

ОСОБЕННОСТИ ТЕСТИРОВАНИЯ ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ДЛЯ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРОННО-ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

И.В. Куликова

cuttlefish99@mail.ru

Н.К. Приступчик

АО «НПП «Исток» им. А.И. Шокина», г. Фрязино, Московская обл.,
Российская Федерация

Аннотация

Описана методика тестирования нового программного обеспечения EliSa, предназначенного для моделирования аксиально-симметричных электронных пушек, построенного на базе метода контрольных объемов на неструктурированных сетках и метода частиц в ячейке. Методика состоит из двух этапов. На первом этапе численные результаты, полученные с помощью программного обеспечения OperaFEA для планарной пушки Пирса, сопоставляются с результатами точного аналитического решения для оценки погрешности численного метода решения задачи траекторного анализа, реализованного в OperaFEA. На втором этапе численные результаты траекторного анализа и вольтамперные характеристики, полученные для аксиально-симметричной пушки с применением EliSa, сопоставляются с результатами, полученными с помощью OperaFEA для той же модели. Это позволяет оценить погрешность численного моделирования электронного потока с нулевым фазовым объемом, поскольку определенная на первом этапе погрешность в OperaFEA, не превышает 0,5 %. Сравнение вольтамперных характеристик, рассчитанных с помощью EliSa, с характеристиками, рассчитанными с использованием программного обеспечения EOS2, разработанного в конце 70-х годов прошлого века, показывает, что программное обеспечение EliSa демонстрирует повышение точности более чем на порядок

Ключевые слова

Пушка Пирса, ВАХ вакуумного диода, метод частиц в ячейке, метод контрольных объемов, неструктурированные сетки

Поступила 07.02.2025

Принята 07.04.2025

© Автор(ы), 2025

Введение. В настоящее время электровакуумные приборы (ЭВП) находят применение в ускорительной технике, системах связи, микроэлектронных технологиях, медицине и многих других областях народного хозяйства. Классические ЭВП, такие как например, лампы бегущей волны (ЛБВ), клистроны и магнетроны прошли долгий путь эволюционного развития, став многократно эффективнее и сложнее. В настоящее время разработка ЭВП, отвечающих неуклонно растущим требованиям, немыслима без применения современных систем инженерного анализа, представляющих собой программное обеспечение (ПО) для ЭВМ и позволяющих частично или полностью заменить натурные эксперименты вычислительными. Целью такой замены является повышение эффективности проектирования новых приборов и усовершенствование существующих. Вычислительный эксперимент не требует затрат материалов и не загружает производственные мощности предприятия, легко масштабируется, а следовательно, позволяет существенно сократить временные затраты на оптимизацию проектов электронно-оптических систем (ЭОС). Отечественное ПО для решения задач электронной оптики появилось во второй половине XX века [1–6].

Отметим, что отечественное ПО, разработанное в 70–80-е годы прошлого века, до сих пор используется в производственной практике, несмотря на ограничения, обусловленные уровнем развития информационных технологий того периода. Главным образом это касается компьютерной графики. В конце прошлого века разработчики ЭВП получили доступ к зарубежному коммерческому ПО, ориентированному на инженеров-проектировщиков, с ним отечественные разработки конкурировать не могли по ряду причин.

Следовательно, разработка современного ПО, ориентированного на инженеров-проектировщиков ЭОС, является актуальной проблемой, имеющей большое практическое значение.

Любое расчетное ПО, предназначенное для математического моделирования физических процессов на ЭВМ, позволяет получать результаты с точностью, не превышающей точность заложенных математических моделей [7–9]. В связи с этим вопрос верификации используемых моделей и методов моделирования имеет определяющее значение.

Можно сопоставить результаты математического моделирования с результатами натурального эксперимента, однако обеспечить в эксперименте уровень точности, необходимый для верификации математической модели, возможно далеко не всегда. Таким образом, более предпочтительным является сопоставление результатов математического моделирования и точного аналитического решения.

