



Динамика цилиндрических электронных пучков при инжекции в полупространство с идеально проводящей границей

А. Г. Шеин, С. А. Аликов

Волгоградский государственный технический университет

Россия, 400005 Волгоград, пр-кт им. В.И. Ленина, 28

E-mail: professor39@mail.ru, sputnik_as@mail.ru

Автор для переписки Александр Георгиевич Шеин, professor39@mail.ru

Поступила в редакцию 23.05.2020, принята к публикации 4.08.2020, опубликована 30.10.2020

Цель настоящего исследования – изучить динамику пучков и электронных сгустков в системе с идеально проводящей плоскостью и однородным магнитным полем при наличии запаздывания электромагнитных волн и при образовании в системе виртуального катода или при параметрах, близких к этому состоянию. **Методы.** В работе в рамках численного моделирования изучается динамика цилиндрического электронного пучка, влетающего через идеально проводящую плоскость в сильное продольное магнитное поле. Частицы – крупные. Изучение динамики пучков проводится путём решения уравнений движения методом Рунге–Кутты 4-го порядка. Поле пространственного заряда рассчитывается по соотношениям Лиенара–Вихерта с учётом запаздывания. Влияние плоскости учитывается методом зеркальных изображений. Время и место формирования виртуального катода оценивается по одномерной модели, что определяет шаг интегрирования по времени численной схемы. **Результаты.** Показано, что при формировании виртуального катода в цилиндрическом пучке, частицы, прошедшие область виртуального катода, испытывают ускорение под действием пространственного заряда, сосредоточенного вблизи проводящей границы. Происходит перераспределение энергии электронов пучка между электронами потока – электроны в хвосте потока ускоряются, электроны вблизи плоскости влёта замедляются. Подобные процессы имеют место и при отсутствии виртуального катода при инжекции в полупространство с магнитным полем короткого электронного импульса. **Заключение.** С ростом плотности пространственного заряда пучка в системе электроны, влетающие в пространство взаимодействия первыми, ускоряются сильнее, последующие электроны сильнее замедляются. При этом также происходит увеличение расстояния, проходимого пучком. Особенно сильное ускорение наблюдается после области виртуального катода.

Ключевые слова: электронный пучок, потенциалы Лиенара–Вихерта, сильноточная электроника, виртуальный катод, приборы О-типа, метод крупных частиц.

Образец цитирования: Шеин А.Г., Аликов С.А. Динамика цилиндрических электронных пучков при инжекции в полупространство с идеально проводящей границей // Известия вузов. ПНД. 2020. Т. 28, № 5. С. 491–504. <https://doi.org/10.18500/0869-6632-2020-28-5-491-504>

Статья опубликована на условиях лицензии Creative Commons Attribution License (CC-BY 4.0).

Dynamics of cylindrical electron beams injecting in a half-space with perfectly-conducting boundary

A. G. Shein, S. A. Alikov

Volgograd State Technical University
28, Lenin Ave., Volgograd 400005, Russia
E-mail: professor39@mail.ru, sputnik_as@mail.ru
Correspondence should be addressed to Alexandr G. Shein, professor39@mail.ru
Received 23.05.2020, accepted 4.08.2020, published 30.10.2020

The **purpose** of this work is to study the dynamics of electron beams and bunches in a system with an ideally conducting plane and a uniform magnetic field in the presence of delayed electromagnetic waves when a virtual cathode is formed in the system and with parameters close to this state. **Methods.** The dynamics of a cylindrical electron beam flying through an ideally conducting plane into a strong longitudinal magnetic field is studied by numerical simulation. Particles are large. The study of the beam dynamics is carried out by solving the equations of motion by the 4th-order Runge–Kutta method. The space charge field is calculated using the Lienard–Wiechert relations taking into account the delay effect. The influence of the plane is taken into account by the method of mirror images. The time and place of virtual cathode formation is estimated by one-dimensional model, which determines the time step of the numerical method. **Results.** It is shown that during the formation of a virtual cathode in a cylindrical beam, particles passing through the virtual cathode region are accelerated by the space charge concentrated near the conducting boundary. The electron beam energy is redistributed between the electrons – the electrons in the tail of the beam are accelerated, the electrons in the vicinity of the entry plane are decelerated. Similar processes also take place in the absence of a virtual cathode when a short electron pulse is injected into a half-space with a magnetic field. **Conclusion.** Increasing space charge density of the beam in the system, the electrons entering the interaction space first are accelerated more strongly, subsequent electrons slow down more strongly. In this case, the distance traveled by the beam also increases. Especially strong acceleration is observed after the virtual cathode region.

Key words: electron beam, Lienard–Wiechert potentials, high-current electronics, virtual cathode, O-type devices, large particle method.

Reference: Shein A.G., Alikov S.A. Dynamics of cylindrical electron beams injecting in a half-space with perfectly-conducting boundary. *Izvestiya VUZ. Applied Nonlinear Dynamics*, 2020, vol. 28, no. 5, pp. 491–504.
<https://doi.org/10.18500/0869-6632-2020-28-5-491-504>

This is an open access article distributed under the terms of Creative Commons Attribution License (CC-BY 4.0).

Введение

Постоянный интерес к изучению поведения электронных потоков связан с тем, что они играют значительную роль в науке и технике как в нерелятивистской, так и в релятивистской областях скоростей. Наличие кулоновского взаимодействия между отдельными электронами и существование пространственного заряда в большом ансамбле частиц приводит к образованию потенциальной ямы, которая, как и запаздывание волн пространственного заряда при релятивистских скоростях существенно влияет на динамику движения электронов. Изучение таких процессов ведется давно, начиная с работ Чайлда [1], Ленгмюра [2–4], Бурсиана [5], Богуславского [6], опубликованных в начале прошлого столетия, и продолжается в настоящее время [7–11].

На структуру пучка и характер движения электронов оказывают влияние как скорости частиц, так и плотность пространственного заряда, и плотность тока на влёте в пространство взаимодействия.

Действие пространственного заряда на характер движения электронов, сфокусированных продольным магнитным полем, заключается, прежде всего, в образовании виртуального катода, который препятствует поступательному движению электронов при отсутствии внешнего ускоряющего электрического поля. В работе [12] для бесконечно длинного пучка, транспортируемого в

ограниченной в поперечном направлении цилиндрической области, получены соотношения, позволяющие определить критические токи для сплошного цилиндрического и трубчатого потоков, превышение которых препятствует дальнейшему продвижению электронов. Такие же процессы существуют и при движении потока в неограниченной в поперечном направлении области [10]. Однако все исследования предполагают наличие электрода, ограничивающего электронный поток вдоль поступательного направления движения, в связи с чем динамика и структура пучка в процессе его движения в неограниченной области остаётся не изученной.

