



Обнинский институт атомной энергетики
национального исследовательского ядерного
университета «МИФИ»

**Методы и техника исследований и
измерений характеристик ТЭП, ЭГЭ, ЭГК на
предреакторной и реакторной
экспериментальных базах**

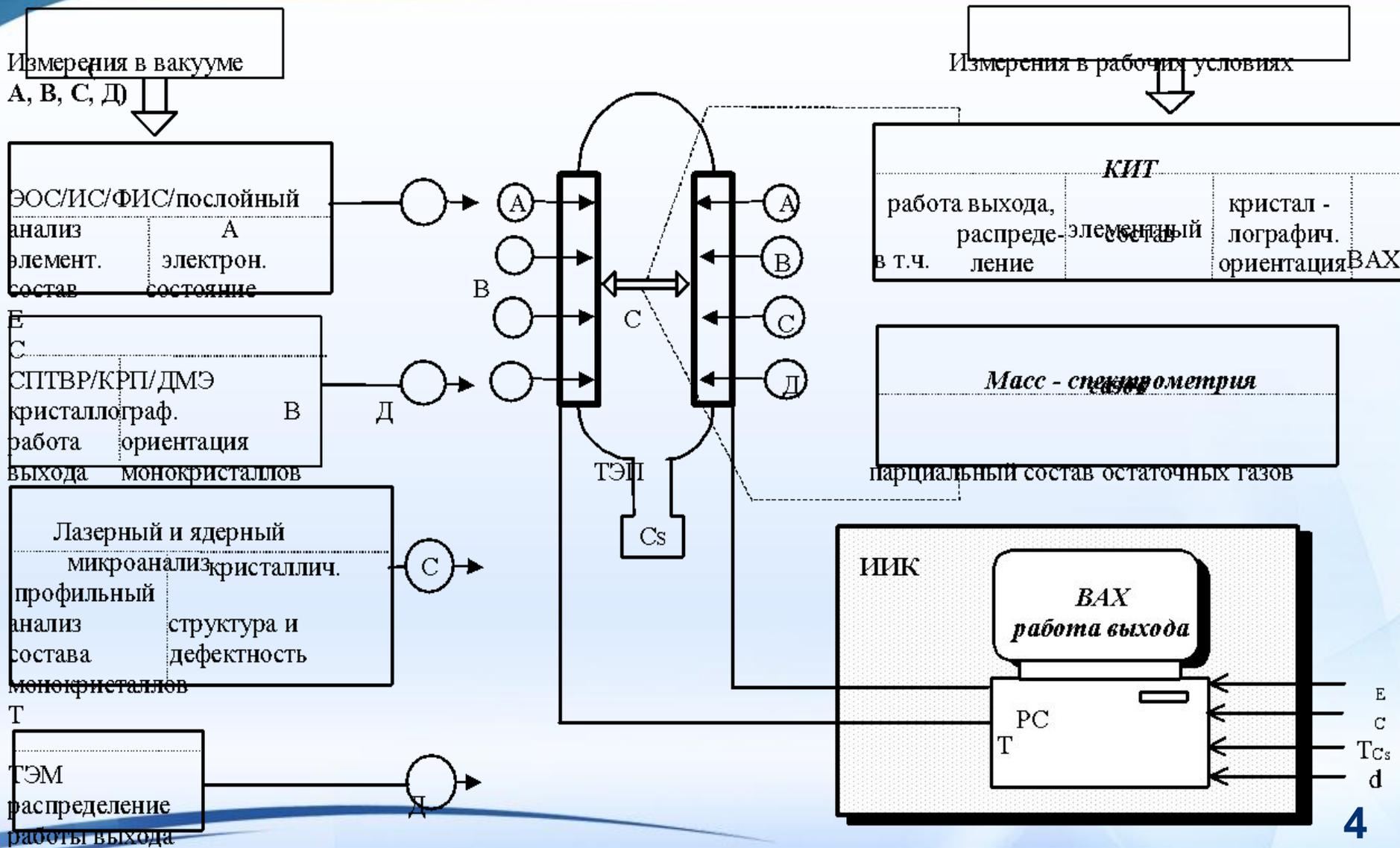
профессор В.И.Ярыгин

Основные направления исследований и испытаний ТЭП, ЭГЭ, ЭГК, ЯЭУ

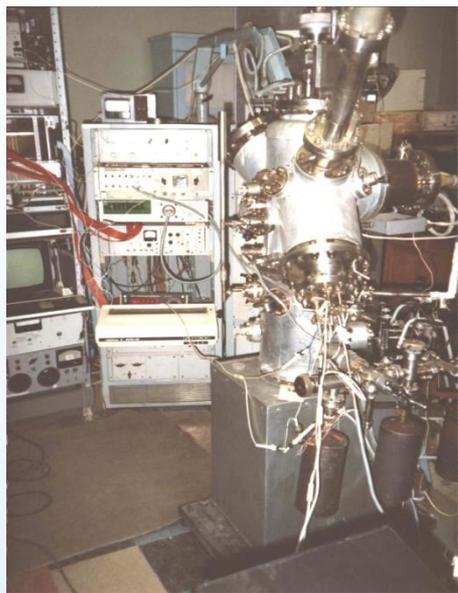


Предреакторные исследования и испытания

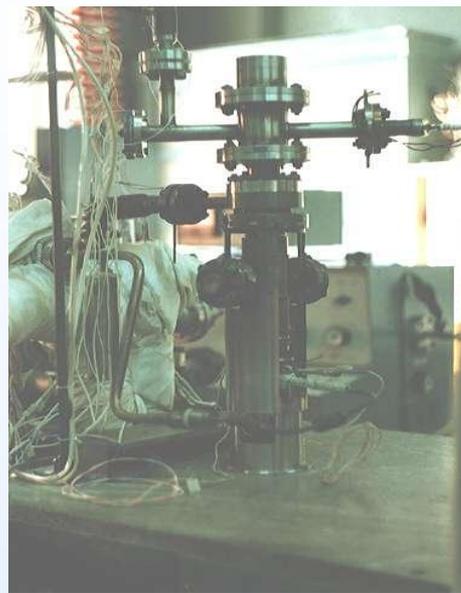
Физическая предреакторная экспериментальная база термоэмиссионных исследований и испытаний ГНЦ РФ-ФЭИ



Действующие основные стенды предреакторных исследований и испытаний термоэмиссионных систем экспериментальной базы ГНЦ РФ-ФЭИ



а



б



в

- а – аналитическая установка «Поверхность» для исследования свойств электродов и конструкционных материалов в модельных условиях;
- б – электрофизическая установка для измерений характеристик лабораторного термоэмиссионного преобразователя с плоской геометрией электродов (3 рабочих места, ВАХ, базы данных);
- в – электровакуумные стенды (2 рабочих места) для испытания термоэмиссионных ЭГЭ.

действующие основные стенды предреакторных исследований и испытаний термоэмиссионных систем экспериментальной базы ГНЦ РФ-ФЭИ (продолжение)

Электрофизический стенд ресурсных испытаний



действующие основные стенды предреакторных исследований и испытаний термоэмиссионных систем экспериментальной базы ГНЦ РФ-ФЭИ (продолжение)

Стенд **УСУ-3** предназначен для использования современных методов исследования и моделирования ресурсоограничивающих процессов на поверхности конструкционных и электродных материалов в вакууме как самостоятельно, так и в ходе НИОКР.

Основные характеристики:

Вакуум в аналитической камере, мм.рт.ст. до 10^{-10}

Мощность нагревателей, кВт до 5

Температура материалов, К до 2500

Методическое обеспечение: масс-спектрометрия остаточных газов аналитической камеры; электронная Оже - спектроскопия для определения элементного состава поверхности материалов, спектроскопия полного тока для определения кристаллографической ориентации приповерхностных слоёв атомов материала, контактная разность потенциалов для определения работы выхода электронов с поверхности материала.



действующие основные стелды предреакторных исследований и испытаний термоэмиссионных систем экспериментальной базы ГИЦ РФ-ФЭИ (продолжение)

Стелд **КИТ** предреазначен для использования современных методов исследования и моделирования ресурсоограничивающих процессов, протекающих на поверхности конструкционных и электродных материалов непосредственно при их контакте с рабочей парогоазовой средой как самостоятельно, так и в ходе НИОКР.

Основные характеристики:

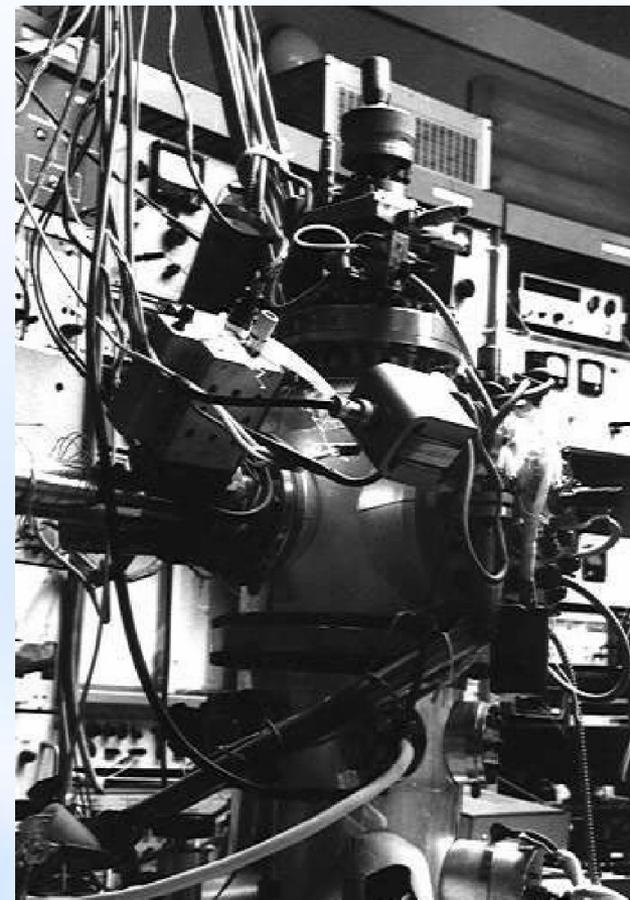
Вакуум в аналитической камере, мм.рт.ст. до 10^{-10}

Давление рабочей парогоазовой среды в имеющемся рабочем участке, атм до 1

Мощность нагревателей, кВт до 5

Температура материалов, К до 2500

Методическое обеспечение: масс-спектрометрия остаточных газов аналитической камеры; электронная Оже - спектроскопия для определения элементного состава поверхности материалов, электронная микроскопия для визуализации поверхности материалов, спектроскопия полного тока для определения кристаллографической ориентации приповерхностных слоёв атомов материала, контактная разность потенциалов для определения работы выхода электронов с поверхности материала.



действующие основные стелды предреакторных исследований и испытаний термоэмиссионных систем экспериментальной базы ГИЦ РФ-ФЭИ (продолжение)

Стелд **УМИ-ТЭП** (3 рабочих места) предрназначен для использования современных методов исследования и испытания лабораторных термоэмиссионных преобразователей (ТЭП) с плоскими электродами площадью $1,5 \text{ см}^2$ при электронагреве, а также взаимодействия материалов электродов с парогазовой рабочей средой межэлектродного зазора как самостоятельно, так и в ходе НИОКР.

Основные характеристики:

Вакуум в рабочей полости ТЭП, мм.рт.ст.	до 10^{-6}
Мощность нагревателей, кВт	до 10
Температура электродов, К	до 2200

Методическое обеспечение: масс-спектрометрия откачиваемых газов; оптическая спектроскопия излучения межэлектродной среды и материалов электродов; измерение полного тока термоэлектронной эмиссии материалов электродов; информационно-измерительный комплекс сбора и обработки информации, высокоточные системы регулирования и поддержания температуры материалов электродов.



действующие основные стелды предреакторных исследований и испытаний термоэмиссионных систем экспериментальной базы ГИЦ РФ-ФЭИ (продолжение)

Стелд **УСП** (2 рабочих места) предназначен для использования современных методов испытаний полномасштабных макетов термоэмиссионных и термоэлектрических электрогенерирующих элементов, термоэмиссионных и термоэлектрических модулей прямого преобразования с электронагревом как самостоятельно, так и в ходе НИОКР.

Основные характеристики:

Вакуум, мм.рт.ст.

