

РЕЗУЛЬТАТЫ ВЕРИФИКАЦИИ ЧИСЛЕННОЙ МОДЕЛИ РАСШИРЕНИЯ ПУЧКОВО-ПЛАЗМЕННЫХ ПОТОКОВ

А.М. Горбань¹, М.Ю. Силкин²

¹Национальный научный центр «Харьковский физико-технический институт», Харьков, Украина

²Харьковский национальный университет имени В.Н. Каразина, Харьков, Украина
E-mail: anaton.gorban@email.ua

Программный комплекс Torch предназначен для моделирования динамики расширения плазменно-пучковых потоков в вакуумный объем, ограниченный электродами произвольной конфигурации. Использована модель частиц в ячейке (particles in cell - PIC) размерностью 2D3V. Проведено сравнение результатов компьютерного моделирования с известными экспериментальными данными. Верификация показала, что численная модель хорошо описывает основные закономерности расширения плазменного потока в область со слабыми электрическими полями.

1. ВВЕДЕНИЕ

В исследованиях с плазменными и пучково-плазменными потоками, генерируемыми разрядами различных типов, возникает необходимость расчета динамики частиц в свободно расширяющихся струях. Такая задача, в частности, может возникать при формировании ионных и электронных пучков, при транспортировке плазменных потоков и в других случаях. При этом, существенным становится определение динамических параметров расходимости плазменных потоков, а также поиск возможных решений по управлению распределением плотности расходящегося потока. Наглядным примером таких систем являются широкоапертурные ионные и электронные источники плазменного типа [1, 2]. В таких системах формирование эмиссионной границы плазмы происходит в результате расширения направленного плазменного потока в область экспандера. Задача усложняется тем, что на оси системы присутствует поток высокоэнергетичных электронов [3], увеличивающий неоднородность плазменной струи и влияющий на его параметры. Следовательно, настройка, а также оптимизация параметров таких систем является сложной задачей. Поэтому разработка программного комплекса для моделирования и исследования пучково-плазменных систем, использующих расширение плазмы в вакуум на базе PIC-модели, является актуальной задачей. Основной идеей разработки такого комплекса является создание эффективного инструмента, позволяющего решать задачи по оптимизации параметров и настройке извлекающих систем ионных и электронных источников, а также более широкого круга фундаментальных и практических задач по транспортировке и ускорению плазменных потоков.

Данная система характеризуется значительным уровнем, в первую очередь, дальних столкновений и потерями частиц, поэтому при верификации модели возникают трудности с нахождением адиабатических инвариантов – дискретных параметров системы, которые должны сохраняться. Решением данной проблемы является сравнение результатов, полученных при моделировании с уже решенными задачами и экспериментальными результатами.

2. ПРОГРАММНЫЙ КОМПЛЕКС TORCH

Программный комплекс Torch предназначен для исследования пучково-плазменных систем, использующих расширение плазмы в вакуум. Расчетная область, схематически представленная на Рис.1, является осесимметричной областью, ограниченную электродами с заданными потенциалами при $z = 0$, $z = L_z$ и $r = L_r$, где L_z , L_r – длина и радиус системы соответственно. Кроме того, система может включать в себя один или несколько внутренних электродов (сеток), находящихся под заданными потенциалами, в том числе и под плавающими. Верхняя граница области может иметь произвольную форму, вписанную в прямоугольник со сторонами L_z , L_r . На систему может накладываться произвольно заданное внешнее магнитное поле с компонентами B_r и B_z .

