

УДК 533.59,620.168

## МЕТОДИКА ПРОГНОЗИРОВАНИЯ РЕСУРСА УСКОРЯЮЩЕГО ЭЛЕКТРОДА ИОННО-ОПТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ГАЗОРАЗРЯДНОГО ИСТОЧНИКА ИОНОВ

© 2019 г. Р. В. Ахметжанов<sup>1</sup>, \*, Е. В. Воробьев<sup>2</sup>, Д. В. Духопельников<sup>2</sup>,  
С. Г. Ивахненко<sup>2</sup>, В. А. Обухов<sup>1</sup>, Г. А. Попов<sup>1</sup>, В. В. Свотина<sup>1</sup>, М. В. Черкасова<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Научно-исследовательский институт прикладной механики  
и электродинамики Московского авиационного института (Национального исследовательского университета),  
125993 Москва, Россия

<sup>2</sup>Московский государственный технический университет  
им. Н.Э. Баумана, 105005 Москва, Россия

\*E-mail: ahmetzhanov1991@mail.ru

Поступила в редакцию 04.02.2019 г.

После доработки 17.03.2019 г.

Принята к публикации 24.03.2019 г.

Проведен анализ состояния исследований по определению ресурса ионных двигателей, включая их методическое обеспечение. Критическим процессом, определяющим ресурс ионных двигателей, является эрозия ускоряющего электрода ионно-оптической системы под действием ионов перезарядки. Показано, что наиболее оперативную и точную информацию о характере и скорости эрозии ускоряющего электрода на начальной стадии испытаний можно получить, используя способ, основанный на применении предварительно нанесенных на его поверхность многослойных покрытий, состоящих из нескольких пар оптически контрастных материалов. Способ позволяет использовать для регистрации картины эрозии простую фотографическую технику и особенно эффективен при существенно неоднородном характере эрозии. Приведена методика расчета параметров диагностических многослойных покрытий, включая оптимальные толщины слоев и общую толщину покрытия, позволяющих получить информацию по профилю и скорости эрозии поверхности, а также по распределению плотности ионного тока перезарядки с наибольшим разрешением за заданное время эксперимента.

**Ключевые слова:** источник ионов, ионный двигатель, ионно-оптическая система, укороченные ресурсные испытания, эрозия, ионы перезарядки.

**DOI:** 10.1134/S1028096019110049

### ВВЕДЕНИЕ

Критическим элементом конструкции ионных двигателей (ИД) и технологических источников ионов с точки зрения их ресурса является ускоряющий электрод (УЭ) ионно-оптической системы (ИОС), распыляемый под воздействием потока ионов перезарядки [1, 2]. Особенно критично ограничение по ресурсу для ИД, так как требования по наработке для них превышают 20000 ч. За более чем 70-летнюю историю развития технологии ИД, за рубежом (в первую очередь, в США) выполнен большой объем теоретических, расчетных и экспериментальных исследований, посвященных проблеме ресурса ИД. Строго ресурс ИД может быть определен на основании полноразмерных и дорогостоящих ресурсных испытаний, длительность которых составляет два года и более. В связи с этим предпринимаются попытки

разработки надежной методики оценки ресурса ИД на основании краткосрочных испытаний. Сложность создания такой методики заключается в том, что в ходе испытаний ИД прямое изменение величины эрозии поверхности УЭ затруднительно, из-за чего невозможно описать изменение характеристик эрозии во времени.

Настоящая статья посвящена вопросу создания расчетно-экспериментальной методики прогнозирования ресурса УЭ по результатам краткосрочных испытаний.

### АНАЛИЗ СОСТОЯНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ ПО ОПРЕДЕЛЕНИЮ РЕСУРСА УЭ ИД

Различным аспектам проблемы ресурса ИД посвящено множество работ. ИОС ИД построена по принципу “ускорение—замедление” и содер-

жит три электрода: эмиссионный (ЭЭ), ускоряющий (УЭ) и замедляющий (ЗЭ) [2]. ЗЭ делают перфорированным или кольцевым, охватывающим ионный пучок. В первом случае ИОС принято называть “трехэлектродной”, а во втором — “двухэлектродной”. Как показано, например, в [2], такая разница в конструкции приводит к существенному различию в распределении потока ионов перезарядки и в характере эрозии УЭ. В двухэлектродной ИОС наблюдается значительная неоднородность плотности ионного тока по поверхности УЭ, что осложняет задачу диагностики и моделирования эрозии УЭ.

В данной статье ставится задача создания методики прогнозирования ресурса УЭ ИД, применимой как для двухэлектродной, так и трехэлектродной ИОС ИД.

Применительно к этой задаче рассмотрим работы, относящиеся к способам регистрации характера эрозии УЭ с точки зрения перспектив их применения при краткосрочных испытаниях ИД без развакуумирования камер, в которых эти испытания проводятся. С учетом этого ограничения возможны различные подходы к созданию методики оценки ресурса ИД на основе краткосрочных испытаний.

В работе [3] применен спектроскопический способ регистрации эрозии, основанный на лазерно-индуцированной флуоресценции. Концентрация выносимых потоком атомов материала УЭ оценивается по интенсивности индуцированного лазером излучения атомов при сканировании струи двигателя. Это позволяет определять эрозию УЭ в режиме реального времени. Способ обеспечивает высокую точность измерений, но требует специального лазерного оборудования с рабочим диапазоном длин волн, соответствующим возбуждению свечения атомов конструкционного материала УЭ, и разработки надежных программ обработки, полученной из эксперимента информации.

В работе [4] сравниваются два способа оценки величины эрозии электродов ИОС. Оба метода основаны на фотографировании поверхности электрода до и после работы ИД. В первом случае с помощью микроскопа, во втором — фотоаппарата, снабженного плоскими линзами и ПЗС-матрицей высокого разрешения (свыше 10 мегапикселей). Второй способ обеспечивает больший размер наблюдаемой области, но оба метода требуют специального освещения и реализуются только после остановки испытаний.

В работе [5] проведены телемикроскопическая фотосъемка и сканирование поверхности электрода двигателя RIT-22 под углом  $33^\circ$  к поверхности. Боковое разрешение оценивалось при этом в 0.01 мм. Результаты измерений сравнивались с результатами моделирования эрозии. Был изучен

профиль поверхности УЭ вдоль черных линий А—А и В—В, показанных на фотографии справа, с захватом области максимальной эрозии (рис. 1). Время наработки ИД составило порядка 800 ч. За это время максимальная глубина выработки поверхности УЭ составила около 300 мкм.

Наибольший интерес представляют работы, в которых применялся комбинированный расчетно-экспериментальный способ исследования. В работе [6] проведено сравнение и показана достаточно хорошая сходимости качественных и количественных экспериментальных и расчетных результатов по эрозии электродов после 8200 ч наземных испытаний. Максимальная глубина эрозии при моделировании составила 208 мкм, в то время как измеренная с использованием профилометра в натурном эксперименте равнялась 220–230 мкм. Применение профилометра возможно лишь после остановки испытаний и разборки двигателя, тем не менее, работы [3, 6] содержат важные результаты по характеру эрозии и глубине каверны после длительной наработки ИД. Эти данные могут использоваться в качестве эталона при сравнении расчетно-экспериментальных оценок ресурса, полученных с использованием различных методик.

В работе [7] проводилось исследование двухэлектродной ИОС с гексагональным расположением отверстий. Исследуемый образец ИОС содержал 19 отверстий. УЭ был выполнен из нержавеющей стали AISI 304. На поверхность ИОС методом ионно-лучевого испарения были нанесены 12 слоев меди и нержавеющей стали AISI 303 (по 6 слоев каждого материала) толщиной по 50 нм. Время работы двигателя составило 280 мин, в течение которых были распылены пять слоев меди и пять слоев нержавеющей стали. После проведения эксперимента было проведено фотографирование поверхностей УЭ. Для подтверждения эффективности методики использования многослойных покрытий авторами был проведен перерасчет полученных в эксперименте скоростей эрозии слоев меди и нержавеющей стали на расчетную скорость эрозии молибдена. По мнению авторов, ошибка в определении скорости эрозии молибденового электрода данным методом не превышает 10%. В работе показана принципиальная возможность такого способа получения информации о характере эрозии при краткосрочных испытаниях, но не рассмотрены методические проблемы применения многослойных покрытий и не определялось изменение скорости эрозии по мере наработки ИД.

В работе [8] проведено прямое экспериментальное сравнение картины эрозии многослойного покрытия, восстановленной по результатам оптической регистрации и с помощью контактного профилометра с целью подтвердить объек-

