным процессом в релятивистском пучке в составной трубе дрейфа, где обнаружена волна переключения двухпотокового состояния пучка в ССП [9]. Отмечается, в частности, что волновой фронт данного переключения может быть использован для



**Рис. 2.** Зависимость потенциала пространства дрейфа от времени (в нормированных единицах) для двух значений тормозящей разности потенциалов: 1 —  $\Delta\varphi = 1.3$ ; 2 —  $\Delta\varphi = 1.5$ .

ускорения ионов. В случае винтового пучка в системе с торможением этот процесс не столь ярко выражен и может значительно корректироваться в зависимости от значений управляющих параметров, а именно тока пучка и тормозящего потенциала  $\varphi_r$ .

Отметим еще некоторые особенности установления и динамики ССП в винтовом пучке с торможением. На рис. 2 приведены временные зависимости потенциала точки пространства дрейфа от времени для двух значений тормозящего потенциала  $\Delta\varphi = \varphi_a - \varphi_r$ . Анализ динамики потенциала пространства в области пучка позволяет детально изучить процесс накопления и сброса пространственного заряда в системе. Для случая, приведенного на рис. 2, точка, в которой снимался потенциал, находится на правом конце пространства дрейфа  $z = 25$  на границе пучка (т.е. за пределами области сжатого состояния).

Цифрой 1 на рис. 2 обозначена зависимость  $\varphi(t)$  при  $\Delta\varphi = 1.3$ , при котором ССП до конца еще не сформировано. В этом случае колебания

потенциала соответствуют хорошо выраженным шумовым колебаниям, которые определяются сложной динамикой ВК в пучке с большим разбросом электронов по скоростям [16]. Далее, при увеличении торможения в системе формируется хорошо развитое ССП. Данное состояние характеризуется, во-первых, тем, что накопленный заряд существенно возрастает. Это выражается в уменьшении средней величины потенциала, около которой происходят колебания (зависимость 2 на рис. 2, построенная при  $\Delta\varphi = 1.5$ ). Во-вторых, во временной зависимости  $\varphi(t)$  начинают все более отчетливо проявляться мощные низкочастотные колебания потенциала. Исследования показали, что в этом случае в электронном облаке, соответствующем ССП, развиваются интенсивные продольные колебания пространственного заряда в области между ВК и катодом МИП. При этом область сжатого состояния покидают отдельные плотные сгустки электронов с некоторой степенью периодичности.

Можно предположить, что появление подобной продольной динамики заряда при увеличении плотности пучка в режиме ССП характерно для рассмотренного случая системы с торможением. Напомним, что ССП в релятивистском случае образуется в протяженной области дрейфа, где не превышен предельный вакуумный ток образования ВК [3,6]. Затравкой для возникновения ССП служит ВК, формирующийся в следующей области пространства дрейфа, в которой предельный вакуумный ток ниже, чем в пространстве формирования ССП. Однако в релятивистском случае попытка существенного увеличения плотности заряда пучка в ССП для возникновения подобных продольных осцилляций сталкивается со сложностью, связанной с возникновением вторичного ВК в области ССП. В то же самое время для системы с торможением подобной проблемы не возникает, поскольку в этом случае предельный вакуумный ток может быть существенно больше, чем ток электронного пучка.

Таким образом, в работе описаны результаты численного моделирования установления сжатого состояния в интенсивном винтовом электронном потоке с дополнительным торможением. В статье описан механизм возникновения ССП в нерелятивистской системе; показано, что для нерелятивистской системы с торможением характерно возникновение продольной динамики пространственного заряда в сжатом состоянии потока, что, видимо, не характерно для релятивистских пучков.



Исследование выполнено при поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации (соглашение № 14.В37.21.0764, 14.В37.21.1171), грантов 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] Рухадзе А.А., Столбцов С.Д., Тараканов В.П. // Радиотехника и электроника. 1992. Т. 37. № 3. С. 385.
- [2] Дубинов А.Е., Селемир В.Д. // Радиотехника и электроника. 2002. Т. 47. № 6. С. 575.
- [3] Дубинов А.Е., Ефимова И.А., Корнилова И.Ю., Сайков С.К., Селемир В.Д., Тараканов В.П. // ФЭЧАЯ. 2004. Т. 35. № 2. С. 462.
- [4] Benford J., Swegle J.A., Schamiloglu E. High Power Microwaves. CRC Press, Taylor and Francis, 2007.
- [5] Ignatov A.M., Tarakanov V.P. // Phys. Plasmas. 1994. V. 1. N 3. P. 741–744.
- [6] Дубинов А.Е. // Письма в ЖТФ. 1997. Т. 23. В. 22. С. 29–33.
- [7] Дубинов А.Е., Макаров И.В., Садовой С.А., Сайков С.К., Тараканов В.П. // Письма в ЖТФ. 2011. Т. 37. В. 5. С. 81–86.
- [8] Барабанов В.Н., Дубинов А.Е., Лойко М.В., Сайков С.К., Селемир В.Д., Тараканов В.П. // Физика плазмы. 2012. Т. 38. № 2. С. 189–199.
- [9] Дубинов А.Е., Корнилова И.Ю., Селемир В.Д. // УФН. 2002. Т. 172. № 11. С. 1225–1246.
- [10] Калинин Ю.А., Короновский А.А., Храмов А.Е., Егоров Е.Н., Филатов Р.А. // Физика плазмы. 2005. Т. 31. № 11. С. 1009–1025.
- [11] Егоров Е.Н., Калинин Ю.А., Короновский А.А., Трубецков Д.И., Храмов А.Е. // Известия вузов. Радиофизика. 2006. XLIX. № 10. С. 843–852.
- [12] Егоров Е.Н., Храмов А.Е. // Письма в ЖТФ. 2010. Т. 36. В. 13. С. 38–45.
- [13] Егоров Е.Н., Храмов А.Е. // Изв. вузов. ПНД. 2011. Т. 19. № 4. С. 40–52.
- [14] Храмов А.Е., Куркин С.А., Егоров Е.Н., Короновский А.А., Филатов Р.А. // Математическое моделирование. 2011. Т. 23. № 1. С. 3–18.
- [15] Калинин Ю.А., Кожевников В.Н., Лазерсон А.Г., Александров Г.И., Железковский Е.Е. // ЖТФ. 2000. Т. 70. В. 7. С. 83–91.
- [16] Калинин Ю.А., Храмов А.Е. // ЖТФ. 2006. Т. 76. В. 5. С. 25–34.