

УДК: 621.455.4

Анализ проблем использования четырехэлектродных ионно-оптических систем для перспективных электроракетных двигателей

Казаков Е.Н.^{1*}, Смирнова М.Е.^{2}, Хартов С.А.^{2***}**

¹*Компания «Прогрестех», ул. Электрозаводская, 14/1, Москва, 107023, Россия*

²*Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), МАИ, Волоколамское шоссе, 4, Москва, А-80, ГСП-3, 125993, Россия*

**e-mail: enkazakov@yandex.ru*

***e-mail: k208@mai.ru*

****e-mail: k208@mai.ru*

Аннотация

Развитие научно-исследовательской деятельности человечества в космосе предъявляет новые требования к космическим аппаратам и энергосиловым установкам для них. В работе представлены некоторые результаты оценки эффективности и целесообразности применения четырехэлектродных ИОС для одной из самых перспективных для будущих применений технологий - ионных двигателей.

Ключевые слова: электроракетный двигатель, ионно-оптическая система, извлечение ионного тока, фокусировка пучка

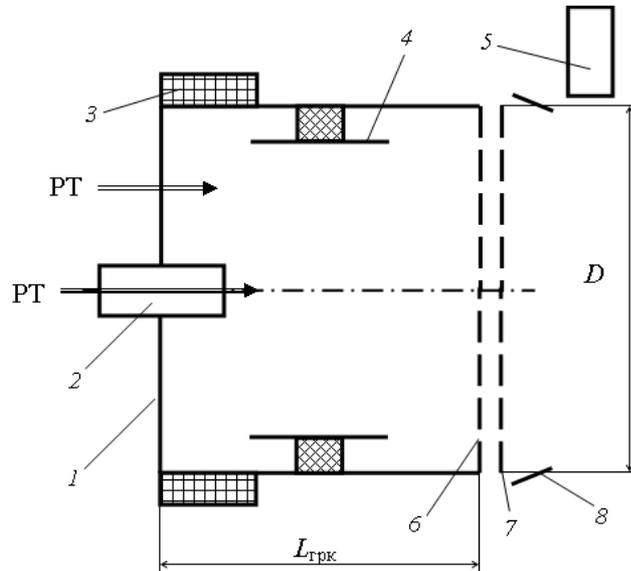
Введение

Анализ анонсируемых программ космических исследований фундаментальных законов Вселенной, Солнечной Системы: Луны и Марса, пояса астероидов, полеты к дальним планетам и изучение их спутниковых систем, пояса

Койпера, проведения исследований за пределами Солнечной Системы; а также развития инфраструктуры околоземных объектов: модернизации систем космической связи и телевидения, мониторинга Земли, комплексов астрофизических и медико-биологических исследований, возможности создания орбитальной станции, как промежуточного пункта обеспечения постоянных полетов к Луне и, в перспективе, Марсу – дает повод задуматься об эффективности использования электроракетных двигателей (ЭРД) для выполнения большого числа из поставленных задач [1-4]. Опыт эксплуатации ЭРД последних лет в Космосе вкупе с выбранными целями предъявляет к космическим двигательным установкам требования по повышению их рабочих характеристик и увеличению времени работы двигателей [5].

В задачах по освоению и исследованию дальних планет Солнечной Системы, в особенности предполагающих использование в качестве источников электроэнергии ядерных энергоустановок с мощностью от нескольких сот кВт, полетах по освоению Марса и Луны требуются высокие значения скоростей истечения – удельного импульса (от нескольких десятков тысяч до сотен тысяч м/с) и огневого ресурса (несколько десятков тысяч часов) двигателя. Эти параметры позволяют считать наиболее эффективным использование для таких миссий ионных двигателей (ИД), обладающих и высоким удельным импульсом 25000...100000 м/с [6] и обеспечивающих работу до 50-70 тыс. часов [7]. Предполагается использования ИД в том числе и с целью утилизации высоких неиспользуемых мощностей энергоустановок [8]. Некоторые специфические задачи (например, связанные с

уводом с орбиты «космического мусора», исследования гравитационного поля) требуют достижения минимальных углов расходимости пучка и хорошей контролируемости интегральных параметров двигателя [7, 9] и это тоже вполне реализуемо с помощью ИД.



1 – газоразрядная камера, 2 – катод, 3 – магнитная система, 4 – анод, 5 – нейтрализатор; ионно-оптическая система в составе: 6 – эмиссионного, 7 – ускоряющего и 8 – выходного электродов.

Рисунок 1 - Схема плазменно-ионного двигателя

В настоящее время среди ИД наибольшее распространение получила схема плазменно-ионного двигателя (ПИД) (рисунок 1), В нем рабочее тело подается в газоразрядную камеру 1, где между катодом 2 и анодом 4 зажигается газовый разряд, в котором атомы ионизируются электронным ударом. Для повышения эффективности ионизации на разряд накладывается осевое магнитное поле, создаваемое магнитной системой 3. Извлечение ионов из плазмы газового разряда и их ускорение до необходимой скорости осуществляется с помощью ускорительной

