Численное моделирование процессов формирования радиального электрического поля в плазме с замагниченными электронами

Г. Д. Лизякин и В. П. Тараканов
Объединенный институт высоких температур РАН, Ижорская ул., 13, стр.2, Москва 125412, Россия

E-mail: glizyakin@gmail.com

Статья поступила в редакцию 27 ноября 2018 г.

Аннотация. Ключевым вопросом для концепции плазмооптической сепарации отработавшего ядерного топлива с потенциальной ямой является создание пространственного распределения электростатического потенциала в плазме с замагниченными электронами. В данной работе приведены результаты численного исследования, проведенного с помощью компьютерного кода КАРАТ, процессов формирования радиального электрического поля в плазме аргона и гелия в цилиндрической геометрии. Получены пространственные распределения потенциала для плазмы аргона с концентрацией электронов $n_e = 10^{10}$ см$^{-3}$ и концентрацией нейтралов $3,5 \cdot 10^{13}$ см$^{-3}$, а также для плазмы гелия с концентрацией электронов $n_e = 10^7$ см$^{-3}$ и концентрацией нейтралов $2,8 \cdot 10^{14}$ см$^{-3}$ при потенциале торцевых электродов -1 кВ (температура электронов $T_e = 10$ эВ, магнитное поле $B = 0; 300; 1000$ Гс). Показано, что при значении магнитного поля 1000 Гс потенциал электрода распространяется вдоль магнитных силовых линий эффективнее, чем при 300 Гс.
https://doi.org/10.33849/2018106

1. ВВЕДЕНИЕ

Перед современной атомной энергетикой среди большого количества задач стоят такие актуальные проблемы как замыкание ядерного топливного цикла и переработка отработавшего ядерного топлива (ОЯТ). Кроме существующих и разрабатываемых химических методов переработки ОЯТ сегодня развиваются и плазменные подходы [1], предполагающие перевод конденсированного вещества в плазменное состояние, и последующее разделение компонентов с разными атомными массами в скрещенных электрическом и магнитном полях в буферной плазме. Компенсация объемного заряда разделяемых ионизированных потоков за счет электронов буферной плазмы позволяет повысить производительность метода. Ключевым вопросом для сепараторов такого типа является создание управляемого пространственного распределения электростатического потенциала в плазме с замагниченными электронами. Одной из возможных конфигураций, в рамках которой может быть осуществлено разделение элементов по группам масс, является плазмооптическая сепарация с потенциальной ямой [1–4]. Следуя данной концепции, в проводящей цилиндрической камере, заполненной плазмой и помещенной в магнитное поле параллельное ее оси, должно быть создано радиальное электрическое поле заданной конфигурации (пространственное распределение потенциала). Для этого применяются электроды, расположенные на торцах цилиндрической камеры. При определенных условиях потенциал электродов должен распространиться в объем буферной плазмы вдоль линий магнитного поля [5–7]. Стоит отметить, что данная конфигурация близка к отражательному разряду или разряду Пеннинга. Процесс воспроизведения потенциала торцевых электродов в буферной плазме требует детального экспериментального и численного изучения. В данной работе приведены результаты численного исследования пространственного распределения потенциала в буферной плазме аргона и гелия в цилиндрической геометрии с торцевыми электродами и проводящей обечайкой. Моделирование проводилось с помощью компьютерного кода КАРАТ [8].

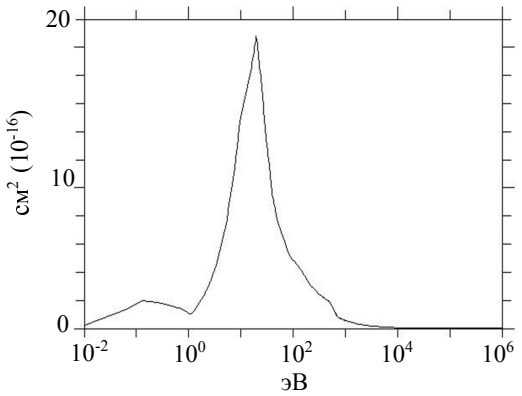
2. МОДЕЛЬ

Численные исследования проводились в цилиндрической геометрии (r, z), где z — ось симметрии и z = 0 — плоскость симметрии цилиндрического объема с заземленной обечайкой ($r_0 = 10$ см) и диэлектрическими торцами ($z_0 = 20$ см). На начальном этапе в данный объем помещалась плазма, состоящая из модельных ионов ($M = 100m_e$ для увеличения скорости расчета) и электронов ($n_e = 10^{10}$ см$^{-3}$). На торце размещался электрод диаметром 4 см с напряжением -1 кВ. Коэффициент вторичной электронной эмиссии электродов принимал значение $\alpha = 0.5$, температура электронов $T_e = 10$ эВ, магнитное поле $B = 0; 300; 1000$ Гс. Используемые в расчетах сечения столкновений [9–11], соответствующие аргону и гелию, приведены на рисунке 1 и рисунке 2 ($3.5 \cdot 10^{13}$–$2.8 \cdot 10^{14}$ см$^{-3}$, что соответствует давлению 1–8 мТорр). Расчет проводился в потенциальном приближении. Геометрия задачи и распределение потенциала в вакууме без магнитного поля представлены на рисунке 3.

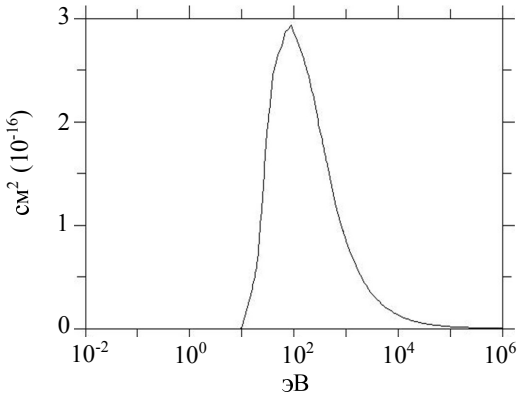
3. РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ

На рисунке 4 и рисунке 5 представлены данные о распределении электронов (зеленые частицы) и ионов (красные частицы) в расчетной области, а также пространственное распределение потенциала при значениях магнитного поля 300 Гс и 1000 Гс, соответственно (концентрация электронов $n_e = 10^{10}$ см$^{-3}$, концентрация нейтральных атомов аргона $3.5 \cdot 10^{13}$ см$^{-3}$). Установление стационарного режима происходит за время порядка 2 мкс. В обоих случаях разряд локализован на оси симметрии и из рисунков видно, что при магнитном поле 1000 Гс потенциал электрода воспроизводится в центральной плоскости эффективнее. Стоит отметить, что в случае отсутствия магнитного поля инициации разряда не происходит.

С увеличением концентрации нейтральных частиц гелия (до $2.8 \cdot 10^{14}$ см$^{-3}$) наблюдается расширение плазмы по радиусу и впоследствии стратификация разряда (рисунок 6), при этом в приосевой области концентра-

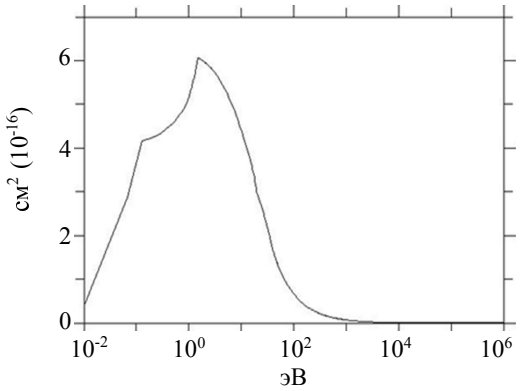


(a) Сечение упругого столкновения.

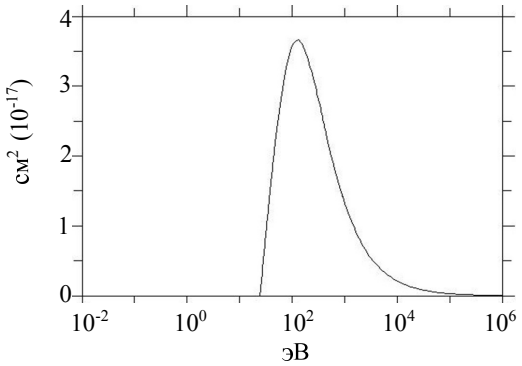


(b) Сечение ионизации.

Рисунок 1. Сечения столкновения для Ar [9].



(a) Сечение упругого столкновения.



(b) Сечение ионизации.

Рисунок 2. Сечения столкновения для He [10, 11].

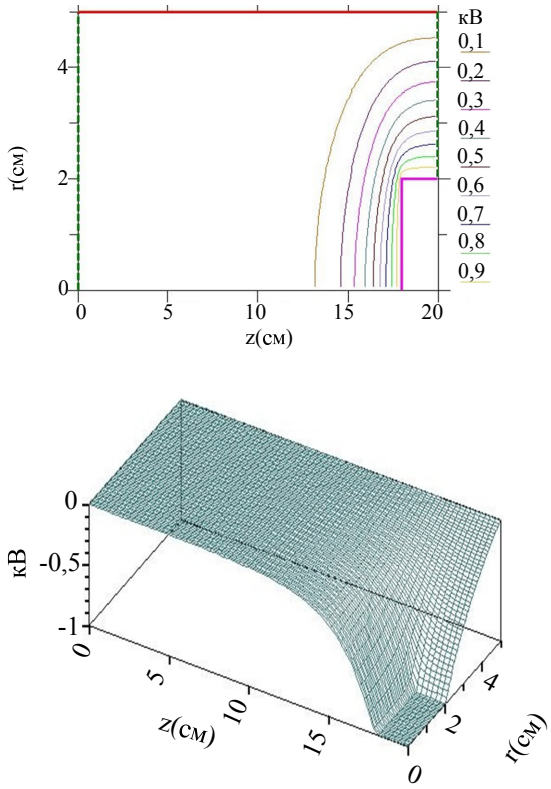


Рисунок 3. Геометрия задачи и распределение потенциала в вакууме (фиолетовый — электрод, красный — проводящая обечайка).

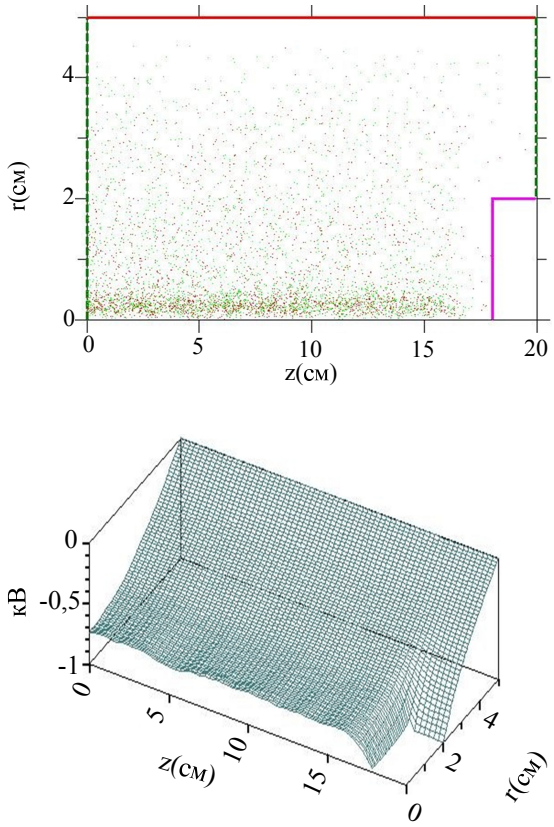


Рисунок 4. Пространственное распределение ионов (красные частицы) и электронов (зеленые) и распределение потенциала для магнитного поля 300 Гс (аргон).

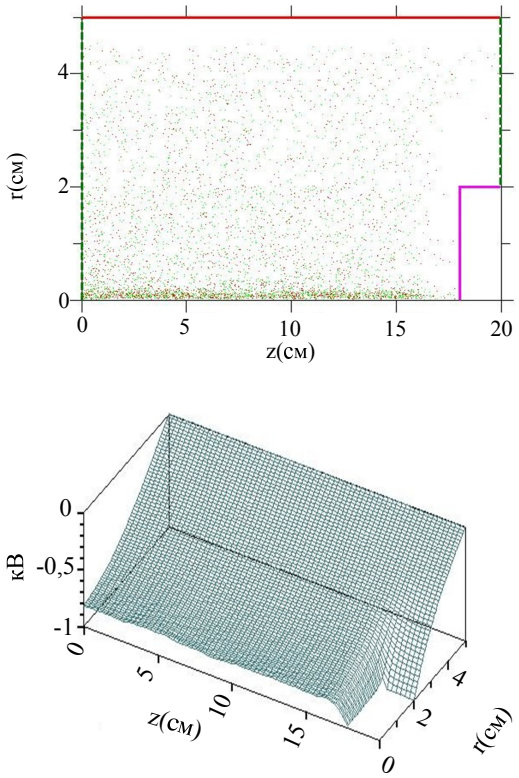


Рисунок 5. Пространственное распределение ионов (красные частицы) и электронов (зеленые) и распределение потенциала для магнитного поля 1000 Гс (аргон).

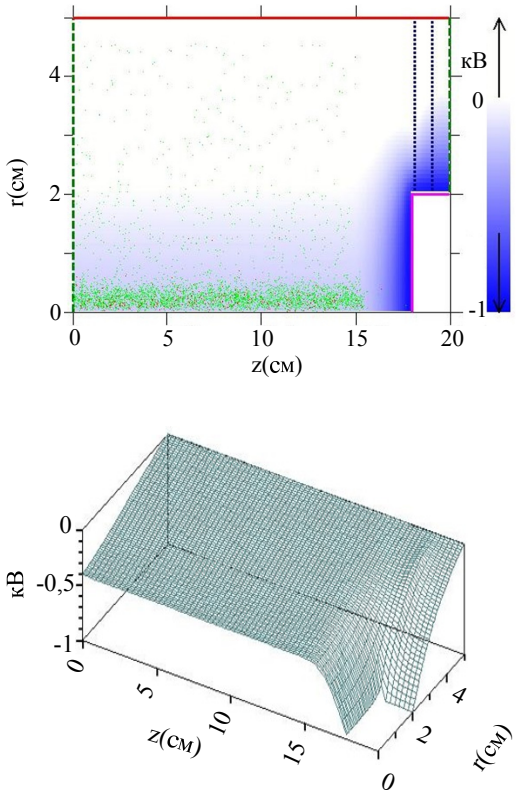


Рисунок 6. Пространственное распределение ионов (красные частицы) и электронов (зеленые) и распределение потенциала для магнитного поля 1000 Гс (гелий).

