



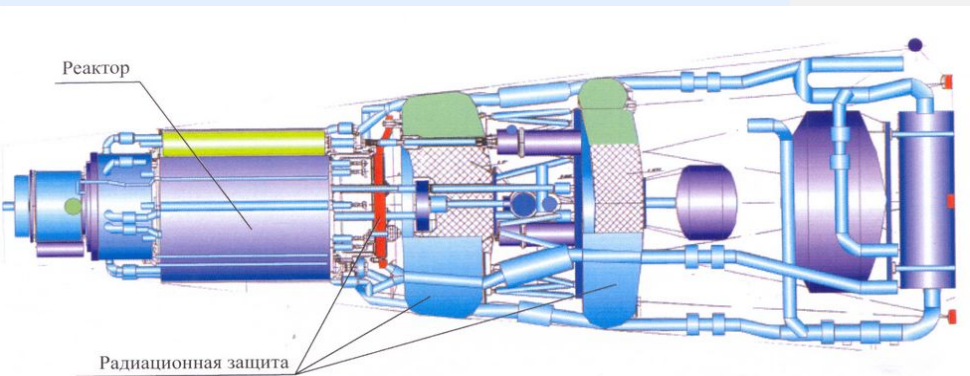
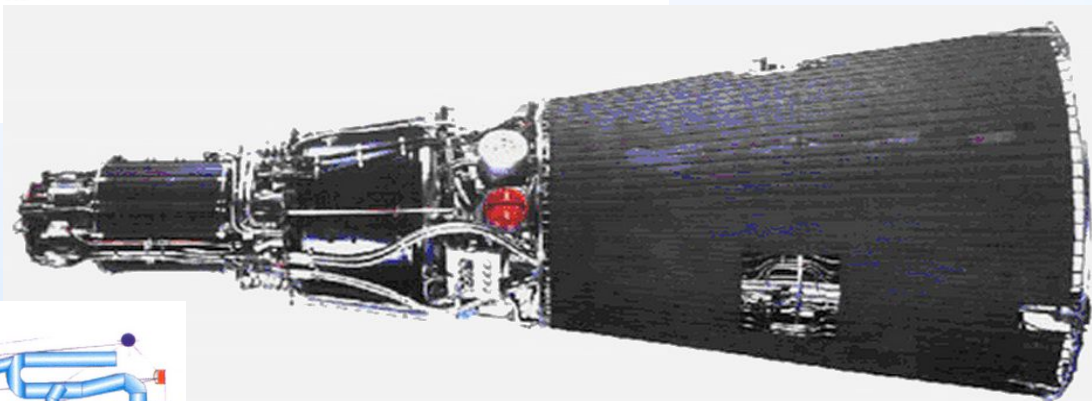
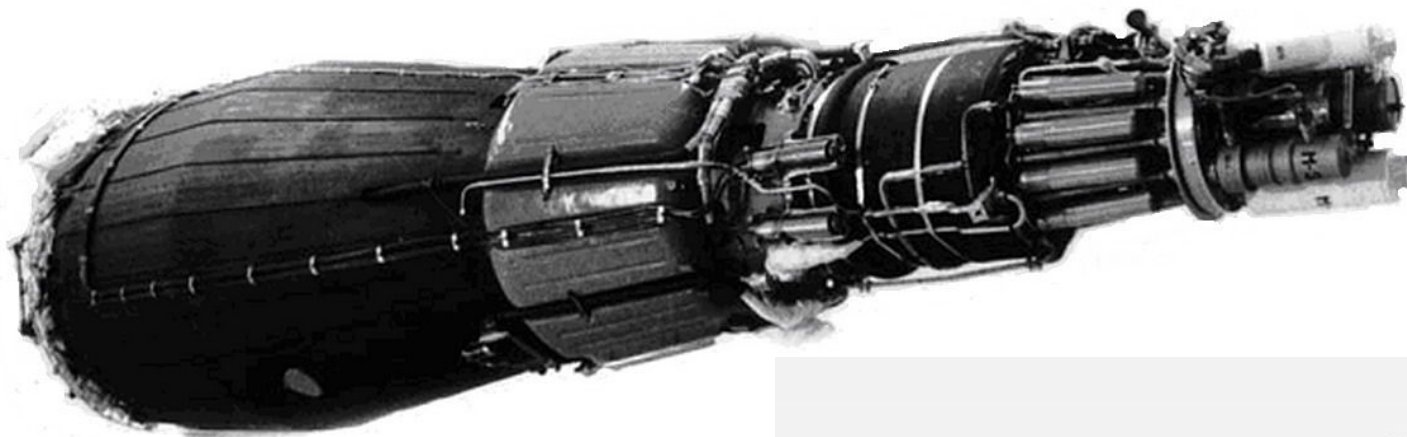
Обнинский институт атомной энергетики
национального исследовательского ядерного
университета «МИФИ»

**Физико-технические основы создания ЭГК для
термоэмиссионных ЯЭУ различного назначения.**

**Влияние примесей на эмиссионно-
адсорбционные характеристики электродов и
выходные характеристики ТЭП, ЭГЭ, ЭГК**

профессор В.И.Ярыгин

Основные типы термоэмиссионных ЯЭУ



Основные направления НИОКР для обеспечения требуемых характеристик ЭГК

- **проектные решения по организации рабочего процесса преобразования энергии;**
- **электродные материалы;**
- **ТОПЛИВНЫЕ КОМПОЗИЦИИ.**

Схема многоэлементного ЭГК

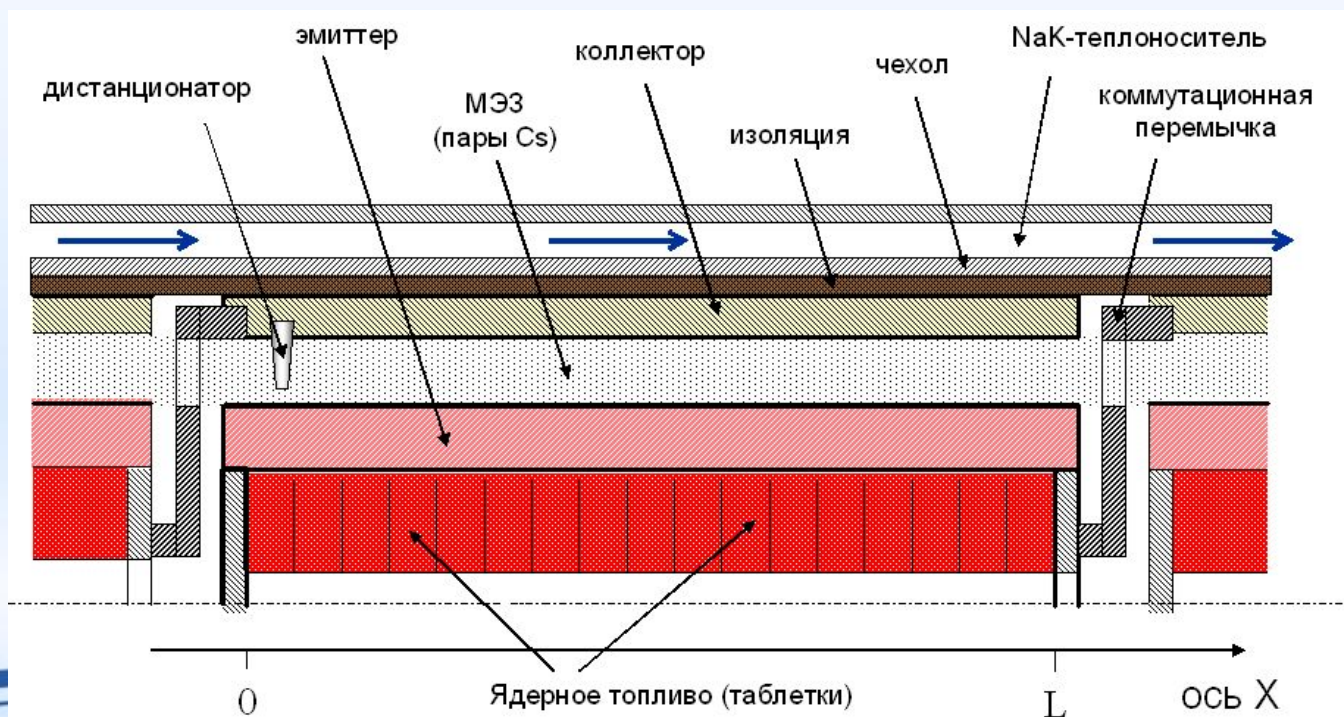
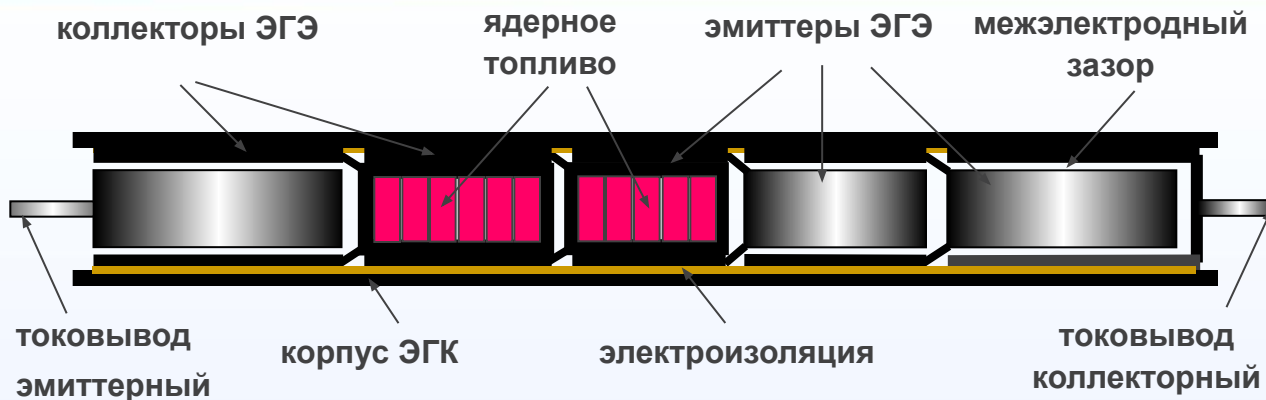
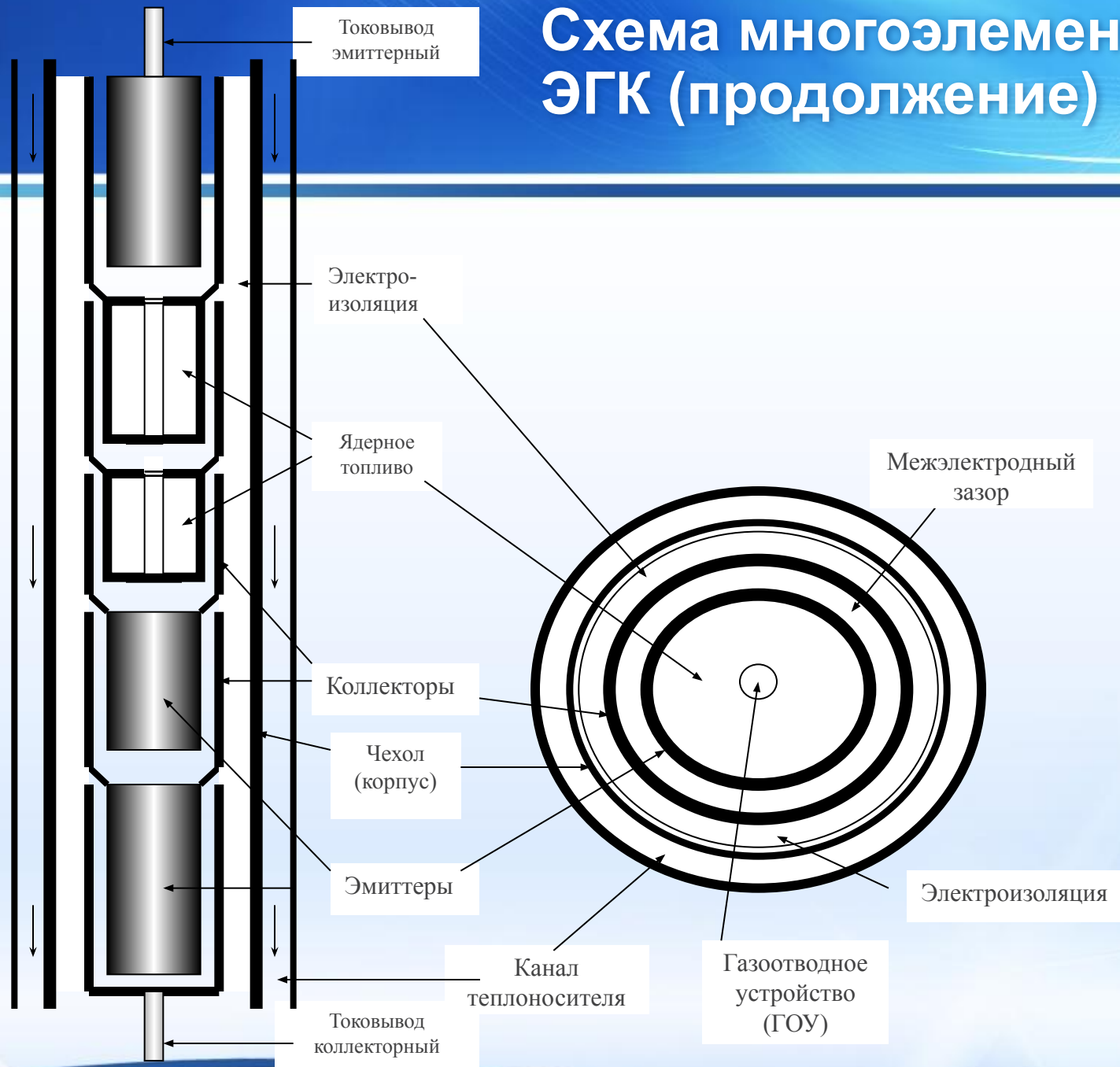
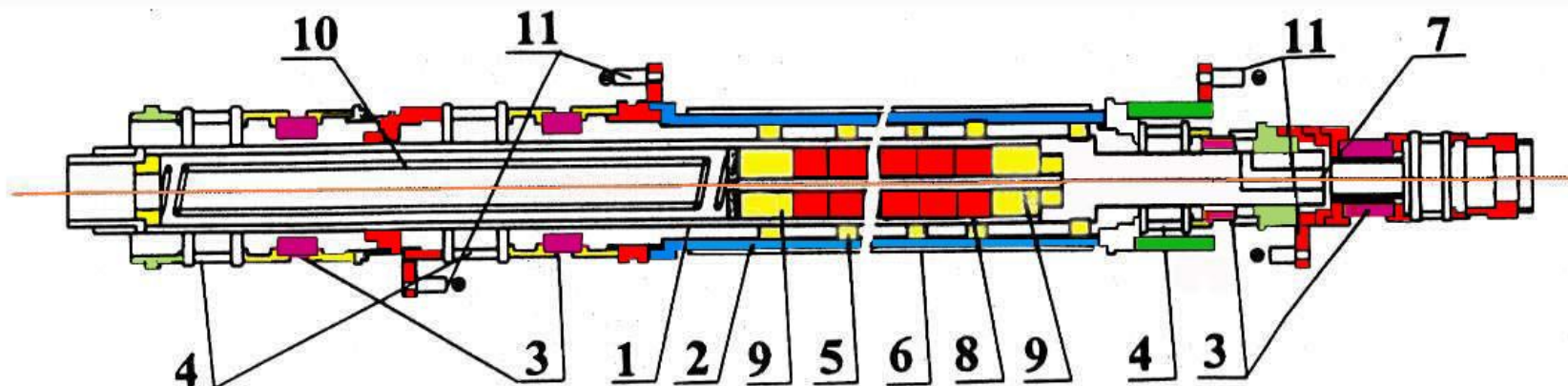