1. Методика анализа

Электронный поток представляется в виде ансамбля «крупных» частиц, заряд и масса которых зависят от величины тока I и количества крупных частиц N , влетающих в пространство взаимодействия за шаг Δt . Заряд каждой частицы $q = I\Delta t/N$, масса $m = km_e$, где $k = |q|/e$ – коэффициент укрупнения, e – абсолютное значение заряда электрона, m_e – его масса. В мгновенной системе отсчёта частицы представляются в виде шаров одинакового размера, параметры которых остаются неизменными в процессе движения. Пучок цилиндрической формы 2, сфокусированный магнитным полем конечной величины \vec{B} , вектор напряженности которого ориентирован вдоль направления движения потока с заданными (рис. 1) поперечными размерами, влетает в пространство взаимодействия, свободное от внешних электростатических полей, через сетку 1, которая в рассматриваемой модели заменена идеально проводящей плоскостью.

Изучение динамики потока проводится на основе решения уравнений движения каждой крупной частицы, масса, заряд и радиус которой сохраняются во все время движения. Поле пространственного заряда учитывается в рамках подхода «частица-частица», развитого в [13]. Для расчета поля пространственного заряда в точке нахождения частицы в данный момент времени используются соотношения Лиенара–Вихерта [14], которые учитывают запаздывание электромагнитного поля от других частиц в данной точке.

Соотношения Лиенара–Вихерта относятся к частице, движущейся в неограниченном пространстве, а наличие сетки нарушает это условие. Исходя из модели идеально проводящей сетки,

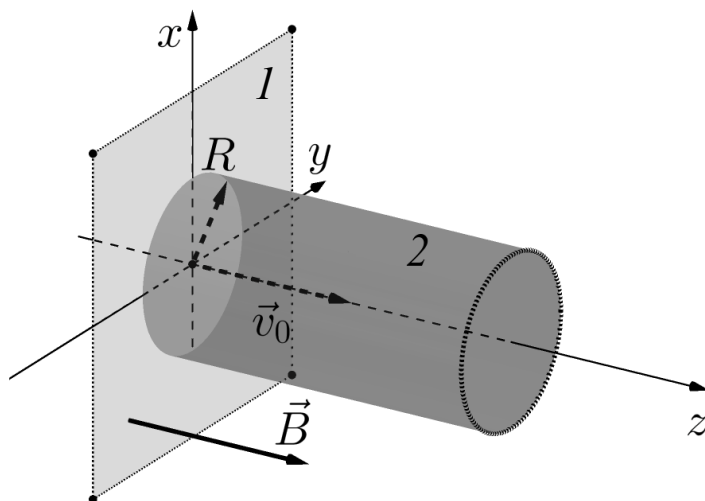


Рис. 1. Рассматриваемая система: 1 – идеально-проводящая плоскость; 2 – цилиндрический электронный пучок радиусом R с начальными скоростями электронов \vec{v}_0 , поступающий в полупространство с продольным магнитным полем \vec{B}
 Fig. 1. The system under consideration: 1 – perfectly conductive plane; 2 – cylindrical electron beam of radius R with initial velocities \vec{v}_0 entering the half-space with a longitudinal magnetic field \vec{B}

для компенсации тангенциальной составляющей электромагнитного поля строятся электрические изображения. При этом траектории частиц полностью отражаются, и с учётом соотношений Лиенара–Вихерта можно показать, что такое отражение приводит к обнулению тангенциальной составляющей электрического поля и нормальной составляющей магнитного поля в плоскости сетки [14].

Для решения уравнений движения крупных частиц применяется метод Рунге–Кутты 4-го порядка точности, а определение времени запаздывания поля ведётся методом сфер [14].

Если скорость электронов потока сравнительно мала (менее $0.3c$), для такой системы можно оценить время и расстояние начала образования виртуального катода, когда первые электроны начинают поворачивать назад. Данная оценка необходима для контроля шага численной схемы при трёхмерном численном моделировании методом крупных частиц.

Уравнения в неограниченном с одной стороны диоде в одномерном приближении, справедливые вплоть до момента образования виртуального катода пока нет обратного тока,

$$\frac{\partial E_z}{\partial z} = \frac{\rho}{\varepsilon_0}, \quad \frac{dv_z}{dt} = -\frac{e}{m}, \quad \frac{\partial E_z}{\partial t} + \frac{\rho v_z}{\varepsilon_0} = 0,$$

где ρ – объемная плотность зарядов.

Если рассматривать модель плоских листов, то поле заряженной плоскости с поверхностной плотностью заряда ρdz в нерелятивистском случае, когда запаздывания нет

$$dE_z = \frac{\rho dz}{2\varepsilon_0}.$$

После интегрирования с учетом введенных изображений положительных зарядов

$$E_z = \frac{1}{2\varepsilon_0} \left(\int_0^z \rho_+(z, t) dz + \int_{-\infty}^0 \rho_-(z, t) dz - \int_z^{\infty} \rho_+(z, t) dz \right) = -\frac{1}{\varepsilon_0} \int_z^{\infty} \rho(z, t) dz,$$

так как

$$\rho_-(-z, t) = -\rho_+(z, t) = -\rho(z, t).$$

В этом случае уравнения движения и уравнения поля допускают сведение к системе характеристических уравнений

$$\frac{dE_z}{dt} = 0,$$

$$\frac{dv_z}{dt} = -\frac{e}{m} E_z,$$

$$\frac{dz}{dt} = v_z.$$

Их решение

$$E_z = E_{z0},$$

$$v_z = -\frac{e}{m} E_{z0}(t - t_0) + v_{z0},$$

$$z = -\frac{e}{m} E_{z0} \frac{(t - t_0)^2}{2} + v_{z0}(t - t_0).$$

Здесь $E_{z0} = -j_0 t_0 / \varepsilon_0$ – поле в плоскости влёта, t – текущее время, t_0 – время влета частицы в пространство взаимодействия, j_0 – плотность тока.

Введем новые переменные: $\omega_p = \sqrt{e|\rho_0|/m\varepsilon_0}$ – плазменная частота; $\eta = \omega_p t$, $\eta_0 = \omega_p t_0$ – текущая и начальная фазы частицы; $Z = \omega_p z / v_{z0}$, $u = v / v_{z0}$ – безразмерные координата и скорость.

Тогда

$$u = -\eta_0(\eta - \eta_0) + 1,$$

$$Z = -\eta_0 \frac{(\eta - \eta_0)^2}{2} + (\eta - \eta_0).$$

Виртуальный катод при этом образуется для электрона, влетающего в пространство взаимодействия с любой начальной фазой $\eta_0 > 0$. Минимум времени образования виртуального катода определяется условием $u = 0$:

$$\eta_- = \eta_0 + \frac{1}{\eta_0}.$$

Очевидно, что минимум достигается при $\eta_0 = 1$, $\eta_- = 2$, тогда начальная координата виртуального катода $Z = 0.5$, что соответствует

$$z = \frac{v_{z0}}{2\omega_p}. \quad (1)$$

Релятивистское обобщение данного соотношения в тех же предположениях

$$z = \frac{1}{\omega_p} \frac{c^2}{v_{z0}\sqrt{\gamma_0}} (\gamma_0 - 1), \quad (2)$$

где γ_0 – лоренц-фактор в плоскости влёта $\gamma_0 = 1/\sqrt{1 - v_{z0}^2/c^2}$. Первым электроном, приобретающим нулевую скорость, является электрон с фазой влёта $\eta_0 = \sqrt{\gamma_0}$, время образования ВК $\eta_- = 2\sqrt{\gamma_0}$.