Настоящая работа посвящена тестированию нового ПО EliSa, предназначенного для решения аксиально-симметричных задач электронной оптики на неструктурированных сетках [10].

Цель настоящей работы — верифицировать реализацию численного метода моделирования электронного потока с нулевым фазовым объемом в ПО EliSa, сопоставляя вольтамперную характеристику (ВАХ) диодной электронной пушки специального вида (пушки Пирса), рассчитанную численно и аналитически в широком диапазоне ускоряющих напряжений [11].

Пушка Пирса формирует планарный электронный поток, граница которого параллельна продольной оси, а ее ВАХ описывается законом «степени 3/2». Эти свойства существенно упрощают сопоставление результатов траекторного анализа и ВАХ, полученных с помощью численных методов.

Моделирование электронного потока в ПО EliSa. Уравнения движения электронов и уравнение Пуассона представляют собой систему [9, 12]:

$$\vec{F} = q(\vec{E} + \dot{\vec{r}} \times \vec{B}); \quad (1)$$

$$m\ddot{\vec{r}} = \vec{F}; \quad (2)$$

$$\Delta\varphi = -\rho / \varepsilon_0, \quad (3)$$

где \vec{F} — сила; q — заряд электрона; \vec{E} — электрическое поле; $\dot{\vec{r}}$ — скорость; \vec{B} — магнитное поле; m — масса электрона; $\ddot{\vec{r}}$ — ускорение; φ — электростатический потенциал; ρ — объемная плотность заряда; ε_0 — диэлектрическая проницаемость. Система уравнений (1)–(3) решается методом самосогласованного поля [8].

В качестве граничных условий для эмиттера использовался закон «степени 3/2» (закон Чайлда — Ленгмюра — Богуславского) [13–15]:

$$j = gU^{3/2}, \quad (4)$$

где j — плотность тока; $g = \varepsilon_0 \sqrt{2\eta} \cdot 4/9/d^2$ — постоянная ($\eta = q/m$; d — пробный шаг, расстояние на котором определяют потенциал U для расчета плотности тока по закону «степени 3/2»). Обычно это расстояние составляет несколько десятков микрометров [16, 17].

Уравнение Пуассона (3) решалось методом контрольных объемов на неструктурированной сетке. В качестве сеточного генератора и пост-процессора использовалась программа Gmsh [18].

В основе ПО EliSa лежит алгоритм численного решения электронно-оптической задачи в цилиндрической системе координат (аксиально-симметричная постановка) на неструктурированных сетках с использованием

метода частиц в ячейке [19]. Этот метод хорошо зарекомендовал себя в физике заряженных частиц. Преимуществом метода является значительный ресурс параллелизма, что важно для трехмерных задач, однако узким местом является процесс пересчета параметров крупных частиц в ячейки расчетной сетки, поскольку, в отличие от структурированных сеток, координаты частиц невозможно напрямую пересчитывать в номера элементов [20].

Отметим, что практически во всех современных системах инженерного анализа для расчета полей используются именно неструктурированные сетки, они позволяют представить сложную геометрию точнее, чем структурированные [7, 9, 18, 20].

Используемая в ПО EliSa методика определения номера элемента, в котором находится крупная частица, основана на переборе ограниченного числа элементов (обычно не более 20), которое не зависит от их общего числа в модели. Это позволяет значительно сократить время определения правой части для уравнения Пуассона. Разработанный критерий, основан на временном шаге интегрирования, при котором данный подход работает, и позволяет отказаться от метода Рунге — Кутты высокого порядка в пользу более экономичного алгоритма с перешагиванием (метод Стёрмера — Верле) для интегрирования по времени уравнения движения, сохраняющего фазовый объем, что также дополнительно ускоряет процесс расчета [10].

Методика тестирования ПО с использованием пушки Пирса. В силу того, что ПО EliSa предназначено для моделирования и проектирования аксиально-симметричных ЭОС, непосредственное сопоставление результатов численного моделирования, полученных с его помощью, с точным аналитическим решением задачи о формировании электронного потока, впервые полученным Пирсом для планарной ЭОС [9, 11, 12], некорректно, поэтому в настоящей работе тестирование ПО EliSa осуществляется опосредованно с помощью ПО OperaFEA (Opera2D и Opera3D).