Схема многоэлементного ЭГК (продолжение)

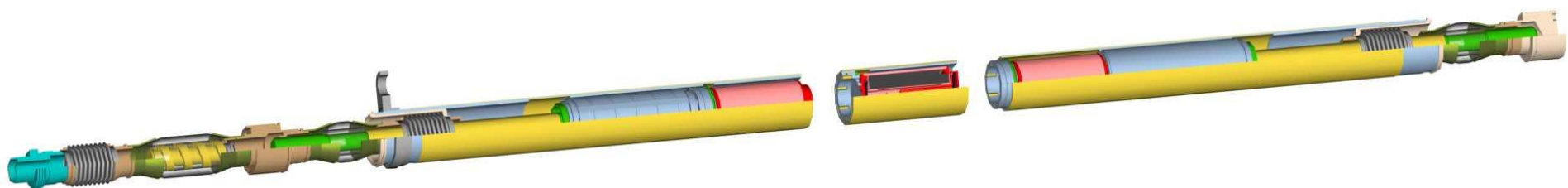


Конструкция одноэлементного ЭГК КЯЭУ «ЕНИСЕЙ»



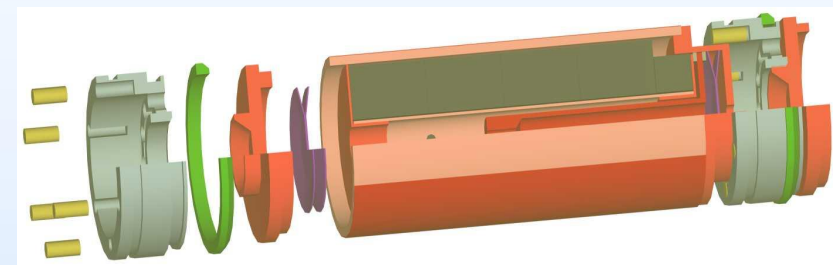
- | | |
|----------------------------|-----------------------------|
| 1. Эмиттер | 7. Канал подачи цезия в МЭЗ |
| 2. Коллектор | (межэлектродный зазор) |
| 3. Гермовводы | 8. Топливо |
| 4. Сильфоны | 9. Торцевые отражатели |
| 5. Дистанционаторы | 10. Фиксирующее устройство |
| 6. Внешняя электроизоляция | 11. Токовыводы |

Унифицированный электрогенерирующий канал

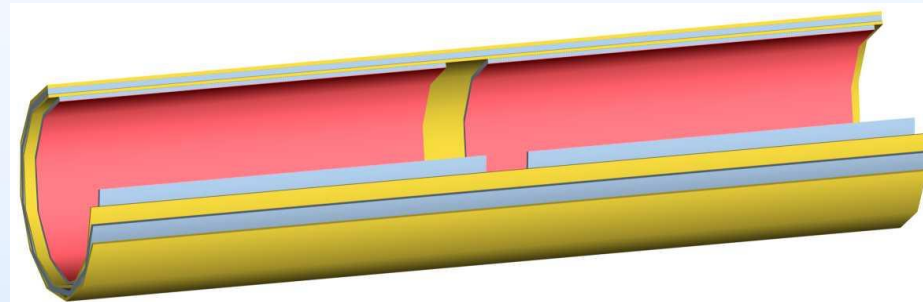


ОСНОВНЫЕ УЗЛЫ ЭГК

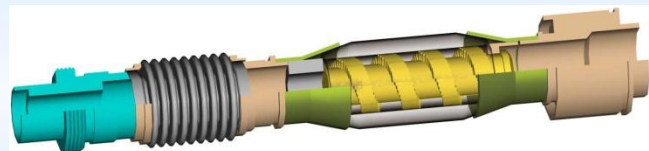
ЭМИТТЕРНАЯ СБОРКА



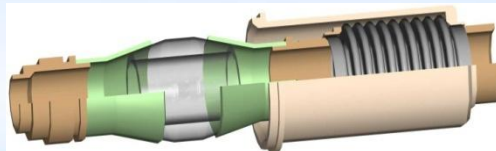
ФРАГМЕНТ КОЛЛЕКТОРНОЙ СБОРКИ



НАДСТАВКА



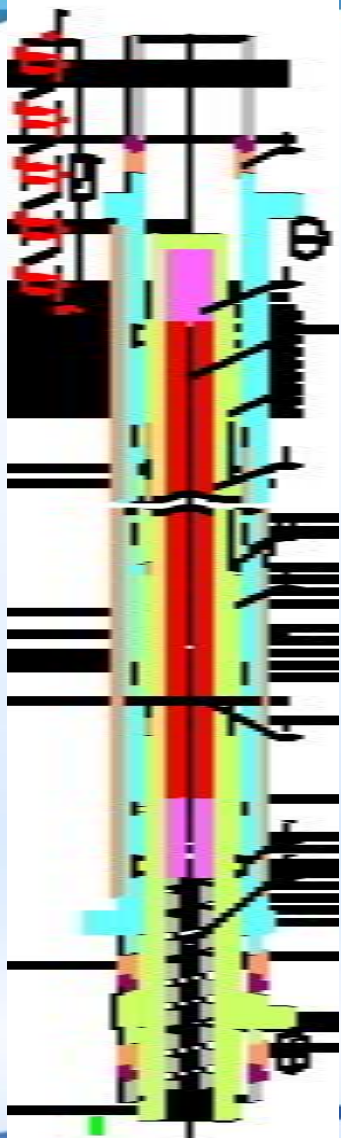
ПЕРЕХОДНИК



ТОКОВЫВОД



Схема одноканального многоэлементного ЭГК (а) и ЭГК с внешним расположением топлива (б)



а)

б)