2. Анализ результатов

2.1. Непрерывные потоки. На практике, как правило, наибольший интерес представляют протяженные электронные потоки. Выбор параметров модели пучка обусловлен следующими соображениями.

Величина фокусирующего магнитного поля должна обеспечивать сохранение формы и поперечных размеров потока при достаточно больших значениях плотности пространственного заряда (с учетом увеличения плотности заряда в области виртуального катода) в диапазоне выбранных значений скоростей (от $0.1c$ до $0.5c$). Пример внешнего вида такого длинного пучка после прохождения области образования виртуального катода приведен на рис. 2.

В качестве базового варианта при расчетах выбраны параметры пучка с величиной плазменной частоты 6 ГГц при токе 1 кА, а временной шаг расчета Δt выбирается не более 10^{-12} секунды, за которое частица с максимальной скоростью проходит расстояние 0.18 мм.

На рис. 3 приведены рассчитанные по соотношениям (1) и (2) зависимости координаты плоскости образования виртуального катода от скорости при неизменном токе (сплошная линия 4 – (1), штриховая кривая 5 – (2)) и результаты, полученные в результате численного расчета

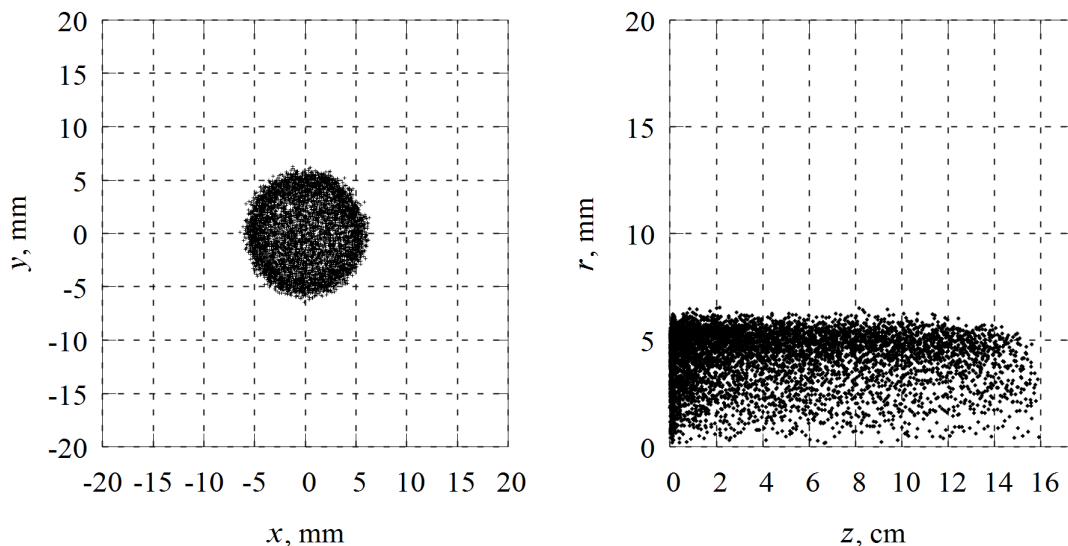


Рис. 2. Вид протяженного электронного потока (магнитное поле 1.0 Тл, плотность пространственного заряда 0.443 Кл/м^3 , $v/c = 0.5$, радиус пучка 5.48 мм)

Fig. 2. The shape of the long electron beam (magnetic field 1.0 T, space charge density 0.443 C/m^3 , $v/c = 0.5$, beam radius 5.48 mm)

(точки, соединённые гладкими кривыми) для трёх вариантов расчётов. Первый вариант (результат 1) является результатом моделирования по изложенному методу крупных частиц с соотношениями Лиенара–Вихерта для электромагнитного поля. Данный случай учитывает запаздывание.

Сравнение с результатами моделирования без запаздывания проводилось с двумя вариантами расчётов. В первом случае (результат 2) для электрического поля использовались кулоновские соотношения, а для расчётов магнитного поля – закон Био–Савара–Лапласа. Во втором случае (результат 3) магнитное поле не учитывалось.

Как следует из рис. 3, наличие запаздывания приводит к тому, что формирование виртуального катода происходит дальше от плоскости влёта, чем по расчётам без запаздывания. Также можно отметить, что время начала формирования виртуального катода при наличии запаздывания увеличивается, а скорость частиц в хвосте потока, приобретённая за то же время, снижается.

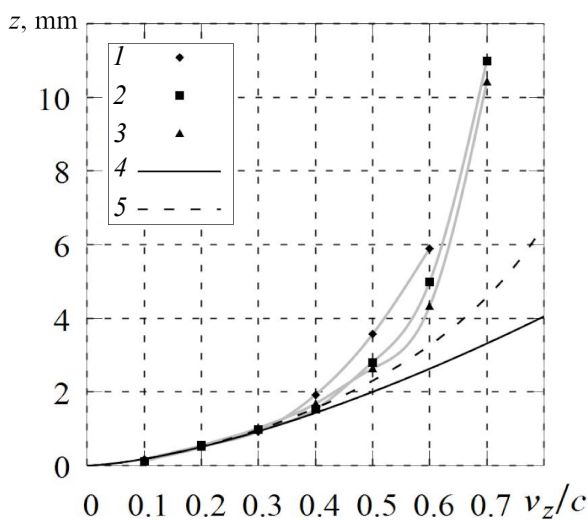


Рис. 3. Зависимость изменения положения начала формирования виртуального катода от скорости электронного потока: 1 – расчёты методом крупных частиц с запаздыванием; 2 – расчёты методом крупных частиц без запаздывания; 3 – расчёты методом крупных частиц по кулоновским соотношениям для поля \vec{E} ; 4 – нерелятивистская одномерная теория; 5 – релятивистская одномерная теория

Fig. 3. Dependence of the change in position of the beginning of the virtual cathode formation on the electron beam velocity: 1 – simulation by large particles method with delay effect; 2 – simulation by large particles method without delay effect; 3 – simulation by large particles method using Coulomb law for electric field \vec{E} ; 4 – non-relativistic one-dimensional theory; 5 – relativistic one-dimensional theory

Расхождение с одномерной теорией связано с двумя основными факторами. Во-первых, модель плоских листов близка к модели цилиндрического пучка только при условии, что диаметр пучка много больше расстояния от плоскости влёта до виртуального катода. Расчёты проводились с пучком радиусом 5.48 мм, и из рис. 3 следует, что в случае, когда наблюдается расхождение, данное условие не выполняется. Во-вторых, в модели плоских листов запаздывание не учитывается, так как выше использовались обычные соотношения для электромагнитного поля неподвижной плоскости, что в релятивистском случае уже не справедливо.