Геометрия пушки Пирса, в которой цветом выделена прямоугольная область пространственного заряда, приведена на рис. 1, а. Область без пространственного заряда имеет специальный вид, обусловленный необходимостью компенсировать отсутствие пространственного заряда выше границы электронного потока. Форма анода в нормированных единицах описывается аналитическим выражением [12]

$$U(R, Z) = (R^2 + Z^2)^{2/3} \cos\left(\frac{4}{3} \arctg \frac{R}{Z}\right), \quad (4)$$

где R, Z — нормированные координаты.

Распределение потенциала в этой области получено Дж. Пирсом аналитически и приведено на рис. 1, б.

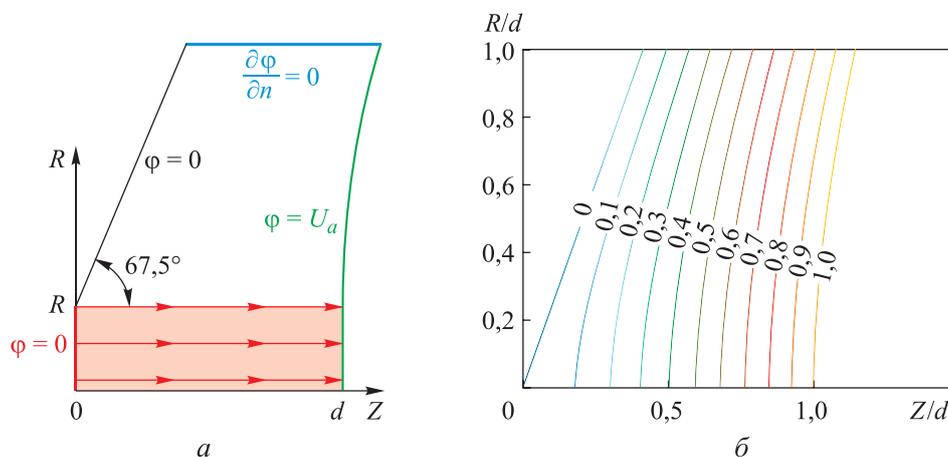


Рис. 1. Пушка Пирса (а) и эквипотенциали (б) в нормированных единицах для области без пространственного заряда

Предлагаемая методика тестирования состоит из двух этапов.

Первый этап. С помощью ПО OperaFEA численно моделируется планарная пушка Пирса и строится ее расчетная ВАХ, которая затем сопоставляется с точной ВАХ пушки Пирса (с помощью закона «степени 3/2»). Результаты траекторного анализа пушки Пирса для ленточного пучка с помощью ПО OperaFEA в двумерной постановке приведены на рис. 2, а. Траектории движения электронов параллельны оси, погрешность определения тока не превышает 0,4 %. Результаты траекторного анализа пушки Пирса, полученные в трехмерной постановке, не приведены, поскольку визуального отличия нет.

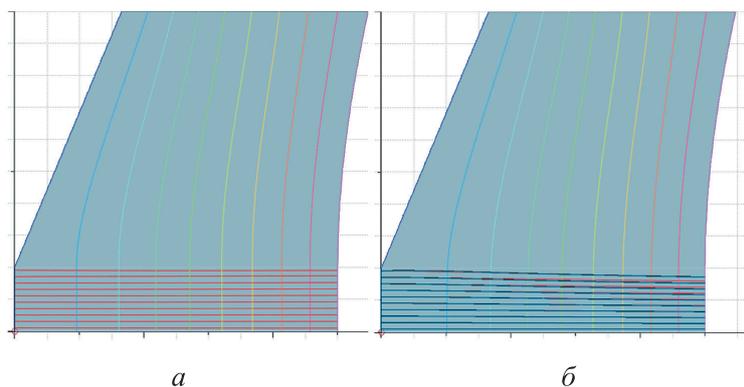


Рис. 2. Скриншот результатов моделирования пушки Пирса в ПО OperaFEA для ленточного (а) и цилиндрического (б) пучков

Второй этап. С помощью ПО OperaFEA численно моделируется аксиально-симметричная пушка Пирса и строится ее ВАХ. Результаты, полученные для цилиндрического пучка в ПО Opera2D (красные кривые) и ПО EliSa (синие кривые), приведены на рис. 2, б. Аксиально-симметричный пучок характеризуется незначительной компрессией, а его ток меньше, чем у ленточного. Отличия по току в ПО Opera2D и Opera3D не превышают 0,2 %. Результаты моделирования в ПО Opera3D (в секторной постановке) не приведены, поскольку не отличаются от результатов, полученных в ПО Opera2D. Результаты траекторного анализа хорошо согласуются между собой.

Результаты моделирования ВАХ пушки Пирса с помощью закона «степени 3/2», ПО OperaFEA и EliSa приведены на рис. 3. Ток, ограничивающий эмиссионную способность импрегнированного катода (работа выхода составляет 1,8 эВ, температура эмиссионной поверхности 1400 К), задан уравнением Ричардсона — Дешмана [9, 12] (штриховая прямая); ВАХ закона «степени 3/2» — сплошная кривая; результаты моделирования в ПО OperaFEA при различных значениях пробного шага (35 и 85 мкм) для ленточного пучка обозначены как Len; результаты моделирования в ПО OperaFEA при различных значениях пробного шага (35 и 85 мкм) для цилиндрического пучка — как Cyl; результаты моделирования в ПО EliSa

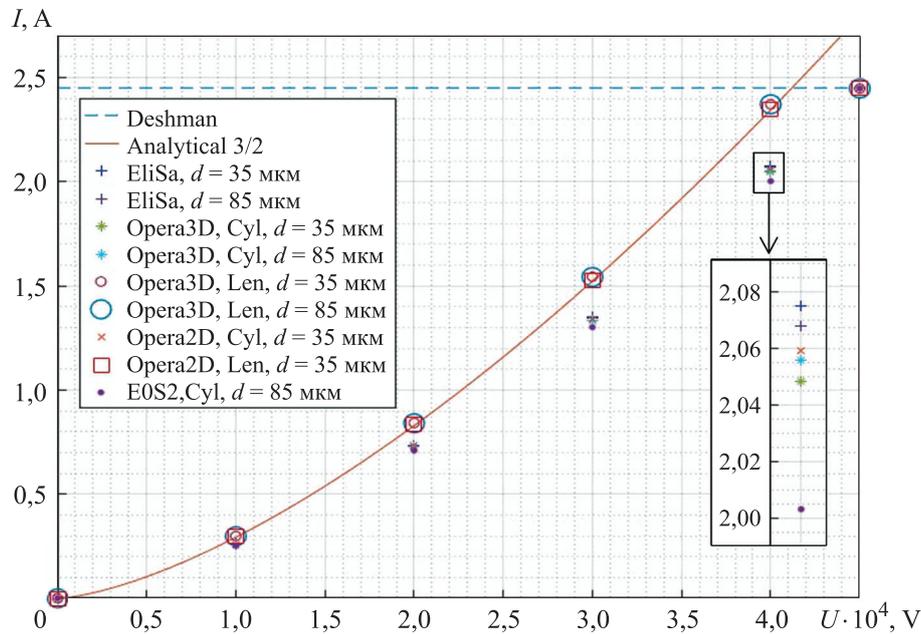


Рис. 3. Вольтамперная характеристика пушки Пирса для ленточного и цилиндрического пучков

при различных значениях пробного шага (35 и 85 мкм) для цилиндрического пучка — как EliSa.

Погрешность результатов моделирования в OperaFEA для ленточного пучка относительно аналитического решения составила менее 0,4 %, а разброс по току в зависимости от значений пробного шага — менее 0,1 %.

В аксиально-симметричной постановке точки ВАХ во всем диапазоне ускоряющих напряжений, полученные в ПО OperaFEA и EliSa, близки по значениям токов (разброс менее 0,25 %). Для сравнения, точки ВАХ, рассчитанные с помощью отечественного ПО EOS2 [2] для ЭОС, отстают от точек, рассчитанных с использованием ПО OperaFEA, на 3 %.

Другими словами, ПО EliSa, реализующее метод контрольных объемов на неструктурированных сетках, и метод Верле для интегрирования уравнений движения демонстрируют на порядок более высокие показатели точности решения задачи траекторного анализа, чем ПО EOS2, где уравнение Пуассона решается методом конечных разностей, а уравнения движения интегрируются методом Рунге — Кутты 2-го порядка [2].

Заключение. В целях первичной апробации нового ПО EliSa, предназначенного для решения аксиально-симметричных задач электронной оптики на неструктурированных сетках, решены следующие задачи:

- построены конечно-элементные модели (КЭМ) и проведен траекторный анализ планарной пушки Пирса в ПО OperaFEA в модулях ПО Opera2D и Opera3D при различных значениях пробного шага;
- выполнено сопоставление результатов траекторного анализа планарной пушки Пирса с известным аналитическим решением этой задачи, что позволило оценить погрешность решателей ПО OperaFEA как незначительную;
- построены КЭМ и проведен траекторный анализ аксиально-симметричной пушки Пирса в ПО OperaFEA, полученные результаты использованы для тестирования нового ПО EliSa;
- для траекторного анализа с помощью ПО EliSa в препроцессоре Gmsh построена КЭМ аксиально-симметричной пушки Пирса, включающая в себя треугольные и четырехугольные элементы;
- результаты траекторного анализа аксиально-симметричной пушки Пирса, полученные с помощью ПО EliSa, сопоставлены с эталонными результатами траекторного анализа, полученными с помощью ПО OperaFEA;
- проведен сравнительный анализ ВАХ планарной и аксиально-симметричной пушек Пирса, позволивший численно оценить погрешность определения рабочих токов с помощью модулей ПО OperaFEA, EliSa и EOS2.

С использованием предложенной методики тестирования ПО для электронно-оптических расчетов, основанной на сопоставлении результатов траекторного анализа и ВАХ пушки Пирса, показано, что новое ПО EliSa характеризуется на порядок более высокой точностью, чем разработанное в конце 70-х годов прошлого века ПО EOS2, и сопоставимо по точности с одним из ведущих комплексов программ для электронно-оптических расчетов — ПО OperaFEA.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Пензяков В.В. Расчет электронных пушек на электронных цифровых машинах. *Электронная техника. Сер. 1. Электроника СВЧ*, 1966, № 1, с. 41.
- [2] Голеницкий И.И., Захарова А.Н., Куцевская Т.П. и др. Комплекс для расчета на ЭВМ М-220 ЭОС от катода до коллектора на основе строгих и упрощенных математических моделей электронных пучков. *Электронная техника. Сер. 1. Электроника СВЧ*, 1974, № 8, с. 109–110.
- [3] Блейвас И.М., Голубцов Б.И., Ильин В.П. и др. Комплекс программ для решения на БЭСМ-6 широкого класса задач статической электроники (компилирующая система КСИ-БЭСМ-6). *Тез. докл. IV Всесоюз. семинара по методам решения задач электронной оптики*. Новосибирск, СО АН СССР, 1971, с. 26.
- [4] Журавлева В.Д., Морев С.П., Пензяков В.В. и др. Программа расчета многоскоростного аксиально-симметричного пучка в магнитном поле. *Электронная техника. Сер. 1. Электроника СВЧ*, 1985, № 1, с. 70.
- [5] Григорьев Ю.А., Журавлева В.Д., Морев С.П. и др. Программа анализа ЭОС с многоскоростным электронным пучком. *Электронная техника. Сер. 1. Электроника СВЧ*, 1988, № 1, с. 70.
- [6] Блейвас И.М., Лукошков В.С., Ильин В.П. и др. Анализ различных машинных программ расчета электронно-оптических систем приборов типа «О». В кн.: *Методы расчета электронно-оптических систем*. М., Наука, 1977, с. 5–8.
- [7] Мышкис А.Д. *Элементы теории математических моделей*. М., КомКнига, 2007.
- [8] Зельдович Я.Б., Мышкис А.Д. *Элементы математической физики. Среда из невзаимодействующих частиц*. М., ФИЗМАТЛИТ, 2008.
- [9] Humphries St. *Charged particle beams*. New York, Dover Publ., 2013.
- [10] Куликова И.В., Приступчик Н.К. Разработка ПО на основе Лагранжева описания движения частиц для неструктурированных сеток. *Сб. докл. XIII Всерос. науч.-техн. конф. «Электроника и микроэлектроника СВЧ»*. СПб., СПбГЭТУ ЛЭТИ, 2024, с. 108–111. EDN: IFZMNU
- [11] Pierce J.R. Rectilinear electron flow in beams. *J. Appl. Phys.*, 1940, vol. 11, no. 8, pp. 548–554. DOI: <https://doi.org/10.1063/1.1712815>
- [12] Алямовский И.В. *Электронные пучки и электронные пушки*. М., Советское радио, 1966.

- [13] Child C.D. Discharge from hot CaO. *Phys. Rev. (Series I)*, 1911, vol. 32, no. 3, pp. 492–511. DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRevSeriesI.32.492>
- [14] Fay C.E., Samuel A.L., Shockley W. On the theory of space charge between parallel plane electrodes. *Bell Sys. Tech. J.*, 1938, vol. 17, no. 1, pp. 49–79. DOI: <https://doi.org/10.1002/j.1538-7305.1938.tb00775.x>
- [15] 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. DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRev.21.419>
- [16] Куликова И.В. Построение ВАХ вакуумного диода на основе численного решения уравнения Власова — Пуассона. *Прикладная физика*, 2020, № 2, с. 27–33. EDN: MEERGB
- [17] Куликова И.В. Методы моделирования электронного газа в плоском диоде. *Тр. Междунар. конф. «Суперкомпьютерные дни в России»*. М., Макс-Пресс, 2021, с. 159–160. EDN: JAXHPU
- [18] Geuzaine C., Remacle J.-F. Gmsh: a 3-D finite element mesh generator with built-in pre- and post-processing facilities. *Int. J. Numer. Meth. Eng.*, 2009, vol. 79, no. 11, pp. 1309–1331. DOI: <https://doi.org/10.1002/nme.2579>
- [19] Воропаева Е.С., Вшивков К.В., Вшивкова Л.В. и др. Алгоритмы движения в методе частиц в ячейках. *Вычислительные методы и программирование*, 2021, т. 22, № 4, с. 281–293. DOI: <https://doi.org/10.26089/NumMet.v22r418>
- [20] Дудникова Г.И., Романов Д.В., Федорук М.П. Об алгоритмах метода частиц на неструктурированных сетках. *Журнал вычислительной математики и математической физики*, 2000, т. 40, № 1, с. 153–165.

Куликова Ирина Владимировна — канд. техн. наук, ведущий инженер теоретического отделения АО «НПП «Исток» им. Шокина» (Российская Федерация, 141190, Московская обл., г. Фрязино, ул. Вокзальная, д. 2А, корп. 1).

Приступчик Никита Константинович — канд. техн. наук, начальник сектора теоретического отделения АО «НПП «Исток» им. Шокина» (Российская Федерация, 141190, Московская обл., г. Фрязино, ул. Вокзальная, д. 2А, корп. 1).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Куликова И.В., Приступчик Н.К. Особенности тестирования программного обеспечения для численного моделирования электронно-оптических систем. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Приборостроение*, 2025, № 3 (152), с. 121–132. EDN: MIDNCU

**FEATURES OF THE SOFTWARE TESTING
FOR NUMERICAL SIMULATION
OF THE ELECTRONIC OPTICAL SYSTEMS**

I.V. Kulikova
N.K. Pristupchik

cuttlefish99@mail.ru
nikki@pristupchik.ru

**JSC “SPE “Istok” n.a. A.I. Shokin”, Fryazino, Moscow Region,
Russian Federation**

Abstract

The paper describes a testing methodology of the new Elisa software designed to simulate the axially symmetric electron guns, it is based on the control volume method on the unstructured meshes and the particle-in-cell method. Methodology consists of two stages. At the first stage, numerical results obtained using the OperaFEA for the planar Pierce electron gun are compared with results of an exact analytical solution to assess the error in the numerical method for solving the trajectory analysis problem implemented in the OperaFEA. At the second stage, numerical results of the trajectory analysis and the current-voltage characteristics obtained for an axially symmetric gun using the EliSa software are compared with the results obtained using the OperaFEA for the same model. This makes it possible to assess the numerical simulation error of an electron beam with the zero phase volume in the EliSa software, since the error determined at the first stage in the OperaFEA is not exceeding 0.5 %. Comparison of the current-voltage characteristics computed using the EliSa software with those computed using the EOS2 software developed in the late 1970s shows that the EliSa software demonstrates an increase in accuracy by more than an order of magnitude

Keywords

Pierce electron gun, vacuum diode current-voltage characteristic, particle-in-cell method, finite volume method, unstructured mesh

Received 07.02.2025

Accepted 07.04.2025

© Author(s), 2025

REFERENCES

- [1] Penzyakov V.V. Calculation of electron guns using electronic digital computers. *Elektronnaya tekhnika. Ser. 1. Elektronika SVCh*, 1966, no. 1, p. 41 (in Russ.).
- [2] Golenitskiy I.I., Zakharova A.N., Kushchevskaya T.P., et al. EOS software for simulation of electron beams from the cathode to the collector based on accurate and simplified mathematical models. *Elektronnaya tekhnika. Ser. 1. Elektronika SVCh*, 1974, no. 8, pp. 109–110 (in Russ.).

- [3] Bleyvas I.M., Golubtsov B.I., Ilin V.P., et al. [Software for simulation a wide class of static electronics problems on BESM-6 (compiling system KSI-BESM-6)]. *Tez. dokl. IV Vsesoyuznogo seminara po metodam resheniya zadach elektronnoy optiki* [Abs. IV All-Union Seminar on Methods of Solving Electron Optics Problems]. Novosibirsk, SO AN SSSR Publ., 1971, p. 26 (in Russ.).
- [4] Zhuravleva V.D., Morev S.P., Penzyakov V.V., et al. Program for calculating a multi-speed axially symmetric beam in a magnetic field. *Elektronnaya tekhnika. Ser. 1. Elektronika SVCh*, 1985, no. 1, p. 70 (in Russ.).
- [5] Grigoryev Yu.A., Zhuravleva V.D., Morev S.P., et al. Program for analysis of EOS with a multi-speed electron beam. *Elektronnaya tekhnika. Ser. 1. Elektronika SVCh*, 1988, no. 1, p. 70 (in Russ.).
- [6] Bleyvas I.M., Lukoshkov V.S., Ilin V.P., et al. Analiz razlichnykh mashinnykh programm rascheta elektronno-opticheskikh sistem priborov tipa «O» [Analysis of various machine programs for calculating electron-optical systems of O-type devices]. V kn.: *Metody rascheta elektronno-opticheskikh sistem* [In: Methods for calculating electron-optical systems]. Moscow, Nauka Publ., 1977, pp. 5–8 (in Russ.).
- [7] Myshkis A.D. *Elementy teorii matematicheskikh modeley* [Elements of theory of mathematical models]. Moscow, KomKniga Publ., 2007.
- [8] Zeldovich Ya.B., Myshkis A.D. *Elementy matematicheskoy fiziki. Sreda iz nevzaimodeystvuyushchikh chastits* [Elements of mathematical physics. Environment of non-interacting particles]. Moscow, FIZMATLIT Publ., 2008.
- [9] Humphries St. *Charged particle beams*. New York, Dover Publ., 2013.
- [10] Kulikova I.V., Pristupchik N.K. [Software development based on the Lagrangian description of particle motion for unstructured grids]. *Sb. dokl. XIII Vseros. nauch.-tekhn. konf. "Elektronika i mikroelektronika SVCh"* [Proc. XIII Russ. Sc.-Tech. Conf. "Microwave Electronics and Microelectronics"]. St. Petersburg, SPbGETU LETI Publ., 2024, pp. 108–111 (in Russ.). EDN: IFZMNU
- [11] Pierce J.R. Rectilinear electron flow in beams. *J. Appl. Phys.*, 1940, vol. 11, no. 8, pp. 548–554. DOI: <https://doi.org/10.1063/1.1712815>
- [12] Alyamovskiy I.V. *Elektronnye puchki i elektronnye pushki* [Electron beams and electron guns]. Moscow, Sovetskoe radio Publ., 1966.
- [13] Child C.D. Discharge from hot CaO. *Phys. Rev. (Series I)*, 1911, vol. 32, no. 3, pp. 492–511. DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRevSeriesI.32.492>
- [14] Fay C.E., Samuel A.L., Shockley W. On the theory of space charge between parallel plane electrodes. *Bell Sys. Tech. J.*, 1938, vol. 17, no. 1, pp. 49–79. DOI: <https://doi.org/10.1002/j.1538-7305.1938.tb00775.x>
- [15] 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. DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRev.21.419>

[16] Kulikova I.V. Vacuum tube diode CVC computation by numerical solution of the Vlasov — Poisson equation. *Prikladnaya fizika*, 2020, no. 2, pp. 27–33 (in Russ.). EDN: MEERGB

[17] Kulikova I.V. [Method for simulation of electron phase fluid in one-dimensional vacuum diode]. *Tr. Mezhdunar. konf. "Superkompyuternye dni v Rossii"* [Proc. Int. Conf. "Russian Supercomputing Days"]. Moscow, Maks-Press Publ., 2021, pp. 159–160 (in Russ.). EDN: JAXHPU

[18] Geuzaine S., Remacle J.-F. Gmsh: a 3-D finite element mesh generator with built-in pre- and post-processing facilities. *Int. J. Numer. Meth. Eng.*, 2009, vol. 79, no. 11, pp. 1309–1331. DOI: <https://doi.org/10.1002/nme.2579>

[19] Voropaeva E.S., Vshivkov K.V., Vshivkova L.V., et al. Algorithms of motion in the particle-in-cell method. *Vychislitelnye metody i programmirovaniye* [Numerical Methods and Programming], 2021, vol. 22, no. 4, pp. 281–293 (in Russ.). DOI: <https://doi.org/10.26089/NumMet.v22r418>

[20] Dudnikova G.I., Romanov D.V., Fedoruk M.P. On algorithms implementing the particles method on unstructured grids. *Comput. Math. Math. Phys.*, 2000, vol. 40, no. 1, pp. 147–158.

Kulikova I.V. — Cand. Sc. (Eng.), Lead Engineer, Theoretical Department, JSC "SPE "Istok" n.a. A.I. Shokin" (Vokzalnaya ul. 2A, korp. 1, Fryazino, Moscow Region, 141190 Russian Federation).

Pristupchik N.K. — Cand. Sc. (Eng.), Head of the Sector, Theoretical Department, JSC "SPE "Istok" n.a. A.I. Shokin" (Vokzalnaya ul. 2A, korp. 1, Fryazino, Moscow Region, 141190 Russian Federation).

Please cite this article in English as:

Kulikova I.V., Pristupchik N.K. Features of the software testing for numerical simulation of the electronic optical systems. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University, Series Instrument Engineering*, 2025, no. 3 (152), pp. 121–132 (in Russ.). EDN: MIDNCU