

УДК 621.3.032.21

А.П. КИСЛИЦЫН, С.Ю. ПОДГОРСКИЙ, А.А. ТАРАН

*Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Украина*

## РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ В АКТИВНОМ СЛОЕ ОКСИДНОГО КАТОДА ПРИ НЕПРЕРЫВНОМ И ИМПУЛЬСНОМ ТОКООТБОРАХ

*Расчитаны температурные поля в слое покрытия оксидного катода толщиной 100 мкм. Расчеты выполнены для непрерывного и импульсного отборов термоэмиссионного тока с учетом только джоулевых источников тепла. Учтены зависимости теплофизических свойств материала оксидного слоя от его температуры. Установлено, что при установившемся отборе тока максимальную температуру имеют сечения, расположенные вблизи эмитирующей поверхности, а не сама поверхность. При импульсном отборе тока в режиме пространственного заряда с частотой импульсов 100 Гц и длительностью 10 мкс температурный режим устанавливается через несколько секунд. В течение импульса температура поверхности возрастает, и ее максимум наблюдается через ~ 0,01 мкс после окончания импульса. В режиме насыщения даже одиночные импульсы приводят к существенному увеличению температуры слоя. При длительностях импульсов более 8 мкс из-за перегрева эмиссионно-активного слоя оксидный катод может выйти из строя.*

**Ключевые слова:** оксидный катод, оксидный слой, температурное поле, непрерывный и импульсный токоотборы, уравнение теплопроводности.

### Общая постановка проблемы, связь с научно-практическими задачами, обзор публикаций и анализ нерешенных проблем

Усовершенствование и дальнейшее развитие электрореактивных двигателей, плазменных двигателей и генераторов плазмы для их использования в космических целях, ионно-плазменных технологических процессах требует создания и применения новых термоэмиссионных катодных материалов.

Однако традиционный оксидный катод (ОК) и его модификации [1, 2] наряду с металлопористыми катодами (пропитанными или прессованными) и в настоящее время остаются одними из наиболее используемых термокатодов. При этом, несмотря на более чем столетнюю историю ОК [3], его исследованиям посвящено большое количество работ [4, 5], что обусловлено многообразием взаимосвязанных процессов, определяющих его работоспособность.

Традиционный ОК в рабочем состоянии представляет собой помещенный на металлическую подложку (кern) слой из смеси кристаллов (твердого раствора) оксидов щелочноземельных металлов – бария, стронция и кальция. В качестве материала керна используют Ni, W, Mo, Re, Pt, Nb, Ta и др. Чаще всего применяют никель и его сплавы, обладающие низкой скоростью испарения при температурах до 1200 К. В связи с этим рабочие температуры оксидного катода не превышают 1100 К при длительном и 1300 К при кратковременном нагреве.

При этом отмечалось [5], что отбор эмиссионного тока приводит к перегреву оксидного покрытия, т.е. в процессе отбора тока температура оксидного слоя возрастает. В работе [6] приведено распределение температуры по толщине слоя при непрерывном отборе тока. Распределение получено на основании аналитического решения упрощенной задачи теплопроводности оксидного слоя. Упрощение связано с линеаризацией уравнения теплопроводности и граничных условий. Подчеркнуто, что такое приближение оправдано только при малых перепадах температуры на слое. Однако для многих случаев, представляющих практический интерес, оно неприменимо. Более точные решения задачи в последующем не осуществлялись.

В последнее время были разработаны новые высокотемпературные оксидные катодные материалы (например, гафнаты [7] и скандаты [2] бария), которые обеспечивают намного большие эмиссионные токи, чем традиционный оксидный катод. Характер распределения температуры в таких катодах, скорее всего, будет повторять характер распределения температуры в традиционном ОК. Это позволяет говорить о том, что нахождение поля температур в активном слое ОК и выяснение влияния на это поле режимов отбора тока является актуальной задачей.

### Цель исследований

Целью проведенных исследований явилось нахождение поля температур в эмиссионно-активном

слое ОК и установление влияния на это поле величины отбираемого тока и характера отбора тока (непрерывный или импульсный).

## Результаты исследований

### 1. Постановка задачи

Поля температур в эмиссионно-активном слое ОК определяются условиями подвода и отвода тепла. Подвод тепла к слою осуществляется двумя способами (рис. 1). С одной стороны, эмиссионно-

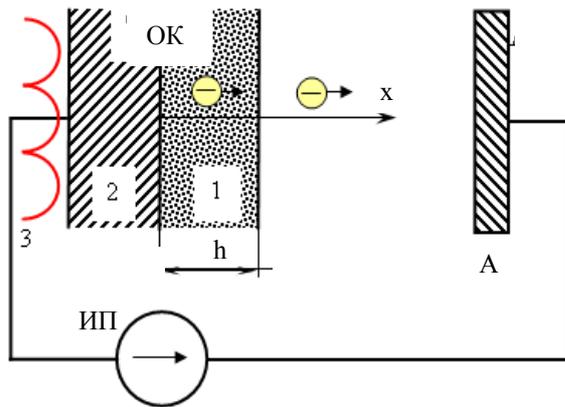


Рис. 1. Анализируемая система катод-анод:  
ОК – оксидный катод; А – анод;  
ИП – источник питания анодной цепи;  
1 – эмиссионно-активный слой; 2 – ядро катода; 3 – катодно-подогревательный узел

активный слой (1) находится на металлическом ядре (2), который разогревается и поддерживается при рабочей температуре катодно-подогревательным узлом (3). При этом оксидный слой получает тепло от ядра, и за счет теплопроводности это тепло распространяется по всему слою, разогревая его. С другой стороны, отбор электронного эмиссионного тока, осуществляемого со свободной эмитирующей поверхности, сопровождается протеканием тока от ядра (2) к эмитирующей поверхности катода через всю толщину слоя (1). В результате этого при отборе эмиссионного тока в объеме слоя появляются распределенные джоулевые источники тепла, которые обеспечивают дополнительный разогрев слоя.

Отвод тепла от слоя осуществляется только с его поверхностей. Поверхность, прилегающую к ядру катода, будем рассматривать как изотемпературную, поскольку температура ядра задается и поддерживается катодно-подогревательным узлом. В случае, когда температура внутренних областей слоя оказывается ниже температуры ядра, через границу «ядро-слой» тепло поступает от ядра в слой. В противном случае тепло через эту поверхность отводится к ядру.

Со свободной (эмитирующей) поверхности оксидного слоя осуществляется только отвод тепла (переизлучениями с поверхности анода пренебрегаем). Этот отвод осуществляется постоянно и обеспечивается, с одной стороны, радиационным путем (тепловое излучение). А с другой – при отборе эмиссионного тока электроны, покидающие поверхность, дополнительно уносят с собой определенную часть тепловой энергии, т.е. наблюдается так называемое электронное охлаждение поверхности.

Теплоотводом с торцевых поверхностей покрытия будем пренебрегать, поскольку их площадь оказывается существенно меньше, чем площадь свободной поверхности (толщина покрытия существенно меньше линейных размеров эмитирующей поверхности).

Таким образом, рассматриваемая задача относится к задачам нестационарной теплопроводности с объемными источниками тепла и граничными условиями третьего рода. При ее решении будем пренебрегать зернистой структурой оксидного слоя и рассматривать его как однородную среду. Наряду с этим, как уже отмечалось, учтем, что толщина покрытия значительно меньше линейных размеров эмитирующей поверхности.

В результате исходную задачу – отыскание поля температур в эмиссионно-активном слое ОК, можно рассматривать как двумерную задачу теплопроводности, т.е. искать  $T = T(x, t)$  исходя из уравнения

$$c\rho \frac{\partial T}{\partial t} - \frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) - q_v = 0, \quad (1)$$

где  $c$  – удельная теплоемкость;

$\rho$  – плотность материала;

$\lambda$  – коэффициент теплопроводности слоя;

$q_v$  – объемная мощность источников тепла.

При этом

$$q_v = \frac{j_{np}^2}{\sigma_e},$$

где  $j_{np}$  – плотность тока, проходящего по слою;

$\sigma_e$  – удельная электрическая проводимость слоя.

Граничные условия к уравнению (1), в соответствии с рассмотренными ранее процессами, будут иметь следующий вид:

1) граница «ядро - покрытие» ( $x = 0$ ):

температура этого сечения покрытия постоянна и равна температуре ядра, т.е.

$$T|_{x=0} = T_c = \text{const}; \quad (2)$$

2) свободная (эмитирующая) поверхность покрытия ( $x = h$ ):

а) в отсутствие отбора тока (идет только радиационный отвод тепла)

$$\left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{x=h} = -\frac{1}{\lambda} (\varepsilon \sigma T_s^4), \quad (3)$$

где  $\varepsilon$  – интегральный коэффициент излучения поверхности оксидного покрытия;

$\sigma$  – постоянная Стефана - Больцмана;

$T_s$  – температура свободной поверхности слоя.

б) при отборе эмиссионного тока к радиационному отводу тепла добавляется электронное охлаждение

$$\left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{x=h} = -\frac{1}{\lambda(T)} \left( \varepsilon \sigma T_s^4 + \frac{A_{\text{ВЫХ}}}{e} j \right), \quad (4)$$

где  $A_{\text{ВЫХ}}$  – работа выхода электрона катодного материала;

$e$  – элементарный заряд;

$j$  – плотность тока, отбираемого с эмитирующей поверхности.

Пространственная одномерность задачи с учетом предположения об однородности оксидного слоя позволяет утверждать, что плотность тока, проходящего по слою во всех сечениях одинакова и равна плотности эмиссионного тока, отбираемого от катода с его эмитирующей поверхности ( $j_{\text{пр}} = j$ ).

Уравнение теплопроводности в поставленной задаче было записано в конечноразностном виде и решалось методом прогонки с применением итераций на каждом временном шаге вычислений. Итерации выполнялись до тех пор, пока рассогласование в распределении температур по толщине слоя не становилось менее  $10^{-3}$  К.

Распределения температуры по глубине слоя оксидного покрытия (температурные поля) были рассчитаны для температур ядра в диапазоне от 900 до 1050 К, толщины оксидного слоя, равной 100 мкм, и различных значений плотности тока, проходящего через слой.

Допуская достаточно большие изменения температуры в оксидном покрытии за счет его разогрева проходящим током, были учтены температурные зависимости теплофизических характеристик материала покрытия. Так, для коэффициента теплопроводности толстых оксидных покрытий на основании данных, приведенных в [6], получено соотношение

$$\lambda(T) = 6 \cdot 10^{-14} T^4 \text{ (Вт} \cdot \text{м}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}\text{)}.$$

Для удельной электрической проводимости толстых оксидных покрытий [8] рекомендует

$$\sigma_e(T) = 10 \exp\left(-\frac{\Delta E}{2kT}\right) \text{ (См} \cdot \text{м}^{-1}\text{)},$$

где  $\Delta E = 0,89$  эВ – энергия активации проводимости;

$k$  – постоянная Больцмана.

Для температурной зависимости интегрального коэффициента излучения оксидного покрытия, имеющего толщину 80 мкм, согласно экспериментальным данным, приведенным в [6], можно записать

$$\varepsilon(T) = 0,24 - \frac{0,04}{600} (T_s - 473)$$

в диапазоне температур от 473 до 1073 К.

Температурная зависимость работы выхода электрона рассчитывалась в приближении высоких температур без учета влияния валентной зоны. Для предполагаемого диапазона температур (на основании рекомендаций [9]) была выбрана следующая энергетическая структура электронов: энергия донорного уровня  $E_d = 0,7$  эВ и концентрация доноров  $n_d = 10^{23} \text{ м}^{-3}$ .

## 2. Стационарный отбор тока

Первоначально были проведены расчеты полей для режимов с непрерывным отбором эмиссионного тока от катода. Полученные результаты свидетельствуют о том, что характер распределения температур по глубине оксидного покрытия ОК практически не зависит от температуры ядра. Поэтому для иллюстрации характера поля температур на рис. 2 приведены распределения, которые имеют место при температуре ядра  $T_c = 900$  К и различных плотностях отбираемого эмиссионного тока, проходящего через покрытие и разогревающего его. В отсутствие отбора тока (линия 0 на рис. 2) распределение температуры является практически линейным с температурой поверхности, близкой к 880 К. При такой температуре поверхности, материал оксидного покрытия, обладающий описанной выше энергетической структурой, может обеспечить плотность эмиссионного тока, несколько превышающую  $0,5 \text{ А/см}^2$ .

Проходящий (отбираемый) ток приводит, как и ожидалось, к увеличению температуры оксидного

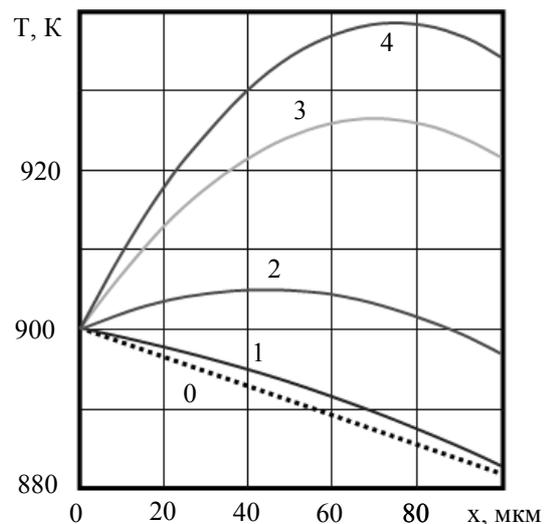


Рис. 2. Распределения температуры по глубине слоя оксидного покрытия ОК при различных плотностях отбираемого тока,  $j$ ,  $\text{А/см}^2$ : 0 – 0; 1 – 0,125; 2 – 0,25; 3 – 0,375; 4 – 0,5

слоя, и распределения температуры по глубине слоя отклоняются от линейного. Увеличение температуры слоя оказывается тем больше, чем больше плотность отбираемого тока (см. кривые 1–4). Так, при плотности отбираемого тока близкой к предельно возможной ( $0,5 \text{ A/cm}^2$ ; кривая 4), внутренние области слоя нагреваются до температуры  $\approx 940 \text{ K}$ , а поверхность до  $\approx 935 \text{ K}$ . Такие перегревы являются существенными для оксидного покрытия.

Расчеты, проведенные для различных температур ядра, показали, что в случае неизменной плотности отбираемого тока перегрев оксидного слоя уменьшается в случае повышения температуры ядра (рис. 3). Такое поведение объясняется тем, что рост температуры ядра и соответственно температуры оксидного слоя, сопровождаются увеличением электро- и теплопроводности слоя. В результате этого уменьшается мощность источников джоулевого тепла в слое и улучшается отвод тепла на границе слоя, что и влечет за собой уменьшение перегрева оксидного слоя.

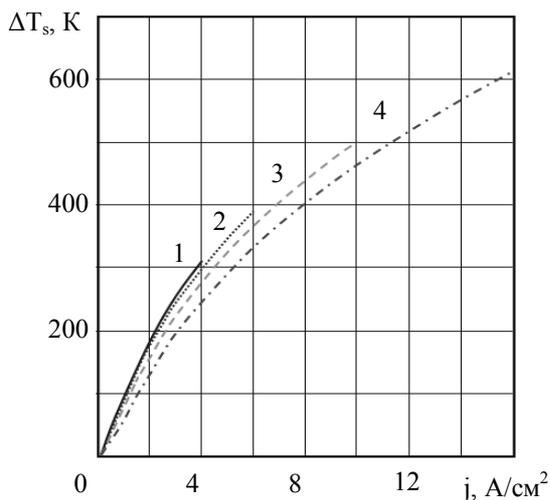


Рис. 3. Зависимости увеличения температуры эмитирующей поверхности от плотности отбираемого тока при различных температурах ядра.  $T_c$ , K: 1 – 950; 2 – 970; 3 – 1000; 4 – 1050

Результаты, представленные на рис. 3, кроме того, свидетельствуют о том, что при плотностях отбираемых токов, превышающих  $1 \text{ A/cm}^2$ , достаточно толстые оксидные покрытия ( $100 \text{ мкм}$ ) будут иметь крайне высокий перегрев, составляющий сотни градусов. Такие перегревы не только существенно сократят срок службы катодов, но и могут привести к разрушению оксидного покрытия. Возможностью таких перегревов и объясняются ограничения на величину тока, отбираемого от ОК в устройствах с непрерывным отбором тока.

Возвращаясь к распределению температур по толщине оксидного слоя (см. рис. 2), отметим, что максимальную температуру имеют не поверхност-

ные слои, как прогнозирует упрощенное аналитическое решение в [6], а внутренние слои, прилегающие к свободной поверхности. При увеличении плотности отбираемого тока наиболее нагретые сечения смещаются к свободной (эмитирующей) поверхности покрытия. На рис. 4 приведены зависимости координат расположения наиболее нагретых сечений оксидного слоя от величины плотности отбираемого тока для различных температур ядра. Увеличение температуры ядра приводит к смещению этих сечений вглубь оксидного слоя. При этом они располагаются в относительно узкой области покрытия, которая сокращается при увеличении отбираемой плотности тока. Так, при плотности тока  $1 \text{ A/cm}^2$  наиболее нагретые сечения покрытия расположены по отношению к эмитирующей поверхности на глубинах от  $\sim 10 \text{ мкм}$  при  $T_c = 950 \text{ K}$  до  $14 \text{ мкм}$  при  $T_c = 1050 \text{ K}$ . При плотности тока  $2 \text{ A/cm}^2$  область залегания наиболее нагретых сечений лежит в пределах от  $7 \text{ мкм}$  при  $T_c = 950 \text{ K}$  до  $9 \text{ мкм}$  при  $T_c = 1050 \text{ K}$ . В случае плотностей тока более  $10 \text{ A/cm}^2$  глубина залегания наиболее нагретых сечений практически не зависит от температуры ядра и составляет  $5 - 6 \text{ мкм}$ .

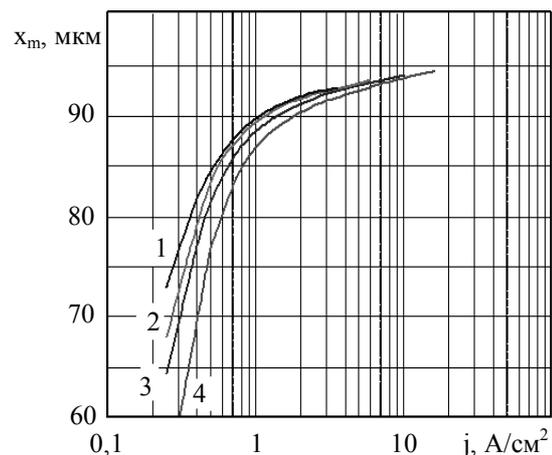


Рис. 4. Зависимости координат расположения наиболее нагретых сечений от величины плотности отбираемого тока для различных температур ядра.  $T_c$ , K: 1 – 950; 2 – 970; 3 – 1000; 4 – 1050

### 3. Импульсный отбор тока

Поля температуры в оксидном слое и их изменения при импульсном отборе тока рассчитывалось для импульсов длительностью  $10 \text{ мкс}$ . Рассматривались случаи посылки как одиночных импульсов, так и с частотой  $100 \text{ Гц}$ . Изменение распределений температуры по глубине слоя при отборе одиночного импульса тока (или первого в серии импульсов) представлено на рис. 5. Интересным оказывается тот факт, что начальное (близкое к линейному) распре-

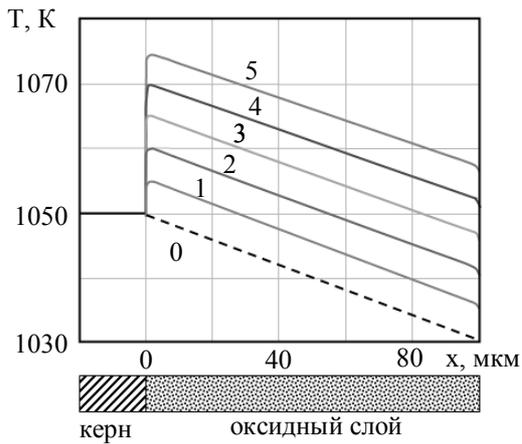


Рис. 5. Поле температур оксидного слоя в различные моменты времени после начала отбора тока плотностью  $j = 15 \text{ A/cm}^2$ .  $t$ , мкс: 0 – 0; 1 – 2; 2 – 4; 3 – 6; 4 – 8; 5 – 10

деление температуры (кривая 0) сохраняется практически линейным в течение всего импульса, т.е. в течение 10 мкс (кривые 1–5). Отклонения от линейного распределения наблюдаются только на границах оксидного покрытия. Это свидетельствует о том, что все сечения слоя, за исключением весьма близких к границам, нагреваются за одинаковые промежутки времени на один и тот же диапазон температур. Такой равномерный разогрев сечений покрытия может быть обусловлен весьма низкой теплопроводностью материала и достаточно равномерным распределением объемных источников тепла. В результате этого тепловая энергия, выделяющаяся в каждом сечении покрытия, не успевает отводиться к его границам, а идет главным образом на увеличение внутренней энергии, характеризуемой температурой.

Температура эмитирующей поверхности, также как и температура любого другого сечения оксидного покрытия (за исключением прилегающих к керну), возрастает в течение отбираемого импульса тока. Зависимости температуры эмитирующей поверхности от времени в течение импульса для различных величин плотностей отбираемого тока представлены на рис. 6. Перегрев поверхности за время первого импульса оказывается много меньше, чем в случае непрерывного отбора тока, но все-таки достаточно заметным. Так, при температуре зерна, равной 1050 К, и исходной температуре эмитирующей поверхности, равной 1030 К, отбор эмиссионного тока плотностью  $10 \text{ A/cm}^2$  приводит к перегреву поверхности на 13 К после первого импульса. В режиме непрерывного отбора тока этот перегрев достигает 460 К.

Достаточно важным процессом в работе ОК с импульсным отбором тока является процесс охлаждения оксидного слоя после прекращения отбора тока. Результаты расчета изменений температуры по

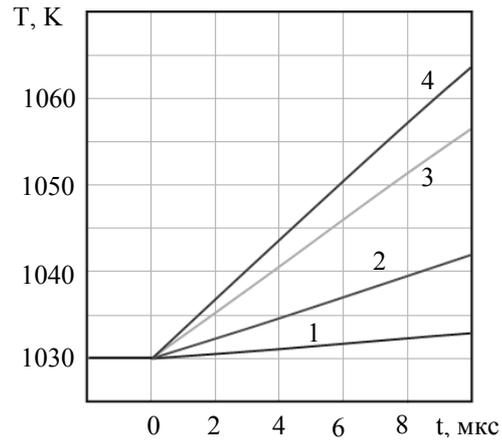


Рис. 6. Временные зависимости температуры эмитирующей поверхности в течение первого импульса при различных плотностях тока.  $j$ ,  $\text{A/cm}^2$ : 1 – 5; 2 – 10; 3 – 15; 4 – 17

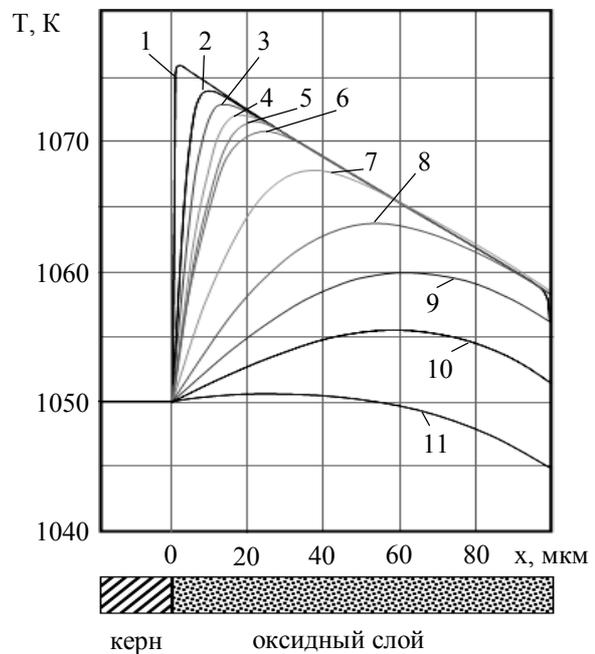


Рис. 7. Распределения температуры по толщине покрытия для различных времен после прекращения отбора тока: 1 – 0 мкс; 2 – 2 мкс; 3 – 4 мкс; 4 – 6 мкс; 5 – 8 мкс; 6 – 10 мкс; 7 – 27,6 мс; 8 – 82,7 мс; 9 – 165,4 мс; 10 – 303,3 мс; 11 – 600 мс

толщине покрытия, которые происходят после прекращения первого импульса отбора тока, представлены на рис. 7. Они свидетельствуют о том, что наиболее быстро изменяется температура сечений слоя, прилегающих к керну. Свободная поверхность оксидного слоя охлаждается значительно медленнее. Снижение температуры поверхности становится заметным приблизительно через 90–100 мс, а восстановление с точностью до  $\sim 1,0 \text{ K}$  исходного невозмущенного распределения температуры происходит через более, чем 4 с после окончания импульса. Ма-

лая скорость охлаждения оксидного слоя в целом связана с его весьма низкой теплопроводностью. Существенное различие в скоростях охлаждения различных областей слоя (прилегающих к разным границам) обусловлено различием тепловых потоков, отводимых от них. Величины тепловых потоков определяются температурными напорами (градиентами температуры) в рассматриваемых областях. Сразу после окончания первого импульса максимальный температурный напор имеет сечение вблизи границы «кern - слой». Именно поэтому сечения оксидного слоя, прилегающие к данной границе, на начальном этапе после окончания первого импульса отбора тока охлаждаются наиболее быстро.

Инерционность процесса охлаждения, отмеченная выше, приводит к тому, что при отборе тока серий импульсов невозмущенное распределение температуры перед каждым последующим импульсом будет иметь место только в том случае, когда период посылок будет больше критического: для рассмотренного случая – 4 с. При значениях периода меньше критического полного восстановления поля температур в оксидном слое наблюдаться не будет. В этом случае к моменту прихода второго импульса (и последующих) распределение температуры по глубине слоя окажется несовпадающим с распределением перед началом первого (предыдущего) импульса. С каждым импульсом величина перегрева будет возрастать, причем внутренние области оксидного слоя будут перегреваться сильнее. В результате в покрытии установится распределение температур, характеризуемое относительно малым «ходом» в течение периода.

Результаты расчета, представленные на рис. 8, свидетельствуют о том, что «ход» температур в любом произвольном сечении слоя в «установившемся» состоянии оказывается небольшим. При частоте посылок импульсов 100 Гц длительностью 10 мкс с отбором плотности тока  $2 \text{ A/cm}^2$  «ход» температур не превышает 1 К, а при отборе плотности тока  $5 \text{ A/cm}^2$  – 5 К. Характер распределений температуры по толщине покрытия оказывается таким же, как и в случае непрерывного отбора тока (см. рис. 2), т.е. наиболее нагретыми оказываются сечения оксидного слоя, залегающие вблизи эмитирующей поверхности.

Продолжительность перехода к «установившемуся» распределению температур при отборе тока импульсами длительностью 10 мкс с частотой посылок 100 Гц составляет 1 – 2 с и слабо зависит от величины отбираемой плотности тока (см. рис. 9).

При отборе эмиссионного тока наблюдается электронное охлаждение поверхности. Этот процесс был учтен при постановке задачи, и теперь проанализируем его влияние. На рисунке 10 представлен

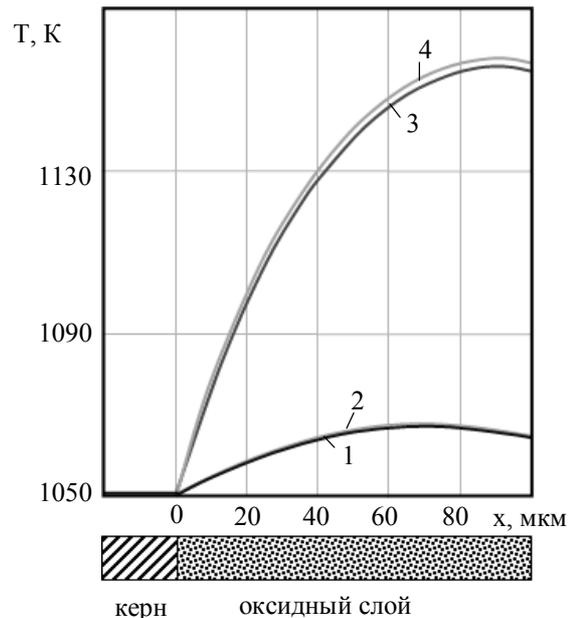


Рис. 8. Распределения температуры по толщине слоя при установившемся импульсном токоотборе.  $j$ ,  $\text{A/cm}^2$ : 1, 2 – 2; 3, 4 – 5. 1, 3 – перед импульсом; 2, 4 – после импульса

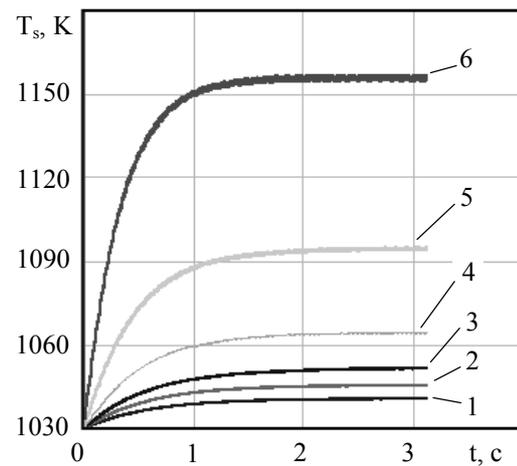


Рис. 9. Временная зависимость температуры эмитирующей поверхности при  $\tau = 10 \text{ мкс}$ ,  $\nu = 100 \text{ Гц}$  для различных токоотборов.  $j$ ,  $\text{A/cm}^2$ :

1 – 1; 2 – 1,25; 3 – 1,5; 4 – 2; 5 – 3; 6 – 5

«ход» температуры эмитирующей поверхности в начальные моменты времени отбора эмиссионного тока для различных плотностей тока. Из приведенных графиков видно, что снижение температуры за счет электронного охлаждения имеет место, но оказывается весьма незначительным. Так, при плотностях тока до  $17 \text{ A/cm}^2$  снижение температуры не превышает 0,1 К. Кроме того, это снижение наблюдается в течение короткого промежутка времени (0,17 мкс при  $5 \text{ A/cm}^2$  и 0,05 мкс при  $17 \text{ A/cm}^2$ ). Столь малое влияние электронного охлаждения на температуру эмитирующей поверхности ОК, скорее

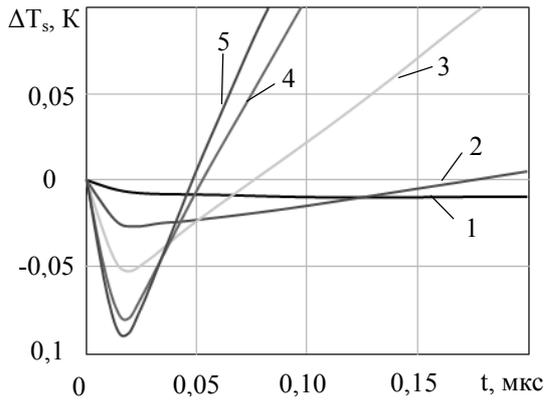


Рис. 10. Изменения температуры эмитирующей поверхности в начальные моменты времени при различных токоотборах.  $j$ ,  $A/cm^2$ :  
1 – 1; 2 – 5; 3 – 10; 4 – 15; 5 – 17

всего, связано с его малым вкладом в общий тепловой баланс эмитирующей поверхности оксидного слоя. В начальные моменты времени отбора тока, когда дополнительный разогрев оксидного слоя проходящим током еще незначителен и потоки тепла к поверхности, обусловленные теплопроводностью, относительно малы, влияние электронного охлаждения становится наблюдаемым. При этом увеличение плотности отбираемого тока с одной стороны приводит к увеличению потока энергии, отводимой от поверхности электронами (электронное охлаждение), а с другой – сопровождается ростом мощности джоулевых источников тепла во всех сечениях слоя. В результате совместного действия этих факторов несколько возрастает начальное снижение температуры и сокращается время такого охлажденного состояния.

Электронное охлаждение проявляет себя и после прекращения отбора тока. В течение короткого промежутка времени ( $\sim 0,01$  мкс) температура поверхности возрастает на несколько градусов (рис. 11).

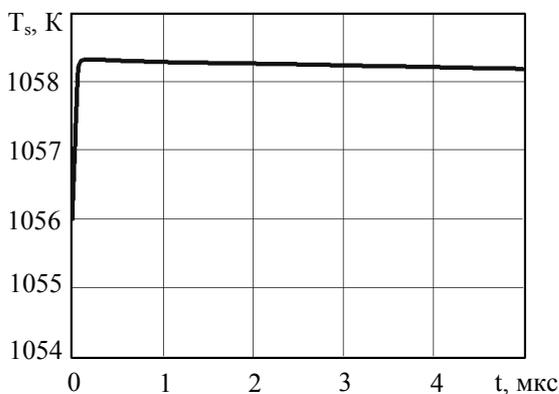


Рис. 11. Зависимость температуры поверхности от времени после прекращения однократного импульса отбора тока ( $\tau = 10$  мкс,  $j = 15 A/cm^2$ )

Это, на первый взгляд, парадоксальное увеличение температуры поверхности обусловлено не самим электронным охлаждением, а резким исчезновением потока тепла, отводимого от поверхности отбираемыми электронами.

Еще один результат представляет заметный интерес. Это изменение температуры эмитирующей поверхности при отборе тока насыщения, т.е. при отборе всех электронов, эмитированных поверхностью (см. рис. 12). Из графика видно, что в этом случае темп роста температуры поверхности в течение импульса все время возрастает. Так, через 2 мкс после начала импульса перегрев поверхности составляет приблизительно 10 К, через 4 мкс – 20 К, через 6 мкс – 40 К, а через 8 мкс перегрев составляет 90 К. После 9-ой микросекунды отбора тока идет лавинообразный рост температуры поверхности, который может привести к необратимым изменениям состава и структуры активного слоя и потере катодом его эмиссионных свойств. Отметим, что в этом случае начальная температура поверхности составляет 1030 К.

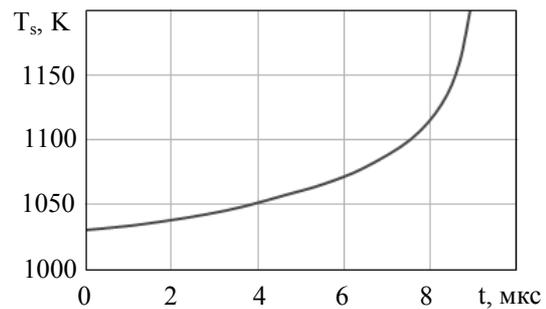


Рис. 12. Зависимость температуры поверхности ОК от времени в режиме насыщения

Такой перегрев в течение одиночного импульса в обязательном порядке должен учитываться при измерениях эмиссионных свойств материалов ОК: длительность измерительного импульса должна быть меньше 8 мкс.

### Выводы

В ОК при отборе эмиссионных токов как в непрерывном, так и в импульсном режиме наиболее нагретыми оказываются сечения оксидного слоя прилегающие к поверхности. Для толстых (100 мкм) оксидных покрытий глубина залегания сечений, имеющих максимальную температуру, составляет 5 – 15 мкм относительно эмитирующей поверхности. При неизменной температуре зерна увеличение плотности отбираемого тока приводит к более сильному разогреву оксидного покрытия и смещению наиболее нагретых сечений к свободной поверхности покрытия.

Энергия, уносимая электронами с поверхности ОК, для рассмотренных случаев составляет незначительную долю в общем тепловом балансе катода, что определяет малое влияние электронного охлаждения на величину температуры эмитирующей поверхности.

В температурном режиме поверхности катода это влияние проявляется только в течение коротких промежутков времени ( $\sim 0,01$  мкс) в начале и конце отбора тока. В начальные моменты отбора тока, даже при отборе плотностей тока  $\sim 17$  А/см<sup>2</sup>, наблюдается снижение температуры поверхности на десятые доли градуса. После прекращения отбора тока температура поверхности повышается на несколько градусов. Максимальную температуру имеет поверхность не в конце импульса отбора тока, а приблизительно через 0,01 мкс после прекращения отбора тока.

После прекращения отбора тока восстановления распределения температуры по слою оксидного покрытия происходит в течение нескольких секунд. В результате при периодическом отборе эмиссионного тока с частотой выше  $\sim 0,2$  Гц установившаяся температура поверхности оказывается выше исходной температуры перед началом отбора тока. Наличие такого перегрева оксидного слоя приводит к необходимости ограничения величины анодного тока, отбираемого от ОК, не только в непрерывном, но и в импульсном режиме работы катода.

Время выхода оксидного покрытия на установившийся температурный режим при фиксированном значении отбираемой плотности тока с длительностью импульсов 10 мкс и частотой посылок 100 Гц составляет несколько секунд. Это время слабо зависит от величины плотности отбираемого тока.

При работе ОК в области насыщения, т.е. при отборе всех электронов, эмитированных оксидным слоем, происходит существенное увеличение температуры оксидного слоя как в импульсном режиме токоотбора, так и при одиночных импульсах. При длительностях одиночных импульсов, превышающих 8 мкс, увеличение температуры поверхности оксидного слоя составляет сотни градусов, что должно приводить к потере катодом своей эмиссионной активности. Для традиционных оксидных катодов такая потеря активности может оказаться невосстанавливаемой.

### Заключение

Полученный результат представляет существенный интерес не только для объяснения особенностей поведения ОК и физического обоснования выбора его эксплуатационных параметров, но и для более глубокого понимания процессов, происходя-

щих в оксидном слое и определяющих его эмиссионные свойства.

Не меньший интерес к полученным результатам связан с новыми высокотемпературными оксидными катодами. Так, композиционные катодные материалы на основе гафнатов или скандатов бария в своем поведении подобны традиционному оксидному катоду. Поэтому можно ожидать, что температурные поля и их изменения при отборе тока будут аналогичны полученным результатам. При этом выявленный существенный «ход» температуры в объеме и на поверхности ОК должен учитываться при проведении исследований эмиссионных свойств новых материалов для обеспечения достоверности информации об этих свойствах.

### Литература

1. Евстигнеев, С.И. Катоды и подогреватели электровакуумных приборов [Текст] / С.И. Евстигнеев, А.А. Ткаченко. – 2-е изд. – М.: Высш. шк., 1975. – 196 с.
2. Ашкинази, Л.А. Результаты в области термо- и вторичноэлектронных катодов за 1990–2010 годы [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [http://www.lit.lib.ru/a/ashkinazi\\_1\\_a/text\\_0070.shtml](http://www.lit.lib.ru/a/ashkinazi_1_a/text_0070.shtml). – 01.09.2011.
3. Gaertner, G. Hundred years anniversary of the oxide cathode – A historical review [Text] / G. Gaertner, D. den Engelsen // Appl. Surf. Sci. – 2005. – Vol. 251, № 1–4. – P. 24–30.
4. Светцов, В.И. Физическая электроника и электронные приборы [Текст]: учеб. пособие / В.И. Светцов, И.В. Холодков. – Иваново: Иван. гос. хим.-технол. ун-т, 2008. – 494 с.
5. Ашкинази, Л.А. Материалы электронных эмиттеров. Ч. II. Термоэлектронные катоды [Текст]: учеб. пособие / Л.А. Ашкинази, В.С. Петров. – М.: Печ. цех Моск. гос. ин-та электроники и математики, 1997. – 58 с.
6. Мойжес, Б.Я. Физические процессы в оксидном катоде [Текст] / Б.Я. Мойжес. – М.: Наука, 1968. – 479 с.
7. Пат. на винахід № 97045 Україна, МПК H01J1/00. Матеріал для термоелектронного катода [Текст] / О.П. Кислицын, А.О. Таран, С.С. Орданьян, П.А. Комозинський, С.І. Планковський (Україна); заявник й патентовласник Нац. аерокосм. ун-т ім. М.Є. Жуковського „Харк. авіац. ін-т”. – № а 2010 11383; заявл. 24.09.2010; надрук. 26.12.2011, Бюл. № 24. – 2 с.
8. Спарк, И.Л. Измерение электропроводности оксидных катодов методом задерживающего потенциала [Текст] / И.Л. Спарк, Г.Р. Филипп // Эффективные термокатоды: сб. науч. тр. – М.-Л.; Госэнергоиздат, 1958. – Вып. 1. – С. 64–74.
9. Кислицын, А.П. Перераспределение электронов по энергетическим состояниям и работа выхо-

да электрона полупроводниковых катодов донорного типа [Текст] / А.П. Кислицын, А.А. Таран, Е.К. Островский // Вісті Академії інженерних наук

України. Машинобудування та прогресивні технології. – 2005. – № 3 (26). – С. 144–149.

Поступила в редакцію 14.05.2012

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф., проф. каф. інформатики М.Л. Угрюмов, Национальний аэрокосмічний університет ім. Н.Е. Жуковського «ХАІ», Харків.

### РОЗПОДІЛ ТЕМПЕРАТУРИ У АКТИВНОМУ ШАРІ ОКСИДНОГО КАТОДА ПРИ БЕЗПЕРЕРВНОМУ ТА ІМПУЛЬСНОМУ СТРУМОВІДБОРАХ

*О.П. Кислицын, С.Ю. Подгорський, А.О. Таран*

Розраховані температурні поля в шарі покриття оксидного катода завтовшки 100 мкм. Розрахунки виконані для безперервного та імпульсного відборів термоємійного струму з урахуванням тільки джоулевих джерел тепла. Враховані залежності теплофізичних властивостей матеріалу оксидного шару від його температури. Встановлено, що при усталеному відборі струму максимальну температуру мають перерізи, що розташовані поблизу емітувальної поверхні, а не сама поверхня. При імпульсного відбору струму у режимі просторового заряду з частотою імпульсів 100 Гц та їх тривалості 10 мкс температурний режим катода встановлюється за декілька секунд. Протягом імпульсу температура поверхні зростає, і її максимум спостерігається за  $\sim 0,01$  мкс після закінчення імпульсу. У режимі насичення навіть одиночні імпульси призводять до суттєвого збільшення температури шару. При тривалості імпульсів більшій, ніж 8 мкс, через зростання температури емісійно-активного шару оксидний катод може вийти з ладу.

**Ключові слова:** оксидний катод, оксидний шар, температурне поле, безперервний відбір та імпульсний струмовідбори, рівняння теплопровідності.

### TEMPERATURE DISTRIBUTION ALONG THE ACTIVE LAYER OF THE OXIDE CATHODE UNDER THE CONTINUOUS AND PULSE CURRENT TAKE-OFFS

*O.P. Kyslytsyn, S.Yu. Podgorskiy, A.O. Taran*

Temperature fields in the oxide cathode coating layer thickness 100  $\mu\text{m}$  have been calculated. Calculations for the continuous and pulse thermionic current take-offs with a glance joule heat sources are carried out. Thermophysical material properties dependences on temperature are taken into account. It has been found that the peak temperature have sections near emitting surface (not the surface itself) to oxide layer heating at the stationary current take-off. Temperature regime becomes established in a few seconds time at the pulse current take-off with pulse rate 100 Hz and duration 10  $\mu\text{s}$ . In this case the current is limited by the volume charge. Surface cathode temperature increases with pulse duration and has the maximum value in  $\sim 0,01$   $\mu\text{s}$  after pulse. Even single pulse in the saturation regime leads to the additional heating of the layer. The failure may occur at pulse duration more than 8  $\mu\text{s}$ , through the layer overheating.

**Key words:** oxide cathode, oxide layer, temperature field, continuous and pulse current take-offs, thermal conduction equation.

**Кислицын Александр Петрович** – канд. техн. наук, доц., доцент каф. фізики, Национальний аэрокосмічний університет ім. Н.Е. Жуковського «Харьковский авиационный институт», Харків, Україна, e-mail: apkyslytsyn@mail.ru.

**Подгорский Станислав Юрьевич** – студент каф. прочності ЛА, Национальний аэрокосмічний університет ім. Н.Е. Жуковського «Харьковский авиационный институт», Харків, Україна, e-mail: entomolog.91@gmail.com.

**Таран Анатолий Алексеевич** – канд. физ.-мат. наук, проф., зав. каф. фізики, Национальний аэрокосмічний університет ім. Н.Е. Жуковського «Харьковский авиационный институт», Харків, Україна, e-mail: anatoliytaran@rambler.ru.