

УДК 621.387.424, 533.09.07

С.А. ОГИЕНКО

*Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Украина*

## ДВА ПОДХОДА К ИЗУЧЕНИЮ ПРОЦЕССА ЭРОЗИИ РАЗРЯДНОЙ КАМЕРЫ ДВИГАТЕЛЯ ХОЛЛА

*Изучается проблема ограничения ресурса двигателя Холла вследствие распыления его разрядной камеры ионным потоком. Рассчитано изменение профиля поверхности разрядной камеры двигателя, разработанного одним из мировых лидеров фирмой “Факел”, путём численного двумерного моделирования движения ионов на основе предварительного расчёта: характерного распределения электрического потенциала в разрядной камере и вне её на базе гидродинамической одномерной модели; перепада потенциала в пристеночном слое; двумерного распределения скорости рождения ионов в разрядной камере методом частиц. При расчёте полагалось, что поток ионов на стенку разрядной камеры формируется: либо объёмным дефокусирующим электрическим полем; либо вследствие хаотической составляющей скорости движения ионов.*

**Ключевые слова:** двигатель Холла, ресурс разрядной камеры, ионное распыление, численное моделирование.

### Введение

Базовая конструкция двигателя Холла (ХД), разработанная более 50 лет назад, эксплуатируется в составе двигательных установках для поддержания орбиты космических аппаратов и других целей уже десятки лет благодаря хорошему сочетанию эксплуатационных характеристик (высокий КПД и надёжность) первых моделей ХД. Дальнейшее развитие ХД предполагает поиск решения “острых” проблем, одна из которых – повышение ресурса двигателя путём сокращения скорости разрушения разрядной камеры (РК) вследствие ионной бомбардировки. Базой для технической модернизации является понимание роли следующих основных процессов (факторов), которые определяют эрозию РК: распределение потенциала электрического поля в разрядном промежутке; распределение концентрации и энергии (температуры) электронов в РК; распределение потоков заряженных частиц. Это исследование проведено для поиска решений некоторых противоречий в понимании указанных процессов и, т.о., для уточнения метода оценки ресурса ХД.

### 1. Анализ существующих проблем, определение задач исследования

Метод оценки ресурса описан в разных работах, например [1 – 3], и, несмотря на различия, включает следующие общие существенные положения. Поверхность РК распыляется ионами плазмобразующего газа. Коэффициент распыления зависит от температуры поверхности и угла падения иона. Выбитые атомы не осаждаются обратно и не

восстанавливают эродированную поверхность РК. При этом, то как ионы набирают энергию и, соответственно, условия падения ионов на поверхность, а также то, какие процессы определяют баланс потоков энергии и температуру поверхности РК, составляет отличие в подходах к оценке ресурса РК.

При оценке продольного распределения потенциала электрического поля, основываясь на результатах экспериментов с использованием зонда, некоторые исследователи полагают [1], что в пределах РК сосредоточено около 90% разрядного напряжения. Определяя скорость ионов оптическим методом, другие полагают, что около 50% разрядного напряжения сосредоточено в пределах РК [2, 3]. При этом, физические процессы, определяющие проводимость плазмы и распределение потенциала поля остаются не выясненными. Для оценки радиальной составляющей электрического поля обычно используется т.н. уравнение “термализованного потенциала”, предложенное А. Морозовым [3]. При этом в ХД распределение магнитного поля характеризуется существенным градиентом в радиальном направлении, что создаёт известный эффект “магнитного зеркала” для электронов, но не учитывается уравнением “термализованного потенциала”.

Для определения особенностей важнейших пристеночных и поверхностных обменных процессов необходим подход для разрешения противоречия между известными данными экспериментов о существовании электронов в РК с температурой более 40 эВ [5, 6] и теоретическими выводами [4] предполагающими охлаждение электронов до 30 эВ в керамической РК.

На основе проведенного анализа следует сделать заключение о необходимости уточнения метода оценки ресурса разрядной камеры ХД путём учёта особенностей двумерного движения ионов и электронов в пространстве РК, включая узкий пристеночный электрический слой, что определяет энергию частиц, угол падения на поверхность и температуру поверхности РК, а также и скорость разрушения поверхности РК в конечном итоге.

Задачи выполнялись в следующей последовательности. На двух участках разрядного промежутка (в РК и вне РК) на базе одномерной гидродинамической модели процессов в плазме определялись перепады электрического потенциала, которые использовались далее для расчёта двумерного распределения параметров плазмы в разрядном промежутке и интегральных характеристик ХД на основе метода вероятностного моделирования. Полученные параметры плазмы были основой для расчёта изменения профиля РК в течение 1000 часов.

## 2. Продольное распределение электрического потенциала в разрядном промежутке ХД

Чтобы определить перепады потенциала на двух основных участках разрядного промежутка: в зоне ускорения ионов (ЗУ) протяжённостью от катода до края РК; в зоне ионизации газа (ЗИ) - от края РК до сечения внутри РК, в котором потенциал достигает максимума (рис. 1) использована разработанная ранее одномерная гидродинамическая математическая модель процессов в плазме в разрядном промежутке ХД [7]. Уравнения баланса потоков частиц, энергии и перепада потенциалов в модели

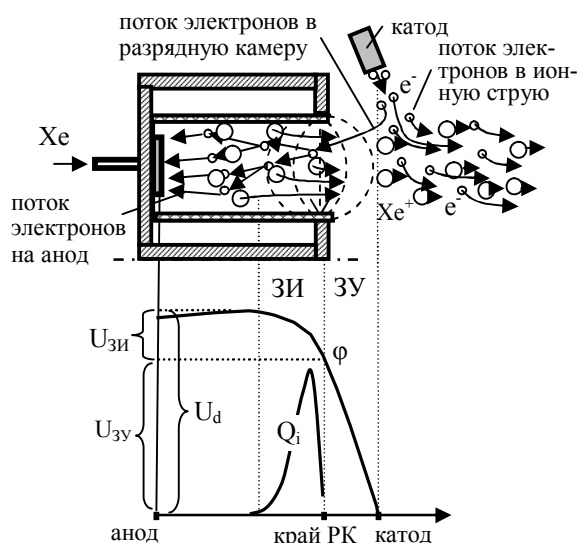


Рис. 1. Распределение в разрядном промежутке ХД потенциала  $\phi$ , интенсивности рождения ионов  $Q_i$

составлены для двух важнейших участков – ЗИ и ЗУ, а также для их границы. Для ЗИ и ЗУ использован классический механизм переноса электронов, притом, что выходное отверстие катода находится на расстоянии 5 ... 7 мм от края РК. Тестовые расчёты показали удовлетворительную точность при параметрах номинального режима работы ХД фирмы “Факел”. По модели была рассчитана величина падение потенциала  $U_{zu}$  в зоне ускорения вне РК (рис. 2), составляющая более 50 % разрядного напряжения, которая использовалась далее для двумерного расчёта параметров плазмы методом частиц.

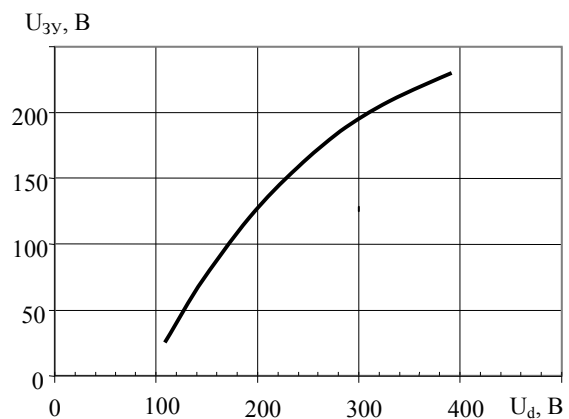


Рис. 2. Перепад потенциала  $U_{zu}$  в ЗУ вне разрядной камеры при различных напряжениях разряда  $U_d$  ХД производства “Факел”

