

ФЕНОМЕНОЛОГИЯ ИОННОГО РАКЕТНОГО ДВИГАТЕЛЯ

В.М. Кулыгин

НИИ «Курчатовский институт», Москва, Россия

Ионные двигатели (ИД) — адаптация источников ионных пучков, используемых в физических, в том числе термоядерных, экспериментах к специфическим требованиям ракетного двигателя. Это одна из наиболее проработанных и широко применяемых в космической практике систем электрореактивных двигателей (ЭРД). В предлагаемой статье рабочий процесс ИД, основу которого составляют ионизация в газовом разряде поступающего в устройство газа и последующее ускорение в электростатическом поле извлекаемых из разряда ионов, исследуется параметрически с использованием фундаментальных понятий и экспериментальных соотношений. На основе этого рассмотрения обсуждаются потенциальные возможности ИД и определяются условия оптимальной его работы.

Ключевые слова: газовый разряд, ионно-оптическая система, ионный пучок, электрореактивный ракетный двигатель, ионный двигатель.

AN ION ROCKET PROPULSION PHENOMENOLOGY

V.M. Kulygin

NRC «Kurchatov Institute», Moscow, Russia

Ion thrusters — adaptation of ion beam sources usually used in physical, including thermonuclear, experiments to the specific requirements of a space rocket demands. This is one of the most developed and widely used in space practice systems of electric propulsion. In the proposed article, the IT workflow, which is based on ionization in a gas discharge of the gas entering to device and subsequent acceleration in an electrostatic field of ions extracted from the discharge, is investigated parametrically using fundamental concepts and experimental relationships. Based on this consideration, the potential capabilities of the IT are discussed and the conditions for its optimal operation are determined.

Key words: gas discharge, ion-optic system, ion beam, electro rocket propulsion, ion thruster.

DOI: 10.21517/0202-3822-2020-43-4-110-117

ВВЕДЕНИЕ

Одной из наиболее проработанных и широко применяемых в космической практике систем электрореактивных двигателей (ЭРД) являются ионные двигатели (ИД), представляющие собой адаптацию источников ионных пучков, используемых в физических, в том числе термоядерных экспериментах [1], к специфическим требованиям ракетного двигателя.

ИД обычно состоит из трёх основных частей: эмиттера ионов, электростатического ускорителя с одним ускоряющим зазором и электронного компенсатора объёмного заряда ионов в выходящем ионном пучке. Наличие компенсатора — специфическое требование космических условий. Эмиттером чаще всего служит газоразрядная камера (ГРК), в которой происходит ионизация рабочего газа, электростатический ускоритель представляет собой систему перфорированных электродов, образующих ионно-оптическую систему (ИОС) (обычно 2- или 3-электродную ИОС), обеспечивающую при подаче на них необходимых электрических потенциалов извлечение ионов из ГРК, их ускорение с одновременным формированием пучка — направленного потока ионов, собственный объёмный заряд и ток которого после выхода из ИОС необходимо компенсировать инжекцией соответствующего электронного потока.

Схема ионного двигателя с ГРК на основе ВЧ-разряда, имеющего преимущество «безкатодности» перед ГРК с разрядами постоянного тока, ограничение ресурса работы которых определяется

именно выходом из строя катодов, показана на рис. 1, а. Отрицательный потенциал на промежуточном (ускоряющем) электроде (см. рис. 1, б) необходим для предотвращения обратного потока электронов на эмиссионный электрод (перфорированная стенка ГРК, через апертуры которой проходят ионы формируемого пучка). Третий, замкнутый на корпус космического летательного аппарата (КЛА) электрод часто делают в виде кольца, охватывающего весь пучок.

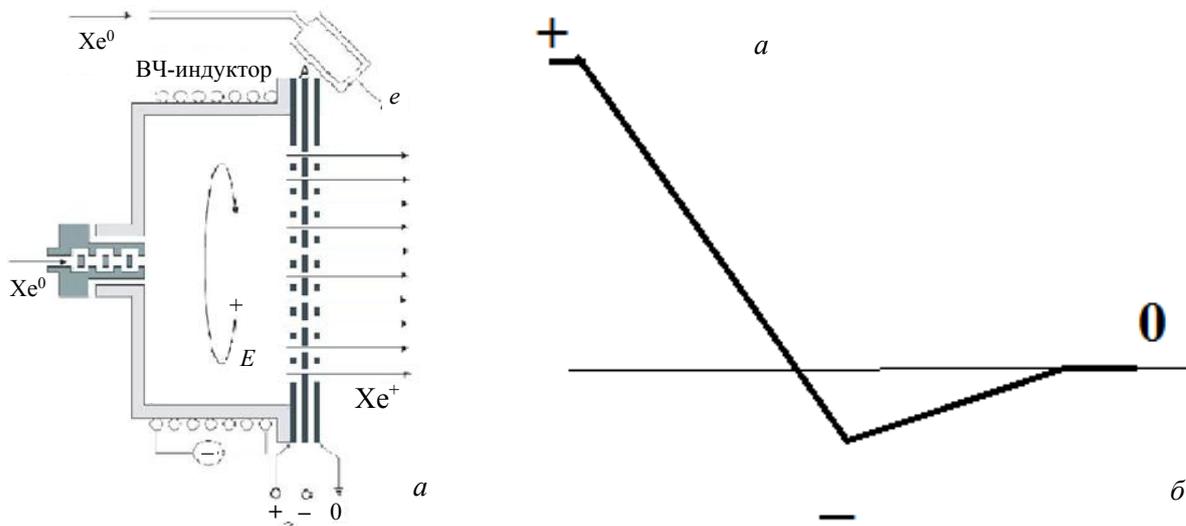


Рис. 1. Схема ИД с трёхэлектродной ИОС и ГРК на основе ВЧ-разряда (а) и ориентировочное распределение потенциалов на электродах трёхэлектродной ИОС (б)

ИЗВЛЕЧЕНИЕ ИОНОВ, ИХ УСКОРЕНИЕ И ФОРМИРОВАНИЕ ПУЧКА

Поскольку ИОС — ключевой узел, определяющий энергетическую эффективность и надёжность работы ионного двигателя, начнём рассмотрение именно с него. Именно здесь производится главный энерговклад в рабочее тело, именно электроды ИОС являются наиболее энергонапряжёнными элементами конструкции, требования надёжности которых накладывают основные ограничения на удельную мощность двигателя. При разработке конкретного устройства необходимы точные, достаточно объёмные расчёты этой системы, базирующиеся на основных физических закономерностях, определяющих работу ИОС. В предлагаемом подходе мы ограничимся модельными соотношениями.

На внутреннюю поверхность эмиссионного электрода приходит поток плазмы из объёма ГРК. Апертуры этой перфорированной поверхности могут рассматриваться как плоские зонды с отрицательным смещением относительно плазмы. Плотность ионного тока насыщения на них определяется хорошо известной формулой [2], которая приведена здесь в удобном для практического использования виде:

$$j_i = \frac{0,6Zn_i 1,38 \cdot 10^6}{6,25 \cdot 10^{18}} \sqrt{\frac{2T_e}{\mu}}, \quad (1)$$

где Z — зарядность ионов; n_i — плотность ионов в плазме ГРК, см^{-3} ; T_e — температура электронов в разряде, эВ; μ — массовое число ионов (отношение массы иона к массе протона).

Ионы, прошедшие апертуру, попадают в ускоряющий зазор, который в первом приближении можно рассматривать как эквивалентный плоский диод, максимальная плотность тока через который даётся законом Чайлда—Ленгмюра (закон 3/2) [3]

$$J_{3/2} = 5,4 \cdot 10^{-8} \sqrt{\frac{Z}{\mu}} \frac{U_{\text{уск}}^{3/2}}{d^2}, \quad (2)$$

где $U_{\text{уск}}$ — ускоряющее напряжение, В; d — ускоряющий зазор, см.

Конечно, плотность ионного тока, проходящего из ГРК на эмиссионный электрод, определяется параметрами плазмы в ГРК, так что смысл ограничения (2) заключается в том, что при большей плотности тока поток ионов не будет сформирован должным образом, попадёт на ускоряющий электрод и вызовет

его эрозию. При уменьшении плотности тока против оптимальной пучок оказывается «перефокусированным» и, вообще говоря, также может вызвать эрозию.

Таким образом, условием нормальной работы ИОС двигателя является согласование плотностей тока, поступающего из плазмы и осваиваемого ускоряющим зазором.

Следует заметить, что в реальной ИОС в отличие от идеального плоского диода:

- пучок ионов имеет ограниченный поперечный размер, зависящий от диаметра апертуры эмиссионного электрода;
- граница плазмы не плоская, и её кривизна меняется с изменением плотности плазмы в ГРК;
- «провисание» эквипотенциалей в апертуру ускоряющего электрода создаёт дефокусирующую конфигурацию поля на выходе из ускоряющего зазора;
- в реальных условиях имеются дополнительные ограничения на разность потенциалов между электродами ИОС и на расстояние между ними. Прежде всего это требование высоковольтной прочности межэлектродного зазора;
- исследования в области вакуумного пробоя привели к установлению связи между пробивным напряжением и величиной зазора [1]

$$U_{пр}, В = C d_1^\alpha, \quad (3)$$

где d_1 — зазор, см; $\alpha < 1$; C — численный коэффициент.

Многочисленные экспериментальные результаты, полученные в ходе разработки мощных ионных источников в рамках термоядерных исследований [1], хорошо согласуются с зависимостью (3) при $C = 8 \cdot 10^4$ и $\alpha = 0,8$.

Ограниченность поперечного размера ионного пучка приводит к появлению поперечного электрического поля, создаваемого собственным объёмным зарядом пучка, что вызывает его расходимость. В источниках ионов для термоядерных исследований частично эта расходимость парируется приданием скошенности краю апертуры в эмиссионном электроде (рис. 2), что обеспечивает поперечную составляющую электрического поля ускорительного зазора, направленную против поперечного поля объёмного

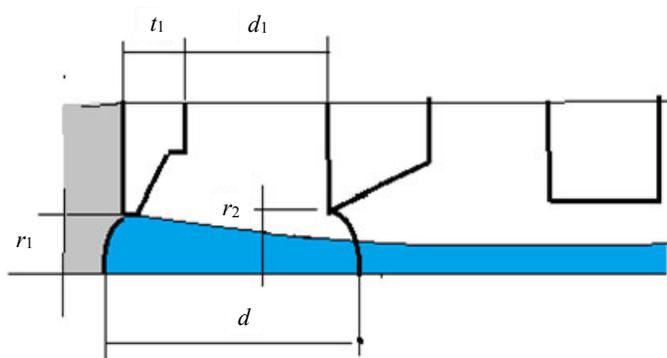


Рис. 2. Схема ионно-оптической системы

заряда (Пирсова оптика). Однако в ионных двигателях такое техническое решение невозможно, так как толщина электрода сильно влияет на КПД двигателя. По этой причине толщина эмиссионного электрода составляет всего 0,26—0,4 мм, так что профилировать отверстие невозможно. В ионных двигателях противодействие расходимости из-за действия объёмного заряда и компенсацию действия дефокусирующей конфигурации поля на выходе из ускоряющего зазора осуществляют организацией вогнутости плазменной границы, что достигается уменьшением плотности извлекаемого тока по сравнению с определяемой

«законом $3/2$ » [1]. При расчёте снижения плотности тока можно ориентироваться на соотношение

$$j_{опт} = 0,7j_{3/2}. \quad (4)$$

В связи с изложенным характерный размер эквивалентного плоского диода d для реальной ИОС не совпадает с зазором d_1 , входящим в выражение (3). Связь между этими двумя параметрами определяется конструктивными условиями реализации электродов ИОС. Эмпирически эту связь можно задать следующим выражением [1]:

$$d \cong 0,5r_1 + t_1 + d_1 + 0,5r_2, \quad (5)$$

где r_1 — радиус апертуры в эмиссионном электроде; t_1 — толщина эмиссионного электрода; d_1 — зазор между электродами; r_2 — радиус апертуры в ускоряющем электроде (см. рис. 2).

Кроме того, для надёжной работы ИОС двигателя напряжение между электродами, формирующими ускоряющий зазор, должно быть меньше пробивного:

$$U_{\text{уск}} = \beta U_{\text{проб}}, \quad (6)$$

где $\beta < 1$.

Результаты оценок по приведённым формулам, сделанные применительно к ИОС двигателя RFIT-450 [4], показаны на рис. 3, а, б и 4.

