

УДК 533.9.07

## Параметры ЭЦР-плазмы, формируемой в коаксиальном резонаторе плазменного инжектора CERA-RI-2 (вычислительный эксперимент)

А. А. Балмашинов, Н. Б. Бутко, С. П. Степина, А. М. Умнов, М. Х. Хименес

*Представлены результаты численного моделирования движения частиц плазмы в плазменном ЭЦР-инжекторе CERA-RI-2. Определены области доминирующих потерь частиц плазмы и интенсивность плазменных и ионных потоков.*

PACS: 52.50.Dg; 52.75.Di; 52.80.Pi

*Ключевые слова:* плазма, электронный циклотронный резонанс, коаксиальный резонатор, потоки частиц, вычислительный эксперимент.

### Введение

В настоящее время плазменные инжекторы широко используются в различных областях науки и техники. Их конструкции, способы формирования плазмы и ее экстракции определяются конкретными задачами, для решения которых они разрабатываются. В течение более чем 40 лет особое внимание уделяется инжекторам, для формирования плазмы в которых используются электромагнитные поля, в особенности тем, в которых реализуются различные типы резонансов и, в частности, электронный циклотронный резонанс (ЭЦР), обеспечивающий высокую энергетическую эффективность ионизации рабочего газа.

Одной из перспективных областей использования плазмы микроволнового разряда является космическая техника. В ряде лабораторий мира ведутся интенсивные исследования по созданию плазменных ЭЦР-двигателей (плазменных инжекторов) для различного класса космических аппаратов [1] и, в частности, двигателей коррекции орбит легких спутников Земли [2—4]. При разработке плазменных двигателей легких космических аппаратов особое внимание уделяется их энергетической и газовой эффективности, а также массогабаритным параметрам. Энергетическая и газовая эффективности достигаются путем реализации ЭЦР-разряда, снижением рекомбинационных по-

терь на корпусе разрядной камеры и эффективной экстракцией ионной компоненты из источника плазмы. При этом массогабаритные параметры существенно улучшаются при использовании коаксиальных резонаторов, геометрические размеры которых могут быть значительно меньше размеров полых резонаторов.

Работа по созданию компактного ЭЦР-инжектора плазмы на основе коаксиального резонатора была начата нами в 2013 году. Источник плазмы инжектора CERA-RI-2 [5] состоял из узкого коаксиального резонатора, постоянное магнитное поле в котором обеспечивало ЭЦР-взаимодействие в азимутально-симметричной области вблизи его торцевой стенки, удаленной от осевого электрода и цилиндрического корпуса. Исследования зависимостей газовой и энергетической эффективности источника плазмы от массового расхода рабочего газа в условиях имитации экстракции ионной компоненты отрицательным потенциалом на сетчатом электроде, одновременно являющимся одной из торцевых стенок резонатора, и сравнение полученных результатов с результатами работы [4] показали, что по этим параметрам источник плазмы разрабатываемого инжектора может обеспечить более высокие значения [5].

Эффективность работы плазменных инжекторов в значительной мере зависит от способа экстракции плазменного потока из источника и ускорения ионной компоненты. В связи с этим нами начата работа по разработке и созданию безэлектродной системы формирования плазменного потока в инжекторе CERA-RI-2. На первом этапе этой деятельности предполагается провести численное моделирование процессов, протекающих в разрядной камере.

Целью данной работы являлось численное моделирование процессов, протекающих в разрядной камере, чтобы установить области доминирующих потерь частиц плазмы.

Балмашинов Александр Александрович, профессор.

Степина Светлана Петровна, доцент.

Бутко Наталия Борисовна, доцент.

Умнов Анатолий Михайлович, доцент.

Хименес Марелин Хименес, студент.

Россия, 117198, Москва, ул. Миклухо-Маклая, 6.

Тел. 8 (495) 955-09-23. E-mail: abalmashnov@rambler.ru

Статья поступила в редакцию 18 марта 2015 г.