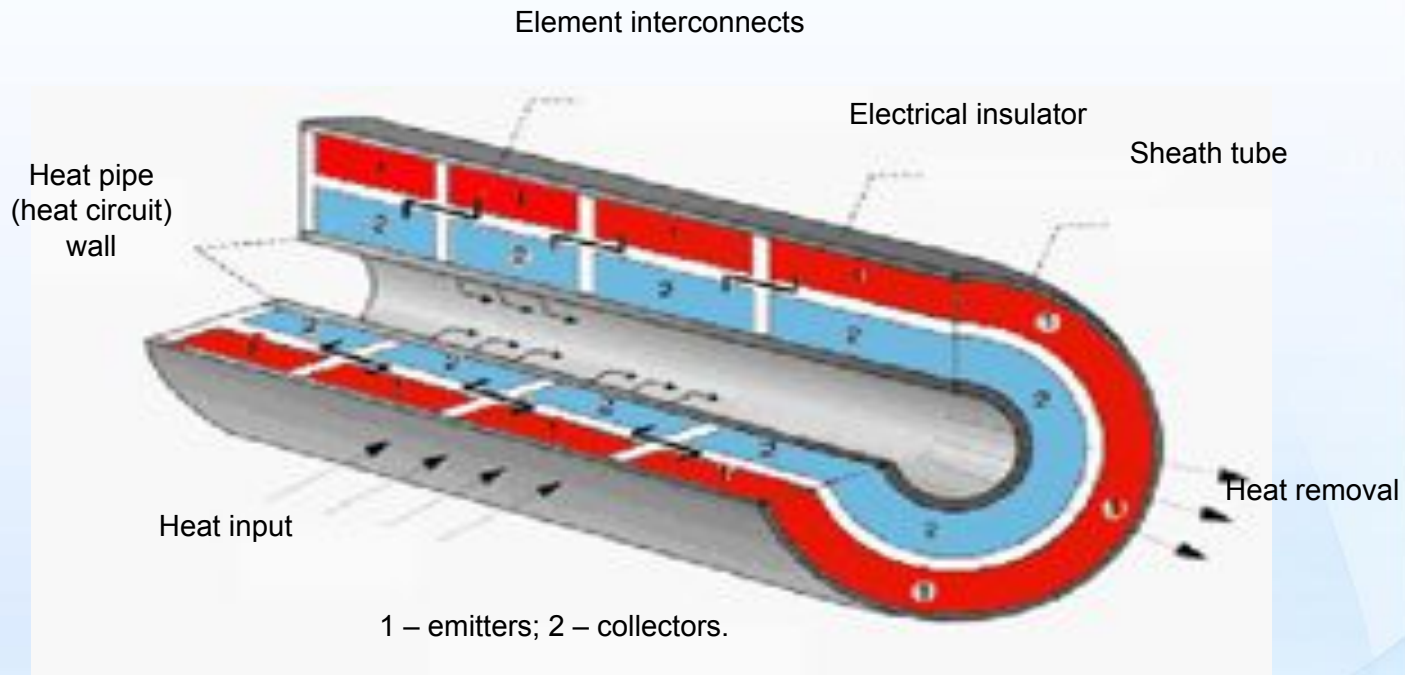
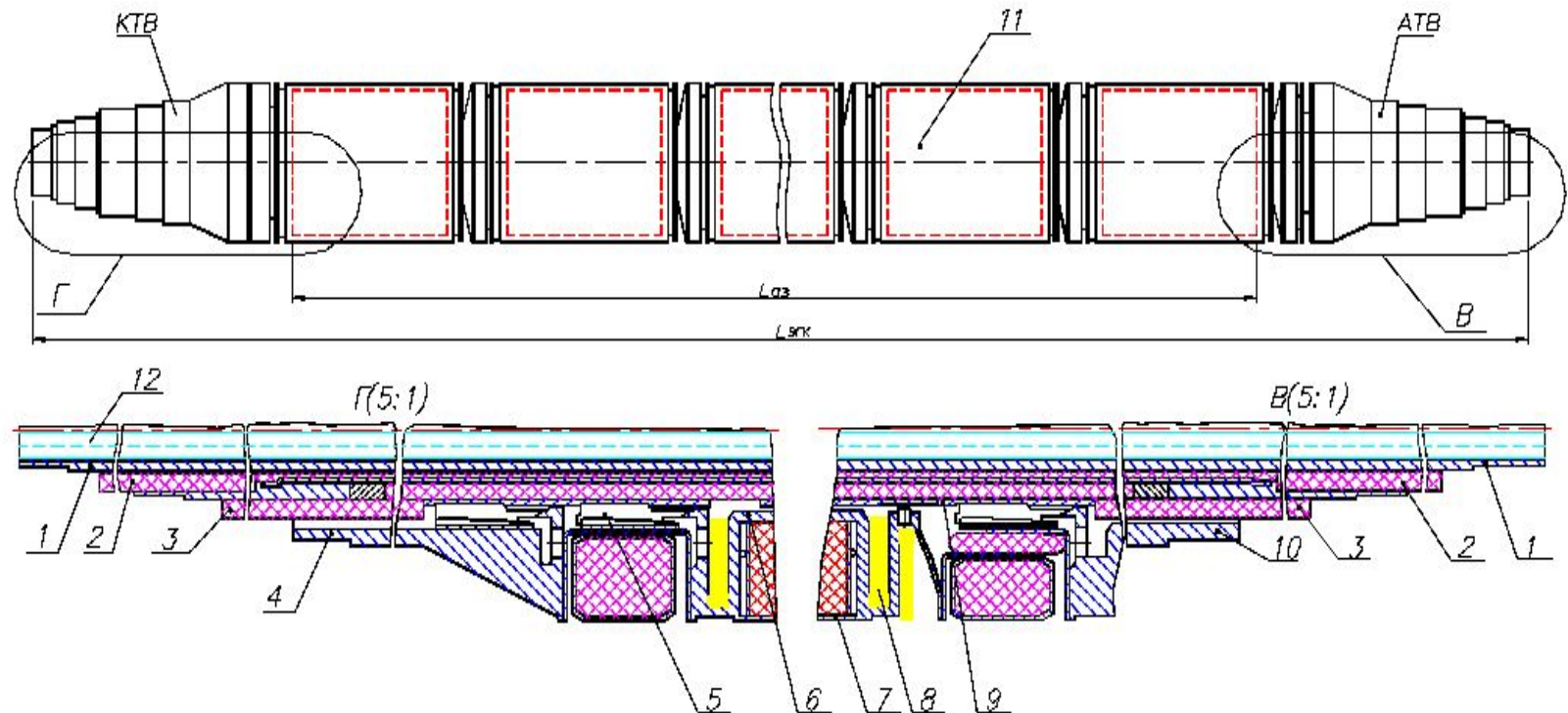
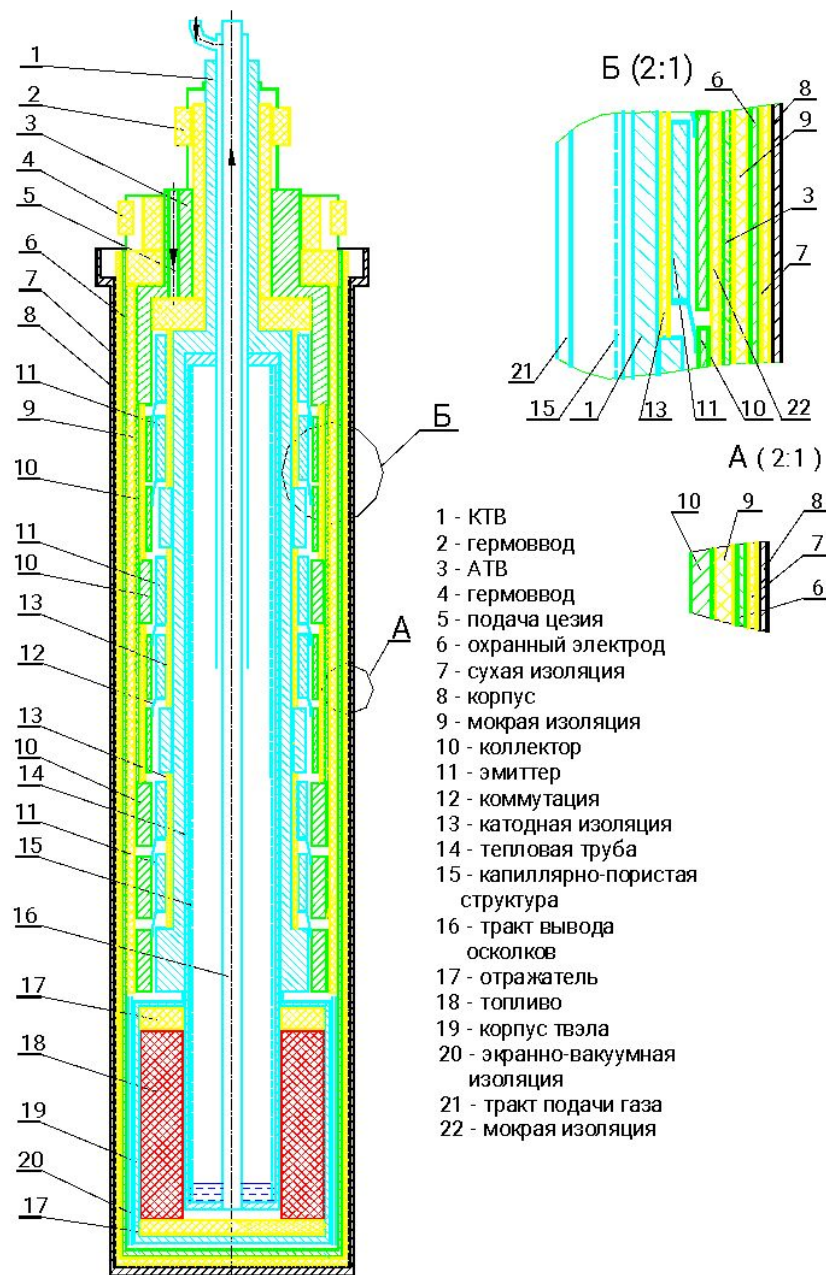


Схема ЭГК с внешним расположением топлива

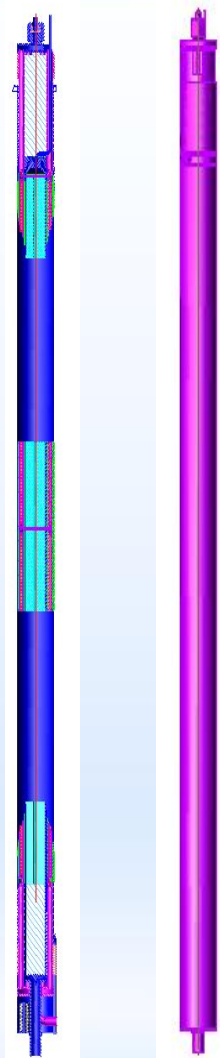


1 – корпус внутренний, 2 – изоляция охранного электрода, 3 – изоляция токовывода, 4 – токовывод катодный, 5 – коммутация, 6 – эмиттер, 7 – корпус эмиттера, 8 – экраны, 9 – коллектор, 10 – токовывод анодный, 11 – узел эмиттерный, 12 – теплоноситель.

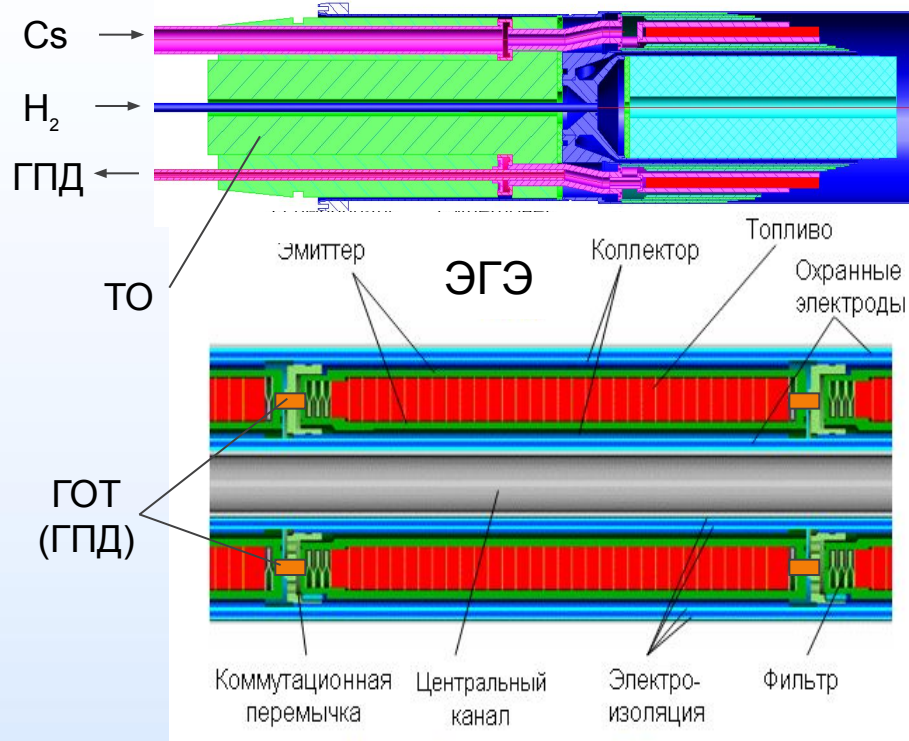
Схема ЭГК с вынесенной из активной зоны термоэмиссионной системой преобразования (с двукратным резервированием термоэмиссионных преобразователей)



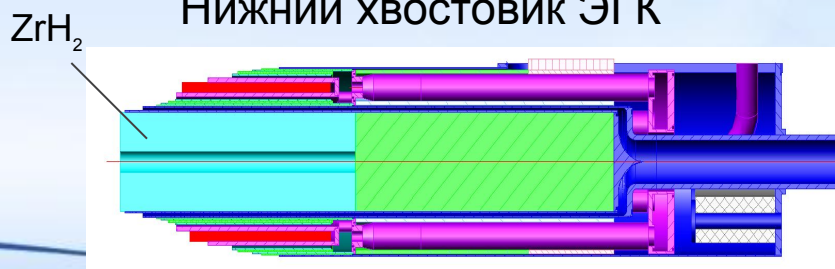
Концепция комбинированного ЭГК



Верхний хвостовик ЭГК

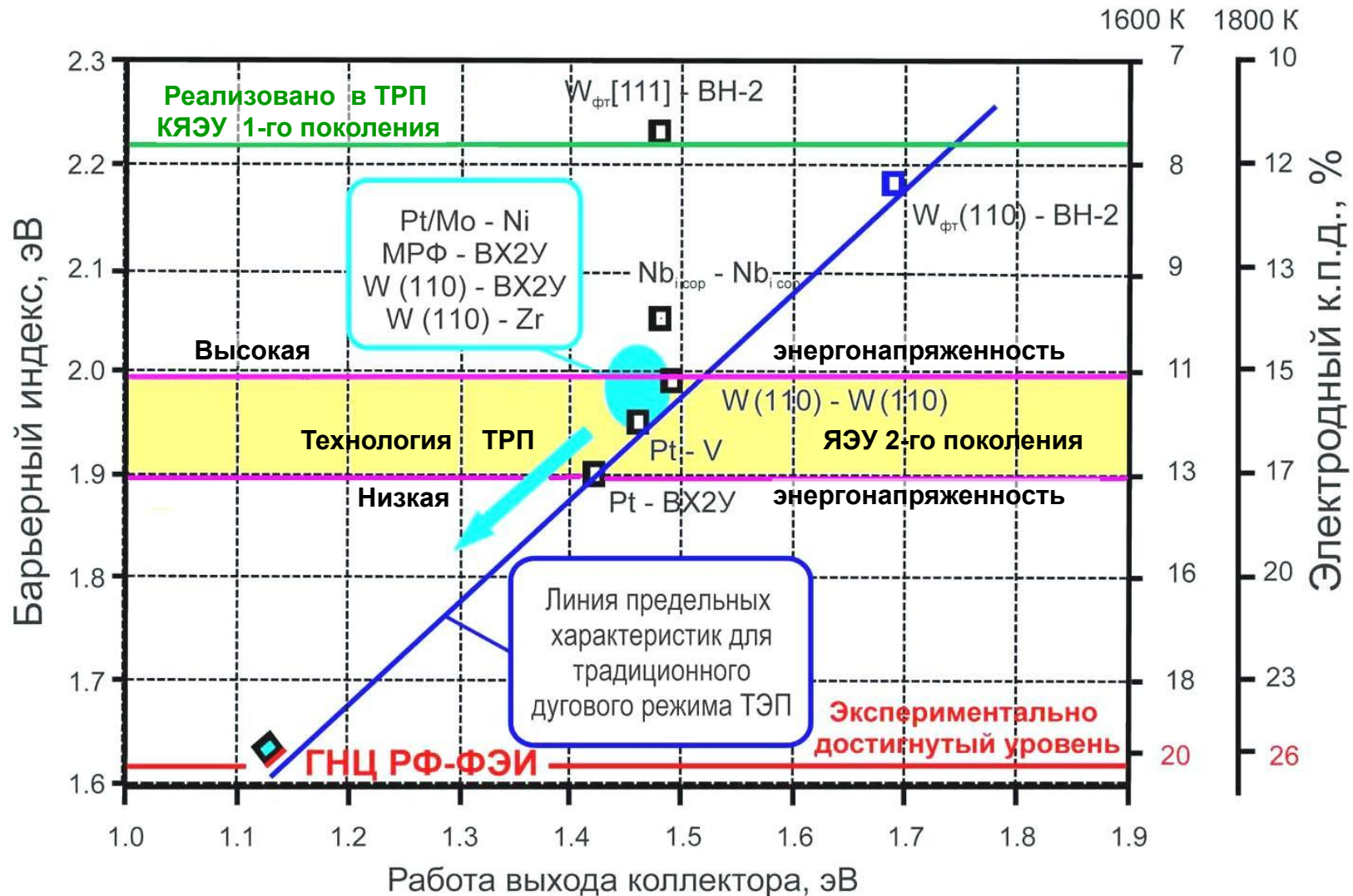


Нижний хвостовик ЭГК



Обобщенные характеристики ТЭП с различными парами электродных материалов и схемами организации рабочего процесса по результатам НИОКР ГНЦ РФ-ФЭИ