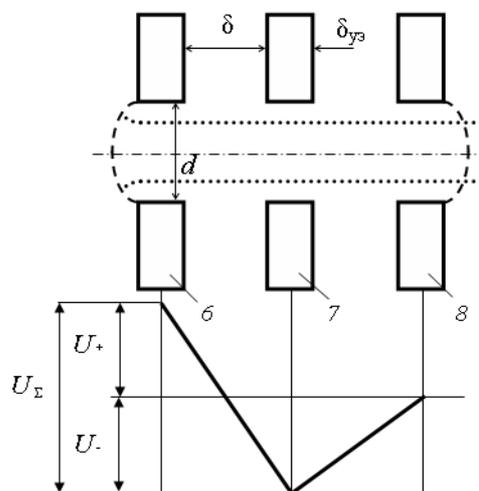
системы, состоящей из эмиссионного 6, ускоряющего 7 и выходного электродов 8. Обычно эти электроды представляют собой тонкие диски, густоперфорированные соосными цилиндрическими отверстиями, причем выходной электрод по форме может повторять ускоряющий или выполняется в виде конуса, охватывающего весь пучок. По аналогии траектории движения ионов узел электродов ПИД получил название ионно-оптической системы (ИОС). На выходе из двигателя размещается нейтрализатор (источник электронов) 5.

Тяга двигателя определяется током ионного пучка, зависящего от расхода рабочего тела, и разностью потенциалов между эмиссионным и выходным электродами, обуславливающую скорость частиц. Полный КПД двигателя есть произведение коэффициента использования рабочего тела и энергетического КПД. Коэффициент использования рабочего тела – $\beta_{дв}$ определяется отношением расхода ионов к полному расходу РТ, поскольку не все атомы ионизируются в источнике ионов. В свою очередь, энергетический КПД зависит от разности потенциалов и затрат на ионизацию рабочего тела, которые характеризуются ценой иона – мощностью, необходимой для получения одного ампера ионного тока пучка. Цена иона зависит от рода РТ и совершенства конструкции двигателя. Для современных моделей ПИД цена иона составляет при работе на цезии 80–100Вт/А, ксеноне 140–180Вт/А, аргоне 220–250Вт/А.

Ионно-оптическая система как критический элемент ИД

Основным элементом, определяющим характеристики и ресурс работы ионного двигателя, является ионно-оптическая система, которая в большинстве

случаев представляет собой систему 2-х или 3-х перфорированных пластин – электродов (схема одной ячейки ИОС представлена на рисунок2).



6 – эмиссионный, 7 – ускоряющий, 8 – выходной электроды (номера позиций соответствуют рисунок1)

Рисунок 2 - Схема ячейки ИОС

Для обеспечения процессов вытягивания и ускорения ионов первый (эмиссионный) электрод находится под большим положительным потенциалом относительно корпуса аппарата, фактически задающим энергию ионов за срезом двигателя, второй (ускоряющий) – под отрицательным потенциалом, не позволяющем электронам проникать в область ускорения, третий (отсечной) электрод (сетка или кольцо) находится под потенциалом корпуса аппарата, что обеспечивает условия разрыва плазмы, предотвращая возвращение обратных потоков заряженных частиц из-за среза в рабочий объем двигателя. Предельная плотность тока ионов, которую можно извлечь из ячейки ИОС при заданной геометрии, с одной стороны, ограничена параметрами плазмы в газоразрядной

камере двигателя, а с другой стороны – объемным зарядом частиц в пространстве ИОС. Предельная плотность извлекаемого системой ионного тока определяется по закону Чайльда-Ленгмюра, который для плоских, сплошных, бесконечных электродов записывается в виде [10]:

$$j = \frac{4\varepsilon_0 U^{3/2}}{9 \delta^2} \sqrt{\frac{2q}{M}}, \quad (1)$$

где ε_0 – диэлектрическая постоянная, U – разность потенциалов между электродами, δ – величина межэлектродного зазора. С величиной предельного тока, обычно называемой извлекающей способностью ИОС, непосредственно связаны основные характеристики двигателя: тяга и удельный импульс, которые можно условно представить в виде:

$$P = j\sigma_F S \sqrt{\frac{2MU_+}{q}}, \quad (2)$$

$$I_{уд} = \beta_{дв} \sqrt{\frac{2qU_+}{M}}, \quad (3)$$

где σ_F – прозрачность электродов ИОС (отношение суммарной площади отверстий к общей площади электрода), $\beta_{дв}$ – коэффициент использования рабочего тела (доля ионов ускоренных ИОС), S – площадь электрода, U_+ – потенциал эмиссионного электрода, определяющий скорость истечения рабочего тела.

Очевидно, что для увеличения значений тяги ИД необходимо повышать: значения извлекаемого тока и напряжения на эмиссионном электроде, либо площади двигателя. Извлекаемая плотность тока тем выше, чем выше перепад напряжения между эмиссионным и ускоряющим электродами и чем меньше зазор между ними

(д на рисунок 2). Изменение величины межэлектродного зазора ограничено в силу нескольких факторов: во-первых, конструктивными соображениями в отношении его неизменности во время работы двигателя; во-вторых, требованиями межэлектродного электрического пробоя, с чем также связана невозможность бесконечного увеличения перепада напряжения.

Изменение площади электродов также является непростой технологической задачей изготовления системы тонких густоперфорированных пластин, чувствительных к значительным изменениям геометрии в процессе нагрева. Во время работы двигателя из-за выпадения на них ионов электроды разогреваются, при этом перепад температур от центра к периферии составляет до нескольких сотен градусов. Поскольку периферия пластин обычно зафиксирована в электрододержателе, то разность температур приводит к изгибанию пластин, приводящему к изменению величины межэлектродного зазора, следствием чего, как правило, является снижение характеристик и даже электрическая коротка между электродами.

