

УДК 533.9.07, 621.387.424

С.А. ОГИЕНКО

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

## ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ В ОБЛАСТИ МЕЖДУ КАТОДОМ И СРЕЗОМ РАЗРЯДНОЙ КАМЕРЫ СТАЦИОНАРНОГО ПЛАЗМЕННОГО ДВИГАТЕЛЯ, ОПРЕДЕЛЯЮЩИХ ФОРМИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ, ПРОВОДИМОСТЬ ЭЛЕКТРОНОВ И ФОКУСИРОВКУ ИОНОВ

С целью поиска путей улучшения фокусировки ионного пучка и повышения ресурса стационарного плазменного двигателя (СПД), решена задача о движении электронов в области между катодом и срезом разрядной камеры с учетом периодических азимутальных неоднородностей потенциала. Экспериментально (по свечению плазмы) установлено существование азимутальных неоднородностей плазмы длительностью в пределах  $10^{-3}$  с.

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

### Введение

В настоящее время стационарный плазменный двигатель (СПД) эффективно применяется в двигательных установках космических аппаратов, в качестве источников ионов для плазменной технологии и при проведении исследований в области ядерного синтеза. Для поиска путей улучшения фокусировки потока и увеличения ресурса работы СПД выделены вопросы, требующие дальнейшего изучения – закономерности движения заряженных частиц и формирования электрического поля в области катод – срез разрядной камеры (РК), а также влияние на эти процессы азимутальной неоднородности параметров плазмы.

**Формулирование задач исследования процессов в области катод – срез РК.** Определены следующие направления углубленного исследования физических процессов в СПД. 1. Экспериментальное (по свечению плазмы) исследование азимутальных неоднородностей в плазме в области катод-срез РК. 2. Изучение закономерностей формирования электрического поля в двигателе на основе изучения закономерностей движения электронов в области катод-срез РК. Представляется необходимым решение

теоретической задачи об определении распределений электронов по энергиям и концентрации электронов в условиях, характерных для рабочего режима двигателя, с учетом периодического характера азимутальной составляющей электрического поля.

### Решение задач. Результаты

**Математическое моделирование движения электронов в разрядном промежутке катод – срез РК.** Задача о движении электронов решалась методом вероятностного моделирования (Монте-Карло методом подобно [1]). Траектория движения электронов определялась путем численного интегрирования системы дифференциальных уравнений движения заряженной частицы. Необходимость применения такого подхода определялась тем, что невозможно аналитическое решение задачи о движении электрона в условиях существенно неоднородного и двумерного характера полей в исследуемой области катод – срез РК. В качестве граничных условий полагалось: перепад потенциала в моделируемой области – 120 В, массовый расход Хе через катод (удаленный от среза РК на расстояние  $\approx 2$  см) составляет 0,3 мг/с (при этом концентрация атомов в самой об-

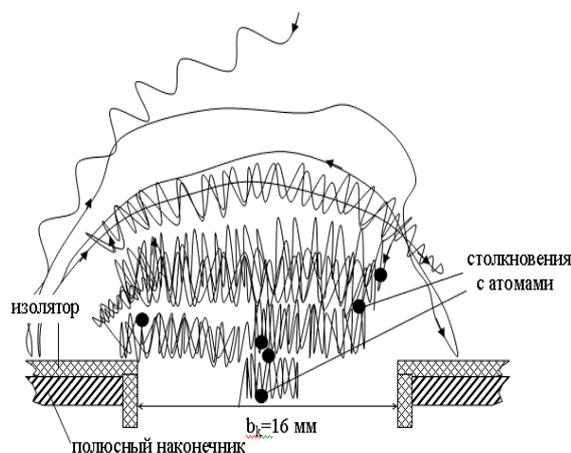
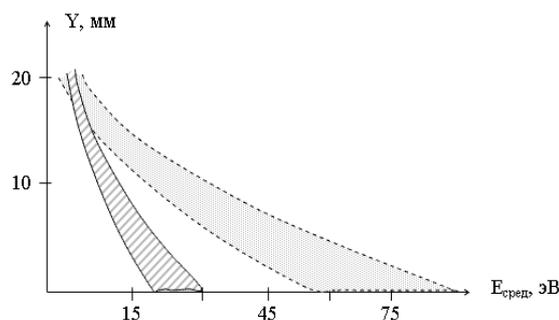
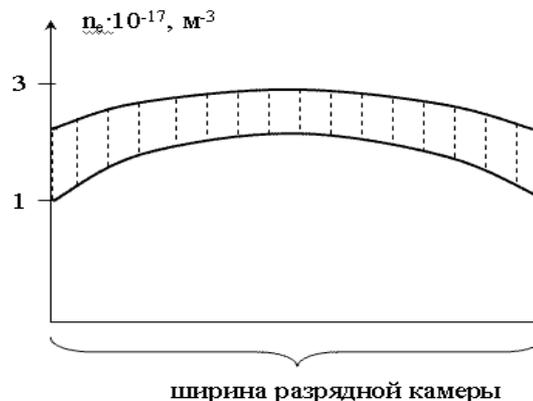
ласти вблизи среза РК определяется преимущественно течением газа из РК. Температура электронов, эмитированных катодом –  $T_e = 2...3$  эВ. Результаты измерений скорости ионов указывают на то, что за пределами РК «падает» до половины разрядного напряжения. Такое распределение потенциала соответствует низкой проводимости электронов за пределами РК из-за сравнительно низкой концентрации атомов РТ в этой области. Это характерно для удаленного расположения катода от среза РК. При этом концентрация атомов в самой области вблизи среза РК определяется преимущественно течением газа из самой РК.

Характерное распределение магнитного и электрического полей бралось в относительном выражении по данным, известным из экспериментальных исследований.

Основным результатом расчета являются распределения электронов – рис. 1, 2; обобщенные особенности траектории движения электрона в исследуемой области разряда – рис. 3, которые изучались при визуальном наблюдении за движением электрона в ходе численного эксперимента.

Анализ результатов (рис. 1 и 2) указывает на неоднородность распределения концентрации и энергии на входе в РК – с повышением (более чем в два раза) к средней линии РК, что является результатом отражения электронов в «магнитных пробках» вблизи полюсных наконечников магнитной системы к срединной линии РК. Такая неоднородность (уже на входе в РК) концентрации электронов определяет локализацию ионизационных процессов в РК вблизи срединной поверхности. За пределами РК в области спадающего электрического поля преобладает механизм проводимости электронов, обусловленный их рассеянием в «магнитных пробках» – областях магнитного поля со сходящимися криволинейными силовыми линиями – и «переходом» на другую силовую линию с большей напряженностью и, т.о., приближением электронов к входу в РК. Необходи-

мое (для отражения в «магнитных пробках») приращение радиальной скорости движения электрона



обеспечивается благодаря кулоновским столкновениям с «термализацией» энергии дрейфового движения электронов. За пределами РК, по мере приближения к срезу РК в нарастающем электрическом поле энергия электронов возрастает и в обеспечении проводимости преобладает роль упругих и неупругих столкновений с атомами

**Экспериментальное исследование азимутальных неоднородностей в плазме в области катод – срез РК.** К настоящему времени установлено существование азимутальных колебаний потенциала с амплитудой  $\delta\phi \sim T_e \approx 20$  эВ. Протяженность этих областей оценивается как  $L \sim 10^{-2}$  м, напряженность наведенного электрического поля  $\delta E \approx \delta\phi/L \approx 2 \cdot 10^{+3}$  В/м. При анализе возможных механизмов проводимости электронов эти колебания следует учитывать как дополнительный фактор, искажающий траекторию дрейфового движения электрона. Действие этого фактора способствует рассеянию электронов в «пробочном» магнитном поле вблизи полюсных наконечников с последующим смещением в направлении входа в РК и, т.о., может повышать проводимость электронов. Происходит «переход» электрона на другую силовую линию магнитного поля при отражении в сходящемся у полюсов магнитном поле. Это возможно при нарушении закона сохранения «магнитного момента» электрона – если отражение происходит в области азимутальной неоднородности потенциала.

Исследования периодических процессов вблизи среза РК при работе СПД типа М-70 на номинальном режиме было проведено с помощью быстрозаписывающей аппаратуры, позволяющей фиксировать видимое свечение плазмы со временем экспозиции  $\sim 10^{-3}$  с. Анализ результатов показал, что в изучаемой области существуют участки, вытянутые вдоль РК, с неоднородной яркостью свечения – рис. 4.

Пространственная картина распределения зарядов, а также схема предполагаемого процесса, который приводит к появлению азимутальной неоднородности

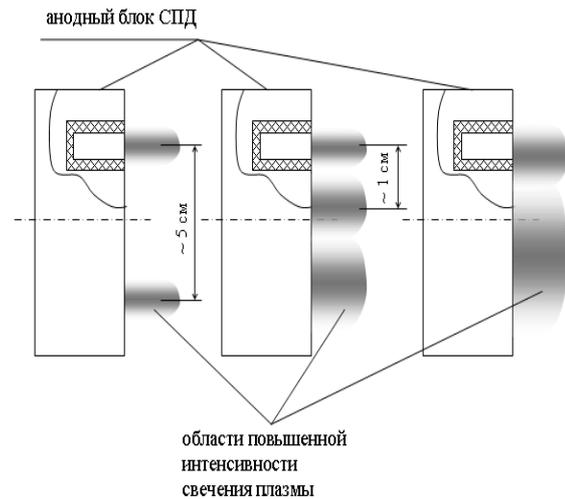


Рис. 4. Неоднородности свечения плазмы вдоль азимута ускорительного канала

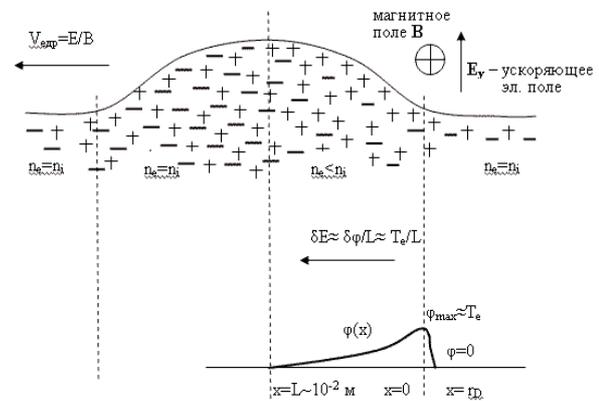


Рис. 5. Предполагаемая схема процесса поляризации зарядов в области с неоднородной концентрацией атомов (за пределами неоднородности потенциал спадает от  $\Phi_{\max}$  до 0 на протяжении Дебаевской длины –  $r_D$ )

родности потенциала электрического поля – процесса поляризации приведена на рис. 5. Время существования неоднородностей будет определяться снизу - временем пролета иона через РК т.е.  $\sim 10^{-6}$  с, а сверху  $\sim 10^{-4}$  с – определится временем “рассыпания” неоднородности атомов – временем пролета атома через РК. Результаты исследования особенностей движения электрона с учетом азимутальной неоднородности потенциала показали, что проводимость электронов изменяется незначительно. При этом необходимо отметить, что при расчете величина азимутальной неоднородности потенциала бралась как  $T_e \approx 20$  В (по экспериментальным данным),

но может иметь верхним пределом величину средней энергии электронов на входе в РК – до 60 эВ (определенную при проведении численного эксперимента в настоящей работе). В рассматриваемом возможном диапазоне величин азимутальной неоднородности потенциала плазмы, и соответствующей напряженности электрического поля, можно ожидать также влияния этой составляющей поля на движение ионов, а именно на расходимость ионного потока. Такое влияние может быть выявлено экспериментально, путем определения направления «закрутки» ионов, выходящих из РК и может, косвенно, характеризовать величину азимутальной составляющей электрического поля в РК. Подтверждением такой особенности движения ионов может быть известный ранее экспериментально определенный факт неоднородного (периодические вдоль периметра зубчатые углубления) износа кромок РК.

Экспериментальная часть исследований выполнена совместно с сотрудником каф. 402 ХАИ Белоконь В.И.

### Заключение

1). Неоднородность в распределении концентрации и энергии электронов вдоль радиуса (уже на срезе разрядной камеры) обуславливает в дальнейшем формирование электрического поля в разрядной камере с радиальной составляющей, которая определяет расходимость ионного потока.

2). Впервые экспериментально обнаружено нестационарное свечение плазмы в области между срезом разрядной камеры и катодом в азимутальном направлении длительностью порядка  $10^{-3}$  с, что позволяет оценивать азимутальную неоднородность потенциала плазмы и соответствующую составляющую электрического поля.

3). Возникающая азимутальная составляющая электрического поля увеличивает расходимость ионного потока.

4). В исследуемой области, по мере приближения к срезу РК, механизм проводимости преимущественно определяется упругим рассеянием электронов на атомах, а также рассеянием в области азимутальных неоднородностей потенциала вблизи полюсных наконечников с последующим «переходом» электронов на силовые линии магнитного поля с большей напряженностью – «переход» в сторону входа в разрядную камеру.

5). Диапазон величин сквозного электронного тока (до 10% эмитированных катодом электронов) определенного по результатам моделирования, качественно соответствует опубликованным результатам зондовых измерений, что подтверждает адекватность моделирования процессов в исследуемой области разрядного промежутка стационарного плазменного двигателя.

В качестве дальнейшего направления исследований определена **задача** о нахождении распределения перепадов потенциала на участках разрядного промежутка СПД.

### Литература

1. Огиенко С.А. Анализ факторов, определяющих формирование электрического поля в стационарном плазменном двигателе // Авиационно-космическая техника и технология: Науч.-техн. журн. – 2006. – № 9. – С. 145-148.

*Поступила в редакцию 30.05.2006*

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф. А.И. Оранский, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков.