

УДК 629.7.036.7

**Н.В. БЛИНОВ, Ю.М. ГОЛОВИН, О.А. ГОРШКОВ, Е.Н. ДЫШЛЮК,  
А.А. ШАГАЙДА***ФГУП “Исследовательский Центр им. М.В. Келдыша”, Россия***СПЕКТРОСКОПИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ СТРУИ ХОЛЛОВСКОГО  
ДВИГАТЕЛЯ С ЦЕЛЬЮ ОПРЕДЕЛЕНИЯ СКОРОСТИ ЭРОЗИИ  
УСКОРИТЕЛЬНОГО КАНАЛА  
В ХОДЕ ДЛИТЕЛЬНЫХ РЕСУРСНЫХ ИСПЫТАНИЙ**

Представлен метод определения скорости эрозии керамического ускорительного канала холловского двигателя в ходе ресурсных испытаний. Проведено сравнение результатов определения скорости эрозии спектроскопическим методом с результатами прямых измерений.

**холловский двигатель, спектроскопия, оптическая диагностика, эрозия, ресурс, корональная модель**

**Введение**

Методы бесконтактной оптической диагностики струи холловского двигателя (ХД) вызывают все больший интерес в последнее время. Одним из направлений оптической диагностики стало исследование эрозии ускорительного канала двигателя.

Эрозия стенки ускорительного канала – основная причина, ограничивающая ресурс холловского двигателя. Этот процесс вызван воздействием высокоэнергетичных ионов струи ХД на материал стенки ускорительного канала.

Определение ресурса ХД чрезвычайно дорогая и трудоёмкая задача. В настоящее время для определения ресурса проводятся длительные испытания. Продолжительность таких испытаний достигает 5 – 10 тысяч часов, а затраты могут быть соизмеримы с затратами на создание самого изделия. Одной из важнейших задач при проведении ресурсных испытаний является определение скорости эрозии ускорительного канала.

Оптическая диагностика – это один из лучших способов, позволяющих оценивать скорость эрозии ускорительного канала непосредственно во время работы двигателя, не влияя на остальные его характеристики. Кроме того, сведения о скорости эрозии

имеют большое значение при выборе оптимального режима работы двигателя. Несмотря на важность таких работ, спектроскопические исследования двигателей с керамическим ускорительным каналом с целью определения скорости эрозии не получили широкого развития.

**1. Постановка задачи**

Цель данной работы – исследование возможности определения скорости эрозии ускорительного канала ХД в ходе ресурсных испытаний.

Существуют два основных типа ХД. В стационарном плазменном двигателе (СПД) используются керамические стенки ускорительного канала (как правило, боросил –  $\text{BNSiO}_2$ ), а в двигателе с анодным слоем (ДАС) – металлические.

Исследования с целью определения скорости эрозии ускорительного канала холловского двигателя проводились в работах [1 – 4]. В работе [1] была показана принципиальная возможность обнаружения линий элементов керамического ускорительного канала ( $\text{VI } 249,68; 249,77 \text{ нм}$ ) в плазменной струе СПД. В работах [2, 3] был представлен метод определения скорости эрозии металлических стенок ускорительного канала ДАС и проведено исследова-

ние скорости распыления в различных режимах работы двигателя. В работе [4] исследовалось распыление ускорительного канала СПД. Недостатком перечисленных выше работ является то, что скорость эрозии, определенная путем спектроскопических измерений, не была сравнена со скоростью эрозии определенной другим независимым методом.

## 2. Метод определения скорости эрозии ускорительного канала холловского двигателя

Интенсивность излучения плазменной струи определяется локальными параметрами разряда (плотность, распределение частиц по энергиям). Интерпретацию интенсивности излучения линий можно проводить только в рамках определенной столкновительно – излучательной модели. В условиях, характерных для холловских двигателей, хорошим приближением является модель коронального равновесия, или иначе – корональная модель [5, 6].