Ресурс ИД также в основном ограничивается процессами, сопутствующими ускорению и извлечению ионов в ИОС. К ним в основном стоит отнести прямую бомбардировку ускоряющего электрода первичными ионами в следствие расфокусировки пучка в межэлектродном промежутке и процессы ионной перезарядки между электродами и за срезом двигателя, которые сопровождаются выпадением вторичных медленных ионов на ускоряющий электрод. Оба процесса приводят к ионному распылению ускоряющего электрода, что, в свою очередь,

определяет необходимость увеличивать его толщину и тем самым как ограничивая возможности извлечения ионного тока, так и усложняя задачу сохранения межэлектродного промежутка во время работы двигателя.

Уже одних только этих простых заключений достаточно, чтобы говорить о наличии некоторых оптимальных соотношений геометрических и рабочих параметров для ИД с классической трехэлектродной ИОС и неизбежном достижении предела их возможностей.

В таблице 1 приведены параметры некоторых существующих моделей двигателей. Учитывая величины тока и принимая во внимание, что прозрачность электродов в силу конструктивных особенностей обычно не превышает 0,6-0,7, найдем, что максимальные значения извлекаемой плотности тока не превышают 18мА/см^2 , 13мА/см^2 и 9мА/см^2 для двигателей диаметром 10-15см, 20-25см и 30-60см соответственно, а нормальные для летных моделей меньше в 1,5-2 раза. При этом диапазон рабочих тяг и удельных импульсов существующих ИД изменяется в сравнительно небольших пределах, демонстрируя очевидную ограниченность в силу предельных параметров трехэлектродных ИОС, применяемых в них.

Таблица 1 - Интегральные характеристики современных ИД [5, 11, 12]

модель	диаметр, м	ток пучка, А	мощность, Вт	плотность мощности, Вт/см ²	тяга, мН	плотность тяги, мН/см ²	удельный импульс, м/с	стадия разработки
RIT-10 EVO	0,087	0,85	980	16,5	35	0,59	3700	квалификационная
T5	0,10	1,05	2220	28,3	71	0,90	4334	инженерная
UK-10	0,10				12		3405	лабораторная
ИД-100	0,10	0,17	198		8,5		2900	лабораторная

ИД-100	0,10	0,30	494		19,2		3500	лабораторная
XIPS-13	0,13				17,8		2585	лабораторная
RIT-15LT	0,142	0,9	1300	8,2	50	0,32	3400	инженерная
RIT-XT	0,21	2,41	8060	23,3	218	0,63	6419	квалификационная
T6	0,22	3,38	7050	18,6	230	0,61	4650	квалификационная
ESA-XX	0,25	3,25	8450	17,2	240	0,49	3500	инженерная
UK-25	0,25	4,45	9500	19,4	316	0,64	4500	инженерная
XIPS-25	0,25	4,00	6800	13,9	245	0,50	4338	летная
Hughes MESC	0,30	5,60	11100	15,7	364	0,51	5160	инженерная
NASA J-Series	0,30	4,00	5100	7,2	201	0,28	3310	инженерная
NSTAR	0,30	1,76	2330	3,3	90	0,13	3100	летная
NSTAR Derivative	0,30	2,70	4600	6,5	172	0,24	5000	квалификационная
Tokyo MESC	0,30	2,50	3500	5,0	153	0,22	3710	летная
BBM-2	0,35	2,88	3300	3,4	150	0,16	3518	инженерная
NEXT (test)	0,40	3,52	6900	5,5	237	0,19	4110	инженерная
NEXIS	0,57	4,00	20000	7,8	415	0,16	7500	лабораторная
HiPEP (DC)	91 * 0,41	5,50	39300	10,5	670	0,18	9620	лабораторная

Можно выделить несколько направлений, в которых использование ионных двигателей может предоставить некоторые преимущества или которые вовсе невыполнимы без них. Но все они предъявляют ряд новых требований к характеристикам двигателя. Приведем ниже условную классификацию, исходя из разницы в технических требованиях:

- 1) Задачи по исследованию и освоению Солнечной системы и дальнего космоса предполагают необходимость использования энергетических установок высокой мощности и двигательных установок с повышенными

значениями скорости истечения (до нескольких сот км/с), тяги (до нескольких Н) и ресурса (до сотни тысяч часов) [6, 8, 11].

2) Специфические научные и прикладные миссии:

- особое место отводится изучению гравитационных полей, в связи с чем актуальной является разработка микродвигателей с малым углом расходимости, относительно высоким удельным импульсом и хорошо контролируемой тягой в диапазоне мкН [7];

- все острее встает также вопрос очистки от «космического мусора», одним из концептуальных решений является изменение траектории движения объектов в околоземном пространстве, передавая им импульс пучком ионного двигателя; в таких миссиях основным требованием является очень малая угловая расходимость [9].

3) Улучшение маневренности и длительности действия орбитальных аппаратов и исследовательских комплексов, возможное создание транспортных буксиров, курсирующих между орбитами Земли, Луны и Марса требует повышения рабочих характеристик ДУ без значительных изменений их массогабаритных параметров [7, 12].

Подводя итог, следует выделить следующие основные требования, которые в разных комбинациях предъявляют современные миссии к перспективным двигателям:

- обеспечение ресурса до значений 100000 часов;
- повышение удельного импульса до 150км/с;

- снижение миделевой тяги;
- снижение полуугла расходимости ионной струи до значений менее 2° .

Одним из наименее затратных из возможных путей создания ИД с улучшенными параметрами, отвечающими требуемым параметрам является использование четырехэлектродных ионно-оптических систем для существующих конструкций ионных двигателей. Безусловно, некоторые специфические задачи потребуют разработки новых типоразмеров ИД.

Четырехэлектродная ИОС

В основе улучшений, которые могут быть привнесены с использованием дополнительного электрода в ИОС, лежит отделение процесса ускорения ионов от процесса их извлечения из пространства газоразрядной камеры. При этом извлекающая разность потенциалов и соответствующий ей оптимальный межэлектродный зазор должны выбираться только исходя из потребности извлечения максимальных плотностей тока и ограничений электрического пробоя, а дополнительное ускорение до заданных скоростей истечения (а значит получения больших значений удельного импульса и тяги) производится в следующем промежутке, который в этом случае не требует значительного уменьшения, т.к. не является определяющим с точки зрения извлекающей способности системы. Перераспределение потенциалов между электродами к тому же способно повлиять на повышение фокусировки пучка, что, в свою очередь, должно положительно сказаться на ресурсе электродов, т.к. снижается прямой перехват ионов на ускоряющую и (в еще большей степени) на извлекающую сетки. Такая система для

использования в космической технике была предложена Д.Ферном [8] в первую очередь для утилизации высоких неиспользуемых мощностей энергоустановки для пилотируемых аппаратов по исследованию планет Солнечной Системы, хотя сам принцип описан гораздо раньше для систем инжекторов водорода для термоядерного синтеза [13]. В конце 90х Й.Накаяма и П.Вильбур предпринимали попытки моделирования основных параметров многоэлектродных ИОС [14]. А в 2004-2008гг Европейское Космическое Агентство провело ряд НИОКР по подтверждению возможности создания прототипа двигателя с четырехэлектродной ионно-оптической системой и демонстрации его характеристик [15]. Результатом этой работы стало создание высокочастотного источника ионов со следующими параметрами [16]:

- 43 апертуры $d=1\text{мм}$;
- тяга 2.7-5.4мН (миделева тяга 0.86мН/см²);
- удельный импульс 14000с;
- угол расходимости пучка 5градусов;
- рабочий потенциал до 17кВ;
- ток пучка 4-33мА.

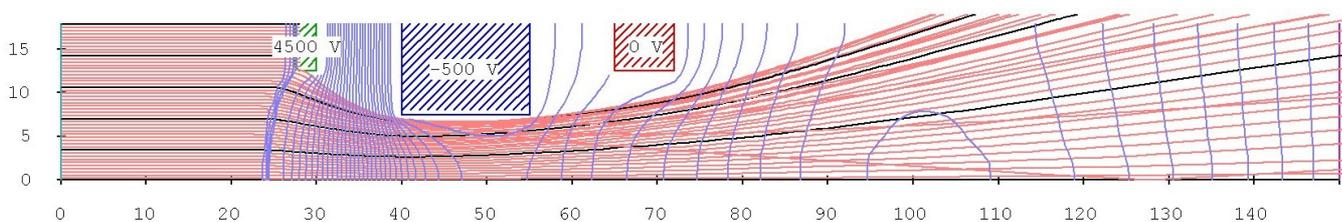
Сравнение этих первых результатов с параметрами летных и квалификационных моделей современных ИД (см. таблицу 1) дает возможность говорить о качественном скачке в достижимом уровне интегральных характеристиках данного типа двигателей при переходе на новую ИОС.

Важными проблемами на пути к созданию четырехэлектродных ИОС является конструкционное усложнение этого узла и вопрос юстировки апертур электродов. С 2008 года до настоящего времени группа в университете Саутгемптона под руководством С.Габриэля занимается их моделированием [17] с целью определения оптимальных соотношений между геометрическими размерами и вкладываемой мощностью для получения максимальных значений скоростей истечения и ресурса ИД. Эти же исследователи также показали возможность использования вместо четвертого перфорированного электрода охрannого кольца без значительных изменений в характеристиках двигателя [18]. Кроме того, ими было показано пятикратное увеличение ресурса по сравнению с традиционными ИД, а также на порядок – миделевой тяги и возможность достижения более высоких удельных импульсов [17].

Наиболее интересным с точки зрения экономической эффективности представляется использование четырехэлектродных ионно-оптических систем с целью улучшения интегральных параметров для существующих конструктивных моделей ИД. Жесткое ограничение массогабаритных характеристик двигателя и его системы электропитания не позволит в полной мере воспользоваться преимуществами такого решения, но результаты моделирования и оценочных расчетов показывают значительные положительные изменения характеристик ИД даже при общем перепаде напряжений до 5кВ, характерном для существующих ИД.

