

УДК 537.5

**ПРОГРАММНЫЙ ИНСТРУМЕНТАРИЙ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ СИСТЕМ
ФОРМИРОВАНИЯ ПОТОКОВ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ И ПЛАЗМЕННЫХ ОБРАЗОВАНИЙ**

*канд. техн. наук, доц. О.Н. ПЕТРОВИЧ, И.С. РУСЕЦКИЙ
(Полоцкий государственный университет)*

Разработан программный комплекс со встроенным менеджером для поэтапного управления пользователем процессом решения задачи формирования и ускорения пучка заряженных частиц. Программный комплекс предназначен для расчета систем формирования и ускорения электронных и ионных пучков в аксиально-симметричных электростатическом и магнитостатическом полях, а также для моделирования систем формирования ленточных пучков.

Ключевые слова: численное моделирование, методы расчета электронно-оптических систем, методы расчета ионно-оптических систем.

Введение. Пучковые технологии занимают одно из ведущих мест в ряду современных ресурсо- и энергосберегающих технологий, так как позволяют реализовать широкий спектр термического воздействия на материалы. Среди электронно- и ионно-оптических систем широкое распространение получили ионные и электронные источники, в которых эмиттером заряженных частиц служит газоразрядная плазма. Современные вычислительные коды PBGUNS [1], KOBRA-3 [2], POISSON-2 [3], ELIS [4], ЭРА [5] для расчета плазменных эмиссионных систем предназначены для нахождения решений самосогласованных двумерных и трехмерных задач сильноточной электронной и ионной оптики.

В соответствии с традиционной методикой моделирования разработчики указанного программного обеспечения используют определенный набор методов решения задач по расчету полей и движения в них заряженных частиц. При расчете полей в пакетах PBGUNS, KOBRA-3, ELIS, ЭРА используется метод конечных разностей, в пакете POISSON-2 – метод интегральных уравнений. В программных кодах PBGUNS, KOBRA-3, POISSON-2, ЭРА для описания потока заряженных частиц используются недеформируемые токовые трубки, в пакете ELIS применяются деформируемые трубки тока.

В данной статье рассматривается программное обеспечение для моделирования физических процессов в устройствах плазменной эмиссионной электроники, основанное на применении поэтапной технологии решения задач электронной и ионной оптики. В соответствии с данной технологией управления процессом решения на каждом этапе моделирования пользователь имеет возможность выбрать из предложенного набора методов требуемый подход.

Программный комплекс со встроенным менеджером для поэтапного управления процессом решения задач электронной и ионной оптики. Программный комплекс предназначен для расчета систем формирования и ускорения электронных и ионных пучков в аксиально-симметричных электростатическом и магнитостатическом полях, а также для моделирования систем формирования ленточных пучков. Программная реализация методов и алгоритмов моделирования систем формирования потоков заряженных частиц основана на технологии модульного программирования.

Архитектура программного комплекса включает в себя: управляющий модуль MANAGER, диалоговый модуль DIALOG, модуль входных данных INPUT, модуль выходных данных OUTPUT, расчетные модули CAR, ELFIELD, MAGFIELD, OWNMAGFIELD, EMITTER, ELECPATH, IONPATH, CHARGE, BEAM.

Диалоговый модуль DIALOG содержит набор сценариев для каждого этапа соответствующей расчетной задачи.

Модуль входных данных INPUT считывает входные данные, задаваемые пользователем через диалоговый модуль, и передает их в расчетную программу.

Модуль выходных данных OUTPUT позволяет просматривать полученные результаты графически или в виде массивов числовых данных.

Управляющий модуль MANAGER вызывает необходимые на каждом этапе расчетные модули с учетом выбора, сделанного пользователем.

Расчетный модуль CAR предназначен для построения в расчетной области сетки, на которой методом конечных разностей решаются уравнения Пуассона для расчета полей и уравнения движения заряженных частиц. Модуль CAR включает два подмодуля: CARSQ для построения квадратной сетки и CARSTR для построения квазиструктурированной сетки [6].

Расчетные модули ELFIELD, OWNMAGFIELD предназначены для вычисления распределений скалярного и векторного потенциалов самосогласованных с характеристиками пучка электрического и магнитного полей, MAGFIELD – для расчета векторного потенциала внешних магнитных полей. Данные модули включают три подмодуля: один для квадратной сетки и два для квазиструктурированной сетки при расчете поля с наложением расчетных областей или без наложения расчетных областей [6].

Расчетный модуль EMITTER предназначен для определения положения и формы плазменного эмиттера электронов или/и ионов. При этом в случае неоднородной плазмы ее параметры можно задавать в виде массива.

Расчетные модули ELECPATH и IONPATH вычисляют траектории движения заряженных частиц в электростатическом и магнитостатическом полях. Каждый включает два подмодуля: один – при расчете пучка методом деформируемых трубок тока [7], другой – при использовании метода крупных частиц [8].

Расчетный модуль CHARGE вычисляет плотность тока и плотность объемного заряда частиц пучка. Включает три подмодуля: для метода деформируемых трубок тока, для метода больших частиц, для гидродинамического метода описания потока.

Расчетный модуль BEAM определяет характеристики формируемого пучка заряженных частиц (расходимость, радиус, распределение плотности тока по поперечному сечению пучка, ток и мощность пучка).

При запуске программы управляющий модуль предлагает выбрать тип краевой задачи (двумерная при формировании аксиально-симметричных пучков или трехмерная при формировании ленточных пучков) и систему формирования пучка (электронно-оптическая или ионно-оптическая). В зависимости от сделанного выбора вызывается соответствующий диалоговый модуль, который предлагает ввести входные параметры задачи и построить сетку в расчетной области (квадратную или квазиструктурированную). Управляющий модуль передает данные, полученные из модуля DIALOG, в расчетный модуль CAR. После завершения процесса пользователь может перейти к следующему этапу (расчету полей) или изменить входные параметры и/или сетку.