Согласно корональной модели, интенсивность излучения линии при переходе с уровня  $u$  на уровень  $l$  вычисляется по формуле:

$$I_{ul} = \frac{h\nu}{4\pi} \frac{A_{ul}}{\sum_j A_{uj}} n_e n_a Q(\epsilon), \quad (1)$$

где  $h$  – постоянная Планка;

$\nu$  – частота перехода с уровня  $u$  на уровень  $l$ ,

$A_{ul}$  – коэффициент Эйнштейна для спонтанного перехода с уровня  $u$  на уровень  $l$ ;

$n_e, n_a$  – плотности электронов и излучающих атомов соответственно;

$Q(\epsilon) = \langle \sigma_{ex}(\epsilon) v_e \rangle$  – коэффициент скорости возбуждения – эффективное сечение возбуждения уровня, усредненное по функции распределения электронов по скоростям.

Для линий распыленных элементов – линий “маркеров” и линий нейтрального ксенона – “опорных” линий в рамках корональной модели имеем:

$$I_s = C_s \cdot n_e \cdot n_s \cdot Q_s(\epsilon); \quad (2)$$

$$I_{XeI} = C_{XeI} \cdot n_e \cdot n_{XeI} \cdot Q_{XeI}(\epsilon), \quad (3)$$

где индекс  $s$  обозначает распыленные атомы;

$XeI$  – нейтральные атомы ксенона;

$C_s$  и  $C_{XeI}$  – константы.

В отличие от работы [2], где в качестве опорных линий были выбраны линии ионизованного ксенона, в данной работе используются линии нейтрального ксенона. Действительно, в условиях квазинейтральности плазменной струи ХД  $n_i \approx n_e$  и  $I_{XeI} \sim n_e^2$ , осуществлять контроль за плотностью нейтральных частиц –  $n_{XeI}$  проще.

Определив коэффициент газовой эффективности –  $\alpha$  [7] ( $\alpha = m_{ai}/m_a$  – отношение числа атомов, выходящих из двигателя ионизованными, к числу атомов, поступающих в анод), и зная то, как меняется расход рабочего газа в процессе ресурсных испытаний, можно определить изменение плотности атомов нейтральной компоненты рабочего газа

$$n_{XeI} \propto m_a \cdot (1 - \alpha). \quad (4)$$

Предполагая, что плотность распыляемых атомов однородно распределена по выходному сечению двигателя получим:

$$n_s = \frac{R}{v_s \cdot S}, \quad (5)$$

где  $R$  – скорость эрозии – количество распыляемых атомов в единицу времени;

$v_s$  – средняя скорость потока распыляемых атомов на срезе двигателя;

$S$  – площадь ускорительного канала на срезе двигателя.

Предполагая, что средняя скорость потока распыляемых атомов ускорительного канала при небольших изменениях режима работы двигателя меняется не существенно, а  $S$  практически не изменяется, получим:

$$R \propto n_s. \quad (6)$$

Учитывая формулы (2) – (4), (6), получим следующее соотношение для определения скорости эрозии ускорительного канала:

$$R \propto m_a \cdot (1-\alpha) \cdot \frac{I_s}{I_{XeI}} \cdot \frac{Q_{XeI}(\varepsilon)}{Q_s(\varepsilon)} \quad (7)$$

или

$$R = R_n \cdot \frac{m_a \cdot (1-\alpha)}{m_{a_n} \cdot (1-\alpha_n)} \cdot \frac{I_s}{I_{s_n}} \times \frac{I_{XeI_n}}{I_{XeI}} \cdot \frac{Q_{XeI}(\varepsilon)}{Q_{XeI_n}(\varepsilon)} \cdot \frac{Q_{s_n}(\varepsilon)}{Q_s(\varepsilon)}, \quad (8)$$

где индекс  $n$  – означает номинальный режим работы двигателя, скорость эрозии в котором известна.

Коэффициент скорости возбуждения –  $Q(\varepsilon)$  зависит от функции распределения электронов по энергиям.

Для контроля за функцией распределения электронов использовались результаты работы [8], где приводится методика определения температуры электронов в плазменной струе холловских двигателей.

В [8] была смоделирована зависимость отношения интенсивности линии XeI 823,16 нм к интенсивности линии XeI 828,01 от температуры электронов (в предположении о максвелловском распределении электронов).

Это удалось сделать, так как сечения возбуждения этих линий сильно отличаются в диапазоне до 30 эВ.

Изменения температуры электронов в ходе ресурсных испытаний составили менее 0,3 эВ.

В таких малых пределах изменения температуры электронов  $Q(\varepsilon)$  можно считать константой и формула для определения скорости эрозии упрощается:

$$R = R_n \cdot \frac{m_a \cdot (1-\alpha)}{m_{a_n} \cdot (1-\alpha_n)} \cdot \frac{I_s}{I_{s_n}} \cdot \frac{I_{XeI_n}}{I_{XeI}}. \quad (9)$$

Определив скорость эрозии в течение нескольких первых часов работы двигателя (как правило, хватает первых 50 часов) каким-либо прямым методом (измерением профиля ускорительного канала или взвешиванием изолятора), в дальнейшем скорость эрозии можно определять, используя соотношение (9).

### 3. Экспериментальное оборудование

Эксперимент проводился на криогенновакуумной установке КВУ-90, находящейся во ФГУП “Центр Келдыша” (рис. 1). Камера имеет объем 90м<sup>3</sup> (длина 8,3 м, диаметр 4,2 м). Система откачки камеры, состоит из систем предварительной и криогенной откачки. Криогенные насосы позволяют достигать высокой степени и чистоты вакуума (остаточное давление в камере ~ 10<sup>-6</sup> Торр).



Рис.1. Криогенновакуумная установка КВУ-90

Для осуществления оптических измерений и наблюдений за работой двигателя камера оснащена кварцевым окном, благодаря чему удастся проводить измерения в ультрафиолетовой области спектра.

Изображение плазменной струи ХД фокусировалось на входную щель спектрографа NSI-600. Сигнал с CCD линейки поступал на компьютер, где регистрировался с помощью специальной программы обработки данных

### 4. Результаты экспериментов и их анализ

Измерения скорости эрозии спектроскопическим методом были проведены в течение первых 150 ч (начиная с 10 часа работы двигателя) 500 часовых ресурсных испытаний лабораторной модели холлов-

ского двигателя мощностью 900 Вт, выполненных во ФГУП “Центр Келдыша”. Рабочие параметры двигателя (напряжение разряда, ток разряда) в ходе ресурсных испытаний поддерживались на заданном уровне.

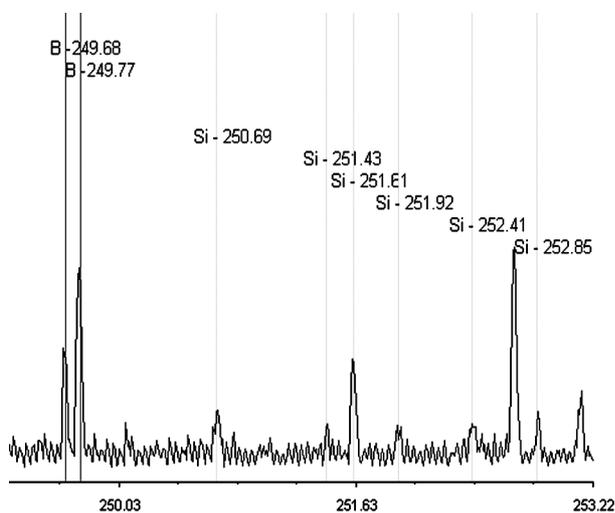


Рис. 2. Спектр излучения струи ХД

В ходе измерений фиксировались интенсивности четырех линий распыляемых веществ (B I 249,68; B I 249,77; Si I 251,61; Si I 288,16 нм), трех линий Хе II (247,55; 248,91; 484,43 нм) и двух линий Хе I (823,16; 828,01 нм). На рис. 2 представлена часть спектра, на которой присутствуют интенсивные линии распыляемых веществ.

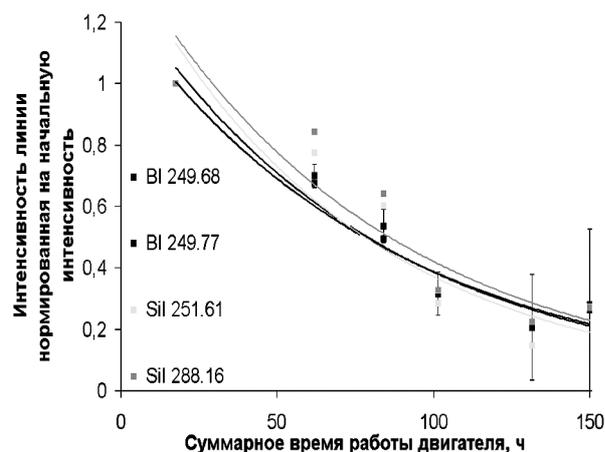


Рис. 3. Интенсивности линий распыляемых веществ в ходе ресурсных испытаний

Результаты измерения интенсивностей линий распыляемых веществ в ходе ресурсных испытаний

представлены на рис. 3. Характер изменения интенсивностей этих линий одинаков и различия укладываются в пределах ошибки измерений. Таким образом, в качестве линии – “маркера” ресурса была выбрана линия, обладающая максимальной интенсивностью (B I 249,77 нм).

Изменения интенсивностей остальных линий в ходе ресурсных испытаний представлены на рис. 4.

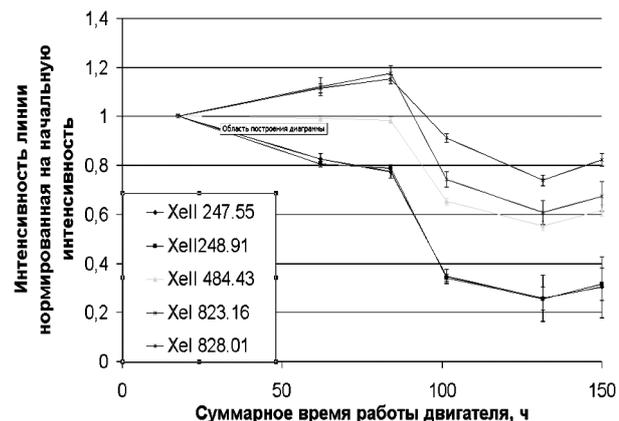


Рис. 4. Изменения интенсивностей линий Хе I и Хе II в ходе длительных ресурсных испытаний

После 100 часов работы двигателя интенсивности всех линий резко упали, что связано со смещением оптической оси системы измерений. Кроме того, изменилось соотношение интенсивностей линий 823/828 нм, что говорит об изменении температуры электронов (другая область у среза двигателя). В соответствии с результатами работы [8], температура изменилась с ~4,4 до ~4,7 эВ. В таких малых пределах изменений температуры, с хорошей точностью можно считать, что коэффициент скорости эрозии не зависит от температуры электронов.

В процессе ресурсных испытаний проверка пропускной способности оптической системы не осуществлялась. Так как пропускающая способность материала, возможно, зависит от длины волны, именно заплытие кварцевого окна могло привести к отличию интенсивностей линий Хе II, находящихся в различных диапазонах спектра (интенсивность линий 247,55 и 248,91 нм упала по сравнению с интенсивностью линии 484,43 нм). Для учета этого

эффекта была введена поправка на интенсивности линий находящихся в ультрафиолетовом диапазоне. Разумеется, эти предположения нуждаются в проверке, которая будет проведена в ближайшее время. На рис. 5 приводятся результаты сравнений скоростей эрозии ускорительного канала ХД, полученные в ходе длительных ресурсных испытаний прямым и оптическим методом.