© Балмашинов А. А., Степина С. П., Бутко Н. Б., Умнов А. М., Хименес М. Х., 2015

**Постановка задачи и метод ее решения**

Численная модель плазмы построена на основе метода частиц в ячейке с учетом электростатических взаимодействий [6]. Выбор модели связан с тем, что в плазме как при отсутствии разности потенциалов между сеткой и корпусом камеры, так и при его наличии возникает сильное амбиполярное поле, существенно влияющее на динамику частиц. В модели учтены все параметры инжектора плазмы (схема которого представлена на рис. 1), а именно, геометрические размеры резонатора, структура магнитного поля и электрических полей.

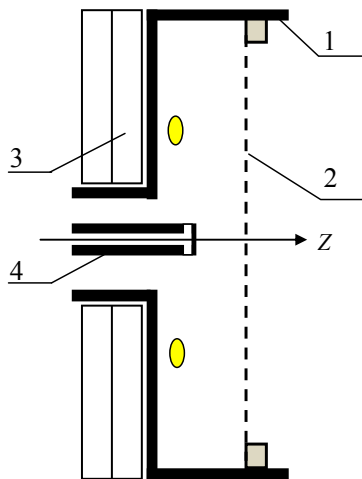


Рис. 1. Схема инжектора CERA-RI-2. 1 — корпус коаксиального резонатора, 2 — сетчатый электрод, 3 — дискообразные магниты, 4 — осевой электрод резонатора, область ЭЦР выделена желтым цветом

Решение уравнения Пуассона  $\Delta\Phi = -4\pi\rho$  проводилось методом быстрого преобразования Фурье на стационарной декартовой сетке с количеством узлов  $64 \times 64 \times 24$ . Самосогласованное электрическое поле плазмы  $\vec{E} = -\nabla\Phi$  вычислялось в узлах сетки с помощью разностных производных от потенциала  $\Phi(i, j, k)$ ,  $i, j, k$  — номера узлов в направлениях  $X, Y, Z$  соответственно.

Уравнение движения электронов, представленное в конечно-разностном виде:

$$\frac{\vec{u}^{n+\frac{1}{2}} - \vec{u}^{n-\frac{1}{2}}}{\Delta\tau} = \vec{g}^n + \frac{\vec{u}^{n+\frac{1}{2}} + \vec{u}^{n-\frac{1}{2}}}{2\gamma^n} \times \vec{b}^n,$$

решалось по схеме Бориса [6]. В уравнении введены обозначения:

- $\vec{u}$  — импульс электрона в единицах  $m_0c$ ,
- $m_0$  — масса покоя электрона,
- $c$  — скорость света в вакууме,
- $\Delta\tau$  — безразмерный временной шаг,
- $\tau = \omega \cdot t$  — безразмерное время,
- $\omega$  — частота СВЧ-поля,

$$\vec{g}^n = \frac{\vec{E}}{B_0} \text{ — безразмерное электрическое поле,}$$

где  $\vec{E} = \vec{E}_{hf} + \vec{E}_s + \vec{E}_{st}$  — сумма напряженностей электрического СВЧ-поля, собственного электрического поля плазмы и поля, создаваемого разностью потенциалов между сетчатым электродом и корпусом инжектора,

$$\vec{b}^n = \frac{\vec{B}^n}{B_0} \text{ — безразмерная индукция магнитного поля;}$$

$$B_0 = \frac{m_0c\omega}{e},$$

$e$  — заряд электрона,

$\gamma$  — релятивистский фактор.

Верхний индекс в представленном уравнении — номер временного шага интегрирования уравнения движения.

Модельная плазма генерировалась в области ЭЦР-взаимодействия, которая представляла собой кольцевую структуру шириной 0,2 см и протяженностью 0,1 см вдоль оси  $Z$ . Радиус структуры — 3 см. Плазма считалась полностью ионизированной, ионы (аргон) — однократно заряженными. В течение всего времени расчета в области ЭЦР-взаимодействия плотность плазмы поддерживалась постоянной. Расчеты проводились до достижения плазменными потоками стационарных состояний. Процессы ионизации не учитывались. Плотность плазмы в ЭЦР-области варьировалась в пределах  $(1-5) \cdot 10^9 \text{ см}^{-3}$ . Все расчеты проводились при амплитуде напряженности электрической составляющей СВЧ-поля  $E_{hf} = 250 \text{ В/см}$ .