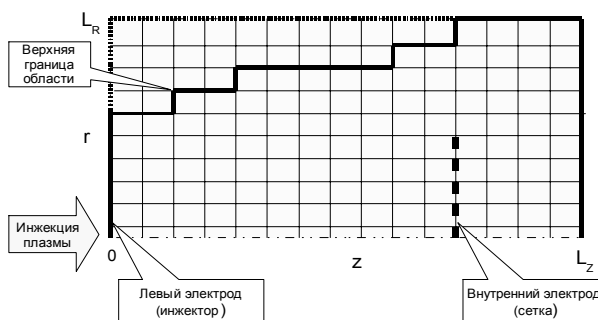


Рис.1. Схема возможной конфигурации расчетной области

Со стороны левого электрода осуществляется инжекция плазмы и, при необходимости, дополнительного пучка. Геометрические размеры области инжекции, как и параметры потоков частиц, могут задаваться произвольным образом. По достижению любой границы частицы поглощаются, а на оси системы при $r = 0$ выполняется условие отражения. Для сеток задаются значения коэффициентов прозрачности по отношению к ионам и электронам. Кроме того, предусмотрена возможность моделирования процессов ионизации нейтральных молекул в объеме системы.

Указанные свойства реализованной модели позволяют с ее помощью выполнять численные эксперименты для решения широкого круга задач со следующими основными ограничениями.

Границы наружных и внутренних электродов должны привязываться к линиям расчетной сетки. Любое поперечное (вдоль r) сечение расчетной области должно представлять собой односвязную область. Магнитные поля, которые могут создаваться потоками заряженных частиц, не учитываются. Потенциалы электродов не зависят от времени. Начальные распределения частиц по скоростям нормальные, а по координатам – равномерные. Общее количество сортов частиц – не более трех.

Эти ограничения не являются принципиальными и могут быть сравнительно легко устранены. Они просто фиксируют нынешнее состояние реализации программного комплекса.

2.1. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ

Метод построения численной модели – частицы в ячейках (PIC) размерности 2D3V. В области помещена равномерная прямоугольная расчетная сетка, в узлах которой вычисляются и сохраняются значения плотностей зарядов, электрического потенциала, напряженностей продольного и поперечного электрических полей и внешнего магнитного поля. Таким образом, все полевые параметры модели описываются в переменных Эйлера, тогда как динамика частиц описывается в переменных Лагранжа.

Система уравнений для самосогласованного электрического поля имеет вид:

$$\frac{\partial^2 \Phi}{\partial z^2} + \frac{\partial^2 \Phi}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \Phi}{\partial r} = -4\pi\rho, \quad (1)$$

$$E_r = -\frac{\partial \Phi}{\partial r}, \quad (2)$$

$$E_z = -\frac{\partial \Phi}{\partial z}, \quad (3)$$

с граничными условиями первого рода на всех электродах. Здесь $\Phi = \Phi(r, z)$, $E_r = E_r(r, z)$,

$E_z = E_z(r, z)$ – потенциал и составляющие напряженности электрического поля; $\rho = \rho(r, z)$ – плотность электрического заряда. Плотность заряда рассчитывается методом взвешивания по площадям – модель CIC [5].

Расчетная область представляет собой односвязную область, вписанную в прямоугольник размерами 100 на 200 ячеек по координатам r и z соответственно. Потенциал электрического поля в ней рассчитывается методом последовательной верхней релаксации с Чебышевским ускорением [6]. Расчет напряженности электрического поля ведется по 6-точечной разностной схеме [4]. Для учета произвольной конфигурации границы расчетной области применяется процедура, аналогичная использованной в [7].

Система уравнений, описывающая динамику частиц, имеет вид:

$$\ddot{r} = \dot{v}_r = g_r + \frac{v_\theta^2}{r},$$

$$\dot{v}_\theta = g_\theta - \frac{v_r v_\theta}{r}, \quad (4)$$

$$\ddot{z} = \dot{v}_z = g_z,$$

$$g_r = \frac{q}{m}(E_r + v_\theta B_z),$$

$$g_\theta = \frac{q}{m}(v_z B_r - v_r B_z), \quad (5)$$

$$g_z = \frac{q}{m}(E_z - v_\theta B_r),$$

где $v_r, v_\theta, v_z, g_r, g_\theta, g_z$ – компоненты скорости и ускорения частицы; q, m – ее заряд и масса соответственно.

Особенностью модели является использование отношения масс модельного иона и электрона в пределах 100...300. При этом необходимость использования масштабирования внешних полей с избытком компенсируется ускорением расчетов приблизительно на порядок. Среднее количество частиц, приходящихся на один узел сетки, в расчетах составляло 15...30. Однако в областях, где частицы наиболее интенсивно взаимодействуют друг с другом, это значение обычно превышало 100. Общее количество частиц при расчетах достигало значений 1,5 млн. При расчете динамики частиц используется комбинация двухшагового метода с перешагиванием второго порядка точности для скорости и метода Рунге-Кутты второго порядка точности для координат.

Особенностью PIC-моделей, использующих цилиндрическую систему координат, является расходимость численных решений для потенциалов и скоростей частиц вблизи оси из-за множителя $1/r$, как в (1, 4). Для устранения расходимости в (1) использовалась сдвинутая на половину ячейки относительно оси системы расчетная сетка, а уравнения (4) решались с использованием преобразования координат в декартовы подобно тому, как описано в [4].

2.2. РЕАЛИЗАЦИЯ МОДЕЛИ

Программный комплекс реализован в виде набора из четырех исполняемых модулей: `torch_run` – главный расчетный модуль, `torch_setup` – модуль инициализации, `torch_border` – генератор внутреннего представления границ расчетной области, `torch_dia` – диагностический модуль анализа результатов эксперимента. Все модули работают с единым форматом представления структур, данных на диске в виде бинарного образа памяти данных программ. Главный расчетный модуль в процессе работы по расписанию сохраняет образ памяти данных в дисковых файлах, так что они могут использоваться для организации точек рестарта. Они же используются диагностическим модулем для последующего анализа. Начальную стартовую точку формирует модуль инициализации. Исходные данные для эксперимента пользователь вносит в формы-шаблоны в виде простых текстовых файлов. В процессе расчетов программа выдает оперативную диагностическую информацию, в том числе в графическом

представлении (пример на Рис.2). Оперативная диагностика также может сохраняться на диске, формируя протокол эксперимента.

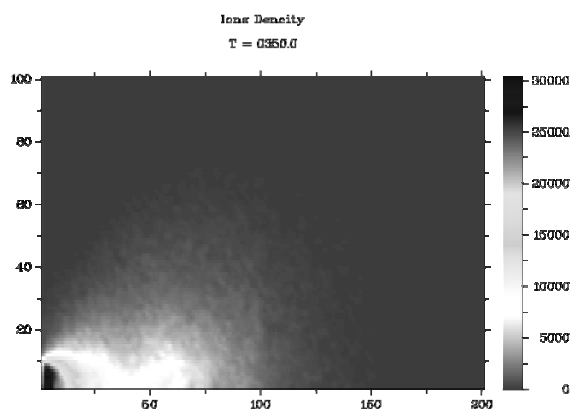


Рис.2. Пример оперативной диагностики пространственного распределения плотности ионов плазменного факела, отн. ед.

Программный комплекс реализован средствами языка FORTRAN 90 и переносимой графической библиотеки DISLIN. Это позволило создать полностью переносимый на уровне исходного кода продукт (ОС Windows 32, Windows 64, Linux, FreeBSD) общим объемом менее 4 тысяч строк текста.