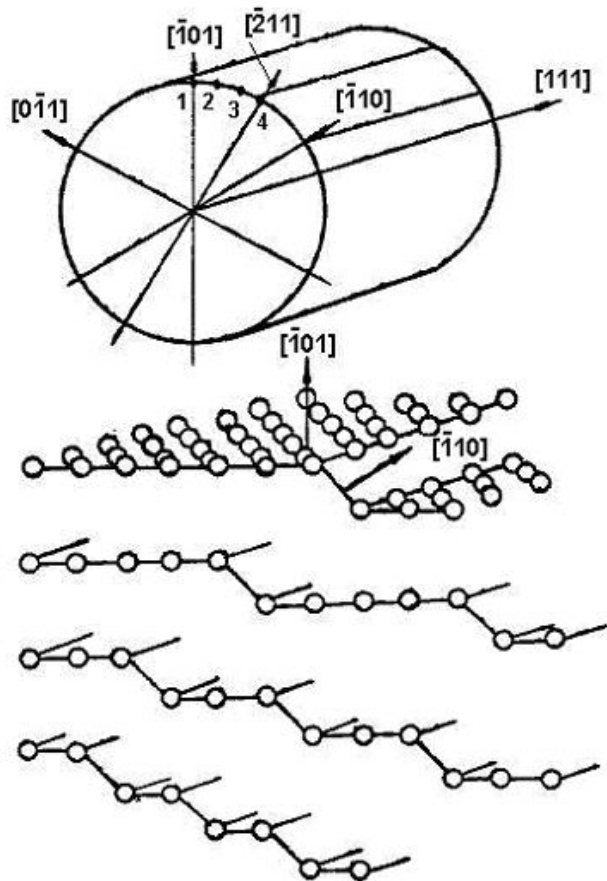
Температура эмиттера



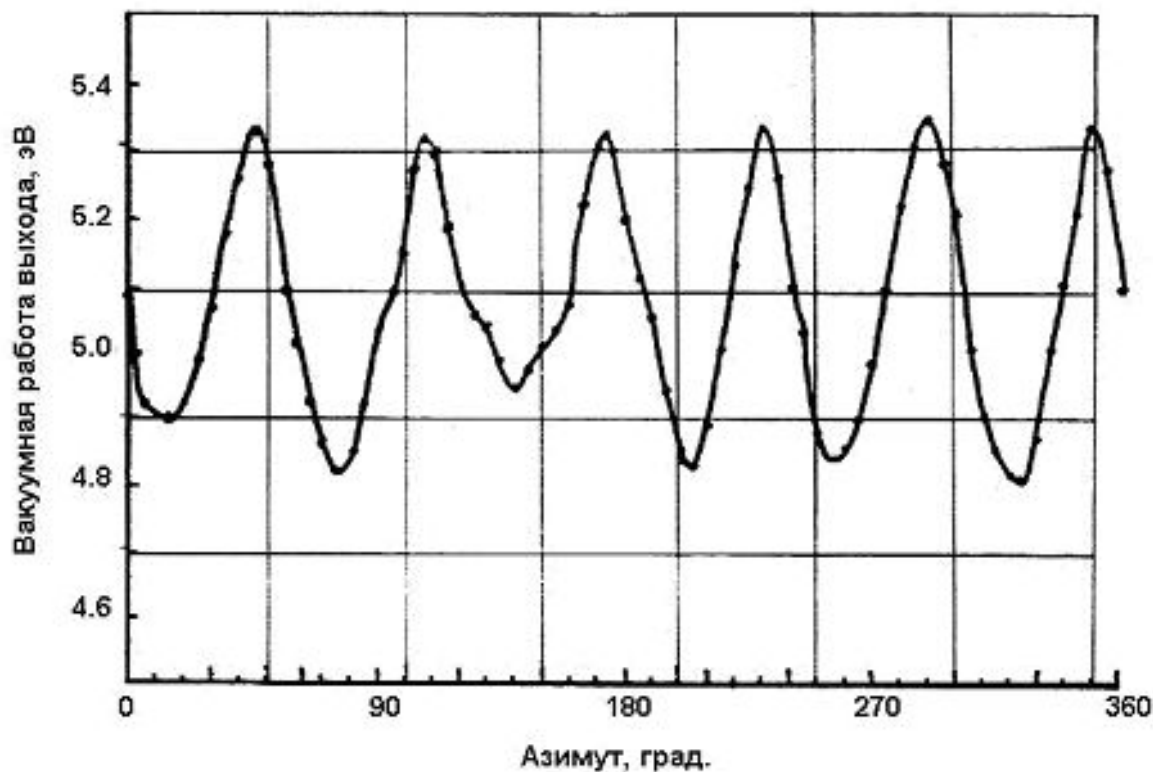
Принципиальная схема базовых технологий, использующихся при формировании эмиссионных покрытий электродов ЭГЭ и ЭГК



Структура поверхности и азимутальное распределение вакуумной работы выхода электронов $W_{\text{фт.}} [111]$

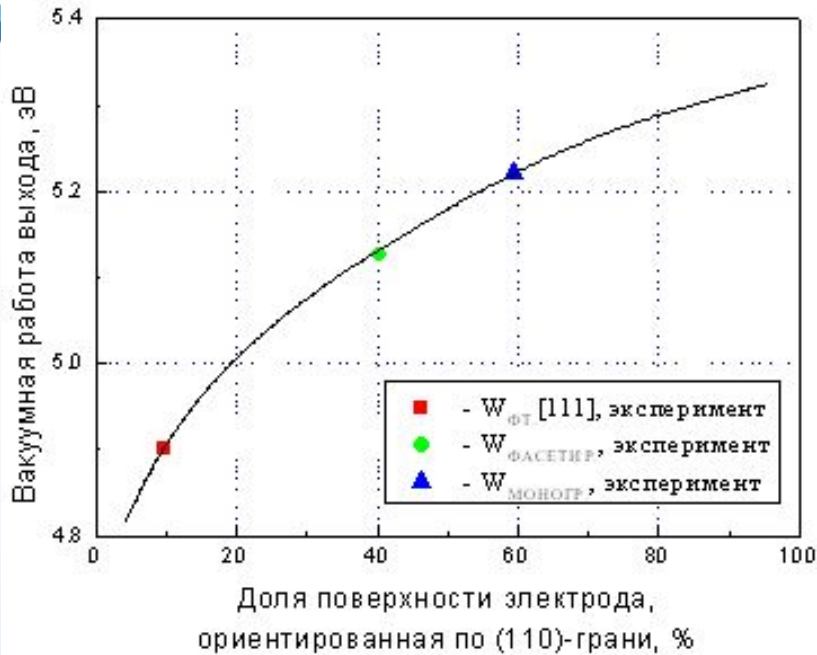


- 1 – область с ориентацией (110);
- 2, 3 – переходные области;
- 4 – область с ориентацией (112).

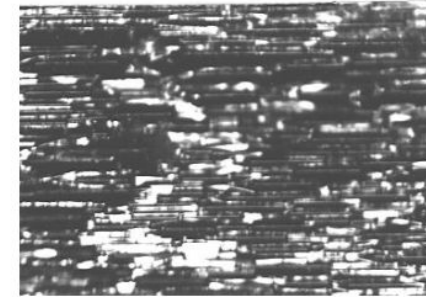


После длительного отжига в вакууме ($T \approx 2000$ К).

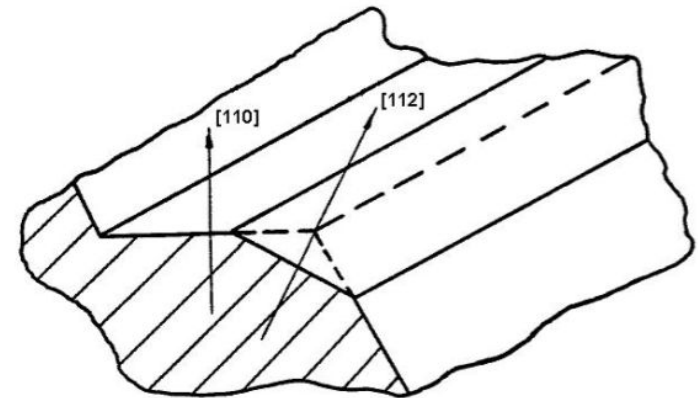
Эмиссионные характеристики и схемы эмиттерных оболочек



а)



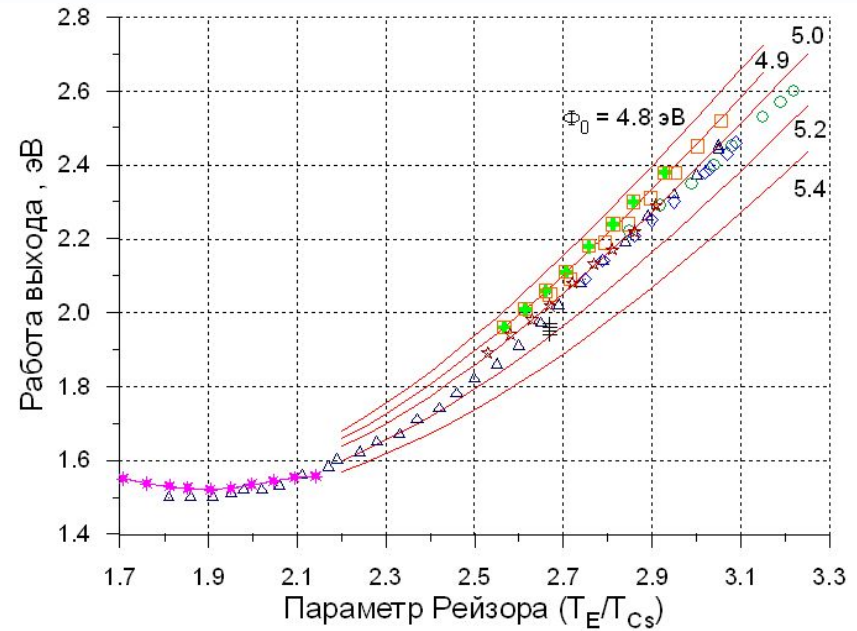
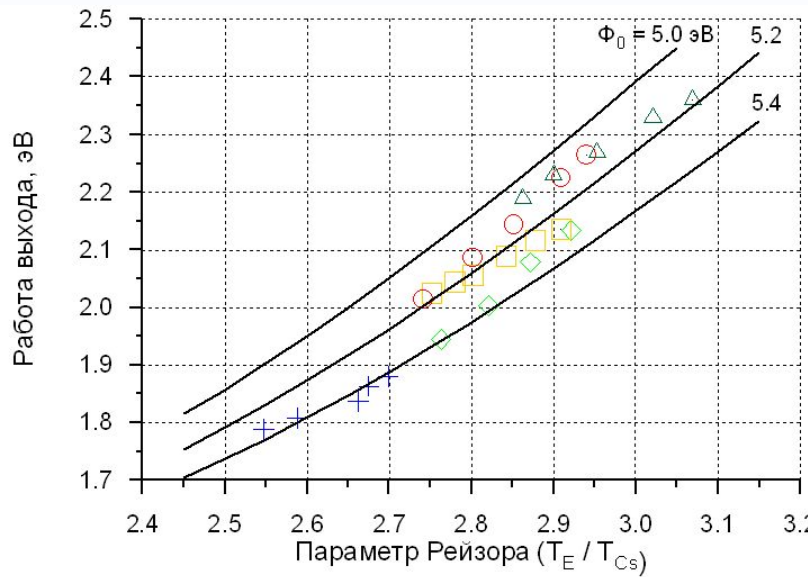
б)