На этапе расчета полей в диалоговом модуле пользователь задает поля, которые требуется вычислить: электростатическое, самосогласованное с объемным зарядом пучка; собственное магнитное поле пучка [9]; магнитное поле, созданное внешними источниками (постоянными магнитами или обмотками с токами), а также выбирает алгоритмы расчета полей (с наложением или без наложения расчетных областей).

На следующем этапе рассчитывается положение и форма плазменного эмиттера с учетом эквипотенциальности поверхности плазмы и температуры электронной компоненты плазмы [7, 10].

На этапе расчета потока заряженных частиц пользователь выбирает модель дискретизации потока: модель деформируемых трубок тока, модель больших частиц, гидродинамическую модель [10]. В зависимости от выбранной модели и рассчитанных полей вычисляются характеристики потока (модули ELECPATH, IONPATH, CHARGE).

На завершающем этапе пользователь запускает модуль BEAM или задает программе найти решение самосогласованной задачи с заданной точностью, после чего будет запущен модуль BEAM. После завершения вычислительного процесса на каждом этапе можно перейти к следующему этапу либо вернуться на предыдущий. Взаимное соответствие задаваемых на каждом этапе пользователем методов проверяет модуль MANAGER, предлагая в диалоговых модулях возможные варианты.

В сравнении с существующими пакетами в разработанном программном обеспечении моделирование электронно- или ионно-оптической системы происходит поэтапно с возможностью отображения промежуточных результатов и выбора различных алгоритмов на каждом из этапов. Такой подход дает возможность проанализировать промежуточные результаты, полученные на каждом этапе, и при необходимости скорректировать исходные данные.

Заключение. Разработан программный комплекс со встроенным менеджером для поэтапного управления пользователем процессом решения задачи формирования и ускорения пучка заряженных частиц, которая включает в себя расчет электрического и магнитного полей, движения в них заряженных частиц, определение положения и формы поверхности эмитирующей плазмы. Предложенный программный комплекс может найти применение при решении обратных задач (синтеза) электронной и ионной оптики, а именно, при проектировании электронно- и ионно-оптических систем, формирующих пучки заряженных частиц с заданными характеристиками.

Работа выполнена при финансовой поддержке Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований (проект № Ф17-122).

ЛИТЕРАТУРА

1. Boers, Jack E. An Interactive Version of the PBGUNS Program for the Simulation of Axisymmetric and 2-D, Electron and Ion Beams and Guns / Jack E. Boers // Proc. 16th Particle Accelerator Conference and International Conference on High-Energy Accelerators, HEACC 1995, Dallas, USA, 1–5 May 1995. – Dallas, 1996. – P. 2312.

2. Spädtke, P. Computer Simulation of High-Current DC Ion Beams / P. Spädtke // Proc. 1984 Linear Accelerator Conf. (LINAC'84), Seeheim, Germany, May 1984, paper THP0012. – Seeheim, 1984. – P. 356–358.
3. Астрелин, В.Т. Особенности решения задач плазменной эмиссионной электроники в пакете прикладных программ POISSON-2 / В.Т. Астрелин // Успехи прикладной физики. – 2013. – Т. 1, № 5. – С. 574–579.
4. Петрович, О.Н. Программный комплекс ELIS для моделирования ЭОС ПИЭЛ / О.Н. Петрович, В.А. Груздев // Прикладная физика. – 2012. – № 2. – С. 79–85.
5. Беляев, Д.О. Пакет прикладных программ ЭРА-DD для решения двумерных краевых задач на квазиструктурированных сетках / Д.О. Беляев, А.Н. Козырев, В.М. Свешников // Вестн. Новосиб. гос. ун-та. Сер. : Информационные технологии. – 2010. – Т. 8. – Вып. 1. – С. 3–11.
6. Петрович, О.Н. Численные методы расчета электромагнитных полей на квазиструктурированных сетках в устройствах плазменной эмиссионной электроники / О.Н. Петрович, И.С. Русецкий // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Сер. С, Фундам. науки. – 2018. – № 4. – С. 124–127.
7. Петрович, О.Н. Алгоритм моделирования ионно-оптической системы с плазменным эмиттером / О.Н. Петрович, И.С. Русецкий // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Сер. С, Фундам. науки. – 2016. – № 12. – С. 71–74.
8. Хокни, Р. Численное моделирование методом частиц / Р. Хокни, Дж. Иствуд. – М. : Мир, 1987. – 640 с.
9. Петрович, О.Н. Алгоритм моделирования фазового портрета и собственных полей интенсивного электронного пучка в источнике с подвижным эмиттером / О.Н. Петрович, И.С. Русецкий // Успехи соврем. науки и образования. – 2015. – № 4. – С. 61–64.
10. Петрович, О.Н. Моделирование электронно-оптических систем с плазменным эмиттером : дис. ... канд. техн. наук : 05.13.18 / О.Н. Петрович. – Новополоцк, 2012. – 199 л.

Поступила 30.08.2019

SOFTWARE TOOLS FOR SIMULATION OF FORMING SYSTEMS OF CHARGED PARTICLE FLOWS AND PLASMA'S FORMATIONS

O. PETROVICH, I. RUSETSKI

The software package with an integrated manager for step-by-step user control over the process of solving of the problem of forming and accelerating of a charged particle beam has been developed. The software package can be used to calculate of the systems of formation and acceleration of electron and ion beams in axially symmetric electrostatic and magnetostatic fields, as well as to simulate systems for the formation of band beams.

Keywords: *numerical simulation, methods for calculating electron-optical systems, methods for calculating ion-optical systems.*