

## ИССЛЕДОВАНИЯ ОСОБЕННОСТЕЙ ПРОЦЕССА ИОННОЙ ЭРОЗИИ В СТАЦИОНАРНОМ ПЛАЗМЕННОМ ДВИГАТЕЛЕ

Андрей Борисович НАДИРАДЗЕ родился в 1961 г. в городе Москве. Ведущий научный сотрудник МАИ. Доктор технических наук. Основные научные интересы — в области проблем интеграции электроракетных двигателей с космическим аппаратом. Автор более 100 научных работ.

Andrey B. NADIRADZE, D.Sci., was born in 1961, in Moscow. He is a Principal Research Associate at the MAI. His research interests are in the integration of electro-jet thrusters with spacecraft. He has published over 100 technical papers.

Сергей Анатольевич ХАРТОВ родился в 1958 г. в городе Москве. Ведущий научный сотрудник МАИ. Кандидат технических наук, старший научный сотрудник. Основные научные интересы — в области исследования рабочих процессов в электроракетных двигателях и источниках ионов, проблем испытаний источников ионов и плазмы. Автор более 100 научных работ.

Sergey A. KHARTOV, Ph.D., was born in 1958, in Moscow. He is a Principal Research Associate at the MAI. His research interests are in the operation process investigation for electro-jet thrusters and ion sources as well as tests of ion sources and plasma. He has published more than 100 technical papers.

Владимир Владимирович ШАПОШНИКОВ родился в 1957 г. в городе Ленинграде. Старший научный сотрудник МАИ. Основные научные интересы — в области исследования рабочих процессов в электроракетных двигателях. Автор более 100 научных работ.

Vladimir V. SHAPOSHNIKOV, Ph.D., was born in 1957, in Leningrad. He is a Senior Research Associate at the MAI. His research interests are in the operation process investigation for electro-jet thrusters. He has published over 100 technical papers.

*В статье представлены анализ и экспериментальные данные по изучению особенностей ионного распыления поверхности керамической камеры стационарного плазменного двигателя (СПД). По результатам проведенных исследований сделан вывод о том, что основной особенностью ионной эрозии (распыления) керамических материалов в СПД является разогрев поверхности до температуры, при которой наступает экспоненциальный рост коэффициента распыления. Получены данные о селективности механизма распыления, который ведет к уменьшению доли азота в поверхностных слоях. По результатам исследований предложена методика испытаний образцов материалов на стойкость к ионному распылению при испытаниях СПД.*

### Обозначения

СПД — стационарный плазменный двигатель;  
 РОР — резерфордовское обратное рассеяние;  
 $I\tau$  — флуенс ионного потока;  
 $S_m$  — массовый коэффициент распыления;  
 $\Delta m$  — масса распыленного вещества;  
 $S_\alpha$  — относительный коэффициент распыления;  
 $\alpha$  — угол падения ионов на поверхность;  
 $D$  — доза падающих на поверхность ионов.

### Введение

Среди современных тяговых устройств для космических аппаратов наибольшее распространение получил стационарный плазменный двигатель. Данный тип двигателя успешно эксплуатируется в

околосреднем пространстве с 1972 г. и постоянно совершенствуется [1].

В настоящее время для разработчиков СПД актуальной становится проблема создания двигателя с ресурсом более 10—15 тыс. ч. Поскольку ресурс СПД определяется, в основном, скоростью износа керамических стенок разрядной камеры, то одним из очевидных способов решения проблемы является использование материалов с малым коэффициентом распыления. Наиболее оптимальные характеристики СПД были получены при использовании керамики на основе нитрида бора. При этом наивысшей стойкостью к ионному распылению обладает чистый нитрид бора [2], однако данный материал обладает низкой конструкционной прочностью. Поэтому в СПД нашли применение керамические композиции из нитрида бора и оксида кремния

(типа БОРОСИЛ, БГП-10). В настоящее время продемонстрированный ресурс 1,35 кВт модели СПД с изолятором из такой керамики достиг 10000 ч [3]. Однако прогноз его существенного увеличения весьма пессимистичен. Возможность дальнейшего повышения ресурса (при сохранении конструкции двигателя) разработчики СПД связывают только с поиском новых керамических материалов, имеющих большую стойкость к ионному распылению в специфических условиях рабочего процесса в СПД.

Одной из первоочередных проблем, которую необходимо решить для выбора новых керамик для СПД, является проведение испытаний этих материалов для определения их стойкости при ионной бомбардировке. Существующие методики определения коэффициентов распыления керамических материалов дают существенно заниженные его значения [2, 4]. С точки зрения чистоты эксперимента испытание керамик непосредственно в канале СПД является наиболее оптимальным. Однако такое решение требует больших затрат времени и средств. В связи с этим целесообразно разработать методику и проводить испытания керамических образцов в условиях, наиболее приближенных к реальным условиям эксплуатации в двигателе.

Прежде чем перейти к разработке такой методики, необходимо уточнить особенности ионного распыления в условиях рабочего процесса в СПД.

### Анализ особенности процесса распыления керамик в СПД

Основным процессом, определяющим износ керамической разрядной камеры и, соответственно, ресурс СПД является взаимодействие ускоренных ионов со стенками камеры, приводящее к их распылению.

Характер протекания этого процесса зависит от энергии, угла падения и флуенса ионов, приходящих на поверхность. Для количественного описания процесса распыления керамик используется

массовый коэффициент распыления ( $S_m = \Delta m / I \tau$ )

[2]. Атомный коэффициент распыления [4], применяемый для чистых соединений, используется гораздо реже из-за большой неопределенности состава и, соответственно, среднего атомного веса керамик (для большинства керамик имеется лишь качественная информация об их составе). Коэффициенты распыления определяются экспериментально.

Исследования показывают, что коэффициенты распыления различных типов керамических материалов, применявшихся в СПД, практически линейно зависят от энергии падающих ионов (рис. 1) [2]. При этом отмечается большой разброс

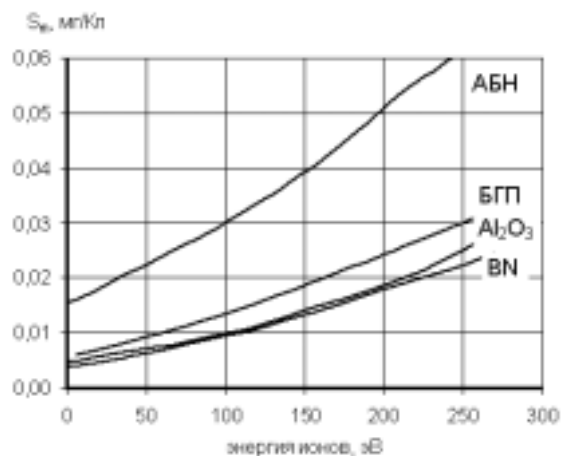


Рис. 1. Зависимости коэффициентов распыления от энергии ионов  $\text{Xe}^+$  для различных керамик, применяемых в СПД

экспериментальных данных по скорости распыления (до 50–70%) для различных образцов одного и того же материала. Кроме того, наблюдается заметное изменение коэффициента распыления в начальный период (период приработки). Для ряда керамик происходит снижение коэффициента распыления по сравнению с начальным значением (рис. 2). Стабилизация наступает при достижении дозы падающих ионов  $D = (1 + 2) \cdot 10^{-2}$  Кл/м<sup>2</sup>. Изменения коэффициента распыления в начальный период объясняются, по-видимому, тем, что в это время уносится поверхностный слой, поврежденный в процессе обработки образца.

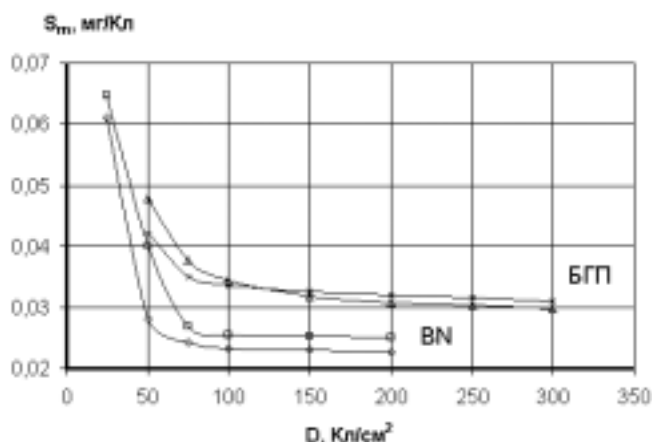


Рис. 2. Зависимость коэффициентов распыления от дозы облучения для разных материалов

Зависимость коэффициента распыления от угла падения ионов характеризуется относительным коэффициентом распыления  $S_\alpha = S_m(\alpha) / S_m(\alpha=0)$ .

Для большинства керамик максимум  $S_\alpha$  лежит в диапазоне углов падения ионов  $\alpha = 50 \div 60^\circ$ . В диа-

пазоне энергий 200—400 эВ положение данного максимума можно считать постоянным (рис. 3) [2].

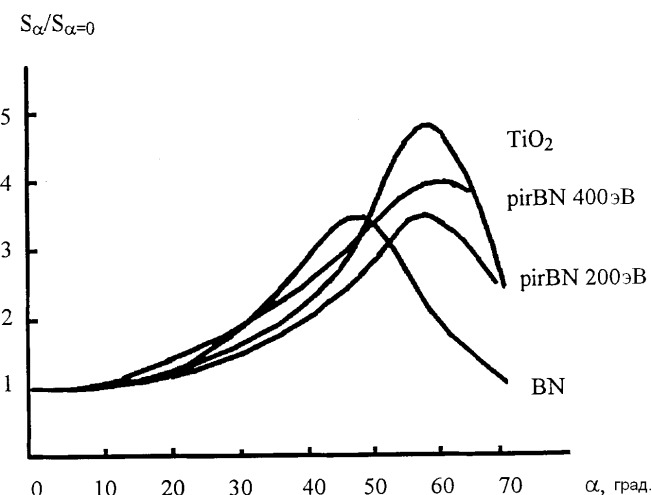
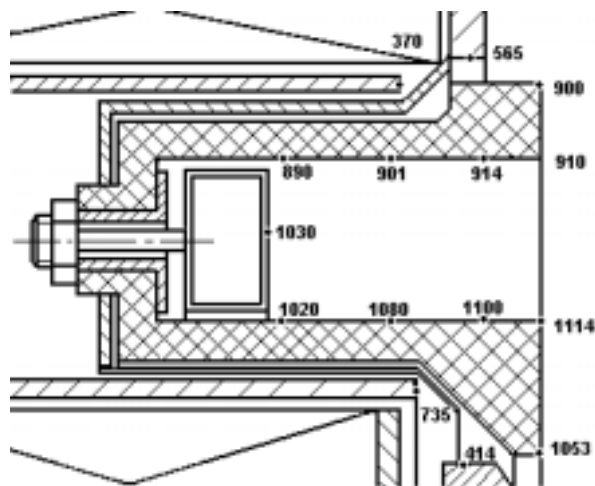


Рис. 3. Угловая зависимость коэффициента распыления для различных керамик

При описании процесса распыления в СПД обычно базируются лишь на зависимости процесса распыления от потока ионов на поверхность и их энергии [5]. В действительности же процесс распыления материалов более сложен и сильно зависит от температуры поверхности. На рабочих режимах в СПД температурный режим кромок разрядной камеры, подвергающихся ионному распылению, как показали исследования авторов [6], достаточно напряженный (рис. 4; значения температуры на рис. 4 представлены в К). Принимая во внимание низкую теплопроводность керамических материалов, можно ожидать повышения температуры поверхности в зонах распыления до критических значений, при которых наступает экспоненциальное увеличение распыления [7]. Это и было экспериментально зафиксировано в работе [8], выполненной по инициативе авторов в МАИ для керамики БГП-10 (рис. 5). К сожалению, отсутствие данных по распылению других керамических материалов при повышенных температурах, а также трудности с измерением параметров ионных потоков на стенки и температуры на работающем двигателе не позволяют прогнозировать процесс распыления расчетным путем, и требуется экспериментальное подтверждение.

Вторым фактором, который существенно затрудняет прогнозирование процесса распыления керамик в СПД, является так называемое электронно-стимулированное распыление [9, 10]. Это явление вызывается флуктуациями в движении электронного облака в разрядной камере СПД, которые приводят к локальному изменению электрического поля в районе отдельных частей стенок канала.



а)



б)

Рис. 4. Результаты моделирования теплового состояния элементов СПД на стационарном режиме (а) и экспериментальное измерение поля температур в стенках разрядной камеры (б)

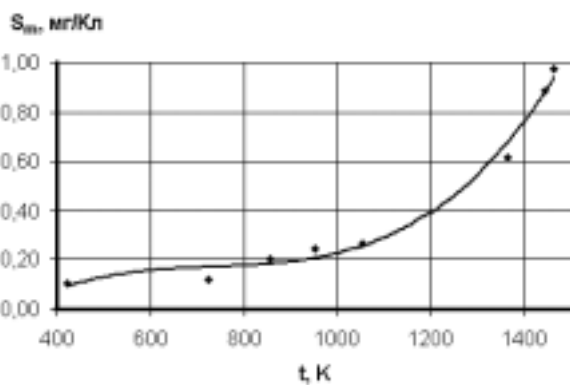


Рис. 5. Зависимость коэффициента распыления керамики БГП-10 от температуры (облучение ионами  $\text{Xe}^+$  с энергией 300 эВ)

В результате этого, очевидно, происходит доускорение ионов в этих областях и локальное увеличение эрозии [10]. Кроме того, флуктуации электрического поля приводят к выпадению электронов на стенки с энергией, существенно большей средней энергии электронов в канале. Последнее явление способствует «расшатыванию» атомов в материале стенки и, как следствие, увеличению коэффициента распыления. К сожалению, на сегодняшний момент данное явление является слабоизученным и не поддается количественной оценке.

## Экспериментальное исследование распыления стенок разрядной камеры СПД

### Описание эксперимента

Целью проведенного авторами эксперимента являлось выявление отличительных особенностей протекания процесса распыления керамики при работе двигателя. Для этого определялись скорость распыления и динамика изменения профиля эрозии и элементного состава поверхностного слоя керамики после облучения в двигателе.

Эксперимент проводился в вакуумной камере объемом 2,5 м<sup>3</sup>. Откачка камеры осуществлялась двумя турбомолекулярными насосами вертикального типа ВМН-2500. Насосы были снабжены азотными ловушками для полного предотвращения попадания паров масла в вакуумную камеру. В эксперименте использовался стационарный плазменный двигатель типа СПД-70 (мощностью 660 Вт). Разрядная камера двигателя была изготовлена из керамики типа БГП-10. Двигатель работал на ксеноне в номинальном режиме при разрядном токе 2,2 А и ускоряющем напряжении 300 В. Полное время работы СПД в ходе данного эксперимента составило 44 часа. Давление в вакуумной камере при работающем двигателе не превышало  $7 \cdot 10^{-5}$  мм рт. ст.

В силу невозможности непрерывного контроля параметров поверхности в процессе работы СПД все время работы было разбито на четыре приблизительно равных по времени цикла. Измерение параметров производилось в промежутках между запусками. Анализ элементного состава производился методом резерфордовского обратного рассеяния. Из-за специфики проведения измерений данным методом (было возможно исследование только образцов небольшого размера) анализ целого изолятора был затруднен. Поэтому разрядная камера СПД была доработана. Во внутренней стенке камеры были выполнены четыре диаметрально расположенных паза, в которые были вмонтированы вставки из того же материала (рис. 6, а). Для предотвращения возникновения паразитных электрических разрядов вставкам и пазам была придана трапецевидная форма. Фиксация вставок в пазах дополнительно осуществлялась подпружиненным разрезным кольцом из вольфрамовой проволоки. Количество и расположение вставок (рис. 6, б) было обусловлено желанием сохранить симметрию струи и необходимостью получения дополнительного статистического материала.

Технология проведения эксперимента заключалась в следующем: до первого запуска были проведены анализ элементного состава материала поверхности вставок, измерение их профиля и взвешивание

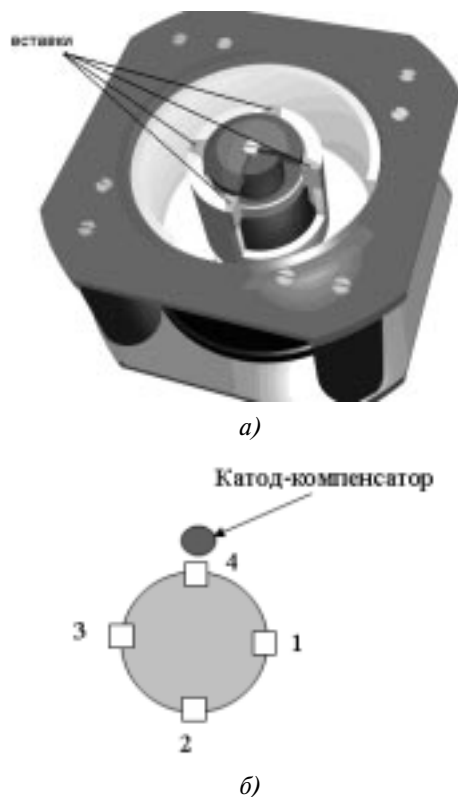


Рис. 6. Расположение вставок на стенках разрядной камеры (а) и их положение относительно катода-компенсатора (б)

вание, после чего вставки устанавливались на свои места и производился запуск двигателя. По окончании цикла наработки вставки вынимались, производилось измерение их профиля и взвешивание. Анализ элементного состава поверхности вставок осуществлялся на каждом цикле поочередно для одного образца. Затем вставки снова устанавливались на свои места и проводился следующий цикл работы СПД. Всего было проведено 4 таких цикла продолжительностью 8–12 ч.

Для контроля стабильности работы СПД в ходе эксперимента измерялись значения разрядного тока, разрядного напряжения и ионного тока струи. Измерения проводились с периодичностью ~2 ч. Контроль ионного тока осуществлялся многосеточным зондом. На время измерений зонд вводился в приосевую зону струи на расстоянии 0,45 м от среза. Результаты измерений параметров двигателя следующие: средние значения разрядного тока и напряжения источника плазмы составляли соответственно 2,2А и 300В с отклонением не более 5 %; при этом ток, регистрируемый многосеточным зондом, колебался от 0,901 до 0,09 мА.

### Результаты измерения профиля эрозии и взвешивания образцов

Измерения профиля эрозии проводилось на универсальном оптическом микроскопе УИМ-21

бесконтактным методом. Измеряемый образец прижимался тыльной (нерабочей) стороной к базовой плоскости плитки Иогансона, установленной на каретке универсального микроскопа. Для минимизации погрешности, возникающей при установке образцов в разных сериях измерений, плитка Иогансона была неподвижно закреплена на каретке рабочего стола микроскопа. До начала измерений проекция базовой плоскости совмещалась с линиями штриховой сетки микроскопа. За начальную точку отсчета принималась крайняя дальняя (относительно среза разрядной камеры) точка на образующей цилиндра образца. Затем с помощью каретки образец перемещался вдоль относительно измерительной станины с шагом от 0,5 мм до 0,1 мм и снимались величины ординат образующей образца относительно базовой поверхности. При этом предполагалось, что тыльная (нерабочая) сторона и начальная точка на наружной (рабочей) поверхности образца не были подвержены процессу эрозии. При такой методике и линейных размерах образцов до 30 мм, согласно руководящему документу РД50-98-86, суммарная погрешность измерений на микроскопах серии УИМ с учетом всех факторов составляет ~3 мкм. Результаты измерений профилей поверхности образца по времени работы двигателя представлены на рис. 7 (типичные для всех четырех вставок).

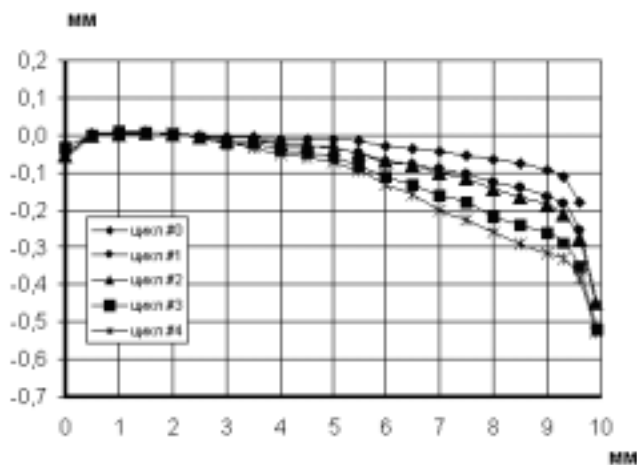


Рис. 7. Динамика изменения профиля поверхности вставки при испытаниях

Параллельно с измерениями профилей образцов до включения и после каждого цикла работы СПД проводилось измерение их массы. Взвешивание осуществлялось на механических рычажных весах, обеспечивающих определение массы в диапазоне 0—200 г с точностью  $\pm 1$  мг. На рис. 8 представлена динамика уменьшения массы образцов по времени работы двигателя. Достаточная линейность приведенных зависимостей свидетельствует об от-

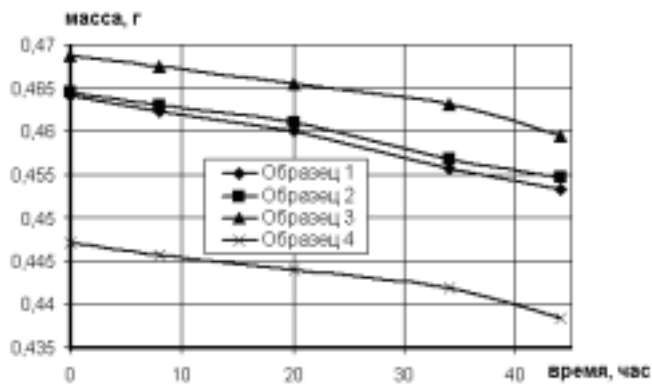


Рис. 8. Изменение массы вставок по времени испытаний

носителем постоянстве скорости эрозии образцов.

Полученные в ходе данного исследования результаты по определению коэффициента распыления хорошо совпадают с данными исследования распыления образцов при их разогреве, представленными в работе [8].

#### Измерения элементного состава керамического изолятора

Для получения данных о характере изменения элементного состава была выбрана точка вставок, расположенная на внешней образующей на расстоянии 1 мм от среза разрядной камеры. Аналитическая диагностика образца выполнялась методом резерфордовского обратного рассеяния ионов  $He^+$  и  $H^+$ , позволяющим определять абсолютное содержание атомов в структурах. Измерения проводились в камере РОР КИ ионопучкового комплекса ИПТМ РАН. Спектры РОР регистрировались в стандартной двухдетекторной схеме измерений с углами рассеяния  $\nu_1=160^\circ$ ,  $\nu_2=120^\circ$  при  $E_0 = 1$  МэВ [11]. Обработка спектров РОР выполнялась с помощью аппроксимирующей интерактивной программы RUMP [12].

Результаты обработки спектров приведены в таблице. Из этих данных следует, что материал исходного изолятора представляет собой систему **C-B-N-Si-O-Sr**. После испытаний в двигателе в поверхностном слое появляются малые примеси Хе, которые, по-видимому, являются следствием диффузии рабочего тела в пористую структуру изолятора. Соотношение элементов по глубине материала представлено на рис. 9. На рис. 10 показаны временные зависимости изменения содержания **C**, **B**, **N**, **O** в поверхностных слоях керамики (в слое толщиной 400—900 Å).

Данное исследование продемонстрировало наличие явления селективного распыления компонен-

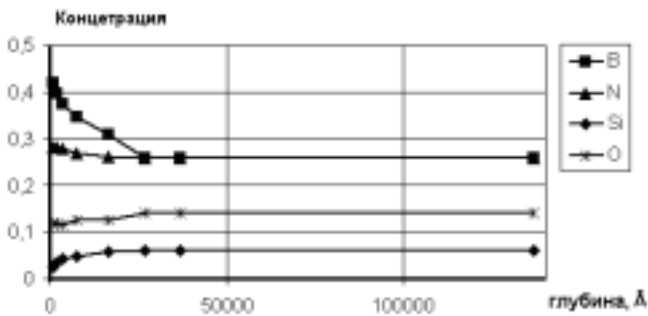


Рис. 9. Изменение концентрации атомов основных элементов по глубине материала

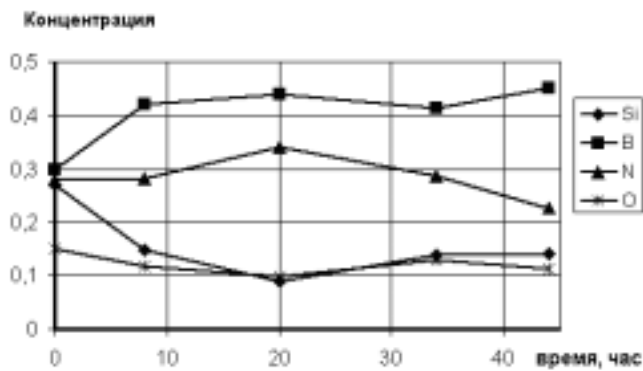


Рис. 10. Изменение концентрации атомов основных элементов в поверхностных слоях по времени испытаний

тов керамического материала. В частности, это хорошо видно на примере нитрида бора. В результате анализа элементного состава по времени заметно уменьшение доли азота в поверхностном слое и, соответственно, увеличение бора (рис.10).

### Методика проведения испытаний образцов материалов на стойкость к ионному распылению при проведении испытаний СПД

На основании проведенного анализа и экспериментальных исследований для качественной оценки стойкости к ионному распылению того или иного керамического материала можно рекомендовать следующую упрощенную методику испытаний.

Образцы исследуемых материалов закрепляются в кассету с каркасом из труднораспыляемого материала (керамика, молибден), которая располагается на удалении от двигателя под углом к оси потока. Угол наклона образцов выбирается с учетом среднего значения угла взаимодействия ионов с поверхностью стенок разрядной камеры СПД. Для определения параметров плазмы (плотности тока и энергии ионов) в зоне расположения образцов необходимо предварительно провести измерения с помощью многосеточных зондов или смонтировать многосеточный зонд на кассете с образцами и про-

водить измерения в ходе эксперимента. Для выполнения условия динамической чистоты исследуемой поверхности образцов (адсорбция остаточных газов в вакуумной камере) необходимо получать плотности ионного тока на их поверхности на уровне 150—300 А/м<sup>2</sup> [2].

Значения коэффициентов распыления целесообразно определять либо весовым методом как  $S_m = \Delta m / (I_i t)$  мг/Кл (где  $\Delta m$  — потеря массы мишени за время эксперимента  $t$ ,  $I_i$  — средний за время  $t$  ионный ток на поверхность мишени), либо, если известен состав и плотность материала, измерением толщины унесенного слоя с помощью, например, профилографа.

Для учета влияния теплового фактора на процесс распыления кассета с образцами должна быть снабжена системой подогрева (простейший случай — вольфрамовой спиралью) и датчиком температуры.

При использовании весового метода необходимо предварительно определить возможные потери массы, не связанные с механизмом ионного распыления (термодесорбция, испарение и т.д.) Величина таких потерь может оказаться весьма значительной, особенно при температурах свыше 1000 К, и вполне соизмеримой с потерями массы в результате ионного распыления [8]. Поэтому, прежде чем исследовать процессы распыления, необходимо провести серию экспериментов по прогреву образцов без облучения их поверхности ионным потоком.

Особый вопрос вызывает уровень температуры, которую в ходе эксперимента должна приобретать поверхность образца. Проблема заключается в том, что дополнительный разогрев осуществляется со стороны, противоположной ионному потоку, и расчет температуры поверхности на противоположной стороне образца затруднен ввиду того, что для большинства перспективных керамик коэффициент теплопроводности определен с недостаточной точностью либо вообще не известен. Помимо этого необходимо учитывать и нагрев от падающих ионов, который, ввиду неопределенности коэффициента аккомодации, также не поддается точному расчету. Все это не позволяет точно определить температуру поверхности. Выходом из этой ситуации может стать использование в ходе эксперимента образцов материалов, для которых определены перечисленные выше параметры с достаточной точностью. Тогда, контролируя унос массы такого образца-свидетеля, можно однозначно прогнозировать условия распыления основных исследуемых материалов.

Итак, требования к образцу-свидетелю таковы: мы должны достоверно знать все его характеристики распыления — по энергиям, углу и, главное, по

Перед экспериментом									
Толщина слоя, Å	100000	Толщина слоя определялась по правилу Берга [11]							
C	0.2700								
B	0.3000								
N	0.2800								
Si	0.0600								
O	0.1500								
Sr	0.0100								
Цикл 1 (8 часов)									
Толщина слоя, Å	600	1600	3400	7400	16400	26400	136400		
C	0.1500	0.1700	0.1900	0.2100	0.2500	2.8000	2.8000		
B	0.4300	0.4100	0.3900	0.3600	0.3200	2.6000	2.6000		
N	0.2900	0.2900	0.2900	0.2800	0.2700	2.6000	2.6000		
Si	0.0250	0.0350	0.0450	0.0500	0.0600	0.0600	0.0600		
O	0.1200	0.1200	0.1200	0.1300	0.1300	1.4000	1.4000		
Sr	0.0030	0.0030	0.0030	0.0030	0.0030	0.0150	0.0100		
He	0.0500	0.0300	0.0100	-	-	-	-		
Цикл 2 (12 часов)									
Толщина слоя, Å	600	1600	3400	7400	10400	16400	21400	36400	136400
C	0.9E-1	0.1000	0.1500	2.0000	0.2500	0.2600	2.7000	2.8000	0.2800
B	0.4500	0.4500	0.4500	3.6000	0.3200	0.3100	2.8000	2.6000	0.2500
N	0.3500	0.3400	0.2700	2.7000	0.2700	0.2700	2.6000	2.5000	0.2500
Si	0.0250	0.0350	0.0450	0.5000	0.0600	0.0600	0.6000	0.6000	0.0600
O	0.1000	0.1000	0.1200	1.3000	0.1300	0.1300	1.4000	1.5000	0.1600
Sr	0.0050	0.0050	0.0050	0.0045	0.0040	0.0030	0.0015	0.0010	0.0010
He	0.0060	0.0030	0.0010	-	-	-	-	-	-
Цикл 3 (14 часов)									
Толщина слоя, Å	600	1600	3400	7400	16400	20900	32900	46900	146900
C	0.1400	0.1600	1.7000	0.1900	0.2100	2.1000	2.4000	2.6000	0.2800
B	0.4200	0.4000	3.9000	0.3500	0.3700	3.7000	3.1000	2.8000	0.2500
N	0.2900	0.2900	2.9000	0.2700	0.2500	2.5000	2.5000	2.5000	0.2500
Si	0.0250	0.0350	0.0420	0.0450	0.0600	0.0600	0.0600	0.0600	0.0600
O	0.1300	0.1300	1.4000	0.1400	0.1400	1.4000	1.4000	1.5000	0.1600
Sr	0.0040	0.0040	0.0400	0.0040	0.0040	0.0025	0.0012	0.0010	0.0010
He	0.0040	0.0030	0.0050	-	-	-	-	-	-
Цикл 4 (10 часов)									
Толщина слоя, Å	800	1600	3400	9400	18400	24400	32400	46400	146400
C	6.2000	1.0000	1.3000	1.6000	1.8000	2.1000	2.4000	2.6000	0.2800
B	2.0000	4.7000	4.4000	3.8000	3.6000	3.5000	3.1000	2.8000	0.2500
N	1.0000	2.8000	2.8000	2.7000	2.7000	2.7000	2.5000	2.5000	0.2500
Si	0.2500	0.3500	0.4000	0.4200	0.4700	0.5300	0.5700	0.6000	0.0600
O	0.5000	1.3000	1.4000	1.4000	1.4000	1.4000	1.4000	1.5000	0.1600
Sr	0.0030	0.0030	0.0030	0.0030	0.0025	0.0015	0.0010	0.0100	0.0010
He	0.0330	0.0190	0.0120	-	-	-	-	-	-

температуре. Кроме того, должен быть известен состав и он должен иметь набор определенных с высокой точностью теплофизических свойств.

Исходя из опубликованных в литературе данных [4], на роль образцов-свидетелей могут претендовать молибден или медь. Предпочтительнее использовать молибден, поскольку его коэффициент распыления существенно ниже, чем коэффициент распыления меди, что позволит избежать (или, во всяком случае, существенно снизить) загрязнения двигателя обратными потоками распыленного вещества. Однако для молибдена зависимость коэффициента распыления от температуры практически отсутствует до 2000 К. Исходя из этого, можно рекомендовать для данных экспериментов только медь. Желательно использовать наиболее чистые сплавы, например электротехническую медь марки М1.

Состав оборудования для проведения экспериментов должен включать, помимо многосеточного зонда для измерения параметров плазмы, аналитические или электронные весы с точностью измерения  $\pm 0,05$ – $0,1$  мг, психрометр для контроля влажности при извлечении образцов из вакуумной камеры и их взвешивании.

Предлагается следующая процедура проведения испытаний. Проводятся измерения параметров ионного потока в зоне расположения кассеты с образцами. Рассчитываются ожидаемые уносы массы образцов. Проводятся циклические разогревы образцов в вакууме без ионного потока для оценки уменьшения массы образцов из-за разогрева (условия прогрева и выдержки см. выше). После каждого прогрева образцы взвешиваются. Цикл этих испытаний проводят до того момента, пока уменьшение массы не становится на порядок меньше ожидаемого в результате ионного распыления. В завершающей стадии экспериментов снимают также зависимость изменения массы от влажности окружающего воздуха. Данная зависимость позволит оценить влияние сорбционных эффектов при дальнейших взвешиваниях. Проводится расчет температуры на поверхности образца-свидетеля с использованием стандартных методик тепловых расчетов (для оценки вклада ионного потока коэффициент аккомодации выбирается равным 1). По результатам расчетов выбираются параметры нагревателя. В ходе испытаний температуру поверхности контролируют с помощью термопары, закрепленной на образце-свидетеле (в ходе измерений необходимо вводить поправку с учетом места расположения термопары). Минимальное время испытаний с ионным распылением выбирают с учетом дозовой зависимости (см. рис. 5).

## Выводы

По результатам проведенных исследований можно констатировать, что основной особенностью ионной эрозии (распыления) керамических материалов в СПД является разогрев поверхности до температуры, при которой наступает экспоненциальный рост коэффициента распыления. Получены данные о селективности механизма распыления, которая ведет к уменьшению доли азота в поверхностных слоях. В результате этого возможно нарушение диэлектрических свойств поверхности. Это явление необходимо учитывать при анализе стабильности работы двигателя при длительных испытаниях. По результатам исследований предложена методика испытаний образцов материалов на стойкость к ионному распылению при испытаниях СПД, которая позволит получать достоверные данные при существенной экономии временных и материальных затрат.

## Summary

An analysis and experimental data are presented to reveal ionic sputtering features of ceramic chamber surfaces for a stationary plasma thruster (SPT). An important conclusion is made according to the obtained results. Namely, the main feature of ionic erosion (sputtering) of ceramic materials used in the SPT is some surface heating up to a temperature under which an exponential growth comes for the sputtering coefficient. Data about selectivity of the sputtering mechanism are obtained too. This mechanism causes decreasing of nitrogen percentage in the SPT chamber surface layers. A procedure is suggested to test ionic sputtering tolerance of material samples during the SPT trials.

## Библиографический список

1. Козубский К.Н., Мурашко В.М., Рылов Ю.П., Трифонов Ю.В. и др. СПД работают в космосе // Физика плазмы. Т. 29. Вып. 3. 2003. С. 277–292.
2. Семенов А.А., Шкарбан И.И. Распыление потоками ионов поверхностей элементов конструкции ионно-плазменных источников // Ракетно-космическая техника // Научно-технический сборник. Выпуск 3(131): Ракетные двигатели и энергетические установки. М.: НИИТП, Центр научно-технической информации «Поиск», 1991. С.42–53.
3. Frederic Marchandise, Nicolas Cornu, Frank Darnon, Denis Estublier. PPS(r)1350-G qualification status 10500 h. (Состояние квалификации двигателя PPS(r)1350-G после 10500 часовых испытаний). — IERC-2007-164// Доклад на 30-й Международной конференции по электроракетным двигателям. — (The 30th International Electric Propulsion Conference, Florence, Italy, September 17–20, 2007).



4. Проблемы прикладной физики. Распыление твердых тел ионной бомбардировкой. Физическое распыление одноэлементных твердых тел / Под ред. Р. Бериша; Пер. с англ. под ред. В.А. Молчанова. — М.: Мир, 1984.

5. Латышев Л.А., Соколовров А.П., Хартов С.А., Чуян Р.К. Поэтапная методика испытаний ускорителей с замкнутым дрейфом электронов // Ракетно-космическая техника, научно-технический сборник. Выпуск 3(131): Ракетные двигатели и энергетические установки. М.: НИИТП, Центр научно-технической информации «Поиск», 1991. С. 71-78.

6. *D.Valentian, S.Khartov et.al.* The investigation of the temperature field in the SPT structure elements (Исследование температурного поля в элементах конструкции СПД). — IERC-95-174// Доклад на 24-й Международной конференции по электроракетным двигателям. — (The 24th International Electric Propulsion Conference, Moscow, Russia, September 19-23, 1995).

7. Ивановский Г.Ф., Петров В.И. Ионно-плазменная обработка материалов. — М.: Радио и связь, 1986.

8. Влияние температуры поверхности на скорость распыления керамики / А.Н. Раннев, А.А. Семенов, О.Б. Соловьев // Сб. тез. докл. XIII Международной конференции по взаимодействию ионов с поверхностью. 1-5 сентября 1997, г. Звенигород. М., 1997. С.136-137.

9. Архипов Б.А., Гнздор Р.Ю., Масленников Н.А., Морозов А.И. Аномальная эрозия диэлектрика под действием плазменного потока // Физика плазмы. Т. 18. Вып. 3. 1992. С. 1241-1244.

10. Баранов В.И., Васин А.И., Назаренко С.Ю., Петросов В.А. и др. Механизм аномальной эрозии диэлектрика под действием плазменного потока / Письма в ЖТФ. Т. 20. Вып. 5. 12 марта 1994. С. 72-75.

11. Комаров Ф.Ф., Кумахов М.А., Ташлыков И.С. Неразрушающий анализ поверхностей твердых тел ионными пучками. — Минск: Изд-во «Университетское», 1987.

12. *Doolittle L.R.* Algorithms for the rapid simulation of the Rutherford Backscattering spectra // Nucl. Inst. and Meth. — 1985, V.9. — p.p. 344-351.

Московский авиационный институт  
Статья поступила в редакцию 10.04.2008