3. ТЕСТИРОВАНИЕ МОДЕЛИ

Физическая постановка. В качестве реального объекта для исследования и верификации программного комплекса были выбраны ионные источники плазменного типа, которые в качестве генератора плазмы используют контрагированный разряд [1], а отбор ионов происходит с развитой поверхности плазмы, выходящей в экспандер (расчетная область – см. Рис.1) [2]. В такой системе экспандер является анодом основного разряда. Параметры плазмы, выходящие в область экспандера, имеют следующие характеристики. Концентрация частиц плазмы в зависимости от тока разряда меняется от 10^{12} до 10^{15} см^{-3} , при этом плотность ионного тока может достигать $100 \text{ А}\cdot\text{см}^{-2}$ в контрагирующем канале. Принимая во внимание диаметр отверстия, равный 0.5 см, получим ток ионов плазмы порядка $1,2 \cdot 10^{20}$ $\text{част}\cdot\text{с}^{-1}$. Средняя энергия ионов в плазменном потоке достигает значений почти полного падения на разряде и находится в диапазоне от 100 до 400 эВ, что в пересчете на скорость частиц дает значения $1,3 \cdot 10^7 \dots 3 \cdot 10^7$ $\text{см}\cdot\text{с}^{-1}$ [8]. Как уже упоминалось выше, особенностью данных систем является наличие пучка высокоэнергетичных электронов с энергией ~ 100 эВ и плотностью тока в контрагирующем канале до $10^3 \text{ А}\cdot\text{см}^{-2}$ [3].

Описание эксперимента. Рассмотрим случай инжекции ускоренного плазменного потока с электронным пучком на оси системы и с одним перераспределяющим электродом (внутренняя сетка), процессами ионизации в объеме экспандера можно пренебречь [8]. Начальные скорости частиц плазмы равнялись $3 \cdot 10^7$ $\text{см}\cdot\text{с}^{-1}$. Рассматривается случай ионного источника, когда левый электрод экспандера имеет отрицательный потенциал. В реальном источ-

нике ионов он является эмиссионным электродом. В большинстве случаев его потенциал равен потенциалу анода, однако сам электрод представляет собой диск, перфорированный отверстиями, за которым располагается ускоряющий электрод. Величина провисания потенциала в плоскости эмиссионного электрода, рассчитанная по известным соотношениям [9], в среднем, составляет значения в диапазоне от (-100) до (-1000) В, для ускоряющего потенциала – до -100 кВ, и зависит от расстояния до ускоряющего электрода, величины отверстий и ускоряющего потенциала. При моделировании потенциал левого электрода был равен (-500) В, остальные электроды, ограничивающие расчетную область, заземлялись. Расчет статического распределения потенциала в экспандере показан на Рис.3 с учетом условия осевой симметрии. Потенциал сетки задавался плавающим, однако в начальный момент, пока частицы не достигли электрода, он равнялся 0.

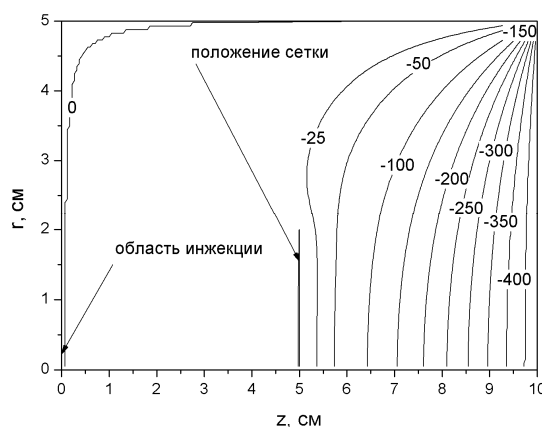


Рис.3. Статическое распределение потенциала в расчетной области, В

Соотношение длины к диаметру экспандера 1:1, размер 10×10 см выбирался из условия оптимума [8]. Рассматривался случай водородной плазмы с массой иона $m_i = 1,6726 \times 10^{-24}$ г, и отношением массы иона к массе электрона $m_i/m_e = 100$. При инжекции частиц плазмы выполняется условие квазинейтральности $n_i = n_e$. Плотность потока плазмы $\sim 10^{14}$ см^{-3} , диаметр инжектора 1 см, скорость частиц $v_p = 3 \cdot 10^7$ $\text{см}\cdot\text{с}^{-1}$. Магнитное поле считается заданным и не возмущающимся с направлением силовых линий вдоль оси струи. С учетом масштабирования напряженности поля составляла величину $\sim 0,1$ Тл, для реальных электронов она равнялась 4 мТл. Начальные параметры частиц пучка задавались следующими: скорость $v_{cb} = 1 \cdot 10^8$ $\text{см}\cdot\text{с}^{-1}$, радиус пучка $r_{cb} = 0,2$ см, ток пучка $I_{cb} = 1 \cdot 10^{17}$ с^{-1} .