Численным моделированием определялись интенсивности потоков частиц на сетчатый электрод и на стенки разрядной камеры для различных величин плотности плазмы в ЭЦР-области и разности потенциалов между сеткой и корпусом камеры.

**Полученные результаты и их обсуждение**

Установлено, что при отсутствии разности потенциалов  $U$  между сеткой и корпусом инжектора он работает в режиме коллективного ускорения ионов. Характерное пространственное распределение ионов в случае  $U = 0$  показано на рис. 2. Электроны движутся к сетке под действием диамагнитной силы  $\vec{F}_\mu = -\mu \cdot \text{grad}B$ , где  $\mu$  — магнитный момент электрона. В то же время движение ионов обусловлено только действием собственного электрического поля, возникающего в плазме. При этом лишь незначительная часть ионов (менее 0,1 %) попадает на торцевую стенку камеры. Электроны на рис. 2 не указаны, так как их про-

пространственное распределение совпадает с распределением ионной компоненты.

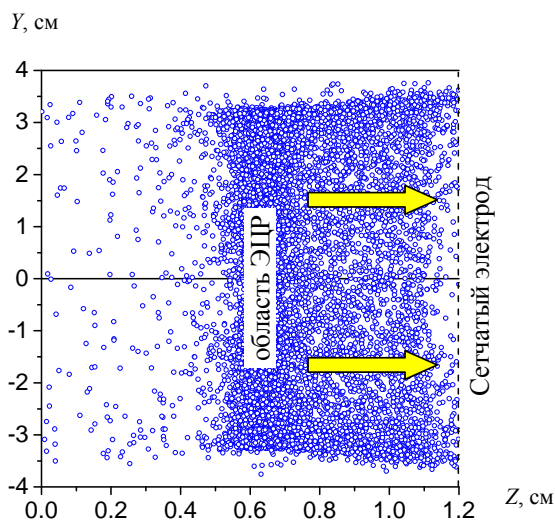


Рис. 2. Характерное пространственное распределение ионов при отсутствии разности потенциалов между сеткой и корпусом резонатора. Стрелками показаны направления движения электронов и ионов

На рис. 3 представлены распределения по скоростям потоков ионов вблизи сетчатого электрода, полученные для различных величин плотности плазмы в области ЭЦР-взаимодействия. Разность потенциалов между сеткой и корпусом  $U = 0$ . Из рисунка следует, интенсивность потока ионов сквозь сетку возрастает с увеличением плотности плазмы, однако средние скорости ионных потоков остаются приблизительно равными. Некоторое возрастание скорости ионного потока и уширение спектра распределения по скоростям в случае плотности плазмы  $n = 5 \cdot 10^9 \text{ см}^{-3}$  связано с увеличением напряженности амбиполярного поля.

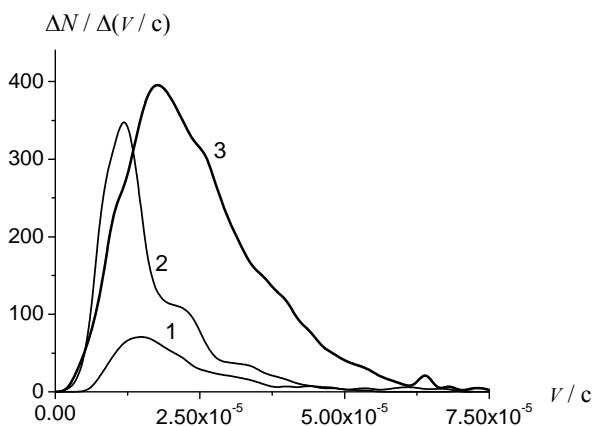


Рис. 3. Распределение ионов по скоростям ( $V/c$ ) вблизи сетчатого электрода для различных значений плотностей плазмы в области ЭЦР-взаимодействия.  $U = 0$ . 1 —  $n = 1 \cdot 10^9 \text{ см}^{-3}$ , 2 —  $n = 2 \cdot 10^9 \text{ см}^{-3}$ , 3 —  $n = 5 \cdot 10^9 \text{ см}^{-3}$

