

03;04

## Особенности эрозии изоляторов холловского двигателя при изменении расхода рабочего тела

© А.В. Шмелёв, А.С. Ловцов

ГНЦ ФГУП „Центр Келдыша“, Москва

E-mail: arseniy-sh@yandex.ru

*Поступило в Редакцию 2 декабря 2011 г.*

Представлены результаты спектроскопических исследований влияния изменения расхода рабочего тела на скорость распыления изоляторов разрядной камеры холловского двигателя при постоянном напряжении разряда. Изменение режима работы двигателя осуществлялось за счет изменения расхода ксенона. Также была проведена оптимизация конфигурации магнитного поля по интенсивности излучения спектральной линии распыленных атомов бора. Анализ полученных экспериментальных данных показал, что скорость эрозии разрядной камеры двигателя при оптимизированной конфигурации магнитного поля значительно ниже, чем в экспериментах с неоптимизированным магнитным полем при незначительном изменении интегральных характеристик двигателя. В ходе экспериментов было отмечено, что при оптимальной конфигурации магнитного поля скорость эрозии стенок разрядной камеры двигателя меняется незначительно при изменении расхода ксенона.

Процесс распыления поверхности изоляторов обусловлен бомбардировкой высокоэнергетичных ионов и зависит от многих параметров: топологии электрического и магнитного полей, геометрии разрядного канала, режима работы двигателя, температуры распыляемой и т.д. Учитывая всю сложность и многообразие процессов, протекающих в разрядном канале двигателя и влияющих на скорость эрозии, создание модели, описывающей распыление поверхности стенок изоляторов, является чрезвычайно трудной задачей. В связи с этим для определения скорости эрозии применяются экспериментальные методы.

Спектроскопический метод определения скорости распыления является методом экспресс-диагностики струи холловского двигателя, позволяющим значительно сократить длительность ресурсных испытаний. Использование данного метода также позволяет в режиме реального

времени отслеживать изменения скорости эрозии при проведении ресурсных испытаний.

Для проведения испытаний использовался холловский двигатель с номинальной мощностью 1600 W и напряжением разряда 550 V. Ускоритель имеет гибридную схему разрядного канала, состоящую из металлической анодной камеры и кольцевых керамических колец на выходе из канала. Диаметр средней линии канала составляет 85 mm. В качестве катода-компенсатора использовался полый катод с эмиттером из гексаборида лантана.

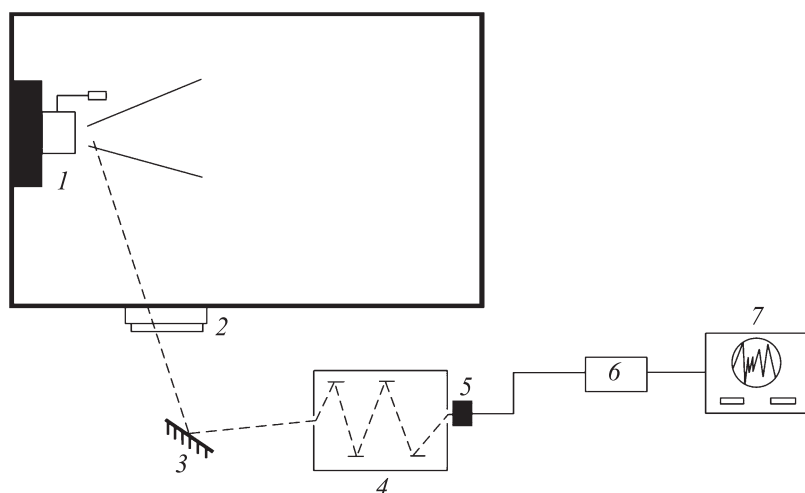
Эксперименты проводились в ГНЦ ФГУП „Центр Келдыша“ на испытательном стенде КВУ-90. Вакуумная камера имеет объем  $90 \text{ m}^3$  (диаметр 3.8 m) и оснащена высокопроизводительной системой криогенной откачки, позволяющей достигать высокой чистоты и степени вакуума (остаточное давление в камере составляет  $\sim 10^{-4} \text{ Pa}$ ). Общая производительность криогенной ступени откачки составляет  $\sim 66 \text{ m}^3/\text{s}$ .

Оптические измерения проводились с помощью монохроматора МДР-23, оснащенного фотоумножителем. Для получения изображения двигателя использовалась длиннофокусная ( $F = 1 \text{ m}$ ) кварцевая линза, установленная непосредственно за кварцевым окном камеры. С помощью оптического алюминиевого зеркала изображение двигателя попадает на входную щель монохроматора, после чего в ФЭУ световой сигнал преобразуется и далее усиливается с помощью усилителя. Полученный сигнал регистрируется осциллографом. На рис. 1 изображена схема экспериментальной установки.

Для определения характера изменения скорости эрозии изоляторов в режиме дросселирования необходимо измерить интенсивности спектральных линий атомарного ксенона и распыленных атомов бора в каждом режиме работы ускорителя [1]. При этом предполагается, что концентрация распыленного материала за срезом двигателя пропорциональна скорости его распыления. Относительные значения концентрации распыленных атомов бора определялись по формуле, полученной в [1]:

$$n_B \propto n_{Xe} \frac{I_B}{I_{Xe}} \left( \frac{Q_{Xe}(f_e) + Q'_{Xe}(U_p) + \frac{p}{\sqrt{2}} Q''_{Xe}(U_d)}{Q_{B(f_e)}} \right), \quad (1)$$

где  $n_B$ ,  $n_{Xe}$  и  $I_B$ ,  $I_{Xe}$  — концентрации интенсивности спектральных линий атомов бора и ксенона соответственно;  $Q_B$ ,  $Q_{Xe}$  — коэффициенты



**Рис. 1.** Схема экспериментальной установки: 1 — холловский двигатель, 2 — кварцевое окно камеры, 3 — алюминиевое зеркало, 4 — монохроматор, 5 — ФЭУ, 6 — усилитель, 7 — осциллограф.

скоростей возбуждения атомов бора и ксенона электронным ударом из основного состояния,  $Q'_{Xe}$ ,  $Q''_{Xe}$  — коэффициенты скоростей возбуждения атомов ксенона одно- и двухзарядными ионами соответственно;  $f_e$  — функция распределения электронов по скоростям,  $U_d$  — напряжение разряда,  $p$  — доля двухзарядных ионов. Как видно из формулы (1), для определения концентрации атомов бора, а следовательно, и скорости распыления необходимо знать концентрацию нейтрального ксенона и температуру электронов в области наблюдения.

В данной работе температура электронов определялась с помощью метода „оптического термометра“ [2,3] по отношению интенсивностей двух линий ксенона 828.01 и 834.68 nm. При вычислении отношения предполагалось максвелловское распределение электронов по скоростям.

Концентрация нейтральных атомов ксенона в области наблюдения определялась как сумма концентраций газа, поступающего из двигателя, и частиц, образующихся в вакуумной камере в результате перезарядки

**Таблица 1.** Рабочие параметры двигателя в экспериментах 1 и 2

Эксперимент 1			Эксперимент 2		
$\dot{m}_a$ , mg/s	$I_d$ , A	$R$ , mN	$\dot{m}_a$ , mg/s	$I_d$ , A	$R$ , mN
2.3	1.94	47.54	2.3	1.92	47.5
2.5	2.12	52.39	2.5	2.10	52.62
2.7	2.32	58.46	2.7	2.29	57.26
2.9	2.53	66.09	3	2.58	67.39
3.1	2.73	71.56	3.29	2.9	75
3.24	2.90	74.12	3.5	3.12	79.8
3.4	3.05	78.28			
3.7	3.38	86.36			