Фасетирование эмиссионной поверхности вольфрамового покрытия на кристаллографическом направлении [121]



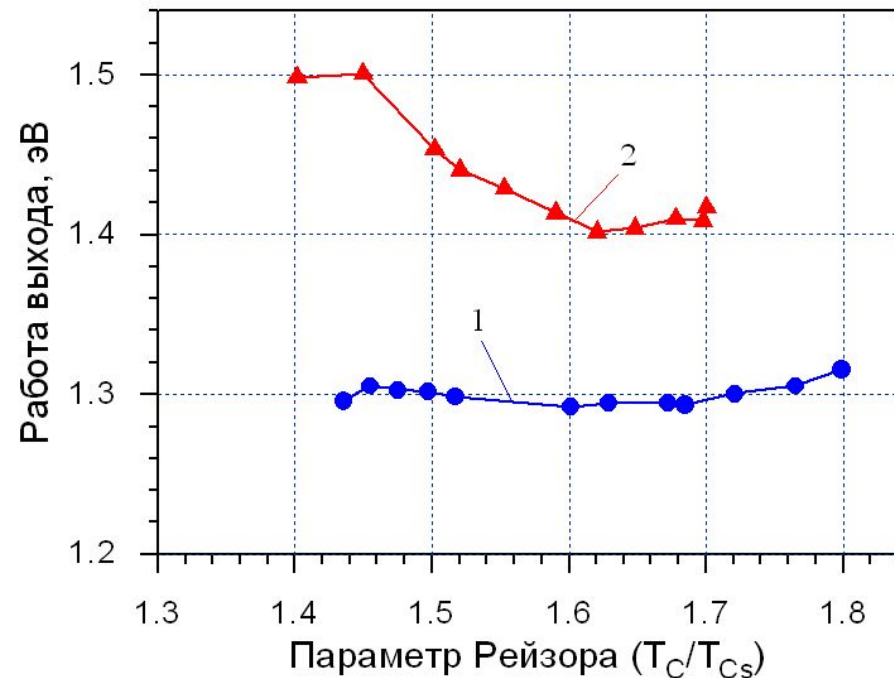
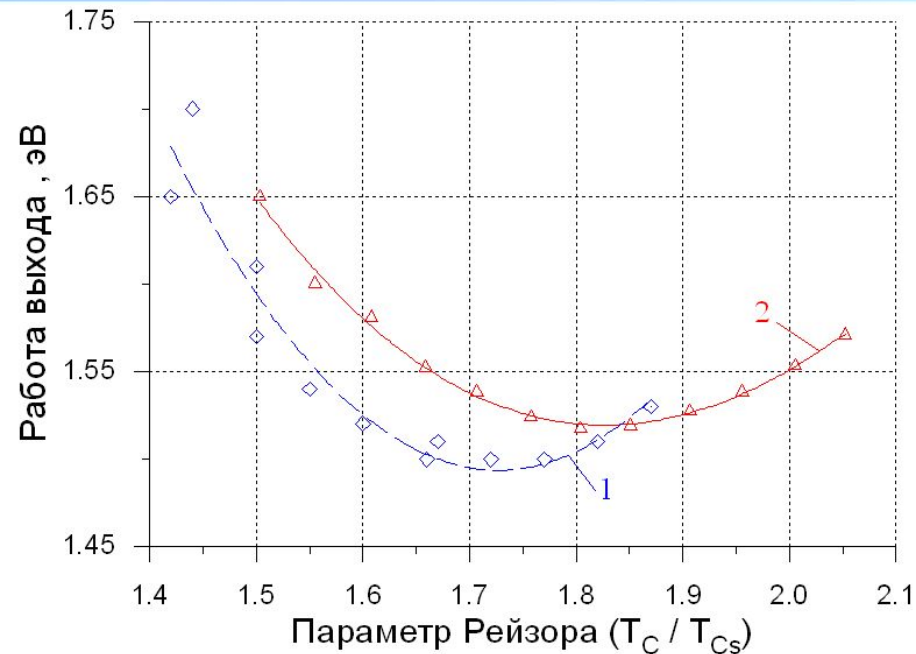
Зависимости Рейзора перспективных эмиттеров



- W(110):**
- + · $T_E = 1300 \text{ K}, T_C = 773 \text{ K}, T_{Cs} = 468 - 511 \text{ K}, d = 0.8 \text{ mm},$
 - ◇ · $T_E = 1325 - 1402 \text{ K}, T_C = 817 \text{ K}, T_{Cs} = 480 \text{ K}, d = 0.6 \text{ mm},$
 - · $T_E = 1402 \text{ K}, T_C = 824 \text{ K}, T_{Cs} = 481 - 510 \text{ K}, d = 0.6 \text{ mm},$
 - · $T_E = 1402 - 1500 \text{ K}, T_C = 509 \text{ K}, T_{Cs} = 511 \text{ K}, d = 0.5 \text{ mm},$
 - △ · $T_E = 1501 \text{ K}, T_C = 801 \text{ K}, T_{Cs} = 489 - 546 \text{ K}, d = 0.5 \text{ mm}.$

- Pt:**
- + · $T_E = 1397 \text{ K}, T_C = 812 - 868 \text{ K}, T_{Cs} = 523 \text{ K}, d = 0.5 \text{ mm}$ (ХТ в дуговом режиме);
 - ◇ · $T_E = 1503 \text{ K}, T_C = 874 \text{ K}, T_{Cs} = 486 - 579 \text{ K}, d = 0.5 \text{ mm}$ (ХТ в дуговом режиме);
 - · $T_E = 1601 \text{ K}, T_C = 888 \text{ K}, T_{Cs} = 496 - 581 \text{ K}, d = 0.3 \text{ mm}$ (ХТ в дуговом режиме);
 - ☆ · $T_E = 1389 - 1600 \text{ K}, T_C = 882 \text{ K}, T_{Cs} = 549 \text{ K}, d = 0.5 \text{ mm}$ (обр. эмиссия в квазивак. режиме);
 - △ · $T_E = 875 - 1601 \text{ K}, T_C = 876 \text{ K}, T_{Cs} = 524 \text{ K}, d = 0.5 \text{ mm},$
 - ☆ · $T_E = 800 \text{ K}, T_C = 800 \text{ K}, T_{Cs} = 339 - 532 \text{ K}, d = 0.1 \text{ mm}$ (обр. эмиссия в квазивак. режиме).

Зависимости Рейзора перспективных коллекторов



Ni: 1 - измерение Φ_C методом обратной эмиссии ($T_E = 1397$ К, $T_C = 745 - 978$ К, $T_{Cs} = 523$ К, $d = 0.5$ мм);
2 - измерение Φ_C в квазивакуумном режиме ($T_E = T_C = 800$ К, $T_{Cs} = 339 - 532$ К, $d = 0.1$ мм)

BX2Y: 1 - измерение работы выхода коллектора методом обратной эмиссии ($T_E = 1400$ К, $T_{Cs} = 509$ К, $d = 1$ мм);
2 - измерение работы выхода коллектора в квазивакуумном режиме ($T_E = T_C$, $T_{Cs} = 448$ К, $d = 0.1$ мм).

Химический состав основных электродных материалов

Материал	Содержание, мас.%							
	Nb	Mo	W	Ti	Zr	V	C	O
ВН-2	основа	4.4	–	$1.2 \cdot 10^{-2}$	$7 \cdot 10^{-1}$	–	$7 \cdot 10^{-2}$	$2 \cdot 10^{-2}$
СМ-4	–	основа	$<10^{-3}$	–	–	–	$4 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-3}$
Mo монокр.	–	основа	10^{-1}	–	–	–	$2 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-3}$
W монокр.	–	–	основа	–	–	–	$<10^{-3}$	$<10^{-3}$
W фторид. (110)	–	–	основа	–	–	–	$<10^{-3}$	$<10^{-3}$
V (вакуум. плавл.)	–	–	–	$3 \cdot 10^{-2}$	–	основа	$<10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-2}$
ВХ2У	–	–	–	Суммарное количество $<10^{-1}$		2	Суммарное количество $< 6 \cdot 10^{-1}$	

Химический состав основных электродных материалов (продолжение)

Материал	Содержание, мас.%								
	Ru	Al	Mg	N ₂	Cr	Fe	Ni	Si	Y/B
ВН-2	–	–	–	–	$3 \cdot 10^{-2}$	–	$5 \cdot 10^{-3}$	$3 \cdot 10^{-2}$	–
СМ-4	$2 \cdot 10^{-1}$	$1 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-2}$	$1 \cdot 10^{-3}$	$1.4 \cdot 10^{-2}$	$2.5 \cdot 10^{-2}$	$1 \cdot 10^{-2}$	–	–
Мо монокр.	–	$1.5 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-3}$	$2 \cdot 10^{-3}$	$1.8 \cdot 10^{-2}$	$1 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-3}$	$3 \cdot 10^{-3}$	–
W монокр.	–	–	–	$<10^{-3}$	–	–	–	–	–
W фторид.(110)	–	$<3 \cdot 10^{-4}$	$<10^{-3}$	$<10^{-3}$	$<10^{-3}$	$<1 \cdot 10^{-3}$	$<10^{-3}$	–	–
V (вакуум. плавл.)	–	$7 \cdot 10^{-3}$	–	–	–	$8 \cdot 10^{-3}$	–	–	–
ВХ2У	–	–	–	–	основа	–	–	–	$5 \cdot 10^{-1}$ / $5 \cdot 10^{-2}$

Низкая энергонапряжённость ЭГК на основе высокоэффективных низкотемпературных ТЭП/ЭГЭ/ЭГК с электродной парой Pt-VX₂У и отделением полости ТВЭЛ от МЭЗ – потенциальная физико-техническая возможность увеличения ресурса и надёжности КЯЭУ

Платина – эффективный эмиттер

- Выбор платины обусловлен наиболее высокой вакуумной работой выхода для эмиссионных поликристаллических покрытий эмиттера, что обеспечивает:
 - ✓ максимальную эффективность эмиттера;
 - ✓ стабильность его свойств при воздействии рабочей среды МЭЗ.
 - ✓ Исследования и испытания показали, что 3÷5 мкм Pt покрытия при эмиттерных температурах формируют в эмиссионном слое молибденовой или вольфрамовой оболочек приповерхностный сплав, на порядки уменьшающий скорость испарения платины и понижающий приведенную степень черноты электродной пары.

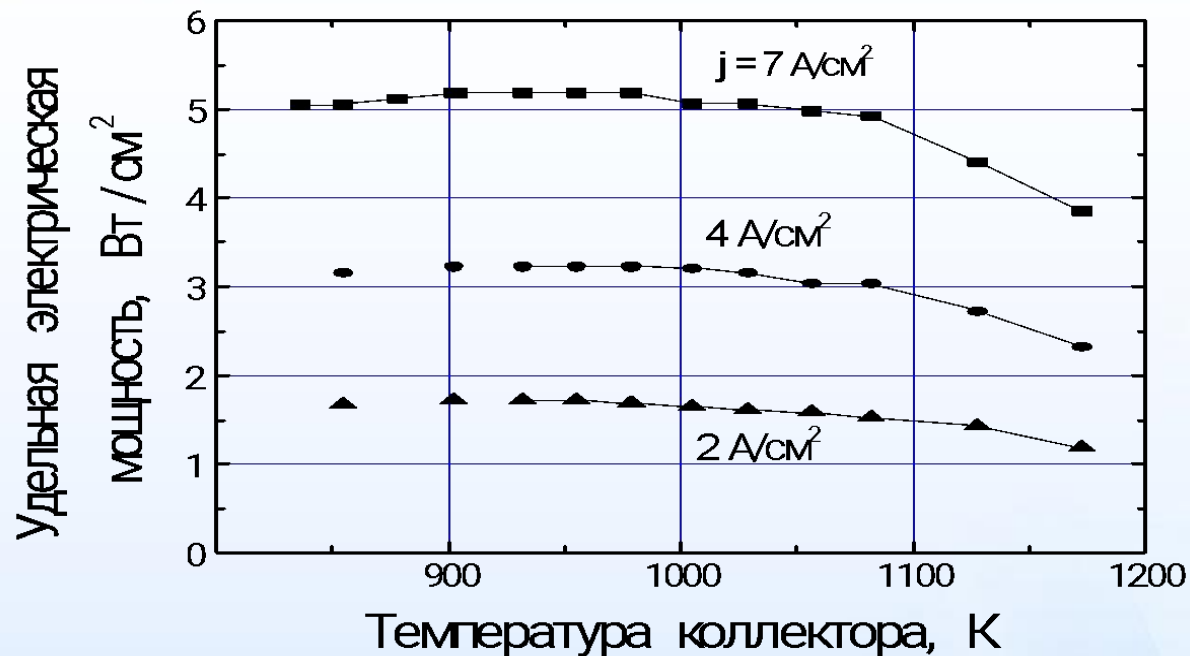
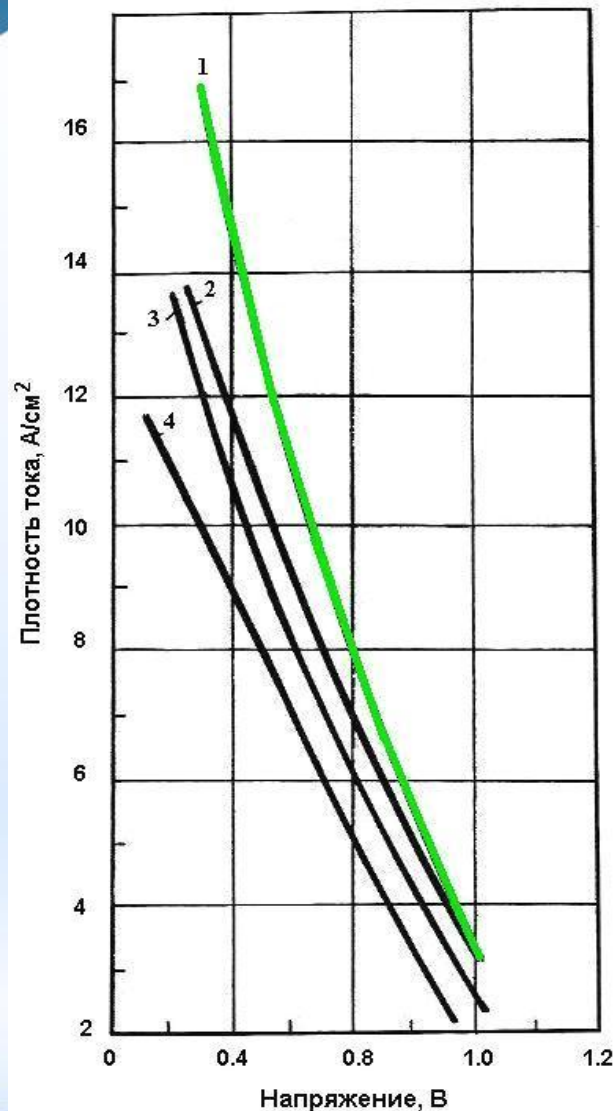
Электродная пара Pt–сплав VX2У

- НИР по увеличению эффективности и ресурса термоэмиссионных преобразователей проводились по двум основным направлениям:
 - ✓ исследование преобразователей с эффективной электродной парой - платиновое поликристаллическое покрытие на эмиттере и покрытие из малолегированного хром-ванадиевого сплава VX2У на коллекторе;
 - ✓ поиск рабочего процесса, способного формировать и длительно поддерживать на высоком уровне выходные электрические характеристики низкотемпературного термоэмиссионного преобразователя.

Электродная пара Pt–сплав ВХ2У (продолжение)

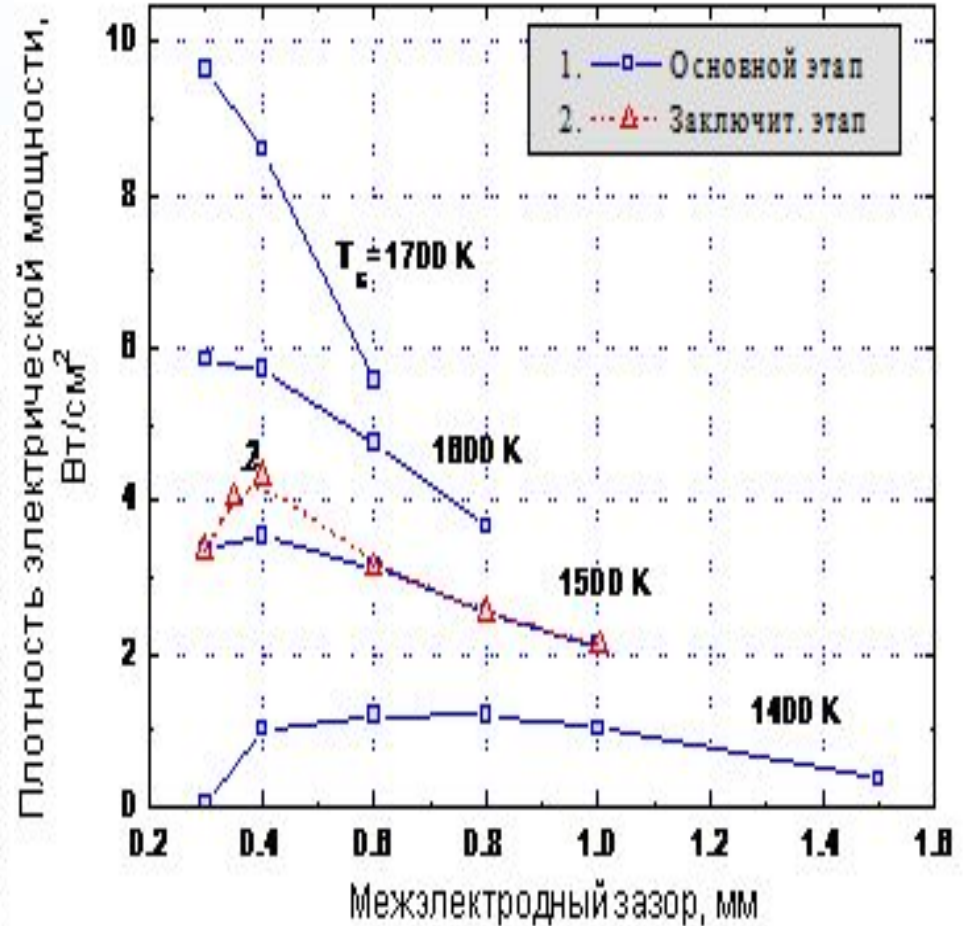
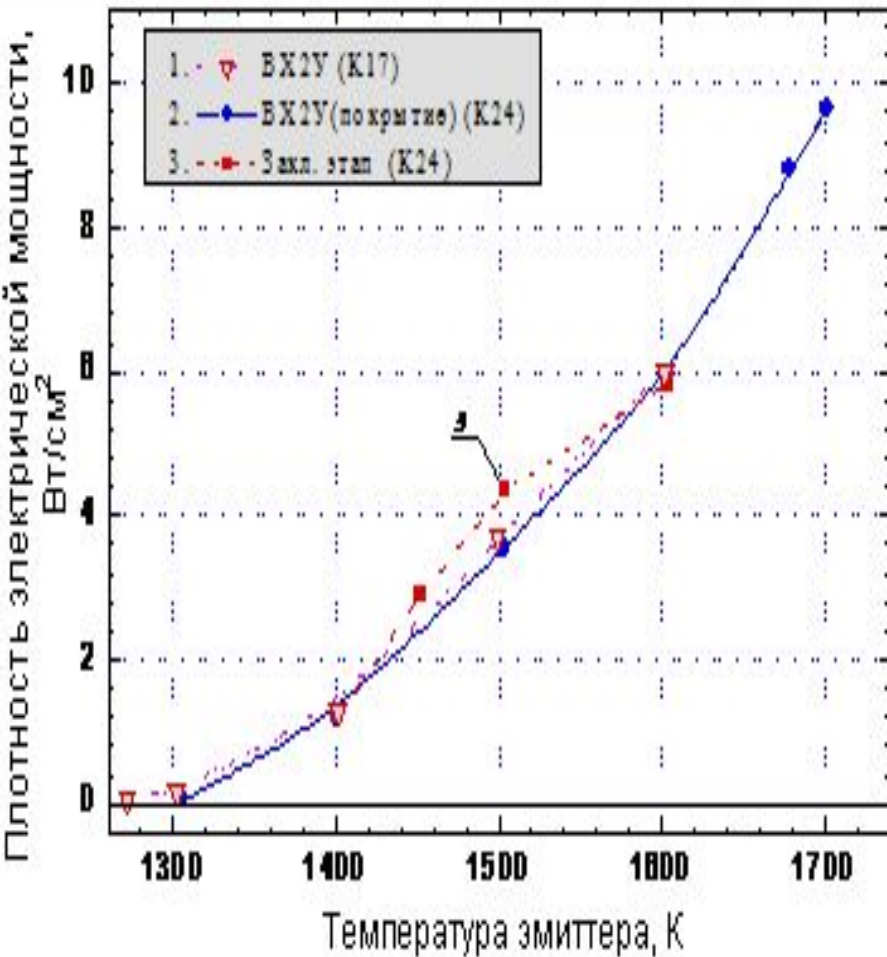
- Освоены технологии создания платинового и ВХ2У-покрытий толщиной $3\div 10$ мкм, позволяющие формировать покрытия на внутренней и наружной поверхности эмиттерной и коллекторной оболочек.
- В обоснование технологий проведен комплекс исследований и испытаний:
 - ✓ экспериментальные исследования температурной эволюции
 - элементного состава электродов,
 - кристаллографической ориентации рабочей поверхности электродов;
 - работы выхода эмиссионных покрытий для широкого диапазона температуры электродов;
 - ✓ испытания электродов с покрытиями в лабораторных ТЭП с электронагревом.
 - ✓ Подтвержденный экспериментально к настоящему времени рабочий ресурс термоэмиссионных преобразователей на основе термоэмиссионной пары материалов платина-ВХ2У составляет около одного года.

Ресурсные испытания ЭГЭ в энергонапряжённых режимах ($q_E = 40 \text{ Вт/см}^2$)



№ кр	Электрод. пара	P_{Cs} , Торр	T_C , K	$W_{эл. макс}$, Вт/см²	Ресурс, час
1	$W_{фт}(110)-W_{фт}(110)$	2,1	870	7	~8000
2	$(W_{фт} / W_{фт.фасет. [111]+Pt})-BH-2$	2,7	893	5,8	~1000
3	$W_{фт.фасет. [111]-BH-2$	3,2	900	5,4	~6460
4	$W_{фт. [111]-BH-2$	4,0	923	4,2	~4000

Экспериментальные результаты испытаний низкотемпературных ТЭП/ЭГЭ с электродной парой Pt-VX2Y



Влияние примесей ГПД и ЛПД

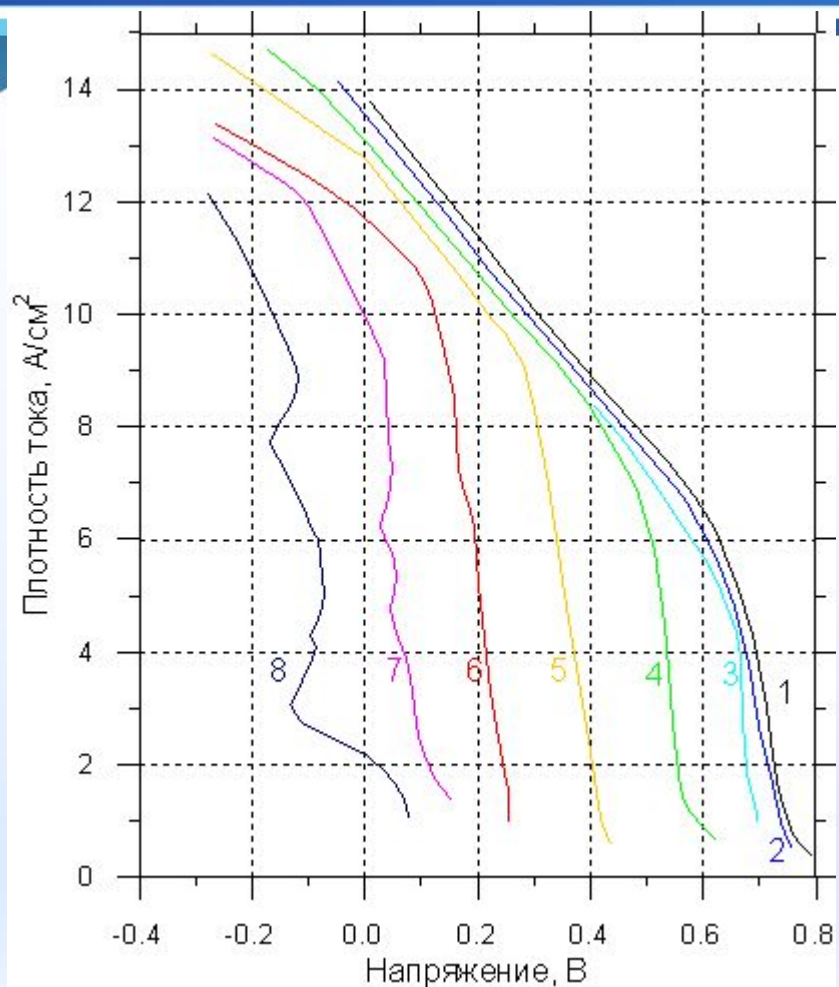


а)

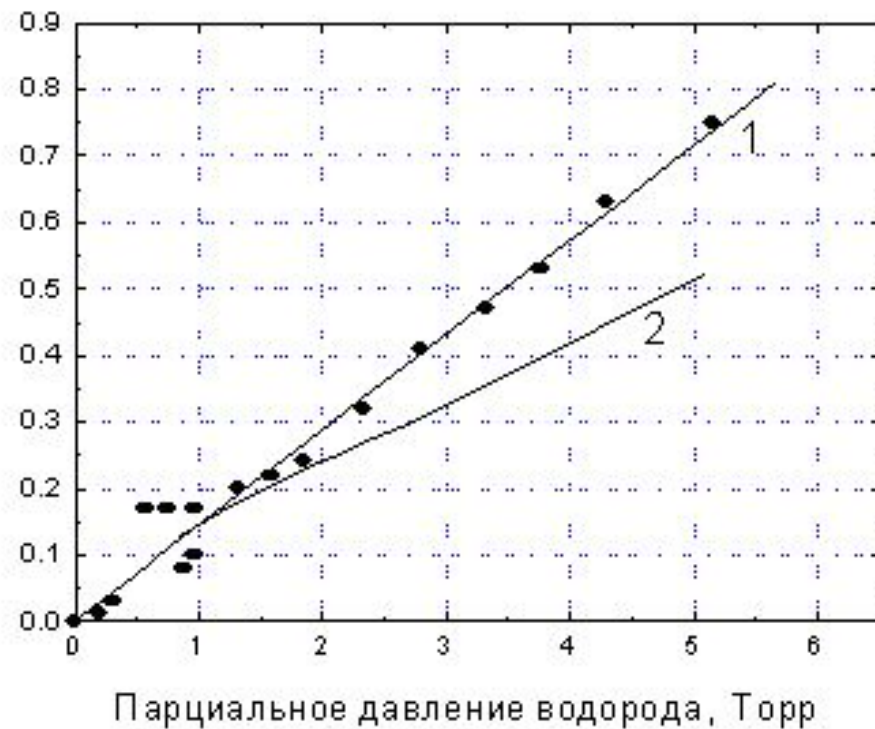
б)

Относительное изменение интенсивности активных процессов влияния примесей из межэлектродной страны ТЭП на эмиттер (а) и коллектор (б) для ЯЭУ типа "ТОПАЗ".

Влияние водорода



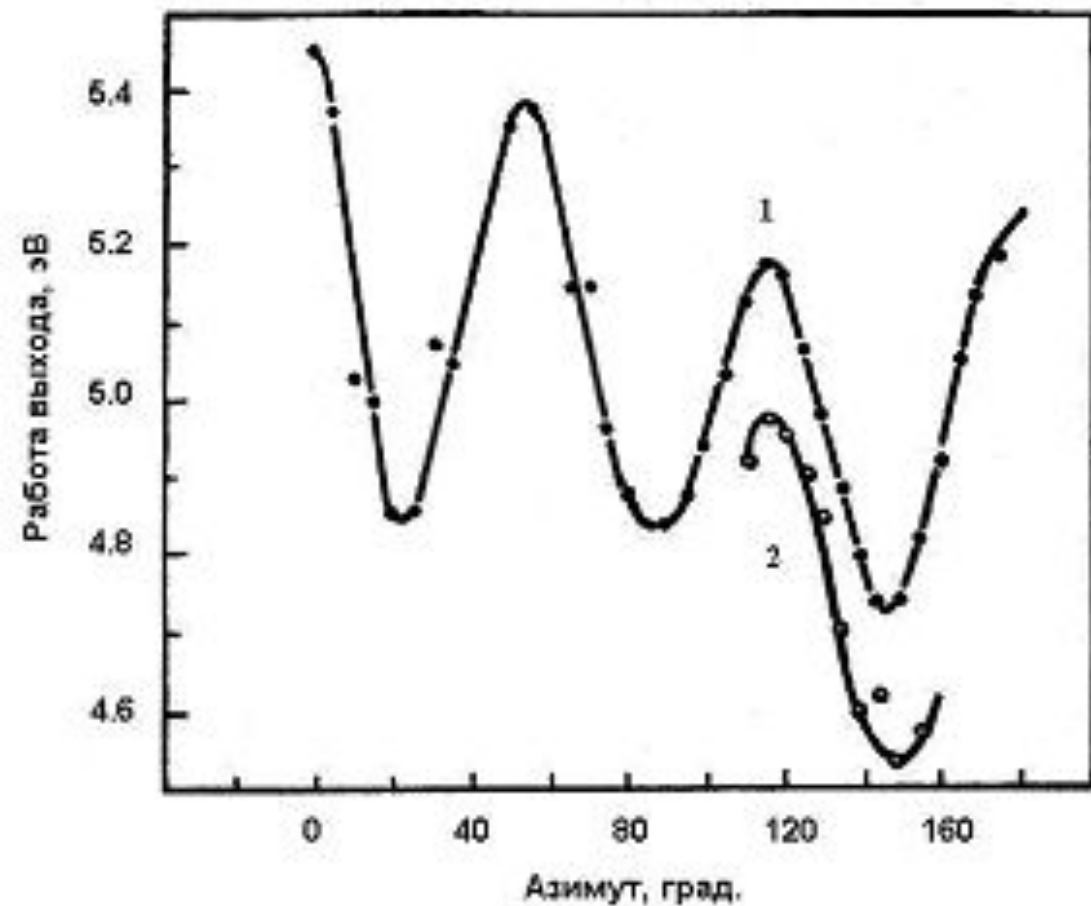
Изменение напряжения
 $\Delta V = V_{Cs} - V_{Cs+H_2}$ В



1. Расчет по формуле $\Delta V = 0.15 P_{H_2}$;
2. Расчет по программе TOR-N
- ◆ Эксперимент.

$T_E = 1775$ К, $T_C = 900$ К, $P_{Cs} = 2.45$ торр, $d = 0,4$ мм;
 1 - $P_{H_2} = 0$ торр; 2 - 0.2; 3 - 0.3; 4 - 1.3, 5 - 2.3; 6 -
 3.3; 7 - 4.3; 8 - 5.1.

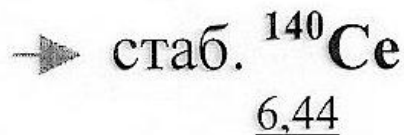
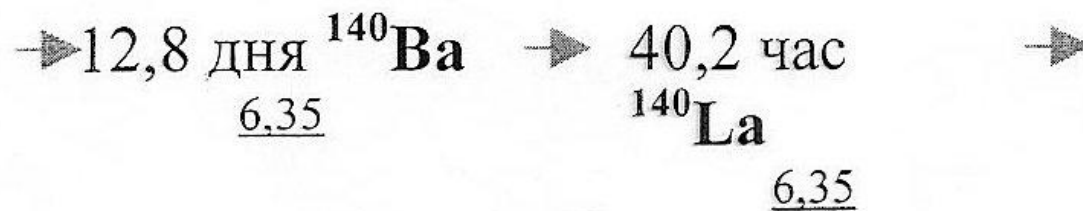
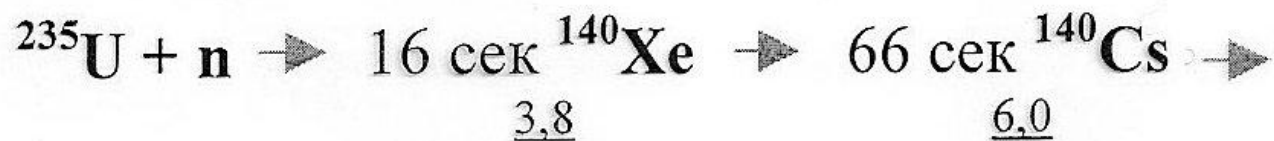
Влияние углерода



Распределение вакуумной работы выхода по поверхности образца с $W_{\text{ФТ}}$ [111]-покрытием:
1 – "чистая" поверхность;
2 – "карбидизированная" поверхность.

Образование эмиссионно-активных ГПД и ЛПД

На примере образования изотопов Ва-140 и La-140



Образование эмиссионно-активных ГПД и ЛПД (продолжение)

- Щелочноземельные и редкоземельные ПД существуют в топливной матрице UO_2 в виде нелетучих оксидов. Активно мигрировать по полостям ЭГК и выходить в газоотводной тракт могут их материнские нуклиды Kr, Xe, Rb и Cs
- **Kr → Rb → Sr → Y → Zr → Nb → Mo**
- **Xe → Cs → Ba → La → Ce → Pr → Nd**

Образование эмиссионно-активных ГПД и ЛПД (продолжение)

Наиболее значимые цепочки:

$\text{Xe}^{138} \rightarrow \text{Cs}^{138} \rightarrow \text{Ba}^{138}$
14,13 мин 33,4 мин

$\text{Xe}^{139} \rightarrow \text{Cs}^{139} \rightarrow \text{Ba}^{139} \rightarrow \text{La}^{139}$
40,8 с 9,4 мин 84,4 мин

$\text{Xe}^{140} \rightarrow \text{Cs}^{140} \rightarrow \text{Ba}^{140} \rightarrow \text{La}^{140} \rightarrow \text{Ce}^{140}$
13,6 с 65,5 с 12,79 сут 40,22 час

Образование эмиссионно-активных ГПД и ЛПД (продолжение)

Схема миграции атомов ГПД и ЛПД по полостям ЭГЭ:

Топливные гранулы



Объем пористости ТК



Компенсационный объем

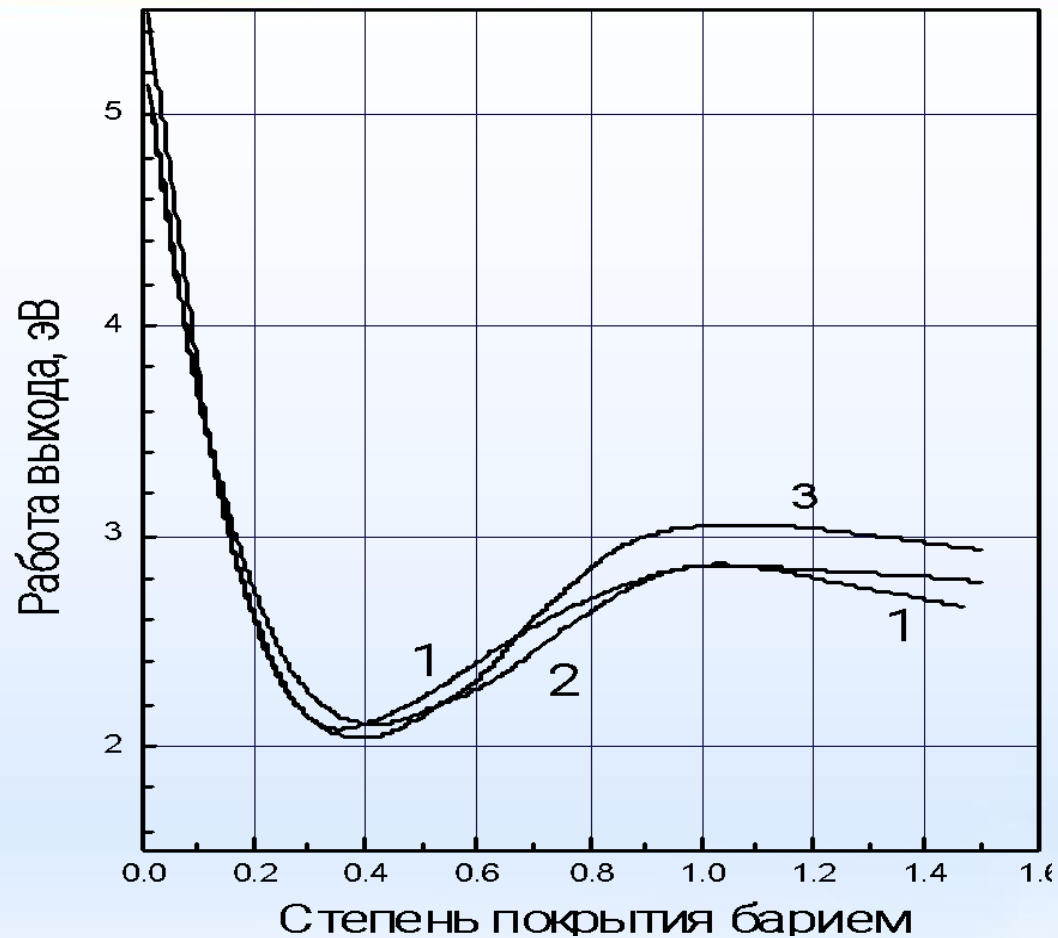


Тракт ГОУ



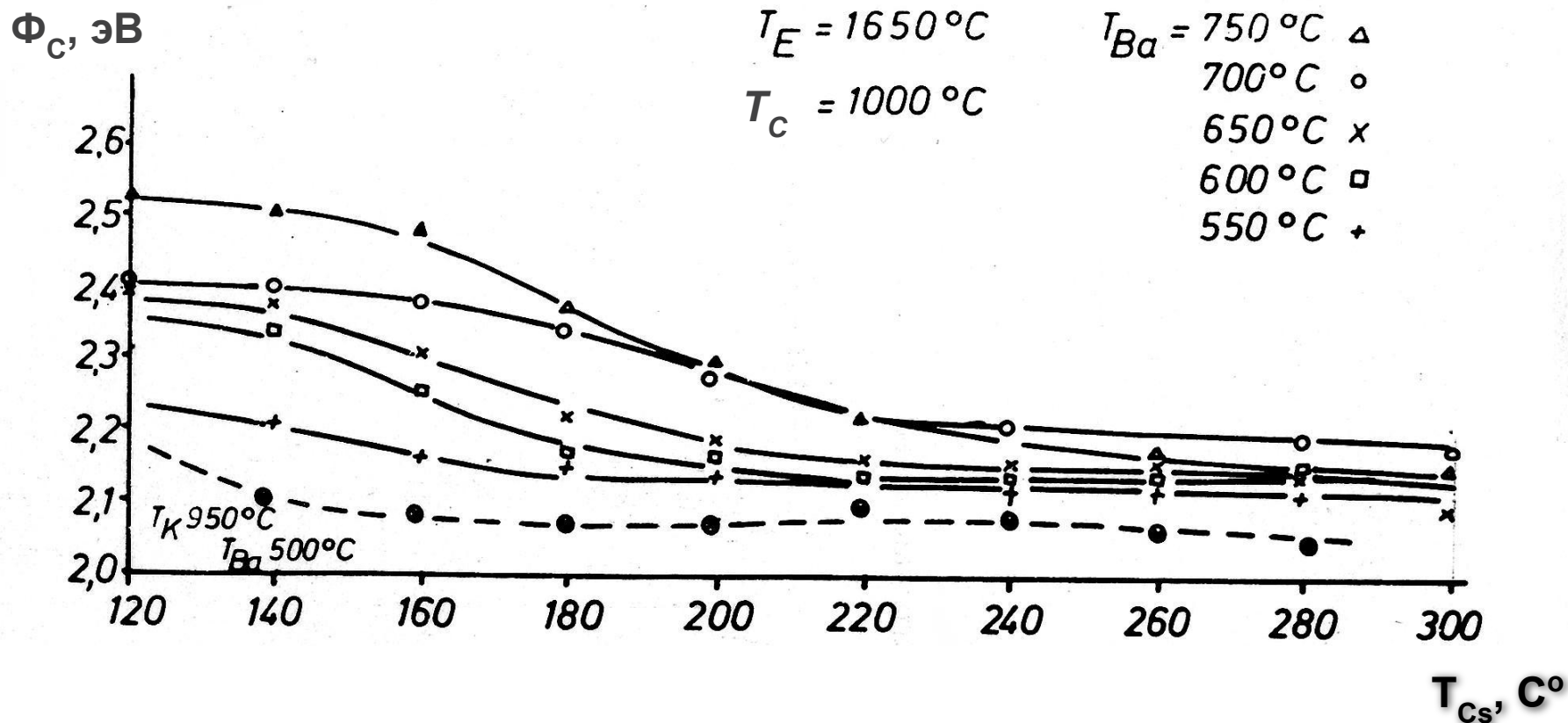
МЭЗ (сумма по всем ЭГЭ)

Влияние эмиссионно-активных ГПД и ЛПД



Изменение работы выхода системы Me(110)-Ba в зависимости степени покрытия барием при адсорбции на подложку при $T=300$ К (принято, что $\Theta_{Ba} = 1$ в максимуме Φ_{Ba}): 1 – Nb; 2 – Mo; 3 – W

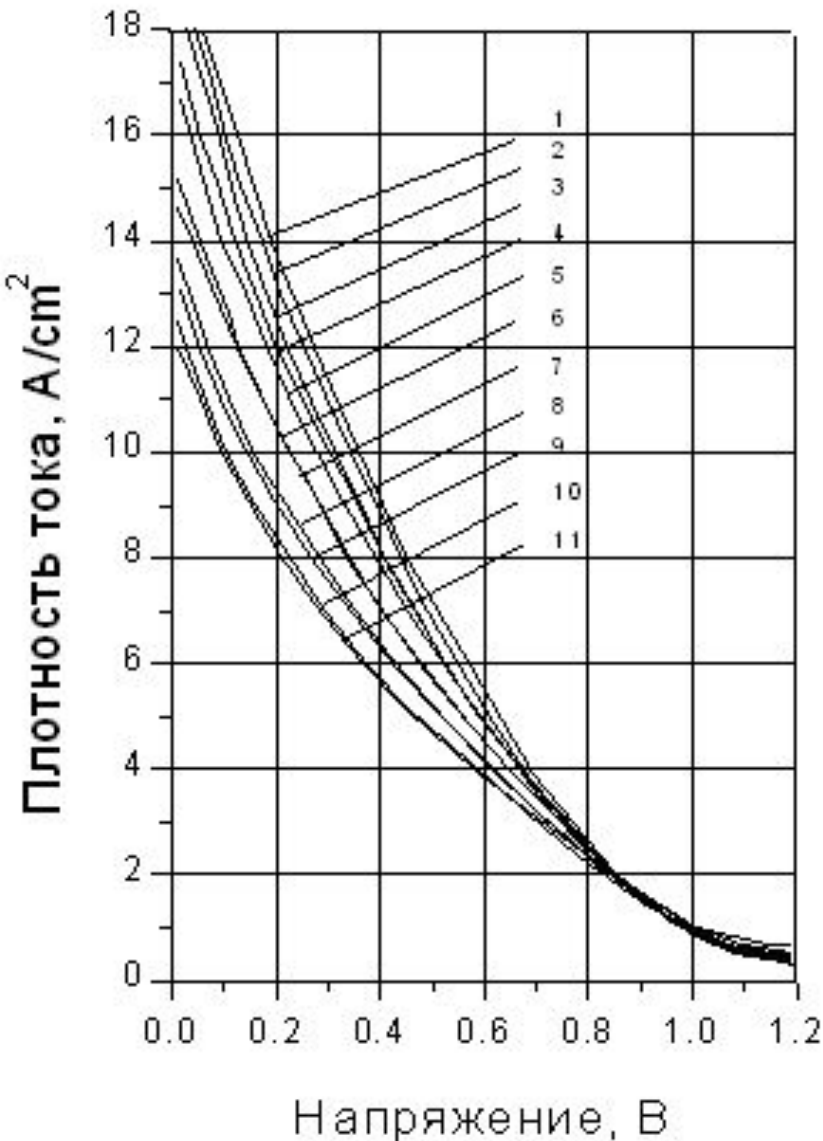
Влияние эмиссионно-активных ГПД и ЛПД (продолжение)



Изменение работы выхода коллектора из поликристаллического Мо в цезиевом ТЭП:

$$P_{Ba} = 2 \cdot 10^{-3} - 2 \cdot 10^{-1} \text{ мм.рт.ст.}$$

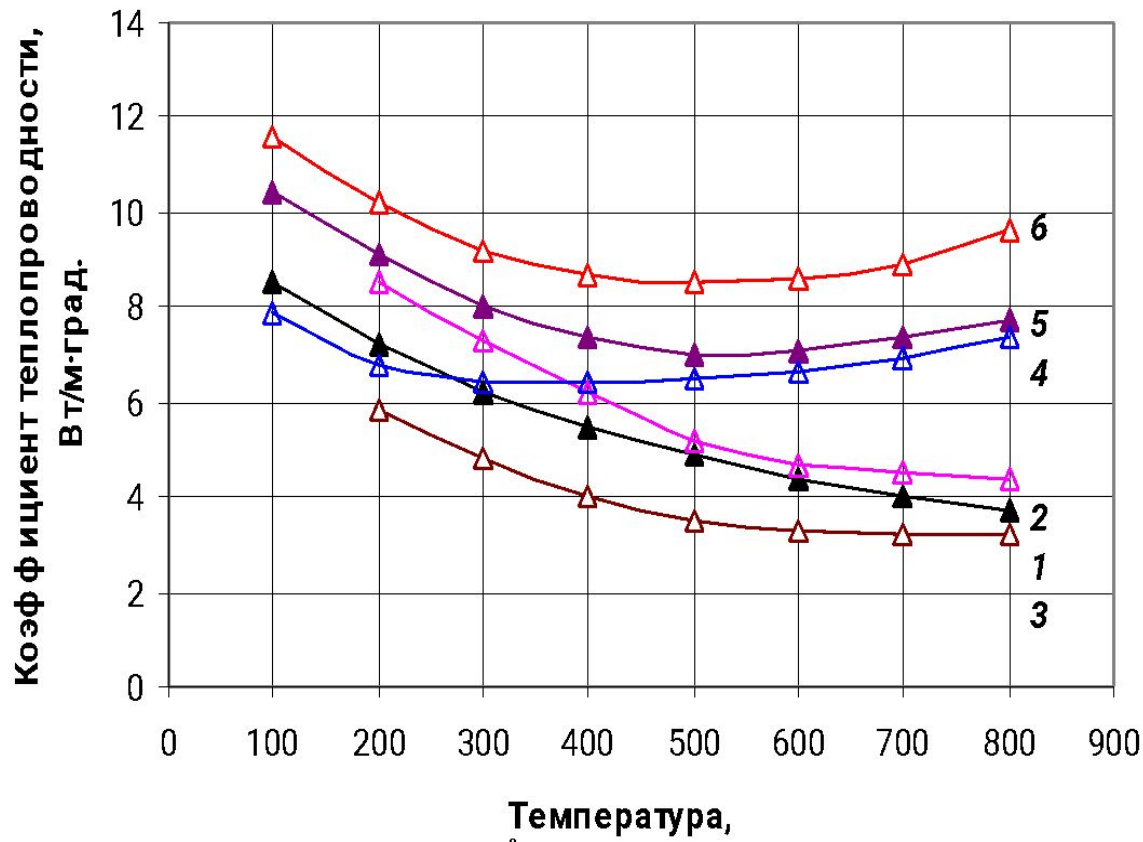
Влияние эмиссионно-активных ГПД и ЛПД (продолжение)



Изменение экспериментальной ВАХ ТЭП в зависимости от величины парциального давления ксенона:
 $T_E = 1800$ К; $P_{Cs} = \text{opt}$; $d = 0,25$ мм.

- 1 – $P_{Xe} = 0$ мм рт. ст.;
- 2 – 10;
- 3 – 20;
- 4 – 40;
- 5 – 60;
- 6 – 90;
- 7 – 105;
- 8 – 130;
- 9 – 145;
- 10 – 170;
- 11 – 190.

Модифицированная топливная композиция на основе UO_2



- 1 – данные из литературы;
- 2 – штатные таблетки UO_2 ОАО "МСЗ";
- 3 – штатные таблетки UO_2 с добавкой Er_2O_3 ОАО "МСЗ";
- 4 – модифицированные таблетки $UO_2+0,05\%TiO_2$;
- 5 – модифицированные таблетки $UO_2+0,1\%SnO_2$;
- 6 – модифицированные таблетки UO_2 (с наночастицами)

Для повышения теплопроводности и термостойкости при «мокрой» технологической схеме производства таблеток UO_2 улучшена его микроструктура за счет соосаждения мелкодисперсных частиц размером 10 – 20 нм.

Перспективный ЭГК для КЯЭУ нового поколения.

- С отдельными полостями ТВЭЛ и МЭЗ.
- С течением пара Cs в МЭЗ.
- С высокоэффективной низкотемпературной электродной парой.
- С большой эмиссионной поверхностью ($\times 1,5-2$) в схемах, подобных комбинированному ЭГК.
- С ТВЭЛ на основе модифицированного топлива.

СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ!