

УДК 533.9.07

**Численное моделирование потоков ионов тяжелых газов
в плазменном ЭЦР-инжекторе***А. А. Балмашинов, С. П. Степина, А. М. Умнов, М. Х. Хименес*

Методом частиц в ячейке проведено трехмерное моделирование потоков ионов криптона и ксенона в плазменном ЭЦР-инжекторе CERA-RI-2. Расчеты выполнены для различных величин плотности плазмы, напряженности электрического СВЧ-поля и разности потенциалов между сеткой и корпусом резонатора. Определены зависимости интенсивности массового потока ионов от параметров эксперимента.

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

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

Введение

Широкая область практического использования источников плазмы на основе ЭЦР (электронный циклотронный резонанс) определяется не только их высокой энергетической эффективностью, но и возможностью реализовать разряд в заданной области и с определенными параметрами. Для решения многих технических проблем используются различные типы резонаторов, что позволяет локализовать электромагнитное поле и повысить напряженность его электрической компоненты. При этом структура полей в резонаторах в совокупности с характером распределения стационарного магнитного поля позволяют реализовать пространственное структурирование параметров плазмы.

Одной из перспективных областей использования плазмы микроволнового разряда является космическая. В настоящее время широко ведутся работы по созданию плазменных ЭЦР-двигателей

(плазменных инжекторов) для различного класса космических аппаратов [1] и, в частности, двигателей коррекции орбит легких спутников Земли [2—4]. Для улучшения массогабаритных параметров этих двигателей могут быть применены коаксиальные резонаторы, геометрические размеры которых значительно меньше размеров полых резонаторов. Существенным для достижения высокой энергетической и газовой эффективности двигателей является реализация ЭЦР-разряда, оптимальность экстракции ионной компоненты (плазмы) и низкие потери частиц плазмы на стенках разрядной камеры.

Работа по созданию компактного ЭЦР-инжектора плазмы на основе коаксиального резонатора с удаленной от его стенок локализацией плазмы была начата нами в 2013 году. Источник плазмы инжектора CERA-RI-2 [5, 6] состоял из цилиндрического узкого коаксиального резонатора, постоянное магнитное поле в котором обеспечивало ЭЦР-взаимодействие в азимутально-симметричной области, удаленной от торцевых стенок, осевого электрода и цилиндрического корпуса. Диаметр ЭЦР-области мог варьироваться. Исследования зависимостей газовой и энергетической эффективностей источника плазмы от массового расхода рабочего газа (аргон) 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, 6].

Балмашинов Александр Александрович, профессор.

Степина Светлана Петровна, доцент.

Умнов Анатолий Михайлович, доцент.

Хименес Марелин Хименес (р-ка Коста-Рика), студент.

Российский университет дружбы народов (РУДН).

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

Тел. 8 (495) 955-09-23.

E-mail: abalmashnov@rambler.ru; stepinasvetlana@rambler.ru;

anumnov@yandex.ru; marilynj8j8@hotmail.com

Статья поступила в редакцию 14 марта 2016 г.

© Балмашинов А. А., Степина С. П., Умнов А. М.,
Хименес М. Х., 2016

Данная работа является продолжением ранее начатых исследований [7] по оптимизации параметров источника плазмы ЭЦР-инжектора CERA-RI-2.

Целью работы являлось численное моделирование потоков ионов тяжелых газов (криптон, ксенон) из разрядной камеры, а также изучение на этой основе зависимости интенсивности потоков ионов от ряда рабочих параметров, а именно, плотности плазмы и напряженности СВЧ-поля.

Постановка задачи и метод ее решения

Проведенное в работе [7] численное моделирование параметров плазмы аргона, генерируемой в источнике CERA-RI-2, и характеристик плазменного потока показало, что при отсутствии разности потенциалов между сеткой и корпусом резонатора источник работает как низкоэффективный коллективный ускоритель ионов, а при ее наличии параметры плазмы в объеме резонатора и интенсивность потока частиц плазмы сквозь сетку зависят от плотности плазмы в области ЭЦР-взаимодействия, напряженности СВЧ-поля, градиента магнитного поля и разности потенциалов между сеткой и корпусом резонатора. Однако основное влияние оказывает именно последний фактор. Варьируя величину разности потенциалов и изменяя полярность, можно не только управлять интенсивностью плазменного потока, но и в случае плазмы с невысокой плотностью (до $n = 5 \cdot 10^9 \text{ см}^{-3}$) создавать электронные или ионные потоки. В случае более высокой плотности плазмы значительно возрастали потери на стенках камеры.

Основная цель работы, как уже сказано, заключалась в исследовании параметров потоков ионов тяжелых газов (криптон и ксенон) и зависимости интенсивности этих потоков от параметров эксперимента. Расчеты проводились на трехмерной численной модели, построенной по методу частиц в ячейке с учетом электростатических взаимодействий, описанной в [7]. В модели учтены все основные рабочие параметры источника CERA-RI-2: конфигурация магнитного поля, структура и напряженность СВЧ-поля, разность потенциалов между сеткой и корпусом резонатора. Решение уравнения Пуассона проводилось методом быстрого преобразования Фурье. Собственное магнитное поле в модели не учитывалось, так как для рассматриваемых параметров (плотность и средняя энергия электронной компоненты) его влияние на процессы, протекающие в инжекторе, пренебрежимо мало. Уравнение движения электронов решалось по схеме Бориса, описанной в работе [8]. Предполагалось, что модельные ионы (Kг, Хе) немагнитные и однократно заряженные. Уравнение движения ионов решалось мето-

дом «с перешагиванием». Расчеты проводились до достижения параметров плазмы своих квазистационарных величин.

Амплитуда напряженности электрического СВЧ-поля варьировалась в интервале $10 \text{ В/см} < E_{\text{СВЧ}} < 100 \text{ В/см}$; плотность плазмы в области ЭЦР-взаимодействия $n = (3 \cdot 10^{10} - 1 \cdot 10^{11}) \text{ см}^{-3}$.

Учитывая результаты, полученные в работе [7], а именно, резкое возрастание потерь частиц на стенках камеры в случае моделирования плотной плазмы, магнитное поле, создаваемое системой постоянных магнитов, было сформировано таким образом, что область ЭЦР-взаимодействия была удалена от цилиндрической поверхности камеры на 1,2 см.

В начальный момент времени в области ЭЦР-взаимодействия, которая представляла собой кольцевую структуру шириной 0,3 см и протяженностью 0,3 см, создавалась модельная нейтральная плазма. Радиус структуры — 2,5 см. Плотность плазмы в области ЭЦР-взаимодействия поддерживалась постоянной. При уходе из этой области пары электрон—ион число частиц восстанавливалось в пространстве области с использованием генератора случайных чисел.

Полученные результаты и их обсуждение

Механизм создания ионного потока достаточно прост. В результате ЭЦР электроны приобретают энергию и дрейфуют вдоль спадающего магнитного поля \mathbf{V} в направлении сетки под действием диамагнитной силы $\mathbf{F}_\mu = -\mu \cdot \text{grad}B$, где μ — магнитный момент электрона. Вследствие более высокой подвижности электронов в плазме возникает амбиполярное поле, под действием которого ионы движутся в том же направлении. В отсутствие разности потенциалов между сетчатым электродом и корпусом источника движение ионов обусловлено только действием собственного электрического поля, возникающего в плазме, которое, в свою очередь, зависит от плотности плазмы.

На рис. 1 представлены распределения по скоростям ионных потоков (газ — криптон), проходящих через сетку, причем при различных величинах напряженности электрического СВЧ-поля. Расчеты проведены для плотности плазмы в области ЭЦР-взаимодействия $n = 3 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-3}$. Разность потенциалов между сеткой и корпусом резонатора равна нулю.

Из рис. 1 следует, что интенсивность потоков ионов, определяемая как количество частиц (площадь, ограниченная соответствующей кривой), пересекающих плоскость сетки в единицу времени ($\Delta N_i / \Delta t$), снижается при увеличении напряженности СВЧ-поля.