Основной интерес для практических приложений представляет случай, когда к сетке приложен отрицательный потенциал. На рис. 4 изображены распределения потоков ионов по скоростям для различных значений  $U$  при фиксированной плотности плазмы ( $n = 5 \cdot 10^9 \text{ см}^{-3}$ ) в области ЭЦР-взаимодействия. Из представленных результатов следует, что количество ионов и их скорости значительно возрастают в сравнении со случаем отсутствия разности потенциалов. Незначительное изменение в скорости потока при малых значениях разности потенциалов ( $U = 20 \text{ В}$ ), по сравнению со случаем его отсутствия ( $U = 0$ ) указывает на то, что в этих условиях доминирует влияние собственного электрического поля плазмы.

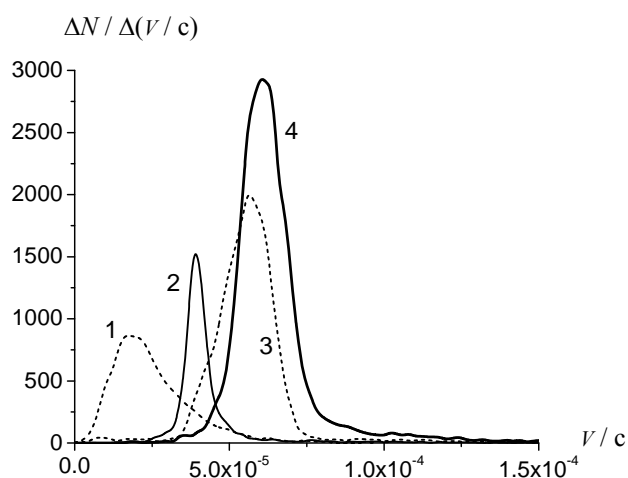


Рис. 4. Распределение ионов по скоростям ( $V/c$ ) вблизи сетчатого электрода для различных значений разности потенциалов между сеткой и корпусом резонатора при фиксированной плотности плазмы в области ЭЦР-взаимодействия. 1 —  $U = 20 \text{ В}$ , 2 —  $U = 50 \text{ В}$ , 3 —  $U = 100 \text{ В}$ , 4 —  $U = 200 \text{ В}$

Установлено, что при увеличении плотности плазмы ( $n \geq 5 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-3}$ ) в ЭЦР-области значительно возрастают потери частиц на стенках камеры см. рис. 5), что приводит к уменьшению потока ионов вблизи сетки. Потоки электронов и ионов на торцевую стенку камеры и сквозь сетку приблизительно равны. При этом потери частиц на цилиндрической поверхности резонатора источника плазмы практически отсутствуют.

На основе полученных результатов были проведены расчеты значений полных ионных токов  $I$  вблизи сетчатого электрода для различных значений разности потенциалов  $U$  и концентраций плазмы в области ЭЦР, результаты которых представлены в таблице.

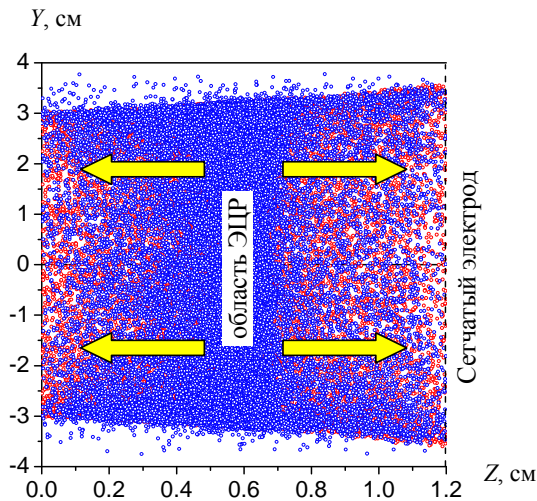


Рис. 5. Пространственное распределение электронов (красные точки) и ионов (синие точки). Плотность плазмы в области ЭЦР  $n = 5 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-3}$ ,  $U = 20 \text{ В}$ . Стрелками показаны направления потоков плазмы

