

УДК 533.9.07, 621.387.424

С.А. ОГИЕНКО

*Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е.Жуковского "ХАИ", Украина*

## АНАЛИЗ ФАКТОРОВ, ОПРЕДЕЛЯЮЩИХ ФОРМИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ И ФОКУСИРОВКУ ИОННОГО ПОТОКА В УСКОРИТЕЛЕ ХОЛЛА И В СТАЦИОНАРНОМ ПЛАЗМЕННОМ ДВИГАТЕЛЕ

С целью улучшения фокусировки ионного пучка ускорителя Холла, на первом этапе, на основе метода Монте-Карло решена задача о движении электронов в скрещенных неоднородных электрическом и магнитном полях при условии их стационарности и учете неоднородного распределения по углам рассеянных электронов при их взаимодействии с частицами плазмы.

**ускоритель Холла, стационарный плазменный двигатель, фокусировка ионного потока, формирование электрического поля**

### Введение

Ускоритель с замкнутым дрейфом электронов и протяженной зоной ускорения, который также известен как ускоритель Холла (УХ), в настоящее время широко используется в качестве стационарного плазменного двигателя (СПД) для космических аппаратов. С целью улучшения фокусировки потока УХ выделены вопросы, требующие дальнейшего изучения: динамика электронов; закономерности формирования электрического поля в разрядной камере (РК).

### 1. Формулирование задач

При решении вышеперечисленных вопросов широко используется описание распределения потенциала электрического поля с помощью так называемого "уравнения термализованного потенциала" (УТП) [1, 2]. Однако остаются противоречия, которые не могут быть объяснены в рамках сделанных предположений и требуют исследования. Условия, при которых определено так называемое УТП, предполагают наличие "перемешивающего электроны фактора" [2]. Полагается, что интенсивность взаимодействия должна быть такова, чтобы отклонение электрона за счет кулоновских столкновений – "перемешивающего фактора" на угол порядка  $90^\circ$

происходило на расстоянии  $L_{mix} = \lambda_{90}$  много меньшим, чем характерный размер неоднородности магнитного поля  $L_{н.мп} \sim 10^{-2}$  м (определяется шириной канала). Т.е. должно выполняться условие  $L_{mix} \ll L_{н.мп}$ . Оценивая  $\lambda_{90}$  согласно [3], получаем  $L_{mix} = \lambda_{90} \approx 1$  м, что превосходит  $L_{н.мп}$ .

Представляется необходимым решение стационарной задачи об определении движения электронов в РК в условиях, характерных для рабочего режима двигателя, с учетом наличия неоднородных электрического и магнитного полей и двумерного характера магнитного поля; характерного углового распределения рассеянных электронов при упругом и неупругом взаимодействии с частицами в плазме РК. Основным результатом решения стационарной задачи будет определение в первом приближении распределений: осредненной по ширине канала скорости движения электронов вдоль оси РК; осредненной энергии электронов; области локализации в РК процессов ионообразования.

### 2. Решение задач.

#### Результаты исследований

##### 2.1. Уравнения и условия математической модели движения электронов в РК

Задача о движении электронов решается на основе метода Монте-Карло. Траектория движения

электронов в РК определяется путем численного интегрирования системы дифференциальных уравнений движения заряженной частицы с единичным зарядом  $-q$ , массой  $-m$ , в скрещенных неоднородных магнитном поле с составляющими  $B_z$  и  $B_y$ , и электрическом поле  $-E_z$  и  $E_y$ :

$$\begin{cases} m \cdot \dot{V}_x = -q \cdot B_z \cdot V_y + q \cdot B_y \cdot V_z; \\ m \cdot \dot{V}_y = -q \cdot E_y + q \cdot B_z \cdot V_x; \\ m \cdot \dot{V}_z = -q \cdot B_y \cdot V_x - q \cdot E_z. \end{cases}$$

Учтены упругие и неупругие столкновения электронов. Вероятностный механизм столкновений моделируется путем введения (дополнительно) расчета вероятности пробега электроном пути  $\lambda$  до реализации интересующего процесса по формуле

$$P\left(\frac{\lambda}{\lambda_0}\right) = \exp\left(-\frac{\lambda}{\lambda_0}\right), \text{ где } \lambda_0 - \text{средняя длина пробега электрона.}$$

Для расчета  $\lambda_0$  использованы опытные данные о характерном распределении параметров плазмы вдоль РК:  $n_e(y)$ ,  $n_a(y)$  – концентрации электронов и атомов РТ.

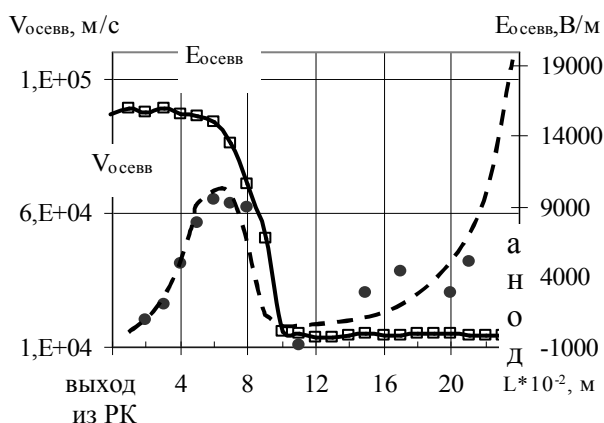


Рис. 1. Распределение скорости движения электронов к аноду и напряженности электрического поля при разрядном напряжении 250 В:

$L$  – расстояние от выхода из РК.

$E_{осев}$  – напряженность эл. поля в РК

Взаимодействие с атомами моделируется с учетом характерного углового рассеянных электронов в зависимости от кинетической энергии взаимного движения [4]. Предполагается, что процессы рекомбинации происходят на поверхности РК при неупругом столкновении электрона со стенкой РК. Учтен пристеночный скачек потенциала с характерной величиной  $\approx (1,5 \dots 2) \cdot T_e$ . Определен коэффициент вторичной эмиссии электронов поверхности РК с эмиссионными свойствами оксида  $Al_2O_3$ .

## 2.2. Результаты расчета по математической модели

Рассчитано: распределение вдоль оси РК осевой скорости электрона  $-V_{осев}$ ; распределение средней энергии электронов  $E_{осев}$  (рис. 1, 2) с характерным изменением вдоль РК (с максимумом в зоне ионизации и ускорения, со снижением к аноду и стабилизацией в прианодной области), что соответствует экспериментальным данным; а также распределение в РК области в которой локализованы процессы ионообразования (рис. 3, 4).

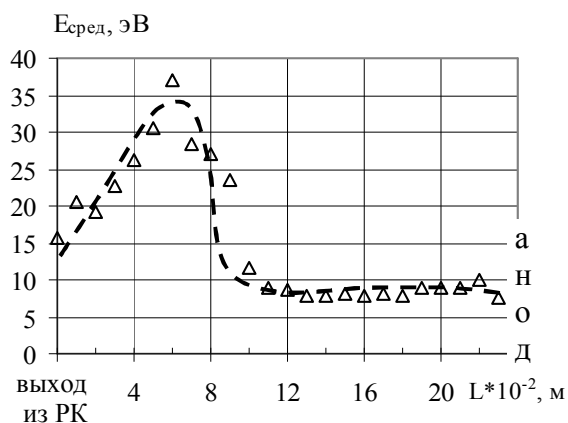


Рис. 2. Средняя энергия электронов  $-E_{сред}$  при разрядном напряжении 250 В:  
 $L$  – расстояние от выхода из РК

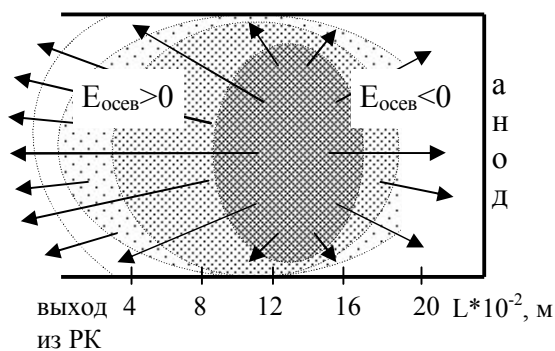


Рис. 3. Распределение в РК области локализации ионизационных столкновений:  
 --- Линии равной концентрации ионов.  
 ← Направление движения ионов в РК.

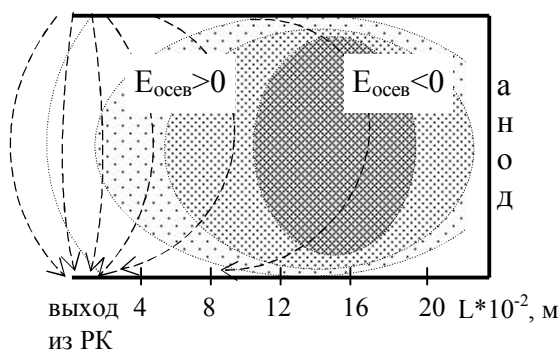


Рис. 4. Распределение в РК концентрации электронов:  
 --- Линии равной концентрации электронов  
 <--- Силовые линии магнитного поля

### Заключение

1. Условия, необходимые для выполнения “уравнения термализованного потенциала” в зоне ионизации и ускорения РК УХ, не реализуются вследствие того, что рассеяние электронов является недостаточно интенсивным.

2. Распределение средней энергии электронов вдоль РК качественно соответствует результатам известных экспериментов

3. При анализе процессов следует учитывать влияние на движение электронов неоднородных электрического и магнитного полей, а также особенности рассеяния частиц при упругих и неупругих взаимодействиях.

4. В прианодной области, в которой электрическое поле имеет обратную направленность, механизм диффузии электронов обеспечивает эффективный перенос электронов на анод;

5. Характерный профиль области, где локализованы процессы ионообразования и распределение концентрации электронов определяет качественно распределение потенциала в РК и, т.о., направление движения ионов (к аноду, к выходу из РК и к стенкам РК) – т.е. определяет дефокусировку ионного потока (рис. 3 и 4). Этот профиль соответствует качественно экспериментальным данным о распределении потенциала в РК.

С целью улучшения фокусировки ионов выделены для решения задачи: о распределении ионов в РК с учетом их движения; о движении электронов в области между катодом и РК.

Некоторые результаты работы получены при выполнении проекта № 1936, финансируемого НТЦУ в 2005 г.

### Литература

1. Плазменные ускорители / Под ред. Л.А. Арцимовича. – М.: Машиностроение, 1973. – С. 75 – 91.
2. Бугрова А.И., Ким В.П. Современное состояние физических исследований в ускорителях с замкнутым дрейфом электронов и протяженной зоной ускорения // Плазменные ускорители и ионные инжекторы. – М.: Наука, 1984. – С. 97 – 117.
3. Мак-Даниель И. Процессы столкновений в ионизованных газах.: Пер.с англ. / Под ред. Л.А. Арцимовича. – М.: Мир, 1967. – 564 с.
4. Месси Г. Электронные и ионные столкновения.: Пер. с англ. / Под ред. С.М. Осовец. – М.: Ин. лит., 1958. – 604 с.

Поступила в редакцию 22.04.2005

**Рецензент:** д-р техн. наук, профессор А.И. Оранский, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е.Жуковского “ХАИ”, Харьков.