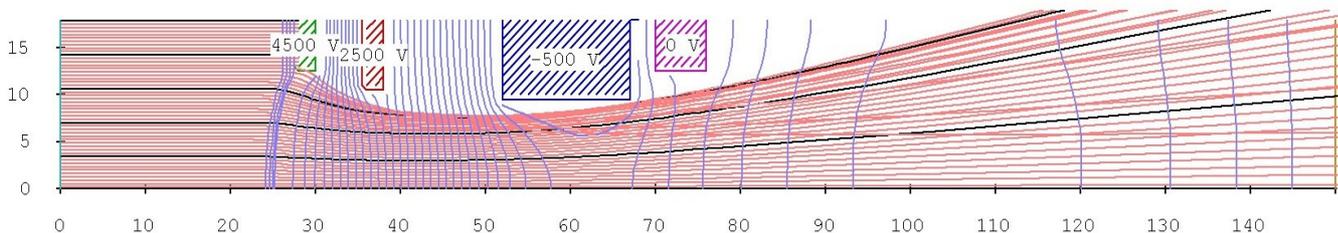
На рисунок 3 и 4 представлены результаты моделирования процесса извлечения ионного пучка из традиционной и четырехэлектродной ИОС,

выполненные с использованием программного комплекса IGUN [19]. В качестве исходных данных выбраны геометрические размеры отверстия ИОС и потенциалы для разрабатываемой в настоящее время модели ИД повышенной мощности [20]. Из полученных численных результатов видно, что перераспределение потенциалов между электродами ИОС сказывается как на повышении фокусировки потока, так и на увеличении извлекаемого ионного тока (рисунок3 и 4).



полуугол расходимости пучка $\approx 22^\circ$, ток $\approx 0,453\text{mA}$

Рисунок 3 - Ионный пучок в традиционной системе ускорения

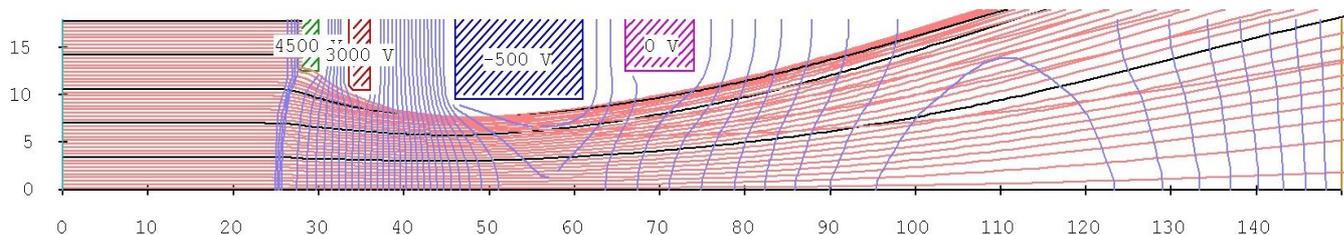


полуугол расходимости пучка $\approx 13,2^\circ$, ток $\approx 0,544\text{mA}$

Рисунок 4 - Ионный пучок в четырехэлектродной системе ускорения

В случае, когда значительные ограничения по углу расходимости не налагаются, можно с незначительными изменениями геометрии и перераспределением потенциалов получить чувствительный прирост по извлекаемому току (рисунок5) с

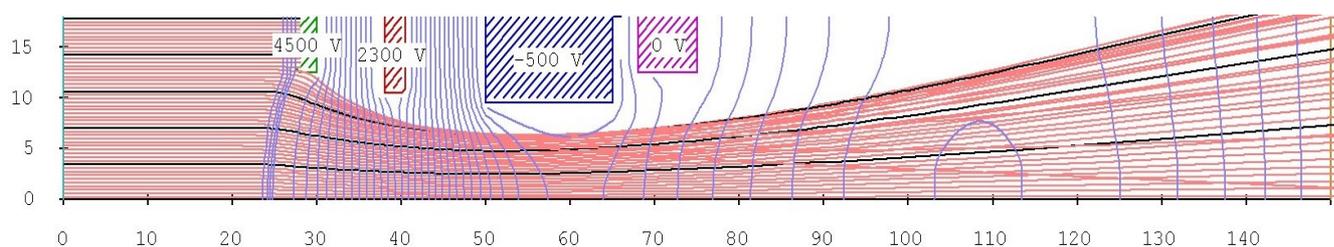
некоторой расфокусировкой относительно оптимизированного по обоим параметрам случая, приведенного на рисунок 4.



полуугол расходимости пучка $\approx 16,4^\circ$, ток $\approx 0,815\text{mA}$

Рисунок 5 - Ионный пучок в четырехэлектродной системе ускорения с высокой плотностью извлеченного тока

Представим также обратную ситуацию, когда основной задачей является фокусировка пучка (рисунокб). Извлекающая способность такой системы извлечения чуть хуже, а фокусировка значительно лучше оптимизированной по обоим параметрам ИОС.

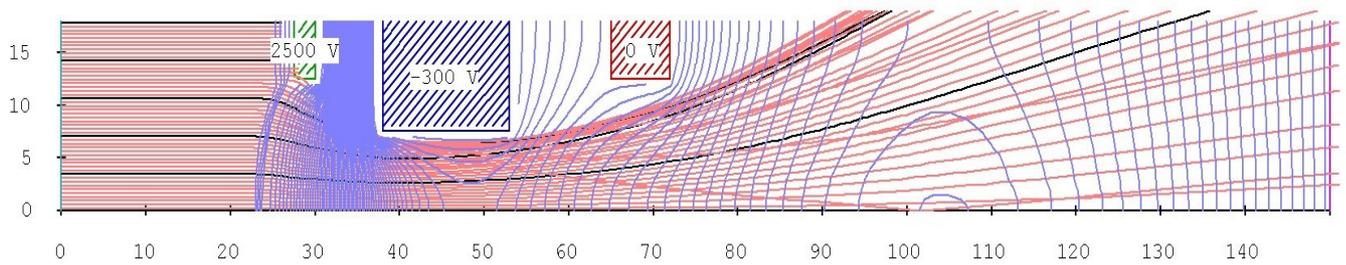


полуугол расходимости пучка $\approx 9,8^\circ$, ток $\approx 0,480\text{mA}$

Рисунок 6 - Ионный пучок в четырехэлектродной системе ускорения с низким значением угла расходимости

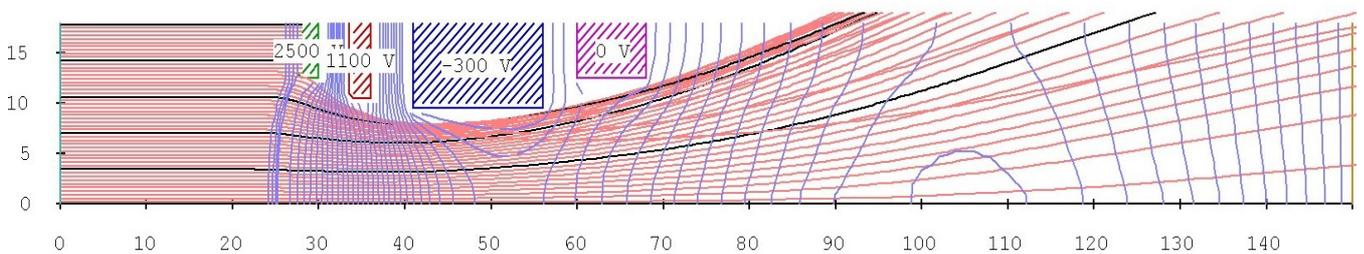
Результаты моделирование систем ускорения при более низких напряжениях (в пределах мощностей представленных на существующих аппаратах)

демонстрируют возможность улучшения параметров и в этом диапазоне (рисунок 7 и 8).



полуугол расходимости пучка $\approx 24^\circ$, ток $\approx 0,367\text{mA}$

Рисунок 7 - Ионный пучок в традиционной системе ускорения при невысоких напряжениях



полуугол расходимости пучка $\approx 17,3^\circ$, ток $\approx 0,413\text{mA}$

Рисунок 8 - Ионный пучок в четырехэлектродной системе ускорения при невысоких напряжениях

На рисунок 9 наглядно представлена возможность повышения извлеченной плотности ионного тока с переходом от трех- к четырехэлектродной ионно-оптической системе при оптимизации по извлеченному току и полууглу расходимости пучка при неизменных условиях разряда в рамках общей геометрии

ячейки ИОС. Картину роста извлеченного тока можно считать показателем пропорционального роста тяги и удельного импульса при прочих равных условиях.

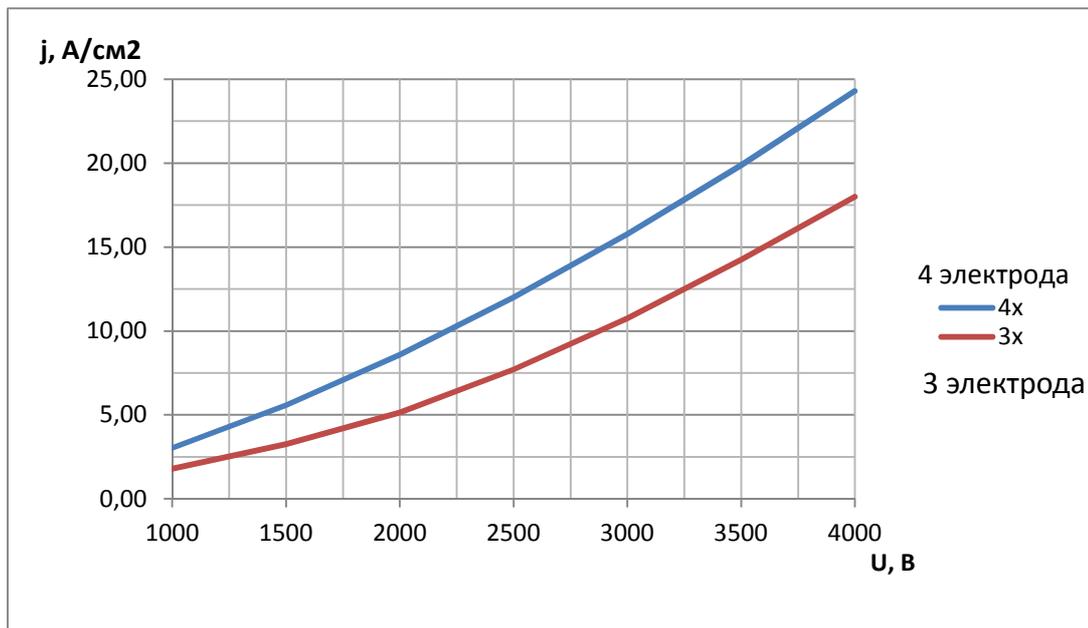
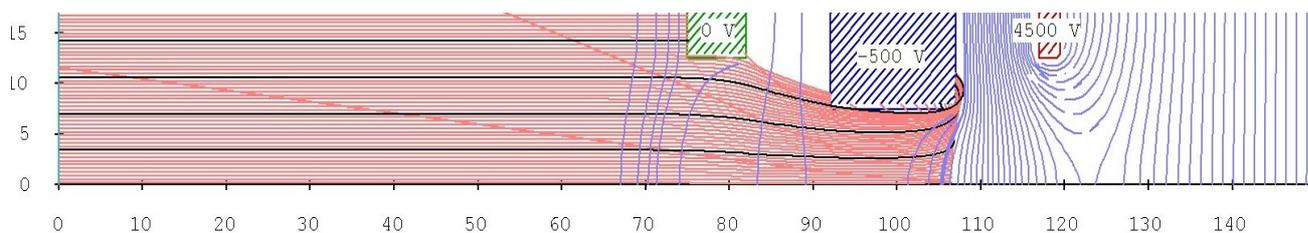


Рисунок 9 - Сравнение извлекающей способности трех- и четырехэлектродной ИОС

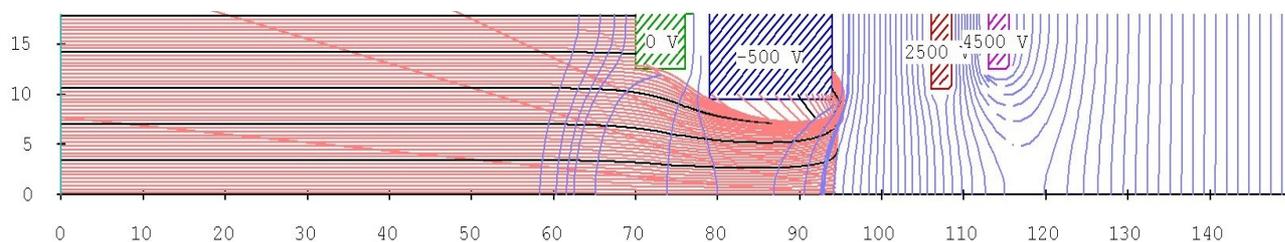
По результатам прямого моделирования сложно рассчитать реальные изменения ресурса двигателя, но можно заметить, что пучок в межэлектродной зоне четырехэлектродных систем в общем случае лучше сфокусирован (запас расстояния до электрода от оси симметрии системы больше при той же геометрии ячейки). Этот эффект должен сказываться положительно, уменьшая число ионов, выпадающих на ускоряющий электрод из прямого пучка.

Программный пакет IGUN позволяет также провести оценочное моделирование обратных потоков частиц в область двигателя, которые также вносят значительный вклад в распыление электродов ИОС, ограничивая ресурс. Результаты такого моделирования для рассмотренных выше «оптимальных» систем представлены на рисунок 10-13.



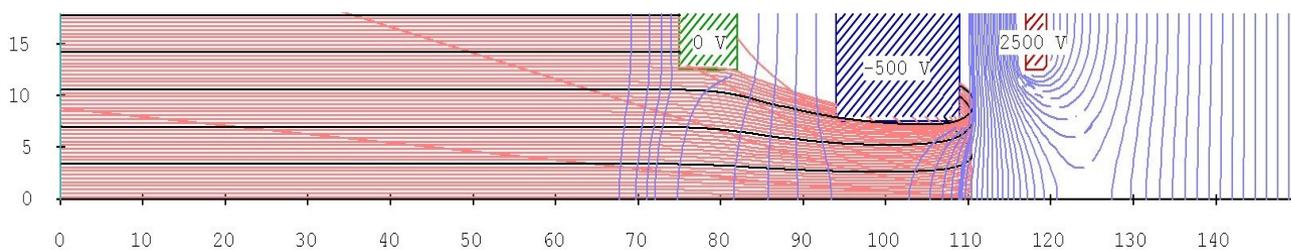
напряжение до 5кВ, токи обратного пучка на ускоряющий электрод $\approx 32\mu\text{A}$, на
отсечной $\approx 9\mu\text{A}$

Рисунок 10 - Обратный поток в трехэлектродной системе ускорения



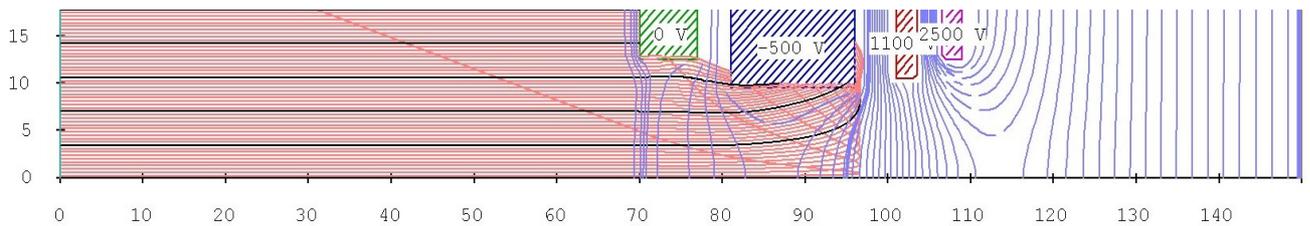
напряжение до 5кВ, токи обратного пучка на ускоряющий электрод $\approx 23\mu\text{A}$. на
отсечной $\approx 2\mu\text{A}$

Рисунок 11 - Обратный поток в четырехэлектродной системе ускорения



напряжение до 3кВ, токи обратного пучка на ускоряющий электрод $\approx 39\mu\text{A}$, на
отсечной $\approx 12\mu\text{A}$

Рисунок 12 - Обратный поток в трехэлектродной системе ускорения



напряжение до 3кВ, токи обратного пучка на ускоряющий электрод $\approx 26\mu\text{A}$, на
отсечной $\approx 14\mu\text{A}$

Рисунок 13 - Обратный поток в четырехэлектродной системе ускорения

Следует заметить, что ток на отсечной электрод учитывает только часть потока, возвращающуюся из области двигателя. Судя по результатам моделирования обратный поток ионов для четырехэлектродной системы также снижается по сравнению с трехэлектродной, что соответственно должно положительно сказываться на значениях повышения ресурса двигателя.

Выводы

Предварительные оценки и анализ работ, в области создания и совершенствования ионных двигателей, показывают потенциальную возможность улучшения их характеристик при переходе к четырехэлектродным ионно-оптическим системам. Их применение для существующих моделей позволяет решить проблему достижения повышенных рабочих параметров (тяги и удельного импульса), уменьшить угол расходимости пучка и увеличить ресурс электродов по сравнению с использованием традиционных трехэлектродных ионно-оптических систем при тех же геометрических и энергетических параметрах двигателя.

Библиографический список:

1. Федеральная космическая программа России. <http://www.federalspace.ru/115>, 22.10.2005. – 8с.
2. Cosmic Vision: Space Science for Europe 2015-2025. <http://sci.esa.int/cosmic-vision/38542-esa-br-247-cosmic-vision-space-science-for-europe-2015-2025>, 2005. - 111p.
3. 2011 NASA Strategic Plan. http://www.nasa.gov/pdf/516579main_NASA2011StrategicPlan.pdf, 2011.
4. Alta. HiPER - High Power Electric Propulsion: a Roadmap for Future Exploration. // FP7 Space Conference, Budapesht. - May 2011.
5. Goebel Dan M., Katz Ira. Fundamentals of Electric Propulsion: Ion and Hall Thrusters. - California: JPL. - March 2008. - 486p.
6. Casaregola C., Cesaretti G. и Andrenucci M. HiPER: a European Programme to Develop Electric Propulsion Technologies for Future Space Exploration. // Space Propulsion 2010, San Sebastian, Spain. - May 2010.
7. Feili D., Collingwood C., Lotz B., Gaertner W., Loeb H., Del Amo J. G., Di Cara D. M. Ion Thrusters for Space Applications. // 31st ICPIG, July 14-19, Granada, Spain. - 2013.
8. Fearn David G. The application of gridded ion thrusters to high thrust, high specific impulse nuclear-electric missions. // IAC-04, Vancouver, Canada. - 2004.
9. Bombardelli C. Removing space debris and deflecting asteroids with ion beams. // 4th Russian-German Conference On Electric Propulsion And Their Applications «Electric Propulsion, New Challenges». Russia. - 2012.
10. Григорьян В.Г. Системы ускорения электростатических ДЛА: Учебное пособие. – М.: МАИ. - 1984. – 34с.
11. Auweter-Kurtz M., Bruno C., Fearn D. G., Kurtz H., Lawrence T.J., Lenard R.X. Nuclear Space Power and Propulsion // IAA Commission III. - 2001. – 257p.

12. Leiter H. J., Killinger R. The "New Grid Systems for Ion Engines" Technology Project - Assessment and Outlook. // 42th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit. AIAA 2006-5000, Sacramento, California. - 2006.
13. Габович М. Д., Плешивцев Н. В., Семашко Н. Н. Пучки ионов и атомов для управляемого термоядерного синтеза и технологических целей. - М.: Энергоатомиздат. - 1986. - 248с.
14. Nakayama Y., Wilbur Paul J. Numerical Simulation of Ion Beam Optics for Many-grid Systems. // 37th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit. AIAA 2001-3782, Salt Lake City, Utah. - 2001.
15. Dual-Stage Gridded Ion Thruster (DS4G). http://www.esa.int/gsp/ACT/pro/projects/ds4g_overview.html, 04.2006.
16. Walker R., Bramanti C., Sutherland O., Boswell R., Charles C., Fearn D., Gonzalez Del Amo J., Frigot P. E., Orlandi M. Initial Experiments on a Dual-Stage 4-Grid Ion Thruster for Very High Specific Impulse and Power. // 42nd AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit. AIAA 2006-4669, Sacramento, California. - 2006.
17. Coletti M., Gabriel S. B. Numerical Investigation of a Dual Stage Variable Isp Ion Engine. // 32nd International Electric Propulsion Conference. IEPC-2011-204, Wiesbaden, Germany. - 2011.
18. Coletti M., Marques R. I., Gabriel S. B. Discharge Hollow Cathode Design for a 4-Gridded Ion Engine. // Aerospace Conference, 2010 IEEE. 978-1-4244-3888-4/10/ - 2010.
19. Описание программного пакета EGUN-IGUN., 1992. <http://www.egun-igun.com/>, 1992.
20. Loeb H.W., Feili D., Popov G.A., Obukhov V.A., Balashov V.V., Mogulkin A.I., Murashko V.M., Nesterenko A.N., Khartov S. Design of High-Power High-Specific Impulse RF-Ion Thruster. // 32nd International Electric Propulsion Conference. IEPC-2011-290, Wiesbaden, Germany. - 2011.