Свой вклад в положения расчётных точек вносят и особенности метода крупных частиц. За время образования виртуального катода в расчётах принимается время, когда одна крупная частица приобретает скорость в отрицательном направлении оси z , именно её координаты приведены на рис. 3. Но в расчётах наблюдались некоторые особенности. В частности, для отдельных пучков отрицательную скорость приобретала не одна крупная частица, а несколько крупных частиц одновременно. В данном случае за плоскость образования виртуального катода принималась координата ближайшей из них к плоскости влёта, а расстояние между наиболее близкой к плоскости влёта частицей и наиболее далекой росло с ростом скорости.

Параметры пучка, показанные на рис. 3, таковы: ток $I = 1$ кА (плотность тока неизменна при всех скоростях), величина объемной плотности пространственного заряда ρ изменяется от 0.059 до 0.354 Кл/м³.

Создание протяженных электронных потоков представляет собой достаточно сложную техническую задачу даже при наличии эффективной фокусировки. И связано это, как было указано ранее, с действием пространственного заряда, заключающемся в появлении виртуального катода. При этом часть электронов, имеющих достаточную энергию, преодолевает потенциальный барьер и продолжает движение.

В любом случае, в том числе и при отсутствии виртуального катода, неограниченный в направлении движения поток находится в условиях, когда пространственный заряд не скомпенсирован в этом направлении, в отличие от бесконечно длинного потока. Наличие продольной составляющей собственного поля пространственного заряда потока не меняет характер продольного движения электронов, но влияет на скорости поступательного движения, увеличивая их. Этот процесс должен наблюдаться как в нерелятивистской, так и при релятивистской скорости, как при наличии виртуального катода, так и при его отсутствии. Для доказательства этого утверждения сошлемся на рис. 4, взятый из работы [15, рис. 36], на котором показано, что даже в одномерной модели явно прослеживается увеличение импульса от $p_z/mc=0.5$ в плоскости влета частиц до $p_z/mc = 1$ на расстоянии 1 см, что соответствует изменению скорости от $0.45c$ до $0.71c$ для тех частиц, которые преодолели потенциальный барьер.

Похожие картины фазовых портретов потоков показаны и в работе [16].

Иллюстрация этого процесса приведена на рис. 5, где показаны фазовые портреты потока при скоростях $0.1c$ и $0.3c$ с токами $I = 1.0$ А и 100 А. Ускорение электронов может наблюдаться в сравнительно сла-

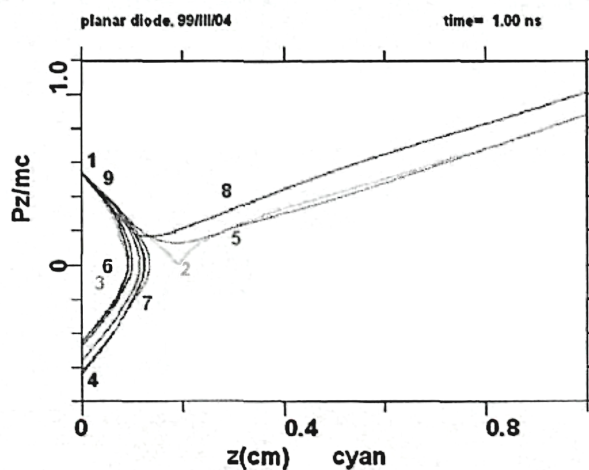


Рис. 4. Фазовый портрет (одномерная модель) [15, рис. 36]

Fig. 4. Phase portrait (one-dimensional model) [15, fig. 36]

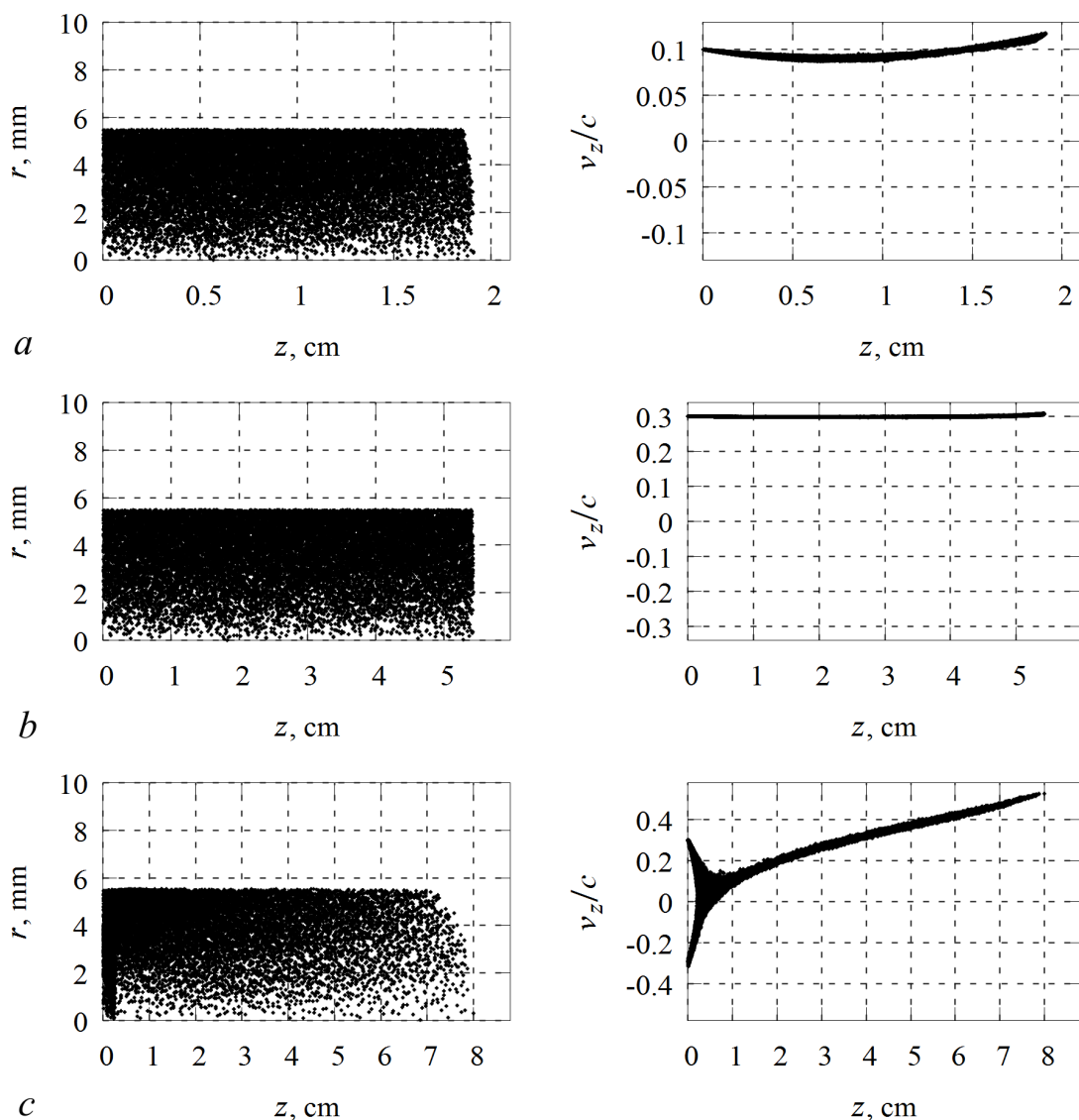


Рис. 5. Фазовые портреты и формы электронных пучков. Ток $I = 1.0$ А, $\rho \approx 3.54$ мКл/м³, $v/c = 0.1$ (a); $I = 1.0$ А, $\rho \approx 0.118$ мКл/м³, $v/c = 0.3$ (b); $I = 100$ А, $\rho \approx 11.8$ мКл/м³, $v/c = 0.3$ (c)

Fig. 5. Phase portraits and the shape of the electron beams. Current $I = 1.0$ А, $\rho \approx 3.54$ мС/м³, $v/c = 0.1$ (a); $I = 1.0$ А, $\rho \approx 0.118$ мС/м³, $v/c = 0.3$ (b); $I = 100$ А, $\rho \approx 11.8$ мС/м³, $v/c = 0.3$ (c)

боточных нерелятивистских потоках (рис. 5, b) до начала формирования минимума потенциала, но особенно четко это видно после образования виртуального катода, когда на электроны, прошедшие дальше, действует дополнительная сила за счет большой величины заряда, сосредоточенного в потенциальной яме. Скорость пучка возрастает, что продемонстрировано в данных примерах.

При дальнейшем уменьшении величины объемной плотности пространственного заряда этот эффект исчезает.

2.2. Импульс тока. Непрерывные потоки наиболее часто применяются, и поэтому их поведению и характеристикам уделяется большое внимание. Однако в ряде случаев интерес могут представлять отдельные сгустки электронов (рис. 6–8), движущиеся в пространстве в

фокусирующем магнитном поле. Особенности их поведения, в том числе и характер изменения их формы и скорости, будут отличаться от непрерывных потоков с аналогичными величинами объемной плотности пространственного заряда, плотности тока, скорости.

Пусть в пространство, в котором существует продольное однородное магнитное поле, направленное вдоль направления поступательного движения частиц, инжектируется в течение ограниченного времени цилиндрический электронный поток. Геометрическая длина электронного импульса зависит от величины скорости, объемной плотности пространственного заряда, плотности тока. Временной интервал инжекции потока может быть выбран как из условия формирования виртуального катода в сгустке, так и при его отсутствии. Процессы, протекающие при этом, существенно различаются.

На рис. 6 приведены картины внешнего вида короткого сгустка, при формировании которого за короткий промежуток времени не успевает сформироваться потенциальная яма.

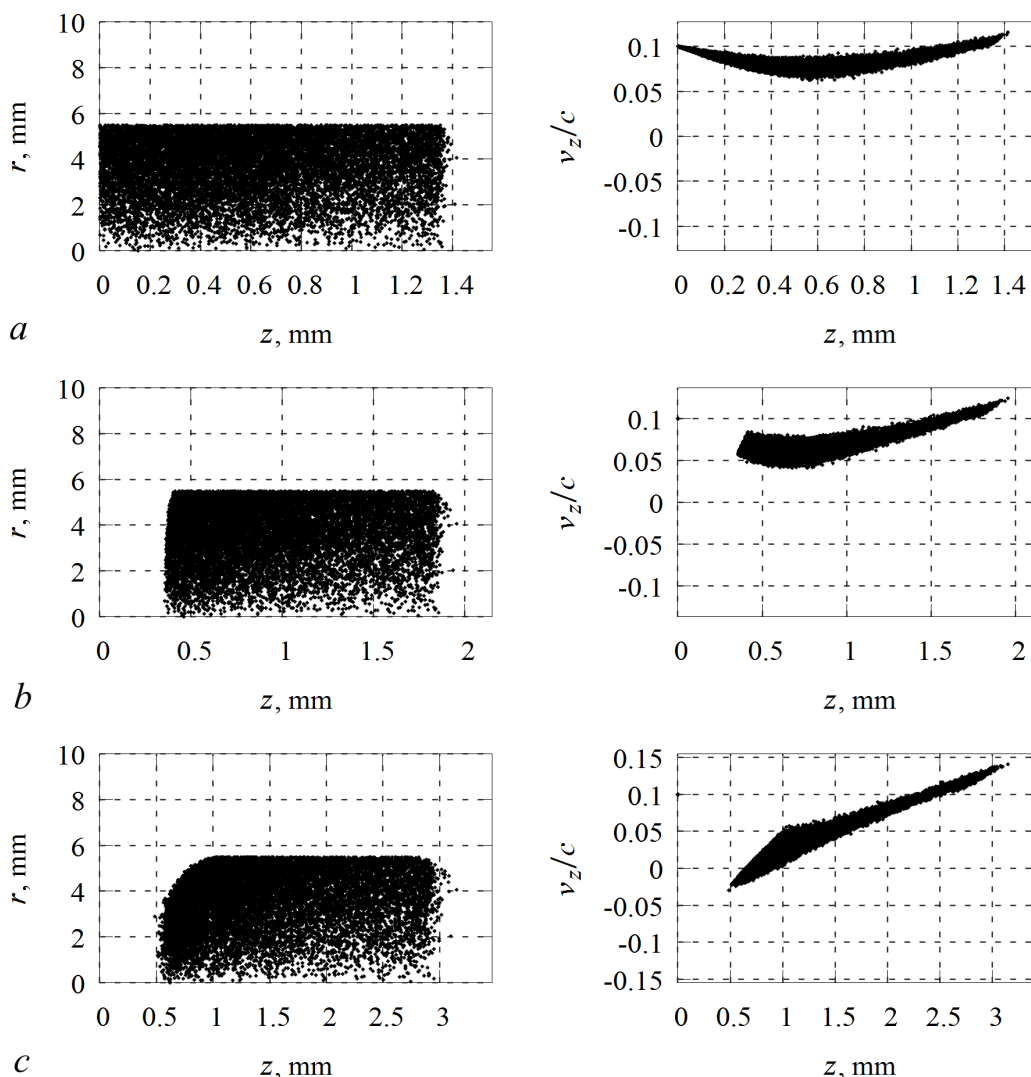


Рис. 6. Изменение формы импульса длительностью 45 пс и его фазового портрета в процессе движения при токе $I = 100$ А и начальной скорости $v/c = 0.1$ через: 45 пс (а); 60 пс (б); 90 пс (с)

Fig. 6. Change in the shape of an electron pulse with duration of 45 ps and its phase portrait during movement at the current $I = 100$ A, and the initial speed $v/c = 0.1$ after: 45 ps (a); 60 ps (b); 90 ps (c)

Для сравнения приведены графики, демонстрирующие пространственное расположение и фазовые портреты импульсов с начальными скоростями $0.1c$ (объемная плотность пространственного заряда $\rho = 11.8 \text{ мКл/м}^3$), а на рис. 7 – с начальной скоростью $0.3c$ ($\rho = 33.4 \text{ мКл/м}^3$) через 45 пс (время формирования сгустка), 60 пс и 90 пс.