в рабочей полости ТЭП до 10^{-6}

в системе защитного вакуума до 10^{-5}

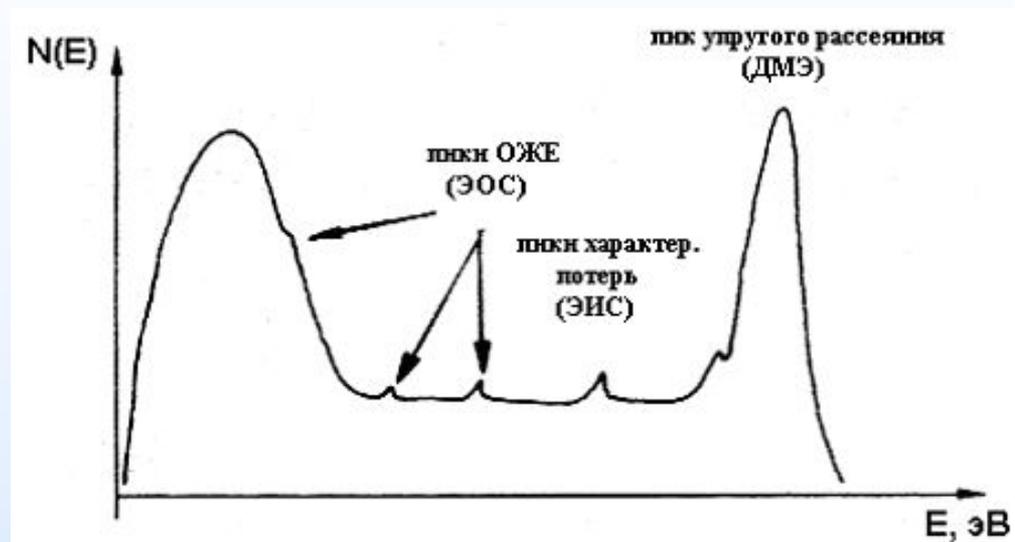
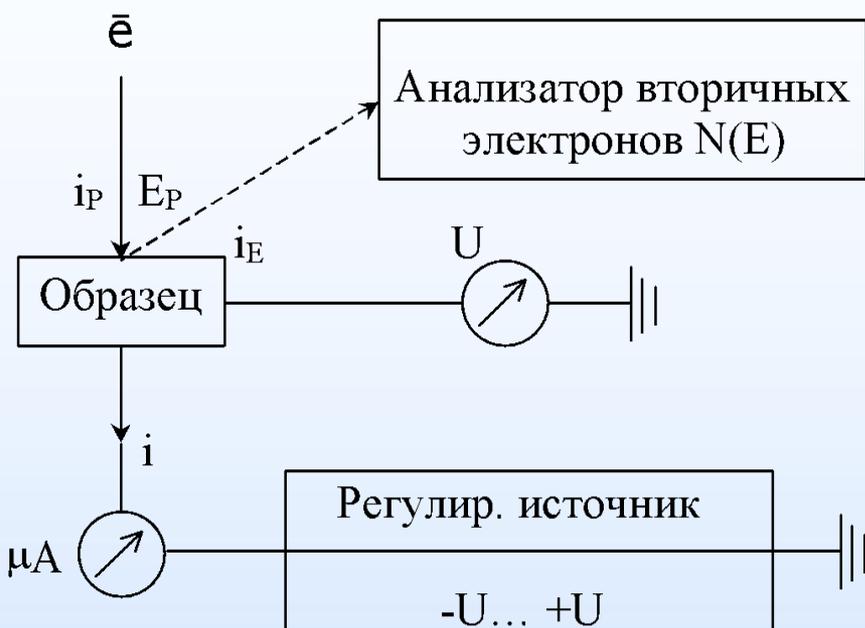
Мощность нагревателей, кВт до 25

Температура электродов, К до 2200

Методическое обеспечение: масс-спектрометрия откачиваемых газов; измерение полного тока термоэлектронной эмиссии материалов электродов; экспресс-система сбора и обработки информации высокоточные системы регулирования и поддержания температуры материалов электродов.

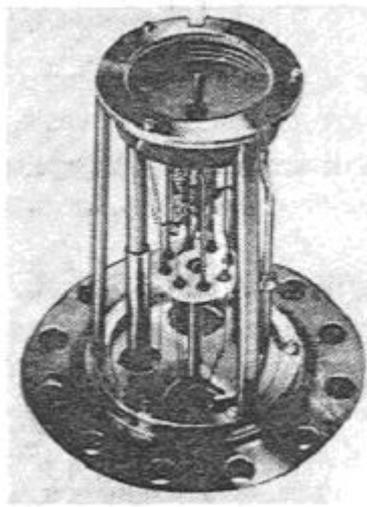
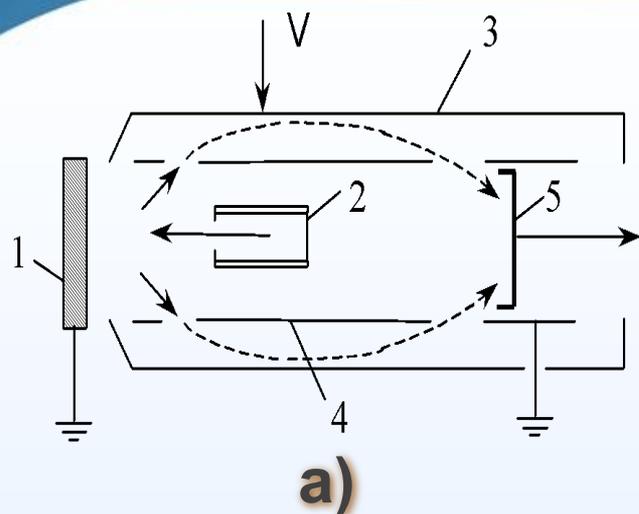


Принципиальная схема базовых методов измерений

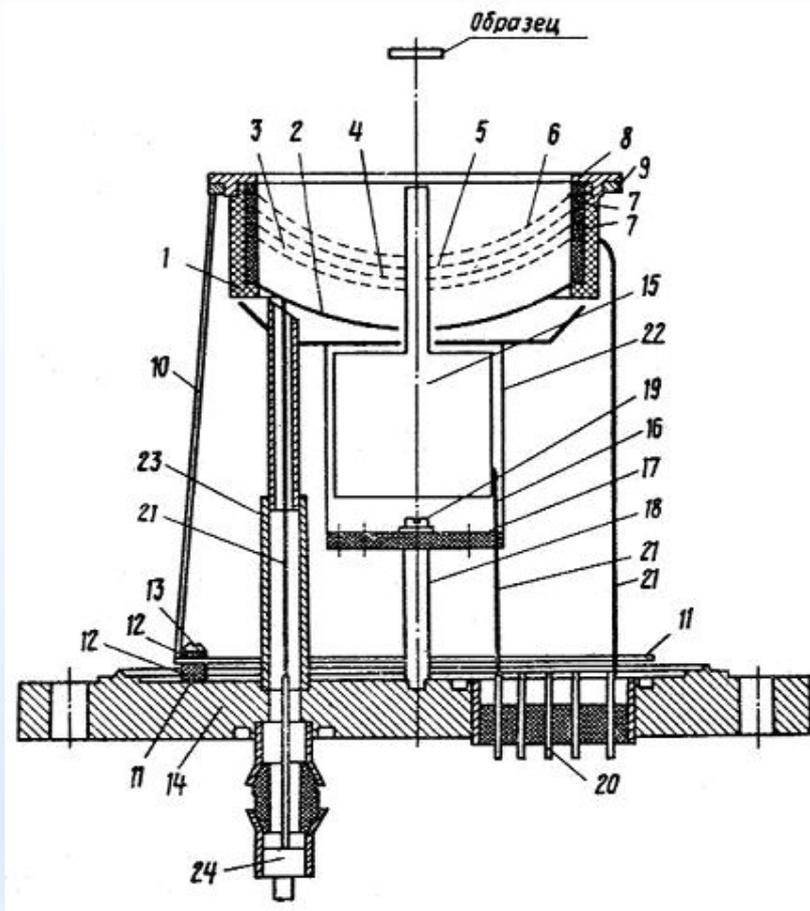


Кривая распределения по энергии истинно вторичных электронов

Конструктивные схемы используемых анализаторов оже-электронов типа «цилиндрическое зеркало» и 4-х сеточного КСА



В)



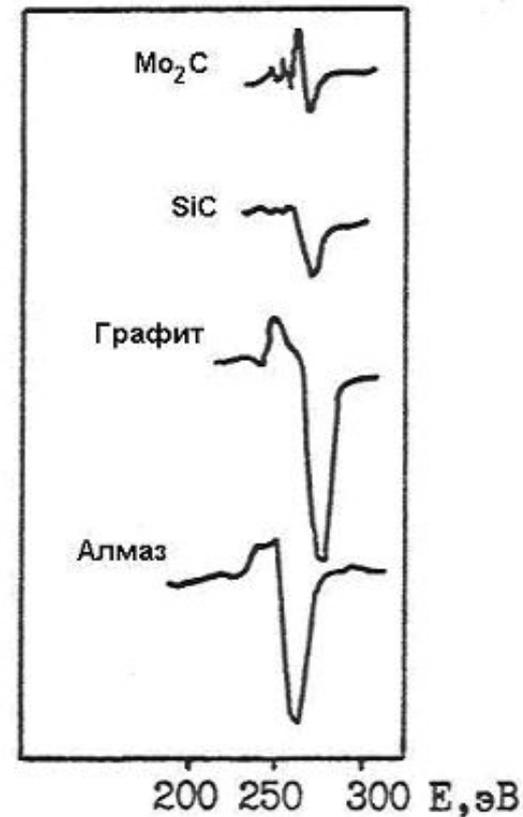
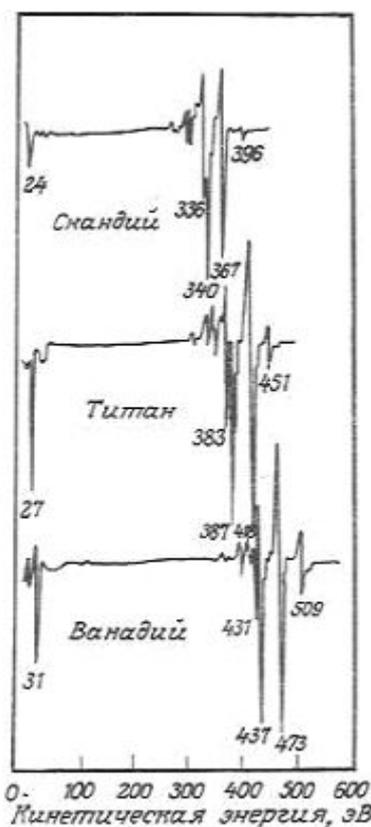
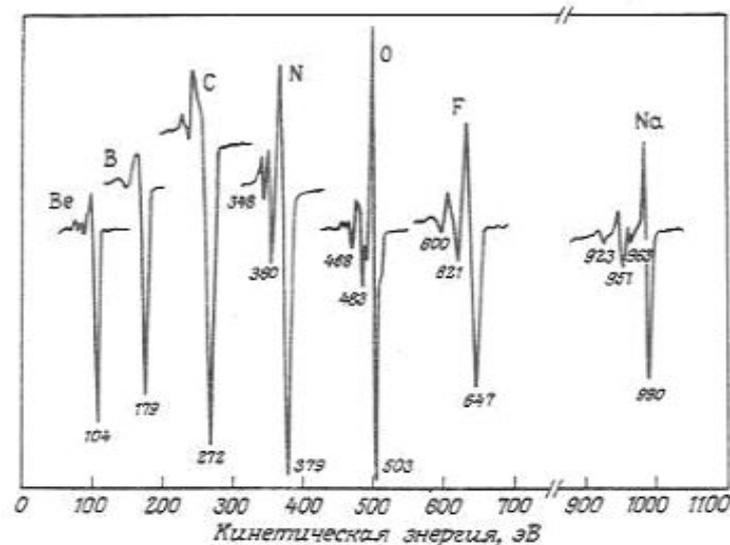
б)

а): 1 - образец; 2 - электронная пушка; 3, 4 - внешний и внутренний цилиндр анализатора; 5 - коллектор оже - электронов.

б): 1 - анализирующий керамический блок; 2 - 6 - коллекторно-сеточная анализирующая система; 7-9, 12, 20, 24 – МКУ - компоненты; 10-14, 16-23 - элементы крепления, экраны и коммутирующие выводы; 15 - электронная пушка.

в): внешний вид 4-х сеточного КСА.

Пример характерных электронных оже-спектров

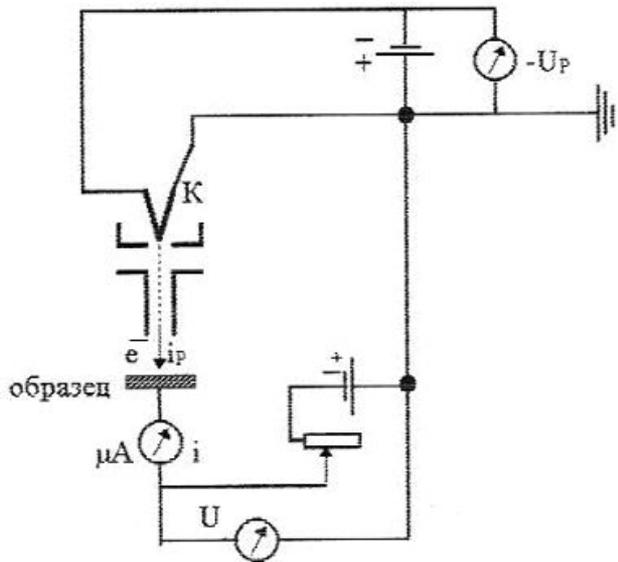


Для определения концентраций i -го элемента в оже-спектре (A_i^i , ат.%) используется формула:

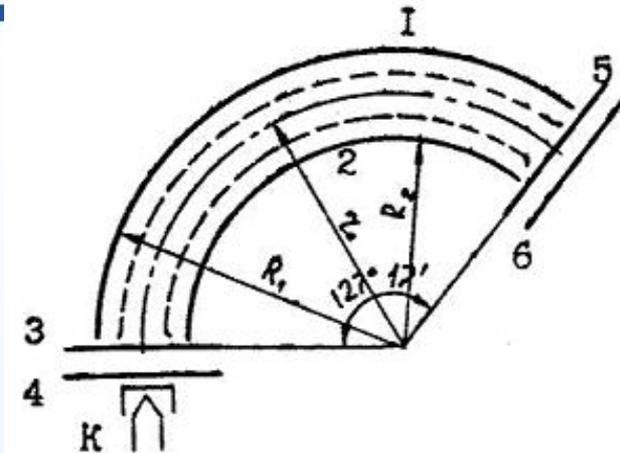
$$A_i^i = \frac{A_i^\delta / A_i^0}{\sum_k A_k^\delta / A_k^0}, \text{ где}$$

A_i^p - регистрируемые амплитуды оже-линий;
 A_i^0 - амплитуды эталонных оже-линий;
 A_i^H - нормированные амплитуды оже-линий;
 \sum_k - суммирование по всем k -линиям оже-спектров.

Измерение работы выхода образца методом Андерсона



Блок-схема измерения КРП регистрацией КЗ электронного тока на образец с помощью электронного пучка.



Принципиальная схема селектора электронов.

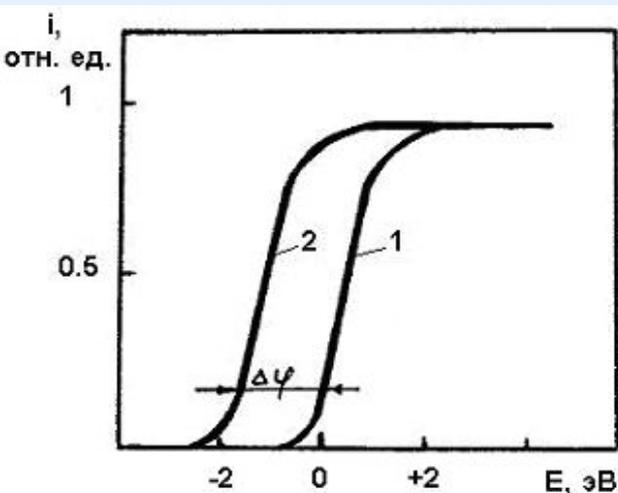
1, 2 – внешний и внутренний отклоняющие электроды;
3, 4 – входные щели;
5, 6 – выходные щели;
K – катодный узел.

Вакуумная работа выхода эталонных образцов:

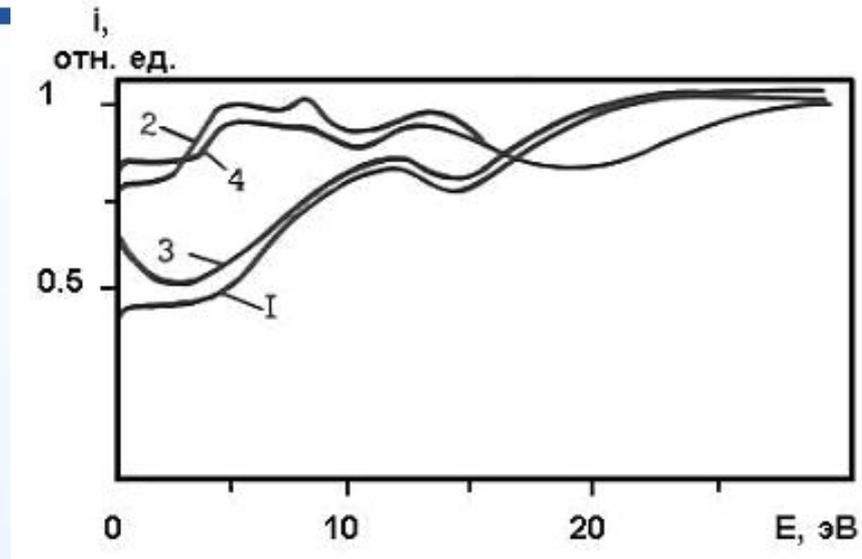
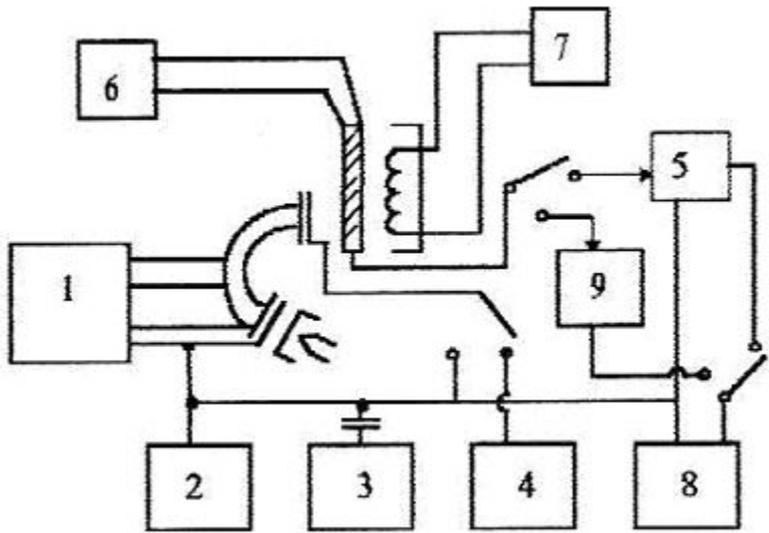
- Mo (110), $\Phi_0 = 5.0 \pm 0.02$ эВ;
- W (110), $\Phi_0 = 5.3 \pm 0.02$ эВ;
- W (112), $\Phi_0 = 4.8 \pm 0.05$ эВ,

$$A_0 = 120,4 \text{ A}/(\text{cm}^2 \text{K}^2)$$

1 - КЗ эталона (110);
2 - КЗ эталона (112).



Определение кристаллографической ориентации поверхности образцов



Блок-схема измерений методами КРП и СПТВР

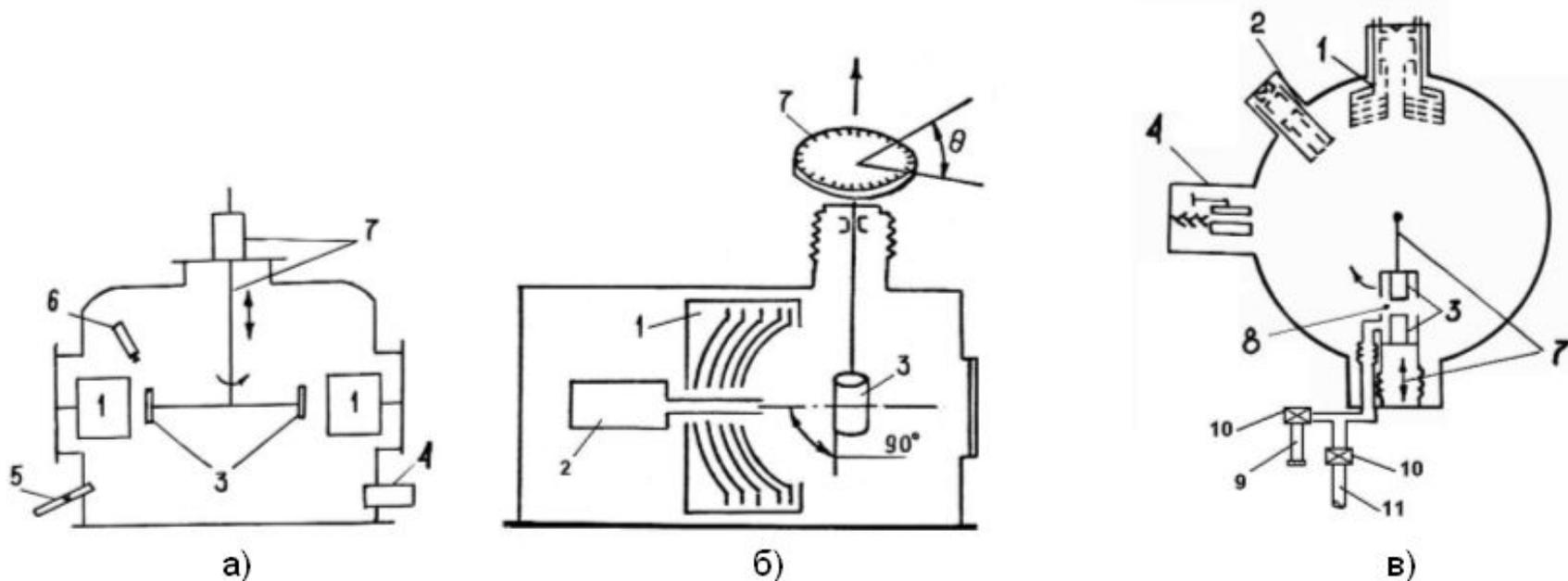
1 - источник питания селектора электронов;
 2 - генератор пилообразного напряжения;
 3 - генератор синусоидального напряжения;
 4 - генератор пилообразного напряжения выходного электрода;
 5 - усилитель - синхронный детектор;

6 - термопара;
 7 - источник питания электронной бомбардировки;
 8 - самописец;
 9 - электрометрический усилитель.

1 - КЗ эталона (110);
 2 - КЗ эталона (112);
 3 - КЗ области ЭО с вольфрамовым покрытием, ориентированной по (110)-грани;
 4 - КЗ области ЭО с вольфрамовым покрытием, ориентированной по (112)-грани.