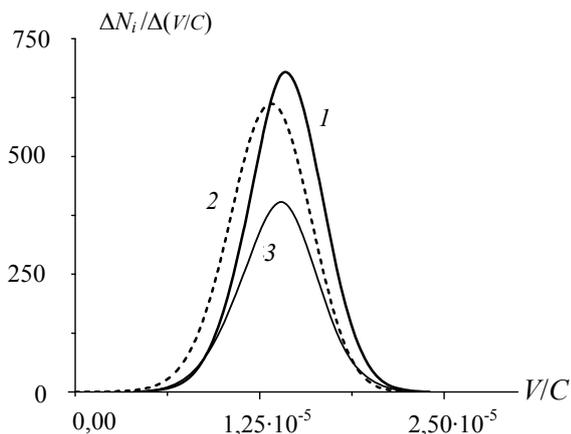


Рис. 1. Распределения ионных потоков по скоростям $\Delta N_i/\Delta(V/C)$ вблизи сетки для различных значений напряженности электрического СВЧ-поля ($E_{СВЧ}$). Разность потенциалов между сеткой и корпусом источника $U = 0$. Газ — криптон. 1 — $E_{СВЧ} = 25$ В/см, 2 — $E_{СВЧ} = 50$ В/см, 3 — $E_{СВЧ} = 100$ В/см.

Аналогичная зависимость распределений ионных потоков по скоростям от напряженности СВЧ-поля наблюдается и для ксенона с той лишь разницей, что средние скорости потоков ионов ксенона несколько ниже, чем в случае криптона (рис. 2).

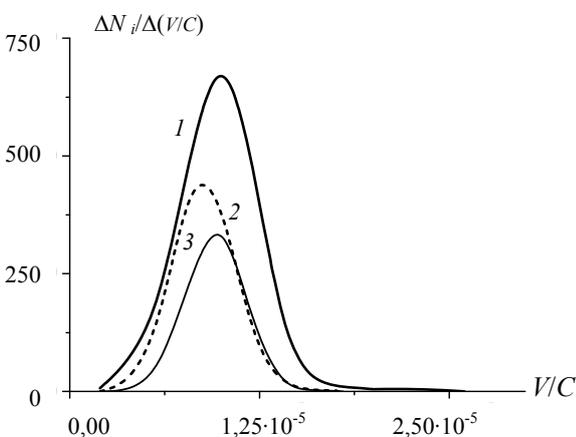


Рис. 2. Распределения ионных потоков по скоростям $\Delta N_i/\Delta(V/C)$ вблизи сетки для различных значений напряженности электрического СВЧ-поля ($E_{СВЧ}$). Разность потенциалов между сеткой и корпусом источника $U = 0$. Газ — ксенон. 1 — $E_{СВЧ} = 25$ В/см, 2 — $E_{СВЧ} = 50$ В/см, 3 — $E_{СВЧ} = 100$ В/см.

Это снижение связано с уменьшением плотности плазмы в направлении спадающего магнитного поля (направление Z). На рис. 3 приведены зависимости плотности плазмы от координаты Z . В области ЭЦР-взаимодействия плотность плазмы практически не зависит от напряженности СВЧ-поля, однако падает в направлении Z тем существеннее, чем выше напряженность СВЧ-поля. Хотя во всех случаях моделирования потоков ионов плазма оставалась квазинейтральной, а разница

между числом модельных ионов и электронов не превышала одного процента, в плазме возникало электрическое поле, ускоряющее ионы.

Отметим, что из-за конструктивных особенностей ЭЦР-инжектора взаимодействие эффективно лишь в интервале $0,5 \text{ см} < Z < 0,8 \text{ см}$. При Z , больших $0,8 \text{ см}$, индукция магнитного поля уменьшается, а вектор напряженности электрического поля уже почти параллелен силовым линиям магнитного поля, вследствие чего эффективность взаимодействия СВЧ-поля с электронами резко снижается. Эти результаты позволяют сделать вывод, что в случае плотной плазмы, в отличие от результатов, представленных в работе [7], доминирующее влияние на ускорение ионов оказывает возникающее в плазме электрическое поле.

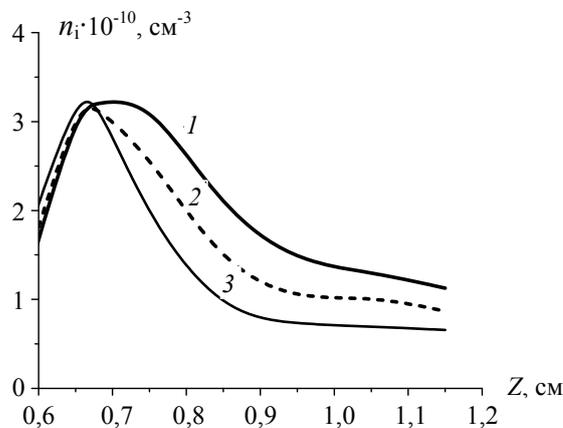


Рис. 3. Зависимости плотности ионной компоненты плазмы n_i от Z -координаты при различных величинах напряженности электрического СВЧ-поля ($E_{СВЧ}$). Разность потенциалов между сеткой и корпусом источника $U = 0$. Газ — ксенон. 1 — $E_{СВЧ} = 25$ В/см, 2 — $E_{СВЧ} = 50$ В/см, 3 — $E_{СВЧ} = 100$ В/см.

Распределения по скоростям ионных потоков, проходящих через сетку для различных величин разности потенциалов между сеткой и корпусом резонатора при напряженности электрического СВЧ-поля 100 В/см представлены на рис. 4. Расчеты выполнены в случае плотности плазмы в области ЭЦР- взаимодействия $n = 3 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-3}$ (криптон).

Представленные результаты показывают, что для заданных значений напряженности СВЧ-поля и плотности плазмы существует оптимальная величина разности потенциалов U , при которой интенсивность потока ионов максимальна. В данном случае это $U = 5 \text{ В}$. При этом на сетке относительно корпуса потенциал положительный, что должно привести к дополнительному ускорению электронов (по сравнению с отсутствием разности потенциалов) и торможению ионов. Однако моделирование дает противоположный результат, а именно, невысокий положительный потенциал на сетке приводит к возрастанию интенсивности по-

тока ионов. Впрочем, при разности потенциалов $U = 25$ В и выше интенсивность ионного потока и их средняя скорость значительно снижаются. В случае отрицательного потенциала на сетке по отношению к корпусу резонатора средняя скорость ионов незначительно возрастает, но интенсивность потока ионов сквозь сетку снижается (кривая 4 на рис. 4), а потери на стенках камеры возрастают. Этот результат является еще одним свидетельством доминирующего влияния собственного электрического поля плазмы на ускорение ионов.

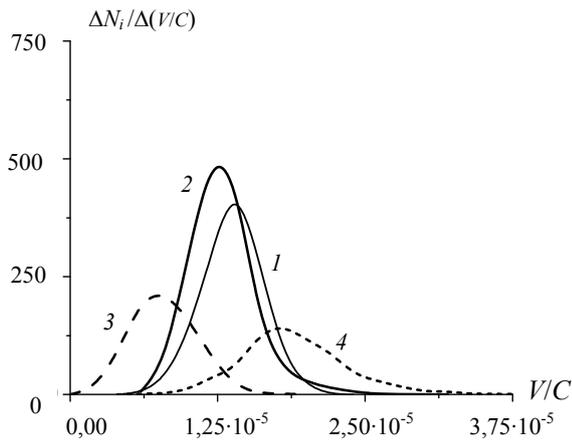


Рис. 4. Зависимость распределений ионных потоков (криптон) по скоростям $\Delta N_i / \Delta(V/C)$ от разности потенциалов между сеткой и корпусом источника U . Напряженность электрического СВЧ-поля $E_{\text{СВЧ}} = 100$ В/см. Плотность плазмы в области ЭЦР $n = 3 \cdot 10^{10}$ см⁻³. Кривая 1 — $U = 0$ В, 2 — $U = 5$ В, 3 — $U = 25$ В, 4 — $U = -5$ В.

Одним из важных параметров, определяющих энергетическую и газовую эффективность работы инжектора, является отношение числа ионов, проходящих сквозь сетку в единицу времени N_i к числу частиц, создаваемых в источнике плазмы в единицу времени N , т.е. $\eta = N_i / N$. На рис. 5 представлены зависимости параметра η от напряженности электрического СВЧ-поля для различных значений плотности плазмы в области ЭЦР-взаимодействия, которые показывают увеличение потерь ионов на стенках корпуса источника плазмы с увеличением $E_{\text{СВЧ}}$.

Представленные результаты показывают, что величина массового потока ионов dm_i/dt в источнике CERA-RI-2 для плотности плазмы в области ЭЦР-взаимодействия $n = 1 \cdot 10^{11}$ см⁻³ (газ — ксенон) может составить 0,13 мг/с.

Результаты вычислительного эксперимента позволяют сделать следующие выводы.

— Изменение конфигурации магнитного поля (удаление области ЭЦР-взаимодействия от образующей цилиндрической камеры), позволяет снизить потери частиц на стенках камеры и увеличить интенсивность потока ионов через сетку.

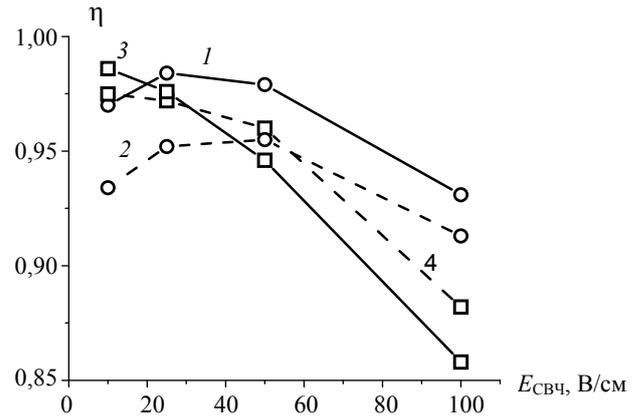


Рис. 5. Зависимость отношения числа ионов N_i , проходящих сквозь сетку в единицу времени, к числу частиц N , создаваемых в источнике плазмы в единицу времени, т.е. $\eta = N_i / N$ от напряженности СВЧ-поля ($E_{\text{СВЧ}}$) для различных значений плотности плазмы n в области ЭЦР-взаимодействия и различных газов. 1 — $n = 3 \cdot 10^{10}$ см⁻³, криптон; 2 — $n = 1 \cdot 10^{11}$ см⁻³, криптон; 3 — $n = 3 \cdot 10^{10}$ см⁻³, ксенон; 4 — $n = 1 \cdot 10^{11}$ см⁻³, ксенон.

— Использование плазмы тяжелых газов (криптона, ксенона) ведёт к возрастанию интенсивности потока ионов по сравнению с плазмой аргона, однако при высокой плотности плазмы ($n = 3 \cdot 10^{10}$ см⁻³ и выше) роль разности потенциалов между сеткой и корпусом резонатора в управлении потоками ионов значительно снижается.

— Наиболее интенсивные потоки ионов наблюдаются в случае генерации плазмы в области ЭЦР с плотностью $1 \cdot 10^{11}$ см⁻³ и при сравнительно невысоких значениях напряженности электрического СВЧ-поля ($E_{\text{СВЧ}}$ до 50 В/см). В случае более высокой плотности плазмы, а также более высоких величин $E_{\text{СВЧ}}$, значительно возрастают потери частиц на стенках камеры и снижается интенсивность потоков ионов через сетку.

Заключение

Установлено, что факторами, влияющими на интенсивность потока ионов через сетчатый электрод, являются плотность генерируемой плазмы и величина напряженности электрического СВЧ-поля, а также наличие оптимального соотношения между этими параметрами, обеспечивающим минимум потерь заряженных частиц на стенках разрядной камеры. В отличие от результатов, представленных в работе [7], разность потенциалов между сеткой и корпусом резонатора для плотной плазмы $n = (3 \cdot 10^{10} - 1 \cdot 10^{11})$ см⁻³ не оказывает существенного влияния на интенсивность потоков ионов. Результаты моделирования плазменных процессов в ЭЦР-установке CERA-RI-2 показывают возможность повышения газовой и энергетической эффективности источника плазмы относительно ранее экспериментально полученных

значений [5], которые при расходе рабочего газа Ar на уровне 0,2 мг/с по таким параметрам, как величина ионного тока и газовая эффективность, практически соответствовали значениям, представленным в работе [4], но при более чем в два раза меньшей величине энергетической цены иона.

Предполагается продолжение исследований в направлении дальнейшей оптимизации параметров разрабатываемого плазменного ЭЦР-инжектора как в теоретическом, так и в экспериментальном плане.

Работа частично поддержана грантом РФФИ № 16-02-00640/16.

ЛИТЕРАТУРА

1. Proc. 33rd International Electric Propulsion Conference (IEPC-2013), Washington, D.C. USA.

2. Yamamoto N., Kondo S., Kanagawa T., Chikaoka T., Yoshihiro K., Nakashima H. / Proc. VI International Conference. "Microwave Discharge: Fundamentals and Applications" (Zvenigorod. 2006). P. 211.

3. Kawanabe T., Takahashi T., Takao Y., Eriguchi K. and Ono K. / Proc. 32nd International Electric Propulsion Conference (IEPC-2011). (Germany, Wiesbaden. 2011). P. 262.

4. Jarrige J., Elias P-Q., Cannat F., Packan D. / Proc. 33rd International Electric Propulsion Conference (IEPC-2013). (USA, Washington. 2013). P. 420.

5. Балмашинов А. А., Степина С. П., Умнов А. М. // Успехи прикладной физики. 2014. Т. 2. № 3. С. 224.

6. Балмашинов А. А., Калашиников А. В., Калашиников В. В., Степина С. П., Умнов А. М. / Труды VII Международного симпозиума по теоретической и прикладной плазмохимии (ISTAPC-2014) (РФ. Плес. 2014). С. 351.

7. Балмашинов А. А., Бутко Н. Б., Степина С. П., Умнов А. М., Хименес М. Х. // Успехи прикладной физики. 2015. Т. 3. № 2. С. 34.

8. Birdsall C. K., Langdon A. B. Plasma Physics via Computer Simulation. (Bristol, Philadelphia): IOP Publishing Ltd, 1995. P. 305.

A computer simulation of ion flows of heavy gases in ECR plasma injector

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

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

Received March 14, 2016

Ion flows of heavy gases (krypton, xenon) in the CERA-RI-2 injector are studied by 3D computer simulation using the particle-in-cell method. Calculations are performed for different values of plasma density, the strength of the electric microwave field and the potential difference between the grid and the resonator housing. A dependence of the intensity of the mass flow of ions on the working parameters is defined. Obtained results allow deterministic approach to the development of a facility for the extraction of ion flows.

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

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

REFERENCES

1. Proc. 33rd International Electric Propulsion Conference (IEPC-2013), (USA, Washington, 2013).
2. N. Yamamoto, S. Kondo, T. Kanagawa, T. Chikaoka, K. Yoshihiro, and H. Nakashima, in Proc. VI International Conference. "Microwave Discharge: Fundamentals and Applications" (Zvenigorod, 2006), pp. 211–216.
3. T. Kawanabe, T. Takahashi, Y. Takao, K. Eriguchi, and K. Ono, in Proc. 32nd International Electric Propulsion Conference (IEPC-2011), (Germany, Wiesbaden, 2011), p. 262.
4. J. Jarrige, P-Q. Elias, F. Cannat, and D. Packan, in Proc. 33rd International Electric Propulsion Conference (IEPC-2013), (USA, Washington, 2013), p. 420.
5. A. A. Balmashnov, S. P. Stepina, and A. M. Umnov, Uspekhi Prikladnoi Fiziki. 2. No. 3, 224 (2014).
6. A. A. Balmashnov, A. V. Kalashnikov, V. V. Kalashnikov S. P. Stepina, and A. M. Umnov, in Proc. VII International Symposium on Theoretical and Applied Plasma Chemistry (ISTAPC-2014), (Plies, 2014). pp. 351–352.
7. A. A. Balmashnov, N. B. Butko, S. P. Stepina, A. M. Umnov, and M. J. Jimenez, Uspekhi Prikladnoi Fiziki. 3. No. 2, 34 (2015).
8. C. K. Birdsall and A. B. Langdon, Plasma Physics via Computer Simulation (Bristol, Philadelphia, 1995; IOP Publishing Ltd, 1995).