Результаты моделирования. Основные результаты моделирования представлены на Рис.4-13.

На Рис.4 показано пространственное распределение плотности ионной компоненты плазмы.

В области инжекции возникают сильные электрические поля, которые образуются вследствие разделения зарядов в магнитном поле – электроны тормозятся, а ионы продолжают движение, поэтому ионы, преодолевшие потенциальный барьер, выходят в виде частично расфокусированного потока [8].

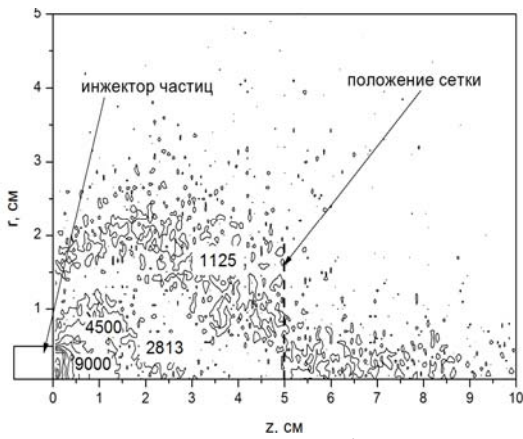


Рис.4. Пространственное распределение плотности ионов плазмы, отн. ед.

Внутренний перераспределяющий электрод не оказывает существенного влияния на прохождение ионной компоненты (см. Рис.4), поскольку прозрачность по отношению к ионам и электронам составляла 75%.

На Рис.5 показано пространственное распределение напряженности электрического поля, возникающего в результате взаимодействия самосогласованных полей частиц.

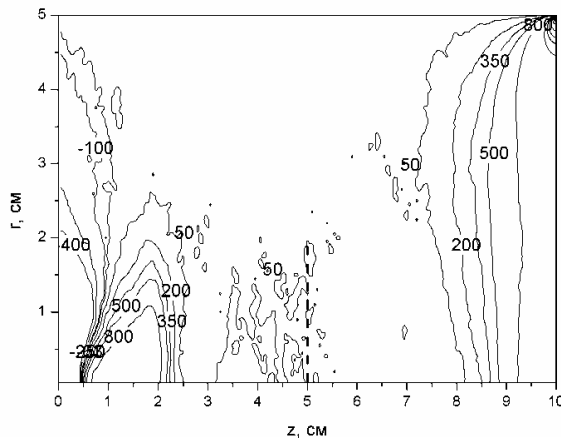


Рис.5. Пространственное распределение напряженности электрического поля, отн. ед.

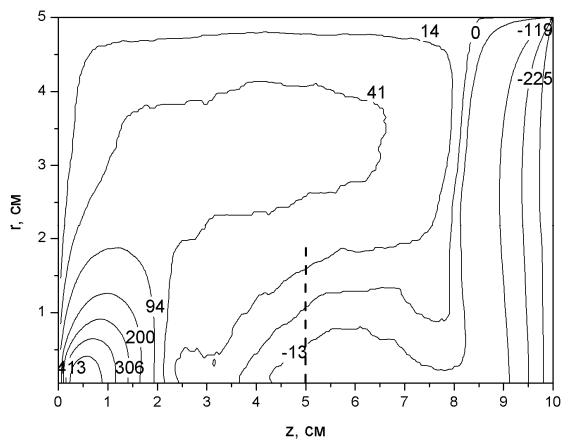


Рис.6. Распределение потенциала самосогласованного поля, В

Проникающая плазма имеет положительный потенциал и заполняет весь объем экспандера, об этом свидетельствует распределение потенциала в расчетной области Рис.6. Это также согласуется с данными работы [8]. Из рисунка видно, что условие

квазинейтральности нарушается только в области правого электрода и на оси системы вблизи перераспределяющего электрода. Это явление возникает в результате накопления отрицательного заряда на сетке при бомбардировке пучком высокоэнергетических электронов.

На Рис.7. показано фазовое пространство электронов плазмы в координатах $z-v_z$. Из рисунка видно, что электроны не попадают на левый электрод, а отражаются его полем. Часть электронов приобретает высокую энергию за счет ускорения в двойном слое, а затем отдают энергию в результате коллективных процессов (см. Рис.6). Большая часть электронов находится в области дрейфа.

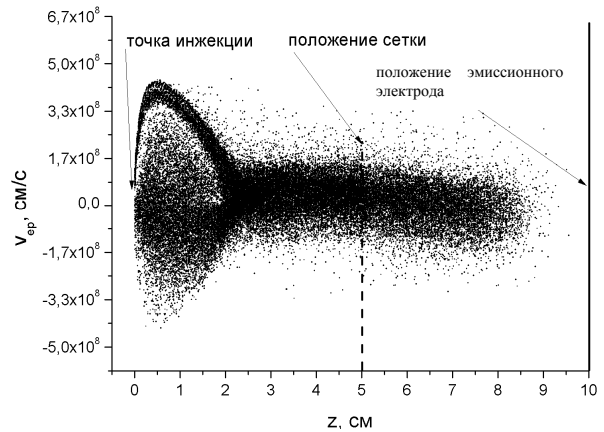


Рис.7. Фазовое пространство $z-v_z$ электронов плазмы

Функция распределения электронов по скоростям близка к Максвелловской (Рис.8).

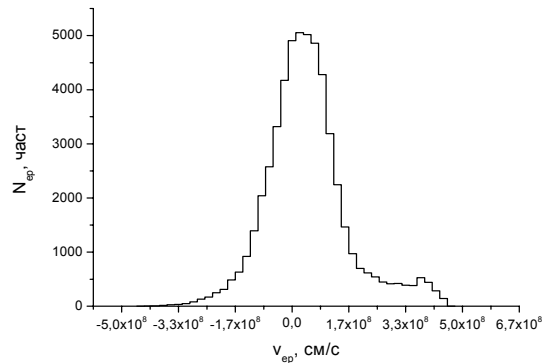


Рис.8. Функция распределения электронов плазмы для случая, соответствующего Рис.7

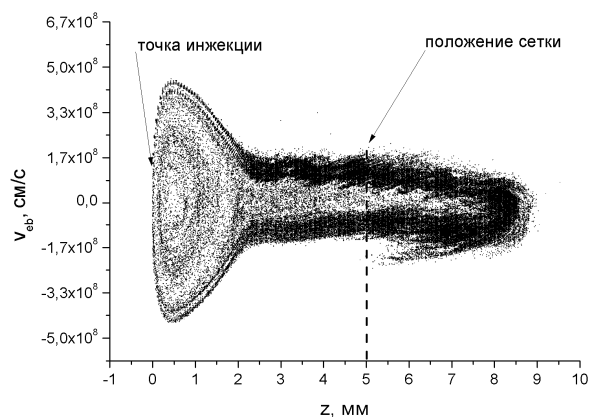


Рис.9. Фазовое пространство $z-v_z$ электронов пучка

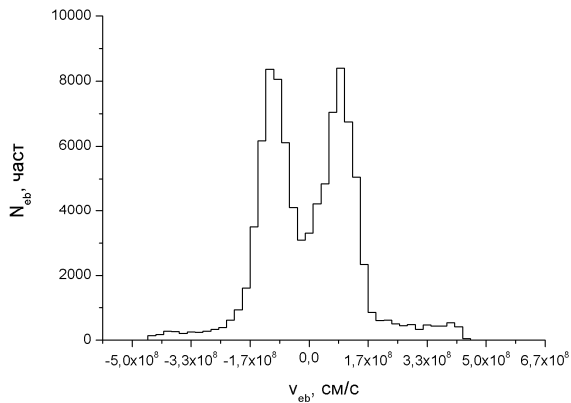


Рис.10. Функция распределения электронов пучка по скоростям для случая, соответствующего Рис.8

На Рис.9,10 показано фазовое пространство $z-v_z$ электронов пучка и функция распределения электронов пучка по скоростям. Функция распределения частиц пучка по скоростям отлична от максвелловской. На Рис.10 присутствуют два максимума. Наличие 2-х максимумов связано с образованием 2-х встречных электронных пучков: входящего в экспандер и отраженного потенциалом правого электрода.

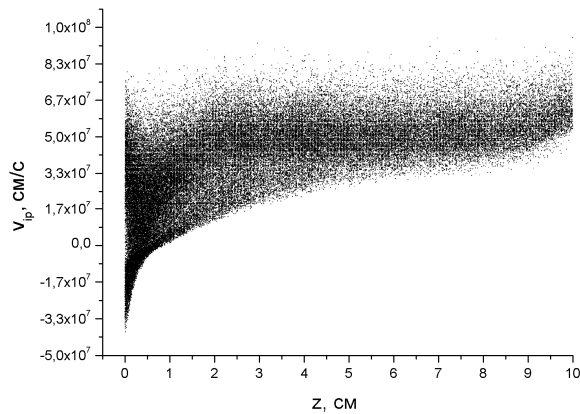


Рис.11. Фазовое пространство $z-v_z$ ионов плазмы

На Рис.11,12 показано фазовое пространство $z-v_z$ для ионов плазмы и функция распределения по скоростям для этого случая.

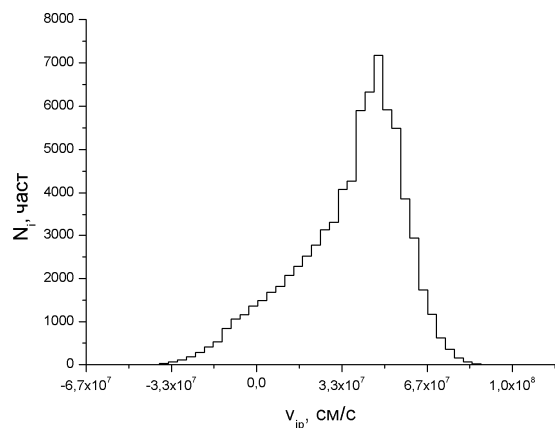


Рис.12. Функция распределения ионов плазмы по скоростям для случая, представленного на Рис.11

Из рисунков видно, что ионы, попадающие на правый электрод, имеют существенно меньший разброс по энергии, чем в области инжекции.

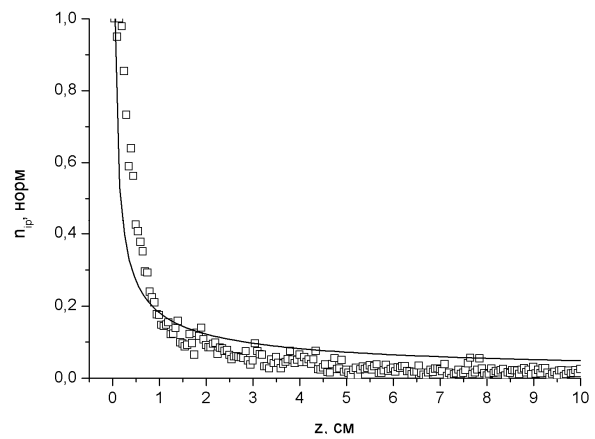


Рис.13. Аксиальное распределение концентрации плазмы. Точки - компьютерный эксперимент, кривая - расчет [10]

На Рис.13 представлено аксиальное распределение концентрации плазмы. Падение плотности плазмы в зависимости от z , хорошо аппроксимируется зависимостью $n = A \cdot z^{-2}$ (сплошная линия на Рис.13), где A – константа, зависящая от начальной концентрации и температуры плазмы. Данные результаты хорошо согласуются с работой [10].