В процессе движения форма сгустка в поперечном сечении изменяется незначительно, а геометрическая длина возрастает. Это обусловлено действием сил, растягивающих сгусток, и появлением отрицательной скорости электронов.

Совершенно иная картина наблюдается в том случае, когда в течение формирования сгустка появляется потенциальная яма и образуется виртуальный катод. Наличие в сгустке электронов, отраженных от потенциальной ямы и движущихся в обратную сторону, приводит к эффекту «прилипания» сгустка к плоскости влета и увеличению его длины.

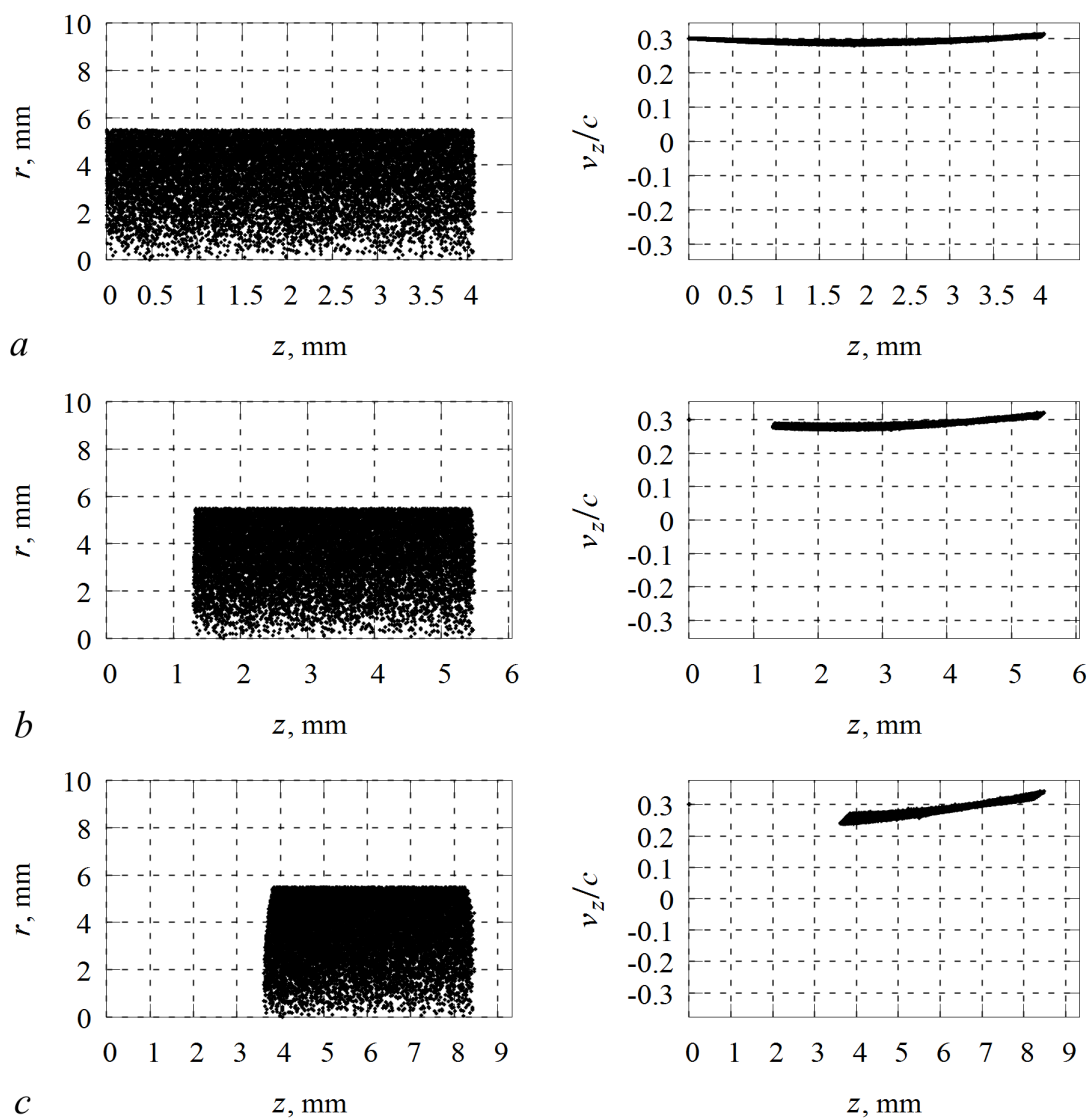


Рис. 7. Изменение формы импульса длительностью 45 пс и его фазового портрета в процессе движения при токе $I = 100 \text{ А}$, и начальной скорости $v/c = 0.3$ через: 45 пс (а); 60 пс (б); 90 пс (с)

Fig. 7. Change in the shape of an electron pulse with duration of 45 ps and its phase portrait during movement at the current $I = 100 \text{ А}$, and the initial speed $v/c = 0.3$ after: 45 ps (a); 60 ps (b); 90 ps (c)

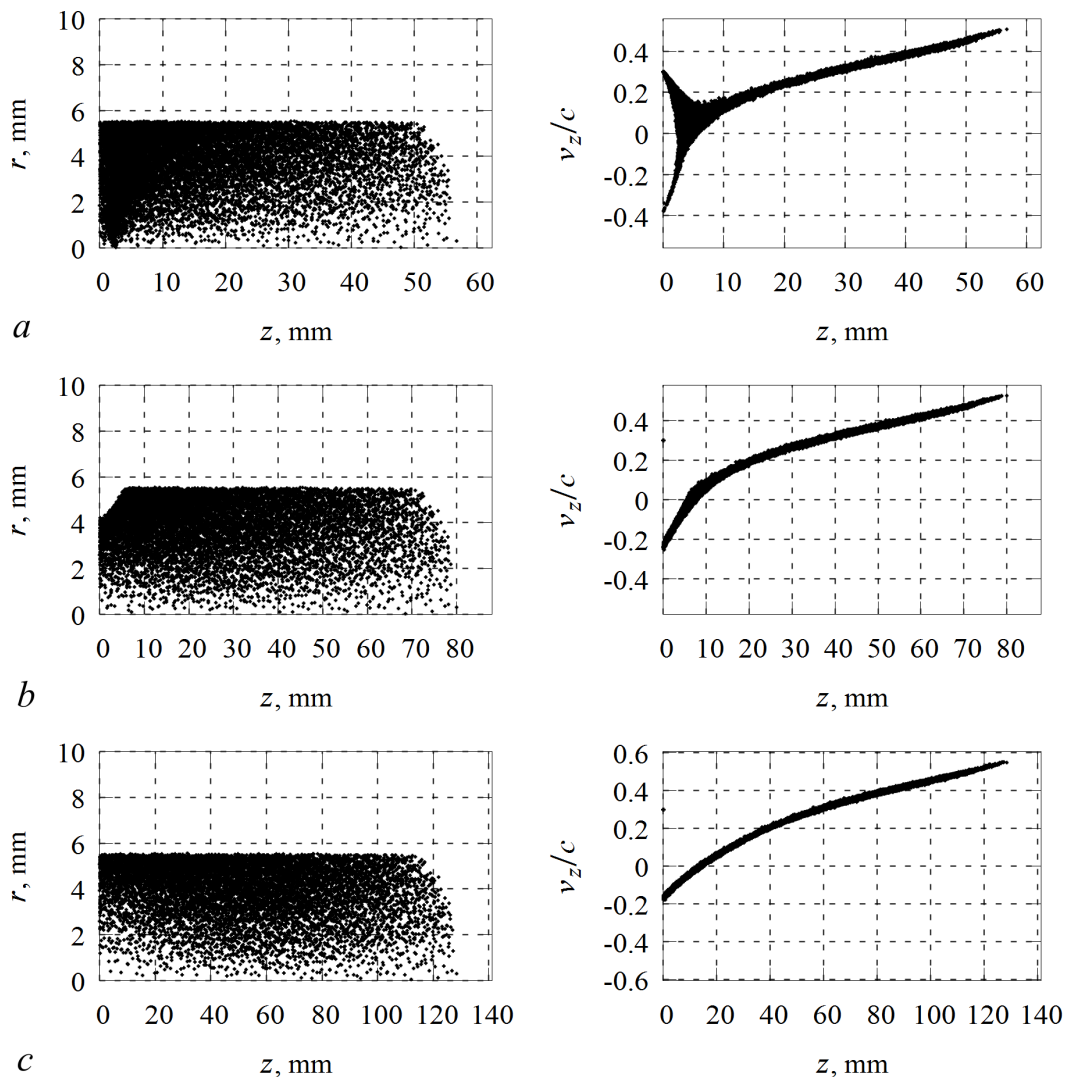


Рис. 8. Изменение формы импульса длительностью 450 пс и его фазового портрета в процессе движения при токе $I = 100$ А, и начальной скорости $v/c = 0.3$ через: 45 пс (а); 60 пс (б); 90 пс (с)

Fig. 8. Change in the shape of an electron pulse with duration of 450 ps and its phase portrait during movement at the current $I = 100$ A, and the initial speed $v/c = 0.3$: 45 ps (a); 60 ps (b); 90 ps (c)

На рис. 8 для тех же параметров, которые использованы при анализе процессов, показанных на рис. 7, приведена картина изменения формы сгустка. В течение 450 пс формируется сгусток, после чего электроны не поступают в пространство (рис. 8, а). В дальнейшем сгусток не отрывается от плоскости инжекции, а отсутствие поступления электронов приводит к исчезновению пополнения электронов в сгусток.

Подобное явление наблюдается во всех случаях, если время формирования сгустка превышает время образования виртуального катода.

Заключение

Одной из причин увеличения скорости движения электронных потоков является появление продольной (вдоль направления движения потока) составляющей силы, вызванной ограниченностью длины пучка.

Ограниченность потока и вызванное этим влияние собственных полей пространственного заряда приводит к изменению фазового портрета ограниченного в пространстве короткого по времени электронного сгустка, увеличению его геометрической длины в процессе движения.

Существенную роль в поведении ограниченного сгустка играет время его образования, поскольку при появлении отраженных электронов ограничение инжекции электронов не позволяет организовать отдельный самостоятельный сгусток, перемещающийся в пространстве.

Библиографический список

1. *Child C.D.* Discharge from hot CaO // *Phys. Rev. (Series I)*. 1911. Vol. 32, no. 5. P. 492.
2. *Langmuir I.* The effect of space charge and residual gases on thermionic currents in high vacuum // *Phys. Rev. (Second Series)*. 1913. Vol. 2, no. 6. P. 450–486.
3. *Langmuir I.* The effect of space charge and initial velocities on the potential distribution and thermionic current between parallel plane electrodes // *Phys. Rev.* 1923. Vol. 21, no. 4. P. 419–435.
4. *Langmuir I., Blodgett K.B.* Currents limited by space charge between coaxial cylinders // *Phys. Rev.* 1923. Vol. 22, no. 4. P. 347–356.
5. *Бурсиан В.Р., Павлов В.И.* Об одном частном случае влияния объемного заряда на прохождение потока электронов в пустоте // *Журнал русского физ.-хим. общества*. 1923. Т. 55. С. 71–80.
6. *Богуславский С.А.* // *Труды ГЭЭИ*. 1924. Вып. 3. С. 18–27.
7. *Морозов М.Ю., Храмов А.Е.* Влияние внешнего магнитного поля на величину критического тока электронного пучка, при котором формируется виртуальный катод // *Физика плазмы*. 2007. Т. 33, № 7. С. 610–619.
8. *Филатов Р.А., Храмов А.Е.* Моделирование колебательных процессов в пучково-плазменной системе с виртуальным катодом в газонаполненном пространстве взаимодействия // *Физика плазмы*. 2011. Т. 37, № 5. С. 429–443.
9. *Келлин Н.С., Толмачев А.И.* Влияние пространственного заряда и начальной скорости электронов на распределение потенциала в плоском диоде // *Журнал технической физики*. 2012. Т. 82, № 4. С. 86–89.
10. *Магда И.И., Мележик О.Г., Пащенко А.В., Романов С.С., Шаповал И.Н., Новиков В.Е.* Модификация закона Чайльда–Ленгмюра–Богуславского для диодного промежутка в системе с виртуальным катодом // *Вопросы атомной науки и техники ВАНТ*. 2012. Т. 80, № 4. С. 133–137.
11. *Куркин С.А., Короновский А.А., Храмов А.Е.* Особенности формирования и динамики виртуального катода с учетом собственных магнитных полей релятивистского электронного потока // *Физика плазмы*. 2013. Т. 39, № 4. С. 333–344.
12. *Рухадзе А.А., Богданкевич Л.С., Росинский С.Е., Рухлин В.Г.* Физика сильноточных релятивистских пучков. М.: Атомиздат, 1980. 200 с.
13. *Shein A.G., Bakulin V.M., Mutovkin A.N.* Computing the space-charge fields of M-type tubes // *Journal of Communications Technology and Electronics*. 2000. Vol. 45, no. 10. P. 1146–1149.
14. *Alikov S.A., Shein A.G.* Peculiar properties of the electron beam dynamics simulation by particle-particle methods taking into account delay effects // *ITM Web of Conferences*. 29th International Crimean Conference «Microwave & Telecommunication Technology» (CriMiCo'2019) (Sevastopol, Russia, September 8–14, 2019). 2019. Vol. 30. DOI: <https://doi.org/10.1051/itmconf/20193009005>.