**Таблица 2.** Рабочие параметры двигателя в эксперименте 3

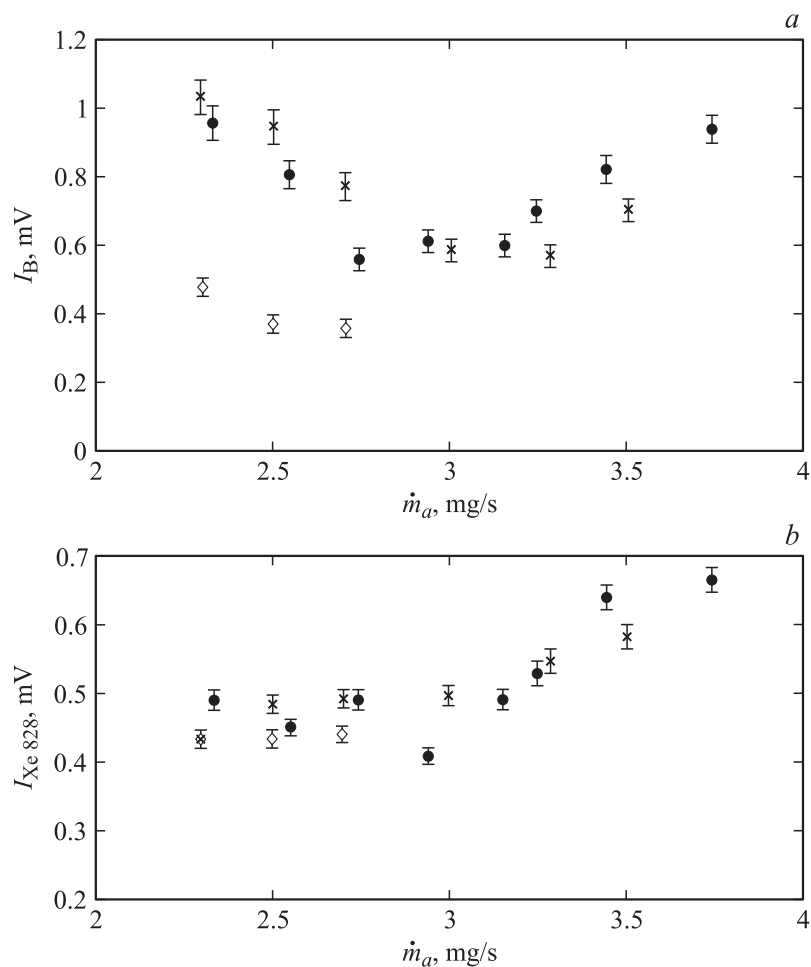
$\dot{m}_a$ , mg/s	$I_d$ , A	$R$ , mN	$I_{ext}$ , A	$I_{int}$ , A
2.3	1.91	44.8	1.5	1.4
2.5	2.07	51	1.45	1.5
2.7	2.26	58.1	1.4	1.6

ионов ксенона на стенках камеры [1]. Концентрация нейтральных атомов, поступающих из двигателя, рассчитывалась с помощью программы GASEL, разработанной в ГИЦ ФГУП „Центр Келдыша“ [4]. Концентрация Xe в области исследования определяется выражением [1]

$$n_{Xe} \propto n_{Xe}^{calc} (1 - \alpha) + n_{Xe}^{meas}, \quad (2)$$

где  $n_{Xe}^{meas}$  — концентрация ксенона в вакуумной камере во время работы двигателя,  $n_{Xe}^{calc}$  — концентрация, рассчитанная с помощью GASEL,  $\alpha$  — коэффициент использования рабочего тела, определяемый по методике, описанной в [5]. Таким образом, формула для определения скорости распыления спектроскопическим методом при постоянном напряжении разряда записывается в виде [1]

$$S \propto (n_{Xe}^{calc} (1 - \alpha) + n_{Xe}^{meas}) \left( \frac{Q_{Xe}(f_e) + Q'_{Xe}(U_d) + \frac{p}{\sqrt{2}} Q''_{Xe}(U_p)}{Q_B(f_e)} \right) \frac{I_B}{I_{Xe}}. \quad (3)$$



**Рис. 2.** Интенсивности атомов бора (а), ксенона (b) и отношение интенсивностей двух линий ксенона (с) в различных режимах работы двигателя: × — эксперимент 1, • — эксперимент 2, ◊ — эксперимент 3.

С целью выявления общей динамики и проверки повторяемости полученных экспериментальных данных, интенсивности атомов бора и ксенона измерялись в двух экспериментах в каждом режиме работы

