

СЕКЦИЯ II. ПРОЕКТИРОВАНИЕ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

*Председатели: д.т.н., профессор Салмин В.В.
д.т.н., профессор Куренков В.И.*

УДК 537.523/.527; 629.7.036.7

Абгарян В.К., Купреева А.Ю., Мельников А.В., Пейсахович О.Д.

ОПТИМИЗАЦИЯ ФОРМЫ РАЗРЯДНОЙ КАМЕРЫ ВЫСОКОЧАСТОТНОГО ИОННОГО ДВИГАТЕЛЯ

Ионно-плазменные источники нашли широкое применение, как в энергосиловых установках космической техники, так и в наземных технологиях [1, 2]. На космических аппаратах источники применяются как двигатели малой тяги, используемые для стабилизации и коррекции орбит спутников в околоземном пространстве. В последнее время двигатели с таким механизмом работы стали часто использовать в качестве маршевых двигателей при миссиях в дальний космос или в задачах довыведения на целевые орбиты.

Одна из схем ионного двигателя - схема высокочастотного [3] ионного двигателя (ВЧИД), отличающийся наличием ВЧ-генератора (рис. 1). Основными элементами конструкции являются: керамическая газоразрядная камера (ГРК); индуктор, подключённый к ВЧ-генератору; ионно-оптическая система (ИОС), состоящая из эмиссионного и ускоряющего электродов, перфорированных круглыми или щелевыми отверстиями; газопровод; катод-нейтрализатор для компенсации положительного заряда ионов в выходящем потоке плазмы.

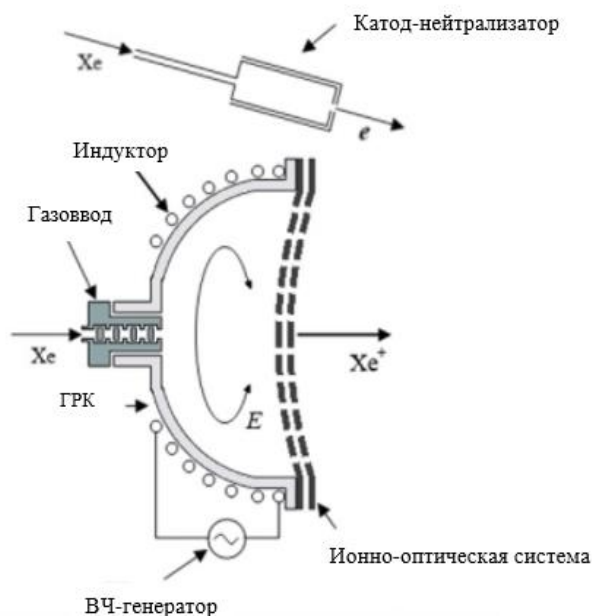


Рис. 1. Конструкция двигателя ВЧИД с полусферической ГРК

В ВЧИД организуется индуктивный разряд плазмы с помощью переменного электромагнитного поля, образующегося при подаче в индуктор высокочастотного тока с частотой порядка МГц. Электроны плазмы поглощают энергию ВЧ-поля и ионизируют нейтральные атомы рабочего газа электронным ударом. Часть ионов извлекается из разрядной камеры через отверстия в электродах ИОС, ускоряется в межэлектродном промежутке до энергий в несколько кэВ.

Остальные ионы выпадают на граничащие в разрядом поверхности, что приносит потери вкладываемой в плазму ВЧ мощности $W_{ВЧ}$, затраченную на образование ионов и их движение внутри ГРК в квазистационарном электростатическом поле. Физические процессы, протекающие в ГРК при работе ионных двигателей, описаны в большом количестве литературы, например, в обзоре [2].

Технические характеристики ионных источников и двигателей, такие как тяга T и извлекаемый ионный ток I_0 зависят от относительной величиной потерь вкладываемой мощности $W_{ВЧ}$, которая, в свою очередь, в первом приближении определяется отношением площадей выходного сечения двигателя к площади поверхностей, где происходят потери мощности. Поэтому вполне закономерно стремление разработчиков переходить к форме ГРК с возможно меньшей площадью поверхности. На практике применялись различные формы, от цилиндрических как в первых моделях ВЧИД, до конической, полусферической, и т.п. В то же время геометрия электродов ИОС во всех схемах выбиралась плоской или близкой к ней. Небольшая кривизна электродов накладывалась для направления в нужную сторону (вне или во внутрь) термопластической деформации электродов ИОС. При плоской геометрии электродов ИОС, очевидно, наименьшим будет поток атомов нейтрального газа, не ионизовавшихся в разряде и покидающих ГРК через отверстия в ИОС. Таким образом, считалось, что в плоской геометрии ИОС поддерживаются на должном уровне такие технические характеристики двигателя, как коэффициент использования рабочего тела и тяга T двигателя, связанная с расходимостью пучка. При плоской геометрии электродов ИОС она, очевидно, минимальная. Однако, если тяга двигателя более важна, чем расходимость ионного пучка, можно поставить совместную оптимизационную задачу об определении оптимальных форм ГРК и ИОС, причём, включая класс существенно выпуклых электродов ИОС. Такая кривизна электродов ИОС ранее не рассматривалась. Критерием оптимизации является тяга для двигателей T , либо ионный ток I_0 .

Расчёты T и I_0 для схем различной геометрии выполнялись с помощью инженерной численной модели [4]. В расчётной модели рассчитываются значения основных параметров плазмы – электронной плотности n_e и электронной температуры T_e . Значения T и I_0 рассчитывались интегрированием бомовского тока

\vec{j}_B по выходной поверхности, т.е. поверхности ИОС, т.е.:

$$T = \iint_{S_{ИОС}} (\vec{j}_B, \vec{n}_z) d\sigma; \quad (1)$$

$$I_0 = \iint_{S_{ИОС}} |\vec{j}_B| d\sigma, \quad (2)$$

где плотность бомовского тока $|\vec{j}_B| = n_e \sqrt{T_e}$, \vec{n}_z - единичный вектор оси двигателя OZ.

Расчёты проводились для двигателей с диаметром выходного сечения, равным 16 см. Значения T и I_0 соотносились со такими же значениями, рассчитанным для базовой схемы двигателя с полусферической ГРК и плоской ИОС.

Параметрами оптимизации в расчётах являлись высота ГРК и прогиб электродов ИОС. На рис. 2 приведены распределения электронной концентрации n_e в базовой схеме и в схеме, для которой отмечено наибольшее увеличение тяги на 14%.

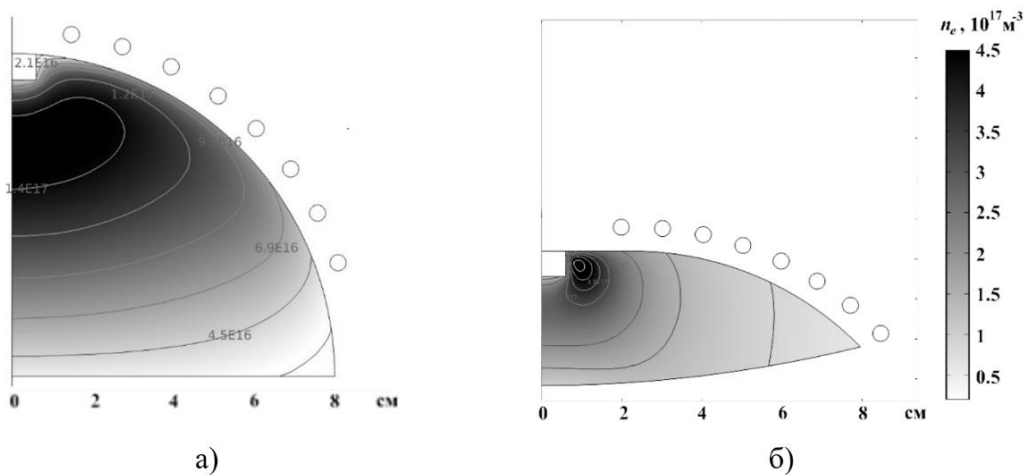


Рис. 2. Результаты расчётов а) базовая схема, б) оптимальная схема

Расчёты проведены на классе поверхностей ГРК и ИОС, являющихся сегментами сферических поверхностей.

Для оценки кривизны РК и ИОС введены понятия относительной высоты камеры h_{PK} и прогиба электродов $h_{\text{э}}$ (рис. 3):

$$h_{PK} = H_{PK} / R_0, h_{\text{э}} = H_{\text{э}} / R_0. \quad (3)$$

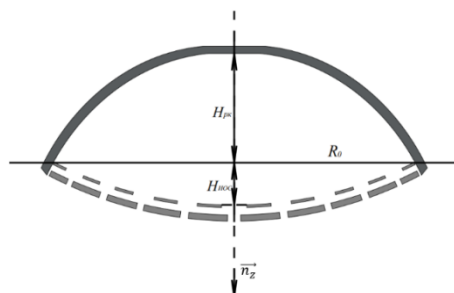
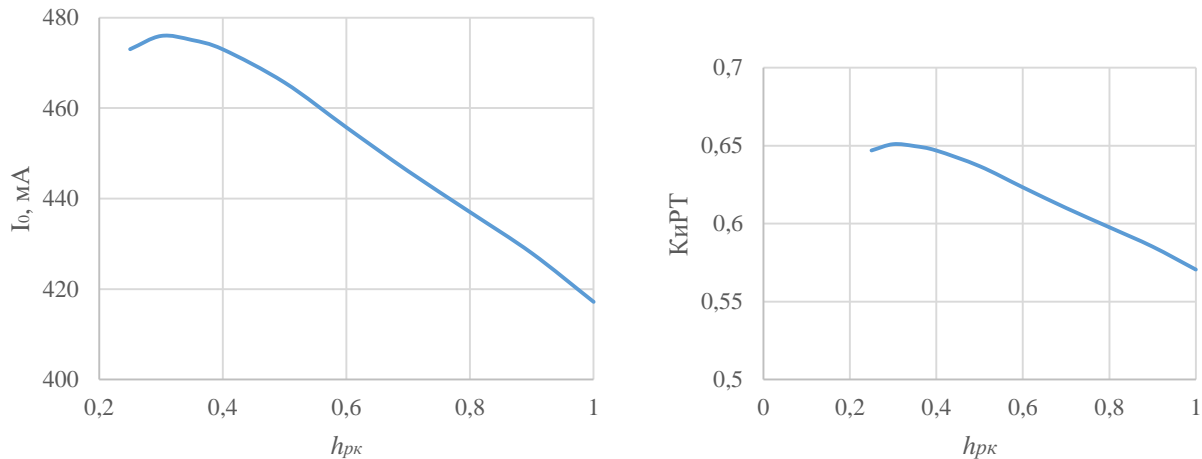


Рис. 3. Геометрические параметры РК и ИОС

Для дальнейших расчётов h_3 был зафиксирован в значении, где наблюдалось максимальное увеличение тяги, h_{PK} менялось в диапазоне от 0,25 до 1 (соответствует полусферической форме камеры).

В результате были получены следующие закономерности:



Выявленное заметное увеличение тяги способствует продолжению исследования в данном направлении. В дальнейшем планируется рассмотрение более широкого класса поверхностей для ГРК и ИОС, например, эллипсоидальных, составных и прочие. При достижении значимых результатов может быть рассмотрен вопрос о введении предложенной методики предварительного расчёта формы двигателя в процесс создания изделия отдельным этапом.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда, проект № 22-29-01006.

Библиографический список

1. V. Kanarov. Thirty-five centimeter diameter radio frequency ion-beam source / V. Kanarov, A. V. Hayes, R. Yevtukhov, B. Vidinsky, A. Navy// Review of Scientific Instruments. 1998. № 69. P. 874-876 Doi:10.1063/1.1148742
2. Goebel D. M. Fundamentals of Electric Propulsion: Ion and Hall / Goebel D. M., Katz I. // New York : John Wiley & Sons, 2008, p. 100.
3. Löb H.W. Kurze Geschichte der RIT-Triebwerke an der JLU Gießen/ Löb H.W.// 1962 Acta Astronautica VIII, 1,3 p. 49.
4. S. Kanev. Mathematical model of radio-frequency ion thruster with an additional magnetostatic field / Kanev S, Melnikov A, Nazarenko I, Khartov S.// IOP Conference Series: Materials Science and Engineering (Institute of Physics and IOP Publishing Limited, 2020), vol. 868, p. 012010 (2020).