15. Тараканов В.П. Теоретический и численный анализ нелинейных задач физики плазмы посредством кода КАРАТ: дисс. ... доктора физ.-мат. наук. М., 2011. 264 с.
16. Гинзбург С.Л., Дьяченко В.Ф., Палейчик В.П., Ходамаев К.В. Расчет характеристик излучения генератора на виртуальном катоде // Журнал технической физики. 1999. Т. 69, № 2. С. 87–92.

References

1. Child C.D. Discharge from hot CaO. *Phys. Rev. (Series I)*, 1911. vol. 32, no. 5, p.492.
2. Langmuir I. The effect of space charge and residual gases on thermionic currents in high vacuum. *Phys. Rev. (Second Series)*, 1913, vol. 2, no. 6, pp. 450–486.
3. Langmuir I. The effect of space charge and initial velocities on the potential distribution and thermionic current between parallel plane electrodes. *Phys. Rev.*, 1923, vol. 21, no. 4, pp. 419–435.
4. Langmuir I. and Blodgett K.B. Currents limited by space charge between coaxial cylinders. *Phys. Rev.*, 1923, vol. 22, no. 4, pp. 347–356.
5. Bursian V.R. and Pavlov V.I. *Journal of the Russian Physical and Chemical Society*, 1923, vol. 55, pp.71–80 (in Russian).
6. Boguslavskii S.A. *Proceedings of the State Experimental Electro-Technical Institute*, 1924, no. 3, pp. 18–27 (in Russian).
7. Morozov M.Yu. and Hramov A.E. Effect of the external magnetic field on the critical current for the onset of a virtual cathode in an electron beam. *Plasma Physics Reports*, 2007, vol. 33, no. 7, pp. 553–561.
8. Filatov R.A. and Hramov A.E. Simulation of oscillatory processes in a beam-plasma system with a virtual cathode in gas-filled interaction space. *Plasma Physics Reports*, 2011, vol. 37, no. 5, pp. 395–408.
9. Kellin N.S. and Tolmachev A.I. Effect of space charge and the initial electron velocity on the potential distribution in a plane diode. *Technical Physics. The Russian Journal of Applied Physics*, 2012, vol. 57, no. 4, pp. 512–515.
10. Magda I.I., Melezhik O.G., Pashchenko A.V., Romanov S.S., Shapoval I.M., Novikov V.E. Modification of the Child–Langmuir–Boguslavsky law for the diode gap in the system with virtual cathode. *Problems of Atomic Science and Technology (PAST)*, 2012, vol. 80, no. 4, pp. 133–137.
11. Kurkin S.A., Koronovskii A.A., Hramov A.E. Specific features of virtual cathode formation and dynamics with allowance for the magnetic self-field of a relativistic electron beam. *Plasma Physics Reports*, 2013, vol. 39, № 4, pp. 296–306.
12. Rukhadze A.A., Bogdankevich L.S., Rosinskii S.E., Rukhlin V.G. Physics of high-current relativistic electron beams. Moscow, Atom-izdat, 1980, 200 p. (in Russian).
13. Shein A.G., Bakulin V.M., Mutovkin A.N. Computing the space-charge fields of M-type tubes. *Journal of Communications Technology and Electronics*, 2000, vol. 45, no. 10. pp. 1146–1149.
14. Alikov S.A., Shein A.G. Peculiar properties of the electron beam dynamics simulation by particle-particle methods taking into account delay effects, *ITM Web of Conferences. 29th International Crimean Conference «Microwave & Telecommunication Technology» (CriMiCo '2019) (Sevastopol, Russia, September 8–14, 2019)*. 2019, vol. 30. DOI: <https://doi.org/10.1051/itmconf/20193009005>.
15. Tarakanov V.P. Theoretical and numerical analysis of nonlinear problems in plasma physics using

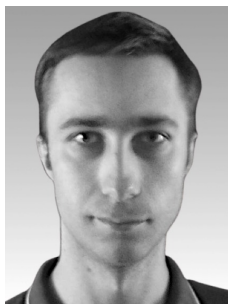
the KARAT code: Doctor of Physical and Mathematical Sciences thesis. Moscow, 2011, 264 p. (in Russian).

16. Ginzburg S.L., D'yachenko V.F., Paleichik V.P., Khodataev K.V. Calculation of the characteristics of the radiation from a generator with a virtual cathode. *Technical Physics*, 1999, vol. 44, no. 2. pp. 212–217. DOI: 10.1134/1.1259286.



Шейн Александр Георгиевич – родился в Ленинграде (1939). Окончил Харьковский государственный университет им. А.М. Горького (1961). Защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности «радиофизика» (1965). Присуждена ученая степень доктора физико-математических наук по специальности «физическая электроника» (1978). Присвоено звание доцента (1967), а затем профессора (1980). До 1985 года работал в Харьковском институте радиоэлектроники (доцентом, заведующим кафедрой, проректором по научной работе). Ректор Симферопольского государственного университета (1985–1991). Заведующий кафедрой физики Волгоградского государственного технического университета (1993–2013). В настоящее время – профессор этого же университета. Академик Метрологической академии России. Член редколлегии журнала «Биомедицинская радиоэлектроника». Награжден орденом Дружбы, знаком «За отличные успехи в работе» МВССО СССР, знаком «Почетный работник высшего профессионального образования Российской Федерации». Научные интересы: электродинамика СВЧ, электроника СВЧ, биофизика. Научные публикации в журналах: «Радиотехника и электроника», «ЖТФ», «Известия вузов. Радиофизика», «Электромагнитные волны и электронные системы», «Биомедицинская радиоэлектроника», «Радиотехника», «Нелинейный мир», «Успехи современной радиоэлектроники, Приборы и техника эксперимента», «International Journal of Advance in Medical Science (AMS)» и ряде других.

Россия, 400005 Волгоград, пр-кт им. В.И. Ленина, 28
Волгоградский государственный технический университет
E-mail: professor39@mail.ru



Аликов Сергей Александрович – родился в Волгоградской области (1992). Окончил с отличием факультет электроники и вычислительной техники Волгоградского государственного технического университета по направлению «Физика» (2016). Аспирант кафедры «Физика» Волгоградского государственного технического университета. Научные интересы – численные методы в области СВЧ-электроники, релятивистская физика, точные решения нелинейных задач электродинамики и электроники. Опубликовал свыше 5 научных статей по указанным направлениям.

Россия, 400005 Волгоград, пр-кт им. В.И. Ленина, 28
Волгоградский государственный технический университет
E-mail: sputnik_as@mail.ru