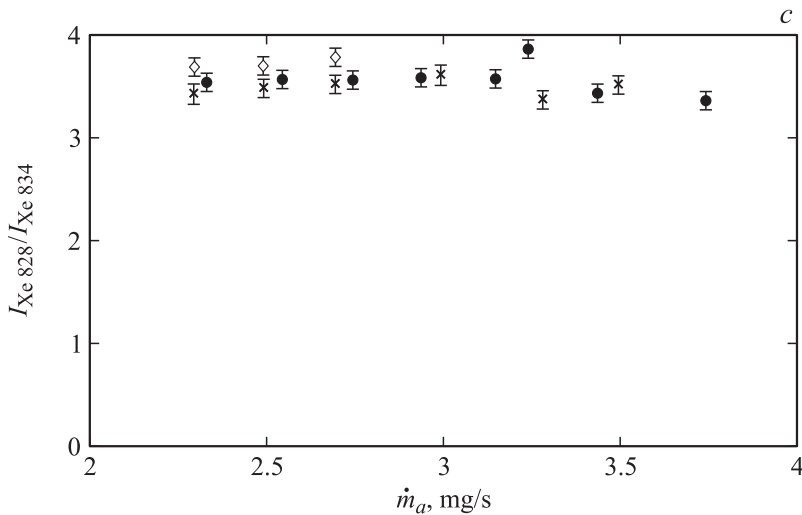
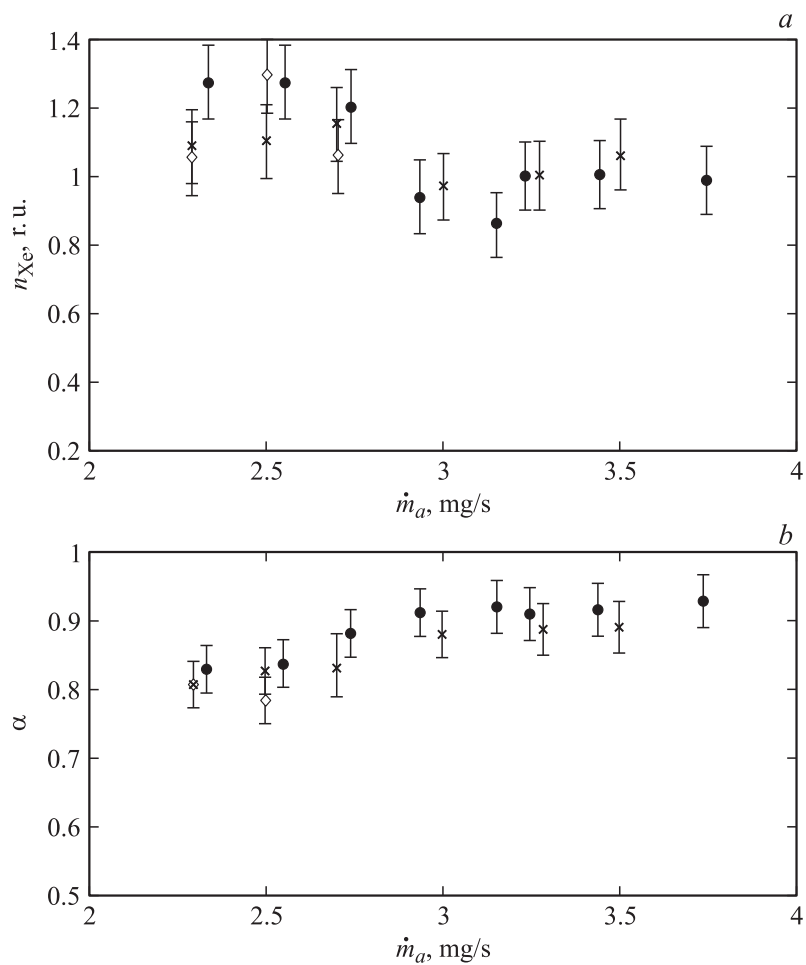


Рис. 2 (продолжение).

двигателя. Изменение режима работы двигателя определялось изменением расхода рабочего газа. Напряжение разряда  $U_d$  не изменялось и оставалось равным 550 В. Величина тока в наружной  $I_{ext}$  и внутренней  $I_{int}$  катушках также оставалась неизменной и равной 1.8 А. В табл. 1 представлены значения рабочих параметров двигателя в каждом эксперименте ( $\dot{m}_a$  — анодный расход ксенона,  $I_d$  — ток разряда,  $R$  — тяга). Магнитные поля соответствовали значениям в „номинальном“ режиме разряда (550 В, 2.9 А).

В третьем эксперименте была проведена оптимизация работы двигателя по интенсивности излучения атомов бора. Варьируя значения тока во внутренней и внешней магнитных катушках, в режиме реального времени выбирался режим с наименьшей интенсивностью излучения атомов бора, соответствующей линии 249.77 нм. При этом значение тока разряда  $I_d$  до и после оптимизации каждого режима практически не изменялось. Напряжение разряда оставалось равным 550 В. В табл. 2 приведены значения параметров двигателя в эксперименте 3.

На рис. 2 представлены зависимости интенсивностей атомов бора, ксенона и отношения интенсивностей двух линий ксенона от расхода газа. Как видно из полученных зависимостей, интенсивность линии бора



**Рис. 3.** Зависимости концентрации нейтрального ксенона (*a*), коэффициента использования рабочего тела (*b*) и скорости эрозии (*c*) от расхода газа: × — эксперимент 1, • — эксперимент 2, ◇ — эксперимент 3.

повышается при снижении расхода газа, а, следовательно, мощности разряда. При оптимизации магнитных полей интенсивность излучения бора при малых значениях расхода значительно ниже интенсивностей, измеренных в экспериментах 1 и 2 при тех же расходах.

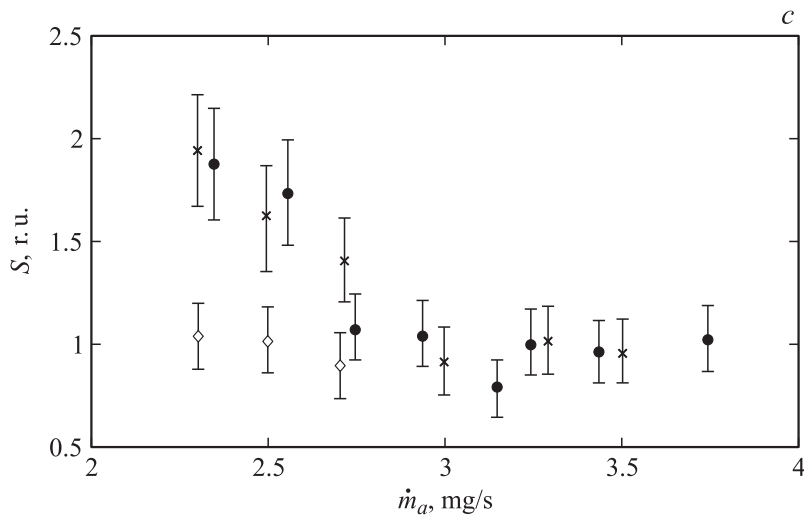


Рис. 3 (продолжение).

Отношение интенсивностей линий ксенона практически не зависит от расхода, т.е. температура электронов остается постоянной при переходе от режима к режиму. Среднее значение температуры составляет  $\sim 7$  eV. Таким образом, при определении относительной скорости эрозии по формуле (3) можно не учитывать изменение коэффициентов скоростей возбуждения в условиях данных экспериментов.

Значения концентрации нейтрального ксенона, коэффициента использования рабочего тела и скорости эрозии в различных режимах работы двигателя приведены на рис. 3. За единицу приняты значения концентрации ксенона и скорости эрозии, соответствующие номинальному режиму работы ( $U_d = 550$  V,  $I_d = 2.9$  A,  $I_{ext} = I_{int} = 1.8$  A). Снижение концентрации нейтральных атомов объясняется повышением эффективности использования рабочего тела при увеличении расхода газа. Анализируя зависимости для всех трех экспериментов, можно отметить хорошую повторяемость полученных данных.

Таким образом, можно сделать вывод о том, что при оптимальных значениях магнитных полей скорость эрозии практически не зависит от расхода газа при постоянном напряжении разряда, т.е. увеличение распыления за счет большего потока ионов на изолятор компенсируется



выдвижением слоя ионизации к срезу двигателя и сокращением бомбардируемой площади. Таким образом, при повышении мощности ресурс двигателя может не изменяться или даже увеличиваться и, наоборот, снижение мощности не означает повышения ресурсных характеристик двигателя. Нужно отметить, что данные результаты получены в ходе экспресс-диагностики и требуют дальнейшего исследования.

## Список литературы

- [1] Горшков О.А., Дышлок Е.Н. // Письма в ЖТФ. 2008. Т. 34. С. 77–84.
- [2] Войцейня В.С., Волошко А.Ю., Коновалов В.Г., Солодовченко С.И. // ЖТФ. 1974. Т. 44. С. 1455–1457.
- [3] Карабаджак Г.Ф. // Космонавтика и ракетостроение. 2004. № 2. С. 85–95.
- [4] Shagayda A.A., Muravlev V.A. // 26<sup>th</sup> International Electric Propulsion Conference. Michigan, 1999. № 162.
- [5] Горшков О.А., Шагайда А.А. // ЖТФ. 2008. Т. 34. С. 37–43.