Таблица

U, В	I, отн. ед.		
	$n = 1 \cdot 10^9 \text{ см}^{-3}$	$n = 2 \cdot 10^9 \text{ см}^{-3}$	$n = 5 \cdot 10^9 \text{ см}^{-3}$
0	< 0,008	0,014	0,053
50	0,066	0,082	0,31
100	0,074	0,152	0,58
200	0,094	0,242	1,00

### Заключение

В ходе вычислительного эксперимента установлено, что доминирующими факторами, влияющими на интенсивность потока ионов в инжекторе CERA-RI-2, являются величина разности потенциалов между сеткой и корпусом резонатора, а также плотность генерируемой плазмы. Представленные в работе результаты моделирования плазменных процессов в ЭЦР-инжекторе показывают перспективность начатого направления исследований как в теоретическом плане, так и для практики, в частности, в интересах разработки безэлектродной системы экстракции плазмы в инжекторе CERA-RI-2.

### ЛИТЕРАТУРА

1. 33<sup>rd</sup> International Electric Propulsion Conference (IEPC-2013), Washington, D.C. USA.
2. Naoji Yamamoto, Shinya Kondo, Takayasu Kanagawa, et al. / Proc. VI Int.Conf. "Microwave discharge: fundamentals and applications". Russia, Zvenigorod, 2006. Abstracts, P. 32.
3. Tetsuo Kawanabe, Takeshi Takahashi, Yoshinori Takao, et al. / IEPC-2011-262.
4. Julien Jarrige, Paul-Quentin Elias, Felix Cannat, et al. / IEPC-2013-420.
5. Балмашинов А. А., Степина С. П., Умнов А. М. // Успехи прикладной физики. 2014. Т. 2. № 3. С. 224.
6. Birdsall C. K., Langdon A. B. Plasma Physics via Computer Simulation. Bristol, Philadelphia: IOP Publishing Ltd, 1995.

## Parameters of ECR plasma created in a coaxial cavity of the CERA-RI-2 injector (computer simulation)

A. A. Balmashnov, S. P. Stepina, N. B. Butko, A. M. Umnov, and M. J. Jimenez

Peoples' Friendship University of Russia  
6 Miklukho-Maklaya str., Moscow, 117198, Russia  
E-mail: abalmashnov@rambler.ru

Received March 18, 2015

**Plasma parameters and plasma particles flows in the CERA-RI-2 injector are studied by 3D computer simulation using particle-in-cell method. The dominating areas of plasma particles losses and intensity of plasma and ion flows are determined. It is shown that the determining factors affecting the rate of flow of ions are the potential difference between the grid and the resonator housing and the density of the generated plasma. The obtained results allow deterministic approach to the development of a facility for the extraction of plasma.**

PACS: 52.50.Dg; 52.75.Di; 52.80.Pi

Keywords: plasma, electron cyclotron resonance, coaxial resonator, plasma flow, computer simulation.

### REFERENCES

1. 33<sup>rd</sup> International Electric Propulsion Conference (IEPC-2013) (Washington, D.C. USA, 2013).
2. Naoji Yamamoto, Shinya Kondo, Takayasu Kanagawa, et al., in Proc. VI Int.Conf. "Microwave discharge: fundamentals and applications". (Russia, Zvenigorod, 2006). Abstracts, P. 32.
3. Tetsuo Kawanabe, Takeshi Takahashi, Yoshinori Takao, et al., in Proc. IEPC-2011-262.
4. Julien Jarrige, Paul-Quentin Elias, Felix Cannat, et al., in Proc. IEPC-2013-420.
5. A. A. Balmashnov, S. P. Stepina, and A. M. Umnov, Uspekhi Prikladnoi Fiziki 2, 224 (2014).
6. C. K. Birdsall and A. B. Langdon, Plasma Physics via Computer Simulation. (Bristol, Philadelphia: IOP Publishing Ltd, 1995).