

УДК 533.59, 537.534

Численное моделирование первичного пучка ионов и потока вторичных ионов в ионно-оптической системе ионного двигателя

Абгарян В.К.^{1*}, Ахметжанов Р.В.^{1}, Лёб Х.В.^{2***}, Обухов В.А.^{1****},
Черкасова М.В.^{1*****}**

¹*Московский Авиационный Институт (национальный исследовательский университет), МАИ, Волоколамское шоссе, 4, Москва, А-80, ГСП-3, 125993, Россия*

²*Первый институт физики Гиссенского университета имени Юстуса Либиха,
Heinrich–Buff–Ring 16, Gießen, 35392, Germany*

**e-mail: vka.mai@mail.ru*

***e-mail: ahmetzhanov1991@mail.ru*

****e-mail: Horst.w.loeb@expl.physik.uni-giessen.de*

*****e-mail: riame@sokol.ru*

******e-mail: maria-post@mail.ru*

Аннотация

Проведено расчетное исследование элементарной ячейки трех электродной ионно-оптической системы (ИОС) в диапазоне плотностей ионного тока и ускоряющих напряжений, соответствующих ионным двигателям космического применения. Исследованы формирование первичного пучка ионов и конфигурация потоков вторичных ионов перезарядки, попадающих на электроды ИОС из объема пучка и из области нейтрализации.

Ключевые слова: высокочастотный ионный двигатель, ионно-оптическая система, эрозия, поток ионов перезарядки, зона нейтрализации, объемный заряд

Введение

Ионные двигатели (ИД) относятся к электростатическим двигателям, в которых рабочее тело в виде положительно заряженных частиц ускоряется посредством электростатического поля с последующей компенсацией их заряда электронами на выходе из двигателя. В ИД процессы преобразования рабочего тела в плазменное состояние и ускорения заряженного потока пространственно разделены. Электростатическое ускорение возможно для заряженных частиц одного знака – ионов и может быть осуществлено в практических конструкциях ИД. Обладая общим механизмом ускорения, ИД делятся по типам, отличаясь способом перевода рабочего тела в заряженное (плазменное) состояние. В настоящее время разработаны ИД на основе газового разряда постоянного тока, высокочастотного газового разряда и сверхвысокочастотного разряда.

В силу простоты физической идеи ИД их разработкой начали заниматься с конца 50-ых годов прошлого столетия сразу во многих странах. Двигатели этого типа доведены до высокого технологического уровня в США (ИД с разрядом постоянного тока), в Европе (ИД с разрядом постоянного тока и ВЧ разрядом), в Японии (ИД с разрядом постоянного тока и СВЧ разрядом). ИД уже нашли применение в качестве двигателей коррекции геостационарных КА, в качестве маршевых двигателей на платформах Hughes 601 и Boeing-702, а также в качестве

маршевых двигателей для полетов в дальний космос по программам Deep Space 1 (США), HAYABUSA (Япония), DAWN (США).

Одним из основных узлов ионного двигателя является ИОС. Она предназначена для извлечения ионов из плазмы газового разряда и их ускорения до требуемой скорости. ИОС определяет такие параметры ИД как рабочий диапазон по току, тягу, удельный импульс, угол расходимости ионного пучка, а также оказывает существенное влияние на коэффициент использования рабочего тела, энергетическую эффективность и ресурс ионного двигателя. Плотность тока ионного пучка зависит от геометрических параметров элементарной ячейки ИОС, причем для её повышения необходимо уменьшать величину межэлектродного зазора и диаметр отверстий, сквозь которые ионы извлекаются из плазмы газового разряда.

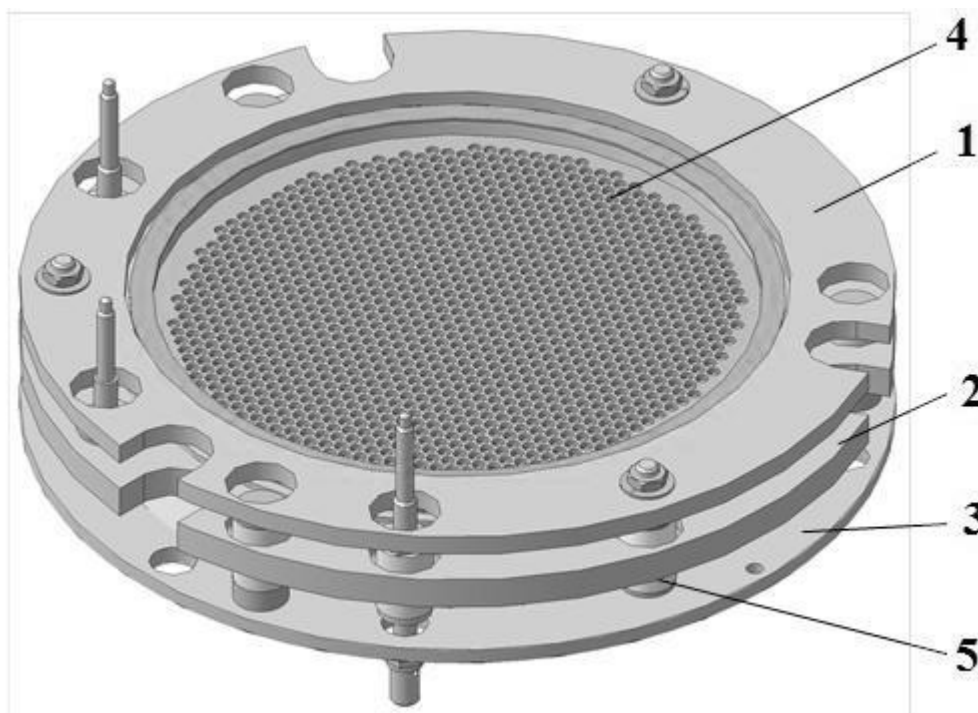
Статья посвящена исследованию процессов формирования первичного пучка ионов и потоков ионов перезарядки из объема пучка и из зоны нейтрализации в трехэлектродной ИОС. Целью численного моделирования является выбор геометрических параметров элементарной ячейки ИОС, при которых обеспечивается требуемая фокусировка первичного пучка (отсутствие столкновений с электродами ИОС и малый полуугол расходимости первичного пучка) при заданных концентрации плазмы и температуры электронов в газоразрядной камере (ГРК). При этом образующиеся в результате перезарядки вторичные ионы ускоряются электростатическим полем ИОС и частично выпадают на ускоряющий электрод, находящийся под отрицательным потенциалом, что приводит к его эрозии

и ограничению ресурса двигателя [2]. Таким образом, моделирование потока вторичных ионов также является частью задачи исследования ИОС.

1. Расчетная модель

1.1. Схема ионно-оптической системы

Общеизвестная конструктивная схема трехэлектродной ИОС, в которой реализуется схема «ускорение-торможение» ионов, показана на рисунке 1. Два электрода – эмиссионный (ЭЭ) и ускоряющий (УЭ) – выполнены перфорированными с множеством соосных отверстий. Третий замедляющий электрод (ЗЭ) чаще всего выполняется кольцевым, охватывающим пучок или может быть также перфорированным. Потенциал ЭЭ положителен, потенциал УЭ отрицателен по отношению к корпусу. ЗЭ заземлен или находится под потенциалом корпуса аппарата.



1 – опорный фланец ЭЭ; 2 – опорный фланец УЭ; 3 – опорный фланец ЗЭ;

4 – эмиссионный электрод; 5 – стяжной узел

Рисунок 1 - Ионно-оптическая система

Ионы извлекаются из квазинейтральной плазмы газового разряда в ГРК через отверстия в эмиссионном электроде (ЭЭ) и ускоряются за счет потенциалов между ЭЭ и УЭ. Формирование пучка ионов определенной энергии, плотности тока и геометрии достигается согласованием параметров газоразрядной плазмы (концентрации плазмы и электронной температуры) с геометрическими параметрами ИОС (диаметрами отверстий, толщинами электродов и величинами межэлектродных зазоров), а также электрическими потенциалами ЭЭ и УЭ и атомной массой рабочего тела.

На выходе из двигателя ионный пучок в зоне нейтрализации трансформируется в поток квазинейтральной плазмы. Потенциал плазмы в зоне нейтрализации автоматически устанавливается таким образом, что формируется потенциальная ловушка для удержания в ее объеме электронов, компенсирующих пространственный заряд ионов.

Элементарная ячейка ИОС, поясняющая расчетную модель, представлена на рисунке 2. Показаны две соседние ячейки с круглыми отверстиями, формирующими «элементарные» ионные пучки. Основными характеристиками плазмы в ГРК являются концентрация электронов n_e и ионов n_i , близкие по своим значениям, а также электронная температура T_e . Плазменный объем ограничен эмиссионным

электродом находящимся под положительным потенциалом U_+ относительно корпуса аппарата. Баланс ионов и электронов на эмиссионном электроде выполняется, если плазма из-за большей подвижности электронов приобретает положительный по отношению к эмиссионному электроду потенциал U_{II} . Между невозмущенной плазмой и границей плазмы в отверстии ЭЭ устанавливается переходный слой толщиной в несколько дебаевских слоев [3].

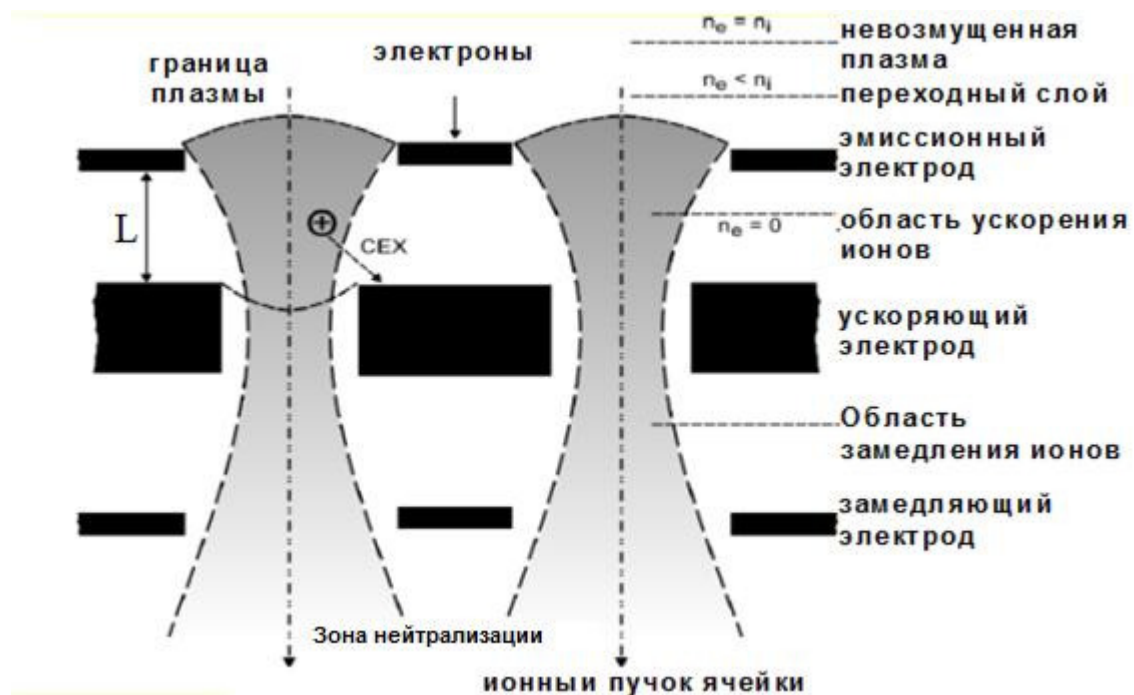


Рисунок 2 - элементарная ячейка ИОС

1.2. Первичный пучок ионов

Для расчета траекторий движения ионов необходимо знать потенциал плазмы относительно эмиссионного электрода. Величина потенциала U_{II} рассчитывается, исходя из равенства плотности тока ионов j_i и плотности тока электронов j_e на эмиссионном электроде. Исходя из закона Бома для выбранной конфигурации электродов [3]:

$$j_i \approx 0,43en_e \sqrt{\frac{2T_e}{M_i}} \quad (1)$$

где M_i - масса иона и e - заряд электрона, T_e - температура электронов (в эВ).

Плотность тока электронов на ЭЭ определяется по следующей формуле:

$$j_e = \frac{1}{4} en_e \bar{v}_e \exp\left(-\frac{eU_{\Pi}}{T_e}\right), \quad (2)$$

где $\bar{v}_e = \sqrt{\frac{8T_e}{\pi m_e}}$ - средняя тепловая скорость электронов при их максвелловском распределении, m_e - масса электрона. Из (1) и (2) получаем потенциал плазмы:

$$U_{\Pi} \approx -\frac{T_e}{e} \ln\left(0,86 \cdot \sqrt{\frac{\pi \cdot m_e}{M_i}}\right). \quad (3)$$

Используя в качестве рабочего тела ксенон с атомной массой 131.3 а.е.м., получаем:

$$\frac{M_i}{m_e} \approx 24 \cdot 10^4 \quad \text{и} \quad U_{\Pi} \approx 5,8 \cdot \frac{T_e}{e}. \quad (4)$$

В трехэлектродной ИОС ускоряющий электрод находится под отрицательным потенциалом U_{\cdot} . Извлекаемый пучок ионов формирует объемный заряд, ограничивающий плотность тока эмиссии с границы плазменного эмиттера. За замедляющим электродом происходит компенсация объемного заряда ионов электронами, поступающими в объем пучка со специально установленного источника электронов - нейтрализатора. В этой области образуется квазинейтральная плазма, потенциал которой $U_{\text{пн}}$ положителен по отношению к ЗЭ [5].

В межэлектродном пространстве электростатическое поле электродов формирует траектории движения первичных ионов, стартующих с границы плазмы ГРК. Математическая модель первичного пучка состоит из следующих уравнений:

1) уравнение Пуассона для самосогласованного электростатического поля электродов с учетом объемного заряда первичного пучка:

$$\Delta\varphi = \left(\frac{\partial^2 \varphi}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \varphi}{\partial r} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial z^2} \right) = - \frac{j_i}{\varepsilon_0 \sqrt{2e\varphi} / M_i} \quad (5)$$

2) уравнение движения первичных ионов пучка в электростатическом поле (второй закон Ньютона):

$$M_i \frac{dv}{dt} = -e \text{grad}(\varphi) \quad (6)$$

3) уравнение неразрывности, согласно которому в межэлектродном пространстве ИОС не возникают и не исчезают ионы:

$$\text{div}(en_i \varphi) = 0 \quad (7)$$

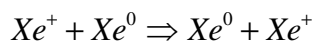
Уравнения записаны в цилиндрической системе координат. При этом учитывается осевая симметричность задачи, т.е. параметры не зависят от азимутальной координаты. Граничные условия для системы принимаются следующими:

1. известны конфигурация и потенциалы электродной системы ИОС, предполагается, что на поверхности и внутри электродов потенциал во всех точках одинаков;
2. на оси симметрии по направлению нормали к оси $\text{grad}(\varphi)=0$ (условие Неймана);
3. известно распределение потенциала в переходном слое;
4. известна граница области нейтрализации плазмы.

Плазменные границы являются подвижными, их положение определяется в процессе решения системы уравнений. Система дифференциальных уравнений первого и второго порядка решается итерационным методом, рассчитывается электростатическое поле и траектории движения ионов (программа IGUN) [1].

1.3. Поток вторичных ионов

В объеме пучка ионов и в зоне нейтрализации образуются медленные ионы перезарядки в результате взаимодействия быстрых ионов Xe^+ первичного пучка с медленными нейтральными атомами Xe^0 , истекающими из ГРК двигателя:



Сечение процесса перезарядки зависит от скорости ионов. Часть этих ионов под действием электростатического поля ИОС выпадает на УЭ. Целью моделирования потока ионов перезарядки является расчет траекторий движения этих ионов, их скоростей и углов падения на поверхность УЭ для последующей оценки эрозии электрода.

Оценим поток ионов перезарядки из объема пучка между ЭЭ и УЭ при известной величине межэлектродного зазора l . Вероятность перезарядки может быть оценена по формуле:

$$P_{II} \approx \sigma_{i0} n_0 l \quad (8)$$

Для ксенона при скорости ионов $7 \cdot 10^4$ м/с ($U_+ = 4500$ В) сечение перезарядки составит $\sigma_{i0} \approx 3,6 \cdot 10^{-19} \text{ м}^2$ [4]. При концентрации атомов в межэлектродном промежутке $n_0 \approx 2 \cdot 10^{18} \text{ м}^{-3}$ и $l = 1,8 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ вероятность $P_{II} \approx 0,13 \cdot 10^{-2}$. Таким образом, если предположить, что все ионы перезарядки, образовавшиеся в межэлектродном промежутке, выпадают на УЭ, их вклад в ток в цепи питания УЭ не превысил бы 0,13% от тока ионов пучка. Однако из экспериментов известно, что ток в цепи УЭ составляет от 1 до 3% от тока ионов пучка [2]. Отсюда следует, что основной поток ионов на УЭ приходит из области нейтрализации пучка. Тем не менее, расчет траекторий движения ионов из межэлектродного пространства необходим с точки зрения расчета эрозии УЭ, так как эти ионы ускоряются значительно более высокой разностью потенциалов и имеют более высокие скорости.

При моделировании потока вторичных ионов перезарядки считается, что вторичные ионы стартуют по нормали с некоторой эквипотенциальной поверхности за замедляющим электродом в сторону УЭ. Распределение потенциала с межэлектродной области и зоне нейтрализации рассчитывается с помощью программы IGUN. Далее предполагается, что вторичные ионы в момент образования имеют нулевую скорость, двигаются только под действием электростатического поля. Траектории движения вторичных ионов рассчитываются на основании уравнений движения в проекциях на оси цилиндрической системы координат с учетом азимутальной симметрии:

$$\begin{cases} M_i \frac{dv_z}{dt} = -e \cdot E_z = -e \cdot \frac{dU}{dz}, \\ M_i \frac{dv_r}{dt} = -e \cdot E_r = -e \cdot \frac{dU}{dr}, \end{cases} \quad (9)$$

где v_z и v_r – продольная и радиальная проекции скорости иона, соответственно; E_z и E_r – продольная и радиальная проекции напряженности электрического поля, z – продольная координата, r – радиальная координата, t – время, U – потенциал. Уравнения приводятся к безразмерному виду.

2. Результаты расчета

2.1. Моделирование характеристик первичного пучка ионов

На этапе расчетного исследования важно оценить влияние геометрических параметров: диаметров отверстий в ЭЭ и УЭ, величины межэлектродных промежутков и толщины электродов на расходимость пучка. При выборе межэлектродного зазора важно иметь запас по величине пробойного напряжения, определяющий надежность работы ИОС. Он зависит от разности потенциалов между электродами и от материала, из которого эти электроды изготовлены.

Особенностью ИОС ИД является использование в УЭ отверстий меньшего, чем в ЭЭ диаметра. Это делается для получения оптимального полного тока и для уменьшения потерь нейтральных атомов при условии приемлемости расходимости пучка[6].

Для трехэлектродной ИОС двигателя малой мощности выполнено моделирование первичного пучка ионов для следующих геометрических параметров ИОС:

- диаметр отверстий в эмиссионном электроде: $D_{\text{ЭЭ}}=1.15$ мм;
- толщина эмиссионного электрода: $h_{\text{ЭЭ}}=0.3$ мм;
- расстояние между эмиссионным и ускоряющим электродами: $\ell_{\text{ЭУ}}=1,0$ мм;
- диаметр отверстий в ускоряющем электроде: $D_{\text{УЭ}}=0.8$ мм;
- толщина ускоряющего электрода: $h_{\text{УЭ}}=2.0$ мм;
- расстояние между ускоряющим и замедляющим электродами: $\ell_{\text{УЗ}}=0,5$ мм;
- диаметр отверстий в замедляющем электроде: $D_{\text{ЗЭ}}=1.2$ мм;
- толщина замедляющего электрода: $h_{\text{ЗЭ}}=0.5$ мм.

Потенциалы электродов:

- потенциал эмиссионного электрода: $U_{\text{ЭЭ}}=+2100$ В;
- потенциал ускоряющего электрода: $U_{\text{УЭ}}= -230$ В;
- потенциал замедляющего электрода: $U_{\text{ЗЭ}}= 0$ В.

Рабочий газ – ксенон с атомной массой 131.3 а.е.м. Плотность тока составляла 14 мА/см², температура электронов в зоне нейтрализации – 5 эВ.

Результаты моделирования представлены на рисунке 3.

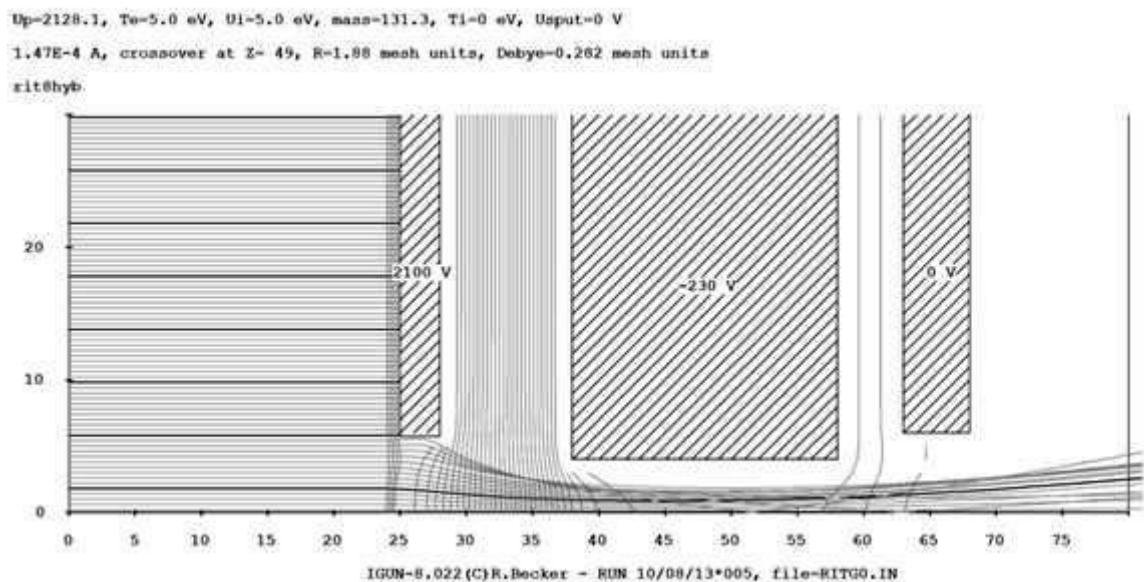


Рисунок 3 – первичный пучок ионов в элементарной ячейке трехэлектродной ИОС

2.2. Моделирование вторичного потока ионов из зоны нейтрализации

По данным многочисленных экспериментов, ток ионов перезарядки составляет от 1% до 3 % от тока ионов первичного пучка [2]. Исходя из этих данных, можно рассчитать концентрацию ионов перезарядки в зоне нейтрализации первичного пучка. Температура электронов в зоне нейтрализации принята равной 5 эВ. Из (1):

$$n_e \approx \frac{j_i}{0,43e} \cdot \sqrt{\frac{M_i}{2T_e}} \quad (9)$$

Вычисление по (9) дает величину концентрации вторичных ионов в пределах от $8 \cdot 10^{15} \text{ 1/м}^3$ до $23 \cdot 10^{15} \text{ 1/м}^3$. Потенциал плазмы в зоне нейтрализации относительно «земли» рассчитывается по формуле (5). Для выбранной температуры электронов 5 эВ, потенциал плазмы составляет 26,4 В. На рисунке 4 показаны результаты моделирования потока вторичных ионов перезарядки для описанной выше ИОС. Ток вторичных ионов на УЭ составляет 1% от тока первичного пучка. Поскольку

поток вторичных ионов движется из зоны нейтрализации, то, исходя из особенностей программы IGUN, электроды на рисунке расположены в противоположном порядке: замедляющий, ускоряющий, эмиссионный.

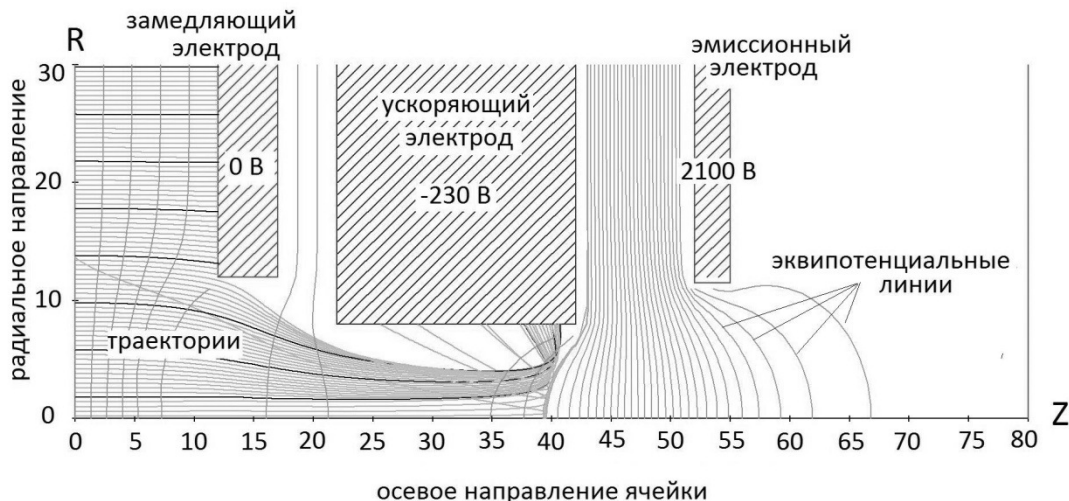


Рисунок 4 - поток ионов перезарядки из зоны нейтрализации

Из расчетов хорошо видна структура потока ионов перезарядки из зоны нейтрализации. Вторичные ионы отражаются от эквипотенциальной поверхности, расположенной в отверстии УЭ (образующей «виртуальный анод»), и попадают на поверхность УЭ преимущественно внутри отверстия.

2.3. Моделирование потока ионов перезарядки, образующихся в объеме первичного пучка

На рисунке 5 выделена область межэлектродного пространства, из которой образовавшиеся ионы перезарядки неизбежно попадают на поверхность УЭ, и приведены примеры траекторий ионов.

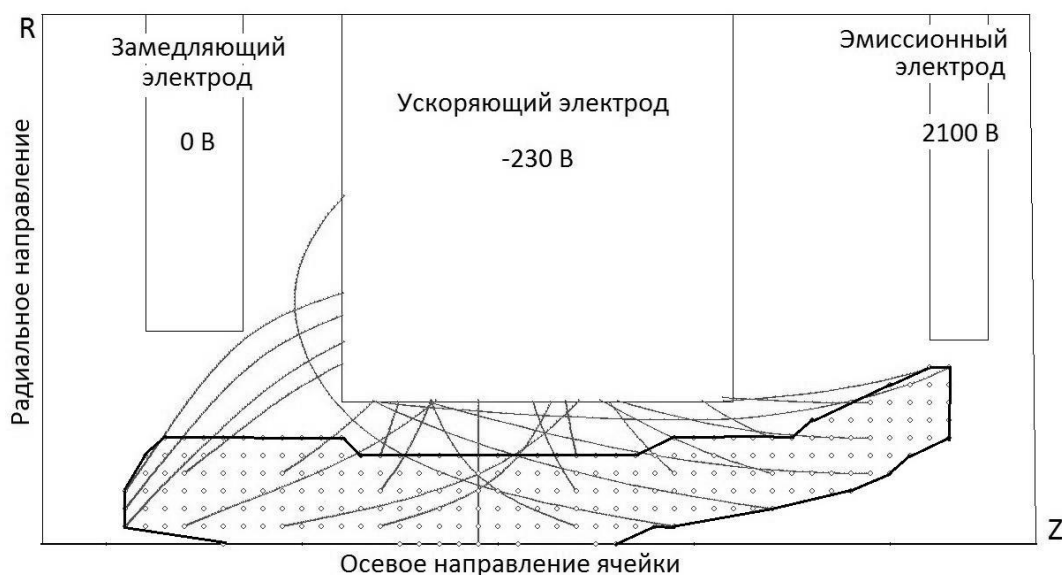


Рисунок 5 - область рождения ионов перезарядки

Показаны примеры траекторий образовавшихся ионов перезарядки. Вторичные ионы бомбардируют УЭ как со стороны отверстия (преимущественно), так и со стороны ЗЭ и ЭЭ.

Вероятность рождения вторичного иона в результате столкновения первичного иона и нейтрального атома зависит от величины сечения столкновения σ этих частиц, которое, в свою очередь, определяется энергией сталкивающихся частиц. Зависимость сечения перезарядки σ от энергии ионов взяты из [4]. В результате моделирования получена зависимость σ от координат в объеме первичного пучка и рассчитаны вероятности рождения вторичных ионов во всех точках первичного пучка. В области между ЭЭ и УЭ размер сечения перезарядки в 1,5 – 2 раза меньше, чем в области между УЭ и ЗЭ. Такое соотношение сечений столкновения приводит к тому, что вероятность попадания вторичных ионов на ускоряющий электрод из области между эмиссионным и ускоряющим электродами в 1,5... 2,5 раза меньше, чем из зоны нейтрализации и со стороны замедляющего электрода. Но вторичные

ионы, возникающие в области между УЭ и ЭЭ, ускоряются большой разностью потенциалов и могут вызывать сильное разрушение поверхности.

Заключение

В результате моделирования получено распределение потенциала электростатического поля элементарной ячейки в межэлектродном промежутке ИОС, рассчитаны траектории вторичных ионов, образующихся в зоне нейтрализации и в межэлектродном промежутке. По данным, полученным в этой работе, в дальнейшем можно рассчитать локальную эрозию УЭ и оценить ресурс ИОС двигателя.

Работа выполнена при поддержке Гранта Правительства Российской Федерации № 11.G34.31.0022 для государственной поддержки научных исследований, проводимых под руководством ведущих ученых в российских образовательных учреждениях высшего профессионального образования; при государственной поддержке комплексных проектов по созданию высокотехнологичных производств, выполняемых с участием высших учебных заведений по Договору № 02.G25.31.0072; при поддержке Гранта Президента Российской Федерации по поддержке ведущих научных школ РФ НШ_143.2012.8.

Библиографический список

1. <http://www.egun-igun.com> [электронный ресурс] / интернет-сайт разработчика программного комплекса IGUN.
2. Goebel, D.M. Evaluation of 25-cm XIPS Thruster Life for Deep Space Mission Applications [Text] / Dan M. Goebel, James E. Polk, Izabela Sandler, Ioannis G. Mikellides, J.R. Brophy, W.G. Tighe, Kue-Ru Chien // IEPC-2009-152, 31st International Electric Propulsion Conference. – University of Michigan, USA. – September 20-24, 2009. – 13 p.
3. Обухов, В.А. Расчет переходного слоя в эмиссионном отверстии газоразрядного источника ионов [Текст] / В.А. Обухов, В.Е. Сосновский // 5 Конференция по плазменным ускорителям и ионным инжекторам: Тезисы докладов / М.: Наука, 1982. – С. 105-106.
4. Хастед, Дж. Физика атомных столкновений [Текст] // М.: Мир, 1965. – 710с.
5. Snyder, J.S. Performance Evaluation of the T6 Ion Engine [Text] / John Steven Snyder, Dan M. Goebel, Richard R. Hofer, James E. Polk, Neil C. Wallace Huw Simpson // AIAA 2010-7114, 46th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibition . – 25-26 July 2010. – Nashville, TN, USA.
6. Loeb, H.W. Design of High-Power High-Specific Impulse RF-Ion Thruster [Text] / H.W. Loeb, D. Feili, G.A. Popov, V.A. Obukhov, V.V. Balashov, A.I. Mogulkin, V.M. Murashko A.N. Nesterenko, S. Khartov // IEPC-2011-290, 32nd International Electric Propulsion Conference. – Wiesbaden Germany. – September 11 – 15, 2011. – 8 p.