

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 ≈ 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

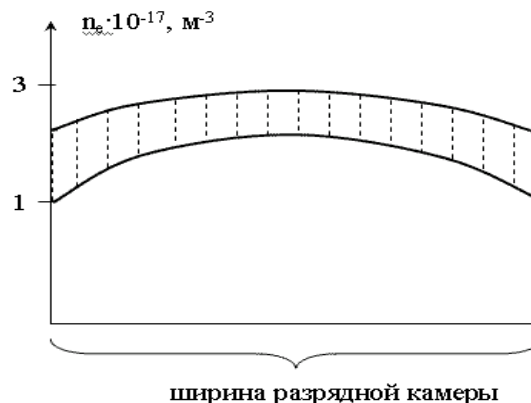


Рис. 1. Распределение концентрации электронов вдоль радиуса на протяжении ширины разрядной камеры СПД. Показан диапазон расчетных значений концентрации

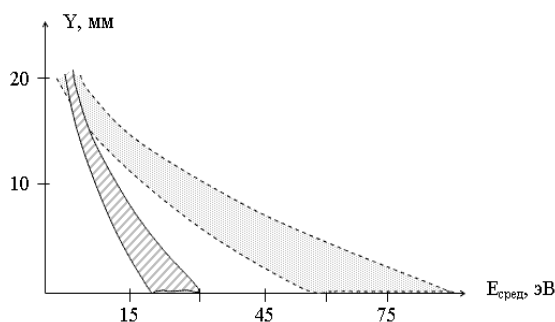


Рис. 2. Распределение энергии электронов на удалении от среза РК (отсчет Y от среза РК): — осредненной по радиальному сечению; --- взятой как средняя на оси величина.

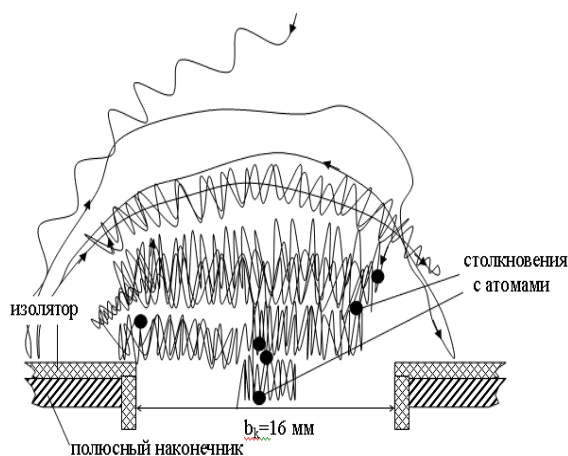


Рис. 3. Особенности движения электрона в области катод – срез разрядной камеры. В РК попадает до 10 %, эмитированных катодом электронов

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

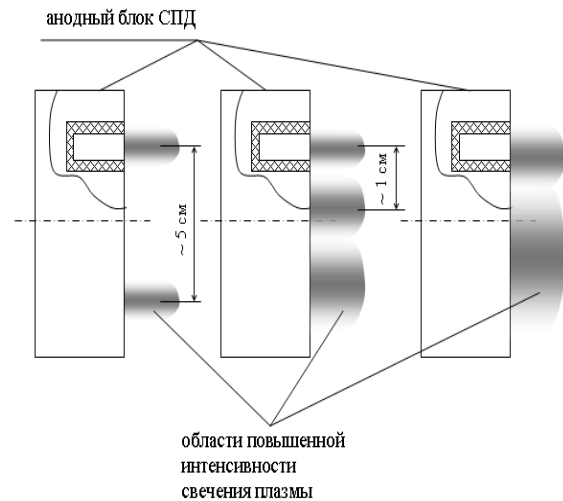


Рис. 4. Неоднородности свечения плазмы вдоль азимута ускорительного канала

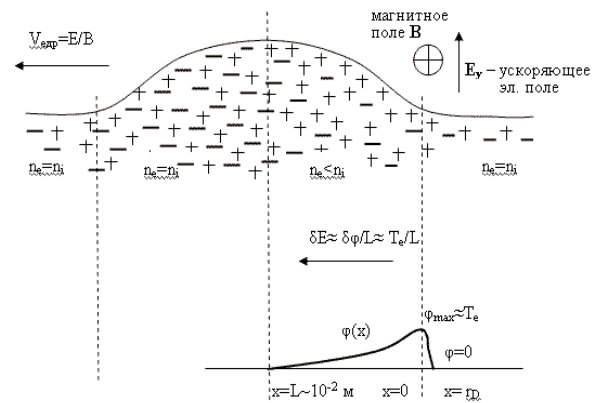


Рис. 5. Предполагаемая схема процесса поляризации зарядов в области с неоднородной концентрацией атомов (за пределами неоднородности потенциал спадает от Φ_{\max} до 0 на протяжении Дебаевской длины – r_D)

ности 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 “рассасывания” 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.