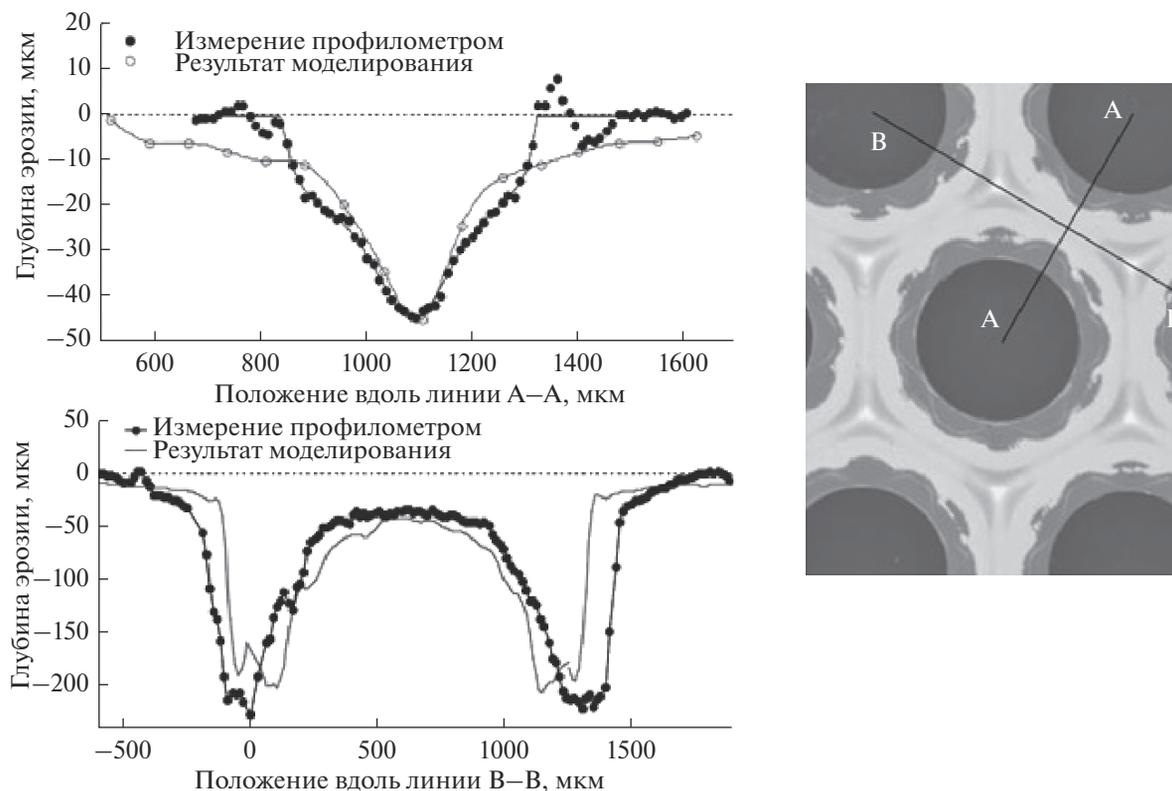


Рис. 1. Профиль эрозии.

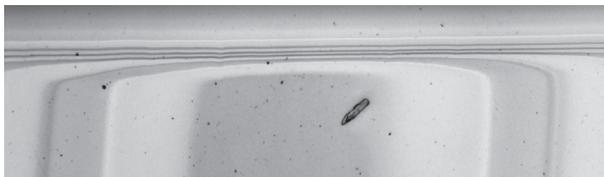
тивность способа фоторегистрации. Покрyтия наносились на стеклянную подложку и состояли из восьми чередующихся слоев алюминия и меди, по четыре слоя каждого их материалов. Исследовались два типа покрyтий. Покрyтие первого типа состояло из слоев равной толщины (130 нм). Покрyтие второго типа состояло из слоев с одинаковым временем нанесения (130 с), толщина алюминиевых слоев составляла 130 нм, а медных — 340 нм. После нанесения покрyтия образцы подвергались воздействию ионного пучка с неравномерным распределением плотности ионного тока по ширине. Для этого образец с покрyтием помещался в ионный пучок ускорителя с анодным слоем УАС-200 [8] на расстоянии 10 мм от выхода из ускорительного канала перпендикулярно ионному потоку. Ускоритель работал при напряжении разряда 3000 В и токе разряда 75 мА. Средняя плотность ионного тока на срезе ускорительного канала составляла 24 А/м<sup>2</sup>. Аналогичным методом был обработан стеклянный образец без покрyтия. Исследование профиля поверхности по визуальным картинам эрозии производилось при помощи микроскопа CarlZeiss AxioImager Z2m. Для оценки точности измерения профиля эрозии по картинам полос травления производилось измерение топологии обработанной поверхности при помощи механического профилометра 17622

(производства завода “Калибр”) с точностью 10 нм. Результаты измерения профиля эрозии по картинам распыления практически совпадали с результатами измерений профилометром по всей ширине зоны ионной обработки.

Проведенный анализ показывает, что из известных способов оценки ресурса УЭ на основе краткосрочных испытаний наиболее эффективным является применение многослойных покрyтий, при котором диагностирование формы и глубины эрозии поверхности производится при помощи простых оптических приборов [7, 8]. В то же время, в этих работах не описываются принципы выбора параметров используемых покрyтий (толщины и количество отдельных слоев и их материалы), обеспечивающих наиболее точные измерения.

#### ПРИНЦИПЫ ПОСТРОЕНИЯ МЕТОДИКИ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ РЕСУРСА УЭ

Предлагаемая расчетно-экспериментальная методика базируется на экспериментальной информации о скорости и характере износа УЭ (как критического элемента конструкции ИД), получаемых периодически на протяжении всех испытаний. Экспериментальные исследования должны сопровождаться теоретическим расчетом на



**Рис. 2.** Фотография поверхности тестового образца с распыленным многослойным покрытием. В вертикальном направлении градиент плотности ионного тока значительно больше, чем в горизонтальном.

основании моделей износа, подтверждаемых в ходе проведения испытаний. Сходимость экспериментальных и расчетных результатов достигается коррекцией исходных данных для расчета по полученным из эксперимента характеристикам ионных потоков на поверхность УЭ. При достижении достаточной сходимости результатов прогноз ресурса УЭ может опираться на результаты расчета. Анализируя программы расчета эрозии с точки зрения составной части разрабатываемой методики, можно сделать вывод о том, что при расчетном исследовании эрозии тыльной стороны УЭ под действием ионов перезарядки, выпадающих на поверхность электрода из области нейтрализации, целесообразно использовать программу IOS-3D [9] разработки Центра Келдыша.

В связи с тем, что полученная в эксперименте информация используется для корректировки моделей эрозии УЭ, учитывающих изменение характера и скорости износа во времени, вытекает необходимость разработки способа оперативного и точного определения количественных и качественных характеристик износа на различных этапах испытаний. Особенно критичным является учет крайне неоднородного распределения плотности ионного тока перезарядки по поверхности УЭ.

### РАСПЫЛЕНИЕ МНОГОСЛОЙНЫХ ПОКРЫТИЙ НЕОДНОРОДНЫМ ИОННЫМ ПУЧКОМ

Скорость распыления поверхности материала ионным потоком равна:

$$\frac{dh}{dt} = \frac{M_a S_{эф}}{qp} j = Kj. \quad (1)$$

Здесь  $M_a$  и  $\rho$  – масса молекулы и плотность материала слоя,  $j$  – плотность ионного тока,  $q$  – заряд иона,  $K$  – коэффициент, пропорциональный скорости распыления,  $S_{эф}$  – эффективный коэффициент распыления:

$$S_{эф} = \int_0^{\infty} f(\epsilon_i) S(\epsilon_i) d\epsilon_i, \quad (2)$$

где  $f(\epsilon_i)$  – функция распределения ионов по энергиям,  $S(\epsilon_i)$  – коэффициент распыления материала при энергии иона  $\epsilon_i$ .