## 3. Распределение электронов вдоль силовых линий магнитного поля

Для описания распределения электронов и электрического потенциала вдоль силовой линии магнитного поля обычно используется т.н. уравнение “термализованного потенциала”, предложенное А. Морозовым [3], в котором пренебрегается влиянием магнитного поля на эти распределения. Однако в ХД характерное возрастание индукции от 15 мТл до 20 мТл на протяжении 1 см создаёт известный эффект “магнитного зеркала”, что не учитывается уравнением “термализованного потенциала” и ведёт к погрешностям при определении электрического поля в ХД. Предлагается учесть эффект “магнитного зеркала” следующим образом. Поток электронов  $q_e = \langle v_r \cdot n_e \rangle$  и распределение концентрации электронов  $n_e$  вдоль силовой линии магнитного поля могут быть определены, учитывая уравнение сохранения адиабатического инварианта  $(V_y^2 + V_z^2)/B = \text{const}$ , где  $V_y$  и  $V_z$  – компоненты скорости электрона, перпендикулярные силовой линии магнитного поля  $B$ , и  $V_r$  – продольная компонента. Обозначая функцию распределения электронов по

энергиям (ФРЭЭ) через  $f(v_x, v_y, v_r, T_e)$ , поток электронов вдоль силовой линии магнитного поля из точки, где индукция -  $B_0$  и потенциал  $\phi_0$  в точку, где индукция  $B$  и потенциал  $\phi$ , при перепаде потенциала  $\Delta\phi = \phi_0 - \phi$  определяется выражением

$$q_e = 2 \cdot \int_0^{\frac{v_r}{\sqrt{B/B_0-1}}} dv_x \cdot 2 \cdot \int_0^{\sqrt{\frac{v_r^2}{B/B_0-1} - v_x^2}} dv_y \times \\ \times \int_{\sqrt{\Delta\phi \cdot 2 \cdot q/m}}^{\infty} v_r \cdot f(v_x, v_y, v_z, T_e) \cdot dv_r.$$

Результаты расчётов показывают значительное ограничение потока электронов к стенкам РК вследствие

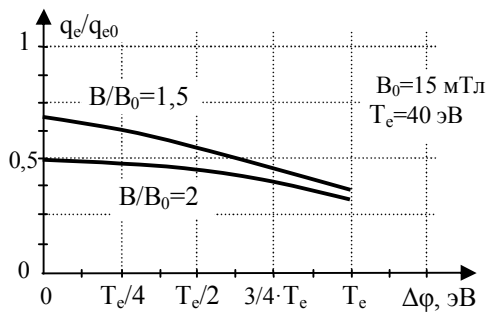


Рис. 3. Изменение потока электронов  $q_e/q_{e0}$  вдоль силовой линии магнитного поля

в ствие градиента магнитного поля (рис. 3).

#### 4. Перепад потенциалов в пристеночном слое плазмы

Противоречие между ожидаемым согласно [4], охлаждением электронов на стенках и экспериментальным фактом о существовании электронов в РК с температурой более 40 эВ [5, 6] может быть устранено, если предположить следующее. ФРЭЭ близка к Максвелловской, но не содержит электронов высоких энергий. В настоящее время нет достоверного описания физических процессов, в которых бы происходила максвеллизация электронов за период их движения между стенками РК. Также сложно использовать для анализа данные о функции распределения электронов полученные зондовым методом в диапазоне энергий более  $5T_e$ , в котором величины ионного и электронного тока на зонд близки.

Полагая, что энергии электронов ограничены величиной  $4T_e$ , рассчитано падение потенциала  $\Delta\phi_w$  между плазмой и стенкой РК в т.н. пристеночном слое в некотором диапазоне температур электронов  $T_e$  (рис. 4). Для этого составлено уравнение баланса радиальных потоков ионов и электронов  $q_i = q_e$  на поверхность РК. Поток ионов  $q_i$  определяется выражением

$$q_i = \int_{-\infty}^{V_{lim}} v_r \cdot [1 - S(\epsilon)] \cdot dv_r \cdot \int_{-\infty}^{V_{lim}} dv_x \times \\ \times \int_{-\infty}^{V_{lim}} f(v_x, v_y, v_z, T_e) \cdot dv_y,$$

где  $q_i = \langle V_{ir} \cdot n_i \rangle$  – поток ионов на границе плазмы и пристеночного слоя;

$v_{lim} \sim (\epsilon_{lim})^{1/2}$ ,  $v_{lim} = (4 \cdot T_e \cdot 2/m)^{1/2}$  – предельная скорость электрона;

$S(\epsilon) = S_{max} \cdot \exp(2 \cdot (1 - (\epsilon/\epsilon_{max})^{1/2}) \cdot \epsilon/\epsilon_{max})$  – коэффициент вторичной эмиссии электронов;

$\epsilon$  – энергия электрона падающего на поверхность РК,  $S_{max} = 2,5$  и  $\epsilon_{max} = 500$  эВ для материала камеры BN-SiO<sub>2</sub>.

Радиальная компонента скорости потока ионов  $V_{ir}$  определяется хаотической составляющей скорости атома (100...200 м/с) и энергией, полученной ионом при ускорении радиальной компонентой электрического поля в пространстве РК вне слоя.

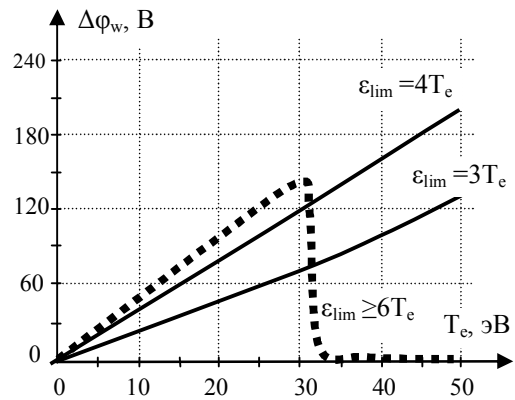


Рис. 4. Расчётная зависимость перепада потенциала к стенке  $\Delta\phi_w$  от температуры электронов  $T_e$  для материала BN-SiO<sub>2</sub>. Энергия электронов в ФРЭЭ ограничена величиной  $\epsilon_{lim}$

#### 5. Расчёт параметров плазмы в разрядной камере

Интенсивность ионообразования  $Q_i$  (количество ионов рождающихся в единице объёма за секунду), концентрация электронов  $n_e$  и средняя энергия электронов  $\epsilon$  в разрядном промежутке были рассчитаны на основе метода вероятностного моделирования подобно [8]. При этом были использованы характерные для ХД формы кривых распределения продольного электрического  $E_x$  и магнитного полей (рис. 1) и величины падения потенциала в РК и за её пределами, рассчитанные ранее в разделе 2 по одномерной гидродинамической модели. Варьировалась величина радиальной составляющей электрического поля  $E_r$ . В тестовой расчётной задаче вели-

чина тяги не выходила за пределы 4 ... 4,4 г, при том, что экспериментальная величина – 4 г.

Некоторые результаты расчёта параметров плазмы в РК ХД моделей М-70 ... М-290 (например с наружным диаметром  $D=70$  мм, шириной канала  $b_k=15$  мм, при разрядном напряжении 280 В, индукции радиального магнитного поля 16 мТл, массовом расходе РТ через анодный блок 2.5 мг/с) при  $E_r \neq 0$  приведены в табл. 1, 2, где:  $\varepsilon$  - средняя энергия электронов;  $E_r$ ,  $E_x$  – радиальная и осевая компоненты электрического поля. Величины  $E_r$  определялись условием балансировки потоков электронов и ионов на поверхность РК.

Таблица 1  
Параметры плазмы у внешней стенки РК

Расстояние от края РК, мм	1	2	3	4	5	6	7
$E_x$ $E_r$ В/мм	27 2,4	27 3,5	14 4,0	6,8 4,1	2,9 4,1	0,8 4,2	0 4,2
$\varepsilon$ , эВ	41	36	23	13	12	8	8
$Q_i$ , $10^{14}$ шт/с/мм <sup>3</sup>	2,1	2,5	1,8	1,3	0,9	1,0	0,9

Таблица 2  
Параметры плазмы у внутренней стенки РК

Расстояние от края РК, мм	1	2	3	4	5	6	7
$E_x$ $E_r$ В/мм	27 2,5	27 3,6	14 4,1	6,8 4,2	2,9 4,2	0,8 4,3	0 4,3
$\varepsilon$ , эВ	48	36	20	12	10	9	9
$Q_i$ , $10^{14}$ шт/с/мм <sup>3</sup>	2,1	5,0	5,3	3,9	3,0	1,6	0,5

Анализ результатов расчётов показал, что при искусственном условии  $E_r=0$  лишь 55% атомов газа ионизируется и расчётная величина тяги составила 2,6 г, тогда как экспериментальная величина – 4 г при условии  $E_r \neq 0$ .

### 6. Расчёт профиля эрозии разрядной камеры

Для расчёта профиля эрозии стенок РК было определено распределение температуры рабочей поверхности РК на основе баланса потоков энергии частиц из плазмы на поверхность РК и энергии излучаемой со всей поверхности РК (рис. 5). Излучение с поверхности площадью  $S$  при температуре  $T_s$  определялось по известному соотношению Стефана-Больцмана для серого тела  $N_{rad}=S \cdot \varepsilon \cdot T_s^4 \cdot \sigma$ , где коэффициенты  $\varepsilon=0.5$  и  $\sigma=5.6 \cdot 10^{-8}$  Вт/(м<sup>2</sup>·К<sup>4</sup>). Для расчёта температуры  $T_s$  поверхности, которая не контактирует с плазмой, учтена передача тепла  $N_{con}$  к этой

поверхности от стенки, контактирующей с плазмой, с коэффициентом теплопроводности материала РК  $\lambda=0,44$  Вт/(К·м).

Для определения потока энергии  $N_e$ , приносимой электронами с зарядом  $q$  на поверхность РК, учитывая, что электроны преодолевают запирающий слой с перепадом потенциала  $\Delta\phi_w$ , оценивая температуру электронов  $T_e$  по средней энергии электронов  $\varepsilon$  (табл. 1, 2) использовано уравнение  $N_e=n_e \cdot \exp(-\Delta\phi_w/T_e) \cdot (T_e \cdot 2 \cdot q/\pi/m_e)^{1/2}$ . На входе в РК поток  $N_e$  приносит энергию  $\approx 0.1$  Вт/мм<sup>2</sup>.

Зависимость пристеночного перепада потенциала  $\Delta\phi_w$  была определена ранее (рис. 4). Анализируя величины потоков энергии на стенку, можно сделать вывод о том, что более 90 % энергии на поверхность приносят электроны.

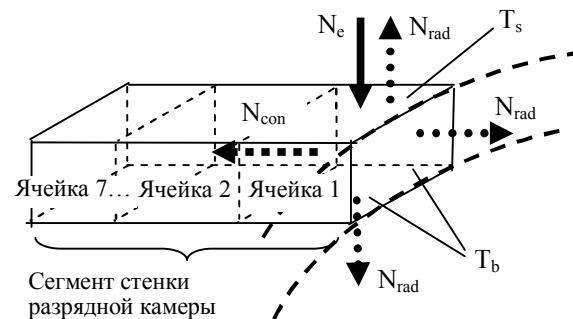


Рис. 5. Баланс потоков энергии через границы условно выделенной ячейки внутренней стенки РК

При проведении расчётов эрозии стенок РК, с помощью ограниченного числа частиц моделировалось движение ионов, рождающихся в разрядной камере с интенсивностью  $Q_i$  (табл. 1, 2), принимая во внимание, что начальная скорость иона равна скорости атома (случайная величина, распределенная в соответствии с Максвелловской функцией), а также учитывая распределение электрического потенциала  $\phi$  (перпендикулярно поверхности РК) в пристеночном слое, определённое по уравнению Пуассона.

Учтена характерная зависимость коэффициента  $Y$  поверхностного распыления материала РК от угла падения иона на поверхность и зависимость коэффициента  $Y$  от энергии иона как это сделано в [2, 3]. При расчёте варьировалась величина радиальной составляющей электрического поля  $E_r$  вне пристеночного слоя. При проведении расчётов полагалось, что интенсивность рождения ионов  $Q_i$  в областях канала, вновь появившихся и увеличивающихся в объёме по мере распыления стенок РК (что увеличивает ширину канала) уменьшается из-за уменьшения концентрации нейтральных частиц в этих областях.

Результаты расчётов – глубина эрозии на различном удалении от края РК на протяжении 1000 часов работы ХД типа М-70 для условий, когда радиальная компонента электрического поля  $E_r$  не

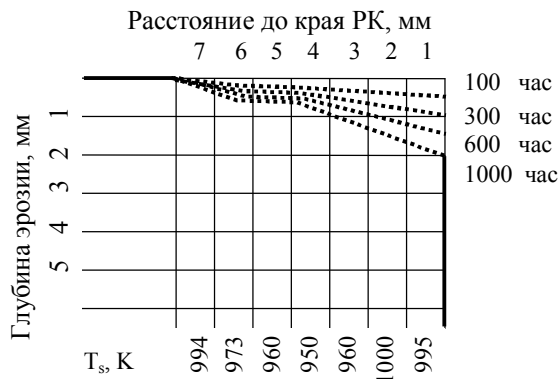


Рис. 6. Изменение профиля внешней стенки РК при температуре поверхности  $T_s$  и радиальной компоненте  $E_r \neq 0$ . Расчетная величина тяги 4,2 г

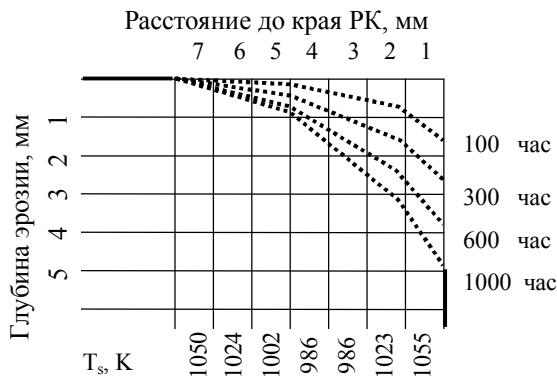


Рис. 7. Изменение профиля внутренней стенки РК при температуре поверхности  $T_s$  и радиальной компоненте  $E_r \neq 0$ . Расчетная величина тяги 4,2 г

## Заключение

Пристеночный запирающий электроны слой может существовать при „сверхкритической„ температуре в 40 эВ и более, при условии, что энергии электронов в функции распределения ограничены величиной  $4T_e$ .

Распределение Дрюестейна, возможно, было бы более точным аналогом действительного распределения частиц по скоростям.

Расчитанная скорость изменения профиля (рис. 6, 7) соответствует с погрешностью до 10 % скорости эрозии камеры двигателя М-100 (из модельного ряда М-70 ... М-290 изготовителя - „Факел“, Россия), который прошёл ресурсные испытания в России и других странах.

Результаты расчёта характеристик двигателя и эрозии РК (рис. 8, 9) при условии, что радиальная

равна нулю и когда  $E_r=0$ , приведены на рис. 6 – 9, на которых также указана рассчитанная температура  $T_s$  поверхности РК.

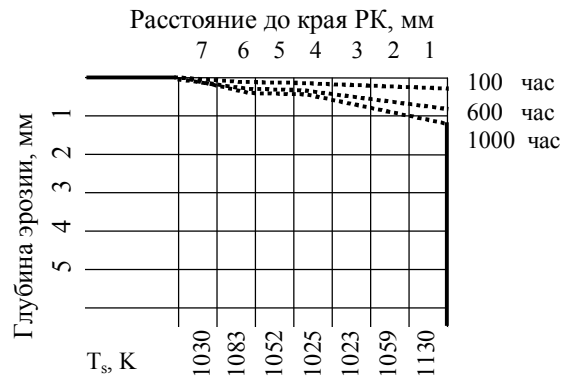


Рис. 8. Изменение профиля внешней стенки РК при температуре поверхности  $T_s$  и радиальной компоненте  $E_r=0$ . Расчетная величина тяги 2,6 г

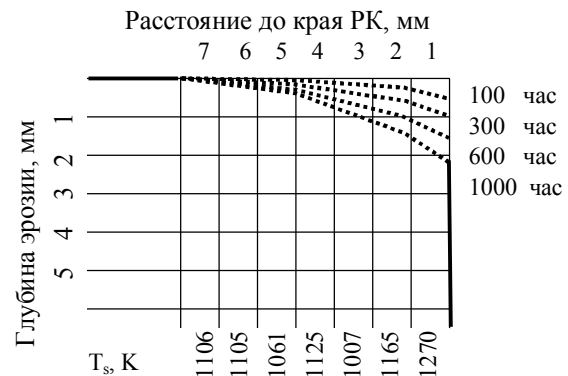


Рис. 9. Изменение профиля внутренней стенки РК при температуре поверхности  $T_s$  и радиальной компоненте  $E_r=0$ . Расчетная величина тяги 2,6 г

компонента объёмного электрического поля близка к нулю ( $E_r \rightarrow 0$ ) и ионы движутся к стенке РК благодаря их хаотической составляющей скорости показали не соответствие экспериментальным данным, но позволили проанализировать гипотетическую ситуацию и сделать следующие выводы. Снижение  $E_r$  не только уменьшает поток ионов на стенку РК, но и ведёт к росту потока электронов на поверхность камеры с последующим их охлаждением и быстрым уходом на анод, что ведёт к росту разрядного тока, уменьшает интенсивность рождения ионов в разрядной камере и снижает тягу.

Дальнейшее совершенствование метода оценки ресурса разрядной камеры ХД планируется путём уточнения распределения электрического потенциала в разрядном промежутке, исследуя закономерности проводимости плазмы в скрещенных электрическом и магнитном полях.

## Литература

1. Makowski K. Influence of the plasma/wall interaction on the operation of Hall thrusters / K. Makowski, S. Barral, Z. Peradzy'nski // Proc. of the 3<sup>rd</sup> Intern. Conf. on Spacecraft Propulsion. – Cannes (France). – 2000. – 12p. (Paper № 2000- 204).

2. Khartov S.A. SPT's high lifetime – some problems of solution / S.A. Khartov, A.B. Nadiradze, Y.V. Zikheeva // Proc. of the 29<sup>th</sup> Int. Electric Propulsion Conf. – Princeton (USA). – 2005. – 9 p. (Paper № 2005-62).

3. Morozov A.I. Fundamentals of Stationary Plasma Thruster Theory / A.I. Morozov, V.V. Savelyev // Reviews of Plasma Physics. – New-York (USA). – 2000. – Vol. 21. – P. 56 - 63.

4. Yim J.T. A Hydrodynamic-Based Erosion Model for Hall Thrusters / J.T. Yim, M. Keidar, I.D. Boyd // Proc. of the 29<sup>th</sup> Int. Electric Propulsion Conf. – Princeton (USA), 2005. – 15 p. (Paper № 2005-13).

5. Linnell J.A. Internal Plasma Structure Measurements of a Hall Thruster Using Xenon and Krypton

Propellant / J.A. Linnell, A.D. Gallimore // Proc. of the 29<sup>th</sup> Int. Electric Propulsion Conf. – Princeton (USA). – 2005. – 17 p. (Paper № 2005-24).

6. Raitses Y. The Dependence of the Electron Temperature on the Discharge Voltage for Different Hall Thruster Configurations / Y. Raitses, A. Smirnov, D. Staack // Proc. of the 29<sup>th</sup> Int. Electric Propulsion Conf. – Princeton (USA), 2005. – 8p. (Paper № 2005-52).

7. A study of some physical processes in the Hall thruster, operated in the discharge voltage up to 1000 V / S. Oghienko, V. Bilokon, A. Oransky, A. Bober // Proc. of the 30<sup>th</sup> Int. Electric Propulsion Conf. – Florence (Italy), 2007. – 16 p. (Paper № 2007-11).

8. Oghienko S. Visualization of the charged particles movement features in conditions, which are characteristic for the Hall Thruster discharge interval / S. Oghienko, Y. Setrakova // Proc. of the 30<sup>th</sup> Int. Electric Propulsion Conf. – Florence (Italy), 2007. – 5p. (Paper № 2007-105).

Поступила в редакцию 25.01.2011

**Рецензент:** д-р техн. наук, профессор, профессор кафедры “Двигатели и энергоустановки летательных аппаратов” А.И. Оранский, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского “ХАИ”, Харьков.

## ДВА ПІДХОДА ДО ВИВЧЕННЯ ПРОЦЕСУ ЕРОЗІЇ РОЗРЯДНОЇ КАМЕРИ ДВИГУНА ХОЛЛА

*С.А. Огієнко*

Вивчається проблема обмеження ресурсу двигуна Холла внаслідок розпилення його розрядної камери іонним струменем. Розраховано зміну профілю поверхні розрядної камери двигуна, розробленого одним з мирових лідерів-виробників фірмою “Факел”, шляхом чисельного двомірного моделювання руху іонів на основі попереднього розрахунку: характерного розподілу електричного потенціалу у розрядній камері та поза неї на базі гідродинамічної одномірної моделі; перепаду потенціалу у пристіночному слої; двомірного розподілу інтенсивності народження іонів у розрядній камері методом частинок. При розрахунку вважалося, що струмінь іонів на стінку розрядної камери формується: або об'ємним дефокусуєчим електричним полем; або внаслідок хаотичної складової швидкості руху іонів.

**Ключові слова:** двигун Холла, ресурс розрядної камери, іонне розпилення, чисельне моделювання.

## TWO APPROACHES TO THE HALL THRUSTER DISCHARGE CHAMBER EROSION PROCESS STUDYING

*S.A. Oghienko*

The problem of Hall thruster resource restriction owing to ion stream sputtering of its discharge chamber is studied. It is calculated the discharge chamber surface profile modification of the thruster, designed by “Fakel” - one of the world leader of manufacturing, by numerical bidirectional modeling of ion movement on the basis of preliminary determining of: characteristic distribution of electric potential in the discharge chamber and outside of it base on the hydrodynamical one-dimensional modeling; potential drop in close to the wall layer; bidimensional distribution of ion origin intensity in the discharge chamber by a method of particles. By calculation it was suppose that the stream of ions to the discharge chamber wall is formed: or by the volumetric defocusing electric field; or owing to chaotic component of ion movement velocity.

**Key words:** Hall thruster, discharge chamber resource, ion sputtering, numerical modeling.

**Огієнко Серей Анатольевич** – канд. техн. наук, старший научн. сотр. кафедры “Двигатели и энергоустановки летательных аппаратов” Национального аэрокосмического университета им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина, e-mail: oghienko@yahoo.com.