

УДК 533.951

Захарченко А.В., Нестеренко С.Ю., Оранский А.И.

## ПРОГНОЗИРОВАНИЕ РЕСУРСНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ПОЛЫХ КАТОДОВ

Экспериментальные исследования полых катодов, показывают величины скорости эрозии, на порядки превосходящие расчетные скорости как испарения (отрыв в результате только тепловых колебаний поверхностных частиц), так и классического катодного распыления (отрыв в результате только бомбардировки) – диапазон величин в низковольтном дуговом разряде с полым катодом таков, что основную долю в потоке атомов с поверхности составляют такие, отрыв которых оказывается возможным только в результате "сложения" энергии исходного (теплого) состояния и энергии возмущения.

Такой совокупный процесс, помимо общего случая, когда скорость эрозии (плотность потока распыленных частиц) есть функция общего вида температуры поверхности, плотности потока и энергии бомбардирующих частиц, может в свою очередь, сводиться к двум предельным случаям:

– относительно большая плотность потока сравнительно медленных частиц, взаимодействие которых с поверхностью есть взаимодействие сплошной среды со сплошной средой – возмущение охватывает большое количество частиц поверхности и сохраняется в течение времени, большего по сравнению с временем установления теплового равновесия;

– относительно малая плотность потока сравнительно быстрых частиц, взаимодействие которых с поверхностью есть взаимодействие отдельных частиц с отдельными частицами – возмущение охватывает малое количество частиц и является непродолжительным.

В первом случае (испарение, стимулированное бомбардировкой) скорость эрозии есть только функция температуры, но локальное и мгновенное значение последней отличается от значений в соседних областях ввиду подвода энергии с потоком частиц.

Во втором случае (термостимулированное распыление [1-3]) скорость эрозии пропорциональна потоку бомбардирующих частиц, но коэффициент пропорциональности оказывается функцией не только энергии последних, но и температуры поверхности:

$$\Gamma_p = P(\epsilon_i, T)\Gamma_i \quad (1)$$

Характеристики разряда с полым катодом в исследуемом диапазоне величин соответствуют именно данному режиму эрозии.

Анализ поведения частиц поверхности показывает, что величина первой квантовой поправки квазиклассического приближения [4] составляет 0.1% классического импульса, и это поведение может описываться

классическими уравнениями движения.

Пороговые процессы при средних тепловых энергиях, существенно уступающих энергии порога (в нашем случае - энергия связи  $\epsilon_m$ ), описываются зависимостями, весьма чувствительными к входящим в них параметрам. Оптимальным подходом в данном случае является отыскание общей формы такой зависимости, с последующей ее калибровкой на основе имеющихся экспериментальных данных.

Условием отрыва поверхностной частицы считаем выражение:

$$\epsilon_a \geq \epsilon_m, \quad (2)$$

где  $\epsilon_a$  - энергия частицы в первом максимуме возмущенных ударом колебаний:

$$\epsilon_a = \epsilon_t + 2 \sqrt{\epsilon_0 \epsilon_t} \cos \varphi + \epsilon_0, \quad (3)$$

Здесь  $\epsilon_t$  - амплитуда начальных тепловых колебаний;

$\epsilon_0$  - остаточное возмущение энергии поверхностной частицы;

$\varphi$  - фаза начальных колебаний в момент отрыва.

Диапазоны изменения и плотности вероятности отыскания случайных величин в выражении (3) следующие:

$$0 \leq \varphi < \pi; f(\varphi) = 1/\pi, \quad 0 \leq \epsilon_t < \omega; f(\epsilon_t) = \frac{1}{KT} e^{-\frac{\epsilon_t}{KT}}, \quad 0 \leq \epsilon_0 \leq \epsilon_{\max}; f(\epsilon_0) = \frac{1}{\epsilon_{\max}},$$

где:  $\epsilon_{\max} = \beta \epsilon_i$ ,  $M$  и  $m$  - массы взаимодействующих частиц,

Выражение для коэффициента распыления можно записать так:

$$P(\epsilon_i, T) = \int f(\epsilon_t) f(\epsilon_0) f(\varphi) d\epsilon_t d\epsilon_0 d\varphi,$$

причем интеграл по  $\epsilon_t$  берется от 0 до  $\omega$ , а интегралы по  $\epsilon_0$  и  $\varphi$  - по области значений, для которой справедливо (2). Интегрирование по  $\epsilon_0$  и  $\varphi$  можно осуществить аналитически, что приводит к выражению:

$$P(\epsilon_i, T) = \int f(\epsilon_t) P_0 \left[ \frac{\sqrt{\epsilon_m} - \sqrt{\epsilon_t}}{\sqrt{\beta \epsilon_i}} \right] d\epsilon_t, \quad (4)$$

$$\text{где } P_0(z) = \begin{cases} 0, & z > 1, \\ \frac{1}{2} - \frac{1}{\pi} \left[ \arcsin(z) - z \operatorname{arch} \left( \frac{1}{|z|} \right) \right], & |z| \leq 1, \\ 1, & z < -1. \end{cases}$$

Коэффициент отклика  $\beta$  в (4) - единственная нетабличная величина,

в которой и должна с использованием данных эксперимента калиброваться зависимость (4).

Плотность потока частиц поверхности определяется в каждой точке процессами распыления и осаждения:

$$\Gamma = (\Gamma_p - \Gamma_-)(1-\theta), \quad (5)$$

где  $\theta$  - степень покрытия поверхности пленкой активатора;

$\Gamma_p$  - плотность потока распыленных частиц с открытой поверхности, вычисляемая с использованием (1);

$\Gamma_-$  - плотность потока осаждающихся частиц.

Плотность потока распыленных частиц в окрестности отверстия (нижний индекс 0), может быть определена так:

$$\Gamma_0 = \left[ \Gamma_{p0} - \gamma \frac{\langle \Gamma_p (1-\theta) \rangle}{\langle 1-\theta \rangle + \sigma S_0/S} \right] (1-\theta), \quad (6)$$

где  $\sigma$  и  $\gamma$  - отношение плотности потока частиц в отверстие и плотности потока осаждаемых частиц в окрестности диафрагмы к средней для поверхности полости плотности потока переосаждения;

$S$  и  $S_0$  - площадь внутренней поверхности и сечения отверстия;

$\langle \rangle$  - осреднение по  $S$ .

Для расчета динамики размера отверстия диафрагмы в стационарном режиме работы катода использовались совместно методики расчета, основанные на приведенной здесь эрозивной и пространственно-кинетической диффузионной моделях процессов в полости катода [5]. Результаты расчетов представлены как семейства кривых для расхода 0.7 мг/с при токах 40, 50, 60 и 70 А (Рис. 1 - 3) и для тока 50 А при расходах 0.5, 0.6, 0.7, 0.8 и 0.9 мг/с (Рис. 4).

Повышенные значения скорости эрозии на начальном этапе работы катода (Рис. 1) обусловлены малым начальным значением радиуса (0.25 мм), при котором имеет место скачок потенциала в биполярном слое вблизи отверстия - "приработка" катода (ускоренный унос дефектного поверхностного слоя) в данной модели не учитывалась.

После достижения величины радиуса отверстия, при которой биполярный слой исчезает, скорость эрозии уменьшается, и кривая зависимости радиуса отверстия от времени становится более пологой.

По мере роста  $R_0$ , с увеличением потенциала плазмы в отверстии скорость эрозии снова начинает расти, и при значениях времени 5000 ÷ 20000 час (70 ÷ 40 А при 0.7 мг/с или 0.5 ÷ 0.9 мг/с при 50 А) рост радиуса приобретает катастрофический характер. В этой же окрестности

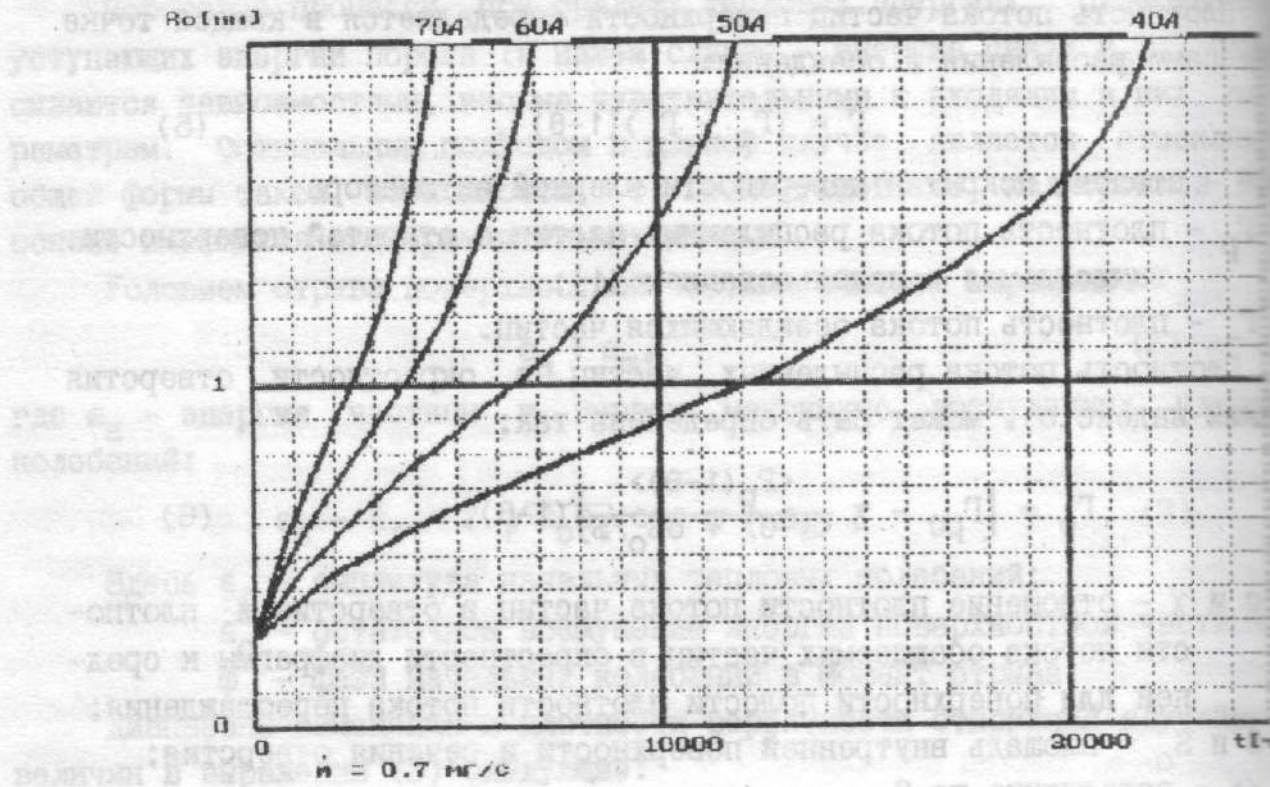


Рис. 1

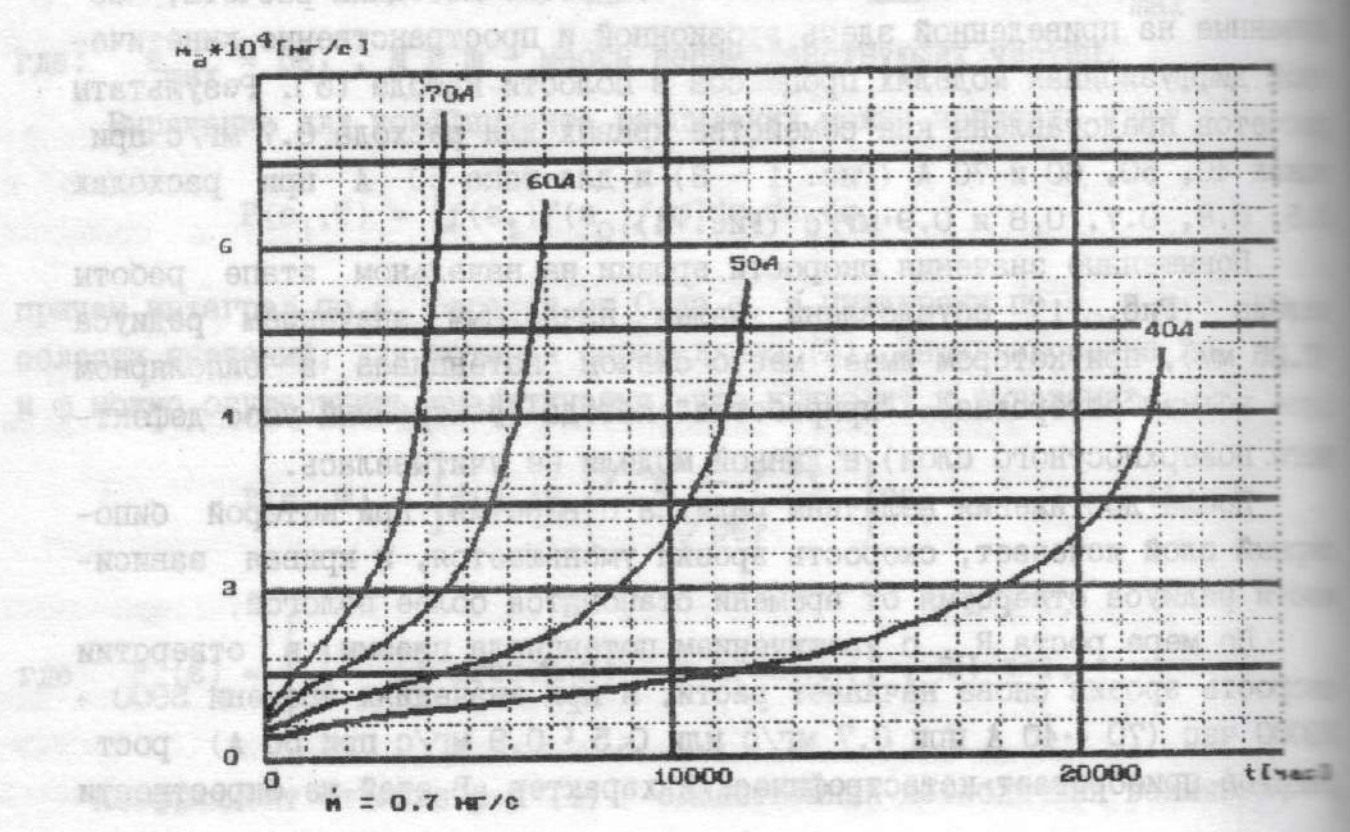


Рис. 2

U1B1

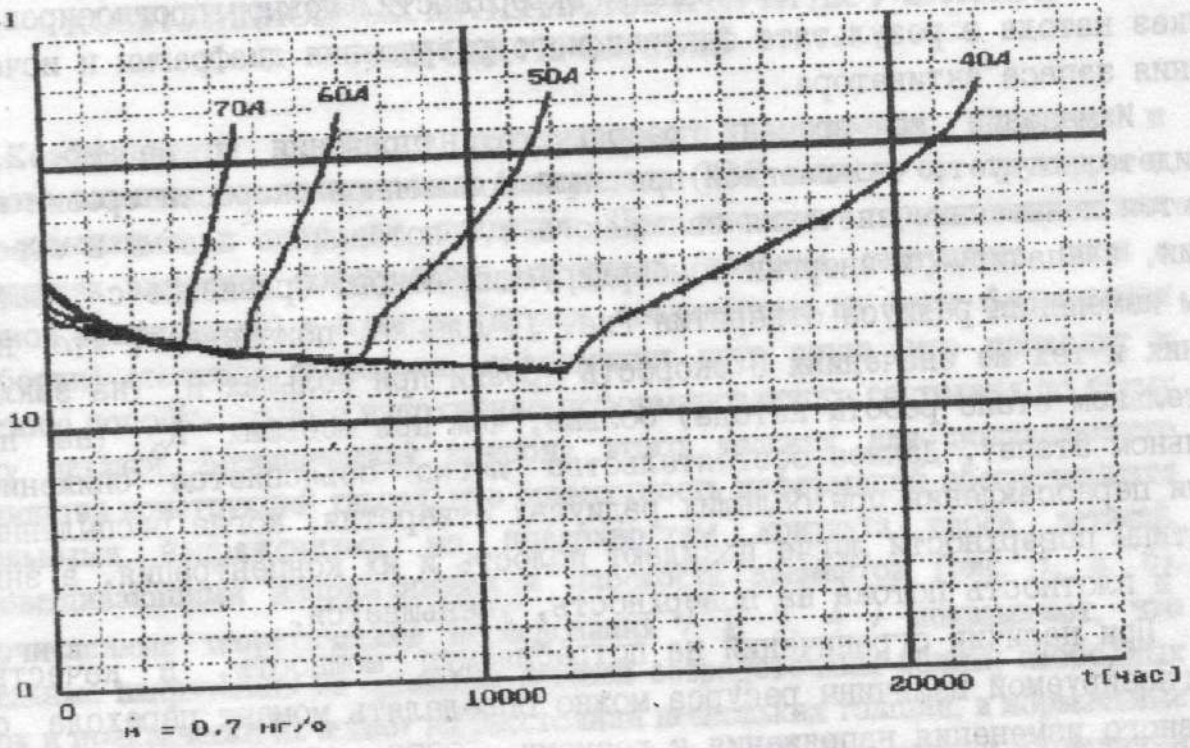


Рис. 3

U1B1

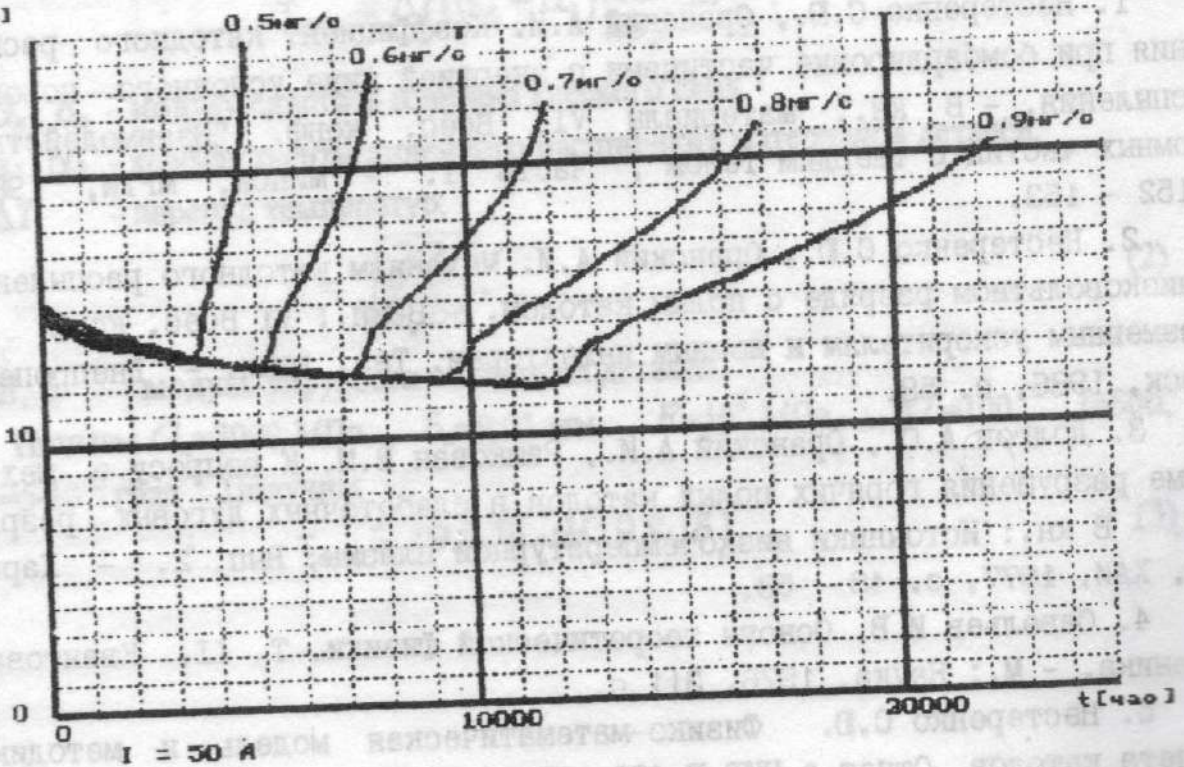


Рис. 4

имеет место резкое (более, чем на порядок) увеличение скорости уноса активатора из полости (Рис. 2), что может привести к его быстрому исчерпанию. Т.о., в названной окрестности можно прогнозировать отказ катода в результате фактического разрушения диафрагмы и исчерпания запаса активатора.

Изменение во времени разрядного напряжения  $U$  на Рис. 3, 4 свидетельствует, что главной причиной повышенной скорости эрозии являются повышенные значения связанного с  $U$  потенциала плазмы в отверстии, а значит – и энергии бомбардирующих ионов. Сравнение с графиком изменения радиуса отверстия Рис. 1, однако, показывает, что при одних и тех же значениях  $U$  скорость эрозии при больших  $R_0$  (на заключительном этапе работы катода) больше, чем при меньших  $R_0$  (на начальном этапе). Данное обстоятельство легко объясняется снижением роли переосаждения при больших радиусах отверстия, когда распыленные частицы поверхности легче покидают полость и их концентрация, а значит и плотность потока на поверхность, уменьшается.

При наличии ограничений на потребляемую мощность, в качестве прогнозируемой величины ресурса можно определять момент перехода от плавного изменения напряжения к резкому – 3000 ÷ 12000 час. (Рис. 1) в зависимости от величины тока и расхода.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Нестеренко С.Ю., Оранский А.И. Коэффициент катодного распыления при бомбардировке частицами с энергией ниже условного порога распыления. – В кн.: Материалы VII Всес. конф. "Взаимодействие атомных частиц с твердым телом", Часть I. – Минск, МРТИ, 1984, с.152 – 153.
2. Нестеренко С.Ю., Оранский А.И. Механизм катодного распыления в низковольтном разряде с полым катодом. – В кн.: VI Всес. конф. по плазменным ускорителям и ионным инжекторам. Тез. докл. – Днепропетровск, 1986, с. 58.
3. Долгов А.С., Оранский А.И., Рашкован В.М. К вопросу о механизме разрушения горячих полых катодов в слаботочных дуговых разрядах. – В кн.: Источники низкотемпературной плазмы, Вып. 2. – Харьков, ХАИ, 1977, с. 48 – 53.
4. Савельев И.В. Основы теоретической физики. Т. II, Квантовая механика. – М.: Наука, 1976, 311 с.
5. Нестеренко С.Ю. Физико-математическая модель и методика расчета катодов. Отчет о НИР Г-402-188/92. – Харьков: ХАИ, 1992, 60с.