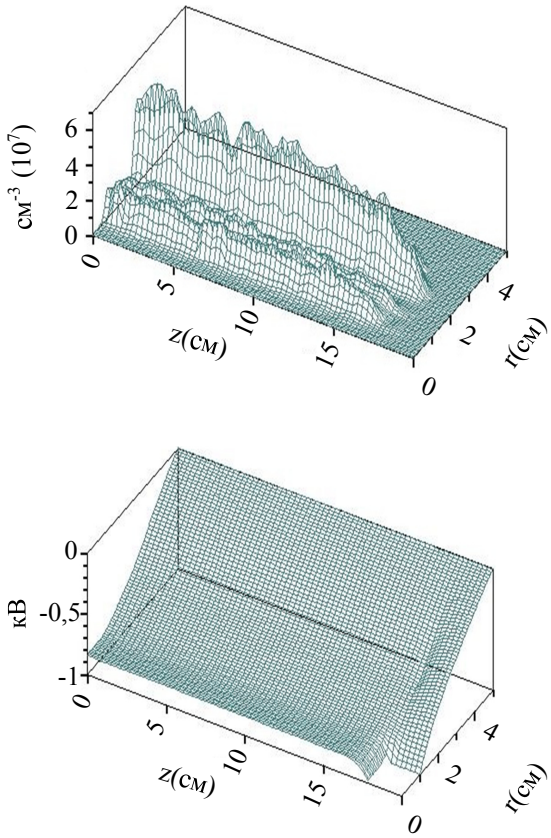


Рисунок 7. Пространственное распределение ионов и распределение потенциала для магнитного поля 1000 Гс.

ция электронов существенно снижается (начальная концентрация плазмы $n_e = 10^7$ см$^{-3}$). Такое поведение может быть объяснено ростом роли столкновений. Стоит отметить, что при данных параметрах также наблюдается воспроизведение потенциала электродов в объеме плазмы.

На рисунке 7 приведены результаты аналогичного расчета с плазмой в атмосфере гелия при значении индукции магнитного поля 1000 Гс, концентрации нейтральных атомов гелия $7 \cdot 10^{13}$ см$^{-3}$, начальной плазме в объеме с концентрацией электронов на уровне $n_e = 10^7$ см$^{-3}$. Установление стационарного режима при описанных параметрах происходит на временах порядка 140 мкс.

4. ВЫВОДЫ

В работе приведены результаты численного исследования процессов формирования радиального электрического поля в плазме аргона и гелия в цилиндрической геометрии. Полученные расчетные данные говорят о возможности формирования необходимого для плазменного разделения химических элементов профиля потенциала (потенциальной ямы). Показано, что при значении магнитного поля 1000 Гс потенциал электрода распространяется вдоль магнитных линий эффективнее, чем при 300 Гс. В аргоновой плазме воспроизводится потенциал до -0.8 кВ при потенциале торцевых электродов -1 кВ. На примере плазмы гелия с концентрацией электронов $7 \cdot 10^{13}$ см$^{-3}$ показано, что увеличение концентрации нейтральных частиц до $2.8 \cdot 10^{14}$ см$^{-3}$

приводит к расширению плазмы и стратификации разряда, при этом концентрация электронов в приосевой области существенно снижается.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Долголенко Д А и Муромкин Ю А 2017 *УФН* **187** 1071–1096
2. Smirnov V P, Samokhin A A, Vorona N A and Gavrikov A V 2013 *Plasma Phys. Rep.* **39** 456–466
3. Gavrikov A V, Sidorov V S, Smirnov V P and Tarakanov V P 2018 *J. Phys.: Conf. Ser.* **946** 012172
4. Vorona N, Gavrikov A, Samokhin A, Smirnov V and Khomyakov Y S 2015 *Phys. Atom. Nuclei* **78** 1624 – 1630
5. Volosov V I and Pekker M S 1981 *Nucl. Fusion* **21** 1275
6. Liziakin G D, Gavrikov A V, Murzaev Y A, Usmanov R A and Smirnov V P 2016 *Phys. Plasmas* **23** 123502
7. Liziakin G, Gavrikov A, Usmanov R, Timirkhanov R and Smirnov V 2017 *AIP Adv.* **7** 125108
8. Tarakanov V P 1992 *Users Manual for Code KARAT* (Springfield: VA: Berkley Research)
9. Мак-Доналд А 1969 *Сверхвысокочастотный пробой в газах* (Москва: Мир)
10. Brunger M, Buckman S, Allen L, McCarthy I and Ratnavelu K 1992 *J. Phys. B: At., Mol. Opt. Phys.* **25** 1823
11. Montague R, Harrison M and Smith A 1984 *J. Phys. B: At. Mol. Phys.* **17** 3295