В завершении хотелось бы отметить, что верификация программного комплекса также проводилась с использованием одностичных тестов для проверки точности расчетов динамических параметров частиц и устойчивости расчетных схем. Результаты тестов дают очень хорошие показатели сохранения импульса и энергии частиц в пределах используемых разностных схем второго порядка точности.

Таким образом, результаты верификации модели в режиме коллективного электрического поля не являются противоречивыми и хорошо согласуются с общими представлениями о физике расширения плазменного потока.

ЛИТЕРАТУРА

1. С.П. Бугаев, Е.М. Окс, П.М. Щанин, Г.Ю. Юшков. Источник ионов (100 кВ) на основе вакуумной дуги, возбуждаемой контрагированным разрядом // *Приборы и техника эксперимента*. 1990, №6, с.125-129.
2. А.Г. Гугля, М.Ю. Силкин, С.Н. Стервоедов, В.И. Фареник. Установка для импульсной ионной и электронной обработки поверхности материалов // *Вісник Харківського університету. Серія фізична. "Ядра, частинки, поля"*. 2001, №529, с.89-93.
3. С.П. Бугаев, Ю.Е. Крейндел, П.М. Щанин. *Электронные пучки большого сечения*. М.: «Энергоатомиздат», 1984, с.112.
4. Ч. Бэдсел, А. Ленгдон. *Физика плазмы и численное моделирование*. М.: «Энергоатомиздат», 1989, с.317-320.
5. А.С. Рошаль. *Моделирование заряженных пучков*. М.: «Атомиздат», 1979, с.224.
6. Р. Хокни, Дж. Иствуд. *Численное моделирование методом частиц*. М.: «Мир», 1987, с.640.
7. А.М. Горбань, Ю.Ф. Лонин. Пространственные характеристики волны плотности заряда в неод-

- нородных магнитоизолированных передающих линиях // *ВАНТ. Серия "Плазменная электроника и новые методы ускорения"*(6). 2008, №4, с.11-13.
8. М.Д. Габович. *Физика и техника плазменных источников ионов*. М.: «Атомиздат». 1972, с.304.
9. М. Кноль, И. Эйхмейер. *Техническая электроника. Т.2* / Пер. с нем. М.: «Энергия», 1971, с.456.
10. П.А. Демченко, Л.И. Крупник, Е.С. Лягнер. Исследование расширения плазменных струй // *Журнал технической физики*. 1974, т.44, в.11, с.2311-2316.

Статья поступила в редакцию 07.06.2010 г.

THE RESULTS OF COMPUTER MODEL VERIFICATION INTENDED FOR SIMULATION OF BEAM-PLASMA FLUXE EXPANSIONS

A.M. Gorban, M.Yu. Silkin

The bundled software Torch is intended for dynamic simulation of plasma flux expansions into vacuum volume restricted by electrodes of any configuration. Particle-in-cell (PIC) model with dimension 2D3V was used. The obtained results of computer simulation were compared with known experimental data. The software verification showed that computer model described well the general physical laws of plasma flux expansion into chamber with weak electrical fields.

РЕЗУЛЬТАТИ ВЕРИФІКАЦІ КОМП'ЮТЕРНОЇ МОДЕЛІ РОЗШИРЕННЯ ПУЧКОВО-ПЛАЗМОВИХ ПОТОКІВ

A.M. Горбань, М.Ю. Сілкін

Програмний комплекс Torch призначений для моделювання динаміки розширення плазмово-пучкових потоків в вакуумний об'єм, обмежений електродами довільної конфігурації. Використана модель частинок в сотах (PIC) розмірності 2D3V. Виконане порівняння результатів комп'ютерного моделювання з відомими експериментальними даними. Верифікація програмного комплексу показала, що чисельна модель добре описує основні закономірності розширення плазмового потоку в область слабких електричних полів.