Принципиальные схемы аналитических камер

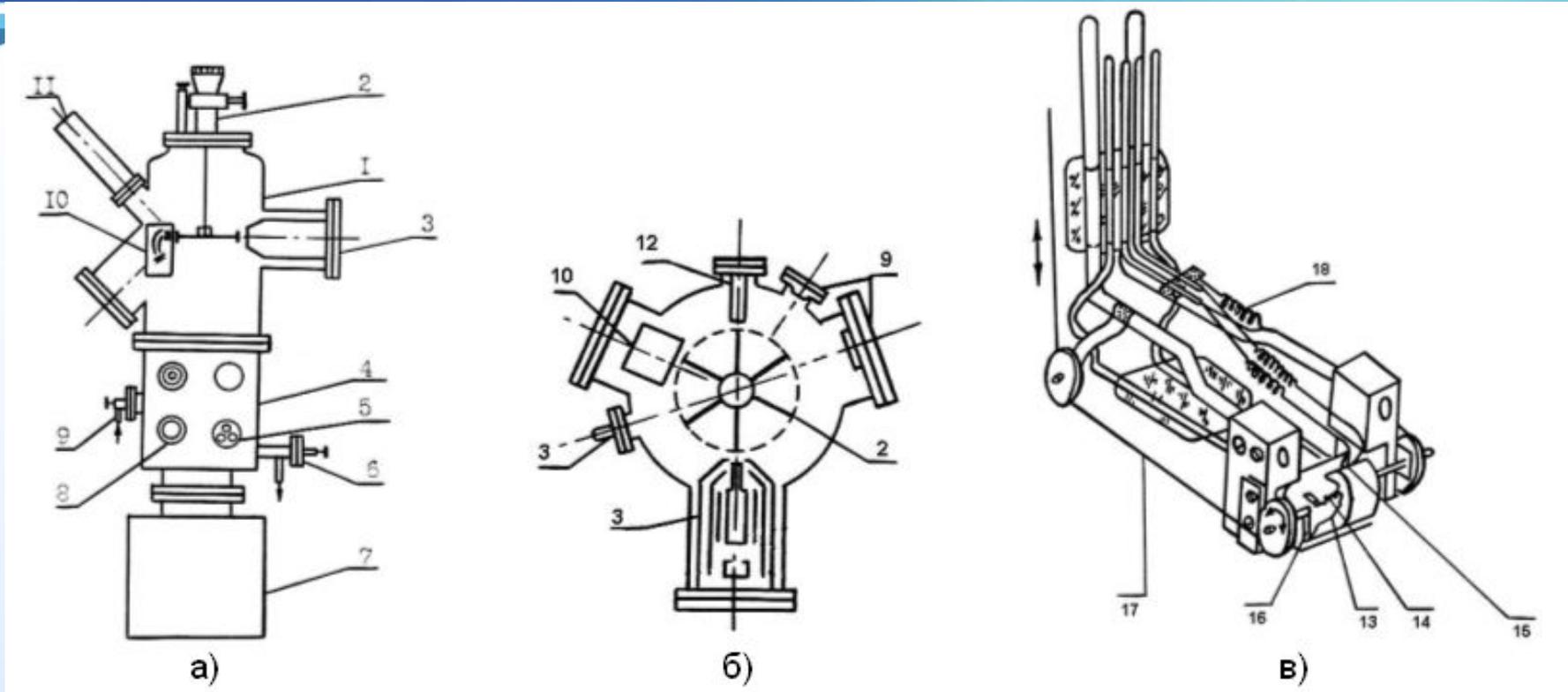
ИЗМЕРЕНИЕ ЭЛЕМЕНТНОГО СОСТАВА, РАБОТЫ ВЫХОДА И КРИСТАЛЛОГРАФИЧЕСКОЙ ОРИЕНТАЦИИ ОБРАЗЦОВ ЭЛЕКТРОДОВ ПЛОСКОЙ И ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ФОРМЫ



(а) и (б) в вакууме, (в) - анализ в ТЭП (КИТ)

- 1 - анализатор вторичных электронов (ЦЗ или КСА); 2 - электронная пушка; 3 - образец;
- 4 - датчик масс-спектрометра; 5 - система напуска эмиссионно-активных газов;
- 6 - источник цезия; 7 - манипулятор образцов (x , y , z , Θ - координаты);
- 8 - рабочая полость ТЭП с образцами эмиттера и коллектора; 9 - резервуар с Cs;
- 10 - горячий вентиль; 11 - откачка/система напуска газов.

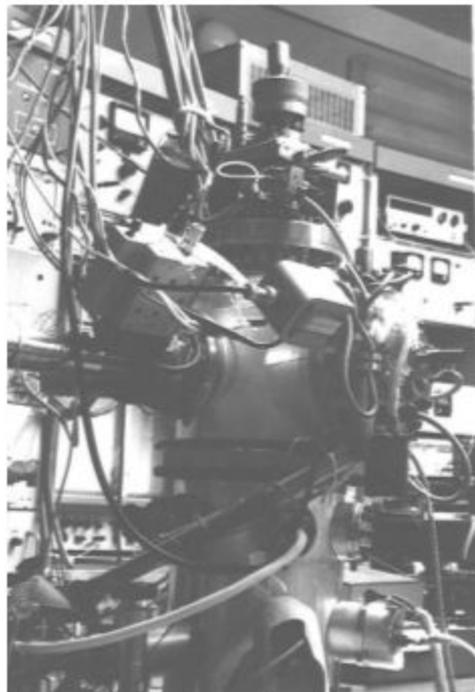
Принципиальные схемы аналитических камер (продолжение)



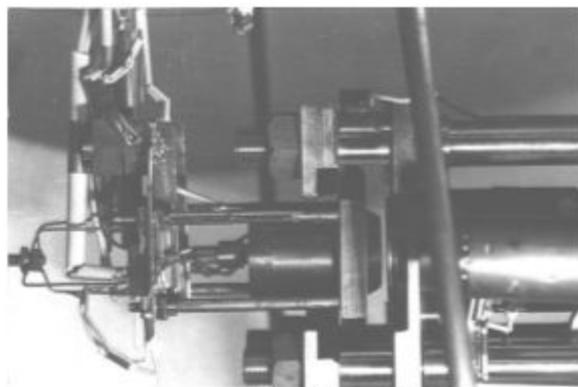
(а) – базовая аналитическая установка, (б) – ее поперечное сечение, (в) – держатель образцов

1 - камера; 2 - манипулятор; 3 - анализатор (ЦЗ или КСА); 4 - сублимационный насос; 5 - титановый испаритель; 6 - вентиль предварительной откачки; 7 - электроразрядный насос; 8 - датчик вакуума; 9 - напуск газов; 10 – селектор электронов; 11 - датчик масс-спектрометра; 12 - источник цезия; 13 - образец; 14 - нагреватель; 15 - термопара; 16 - рамка-держатель; 17 - тяга привода качания образца; 18 - пружина возврата.

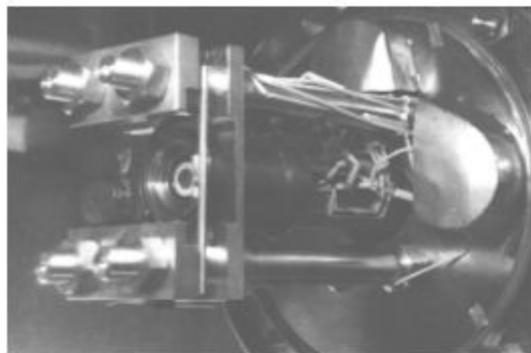
Внешний вид установки анализа образцов в составе ТЭП (КИТ)



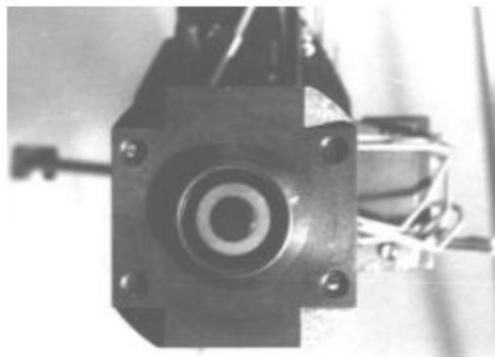
а)



б)



в)

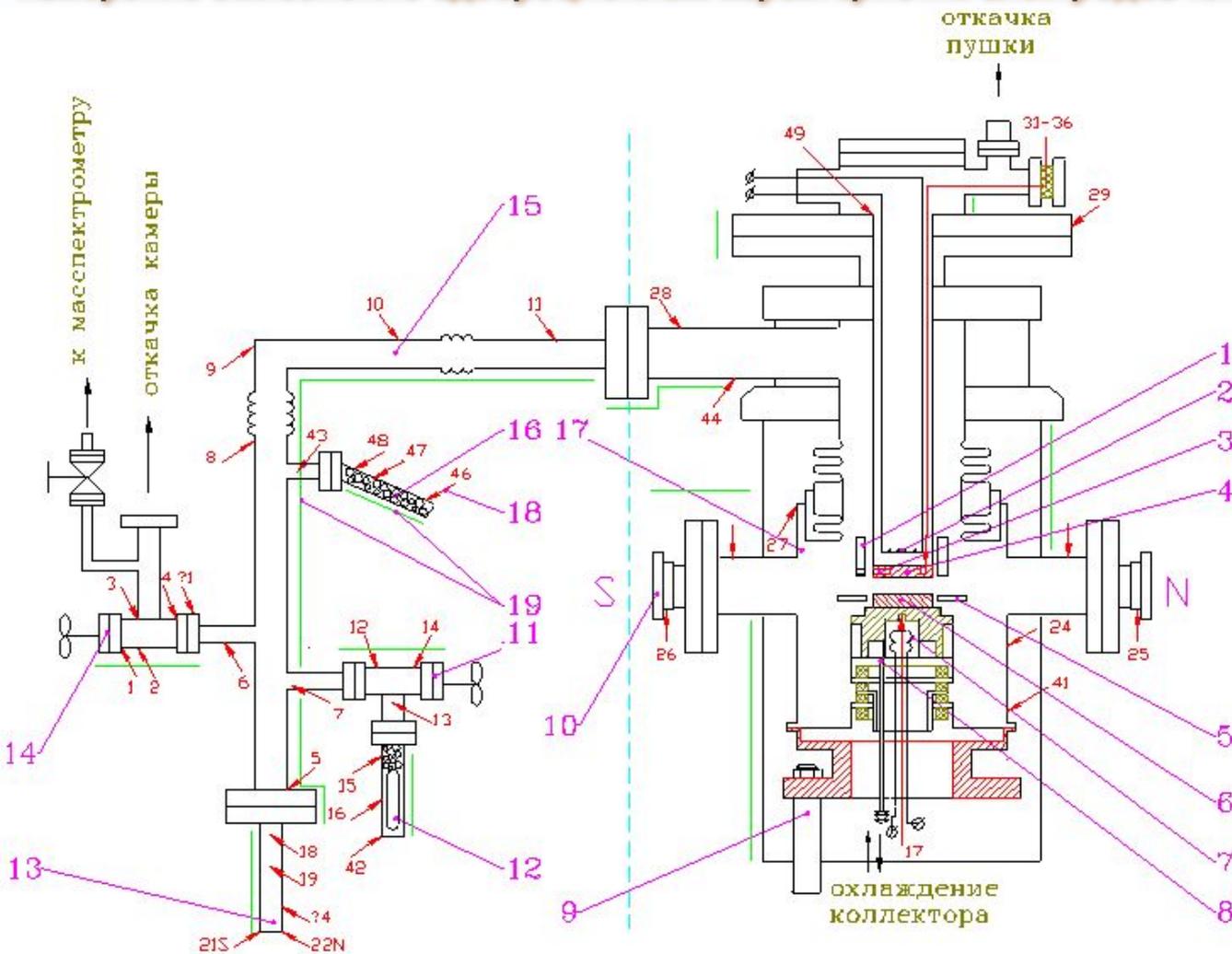


г)

а - аналитическая камера;
б - ТЭП в разгерметизированном состоянии (электроды разведены);
в - подвижный электрод (эмиттер или коллектор);
г - неподвижный электрод (коллектор или эмиттер).

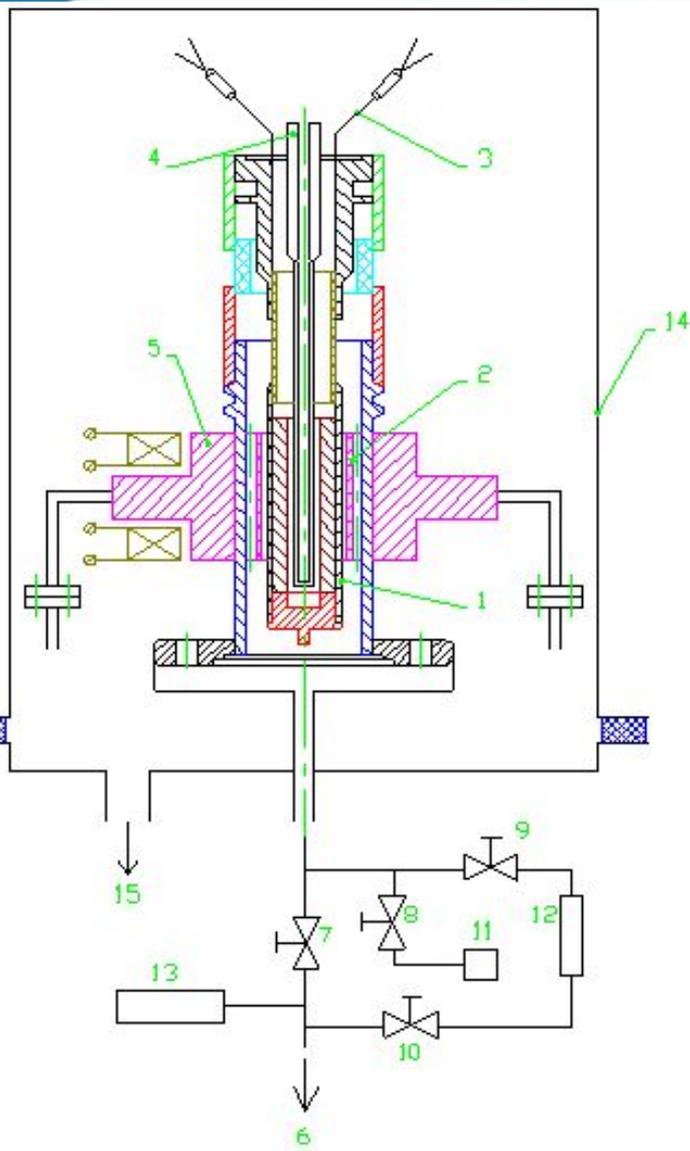
Конструктивная схема лабораторного ТЭП и установки

Регистрация изотермических и эквипотенциальных ВАХ, формирование базы данных о ВАХ, измерение эмиссионно-адсорбционных характеристик электродов плоской геометрии



- 1, 5- охранный изолирующая керамика;
- 2- нагреватель электронной пушки;
- 3- полость черного тела;
- 4- эмиттер;
- 6- коллектор;
- 7- нагреватель коллектора;
- 8- охлаждение коллектора;
- 9- тяги механизма перемещения;
- 10- смотровые окна;
- 11,14- горячие вентили;
- 12- загрузочный Cs-резервуар;
- 13- Cs-термостат;
- 15- вакуумно-цезиевый тракт;
- 16- геттер;
- 17- корпус ТЭП;
- 18- термопары;
- 19- электронагреватели.

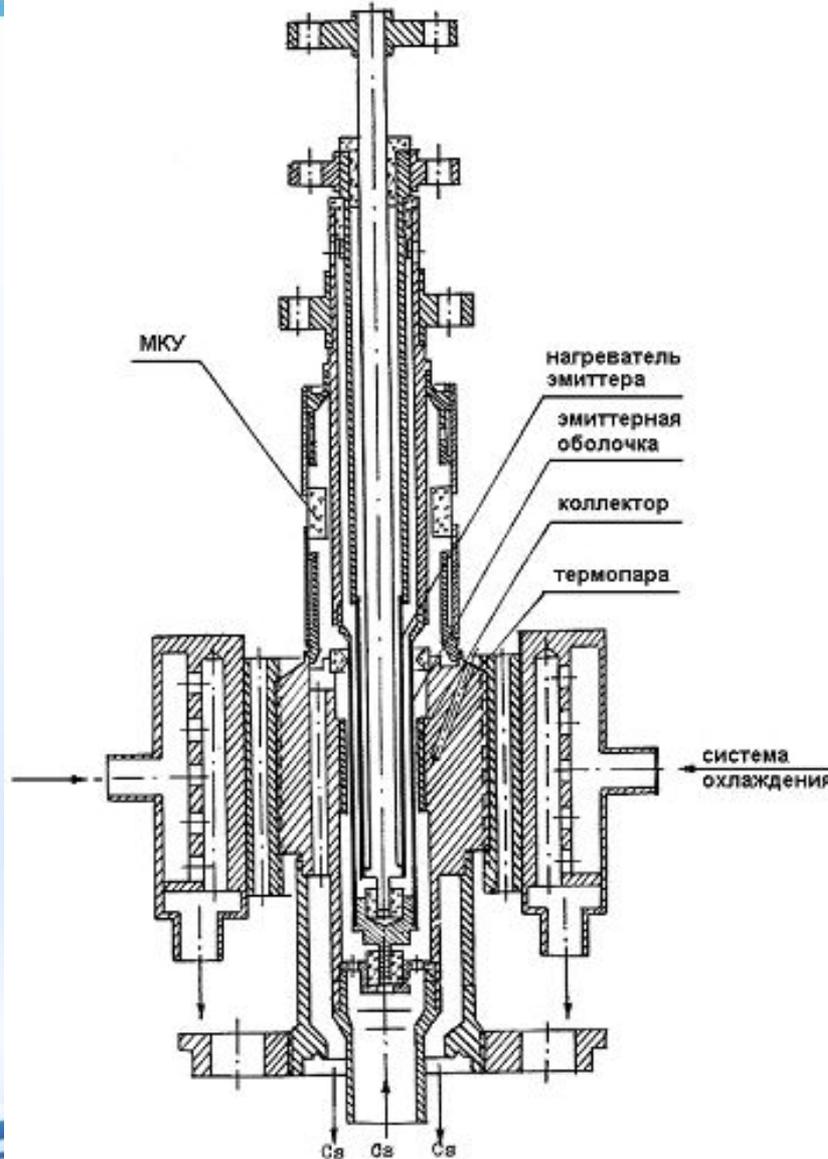
Конструктивная схема лабораторного ТЭП и установки (продолжение)



Регистрация ВАХ, формирование базы данных о ВАХ, измерение эмиссионно-адсорбционных характеристик электродов цилиндрической формы в составе ЭГЭ

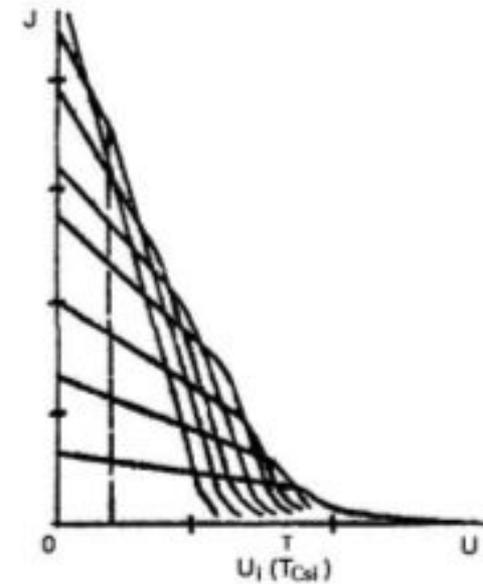
- 1- эмиттерная оболочка;
- 2- коллектор;
- 3- термопары;
- 4- нагреватель эмиттера;
- 5- система нагрева/охлаждения коллектора;
- 6- система откачки;
- 7÷10- прогреваемые вентили (Ду50-10);
- 11- Cs-термостат;
- 12- система дистилляции Cs;
- 13- датчик масс-спектрометра;
- 14,15- защитная вакуумная камера и система ее откачки.

Конструктивная схема лабораторного ТЭП и установки (продолжение)

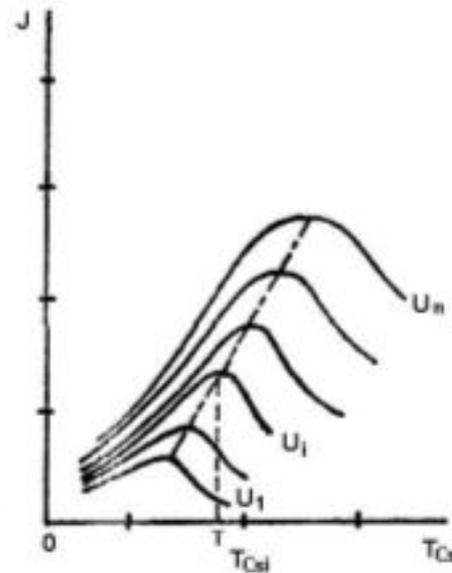


**Регистрация
изомощностных ВАХ в
процессе ресурсных
испытаний ЭГЭ**

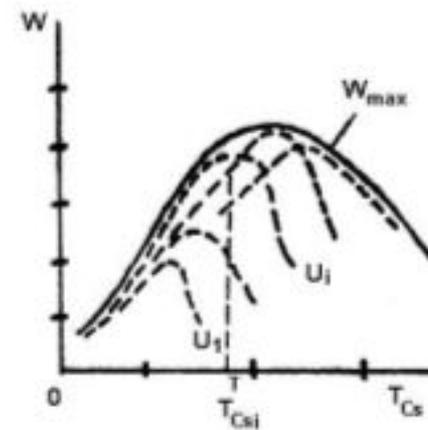
Алгоритмы оптимизации выходных характеристик ТЭП



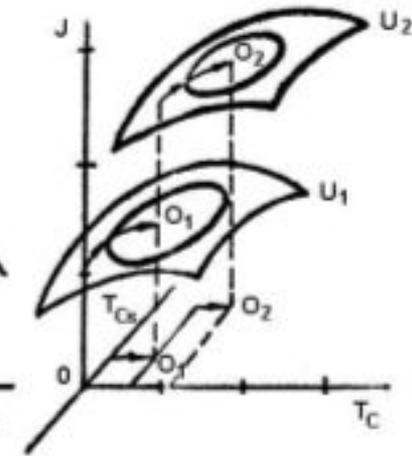
а)



б)



в)

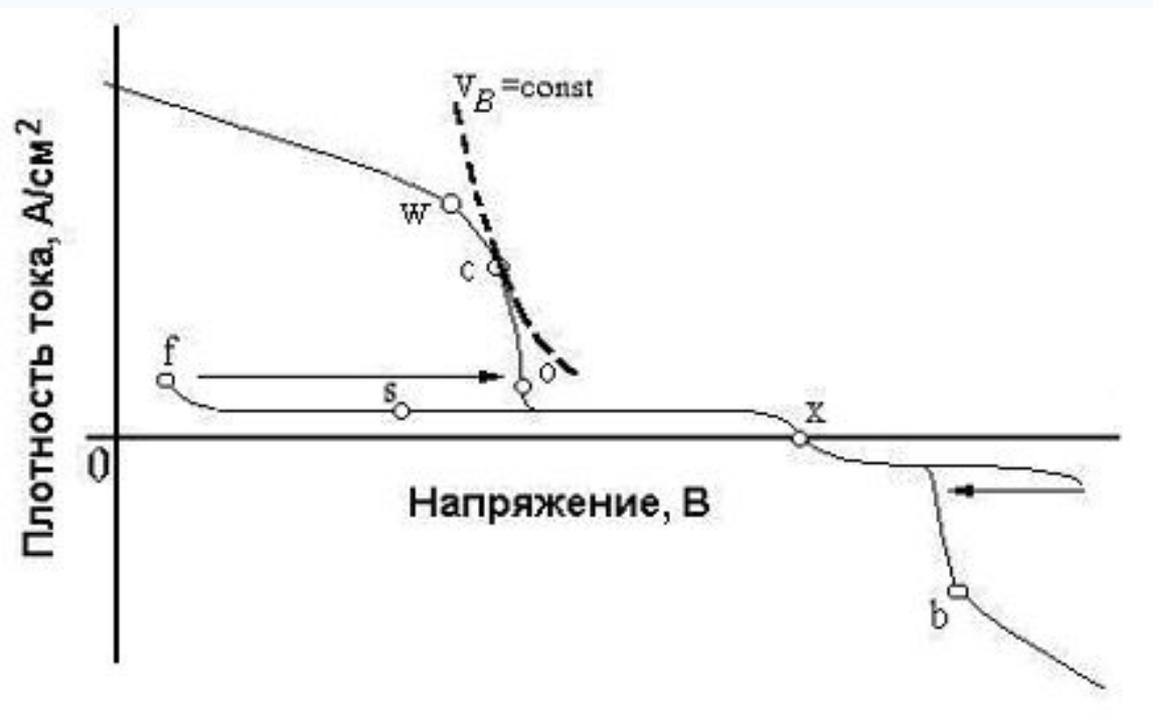


г)

- а** – $T_E, T_C, d = \text{const}; T_{Cs} = \text{var};$
б – $T_E, T_C, U, d = \text{const}; T_{Cs} = \text{var};$
в – $T_E, T_C, d = \text{const}; R_H = \text{opt}; T_{Cs} = \text{var};$
г – $T_E, U, d = \text{const}; T_C \text{ и } T_{Cs} = \text{var}.$

Методы определения внутренних параметров ТЭП по ВАХ

Принципиальная форма ВАХ лабораторного ТЭП в дуговом режиме



- X** - напряжение холостого хода;
- S** - ток насыщения диффузионного режим;
- f** - напряжение поджига;
- O** - напряжение гашения;
- C** - минимальный барьерный индекс V_B ;
- W** - плотность электрического тока в точке перегиба дуговой ВАХ эмиттерной ветви;
- b** - плотность электрического тока в точке перегиба дуговой ВАХ коллекторной ветви.

Определение работы выхода эмиттера в парах цезия Φ_E

Для определения работы выхода эмиттера в парах цезия Φ_E используется значение плотности тока в точке перегиба дуговой ВАХ j_w для текущих внешних параметров T_E , T_C , T_{Cs} (P_{Cs}) и d :

$$\Phi_E = \Phi(j_w) - \frac{P_{Cs} \cdot d}{10} \cdot \frac{T_E}{T_E - T_C} \ln \frac{T_E + T_C}{2T_C},$$

где $\Phi(j_w)$ - работа выхода в эВ, определяемая плотностью тока j_w :

$$\Phi(j_w) = \frac{kT_E}{e} \ln \frac{A_0 T_E^2}{j_w},$$

где k - постоянная Больцмана, e - заряд электрона, $A_0 = 120.4 \text{ А} \cdot \text{см}^{-2} \cdot \text{К}^{-2}$ - постоянная Ричардсона.

Соотношение (1) получено по экспериментальным данным. С помощью этих же данных получено отношение для потоков электронов в точке излома ВАХ:

$$\frac{j_R}{j_w} = 1 + 1.73 \frac{P_{Cs} \cdot d}{T_C},$$

где j_R - плотность тока электронной эмиссии с эмиттера. В рабочих режимах ТЭП результаты расчетов j_R и Φ_E по выражениям (1) и (3) соответствуют друг другу. Полученные по (1) значения Φ_E приводятся в соответствие вакуумной работой выхода эмиттера Φ_{0E} по соотношению $\Phi_E = f(T_E/T_{Cs}, \Phi_{0E})$, по кривым Рейзора.

Определение эффективной работы выхода коллектора Φ_C

Эмиссионный метод

1. $\Phi_C^{\text{эмис}}$ – в квазивакуумном режиме ($d < 0,05$ мм) по ричардсоновскому току насыщения с коллектора на «холодный» эмиттер. Корректное измерение в режимах с $V_B \geq 2$ эВ.
2. $\Phi_C^{\text{эмис}}$ – в режимах с $V_B < 2$ эВ по точке перегиба «b» плотности обратного тока (в коллекторной ветви):

$$\frac{j_R^*}{j_b} = 1 + 1.7 P_{Cs} \cdot d ,$$

где j_R^* - ричардсоновская плотность электронного тока с коллектора.

Определение эффективной работы выхода коллектора Φ_c (продолжение)

Идентификационный метод

По выходному напряжению V в точке «с» на ВАХ с V_{Bmin}

$$V = \Phi(j, T_E) / e \quad (4) \quad \Phi_c / e - V_d ,$$

где $\Phi(j, T_E) / e = k T_E / e^2 \cdot \ln \left(A_0 T_E^2 / j \right)$ - предельное (Больцмановское) напряжение

для заданных j и T_E ; V_d - потери напряжения, связанные с затратами энергии на поддержание дугового разряда; e - заряд электрона.

$$V_d = \Delta V_C + \Delta V_L ,$$

где ΔV_C - потери напряжения из-за обратной эмиссии с коллектора, ΔV_L - остальные потери.

$$\Delta V_C = k T_C / e \cdot \ln \left\{ 1 + j_C^R / j \cdot \left[1 + (T_E - T_C) / T_C P_{Cs} \cdot d \right] \right\} ,$$

где j_C^R - ток эмиссии электронов с коллектора.

Для оптимального значения $(P_{Cs} \cdot d) \sim 0,5 \text{ мм.рт.ст.} \cdot \text{мм}$ $\Delta V_L \approx 0,48 \text{ В}$.

Контроль температуры эмиттера

Независимый, дополнительный (кроме термпарного и оптического канала измерений) контроль температуры эмиттера может проводиться по результатам измерений тока насыщения j_{ES} в недокомпенсированном режиме (точка «s» на ВАХ) с помощью выражения

$$j_{ES} \sqrt{P_{Cs}} = M \frac{T_E^{7/4}}{d} \exp\left(-\frac{22595}{T_E}\right),$$

где M – эмпирический коэффициент учитывает вклад среднего по МЭЗ коэффициента диффузии электронов по сравнению с коэффициентом диффузии у эмиттера, а также уменьшение равновесной концентрации электронов при измерении j_{ES} .

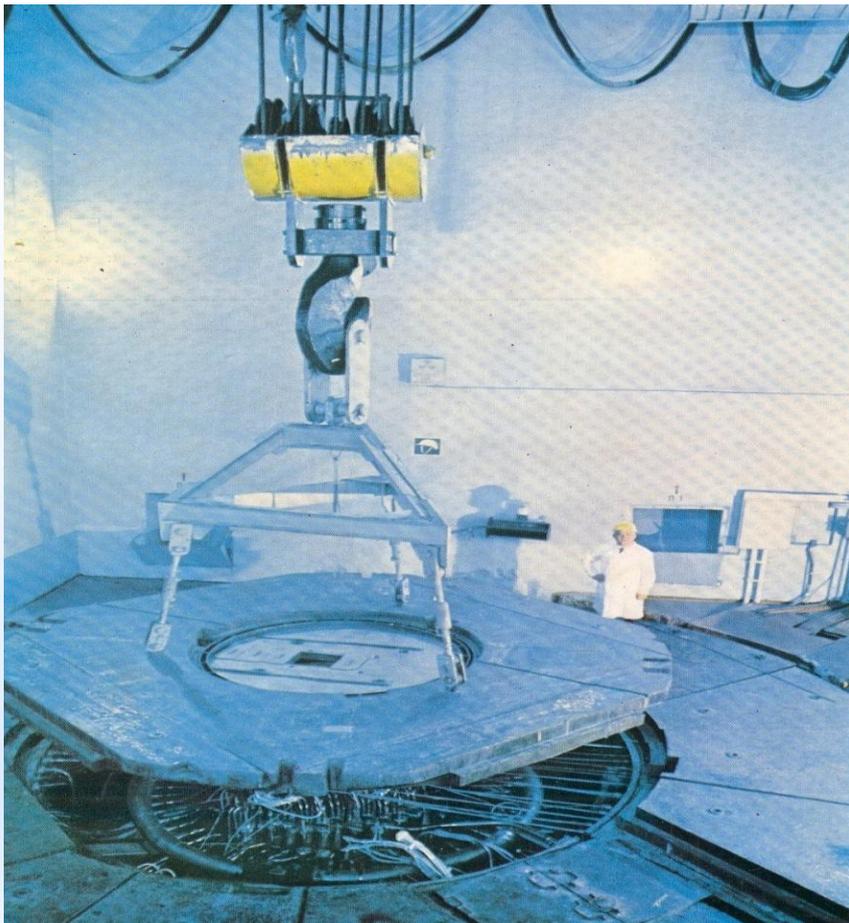
Обычно M был равен $0,3 \div 0,4$.

Реакторные испытания ЭГК, ТРП

ПЕТЛЕВЫЕ ИСПЫТАНИЯ ТЕРМОЭМИССИОННЫХ ЭГК В РЕАКТОРЕ АМ

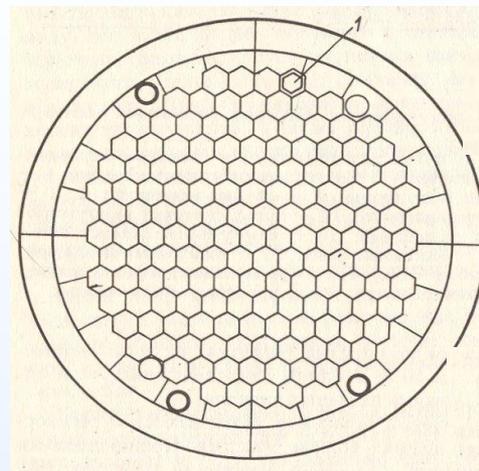


Реакторный зал Первой в мире АЭС (АМ)



а)

а – реактор АМ со снятой плитой радиационной защиты;

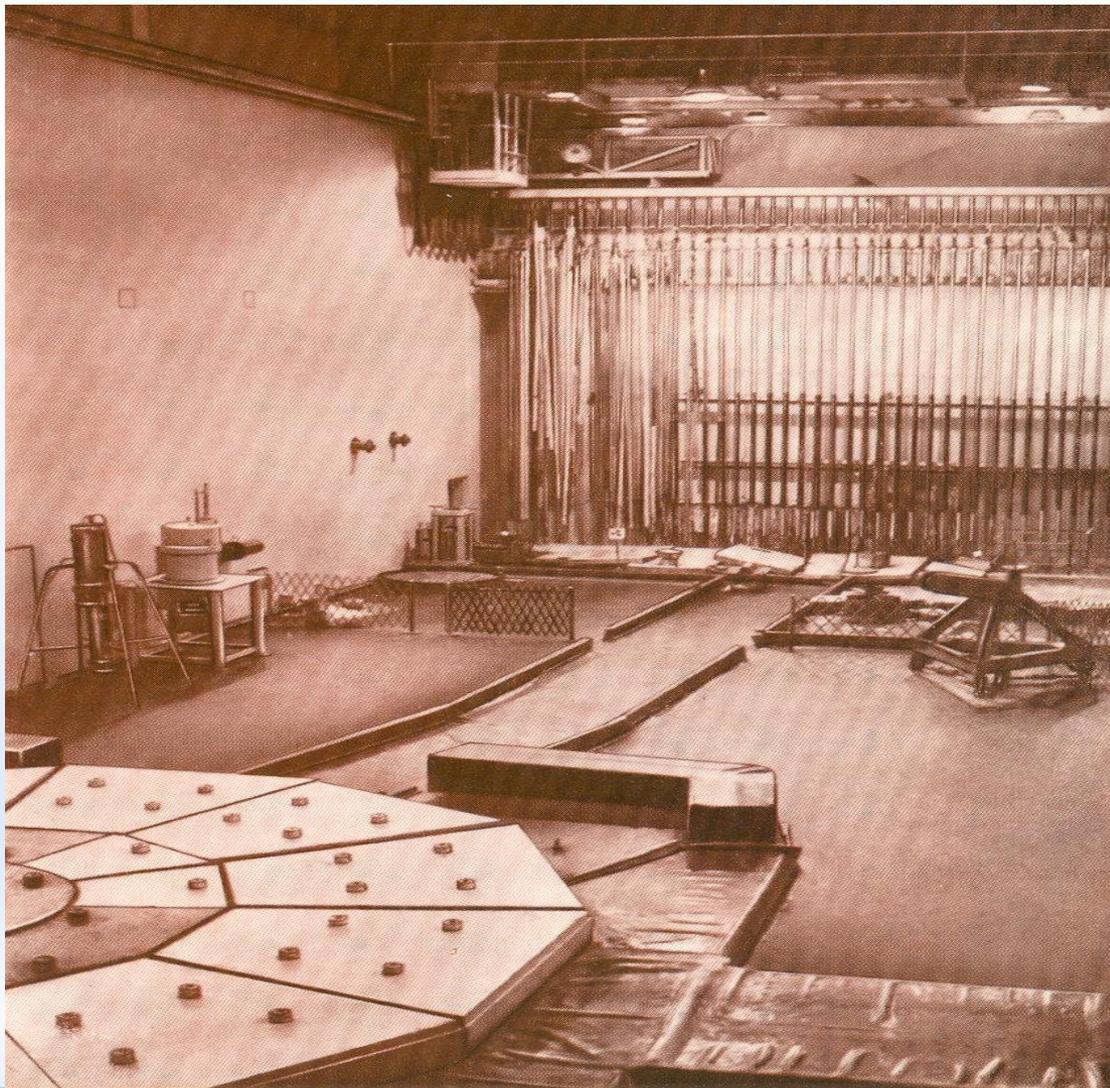


б)

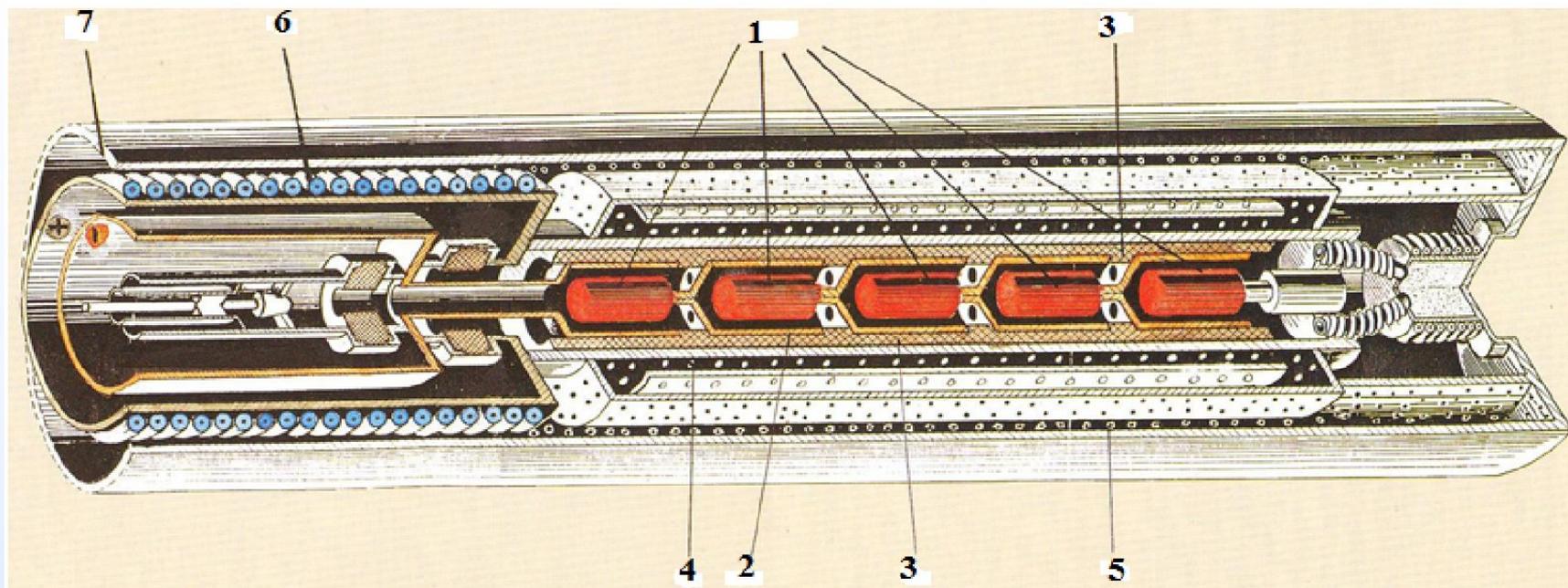
б – схема а.з. с ячейками для петлевых каналов:

1 – петлевой канал с ЭГК.

Реакторный зал Первой в мире АЭС (АМ) (продолжение)



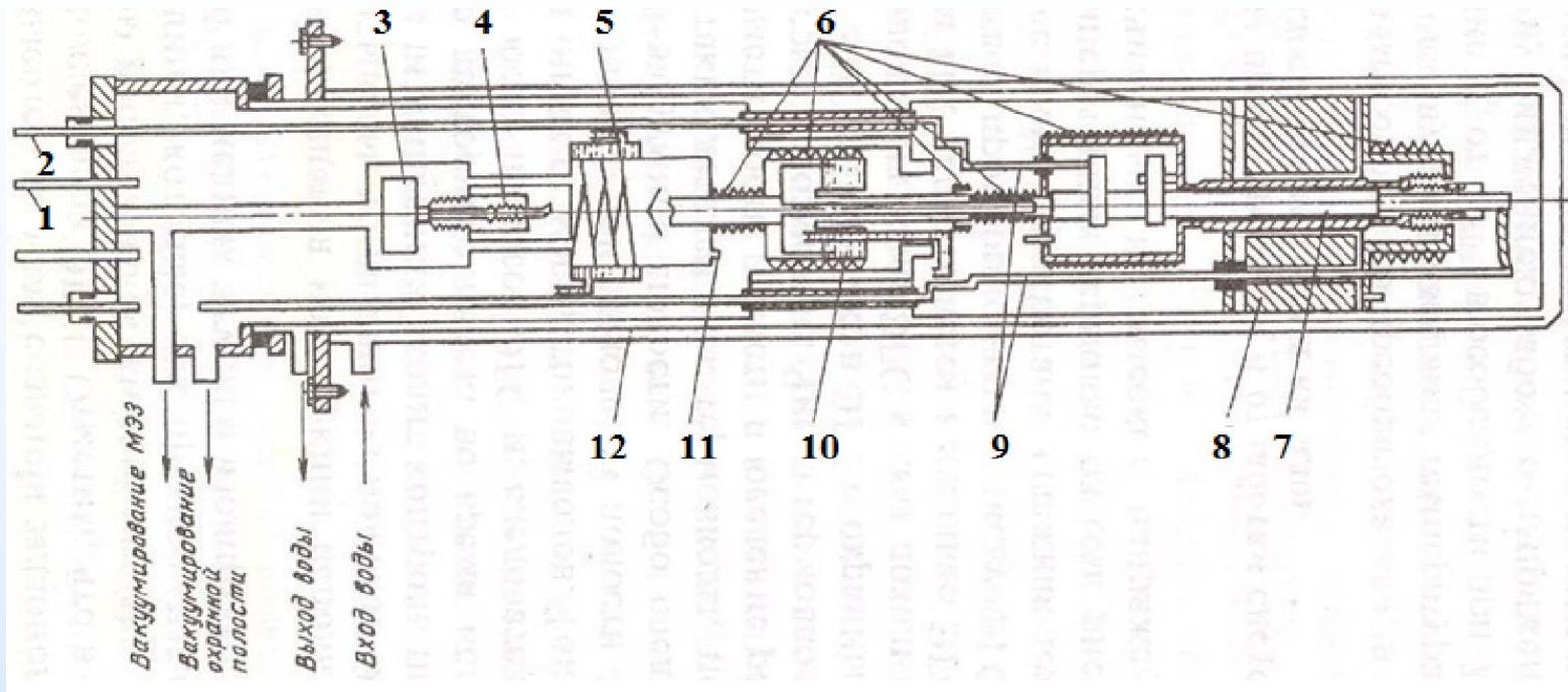
Принципиальная схема петлевого канала и термоэмиссионного ЭГК в обоснование ЯЭУ «ТОПАЗ»



- 1 – эмиттер; 2 - коллектор; 3 – коллекторная изоляция;
4 – теплоноситель; 5 – охлаждающая вода;
6 – нагреватель; 7 – корпус ПК.

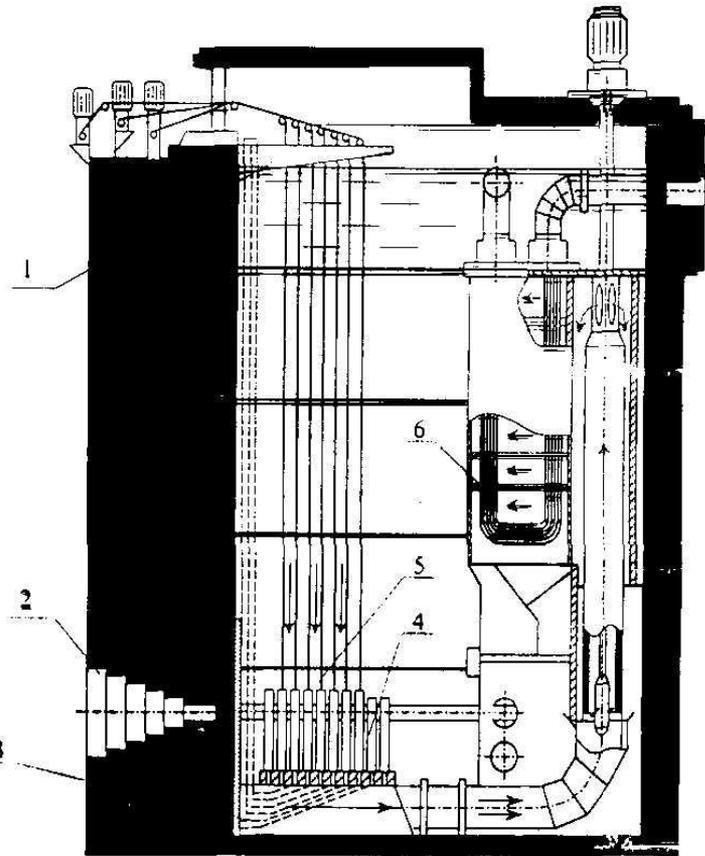
Развитие проектных решений по ПК с термоэмиссионными ЭГК в обоснование ЯЭУ «ТОПАЗ»

Конструктивная схема одного из последних вариантов ПК, испытанных в реакторе АМ



1 – многштырьковый герморазъем; 2 – силовой токовый герморазъем; 3 – ампула с жидким цезием; 4 – устройство для вскрытия ампулы с цезием; 5 – конденсатор пара цезия; 6 – электронагреватель; 7 – термоэмиссионная ЭГС; 8 – СТС; 9 – токовывод; 10 – источник пара цезия циркуляционного типа; 11 – трубка возврата сконденсировавшегося цезия; 12 – теплообменник в виде трубки Фильда.

Схема реактора ИВВ-2М



Основные характеристики реактора

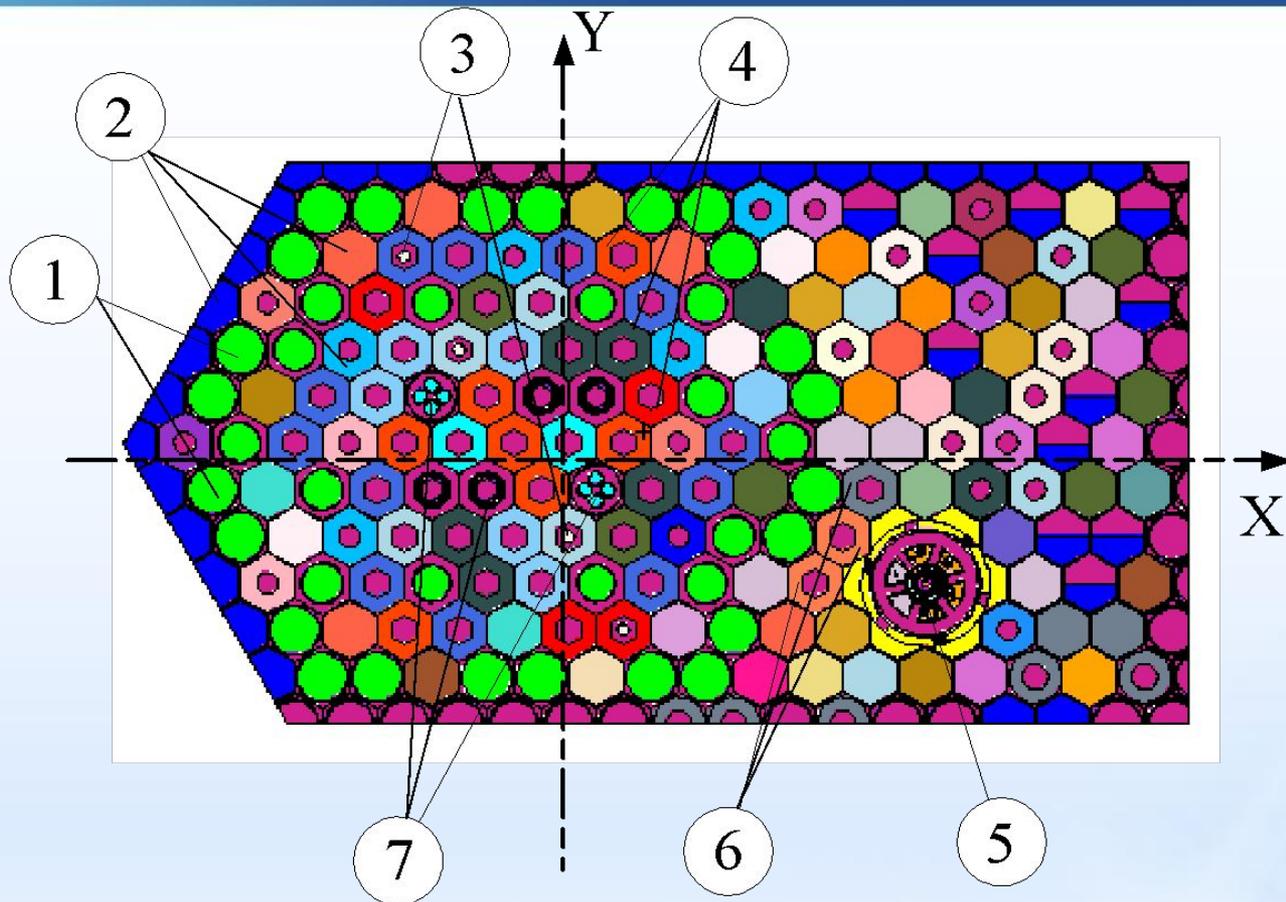
Параметр	Значение
Номинальная мощность (тепловая), МВт	15
Высота активной зоны, мм	500
Неравномерность энергосвечения в активной зоне:	
– радиальная	1,4
– аксиальная	1,3
Количество каналов (ампул) в АЗ и бериллиевом отражателе, шт :	
– в центре АЗ, $\varnothing 120$ мм	1
– в секции из шести ТВС, $\varnothing 60$ мм	6
– в полости ТВС, $\varnothing 30$ мм	20
– в Ве-отражателе, $\varnothing 60$ мм	10
– в Ве-отражателе, $\varnothing 130$ мм	1
– в полости Ве-блока, $\varnothing 24$ мм	25
Плотность невозмущённого потока нейтронов (максимальная), $\text{см}^{-2}\cdot\text{с}^{-1}$ *	
– тепловых	$5 \cdot 10^{14}$
– быстрых ($E > 0,1$ МэВ)	$2 \cdot 10^{14}$

* - для центральной ячейки

1 – система управления и защиты;
 2 – горизонтальный экспериментальный канал;
 3 – система контроля герметичности оболочек;

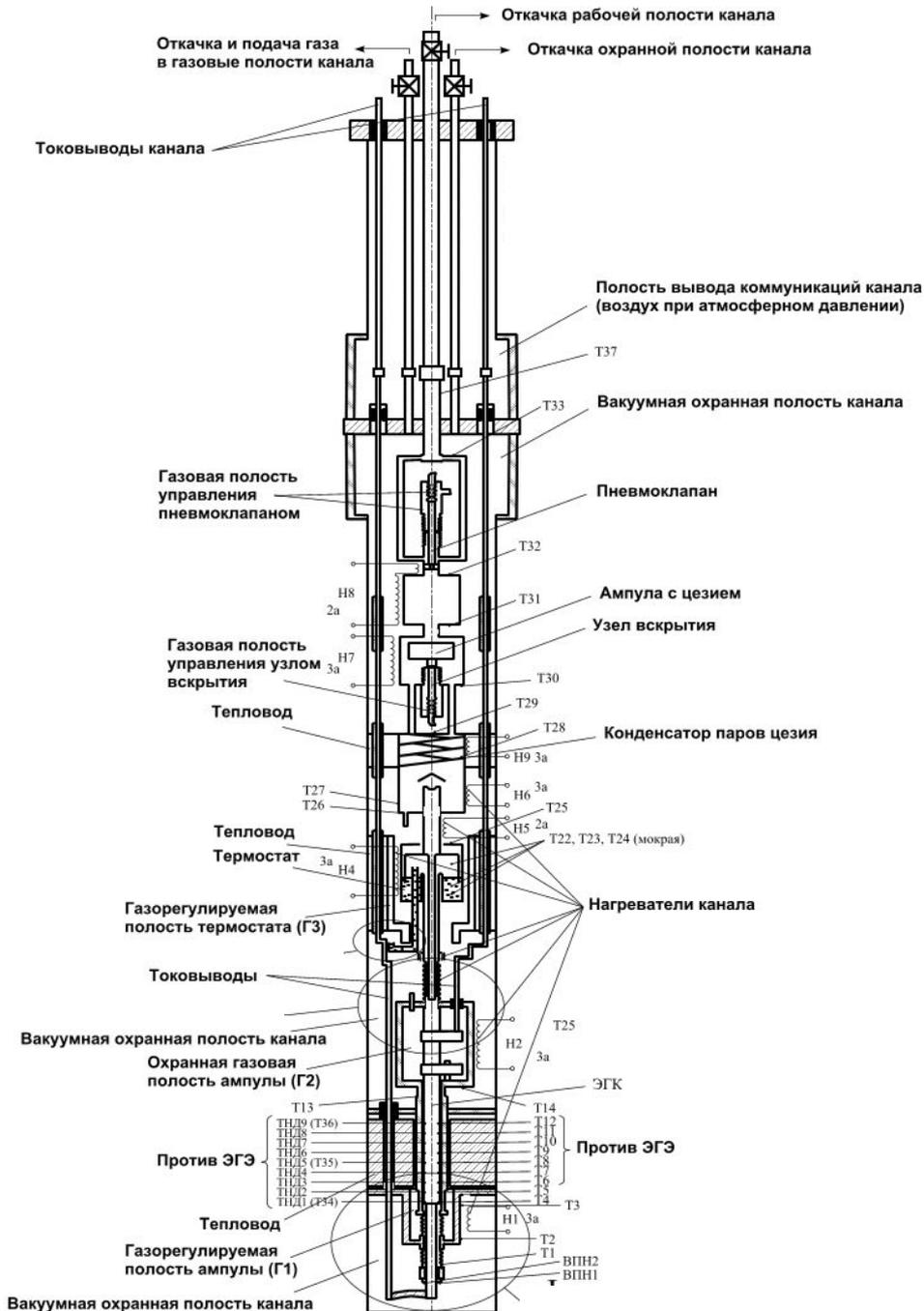
4 – активная зона;
 5 – облучательные устройства;
 6 – теплообменник.

Расчетная картограмма активной зоны ИВВ-2М



1 – блоки из нитрида алюминия, 2 – бериллиевые блоки, 3 – органы регулирования, 4 – топливные кассеты, 5 – петлевой канал, 6 – кассеты подсветки, 7 – облучательные устройства

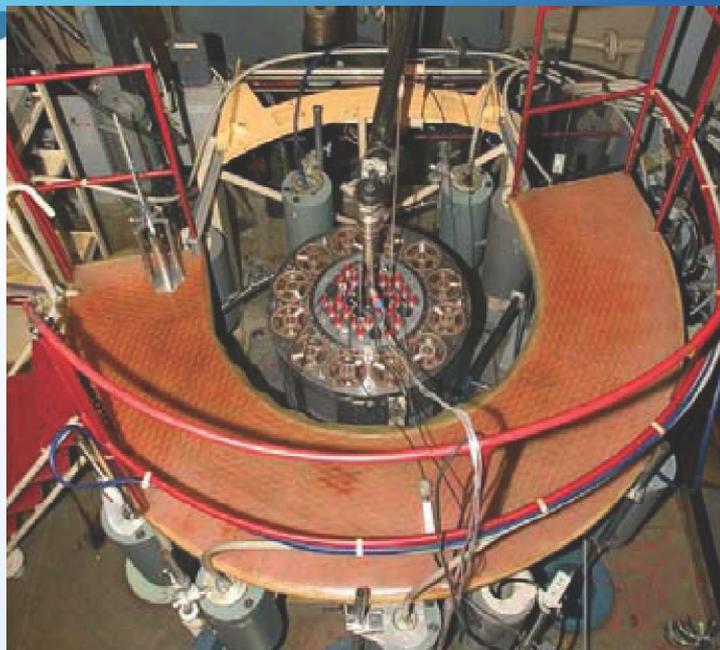
Принципиальная схема ПК



ТЕХНИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ПК

- наружный диаметр – 90 мм;
- длина ПК – 7700 мм;
- регулируемых газовакуумных плоскостей – 9;
- нагревателей – 22;
- термоэлектрических преобразователей – 37;
- детекторов прямой зарядки (ДПЗ) – 2;
- термонейтронных датчиков (ТНД) – 9;
- изолированных токовыводов ПК – 2;
- потенциметрических токовыводов ЭГК – 4;
- тепловая мощность ЭГК – до 12,5 кВт;
- снимаемый ток с ЭГК – до 250 А;
- регулируемое давление пара цезия – 1...10 торр;
- регулируемая температура корпуса ЭГК – 400...700 °С;
- регулируемая температура эмиттеров ЭГК – 1550...1900 °С;
- температура наружной оболочки 20...40 °С.

Действующий реакторный стенд ГНЦ РФ-ФЭИ для моделирования и исследования характеристик термоэмиссионных ЯЭУ 2-го поколения



Критический стенд ФС-1М

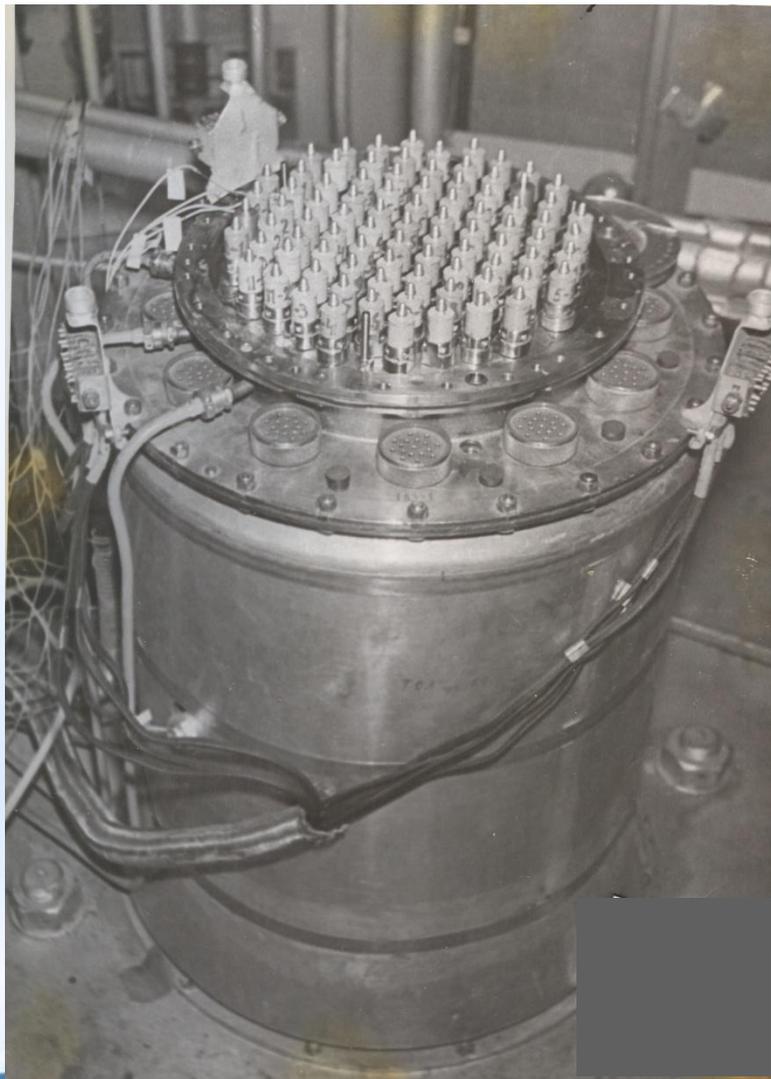
Назначение стенда – исследование нейтронно-физических характеристик термоэмиссионных реакторов-преобразователей различного назначения и других малогабаритных транспортных реакторов.

Решенные задачи – обоснованы нейтронно-физические характеристики и ядерная безопасность проектов космических ЯЭУ с реакторами-преобразователями на быстрых нейтронах мощностью от 500 до 1500 кВтэл.

Основные характеристики:

Максимальная мощность	100 Вт
Активная зона Диаметр Высота Материалы	4 типа размера от 69,6 см до 84,9 см 117 см Имеется полный набор конструкционных и ядерных материалов для моделирования реакторов космических ЯЭУ нового поколения
Боковой отражатель	Бериллий толщиной от 80 до 120 мм (12 органов СУЗ)
Регулирование	Поворотными цилиндрами в отражателе

Макетная физическая сборка ТРП



Возможности стенда:

- критические параметры реактора;
- выбор решетки реактора;
- определение эффективности гидридциркониевого замедлителя;
- определение эффективности органов регулирования;
- измерение свойств различных материалов;
- проведение интегральных спектральных измерений и оценка температурного коэффициента реактивности.

Результаты наземных испытаний ЯЭУ ТОПАЗ в испытательном комплексе ГНЦ РФ-ФЭИ

Номер установки	4С	5С	6С	7С (7СВ)	10С	11С	14С
Дата испытаний	1970	1971	1972-73	19.06.1975 29.06.1976 - 1977 -	1979	1982	1984
Ресурс, сутки	50	67	108	215	221	208	306
Тепловая мощность, кВт	170	180	180	150	150	150	150
Стартовая электрическая мощность, кВт	6,6	5.1	8,2	8,8	8.8	7,2	7,2



Результаты лётно-конструкторских испытаний КЯЭУ ТОПАЗ (1987-1988 гг.)

	Первый образец	Второй образец
Космический аппарат	"Космос 1818"	"Космос 1867"
Высота орбиты	800 км	
Лётный образец ЯЭУ	4Я 90-22Л	4Я 90-23Л
Материал эмиттеров ЭГК	монокристалл молибдена	монокристалл вольфрама
Ресурс работы	142 суток	342 суток
Полезная электрическая мощность, кВт начало испытаний конец испытаний	5,6 4,8 4,0	5,6 3 3
Габариты, м	1,3 (Dmax) 4,7 (L)	
Масса ЯЭБ, кг	1100	
Причина прекращения испытаний	плановое исчерпание запасов цезия	



СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ!