

С Т А Т Ь И

УДК 621.362:537.533

РЕСУРСНЫЕ СВОЙСТВА ЭЛЕКТРОДОВ ОДНОЭЛЕМЕНТНОГО ЭЛЕКТРОГЕНЕРИРУЮЩЕГО КАНАЛА ТЕРМОЭМИССИОННОЙ ЯЭУ «ЕНИСЕЙ»

Корюкин В.А. (РНЦ «Курчатовский ин-т»)

Успехи в проектировании, создании и испытании опытных космических ЯЭУ, оснащенных электрогенерирующими каналами (ЭГК) на основе термоэмиссионного метода преобразования энергии, в значительной степени обусловлены многолетними исследовательскими работами по изучению функционирования установок и их элементов и совершенствованию технологии изготовления [1—4]. Тем не менее исследования ресурсоспособности ЭГК и изучение стабильности их выходных характеристик остаются немногочисленными как в экспериментальном, так и в расчетном плане. В основном такие работы направлены на выявление факторов, приводящих к отказам в работе преобразователей и возникновению условий существенного деградационного характера изменения выходных характеристик. Определяющими являются нейтронно-физические и механические свойства ядерного топлива и материалов, применяемых в конструкциях ЭГК, в условиях реакторного облучения и воздействия высокой температуры [5]. Не менее важными факторами являются также различные процессы в межэлектродном зазоре и на поверхностях электродов ЭГК. К ним относится адсорбция на поверхности электродов атомов остаточных газов, присутствующих в зазоре, и атомов, диффундирующих из объема электродов и появляющихся путем газовой выделения из конструкционных материалов, а также массоперенос материала эмиттера на коллектор и влияние газообразных продуктов деления ядерного топлива. Для прогнозирования ресурсоспособности электродов одноэлементных ЭГК вначале были изучены процессы, наиболее сильно влияющие на изменение их свойств [6].

В настоящей статье приводятся результаты систематического измерения ресурсных эмиссионных характеристик электродов одноэлементных ЭГК и анализ экспериментальных данных, дается прогноз стабильной работы одноэлементных ЭГК на длительный ресурс. В процессе исследований были определены как эмиссионные свойства, так и элементный состав поверхностей эмиттерных и коллекторных электродов, отработавших в составе ЯЭУ и установок с электронагревом до 14 тыс. ч и 27 тыс. ч соответственно в РНЦ «Курчатовский институт», ГосНИИ НПО «Луч» и СФТИ им. И. Веква.

Конструкция одноэлементного ЭГК. Конструкция Е-16МО одноэлементного ЭГК опытных установок, являющихся прототипами космического реактора-преобразователя «Енисей» («Топаз-2»), подробно описывается в работах [7, 8]. В отличие от многоэлементных ЭГК («Топаз-1»), в которых отдельные электрогенерирующие элементы с ядерным топливом внутри соединены последовательно, в одноэлементном ЭГК по всей длине твэла расположен один электрогенерирующий элемент со сквозным центральным каналом. Таким образом, отличительной чертой конструкции является наличие длинных соосных цилиндрических поверхностей эмиттера и коллектора с зазором между ними 0,5 мм. Эмиттером одноэлементного ЭГК служит цилиндрическая труба диаметром 19,6 мм из жаропрочного монокристаллического сплава $\text{Mo}-3,6\% \text{Nb}$

с осевой кристаллографической ориентацией $\langle 111 \rangle$. На внешнюю поверхность трубы на длине 500 мм методом газозафазного осаждения с использованием хлоридной технологии нанесено изотопное вольфрамовое покрытие (^{184}W) толщиной около 0,1 мм. Готовый эмиттер, обычно обозначаемый как $\text{W}_{\text{хл}}\langle 111 \rangle$, имеет на своей поверхности 12 чередующихся между собой через 30° кристаллографических направлений $\langle 110 \rangle$ и $\langle 112 \rangle$.

Коллекторный электрод ЭГК выполнен из поликристаллического молибденового сплава $\text{Mo}-0,2\%\text{Ru}$ (СМ-4). Он входит составной частью в коллекторный пакет с гелиевыми зазорами и системой охлаждения. Между эмиттером и коллектором располагаются шесть поясов дистанционаторов, удерживающих межэлектродный зазор в заданных начальных пределах. Материалом дистанционаторов является Sc_2O_3 .

Эмиттер одноэлементного ЭГК может нагреваться как ядерным топливом при работе в составе реактора-преобразователя или петлевого канала исследовательского реактора, так и с помощью специальных электронагревателей на тепловых стендах при различной отработке режимов ЭГК. В рабочем режиме электроды одноэлементного ЭГК являются существенно неизотермичными с максимальной температурой в центре эмиттерного электрода $T_3 = 1825-1870$ К и постепенным понижением к границе эмиттера до 1550 К. В начальном номинальном режиме в межэлектродном зазоре ЭГК давление остаточных газов и цезия составляет $10^{-3}-10^{-5}$ Па и $1 \cdot 10^2$ Па соответственно.

В качестве конструкционных материалов в ЭГК применяются сплавы ниобия и молибдена, отдельные элементы выполнены из нержавеющей стали. Изоляторами служат покрытия из Al_2O_3 .

Объекты исследования и методики измерения эмиссионно-адсорбционных характеристик электродов. Исследованию были подвергнуты материалы электродов одноэлементных ЭГК ЯЭУ «Енисей», а также ЭГК, прошедшие полномасштабные испытания на тепловых стендах с электронагревом и в петлевых каналах ЛИ исследователя реактора ВВР-2. Свойства материалов исследовали до начала работы электродов в составе электрогенерирующих каналов, после цикла термовакуумных испытаний ЭГК и завершения их работы.

Для измерения характеристик электродов одноэлементных ЭГК, отработавших определенный ресурс, необходимо было их разобрать, после чего можно было визуально оценить состояние. В выбранном месте ЭГК вырезали небольшие образцы электродов для дальнейшего измерения работы выхода и определения элементного состава поверхностей. Эмиссионно-адсорбционные свойства электродов ЭГК ЯЭУ, одиночных ЭГК петлевых каналов и ЭГК, проходивших испытания на тепловых стендах, определяли с помощью модернизированного термоэмиссионного микроскопа [9, 10]. Для контроля состояния поверхностей и приповерхностных слоев образцов электродов ЭГК использовали микрорентгеновский анализатор и оже-спектрометр [6].

Исзуемые образцы электродов ЭГК обычно представляли собой фрагменты эмиттера или коллектора ЭГК площадью 7×8 мм. При измерениях на микроскопе в торцевых частях образцов формировали цилиндрические углубления, моделирующие «абсолютно черное тело» диаметром 0,7 мм при глубине 4 мм для пирометрических измерений температуры. В другие углубления в торцах образцов помещали вольфрам-рениевые или другие термпары. Методики измерения работы выхода электродов и определения элементного состава их поверхностей подробно излагаются в работе [6]. Ускоренные ресурсные испытания эмиттеров ЭГК проводили по методике [11] (см. табл. 1).

Т а б л и ц а 1. Основные объекты ресурсных испытаний

Время работы, ч	Характер испытаний	Место испытаний	Образцы коллектора	Образцы эмиттера
0—100	Лабораторный ТЭП	РНЦ «Курчатовский институт», НПО «Луч»	ТЭП	ТЭП
300	Лабораторный ТЭП и тепловой стенд	То же	ТЭП, ЭГК	ТЭП, ЭГК
2500	Тепловой стенд	НПО «Луч»	ЭГК № 171347	Ускоренные испытания
4800	Петлевой канал	РНЦ «Курчатовский институт»	Л-10, -12	Л-11
5500	Тепловой стенд	НПО «Луч»	ЭГК № 173118	Ускоренные испытания
8450	То же	То же	ЭГК № 175096	ЭГК № 175096
10 090	Петлевой канал	РНЦ «Курчатовский институт»	Л-13	Ускоренные испытания
11 000	Тепловой стенд	НПО «Луч»	ЭГК № 177722	
12 380	В составе реактора-преобразователя Я-81	РНЦ «Курчатовский институт»	ЭГК № 3, 26	ЭГК № 1, 3, 7, 26
14 000	В составе реактора-преобразователя Я-24	То же	ЭГК № 28	
17 340	Петлевой канал	То же	Л-14	Л-14
27 340	Тепловой стенд	НПО «Луч»	ЭГК № 173119	ЭГК № 173119
27 400	То же	СФТИ	ЭГК № 189179	

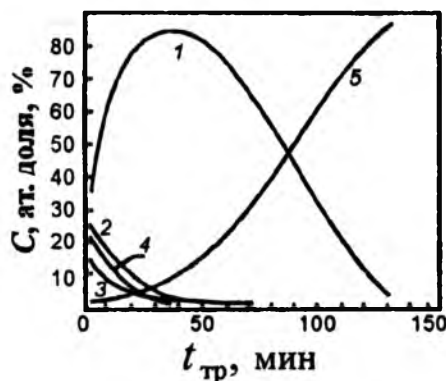
Примечания. Лабораторный ТЭП — лабораторные установки термоэмиссионных преобразователей энергии; Я-81, -24 — опытные установки, являющиеся прототипами космического реактора-преобразователя «Енисей»; Л-10 — -14 — ЭГК, проходившие испытания в петлевых каналах исследовательского реактора. Для ЭГК, проходивших испытания на тепловых стендах, приводятся их производственные номера. ЭГК в составе реакторов-преобразователей имеют номера, присвоенные им при компоновке активной зоны.

Экспериментальные данные о свойствах электродов одноэлементных ЭГК затем анализировали и проводили статистическую оценку их ресурсоспособности.

Эмиссионные свойства электродов ЭГК, отработавших ресурс на стендах с электронагревом. Самые многочисленные измерения эмиссионных свойств электродов были проведены на образцах эмиттеров и коллекторов ЭГК, проработавших на тепловых стендовых испытаниях с электронагревом.

Образцы коллекторов для измерений на термоэмиссионном микроскопе и исследования элементного состава поверхности вырезали из центральных зон коллекторов между III и IV поясами дистанционаторов, а также на образцах, вырезанных из концевых зон электродов между I—II и V—VI поясами дистанционаторов.

Оже-анализ приповерхностного слоя образцов, проведенный с использованием травления поверхности Ag^+ , во всех случаях показал наличие на поверхности коллекторов слоя вольфрама. Помимо вольфрама, в основном перенесенного с эмиттера на коллектор на этапе термовакуумной подготовки ЭГК, в состав конденсата входили также кислород, углерод и цезий. Последний попадал в приповерхностный слой коллектора в процессе работы ЭГК в режиме генерации энергии. В качестве примера на рис. 1 приведены результаты профильного оже-анализа



Р и с. 1. Результаты профильного оже-анализа коллектора ЭГК, отработавшего в режиме генерации энергии 2500 ч: 1 — W; 2 — O; 3 — C; 4 — Cs; 5 — Mo

за образца коллектора ЭГК, проработавшего 2500 ч. Толщина вольфрамового слоя на поверхности коллектора была не менее 300 нм. Скорость травления 3 нм/мин.

Внешний вид поверхностей исследованных коллекторов был различным. Наиболее темную поверхность наблюдали у коллекторов ЭГК, вакуумные полости межэлектродного зазора которых имели те или иные нарушения герметичности во время испытаний. В этом случае содержание углерода в поверхностном слое коллекторов по данным оже-анализа было повышенным. Во всех случаях измерений требовался активационный прогрев образцов для восстановления эмиссионных свойств коллекторов, ухудшенных вследствие возможного загрязнения поверхности при разделке ЭГК, резке образцов и установке в термоэмиссионный микроскоп. Кроме того, частично состояние поверхности коллекторов могло ухудшаться и на этапе охлаждения ЭГК при выводе преобразователей из режима работы.

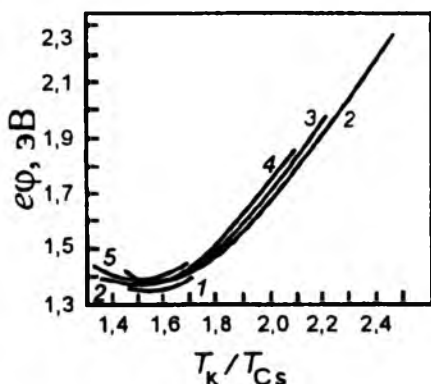
Образцы коллекторов, отработавшие в составе ЭГК от 300 до 27 400 ч, прогревали при 1000 К в потоке атомов цезия плотностью $10^{14}—10^{16} \text{ с}^{-1} \cdot \text{см}^{-2}$ от 1 до 5 ч. Самого длительного времени прогрева требовали образцы с наиболее темными поверхностями коллекторов. У всех образцов коллекторов наблюдали характерное изменение вида зависимостей работы выхода $e\varphi$ от отношения температуры T_k/T_{Cs} , где T_k — температура образца коллекторного электрода; T_{Cs} — температура цезиевого резервуара. Начальные эмиссионные свойства образцов характеризуются работой выхода $\sim 1,6$ эВ. Вакуумная работа выхода, которую можно сопоставить начальным эмиссионным зависимостям $e\varphi = f(T_k/T_{Cs})$, не превышала 4—4,1 эВ. Термоактивационный прогрев в цезии приводил к снижению минимальной работы выхода и стабилизации состояния поверхности.

Зависимости $e\varphi = f(T_k/T_{Cs})$ стабилизированного состояния поверхностей образцов коллекторов представлены на рис. 2. Минимум работы выхода равен 1,35—1,4 эВ при соответствующих им значениях $T_k/T_{Cs} = 1,5—1,6$. Эмиссионный контраст в области $e\varphi_{\text{мин}}$ составляет 0,1—0,15 эВ.

Полученные результаты свидетельствуют, что коллекторы ЭГК в испытаниях на тепловых стендах сохраняют эмиссионные свойства, приобретаемые ими во время цикла термовакуумной подготовки, в результате массопереноса вещества эмиттера на коллектор и последующего взаимодействия вольфрамового слоя с цезием [11, 12].

Монокристаллический вольфрамовый эмиттер ЭГК $W_{\text{хл}} \langle 111 \rangle$ при рабочей температуре обладает равновесным кристаллографическим строением, что должно обеспечить длительную стабильную работу такого эмиттера. Это подтверждают результаты измерения вакуумной работы выхода вблизи кристаллографических направлений эмиттера $\langle 110 \rangle$ и $\langle 112 \rangle$ (табл. 2).

Эмиссионный контраст исследованных образцов эмиттеров не превышал 0,15—0,2 эВ. Изменение эмиссионных параметров эмиттеров возможно лишь в условиях аномально высокой скорости массопереноса, когда происходит значительное утонение вольфрамового слоя и возможно проявление диффузии к поверхности атомов подложки — молибдена и ниобия. Оценки показывают [11], что обычно в условиях ЭГК массоперенос разными циклами на этапе термовакуумной подготовки уносит с эмиттера слой вольфрама толщиной $\sim 0,3—0,5$ мкм и далее $\sim 0,05—0,5$ мкм/год. Термическое испарение имеет более низкую скорость: при 1870 К 0,005 мкм/год.



Р и с. 2. Эмиссионные кривые стабилизированного в термоэмиссионном микроскопе состояния поверхностей коллекторов, отработавших в составе ЭГК 300 (1), 2500 (2), 5500 (3), 8450 (4), 11 000 ч (5)

Т а б л и ц а 2. Работа выхода эмиттеров ЭГК при разных ресурсах

Ресурс, ч	Кристаллографическое направление	$\phi_{\text{ср.ст.}}$, эВ
0	110	$5,05 \pm 0,05$
	112	$4,75 \pm 0,05$
8450	110	$5,03 \pm 0,05$
11 000	110	$5,03 \pm 0,05$
27 400	110	$5,02 \pm 0,05$
	112	$4,72 \pm 0,05$

Эмиссионные свойства электродов ЭГК, исследовавшиеся в петлевых каналах. Более сложная картина взаимодействия поверхностей электродов с межэлектродной средой может наблюдаться в ЭГК, работающих в составе ядерных реакторов. В этом случае возможно взаимодействие продуктов деления ядерного топлива с поверхностью электродов ЭГК. Хронологическое описание испытаний отдельных систем и различных прототипов космических ЯЭУ с термоэмиссионными преобразователями энергии приведено в работе [13]. Изучали поведение электродов одноэлементных ЭГК при ресурсных испытаниях в петлевых каналах ВВР-2 [14].

На этапе реакторного обезгаживания и исследования вакуумных характеристик ЭГК были определены электрофизические параметры: ток насыщения и контактная разность потенциалов между эмиттером и коллектором. По ним была определена средняя для всей поверхности электродов работа выхода (табл. 3).

Т а б л и ц а 3. Вакуумная работа выхода эмиттера и коллектора

Прибор	Время измерения, ч	Работа выхода коллектора, эВ	Работа выхода эмиттера, эВ
Л-13	0	5,25	5,05
	62	5,25	5,13
	166	5,25	5,10
Л-14	0	5,1	4,93
	68	5,05	4,89
	144	5,05	4,97

Усредненная по приведенным в таблице значениям вакуумная работа выхода эмиттеров для ЭГК Л-13, -14 составляет $5,09 \pm 0,04$ и $4,93 \pm 0,04$ эВ соответственно. Различия значений работы выхода эмиттеров, превышающие в 4 раза погрешность измерений (0,04 эВ — среднеквадратичное отклонение), свидетельствуют об объективном различии работы выхода эмиттеров в этих каналах.

Вакуумная работа выхода коллекторов Л-13, -14, изготовленных из сплава СМ-4, отличается как между собой, так и от первоначальной работы выхода сплава (вакуумная работа выхода поверхности СМ-4 равна 4,5 эВ). Это связано с наличием на поверхности коллектора пленки вольфрама до ее экспозиции в цезиевой среде. Вакуумная работа выхода вольфрамовой пленки, перенесенной с эмиттера, равна 4,9—5 эВ [6]. Ее более высокий уровень для коллектора ЭГК Л-13 ($\phi_{\text{к}} = 5,25$ эВ) может быть связан с наличием на нем активного кислородсодержащего слоя. Как и ожидалось, отличия вакуумной работы выхода коллекторов сказались на их выходных характеристиках при работе в цезиевом режиме. Неидентичность этих двух ЭГК подтверждается большим различием оптимального выходного напряжения (1,16 и 0,56 В) и давления цезия 1,7 и 1 Па. Проверка стабильности выходных электрических характеристик ЭГК Л-13, -14 еще более выявила их различия. На начальном этапе энергетических испытаний наблюдали значительный дрейф характеристик ЭГК Л-13. Электрическая мощность уменьшилась примерно на 30%, оптимальное давление цезия

увеличилось вдвое. И в дальнейшем при проведении ресурсных испытаний наблюдали нестабильность выходных электрических характеристик ЭГК Л-13.

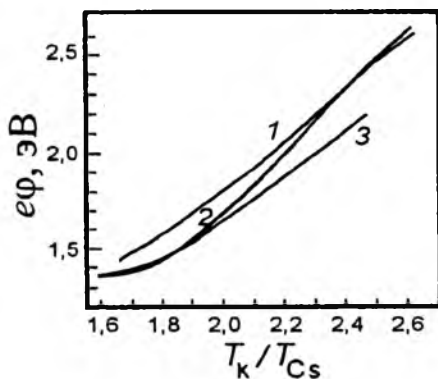
Энергетические характеристики ЭГК Л-14 существенным образом отличались от характеристик ЭГК Л-13. Вольт-амперные характеристики, снятые в начальный (1020 ч) и конечный момент ресурсных испытаний (17 340 ч) при постоянном тепловыделении и оптимальном давлении цезия, были почти одинаковы. ЭГК Л-14 был снят с испытаний в работоспособном состоянии.

По окончании реакторных испытаний ЭГК Л-14 были измерены эмиссионные характеристики образцов эмиттера и коллектора на термоэмиссионном микроскопе. Образец эмиттера исследовали в вакуумной области при высокой температуре. Образец коллектора изучали в условиях адсорбции цезия на рабочую поверхность. Были измерены температурные зависимости $e\varphi = f(T)$ и кривые $e\varphi = f(T/T_{Cs})$ образцов эмиттера и коллектора, вырезанных из центральной части ЭГК. Как оказалось, они слабо отличаются от значений на начальном этапе испытаний в области и высокой температуры, и адсорбции цезия. Вакуумная работа выхода эмиттера Л-14 при 1860 К была равна 5,02 эВ. Работа выхода коллектора в условиях адсорбции цезия составила 2,2 эВ при $T_k/T_{Cs} = 2,4$.

Измерение эмиссионных свойств образцов электродов ЭГК ЯЭУ Я-24, -81. Исследовали образцы электродов ЭГК опытных установок Я-24, -81, отработавших при испытаниях 14 000 и 12 380 ч соответственно. Определяли состояние поверхности электродов и измеряли их эмиссионно-адсорбционные характеристики.

На рис. 3 приведены эмиссионно-адсорбционные характеристики образцов коллекторов ЭГК № 28 установки Я-24 и ЭГК № 3 установки Я-81 в виде зависимостей $e\varphi = f(T_k/T_{Cs})$. После прогрева образцов при 1000 К в потоке атомов цезия плотностью $10^{14} - 10^{19} \text{ с}^{-1} \cdot \text{см}^{-2}$ в течение 1,5 ч была получена эмиссионная кривая 1, относящаяся к коллектору как ЭГК № 28, так и № 3. Дальнейший прогрев изменял вид эмиссионных кривых. Полная стабилизация эмиссионных свойств наступила лишь после 5 ч термоактивации в цезиевой среде. Кривая 2 характеризует изменение свойств коллектора № 28. Аналогично в области низких значений T_k/T_{Cs} вел себя и образец коллектора ЭГК № 3 (кривая 3).

Измеряли эмиссионные свойства эмиттера ЭГК № 3 установки Я-81. Внешний осмотр показал, что поверхность эмиттера чистая и имеет металлический блеск.



Р и с. 3. Эмиссионные характеристики коллекторов ЭГК ЯЭУ Я-24, -81 после прогрева при 1000 К в цезиевой среде в течение 1,5—2 ч (1), стабилизированное эмиссионное состояние поверхности коллектора ЭГК № 28 установки Я-24 после 5 ч термоактивации в цезиевой среде (2), то же для коллектора ЭГК № 3 установки Я-81 (3)

Исследование образца эмиттера на термоэмиссионном микроскопе в условиях вакуума и при адсорбции цезия выявило высокую стабильность его эмиссионных свойств (рис. 4). Дальнейшие измерения эмиссионных свойств эмиттеров ЭГК установки Я-81 проводили после длительной выдержки ЭГК в хранилище при нормальном атмосферном давлении. Как и следовало ожидать, происходит значительное ухудшение эмиссионных характеристик поверхностей электродов. Появляется большое число участков (до 20% на поверхности образца эмиттера ЭГК № 7) с более низкой вакуумной работой выхода $\sim 4,6$ эВ, чем полученная при измерениях непосредственно после выработки ресурса.

Так как исследовавшиеся образцы эмиттеров опытных установок вырезали в основном из центральных областей ЭГК, то представляло большой интерес измерение эмиссионных свойств эмиттера по всей длине ЭГК. Измерения

проводили на ЭГК № 1, также находившемся длительное время в хранилище. Для исследований вырезали три образца из центральной, промежуточной части и у края. Расстояние между образцами вдоль эмиттера было примерно 80 мм. Визуальный осмотр показал, что поверхность эмиттера неоднородная. У центрального образца поверхность наиболее чистая и блестящая, у промежуточного и крайнего имеются участки с характерным цветом побежалости. Экспериментальная работа выхода образцов эмиттера ЭГК № 1 при температуре измерений в микроскопе ($T_{изм}$), рабочей температуре испытаний ($T_{раб}$) и экстраполированные значения $e\varphi$ от $T_{изм}$ к $T_{раб}$ представлены в табл. 4.

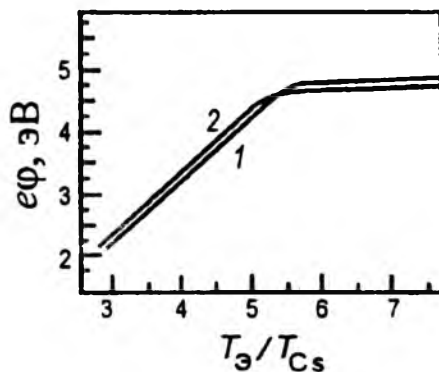


Рис. 4. Зависимость работы выхода эмиттера ЭГК № 3 установки Я-81 в начале (1) и после ресурсных испытаний (2)

Т а б л и ц а 4. Работа выхода образцов эмиттера ЭГК № 1

Образец	Измерения $e\varphi_{вак}$, эВ	$T_{изм}$, К				$T_{раб}$, К		
		1700	1800	1900	2000	1825	1770	1550
Центральный (III—VI)	Начальные	4,7	4,85	4,95	5	4,87		
	Конечные	4,85	4,94	5	5	4,95		
Промежуточный (II—III)	Начальные	4,68	4,72	4,76			4,71	
	Конечные		4,8	5—4,95	5,06—5		4,8	
Крайний (I—II)	Начальные	4,62	4,88	5,05	5,2			4,23
	Конечные	4,66	4,82	4,95	5			4,4
Экстраполированные значения $e\varphi$ от $T_{изм} = 1900—2000$ К к $T_{раб}$						4,95	4,96—4,92	4,92

Измеренная работа выхода поверхности эмиттера у центрального образца совпадает с предыдущими исследованиями и исходными данными. Как видно из табл. 4, наблюдается снижение работы выхода у всех трех образцов с уменьшением температуры измерений ниже ~ 1850 К даже после их длительного прогрева. Так же, как и для образца эмиттера ЭГК № 7, это может быть связано с загрязнением поверхности в результате длительного хранения ЭГК на воздухе при атмосферном давлении.

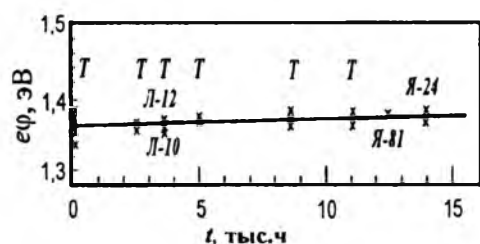
Состояние поверхностей электродов ЭГК после выработки ресурса. Разделка ЭГК ЯЭУ Я-81, -24 и петлевых каналов Л показала, что на поверхности коллекторов после ресурсных испытаний присутствует вольфрам разной толщины. Микрорентгеновский анализ образцов коллекторов ЭГК на МАР-2 показал, что атомная доля вольфрама на поверхности коллекторов составляет 0,1—10%. Эти данные отличаются от полученных при испытаниях на тепловых стендах, при которых в некоторых случаях количество вольфрама на коллекторе было на уровне 100%. Это означает, что при глубине зондирования электронного луча МАР около 1 мкм весь поверхностный слой коллектора состоит из вольфрама. В реакторных же испытаниях после выработки ресурса толщина вольфрамового слоя на коллекторе значительно меньше. Так, средняя толщина вольфрамового покрытия коллекторов установок Я-24 и -81 составила ~ 10 нм, что значительно меньше начальной толщины вольфрамового слоя непосредственно после термовакуумной подготовки (до 300 нм в центральной части ЭГК). Эффект утонения вольфрамового слоя на коллекторе в десятки раз при испытаниях одноэлементных ЭГК на тепловых стендах не наблюдался.

Представляло интерес измерение содержания атомов молибдена и ниобия на поверхности $W_{хл} \langle 111 \rangle$ эмиттера, которые могли продиффундировать из подложки на

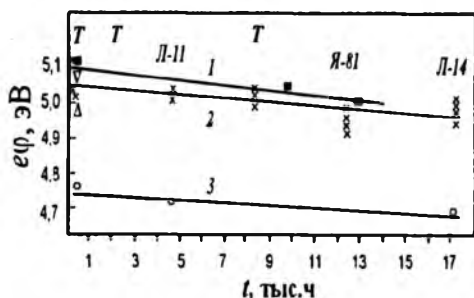
поверхность эмиттера в процессе работы установки. Образцы эмиттеров исследовали на микроанализаторе MAP-2 до и после исследований на термоэмиссионном микроскопе. Образцы нагревали в микроскопе до температуры немного более высокой, чем рабочая температура эмиттеров ЭГК установки Я-81. Измерения показали, что атомная доля молибдена на поверхности неодинакова и колеблется от 0,6 до 1%. После исследования образцов эмиттеров установки Я-81 на термоэмиссионном микроскопе содержание молибдена на поверхности уменьшилось в 2 раза. Концентрация ниобия вблизи поверхности составляла не более 0,5% и плавно возрастала в глубину вольфрамового покрытия до 3,5% на расстоянии от поверхности 175 мкм.

Необходимо отметить, что частично источниками чужеродных атомов на поверхности $W_{\text{хл}} <111>$ эмиттеров, помимо элементов самих электродов, могут быть и различные конструкционные узлы ЭГК, выполненные из материалов на основе молибдена и ниобия, — концевые элементы эмиттеров, фиксаторы, сепараторные кольца.

Прогнозирование ресурсоспособности электродов ЭГК. Данные об измеренной работе выхода всех коллекторных и эмиттерных образцов электродов ЭГК, проходивших ресурсные испытания в лабораторных установках, на тепловых стендах, в петлевых каналах исследовательского реактора и в составе опытных установок, приведены на рис. 5, 6. Набранная статистика измерений в случае как коллекторных, так и эмиттерных данных ограничивается 1,5—2 годами и недостаточна для обоснованного прогнозирования ресурсных свойств электродов с 1,5—2 до 3 лет. Однако отсутствие промежуточных данных между 2 и 3 годами испытаний не является жестким препятствием к такому прогнозированию.



Р и с. 5. Зависимость минимальной работы выхода коллекторов ЭГК при $T_k/T_{Cs} = 1,5—1,6$ от времени их испытаний (Т — испытания на тепловых стендах; Л-10, -12 — приборы, прошедшие испытания в петлевых каналах; Я-81, -24 — прототипы ЯЭУ «Енисей»)



Р и с. 6. Зависимость работы выхода эмиттеров ЭГК от времени испытаний: ■ — ускоренные испытания в термоэмиссионном микроскопе $W<110>$ (1), $W<110>$ (2), $W<112>$ (3); Δ, ▽ — начальная работа выхода эмиттеров приборов Л-13 и Л-14 соответственно

Таким образом, основной массив экспериментальных данных об эмиссионно-адсорбционных свойствах электродов ЭГК с разным временным ресурсом можно обработать статистическими методами в целях найти зависимость изменения эффективной работы выхода от времени и попытаться предсказать поведение электродов во времени.

Вначале было определено, как изменяется работа выхода коллекторов во времени при выбранном отношении температуры коллекторов и резервуара с жидким цезием в минимуме зависимости $ef = f(T_k/T_{Cs}) - T_k/T_{Cs} = 1,5—1,6$. Как видно из рис. 5, с увеличением времени средняя работа выхода коллектора имела тенденцию к слабому росту. Наблюдающиеся изменения были определены в виде линейной зависимости $ef_k = f(t)$, где t — время работы коллектора, ч. С учетом повторных общее число измерений ef_k (выборка) достигало 18.

Было получено уравнение регрессии, связывающее изменение минимума работы выхода коллектора ЭГК со временем. Далее была проведена проверка модели по общепринятой методике. Затем была определена 95%-ная доверительная область, в которой находится истинная регрессия для коллек-

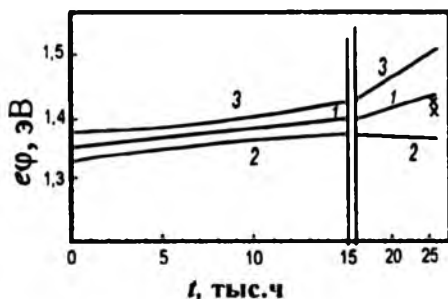
тора на отрезке 0—15 тыс. ч, и проведено прогнозирование по регрессии до 28 тыс. ч. На рис. 7 прогнозируемая доверительная область между 17—28 тыс. ч показана отрезками гипербол. Здесь же нанесены экспериментальные точки для минимальной работы выхода коллектора, соответствующие времени работы ЭГК № 189179 ~27 400 ч на стенде с электронагревом в СФТИ им. И. Векуа.

Такие же расчеты были проведены и для эмиттеров по данным, полученным в ресурсных экспериментах. На рис. 8 показана линейная регрессионная зависимость $e\varphi_3 = f(t)$ для кристаллографического направления $\langle 110 \rangle W_{\text{хл}} \langle 111 \rangle$ эмиттера от времени на участке 0—17 тыс. ч и ее 95%-ная доверительная область, ограниченная верхней и нижней гиперболами. На временном участке 17—28 тыс. ч проведено прогнозирование работы выхода с верхней и нижней максимальной оценкой. Здесь же показаны экспериментальные значения работы выхода для кристаллографических направлений $\langle 110 \rangle$ и $\langle 112 \rangle$ эмиттера ЭГК № 173119, проработавшего на тепловом стенде в ГосНИИ НПО «Луч» 27 340 ч.

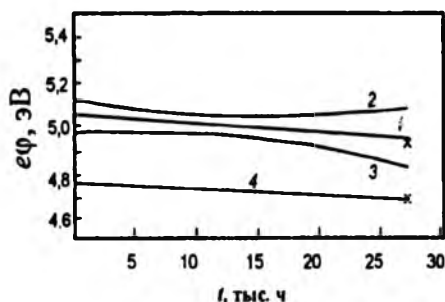
Основной вывод, который можно сделать по прогнозу ресурсоспособности электродов Е-16МО, состоит в том, что эмиссионные свойства электродной пары, состоящей из эмиттера $W_{\text{хл}} \langle 111 \rangle$ и коллектора СМ-4, остаются удовлетворительными до 3 лет. Даже самая низкая оценка среднестатистической работы выхода эмиттера не ниже 4,8—4,75 эВ. Верхняя оценка минимальной работы выхода коллектора в конце 3-летнего ресурса равна 1,5 эВ, что приемлемо с точки зрения работоспособности ЭГК.

Таким образом, расчеты с 95%-ной вероятностью показывают, что и эмиттер, и коллектор одноэлементных ЭГК ядерных космических энергетических установок «Енисей» имеют высокую ресурсоспособность и надежность до 3-летнего срока работы. Отсутствие набора экспериментальных данных о ресурсоспособности на срок более 3 лет не позволяет в настоящее время делать какие-либо прогнозы на 5—7 лет непрерывной работы. Отметим лишь, что в исследованиях [15] сообщалось о длительных испытаниях на фирме «Дженерал атомик» (США) цилиндрического термоэмиссионного преобразователя LC-9 (прототипа электрогенерирующего элемента для многоэлементного ЭГК). При температуре вольфрамового эмиттера 1970 К электрогенерирующий элемент устойчиво проработал в течение 46 тыс. ч.

В заключение автор выражает благодарность сотрудникам РНЦ «Курчатовский институт», ГосНИИ НПО «Луч» и СФТИ им. И. Векуа за многолетнюю совместную работу, критику и поддержку. Автор признателен В.П. Обрезумову и С.С. Геращенко, с которыми были выполнены экспериментальные работы на термоэмиссионном микроскопе, В.И. Чурину за предоставление материалов измерений на МАР-2, В.И. Выбыванцу, Б.С. Степеннову, Ю.Г. Дегальцеву и А.Г. Каландаришвили за предоставление образцов электродов, материалов по разделке ЭГК и полезные обсуждения.



Р и с. 7. Регрессионная зависимость (1) для минимальной работы выхода коллекторов ЭГК от времени испытаний, нижняя (2) и верхняя граница (3) 95%-ной доверительной области. Правая часть рисунка соответствует области прогноза: x — экспериментальные данные для коллектора ЭГК № 189179



Р и с. 8. Регрессионная зависимость (1) для работы выхода $W_{\text{хл}}$ эмиттеров ЭГК от времени их испытаний, нижняя (3) и верхняя граница (2) 95%-ной доверительной области; 4 — $W \langle 112 \rangle$. Правая часть рисунка соответствует области прогноза: x — экспериментальные данные для эмиттера ЭГК № 173119

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Пономарев-Степной Н.Н. Ядерная энергетика в космосе. — Атомная энергия, 1989, т. 66, вып. 6, с. 371—374.
2. Никитин В.П., Оглоблин Б.Г., Соколов Е.Н. и др. Космическая ядерная энергетическая установка «Енисей». — Там же, 2000, т. 88, вып. 2, с. 95—108.
3. Грязнов Г.М., Жаботинский Е.Е., Зродников А.В. и др. Термоэмиссионные реакторы-преобразователи космических ЯЭУ. — Там же, 1989, т. 66, вып. 6, с. 374—377.
4. Грязнов Г.М. К 30-летию пуска первого в мире термоэмиссионного ядерного реактора «Топаз». — Там же, 2000, т. 89, вып. 1, с. 6—11.
5. Дегальцев Ю.Г., Пономарев-Степной Н.Н., Кузнецов В.Ф. Поведение высокотемпературного ядерного топлива при облучении. М.: Энергоатомиздат, 1987. 207 с.
6. Корюкин В.А. Изменение эмиссионных и адсорбционных свойств электродов термоэмиссионных од-ноэлементных ЭГК на начальном этапе работы. — Атомная энергия, 2000, т. 89, вып. 1, с. 48—57.
7. Выбыванец В.И., Гонтарь А.С., Гординский В.А. и др. Экспериментальная отработка одноэлементного ЭГК при тепловых и реакторных испытаниях. Тезисы докл. отрасл. юбилейной конф. «Ядерная энергетика в космосе», Обнинск, ФЭИ, 1990, ч. 1, с. 382—383.
8. Ponomarev-Stepnoi N.N., Nikolaev Yu.V., Kuchero R.Yu. e.a. Comparative analysis of concepts of single-cell and multi-cell TFE of thermionic NPS. — In: Proc. AIP Conf. 271, Albuquerque, January, 1993, p. 1347—1353.
9. Каретников Д.В., Корюкин В.А., Обрезумов В.П. Изучение эмиссионных свойств тугоплавких монокристаллов с помощью термоэмиссионного микроскопа. — В кн.: Термоэмиссионное преобразование тепловой энергии в электрическую. Обнинск, 1980, с. 108—118.
10. Koryukin V.A., Obresumov V.P. Measurement of the emission characteristics of the TEC electrodes by means of a thermionic emission microscope. — In: Proc. of the Thermionic Energy Conversion Specialist Conference. Eindhoven, Holland, 1989, p. 209—219.
11. Выбыванец В.И., Корюкин В.А., Николаев Ю.В., Обрезумов В.П. Процессы в МЭЗ, на электродах и ресурсоспособность ЭГК. — В кн.: Физика термоэмиссионных преобразователей энергии. Докл. 2-й отрасл. конф. «Ядерная энергетика в космосе». Сухуми, 1991, с. 100—108.
12. Koryukin V.A., Obresumov V.P. Dynamics of changes in thermionic energy converter collector properties under conditions of mass transfer in the interelectrode gap. — In: Proc. of the 25th Intersociety Energy Conversion Engineering Conference. Reno, USA, 1990, p. 332—339.
13. Ponomarev-Stepnoi N.N., Usov V.A., Nikitin V.P. e.a. Program on the «TOPAZ-2» system preparation for flight tests. — In: Proc. AIP Conf., Albuquerque, January, 1993, p. 741—746.
14. Корюкин В.А., Мосевичкий И.С., Обрезумов В.П., Степеннов Б.С. Эмиссионные свойства электродов одноэлементных ЭГК в ресурсе. Тезисы докл. отрасл. юбилейной конф. «Ядерная энергетика в космосе», Обнинск, ФЭИ, 1990, ч. 1, с. 80—83.
15. Fitzpatrick G., Britt E. Thermionics and its application to the SPS. — In: Radiat. Energy Convers. Space. Techn. Pap. 3rd NASA Conf., 1978, p. 211—222.

Поступила в Редакцию 25.09.2000

УДК 621.039

МАССОПЕРЕНОС ПАРОВ СВИНЦОВОГО ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ В РЕАКТОРЕ БРЕСТ-ОД-300

*Безносов А.В., Кирьянов В.А., Бокова Т.А., Фисейский Н.Е., Пинаев С.С.,
Захватов В.Н. (Нижегородский государственный технический университет)*

Особенностью реакторного блока БРЕСТ-ОД-300 является наличие в корпусе нескольких свободных уровней жидкометаллического теплоносителя, разных по высоте, температуре, затесненности элементами конструкций. В процессе эксплуатации на свободных уровнях теплоносителя концентрируется дисперсная фаза примесей, в основном, оксидов свинца (шлаков) и соединений компонентов конструкционных материалов контура. С течением времени эти примеси могут смачиваться и пропитываться свинцом: в их состав могут входить ^{210}Po , образующийся из висмута (естественной примеси в свинце и генерируемой в нейтронном потоке из изотопов свинца), примеси, поступающие через возможные неплотности оболочек твэлов, и др. Шлаки