Эффективный коэффициент распыления может быть рассчитан при известной функции распределения ионов по энергиям, или измерен на моделирующем устройстве [10].

Если ионный пучок моноэнергетичный, то

$$S_{эф} = S(\epsilon_i). \quad (3)$$

При неоднородном распределении плотности ионного тока поверхность будет распыляться, образуя уклон в сторону возрастания плотности ионного тока с углом  $\alpha$ :

$$\text{tg}(\alpha) = \frac{dh}{dx} = \frac{M_a S_{эф} t}{qp} \frac{dj}{dx}, \quad (4)$$

где  $t$  – время обработки.

При распылении многослойного покрытия будут наблюдаться полосы с шириной:

$$b_i = \frac{\delta_i}{\text{tg}(\alpha_i)} = \frac{\delta_i qp_i}{M_{ai} S_{эф} t_{скв}} \frac{dj}{dx} = \frac{\delta_i}{K_i t_{скв}} \frac{dj}{dx}. \quad (5)$$

Из выражения (5) следует, что ширина полосы обратно пропорциональна градиенту плотности ионного тока, что хорошо видно на рис. 2.

В работе [11] показано, что выражения (4) и (5) выполняются для произвольной структуры покрытия при любых толщинах и количестве слоев.

### ВЫБОР СТРУКТУРЫ ПОКРЫТИЯ

Для того, чтобы в построении профиля распыленной поверхности принимали участие все слои многослойного покрытия необходимо, за время эксперимента в исследуемой области распылить насквозь покрытие в точке, соответствующей максимальной плотности ионного тока. Если покрытие состоит из  $n$  пар чередующихся слоев двух разных материалов, время его сквозного распыления в этой точке будет равно:

$$t_{скв} = \frac{nq}{j_{\max}} \left( \frac{\rho_1 \delta_1}{M_{a1} S_{1эф}} + \frac{\rho_2 \delta_2}{M_{a2} S_{2эф}} \right) = \frac{n}{j_{\max}} \left( \frac{\delta_1}{K_1} + \frac{\delta_2}{K_2} \right). \quad (6)$$

Так как предлагаемая методика основана на измерении координат границ между полосами на изображении распыленного многослойного покрытия, минимальная ширина полос отдельных слоев на изображении должна многократно превышать разрешающую способность оптической системы  $r$ , определяемую критерием Релея. В настоящей работе полагается, что измерения можно производить, если минимальная ширина  $b_{\min}$  по-

лосы в 10 и более раз превышает разрешение оптической системы:

$$b_{\min} = Zr, \quad Z \geq 10. \quad (7)$$

Минимальную ширину будут иметь полосы, находящиеся в области ионного потока с наибольшим градиентом плотности ионного тока. Тогда из выражения (5) получаем минимальные толщины отдельных слоев:

$$\begin{cases} \delta_{1\_min} = b_{\min} K_1 t_{\text{СКВ}} \left( \frac{dj}{dx} \right)_{\max} \\ \delta_{2\_min} = b_{\min} K_2 t_{\text{СКВ}} \left( \frac{dj}{dx} \right)_{\max} \end{cases}. \quad (8)$$

При этом следует учитывать, что металлические покрытия толщиной менее 100 нм полупрозрачные [12]. Толщина  $\delta_{i\_tr}$ , при которой металлическая пленка становится непрозрачной, зависит от концентрации свободных электронов, подвижности и длины свободного пробега электронов в металле и поэтому является характеристикой материала. Если отдельные слои в диагностическом многослойном покрытии будут тоньше  $\delta_{i\_tr}$ , контрастность изображений будет снижена, что приведет к сложностям при идентификации границ слоев. Поэтому толщина каждого слоя покрытия должна превышать  $\delta_{i\_tr}$ . При этом необходимо учитывать, что при исследовании образцов в отраженном свете толщина полупрозрачной части слоя в два раза меньше, чем при исследовании в проходящем свете, так как в первом случае свет проходит через материал дважды.

Подставляя выражения (8) в уравнение (6) получаем количество пар слоев, при котором самая узкая полоса на изображении будет иметь достаточную для измерения ширину:

$$n_{\max} = \frac{j_{\max}}{2b_{\min} \left( \frac{dj}{dx} \right)_{\max}}. \quad (9)$$

Если пар слоев в покрытии будет больше, чем  $n_{\max}$  ( $n > n_{\max}$ ), то ширина полос в области с наибольшим градиентом плотности ионного тока будет слишком малой для точного измерения, если же  $n < n_{\max}$ , то возможности метода будут реализованы не полностью. Максимальное количество пар слоев зависит от разрешения оптической системы, при помощи которой предполагается исследовать распыленную поверхность, а также от максимальных значений плотности ионного тока

$j_{\max}$  и ее градиента  $\left( \frac{dj}{dx} \right)_{\max}$ . Последние два параметра неизвестны до проведения эксперимента. Поэтому их необходимо оценить на основе теоретических расчетов, анализа литературных данных или короткой серии предварительных экспери-

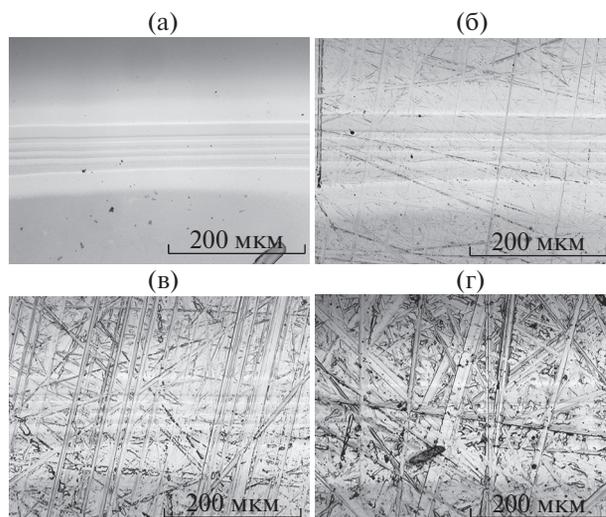


Рис. 3. Фотографии распыленного многослойного покрытия при различных шероховатостях  $R_a$  поверхности подложки: а – 0.0008, б – 0.026, в – 0.088, г – 0.189 мкм.

ментов с использованием многослойных покрытий с произвольным количеством слоев.

## ВЛИЯНИЕ ШЕРОХОВАТОСТИ ПОВЕРХНОСТИ НА РАЗРЕШЕНИЕ МЕТОДА

На рис. 3 представлена картина экспериментального травления при различной шероховатости образцов. На полированной поверхности контрастные полосы отчетливо видны во всем диапазоне градиентов плотности ионного тока. На шероховатой поверхности восприятие картины полос значительно ухудшается.

Особенно сильно снижение качества изображения проявляется при низких значениях увеличения оптической системы, когда разноцветная картина распыления “теряется” среди крупных дефектов на поверхности. В то же время при больших увеличениях разноцветные полосы на изображении видны более отчетливо.

Таким образом, для визуального исследования изображений с целью оперативной качественной оценки распределения скорости травления по поверхности шероховатость образца не играет решающей роли. Глазом (невооруженным, или при использовании микроскопа) картина травления видна во всем диапазоне параметров шероховатости. Если же необходима более точная количественная оценка распределения скорости распыления по поверхности и/или будет применяться автоматическая обработка изображений, необходимо использовать полированные образцы с минимальной шероховатостью.

**Таблица 1.** Значения коэффициента  $K_i$  для различных материалов при распылении ионами ксенона и аргона с разными энергиями

Материал	$K_i, \text{м}^3/\text{Кл}$		
	$\text{Ar}^+, 200 \text{ эВ}$	$\text{Ar}^+, 2000 \text{ эВ}$	$\text{Xe}^+, 200 \text{ эВ}$
Алюминий	3.75	20	2.5
Кремний	0.63	10	1
Титан	1.88	16.3	1.44
Хром	5	15	3.31
Никель	4.38	15	2.56
Медь	12.5	31.9	5.88
Цирконий	4.38	14.4	2.63
Ниобий	4.38	12.5	1.88
Молибден	5	14.4	2.75
Серебро	19.4	61.9	11.3
Вольфрам	2.5	10	3.5
Платина	6.25	18.8	6.87
Золото	11.3	53.1	10.63

### ВЫБОР МАТЕРИАЛОВ СЛОЕВ

Для оценки плотности ионного тока по контрастным картинам коэффициент распыления материалов, используемых для нанесения отдельных слоев диагностического многослойного покрытия, ионами рабочего газа должен быть хорошо известен в рассматриваемом диапазоне энергий. В тоже время нанесение покрытий должно осуществляться при помощи простых способов, требующих минимальных временных и материальных затрат и обеспечивающих высокую воспроизводимость. Поэтому наиболее приемлемыми в диагностических покрытиях являются чистые металлы, наносимые методом магнетронного распыления.

Одним из важнейших требований к используемым материалам является их оптическая контрастность по отношению друг к другу и к подложке. Последнее обусловлено необходимостью отличить покрытие от подложки в местах сквозной выработки. Среди всех металлов цветом выделяются только три: медь, золото и цезий. По объективным причинам оптимальным материалом для диагностических покрытий является медь, имеющая красный цвет.

Кроме того, для сокращения времени эксперимента, применяемые материалы должны иметь (по возможности) наибольшую скорость распыления (параметр  $K_i$ ) ионами рабочего газа. В табл. 1 представлены значения параметра  $K_i$  для различных металлов при распылении ионами аргона и ксенона. Наибольшие скорости распыления

ионами ксенона имеют медь, серебро, золото и платина. Однако, серебро и платина помимо высокой стоимости обладает сравнительно низкой адгезией к подложке и, следовательно, не подходят для использования в диагностических покрытиях. Молибден и вольфрам, имеющие высокие скорости распыления и хорошую контрастность к меди, при нанесении методом магнетронного распыления образуют покрытия низкого качества из-за порошковой структуры мишеней. Из остальных металлов наибольшую скорость распыления ионами ксенона имеет хром. Благодаря высокому коэффициенту отражения хром обладает хорошей контрастностью как по отношению к меди, так и к большинству материалов, из которых изготавливаются ускоряющие электроды электростатических ускорителей (Ti, Mo).

Таким образом, оптимальной парой материалов для диагностических покрытий являются медь и хром.

### ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЬ ВЫБОРА ПАРАМЕТРОВ МНОГОСЛОЙНОГО ПОКРЫТИЯ

Приведенные рассуждения и теоретические результаты позволяют сформулировать последовательность выбора параметров многослойных покрытий для исследования эрозии ускоряющего электрода ионно-оптической системы:

1. На основе теоретических расчетов или коротких предварительных экспериментов необходимо оценить значения максимальной плотности ионного тока  $j_{\max}$  и максимального градиента

плотности ионного тока  $\left(\frac{dj}{dx}\right)_{\max}$ .

2. По техническим характеристиками и критерию Релея определить разрешение оптической системы, при помощи которой планируется производить исследование картин эрозии многослойных покрытий. По формуле (7) определить минимальную измеримую ширину полосы  $b_{\min}$ .

3. Выбрать пары материалов для многослойного покрытия. Если ускоряющий электрод изготовлен из титана или молибдена, а в качестве рабочего вещества используется ксенон, то оптимальной парой будут медь и хром.

4. Используя выражение (9), определить количество пар слоев в покрытии. При этом дробные значения округляются в меньшую сторону.

5. Используя выражения (8), определить толщины отдельных слоев покрытия. Вычислить суммарную толщину многослойного покрытия.

7. Проверить выполнение условия непрозрачности для слоев каждого материала. Если хотя бы один из слоев оказался полупрозрачным, то необходимо увеличить время эксперимента. При не-

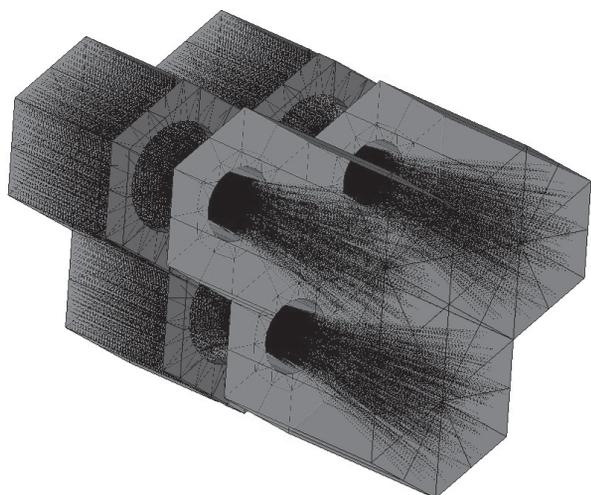


Рис. 4. Внешний вид моделируемого блока из трех элементарных ячеек УЭ.

возможности увеличения времени эксперимента необходимо увеличить толщины слоев, сохранив постоянными их отношение и суммарную толщину покрытия. При этом будет снижено количество слоев в многослойном покрытии и, соответственно, предельное пространственное разрешение методики.

### РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ПРОГНОЗИРОВАНИЕ РЕСУРСА УЭ

Для оценки значений плотности и градиента плотности ионного тока необходимо выполнить трехмерное моделирование скорости эрозии поверхности УЭ, обращенной к зоне нейтрализации пучка. Фокусировка потоков вторичных ионов перезарядки, двигающихся из зоны нейтрализации, в характерных точках между отверстиями связана со сложной конфигурацией электростатического поля электрода в пространстве и перекрытием полей соседних пучков ионов. Следовательно, для получения достоверных результатов в расчете необходимо моделировать блок из трех соседних отверстий сетки (рис. 4). Неопределенность расчета заключается в возможных ошибках при задании (в качестве исходных данных для расчета) параметров плазмы в зоне нейтрализации ионного пучка: концентрации ионов пучка  $n_{i0}$ , концентрации атомов  $n_a$ , электронной температуры  $T_e$ . Измерения  $n_{i0}$  и  $T_e$  с помощью зондов Лэнгмюра дают значительную ошибку, а  $n_a$  задается на основе оценочного расчета. Используя программу 3D IOS [9], получают картину распыления УЭ на заданной временной базе. Пример распределения скорости эрозии поверхности УЭ, рассчитанной для титана, приведен на 3D-диаграмме рис. 5. При средней по поверхности УЭ

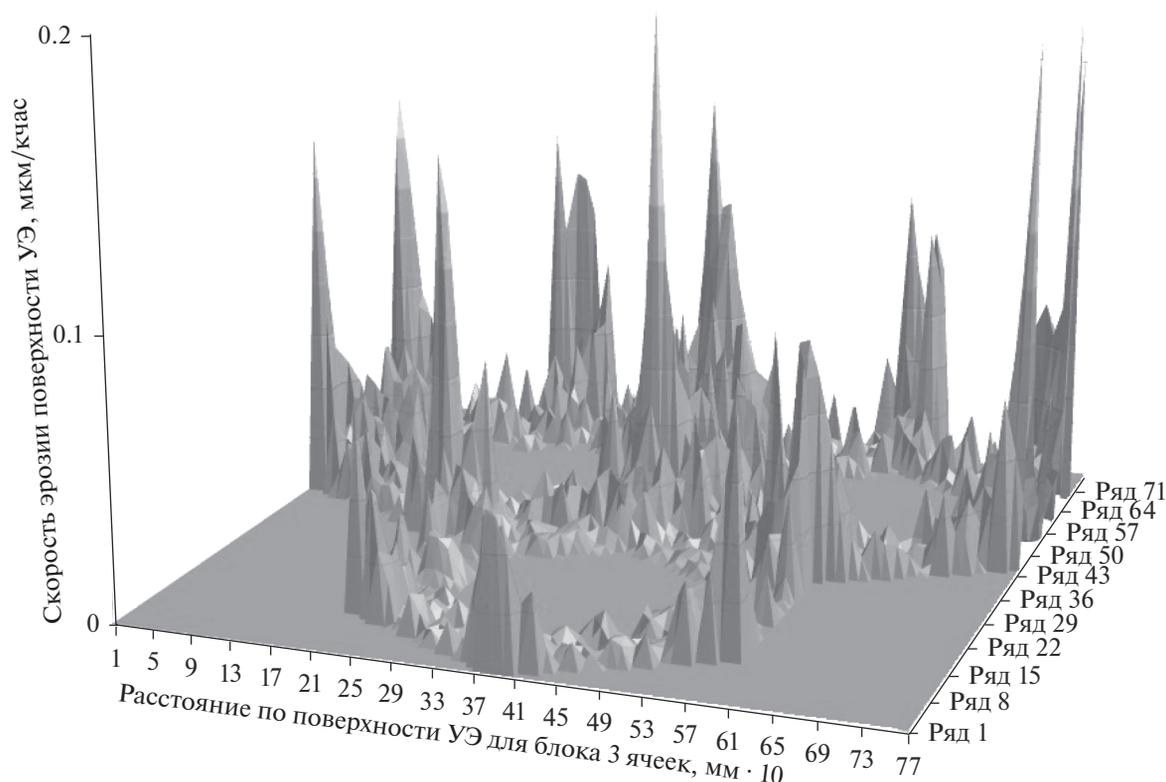
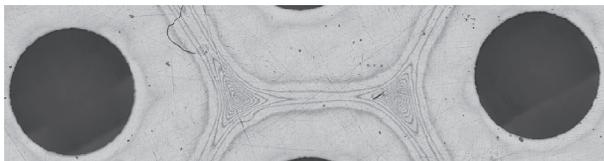
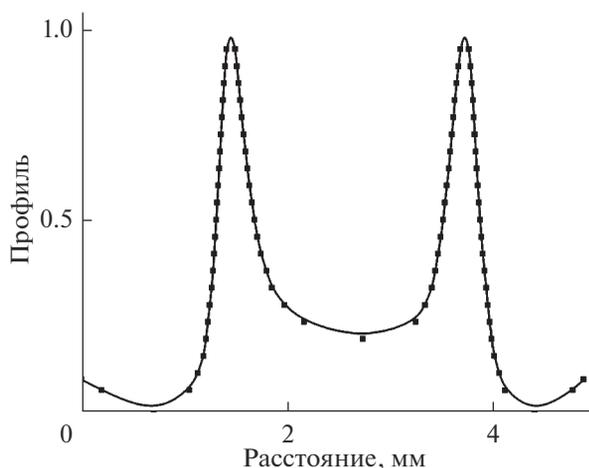


Рис. 5. Распределение скорости эрозии по поверхности УЭ мкм/кчас (материал электрода – титан).



**Рис. 6.** Пример контрастной картины травления многослойного покрытия на поверхности ускоряющего электрода ионно-оптической системы электростатического ионного двигателя.



**Рис. 7.** Нормированный профиль эрозии поверхности электрода, восстановленный по картине распыления.

плотности ионного тока, равной  $1 \text{ А/м}^2$ , значение максимальной локальной скорости эрозии для титана составляет примерно  $90,5 \times 10^{-3} \text{ мкм/кчас}$ , а минимальной – почти на два порядка ниже. Локальная скорость эрозии пропорциональна локальному значению плотности ионного тока перезарядки, и неоднородность эрозии является следствием неоднородности распределения ионного тока. Для того, чтобы получить прогноз ресурса УЭ расчетным путем, необходимо сопоставить результаты расчета с экспериментом на начальном этапе кратковременных испытаний. Работа ИД может производиться циклично при фоторегистрации картины эрозии, вообще говоря, без извлечения ИД из вакуумной камеры. Время цикла может составлять 5–6 ч. Сопоставляются графики изменения глубины эрозии в точке с максимальной эрозией, полученные экспериментально и расчетным путем. При расхождении результатов для следующей расчетной итерации вносится коррекция в задании параметров плазмы.

При достижении сходимости для оценки ресурса можно использовать расчет. Применение на начальном этапе испытаний многослойного

покрытия позволяет получить необходимую информацию по ресурсу УЭ с высокой точностью.

На рис. 6 приведена контрастная картина травления ускоряющего электрода, а на рис. 7 – профиль выработки, по которому проводится корректировка параметров расчета.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представленная в работе методика позволяет прогнозировать ресурс ускоряющего электрода ионно-оптической системы газоразрядных источников ионов на основе коротких экспериментов без проведения полноценных ресурсных испытаний. Методика (за счет корректировки теоретических расчетов по экспериментальным данным эрозии поверхности) позволяет повысить надежность прогноза ресурса двигателя.

Важное преимущество представленной методики заключается в том, что получение изображений распыленной поверхности производится при помощи простых оптических приборов (фотоаппарат с макрообъективом, либо микроскоп, оснащенный фотокамерой), которые, как правило, имеются в распоряжении практически всех исследовательских лабораторий.

Оптимальное количество пар слоев в покрытии зависит от разрешения применяемой оптики, а также от максимальных значений плотности и градиента плотности ионного тока на исследуемой поверхности. В качестве материалов слоев покрытия следует выбирать металлы, имеющие наибольшие скорости распыления в условиях эксплуатации исследуемого изделия, и имеющие максимальную оптическую контрастность друг относительно друга. Толщина слоев зависит от времени, отведенного на эксперимент, но не должна быть меньше толщины, при которой слои будут полупрозрачными.

Результаты работы будут полезны при оценке срока службы любых газоразрядных приборов, элементы которых в процессе работы подвергаются ионной бомбардировке.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Wirz R.E., Anderson J.R., Goebel D., Katz I.* XIPS Ion Thruster Grid Erosion Assessment for Deep Space Missions // IEPIC–2007–265. Rep. 30th Intern. Electric Propulsion Conf. Florence, Italy, 2007. P. 9.
2. *Abgaryan V.K., Akhmetzhanov R.V., Loeb H.W., Obukhov V.A., Cherkasova M.V.* // J. Surf. Invest.: X-ray, Synchrotron Neutron Tech. 2013. V. 7. № 6. P. 1092.
3. *Domonkos M.T., Stevens R.E.* Assessment of Spectroscopic, Real-Time Ion Thruster Grid Erosion–Rate Measurements // AIAA–2000–3815, 36 AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conf. and Exhibits. Las Vegas, NV, USA, 2000.

4. *Li J., Qiu J., Chu Y., Zhan T., Men W., Jia Y., Liu X.* // Intern. J. Mechanical, Aerospace, Industrial, Mechatronic and Manufacturing Engineering. 2015. V. 9. № 11. P. 1978.
5. *Bundesmann C., Tartz M., Scholze F., Neumann H., Leiter H.J., Scortecchi F., Feili D., Frigot P.E., Gonzalez J.* In-Situ Temperature, Grid Curvature, Erosion, Beam and Plasma Characterization of a Gridded Ion Thruster RIT-22 // IEPC-2009-160. 31th Intern. Electric Propulsion Conf. Michigan: University of Michigan, Ann Arbor. USA, 2009.
6. *Wang J., Polk J., Brophy J., Katz I.* Three-Dimensional Particle Simulations of NSTAR Ion Optics // IEPC-01-085. 27th Intern. Electric Propulsion Conf. Pasadena. USA, 2001.
7. *Barker T.* Impingement-Current-Erosion Characteristics of Accelerator Grids on Two-Grid Ion Thrusters // NASA Contractor Report 198523, Lewis Research Center, Grant NAG3-1801, 1996.
8. *Dukhopel'nikov D.V., Vorobyev E.V., Ivakhnenko S.G., Akhmetzhanov R.V., Obukhov V.A., Popov G.A., Khar-tov S.A.* // J. Surf. Invest.: X-ray, Synchrotron Neutron Tech. 2015. V. 10. № 1. P. 2016
9. Свидетельство государственной регистрации программы для ЭВМ № 2014610277 от 21.01.2014 // IOS-3D, Моделирование потоков заряженных частиц в ионно-оптических системах ионных двигателей.
10. *Dukhopel'nikov D.V., Riazanov V.A., Vorobyev E.V., Ab-garian V.K., Popov G.A., Khartov S.A.* // J. Surf. Invest.: X-ray, Synchrotron Neutron Tech. 2016. T. 10. № 6. P. 1202.
11. *Духопельников Д.В., Воробьев Е.В.* // Вестник МАИ. 2019. Т. 26. № 1. С. 152.
12. *Марахтанов М.К., Духопельников Д.В., Мэй Сянь Сю* // Нано- и микросистемная техника. 2008. № 1. С. 42.

## Procedure of Predicting the Lifetime of Accelerating Electrode of Ion-Extraction System of Gas-Discharge Ion Source

**R. V. Akhmetzhanov, Ye. V. Vorob'ev, D. V. Dukhopel'nikov, S. G. Ivakhnenko, V. A. Obukhov, G. A. Popov, V. V. Svtina, M. V. Cherkasova**

The state of studies on the determination of lifetime for ion thrusters (IT) is analyzed, their methodical ware including. The erosion of accelerating electrode (AE) of the ion-extraction system caused by the charge-exchange ions is the critical process being responsible for the IT lifetime. It is shown that the most-timely and accurate information on the AE erosion nature and rate at the initial test stage can be obtained by the method based on the use of multi-layer coatings fore-applied onto the AE surface, such coatings consisting of several pairs of optically contrast materials. The method allows the use of simple photographic devices for recording the erosion pattern, and is especially efficient in the case of substantially non-uniform nature of erosion. The calculation procedure is presented for the parameters of diagnostic multilayer coatings, including the optimal layer thickness and total coating thickness, which allow getting data on the surface erosion profile and rate, and on the charge-exchange ion current density distribution with the highest resolution during the given test time. Calculation results are presented for the AE erosion for the case of typical pattern of the charge-exchange ion current distribution. The IT lifetime prediction procedure is proposed, according to which the test data are used for the correction of plasma properties in the AE down stream, as the input at subsequent steps for the charge-exchange ion current density and erosion rate calculation. The procedure of predicting the IT lifetime, according to which the information obtained from the experiment is used in the correction of plasma parameters in the ion beam behind the AE as the initial conditions for the successive steps of calculating the erosion rate, is proposed.

**Keywords:** ion source, ion thruster, ion-extraction system, shortened lifetime tests, erosion, charge-exchange ions.