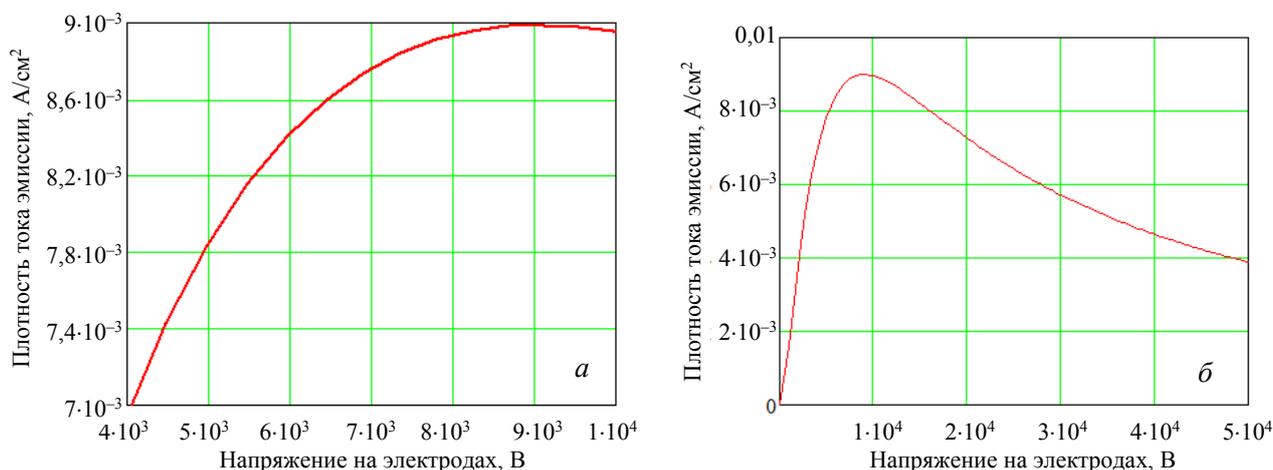


Рис. 3. Зависимость оптимальной плотности тока ионной эмиссии от ускоряющего напряжения (а); то же в более широком диапазоне напряжений (б)

Геометрические параметры ИОС соответствуют параметрам, приведённым в [4]: $r_1 = 0,2$ см, $t_1 = 0,55$ см, $r_2 = 0,14$, d_1 варьируется. Запас по высоковольтной прочности, заданный коэффициентом $\beta = 0,27$, выбран из условия соответствия данным [4]: $U_{\text{уск}} = 5$ кВ при расстоянии между электродами 0,16 см. Оптимальная плотность тока ионов ксенона при этом составляет $7,84$ мА/см².

Рис. 5 иллюстрирует влияние отклонения от оптимальной плотности тока на формирование пучка при различных отношениях радиуса эмиссионной апертуры к длине области ускорения $\xi = r_1/d$. Видно, что при меньших значениях ξ чувствительность системы к этим отклонениям меньше. Зависимость (2) рассчитана для параметров ИОС двигателя RFIT-450, приведённых в [4], (1) и (3) — варианты с изменением радиуса эмиссионной апертуры 0,1 и 0,3 см соответственно.

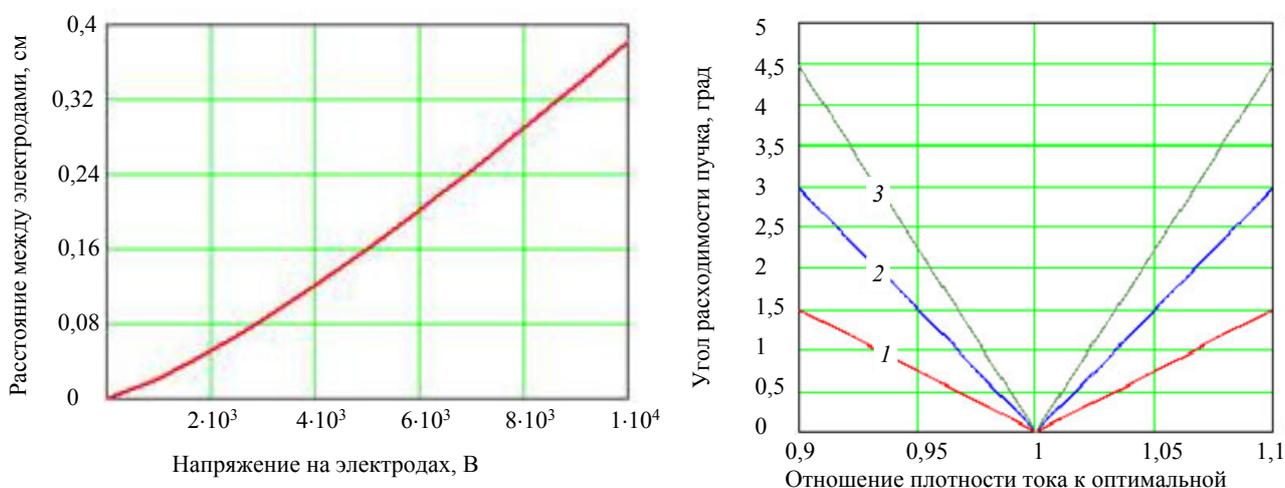


Рис. 4. Изменение требуемого расстояния между электродами ускоряющего зазора с изменением напряжения на них в диапазоне, соответствующем рис. 3, а

Рис. 5. Зависимость угла расходимости пучка α на выходе из области ускорения от отношения плотности тока к оптимальному значению η при $\xi = 0,29$ (1), $\xi = 0,519$ (2), $\xi = 0,779$ ($\eta = 57,3 \xi |\eta - 1|$) (3) [1]

Связь плотности тяги с удельным импульсом для рассматриваемой конфигурации электродов показана на рис. 6. Плотность тяги дана с учётом прозрачности эмиссионного электрода.

На рис. 7 показана связь тяги с удельным импульсом для двигателя RF IT-450 [4].

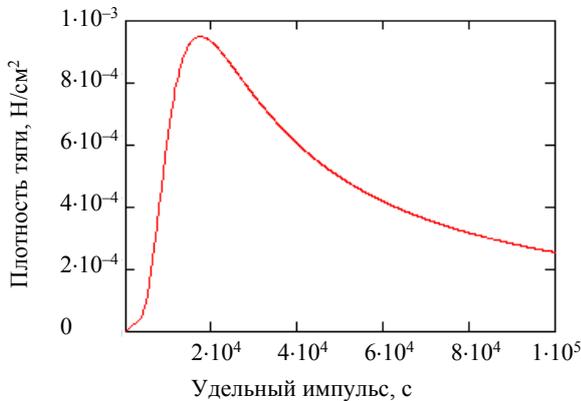


Рис. 6. Зависимость плотности тяги от удельного импульса для рассматриваемой конфигурации электродов (плотность тяги дана с учётом прозрачности эмиссионного электрода)

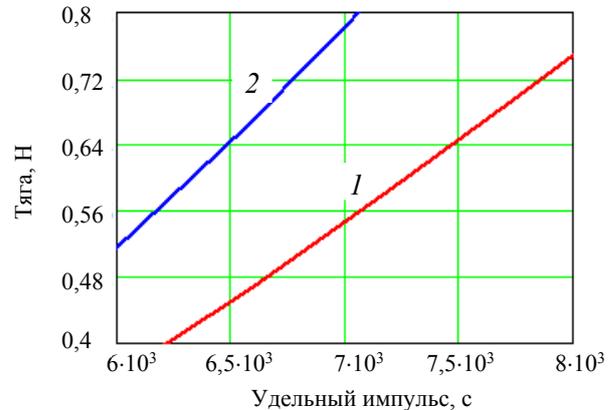


Рис. 7. Зависимость тяги от удельного импульса для двигателя RF IT-450 [4]: 1 — результат, полученный с учётом смещения оптимального значения эмиссионной плотности (соотношение (4)); 2 — без такого учёта

ОБЕСПЕЧЕНИЕ ГЕНЕРАЦИИ ИОНОВ В ГРК

Концентрация плазмы, которая должна обеспечить поставку ионов с заданной плотностью тока, определяется из выражения для плотности ионного тока насыщения, идущего на плоский зонд:

$$n, \text{см}^{-3} = \frac{6,25 \cdot 10^{18} j_i}{0,6 \cdot 1,38 \cdot 10^6 \sqrt{\frac{T_e}{\mu}}}, \quad (7)$$

где j_i А/см²; T_e , эВ; принимаем вслед за авторами [4] $T_e = 5$ эВ; μ — массовое число иона, что даёт $n = 3,033 \cdot 10^{11}$ см⁻³.

Оценка условий, необходимых для обеспечения требуемой концентрации плазмы, требует рассмотрения баланса частиц и энергии в ГРК.

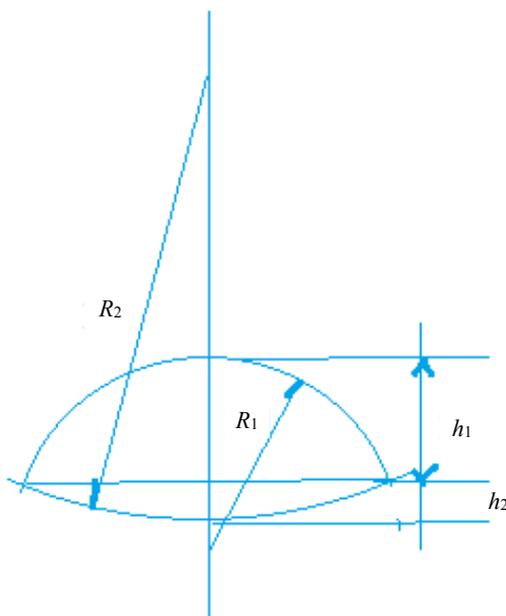


Рис. 8. Геометрия ГРК RF IT-450

Геометрия ГРК RF IT-450 может быть с достаточной для наших оценок точностью аппроксимирована двумя шаровыми сегментами (рис. 8): $R_1 = 26$ см; $h_1 = 12,5$ см; $R_2 = 55$ см; $h_2 = 5$ см. Объём шарового сегмента $V = \frac{1}{3} \pi h^2 (3R - h)$; площадь шаровой поверхности сегмента $S = 2\pi R h$. Объём и площадь поверхности верхнего (см. рис. 8) сегмента $V_1 = 1,072 \cdot 10^4$ см³, $S_1 = 2,042 \cdot 10^3$ см², нижнего $V_2 = 4,189 \cdot 10^3$ см³, $S_2 = 1,728 \cdot 10^3$ см². Полный объём ГРК $V_{\text{ГРК}} = V_1 + V_2 = 1,491 \cdot 10^4$ см³, полная площадь поверхности $S_{\text{ГРК}} = S_1 + S_2 = 3,77 \cdot 10^3$ см², эффективная площадь поверхности эмиссии $S_{\text{эмиссии}} = S_2 K_{\text{пр}} = 0,59 S_2 = 1,02 \cdot 10^3$ см².

Полный ток пучка $I_{\text{пучка}} = j_i S_{\text{эмиссии}} = (7,84 \cdot 10^{-3})(1,02 \cdot 10^3) = 7,9968 \approx 8$ А, полный ток ионов на всю внутреннюю поверхность ГРК $I_{\text{ионов}} = j_i S_{\text{ГРК}} = (7,84 \cdot 10^{-3})(3,77 \cdot 10^3) \approx 29,6$ А.

Необходимую концентрацию нейтрального газа оценим из условия равенства полного количества ионов, рождающихся в объёме ГРК и уходящих на всю её внутреннюю поверхность:

$$n_e = \frac{S_{\text{ГРК}}}{V_{\text{ГРК}}} \frac{0,6v_i}{\langle \sigma v_e \rangle}, \quad (8)$$

где $\langle \sigma v_e \rangle = 7,16 \cdot 10^{-9} \text{ см}^3/\text{с}$ — скорость ионизации ксенона электронами, имеющими температуру $T_e = 5 \text{ эВ}$;

$v_i = 1,38 \cdot 10^6 \sqrt{\frac{T_e}{\mu}} = 2,69 \cdot 10^4 \text{ см}^{-3}$ — скорость ионов, выходящих на стенку, что даёт искомую величину

$$n_g = 5,706 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-3}.$$

Оценим мощность, требующуюся для поддержания разряда.

Энергетическая цена иона в индукционном разряде $C_i \approx 40\text{—}80 \text{ эВ}$ [5]. Таким образом, полная мощность при консервативной оценке 80 эВ, требующаяся для работы ГРК, составит $P_{\text{ГРК}} = I_{\text{ионов}} C_i = 29,6 \cdot 80 = 2368 \text{ Вт}$.

Из этой мощности пучок «выносит» из ГРК $P = I_{\text{пучка}}(\Phi_i + T_e) \approx 8(12,1 + 5) \approx 137 \text{ Вт}$, так что на стенке камеры высаживается $P_{\text{ст}} = P_{\text{ГРК}} - P = 2,23 \text{ кВт}$.

Если принудительное охлаждение ГРК отсутствует, то эта мощность сбрасывается излучением, что

$$\text{даёт температуру стенок } T_{\text{ст}} = \sqrt[4]{\frac{P_{\text{ст}}}{S_{\text{ГРК}} \sigma_T}} \approx 568 \text{ К}, \quad \sigma_T = 5,67 \cdot 10^{-12} \text{ К}.$$

Считая, что стационарно работающая ГРК находится в тепловом равновесии, принимаем, что температура газа в ней имеет ту же температуру $T_g = T_{\text{ст}}$. Тогда давление газа оценивается как

$$P_g = \frac{n_g T_g}{3,55 \cdot 10^{16} \cdot 273} = 3,34 \cdot 10^{-4} \text{ торр}.$$

Газовую эффективность двигателя оценим как отношение потока частиц, выходящих из ГРК в виде ионов, к потоку нейтрального газа. Для увеличения этой эффективности авторы разработки [4] предлагают уменьшить диаметр апертуры ускоряющего электрода по сравнению с эмиссионной апертурой, фокусируя элементарную струйку в центр этой апертуры. При этом эффективная апертура для извлечения ионов определяется площадью отверстия в эмиссионном электроде, а истечение газа определяется площадью апертуры в ускоряющем электроде, и газовая эффективность составит

$$\eta_g = \frac{0,6n_i}{n_g} \sqrt{\frac{T_e}{T_g}} \frac{r_1^2}{r_2^2} = 0,65.$$

Это будет справедливо, если предотвращён уход газа вбок и можно мириться с соответствующим увеличением давления газа в ускоряющем зазоре.

Если же принять $r_2 = r_1$, то $\eta = 0,5$, что обычно и имеет место в ионных источниках.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Ограничение по эмиссионной плотности тока элементарной струйки и ускоряющему напряжению в одноззорной ИОС определяется законом 3/2 с учётом поправок, связанных с граничными условиями области ускорения и требованием высоковольтной прочности ускоряющего зазора. Кроме этих ограничений, следует иметь в виду коэффициент прозрачности ИОС, определяемый технологическими возможностями и условиями механической устойчивости системы электродов ИОС.

Зависимость рабочей плотности тока от величины ускоряющего напряжения имеет максимум, положение которого зависит от массы и зарядности ускоряемых ионов.

Оценки влияния отклонения эмиссионной плотности тока от оптимального значения, представленные на рис. 5, на расходимость ионного пучка позволяют оценить её влияние на тяговую эффективность двигателя и в ещё большей степени на надёжность работы ИОС: недофокусировка или перефокусировка приводит к попаданию энергичных ионов на ускоряющий электрод ИОС, что может привести к его быстрому разрушению из-за ионного распыления.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Семашко Н.Н., Владимиров А.Н., Кузнецов В.В., Кулыгин В.М., Панасенков А.А. Инжекторы быстрых атомов водорода. — М.: Энергоиздат, 1981.
2. Франк-Каменецкий Д.А. Лекции по физике плазмы. — М.: Атомиздат, 1968.
3. Габович М.Д. Плазменные источники ионов. — Киев: Наукова думка, 1964. 223 с.
4. Loeb H.W., Feili D., Popov G.A., Obukhov V.A., Balashov V.V., Mogulkin A.I., Murashko V.M., Nesterenko A.N., Khar-tov S.A. Design of high-power high-specific impulse RF-ion thruster. — In: 32 Intern. Electric Propulsion Conf. (IEPC-2011). Wiesbaden, Germany, September 11—15, 2011, p. 290.
5. Дудин С.В. и др. Энергетическая цена ионов в комбинированном индукционно-ёмкостном ВЧ-разряде. — Письма в ЖТФ, 1998, т. 24, № 22, с. 33.

Владимир Михайлович Кулыгин, заместитель руководителя Отделения плазменных технологий ККЯТЭТ, к.ф.-м.н., ветеран атомной энергетики и промышленности; НИЦ «Курчатовский институт», 123129 Москва, пл. Академика Курчатова 1, Россия

Статья поступила в редакцию 15 июня 2020 г.

После доработки 11 июля 2020 г.

Принята к публикации 24 сентября 2020 г.

Вопросы атомной науки и техники.

Сер. Термоядерный синтез, 2020, т. 43, вып. 4, с. 110—116.