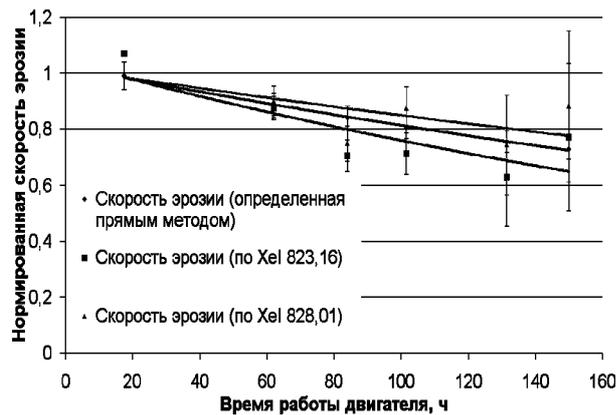


Рис. 5. Сравнение скоростей эрозии ускорительного канала, определенных прямым и оптическим методом

### Заключение

Прямой метод измерения показал, что в течение первых 150 часов работы двигателя скорость эрозии уменьшилась на 30%. Результаты представленной методики определения скорости эрозии ускорительного канала двигателя в ходе ресурсных испытаний согласуются с результатами прямых измерений в пределах погрешности измерений. Дальнейшее развитие данной методики связано, прежде всего, с использованием более точных спектроскопических приборов и контролем за пропускающей способностью оптической системы.

Детальное рассмотрение задачи определения скорости эрозии, применительно к другим задачам, включающим в себя сильные изменения режимов работы двигателя, приводит к необходимости создания более точной (чем корональная модель) столкновительно – излучательной модели и учету различия сечений возбуждения рассматриваемых переходов.

### Литература

1. Minea T.M., Bretagne J., Magne L., Pagnon D., Touzeau M. "Spectroscopic Evidence of the Ceramics Erosion in a Stationary Plasma Thruster". Second European Spacecraft Propulsion Conference, 27-29 May, 1997.
2. Karabadzhak G.F. "Semi-Empirical Method for Evaluation of a Xenon Operating Hall Thruster Erosion Rate Through Analysis of its Emission Spectra". International Conference on Space Propulsion 2000.
3. Karabadzhak G.F. and A.V. Semenkin "Evaluation of a Xenon Operating Hall Thruster Body Erosion Rate Through Analysis of its Optical Spectra". 37<sup>th</sup> Joint Propulsion Conference, 9-11 July 2001 Salt Lake City, Utah AAIA-01-34519.
4. Pagnon D., Lasgorceix P. and Touzeau M. "Control of the Ceramic Erosion by Optical Emission Spectroscopy: Parametric Studies of PPS1350-G and SPT100-ML" 40<sup>th</sup> Joint Propulsion Conference, 11-14 July 2004 Fort Lauderdale, Florida AAIA-2004-3773.
5. Грим Г. Спектроскопия плазмы. – М., 1969.
6. Meezan N.B., Schmidt D.P., Hargus W.A., Cappelli Jr. and M.A. "Optical Study of Anomalous Electron Transport in a Laboratory Hall Thruster". 35<sup>th</sup> Joint Propulsion Conference, 20-24 June 1999 Los-Angeles, CA, AAIA-99-2284.
7. Blinov N.V., Gorshkov O.A., Rizakhanov R.N., Shagayda A.A. "Hall-Effect Thruster with High Specific Impulse". – Proc. 4<sup>th</sup> Intern. Spacecraft Propulsion Conf. Sardinia, Italy, 2-9 June 2004.
8. Karabadzhak G.F., Chiu Y. –H., Williams S. and Dressler R.A. "Hall Thruster Optical Emission Analysis Based on Single Collision Luminescence Spectra". 37<sup>th</sup> Joint Propulsion Conference, 9-11 July 2001 Salt Lake City, Utah AAIA-01-34523.

Поступила в редакцию 31.05.2005

**Рецензент:** д-р техн. наук Ю.М. Кочетков, ФГУП "Исследовательский Центр им. М.В. Келдыша", Москва.