

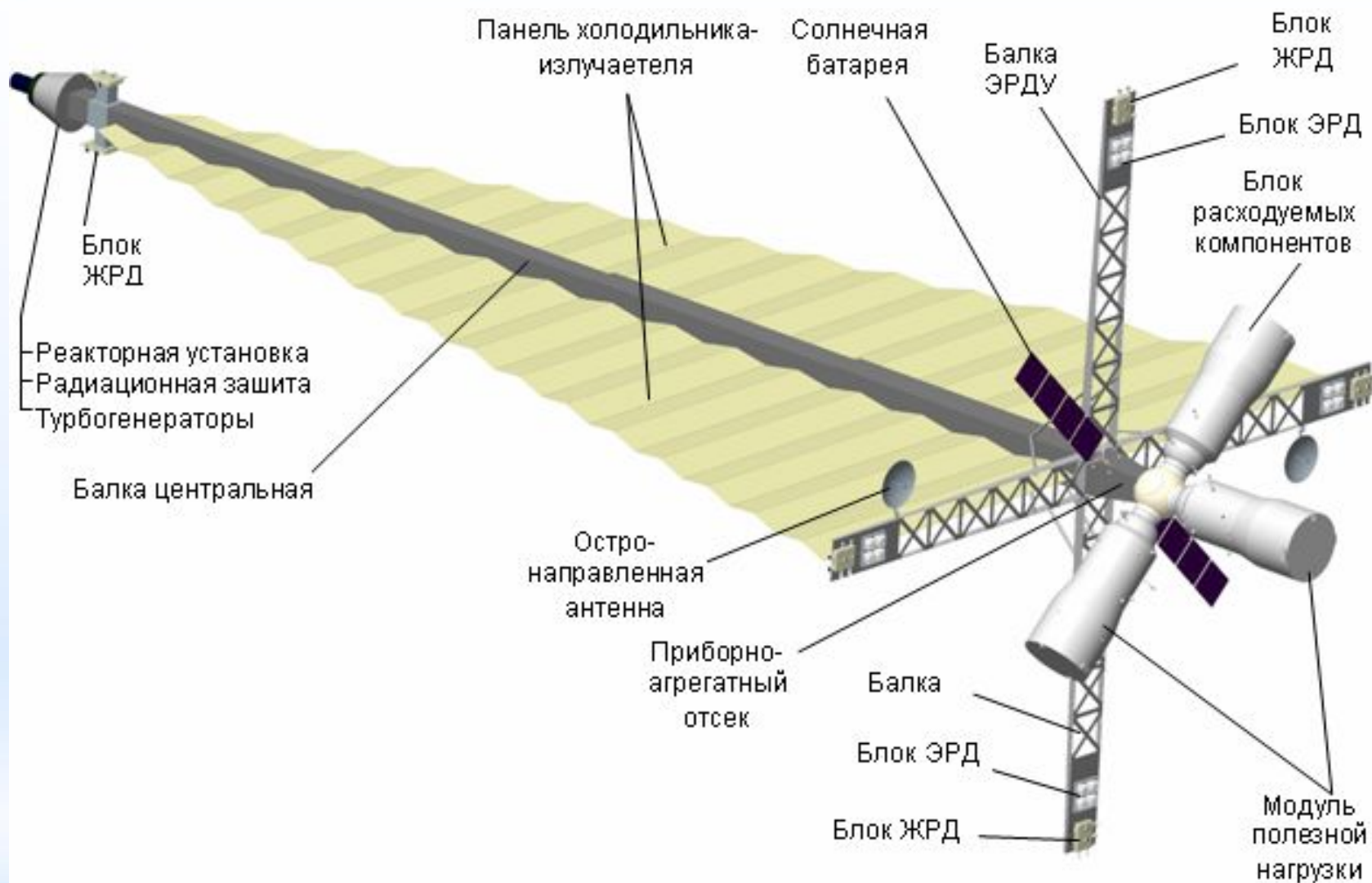


Проект

«Создание транспортно-энергетического модуля на основе ядерной энергодвигательной установки мегаваттного класса»

*- утверждён решением № 5 Комиссии при президенте РФ по модернизации и
технологическому развитию экономики России 28 октября 2009 г.*

ТЭМ с ЯЭДУ мегаваттного класса (концепция ИЦ им. М.В. Келдыша и РКК «Энергия»)



Космическая инновационная технология России

«... Но на самом деле, если серьезно, то модуль на основе ядерной энергодвигательной установки мегаваттного класса – это очень серьезный проект...»

Д.А. Медведев, Президент Российской Федерации.
Стенографический отчет о заседании Комиссии
по модернизации и технологическому развитию
экономики России.

28 октября 2009 г., Московская обл., Фрязино,
<http://www.kremlin.ru>

Принятие решения Президентом России о начале работ по созданию ТЭМ с ЯЭДУ мегаваттного класса (28.10.2009 г.)

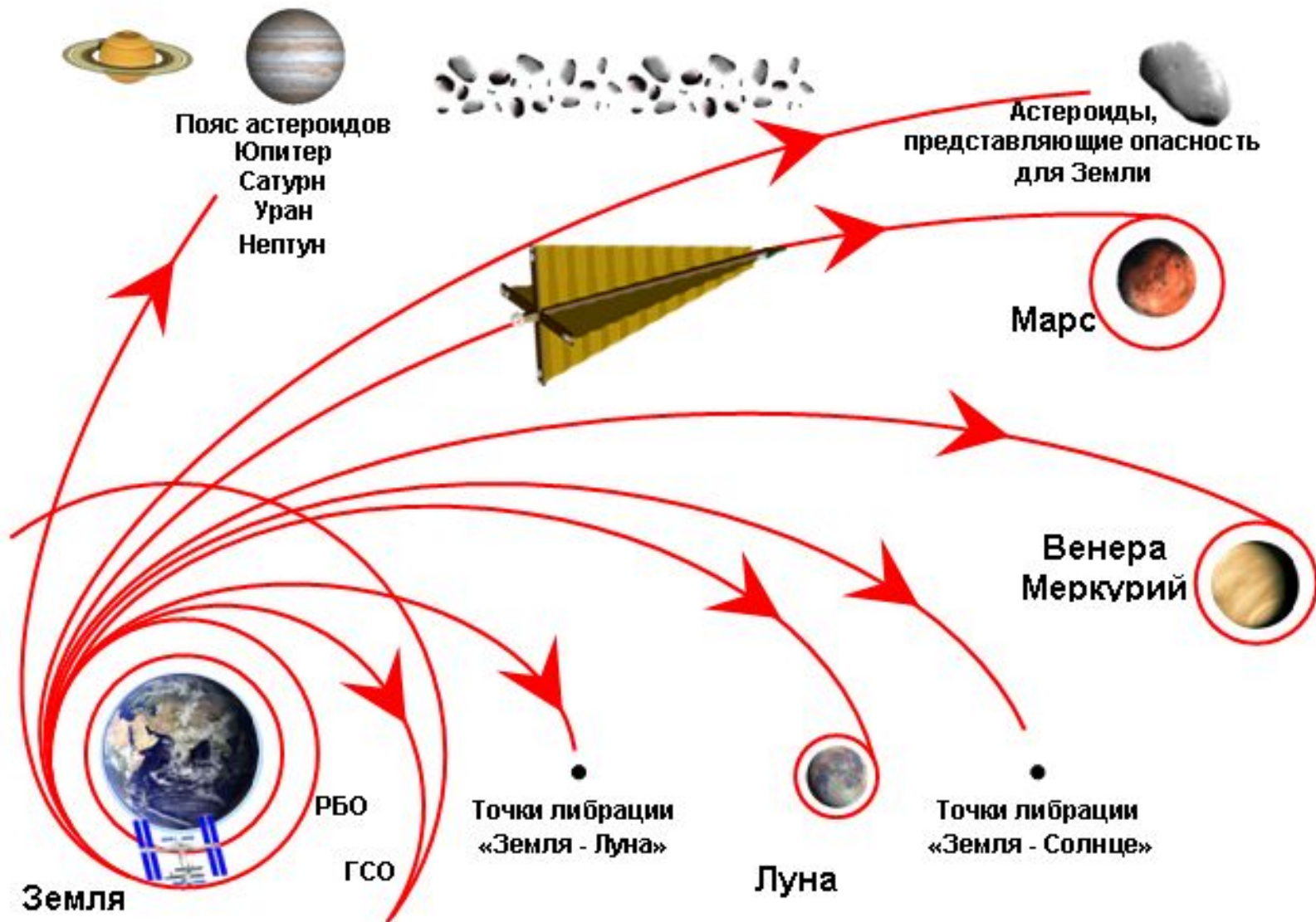


Заседание Комиссии по модернизации и технологическому развитию экономики России. 28 октября 2009 года

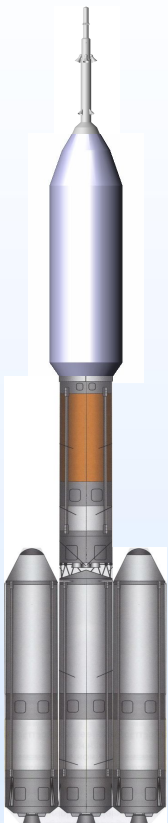


Президент России Дмитрий Медведев и глава Роскосмоса Анатолий Перминов (фото пресс-службы Роскосмоса, 28 октября 2009 года)

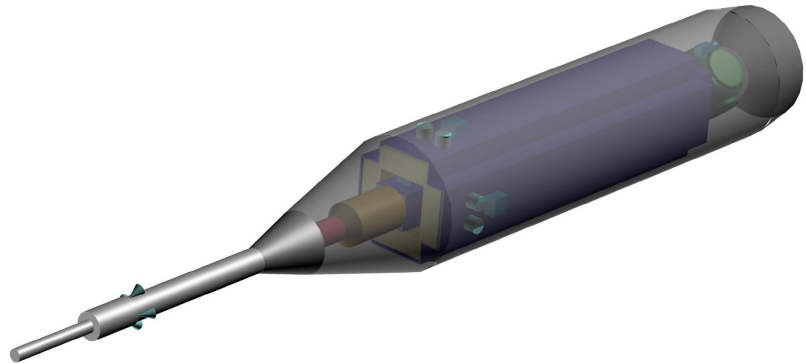
Задачи, решаемые с помощью ТЭМ с ЯЭДУ мегаваттного класса (концепция РКК «ЭНЕРГИЯ»)



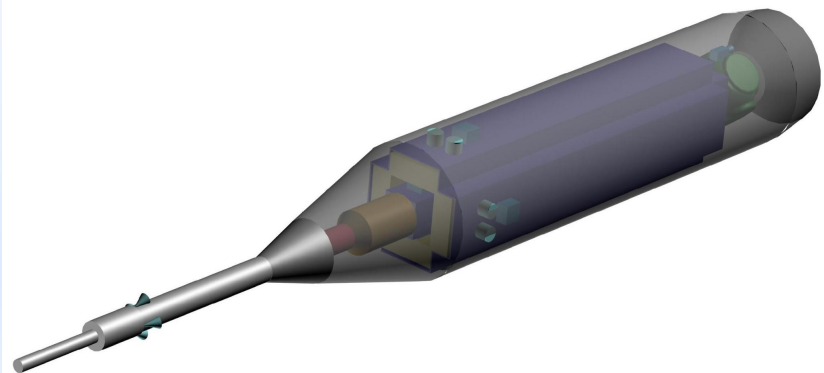
Средства доставки ТЭМ на опорную орбиту



**Ракета-носитель
«Русь-М»**

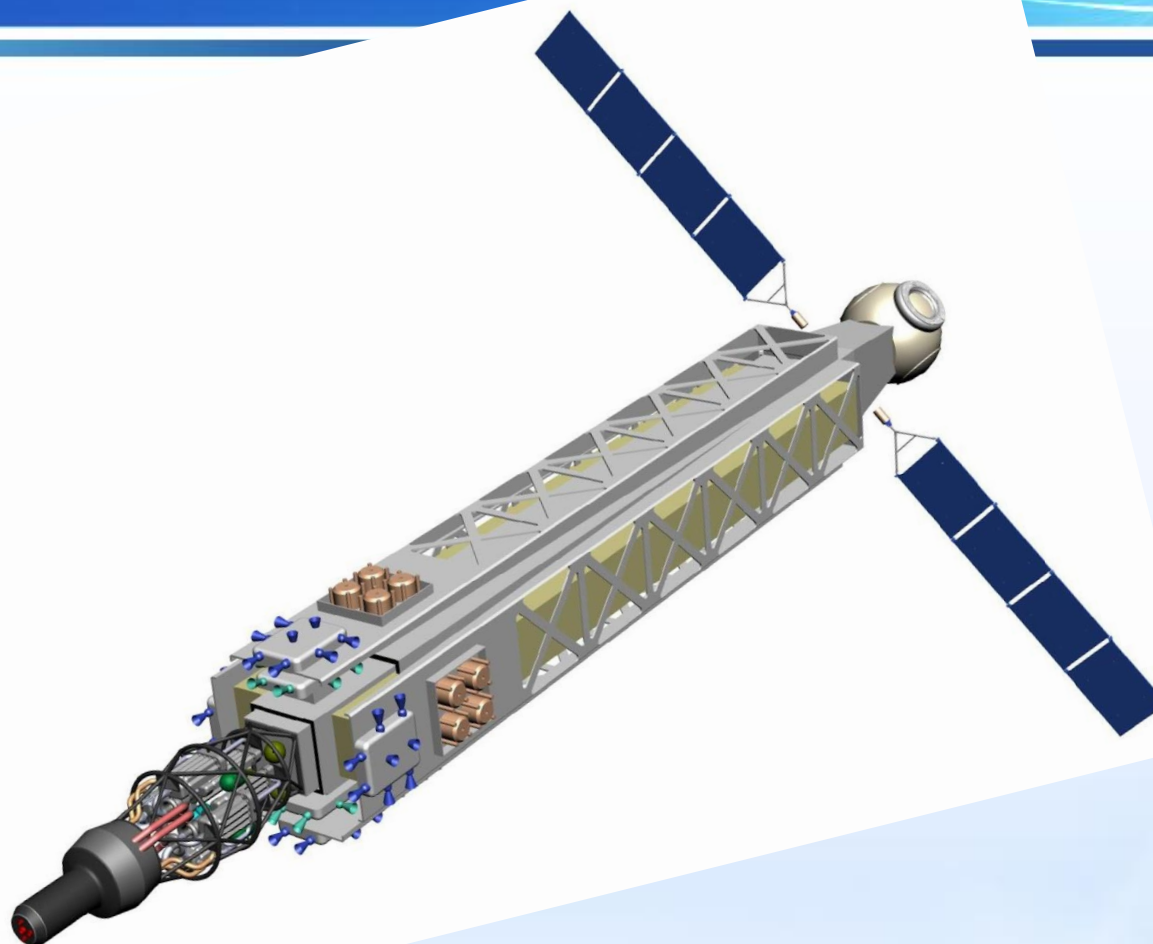


**Вариант компоновки головной части с РН «Русь-М»
с ТЭМ (космодром «Восточный»)**



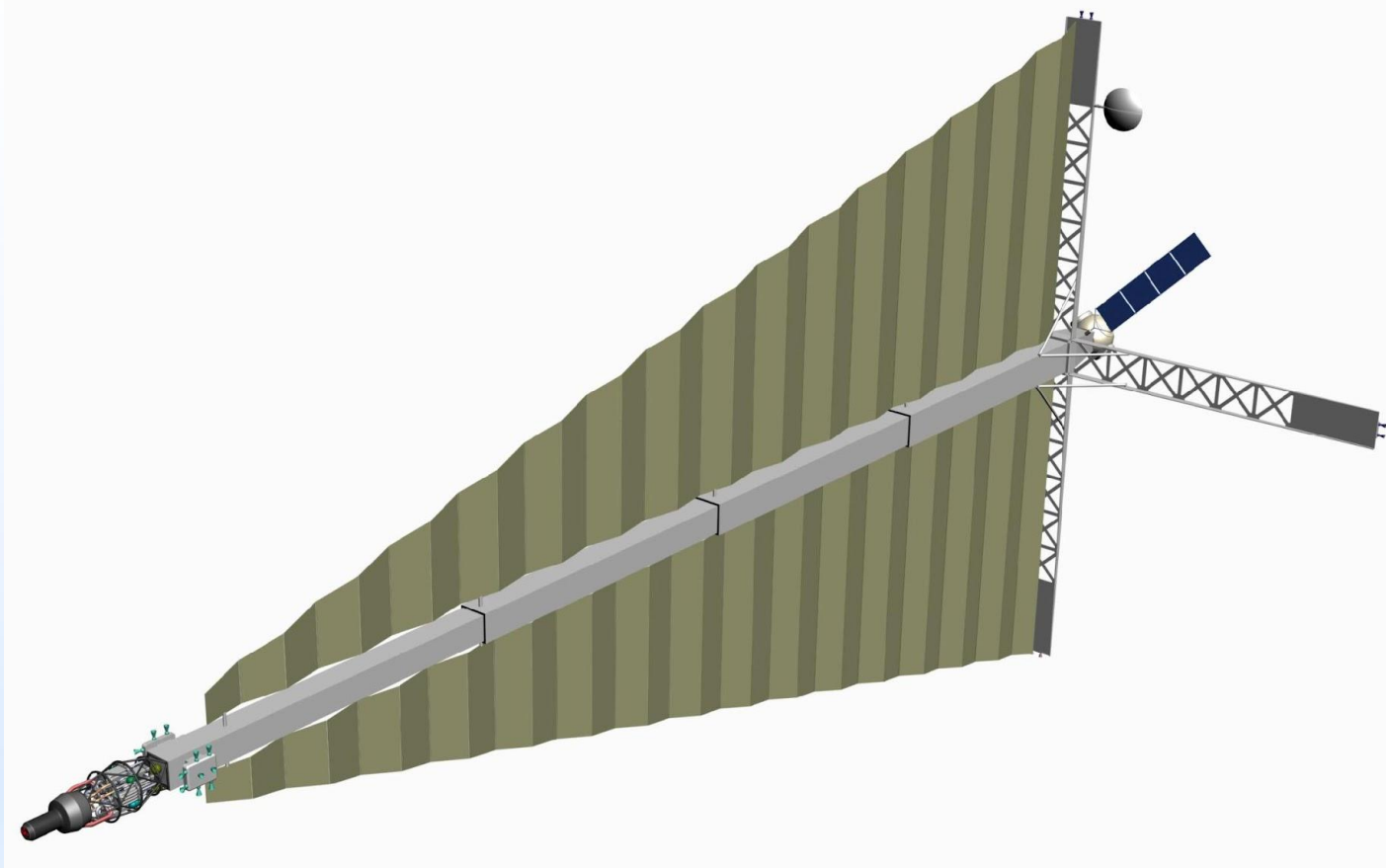
**Вариант компоновки головной части с РН «Ангара-5»
с ТЭМ (космодром «Плесецк»)**

Эволюции функционирования ТЭМ (концепция РКК «ЭНЕРГИЯ»)



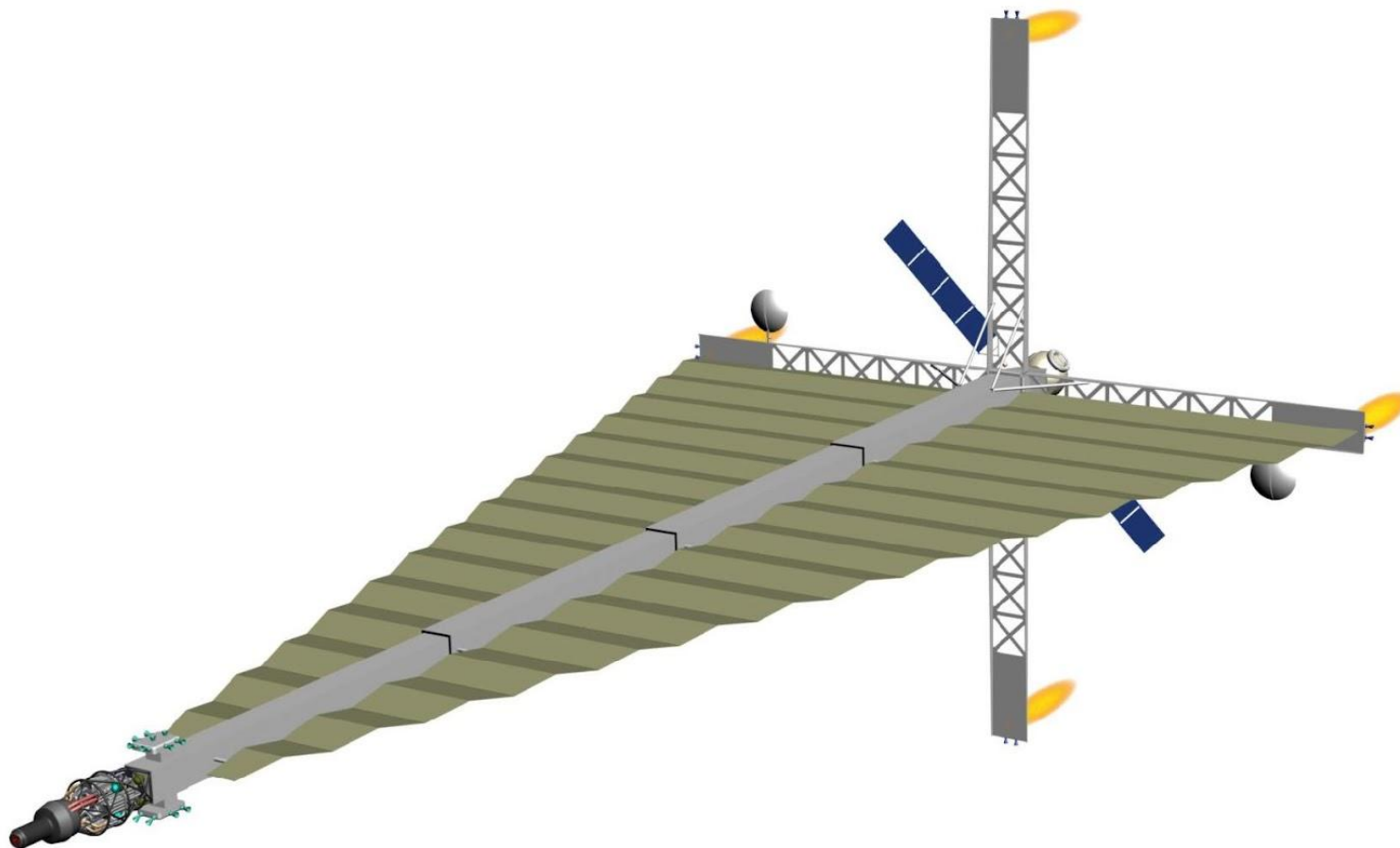
**Вид ТЭМ после выведения на опорную орбиту и довыведения
на монтажную орбиту (~ 400 км)**

Эволюции функционирования ТЭМ (продолжение)



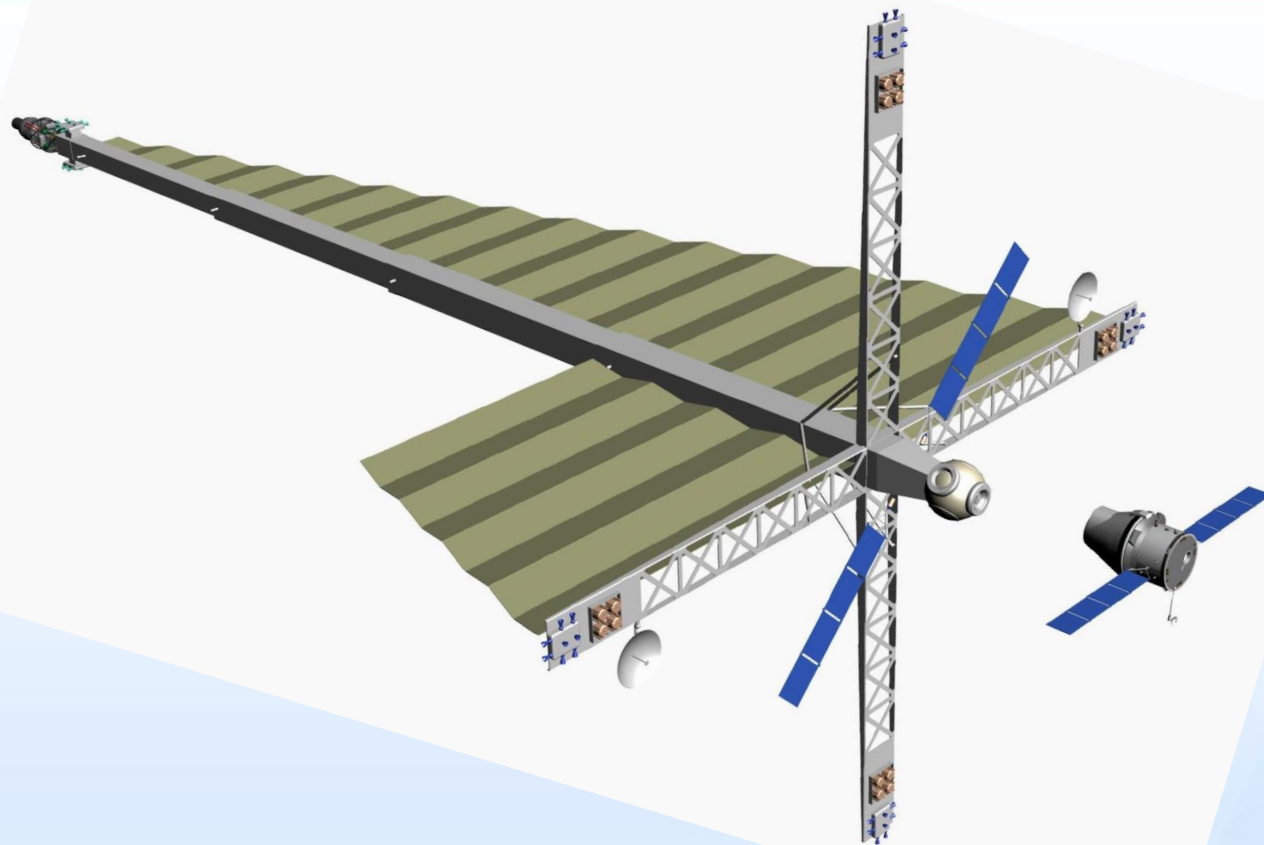
Вид ТЭМ после разворачивания балок ДУ, панелей радиаторов, центральной балки на монтажной орбите (~ 400 км)

Эволюции функционирования ТЭМ (продолжение)



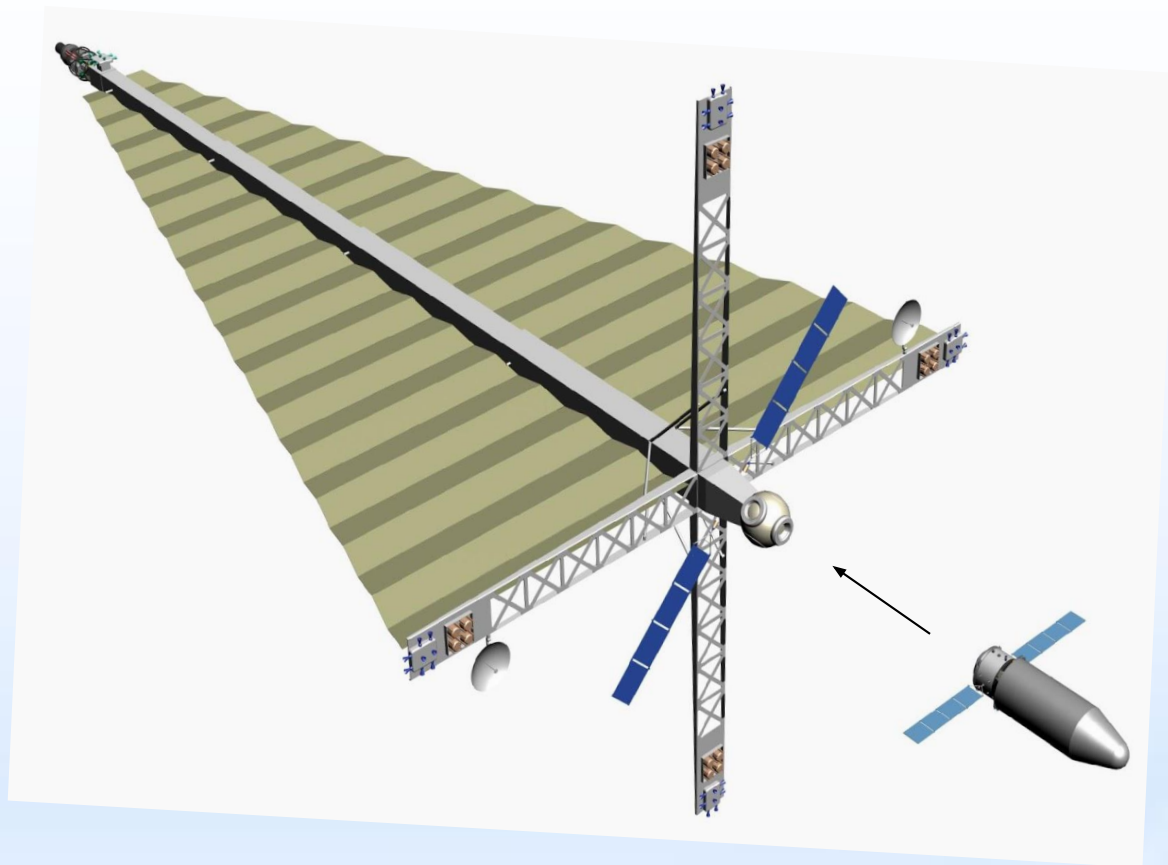
**Включение ЖРДУ и переход ТЭМ на орбиту базирования
(РБО ~ 800 км)**

Эволюция функционирования ТЭМ (продолжение)



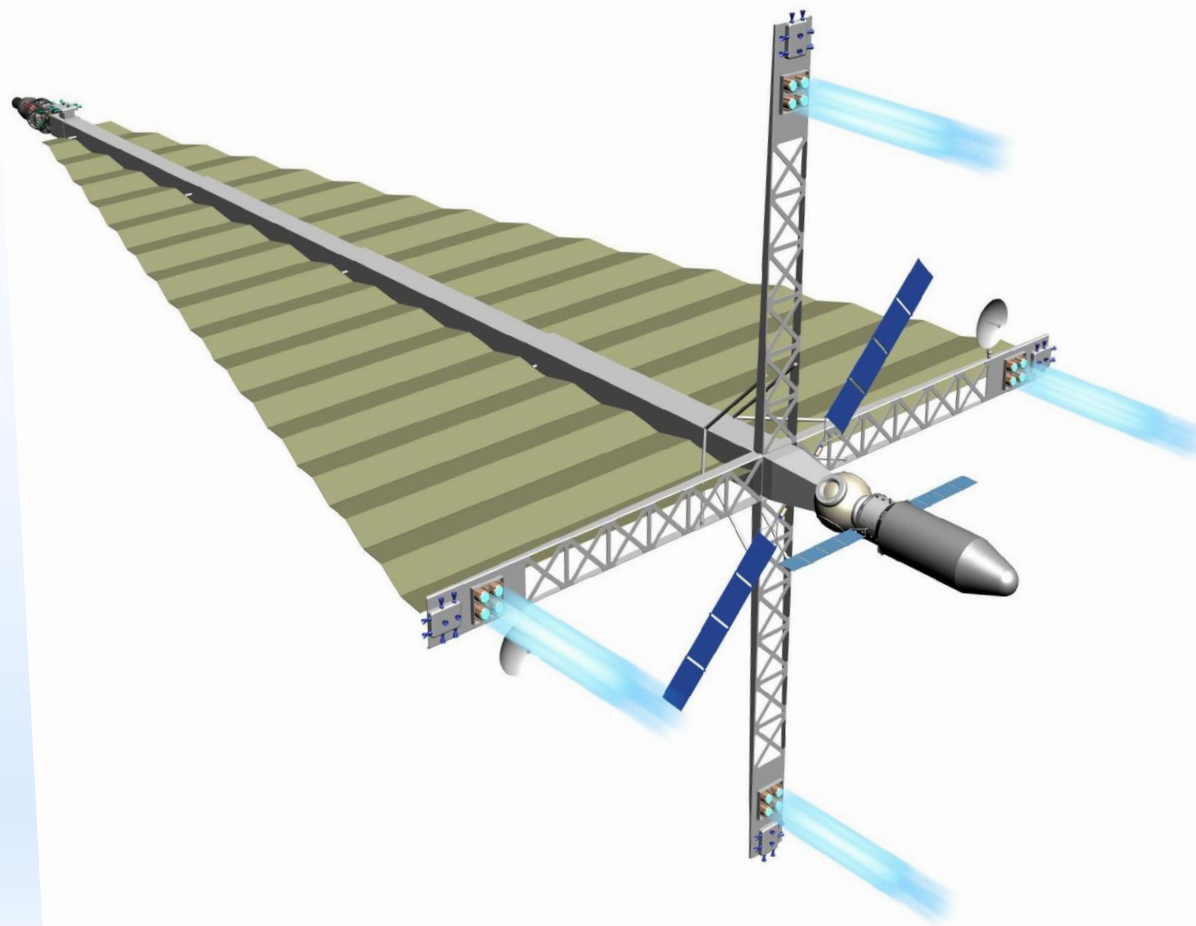
**Стыковка корабля обслуживания к ТЭМ
(предусматривается стыковка пилотируемого транспортного корабля для
обслуживания ТЭМ, например, дораскрытия элементов ТЭМ)**

Завершение эволюции функционирования ТЭМ



Сстыковка с модулем полезной нагрузки с блоками расходных компонентов

Начало штатной эксплуатации ТЭМ

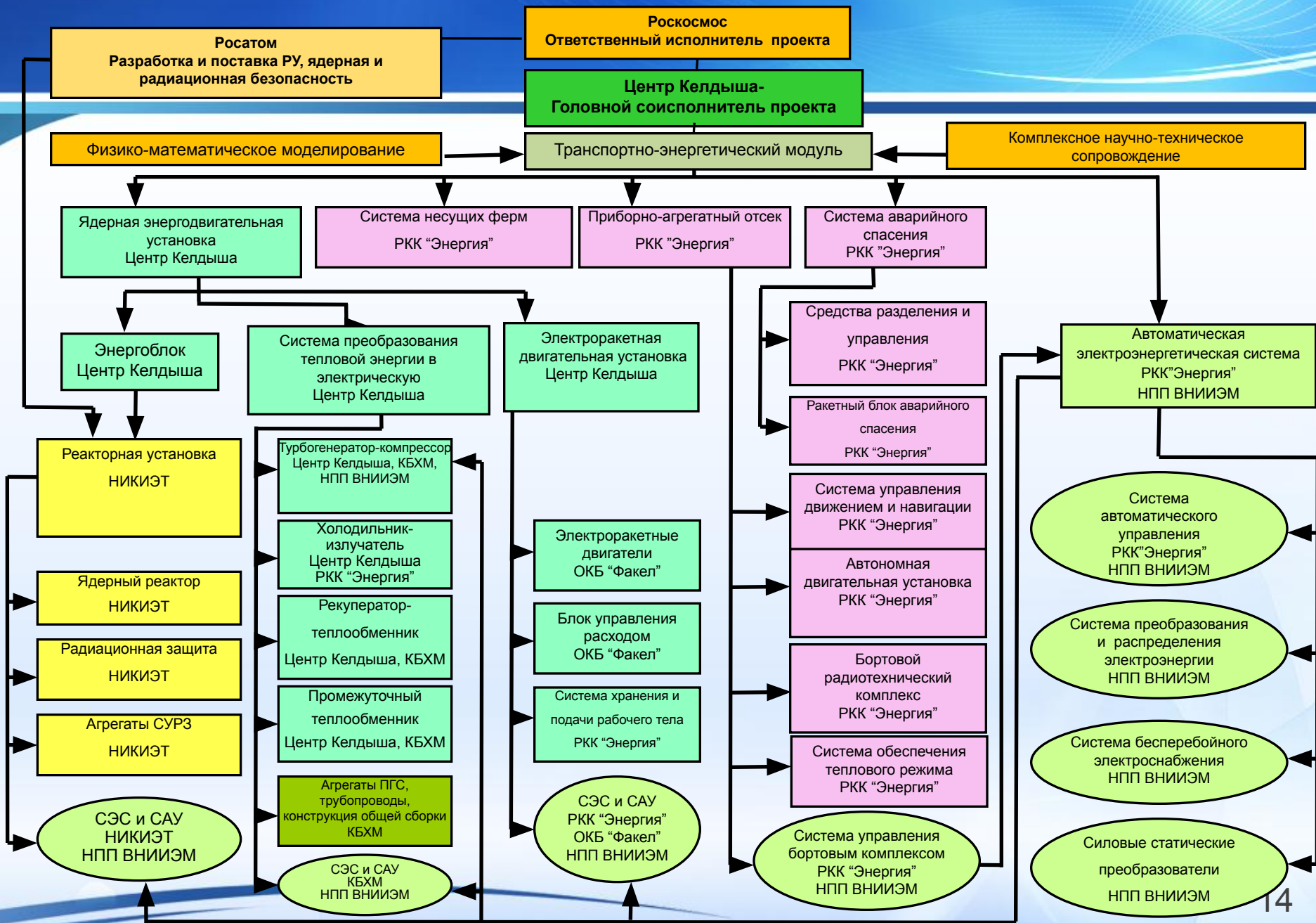


Включение в эксплуатацию и доставка модуля полезной нагрузки
в точку назначения

Декларируемые цели проекта

- Обеспечение лидирующих позиций в создании высокоэффективных энергетических комплексов космического назначения.
- Освоение новых инновационных технологий в обеспечении развития отечественной промышленности, в том числе
 - технологии создания высокотемпературного компактного газоохлаждаемого реактора;
 - технологии создания высокоплотного топлива на основе температуростойких композиций урана;
 - технологии создания жаропрочных конструкционных материалов.

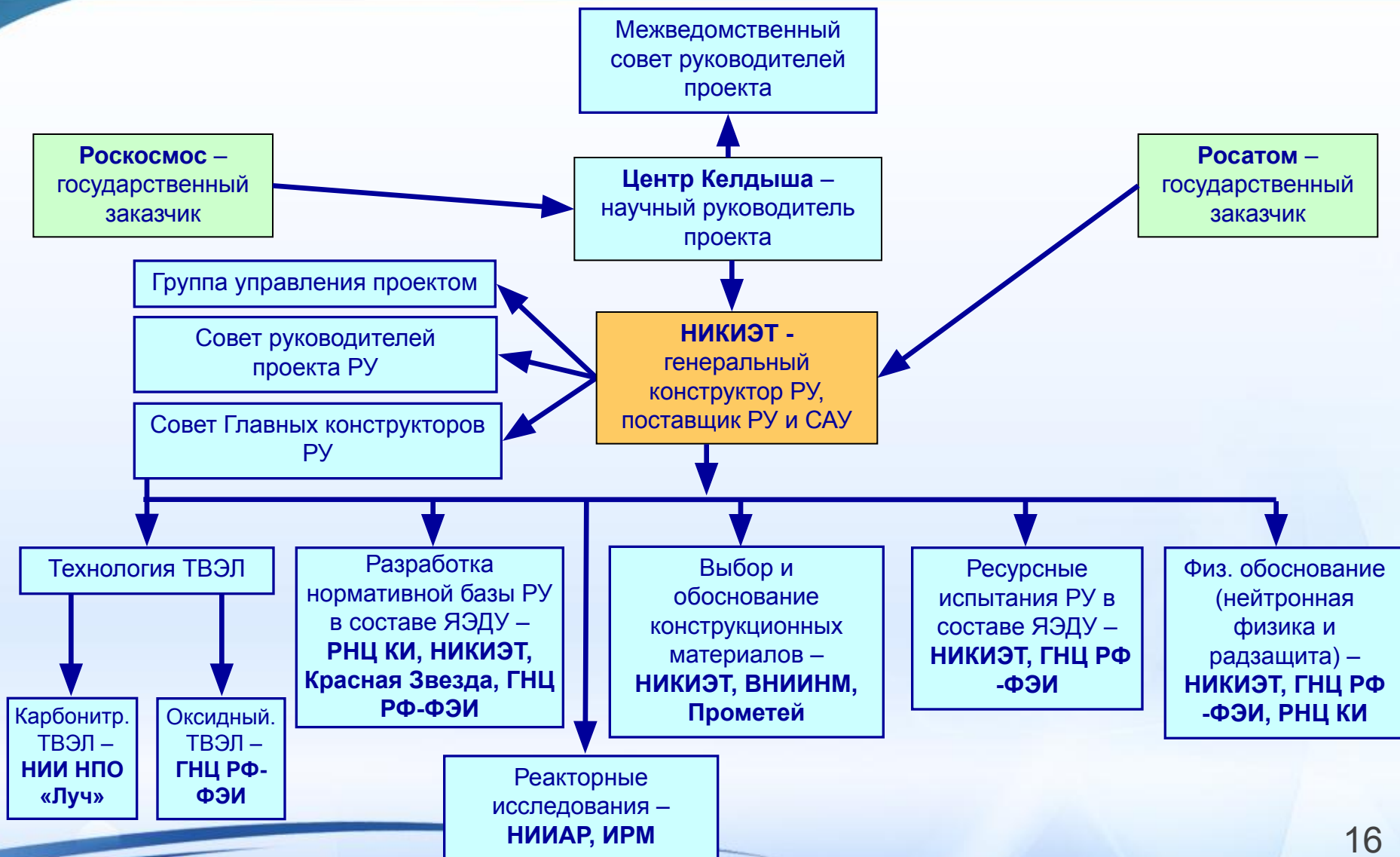
Организационная структура создания транспортно-энергетического модуля на основе ядерной энергодвигательной установки мегаваттного класса



Создание реакторной установки для ЯЭДУ мегаваттного класса

Решением Стратегического комитета Госкорпорации «Росатом» (протокол № 1 от 06.22.2009 г.) на предприятиях Росатома в кооперации со смежниками из Роскосмоса начаты ОКР по мегапроекту.

Организационная структура ОКР по созданию реакторной установки в составе энергоблока ЯЭДУ мегаваттного класса



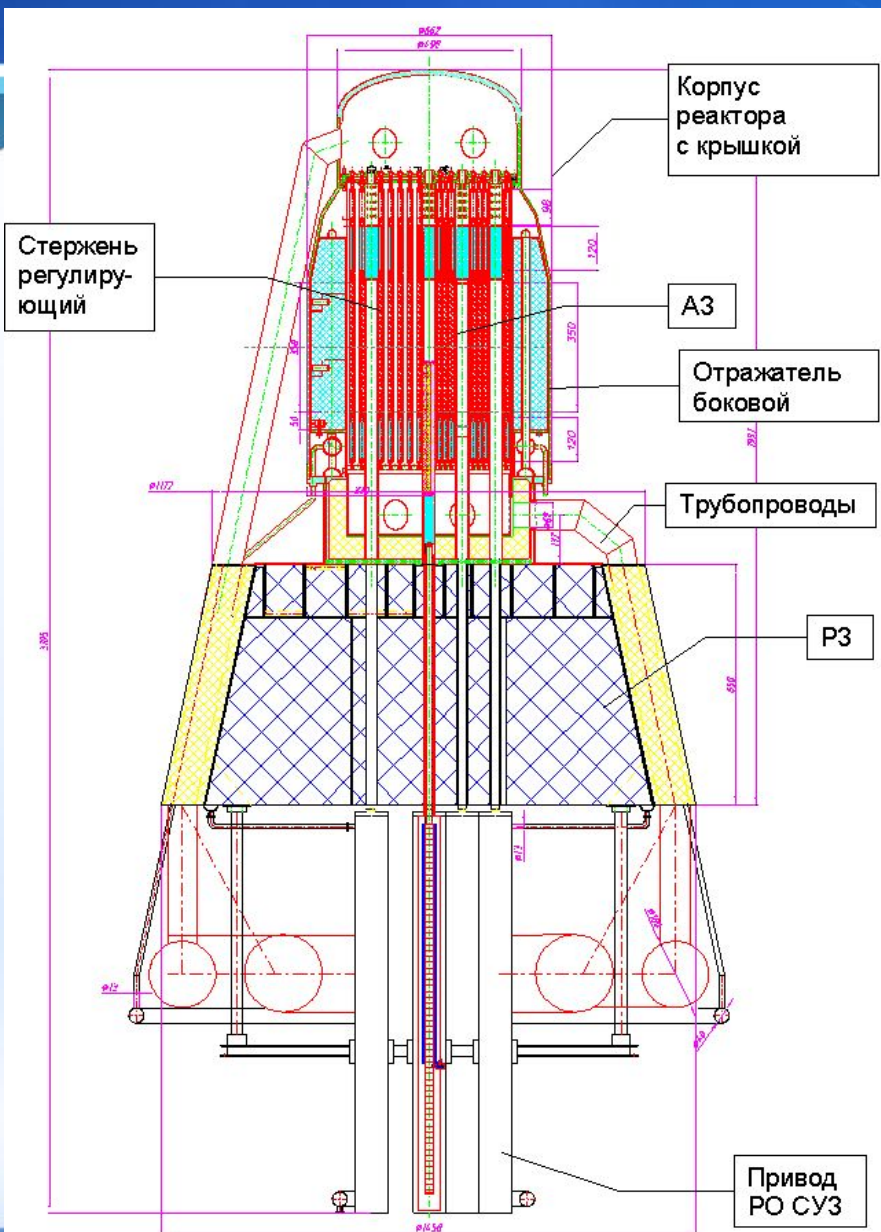
Совещание руководителей и специалистов предприятий кооперации ОКР по созданию энергоблока ЯЭДУ мегаваттного класса 22.04.2009 г.



г. Москва, ГНЦ РФ «Исследовательский центр им. М.В. Келдыша»

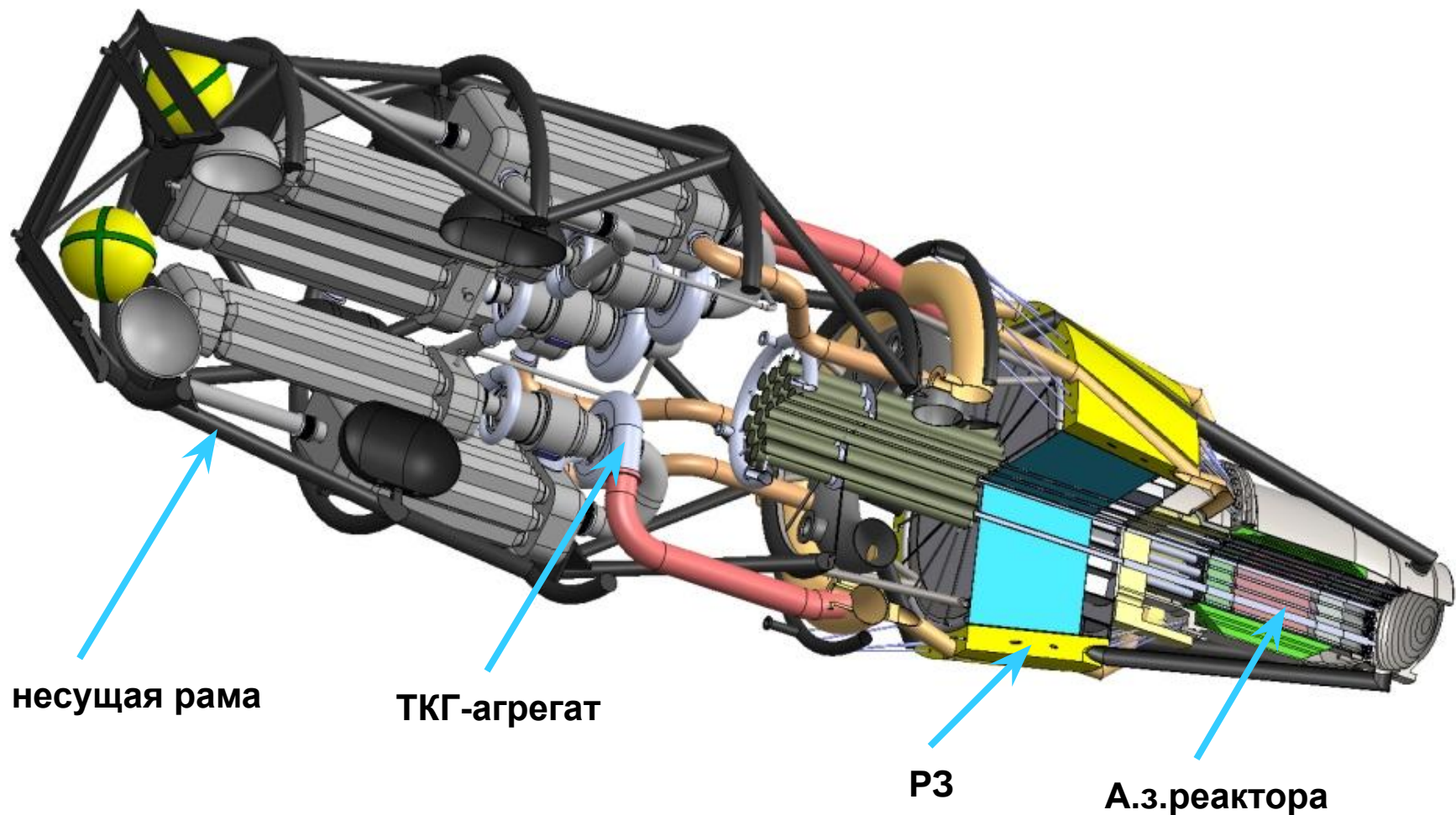
Проблемные вопросы проведения ОКР по мегапроекту

Схема РУ в составе ЯЭДУ мегаваттного класса (концепция НИКИЭТ)



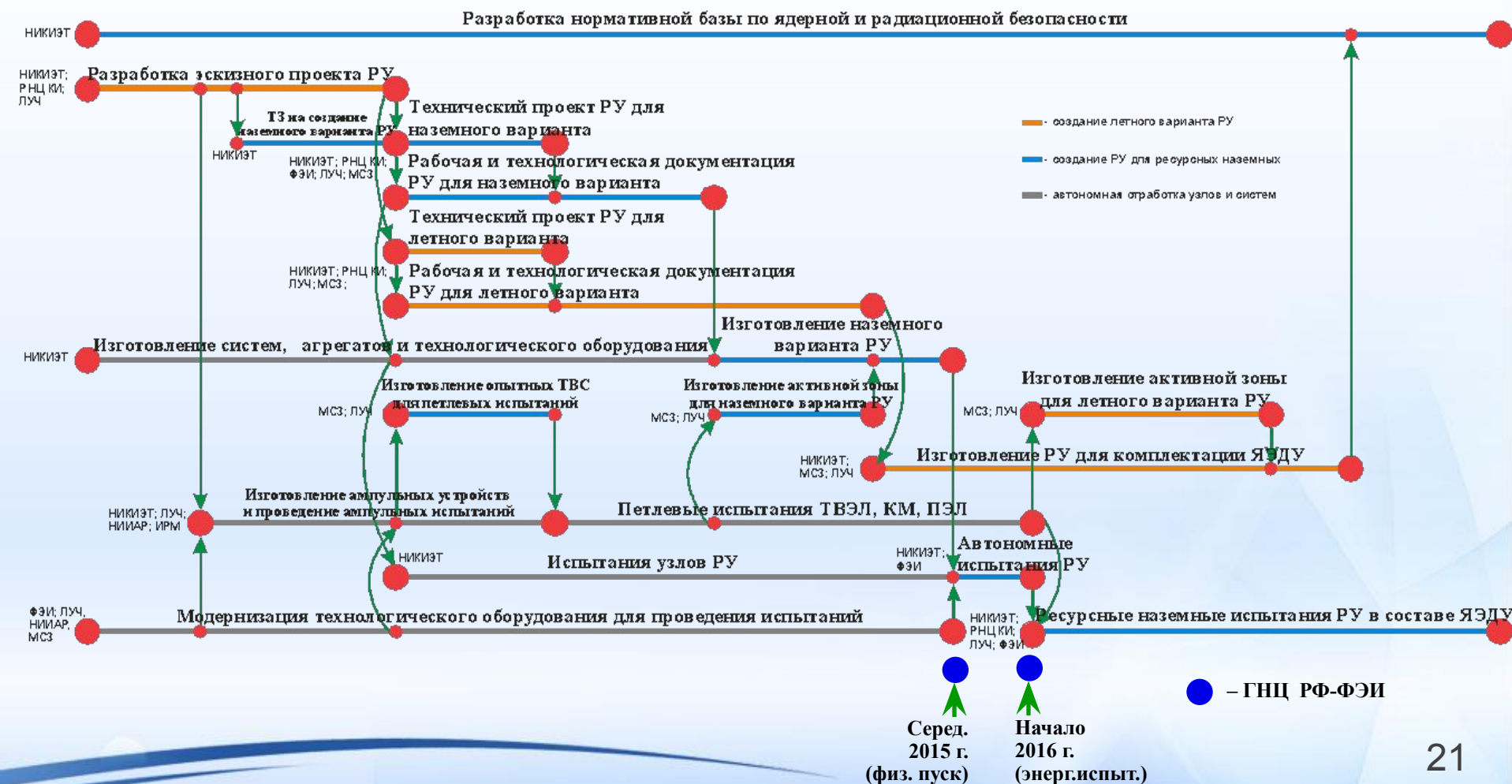
- Газоохлаждаемый (He-Xe) реактор на быстрых нейтронах.
- Тепловая мощность – до 3,5 Мвт.
- Температура газа на выходе из реактора (перед турбиной) – до 1500 К.
- Рабочее давление (He-Xe) – 3-4МПа.
- Загрузка урана ~ 200 кг.
- Обогащение – 90...96%.
- Назначенный срок службы – не менее 10 лет.
- Масса РУ не более 2700 кг.

Схема компоновки РУ в составе энергоблока ЯЭДУ мегаваттного класса (концепция НИКИЭТ и ИЦ им. М.В. Келдыша)

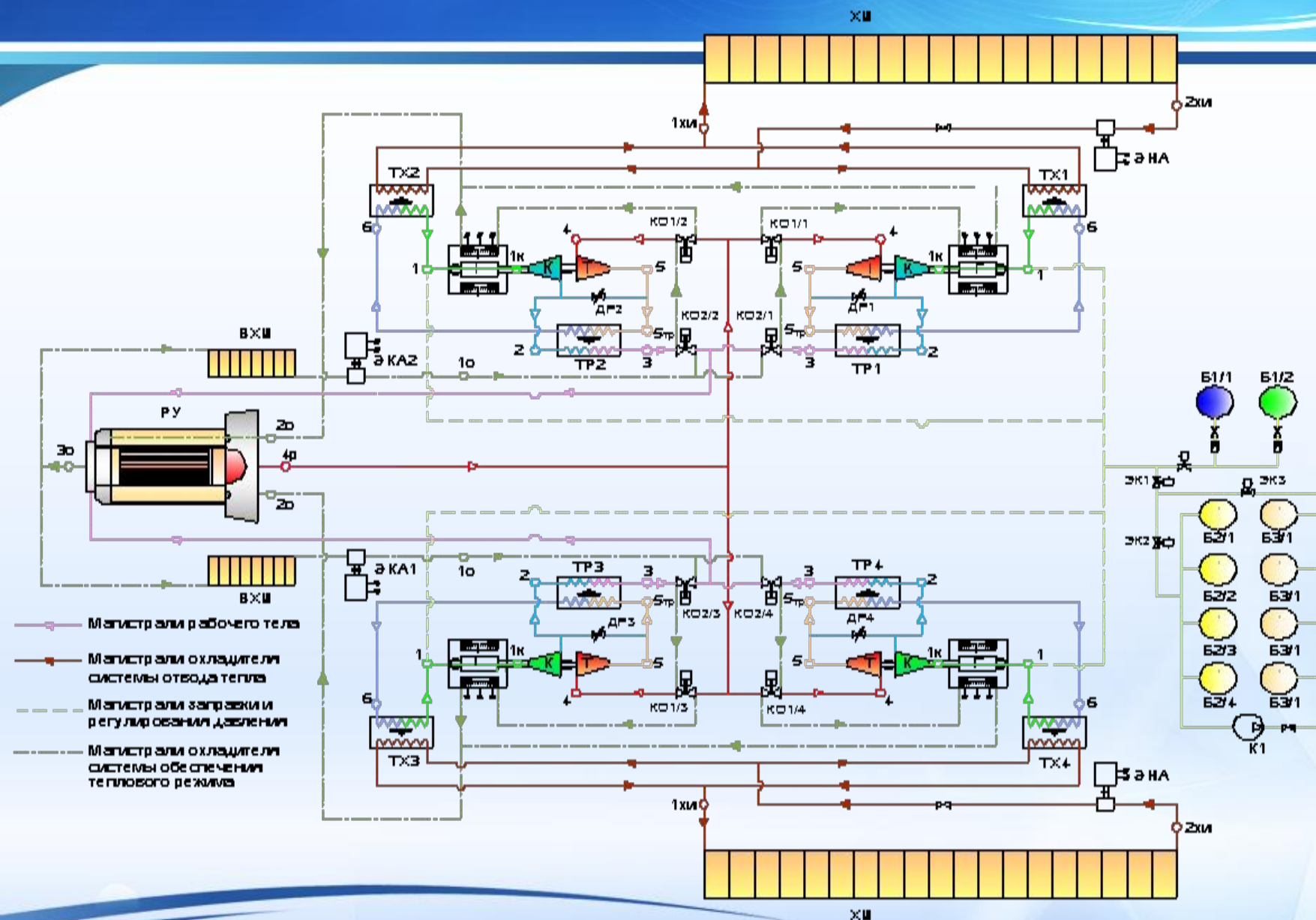


План-график создания энергоблока ЯЭДУ мегаваттного класса

Годы:	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018
Млн. руб.	430	670	1260	1420	1155	1210	555	405	140



Пневмогидравлическая схема ЯЭДУ мегаваттного класса



Состав пневмогидравлической и тепловой систем энергоблока ЯЭДУ мегаваттного класса

Пневмогидравлическая схема энергоблока ЯЭДУ включает следующие основные агрегаты и системы:

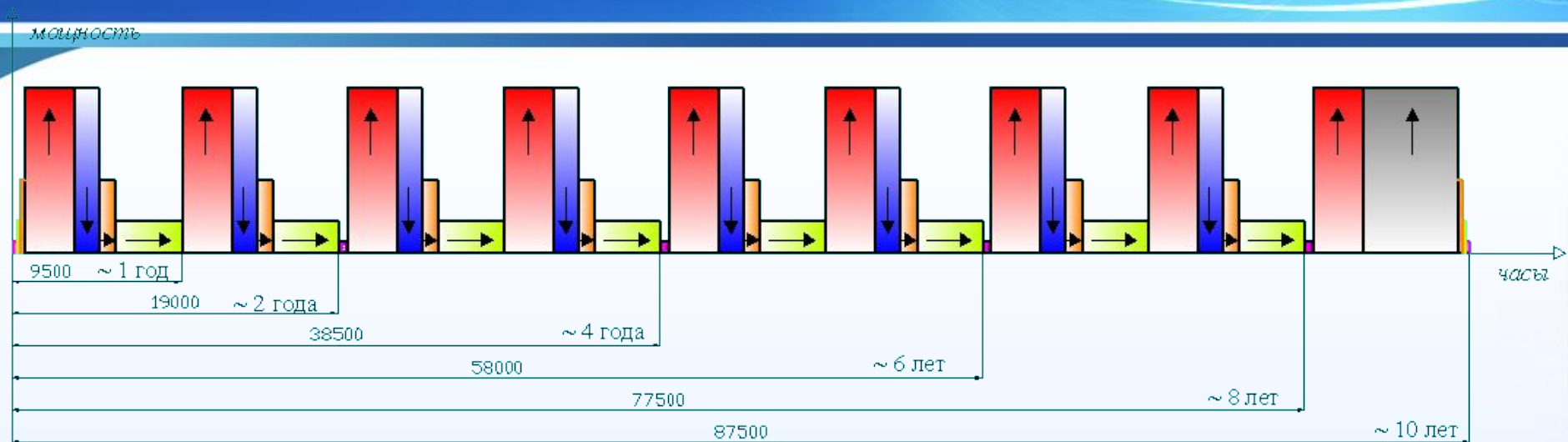
- реакторная установка РУ	1 шт.
- турбокомпрессор ТК	4 шт.
- электрогенератор ЭГ	4 шт.
- теплообменник-рекуператор ТР	4 шт.
- теплообменник-холодильник ТХ	4 шт.
- система отвода тепла СОТ, включающую 2 холодильника-излучателя ХИ	2 шт.
- вспомогательная система отвода тепла ВСОТ, включающую 2 ВХИ	2 шт.
- система изменения давления рабочего тела газотурбинного контура СИД	4 шт.
- дроссели перепуска рабочего тела	4 шт.

В состав ЯЭДУ также входят:

- система регулирования режима работы турбокомпрессора - СРРТ;
- система регулирования режима работы реактора СРРР.

Система преобразования тепловой энергии в электрическую представлена четырьмя турбогенераторными установками ТГУ. Каждая ТГУ может работать независимо от трех других. В нужный момент она может быть подключена или отключена от газовых магистралей СПЭ и от системы электрической нагрузки, а также от системы электропитания в режиме «мотор».

Базовая циклограмма функционирования ТЭМ



- 1. Транспортные режимы (режим максимальной мощности) – $\Sigma 45,5$ тыс. час.**
 - перевод ТЭМ с РБО на ГСО (~ 120 суток);
 - перевод ТЭМ с ГСО на РБО (~ 60 суток);
 - под ТЭМ на орбиту захоронения (~ 270 суток).
- 2. Промежуточный режим (дежурная < мощность < максимальная) – $\Sigma 8$ тыс. час.**
 - ТЭМ на РБО (~ 40 суток)
- 3. Дежурный режим – $\Sigma 32$ тыс. час.**
 - ТЭМ на РБО (~ 170 суток)
- 4. Режим с выключенным реактором – $\Sigma 2$ тыс. час.**
 - ТЭМ на РБО или на орбите захоронения (~ 20 суток)

Суммарная наработка ~ 90 тыс. час.

Текущее состояние схемных решений для обеспечения требуемых характеристик энергоблока ЯЭДУ мегаваттного класса

Характеристика	Варианты энергоблока		
	Вариант 1	Вариант 2	Вариант 3
Выходная электрическая мощность, кВт	900	900	900
Максимальная/ минимальная температура цикла, К	1230/320	1500/320	1500/400
Степень рекуперации	0,92	0,92	0,92
Перетечки на регулирование, %	5	5	5
КПД:			
-компрессора	0,80	0,80	0,80
-турбины	0,87	0,87	0,87
-генератора	0,89	0,9	0,9
Перепад на компрессоре/турбине	2,6/2,34	2,4/2,22	2,6/2,38
Массовый расход рабочего тела, кг/с:			
-через компрессор	4X4,73=18,92	4X2,93=11,72	4X3,85=15,40
-через активную зону реактора	17,98	11,12	14,64
-через турбину	4X4,49=17,98	4X2,78=11,12	4X3,66=14,64
Тепловая мощность реактора, кВт, в том числе активной зоны	3470 3375	2615 2543	3470 3375
Тип холодильника-излучателя	Капельный	Капельный	Панельный
Мощность, отводимая СОТ, кВт	2319	1500	2329
КПД преобразования энергии, %	26	34	26
Масса ЭБ, кг	6800	6500	6800

Режимы функционирования ЯЭДУ в составе ТЭМ

1. **Транспортный режим** – режим максимальной мощности при переводе ТЭМ с одной орбиты на другую:
 - работа ЭРДУ в номинальном режиме;
 - работа ЭБ в режиме максимальной мощности.
2. **Промежуточный режим** – режим со значением мощности, меньшей максимального значения и большей значения в дежурной режиме:
 - ЭБ работает на промежуточном значении мощности;
 - ЭРДУ отключена или работает только часть двигателей.
3. **Дежурный режим** – режим минимально доступной мощности, при которой обеспечивается устойчивая работа ЭБ.
 - ЭБ работает на предельно возможной минимальной мощности;
 - ЭРДУ отключена.
4. **Режим с выключенным реактором** – режим используется для технологического обслуживания ТЭМ на РБО с участием человека и при захоронении ТЭМ:
 - ЭБ отключен;
 - ЭРДУ отключена.

Переходные режимы (концепция ИЦ им. М.В. Келдыша)

1. Запуск энергоблока.

2. Останов.

2.1. Мощность реактора снижается до 0 (по потоку нейтронов).

2.2. Расхолаживание.

Рассматривается наиболее тяжелый режим по тепловыделению:

- тепловая мощность реактора 3450 кВт;
- продолжительность работы 120 суток.

2.2.1. Плановый останов.

2.2.2. Аварийный останов (отказ СПЭ, ХИ, ВХИ, АБ, СБ).

$W_{\text{утилиз}}$ до 3, 45 МВт.

Требования к САУ ЯЭДУ мегаваттного класса

Система управления ЯЭДУ должна обеспечивать контроль, управление и защиту ЯЭДУ и ее агрегатов и систем при плановой (нормальной) работе и в аварийных ситуациях на следующих режимах:

- запуск и выведение на заданный уровень мощности в диапазоне от 40 до 1000 кВт_{эл};
- работа на стационарном уровне мощности в диапазоне от 40 до 1000 кВт;
- изменение электрической мощности в пределах диапазона регулирования (реализуется изменением давления (расхода) в контуре ТК и мощности реактора);
- плановый останов;
- аварийный останов при потере внешней электрической нагрузки;
- аварийный останов, несвязанный с нарушением или прекращением работы СПЭ;
- изменение режима работы или аварийный останов при частичном нарушении или прекращении работы оборудования СПЭ (от одного до трех ТГУ).

Проблемы обеспечения запуска и длительного функционирования турбокомпрессора-генератора (ТКГ) энергоблока ЯЭДУ мегаваттного класса

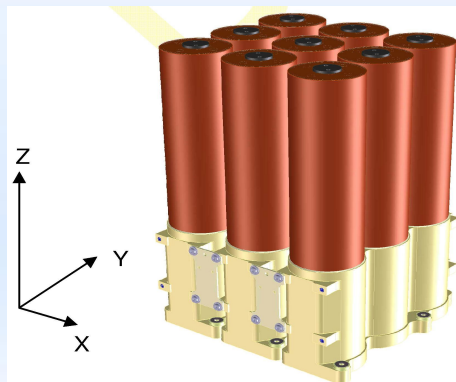
- На борту ТЭМ существует три группы потребителей электроэнергии:
 - ⇒ ЭРДУ
 - снабжается по шине питания постоянного тока напряжением ~ 4500 В;
 - электрическая мощность генерируется четырьмя ТКГ;
 - ⇒ внутренние электропотребители ТЭМ
 - снабжаются по шине питания постоянного тока напряжением ~ 28 В;
 - электрическая мощность генерируется солнечной батареей (СБ);
 - ⇒ автоматическое электропусковое устройство
 - снабжается по шине питания постоянного тока напряжением 60-70 В;
 - электрическая мощность генерируется аккумуляторной батареей (АБ);
- Номинальная частота вращения ТКГ – 60000 об./мин.

Технические характеристики солнечной батареи

- **Мощность 3-х каскадной арсенид-галиевой СБ – 9000 Вт.**
- **Период обращения ТЭМ – 100,8 мин.**
- **Максимальное время освещенной части витка – 100,8 мин.**
- **Минимальное время освещенной части витка – 65,4 мин.**
- **Коэффициент освещенности по орбитальному дню – 1.**

Технические характеристики аккумуляторной батареи

- Состоит из двух последовательно соединенных литий-ионных батарейных модулей конфигурации 6p11s VES180 фирмы «SAFT».
- Рабочее напряжение АБ – 88 -73,7 В (при глубине разряда до 80%).
- Емкость – 21648 Втч, (268 Ач)
- Ток разряда – не более 274 А
- Мощность АБ – до 17300 Вт (в течение 1 часа).
- Вес - 214 кг.



Технические характеристики генератора электропускового устройства, обеспечивающего начальную раскрутку ТКГ

Низковольтная обмотка – 442 В / 39,7 А

Высоковольтные обмотки – 887 В / 39,7 А – 2шт.

**Момент инерции турбогенератора с магнитной муфтой и
валом под турбину и компрессор – $J = 0,079 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$**

Электрические потребители ТЭМ при запуске ТКГ

- Потребители:
 - САУ РУ – 6000 Вт;
 - оборудование системы преобразования энергии – 6000 Вт;
 - другие потребители автономного оборудования – 1800 Вт.
- Доступная суммарная электрическая мощность (СБ + АБ) для запуска ТКГ – 12500 Вт. Справка: $[(9 + 17,3) - (6 + 6 + 1800)] = 12500$ Вт.
- Допущения (текущие), обеспечивающие запуск ТКГ:
 - момент нагрузки при запуске имеет вентиляторный характер;
 - мощность компрессора линейно зависит от давления в контуре;
 - при постоянной частоте вращения вала ТКГ мощность турбины линейно возрастает с повышением температуры на ее входе;
 - повышение температуры на входе турбины осуществляется со скоростью 10- 20 град/мин.;
 - разогрев РУ начинается одновременно с запуском 2-х (из 4-х) генераторов ТКГ в двигательном режиме;
 - текущий дефицит электрической мощности для запуска ТКГ;



Выбор

Главным конструктором РУ (НИКИЭТ) и

Главным конструктором ЯЭДУ

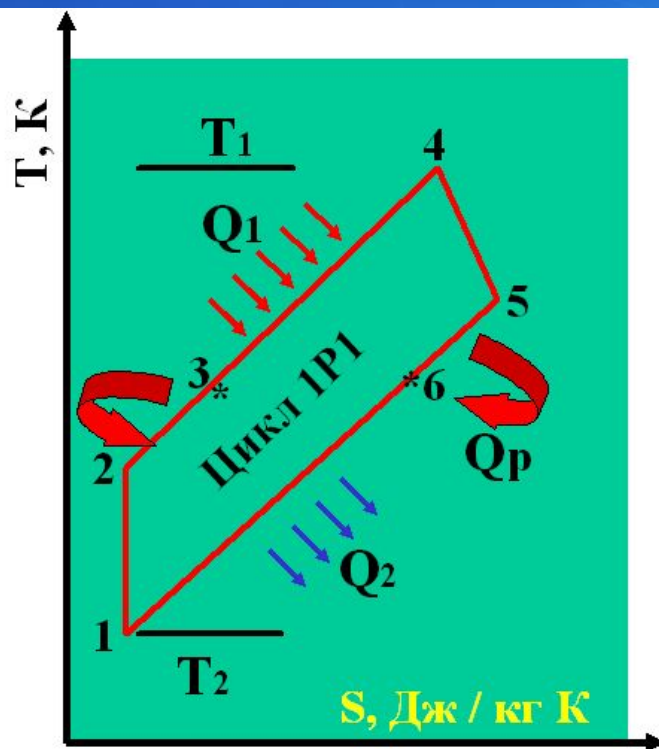
(Исследовательский центр им. М.В. Келдыша)

сделан,

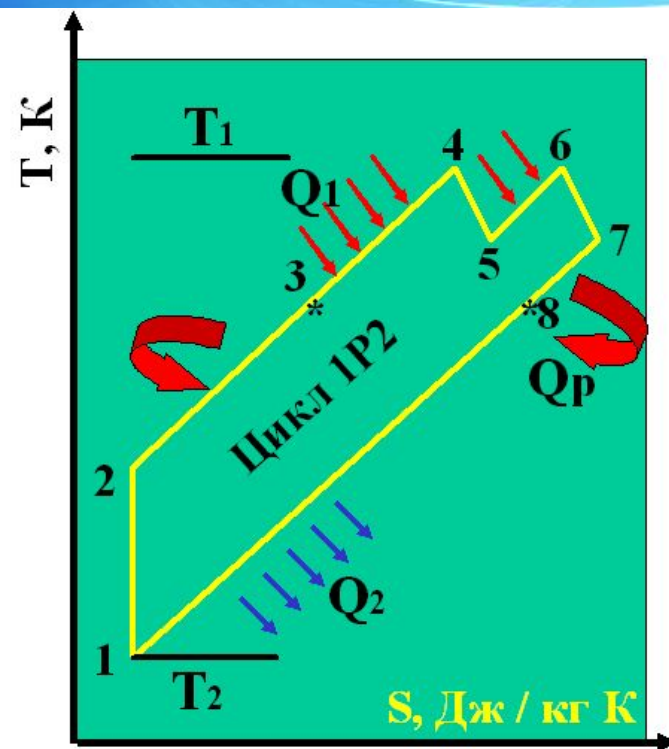
**но ПРОБЛЕМЫ обоснования проектных
решений ОСТАЛИСЬ...**

**ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЙ ЦИКЛ И ОБЛИК ЯЭДУ С
ДИНАМИЧЕСКИМ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕМ ТЕПЛОВОЙ
ЭНЕРГИИ В ЭЛЕКТРИЧЕСКУЮ НА ОСНОВЕ
ЗАМКНУТОГО ЦИКЛА БРАЙТОНА**

Сравнение замкнутых циклов Брайтона в «Т-S» координатах



- 1-2 - сжатие в компрессоре
- 2-3 - нагрев в регенераторе
- 3-4 - нагрев в реакторе
- 4-5 - расширение в турбине
- 5-6 - охлаждение в регенераторе
- 6-1 - охлаждение в теплообменнике ХН

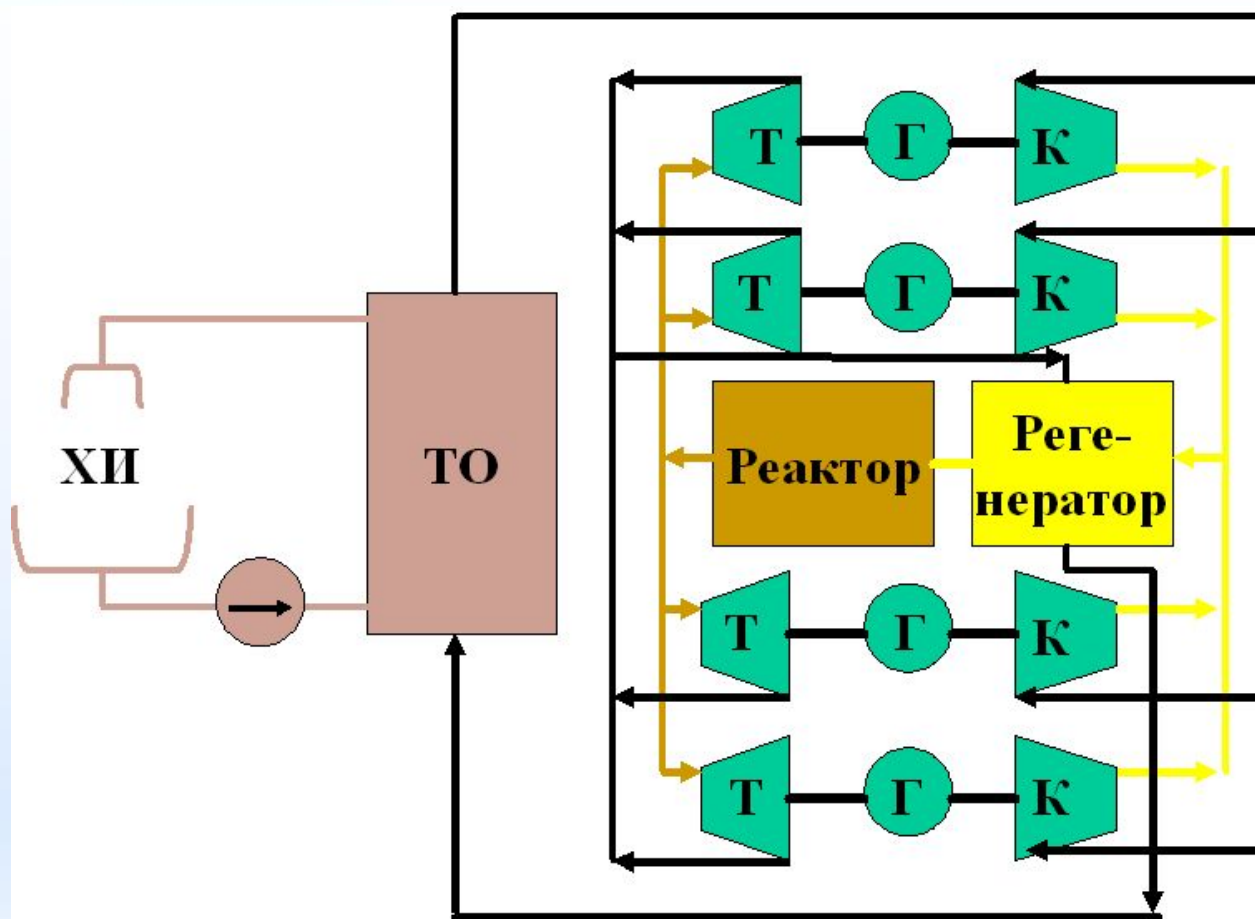


- 1-2 - сжатие в компрессоре
- 2-3 - нагрев в регенераторе
- 3-4 и 5-6 - нагрев в реакторе
- 4-5 и 6-7 - расширение в турбинах Т1 и Т2
- 7-8 - охлаждение в регенераторе
- 8-1 - охлаждение в теплообменнике ХН

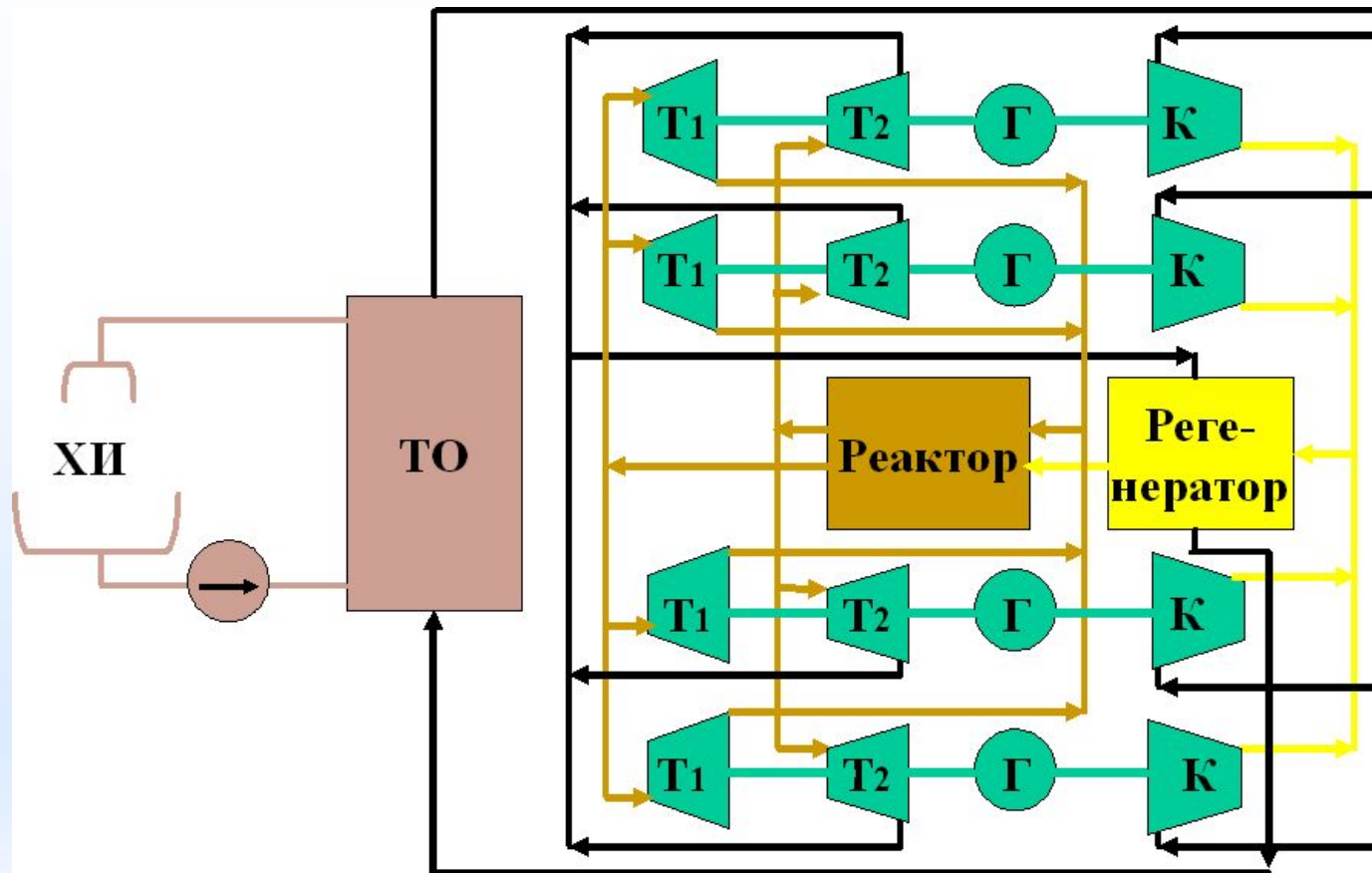
«Цена» осуществлённого выбора цикла 1P1:

- к.п.д. $\leq 34\%$ при $T_{\text{ГАЗА}} \sim 1500 \text{ K}$;
- материаловедческие проблемы обоснования топливной композиции, материала оболочки ТВЭЛ, конструкционных материалов РУ.

Принципиальная схема выбранного цикла 1Р1 ТКГ в ЯЭДУ мегаваттного класса



Принципиальная схема предлагаемого специалистами ГНЦ РФ-ФЭИ цикла 1Р2 ТКГ в ЯЭДУ мегаваттного класса

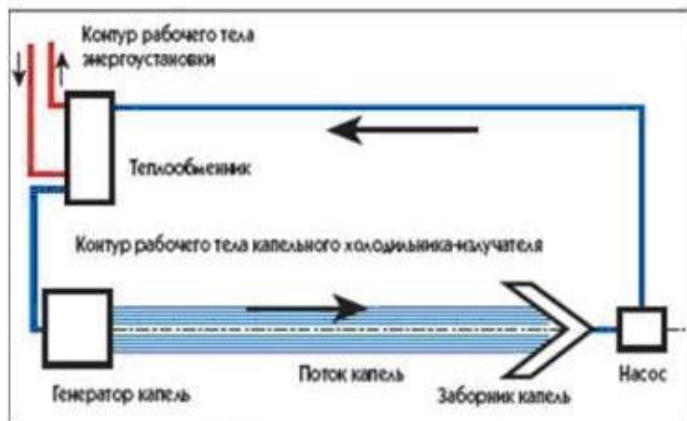


Что даст изменение схемы рабочего процесса преобразования энергии в ТКГ путём перехода от цикла 1P1 к циклу 1P2?

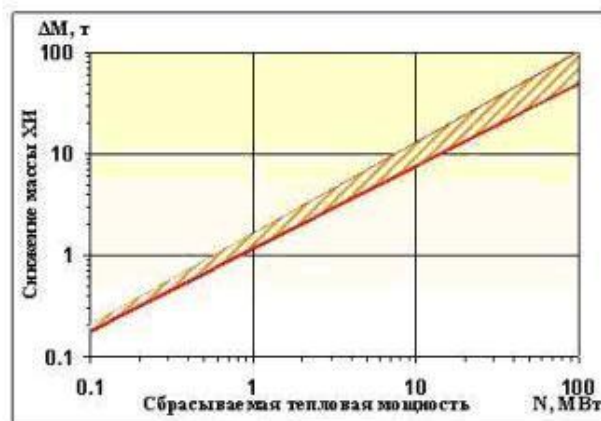
- Увеличение к.п.д. с 0,33 до 0,40 при существующих ИД и, тем самым,
 - снижение тепловой мощности РУ до ~ 3 МВт;
 - снижение «сбрасываемой» тепловой мощности до ~ 2 МВт.
- Снижение подогрева рабочего тела в реакторе с 500 К до 300 К.
- Увеличение КПД можно «разменять» на снижение температуры рабочего тела на выходе из реактора с 1500 К до 1300 К.
- Вариативность компоновочных решений по турбокомпрессорным и энергопреобразующим агрегатам (одна турбина приводит в действие компрессор, а другая - генератор).

Концепция ИЦ им. М.В Келдыша (Роскосмос)*

Турбомашинные ЯЭУ с капельным холодильником-излучателем – перспективное направление развития космической ядерной энергетики



Функциональная схема
капельного холодильника-излучателя



Эффективность применения
капельного холодильника-излучателя



Оборудование для космического
эксперимента «Пелена-2»

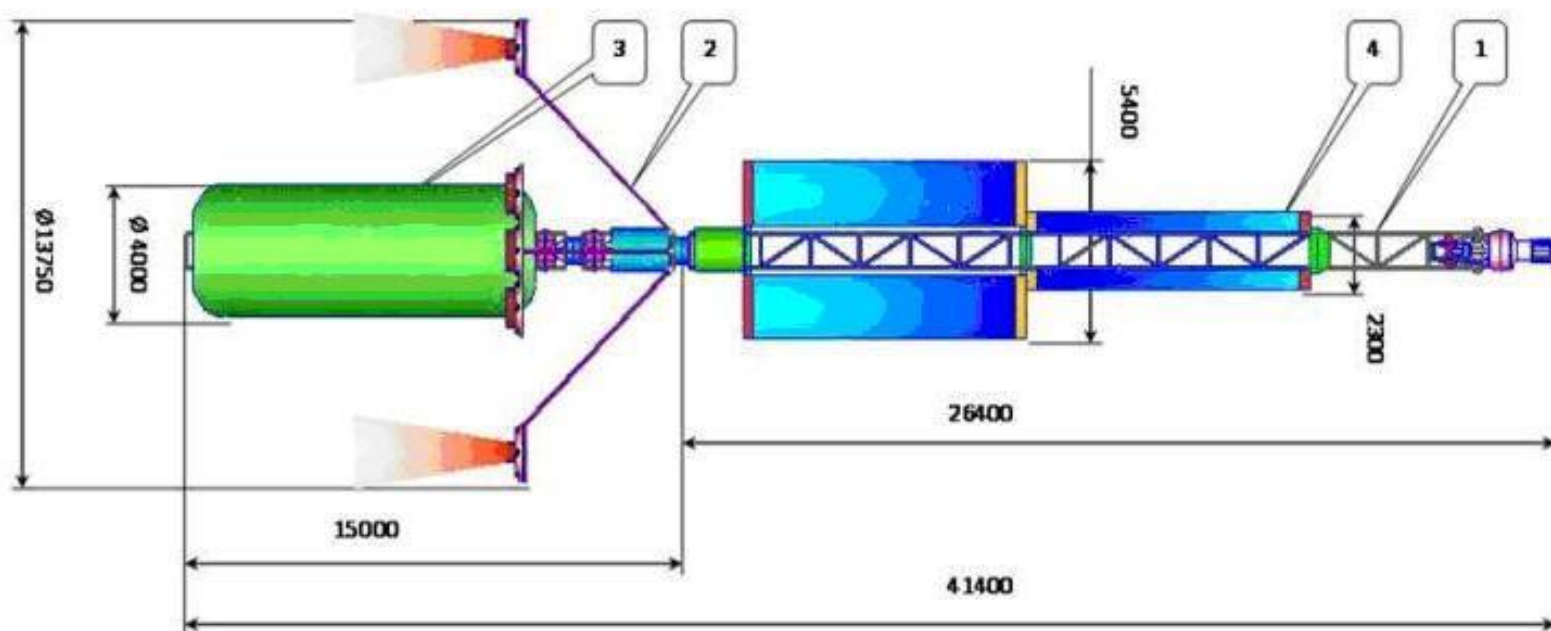


Космонавт С. Золотарев во время
космического эксперимента на борту ОС «Мир»

*А.С. Коротеев «Актуальные задачи в космонавтике XXI века», доклад на 1-ом Международном симпозиуме «Космос и глобальная безопасность человечества»

Концепция ИЦ им. М.В Келдыша (Роскосмос)*

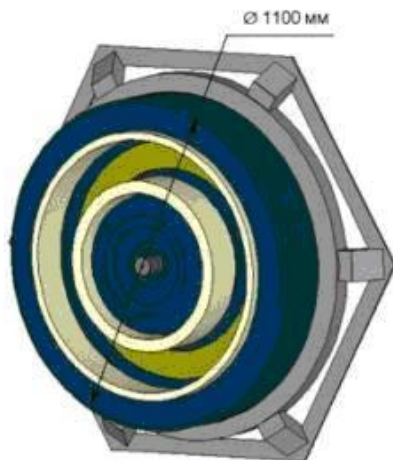
ВАРИАНТ КОМПОНОВКИ ЯЭУ С КАПЕЛЬНЫМ ХОЛОДИЛЬНИКОМ-ИЗЛУЧАТЕЛЕМ В СОСТАВЕ МНОГОРАЗОВОГО МЕЖОРБИТАЛЬНОГО БУКСИРА



*А.С. Коротеев «Актуальные задачи в космонавтике XXI века», доклад на 1-ом Международном симпозиуме «Космос и глобальная безопасность человечества»

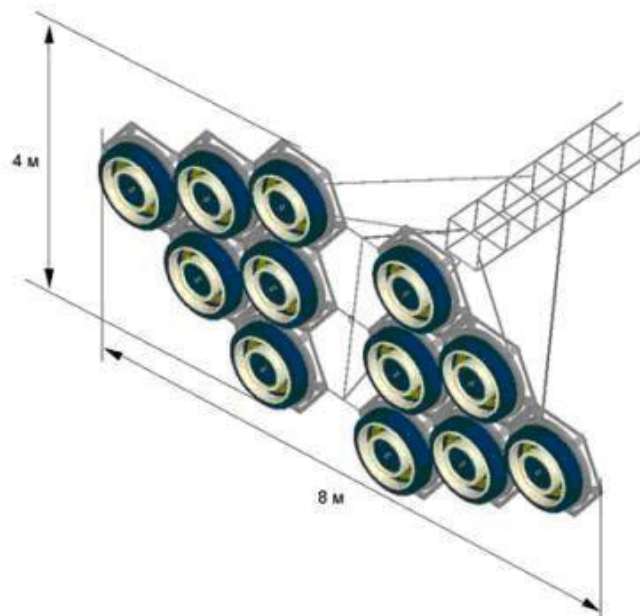
Концепция ИЦ им. М.В Келдыша (Роскосмос)* - вариант выбора ЭРДУ

ПРОЕКТ ЭРДУ МОЩНОСТЬЮ 1 МВт НА БАЗЕ ХОЛЛОВСКИХ ЭРД



Проектные параметры
единичного модуля СПД

Мощность, кВт	100		
Напряжение разряда, В	200	250	300
Ток разряда, А	490	392	327
Тяга, кгс	0,87	0,78	0,71
Расход ксенона, мг/с	635	508	423
Удельный импульс, с	1400	1565	1700
КПД, %	60		



Проектные параметры ЭРДУ на
базе 10 основных и 2 резервных
модулей СПД

Мощность	1 МВт
Тяга	7 - 9 кгс
Удельный импульс	1400 – 1700 с

*А.С. Коротеев «Актуальные задачи в космонавтике XXI века»,
доклад на 1-ом Международном симпозиуме «Космос и глобальная безопасность человечества»

Ожидаемые результаты мегапроекта

- Качественное повышение функциональных возможностей космических средств нового поколения.
- Создание нового класса реакторных установок, ранее неосвоенных отечественной промышленностью.
- Создание ряда инновационных продуктов, которые могут быть использованы в других отраслях промышленности.
- Развитие кадрового потенциала ГК «Росатом».

Текущие основные стадии ОКР по мегапроекту

В 2010 г.:

- Разработано ТЗ на ТЭМ.
- Разработано ТЗ на РУ.
- Разработаны технические задания на карбонитридный и оксидный варианты исполнения ТВЭЛ.
- Разработано ТЗ на опытный образец энергоблока для наземных испытаний.
- Разработано ТЗ на опытный образец РУ в составе ЭБ для наземных испытаний.
- Выпущена пояснительная записка к 1-му этапу эскизного проекта ТЭМ.
- Сформирована организационная структура по созданию РУ.
- Разработан и утвержден руководством ГК «Росатом» график работ по созданию РУ.
- Разработан первый вариант общего вида РУ в формате 3D.
- Сформированы рабочие группы по основным направлениям проекта.

Текущие основные стадии ОКР по мегапроекту (продолжение)

Находятся в работе (2010 / 2011 гг.):

- ТЗ на испытательный комплекс «Ресурс» для обеспечения наземных ресурсных испытаний ЭБ НП.
- Маршрутная технология сборки ЭБ НП и др. НТД.
- Комплексная программа экспериментальной отработки ЭБ НП.
- Задание на проектирование реконструкции ИК (зд. 224А).
- Проект инвестиционного объекта (зд. 224А).
- Проектно-изыскательские работы по ИК (зд. 224А).
- Комплект документов в обоснование объёмов финансирования по всем объектам капитального строительства в рамках мегапроекта.
- Другие ОКР и ПИР по ИК (зд. 224А).



ТВЭЛ с диоксидным топливом активной зоны реакторной установки для ЯЭДУ мегаваттного класса

- приказом № 1/475-П от 26.11.2010 г. ГНЦ РФ-ФЭИ
назначен Главным конструктором-технологом
ТВЭЛ с диоксидным топливом –**

Общий подход к созданию ТВЭЛ

Исходные предпосылки:

Сжатые сроки разработки эскизного и технического проектов активной зоны для ядерной энергоустановки мегаваттного класса предполагают наличие завершенных поисковых НИР по материалам и базовым технологиям ТВЭЛ.

Наиболее близкие технологии, на которых может базироваться создаваемый ТВЭЛ для ядерной энергоустановки мегаваттного класса может быть создан на базе разработанных в 1962-1987 гг. пионерских технологий изготовления высокотемпературных ТВЭЛ (ЭГК), термоэмиссионной ЯЭУ "Тополь", постоянно совершенствующихся и модернизирующихся за счет применения современного станочного, термовакuumного и контрольно-измерительного оборудования, сегодня широко применяемых ФЭИ для изготовления твэлов различных ЯЭУ, в том числе, с газовым теплоносителем.

В качестве топлива во всех разрабатывавшихся и разрабатываемых в России термоэмиссионных ЯЭУ используется топливо на основе диоксида урана, в качестве оболочки – монокристаллические сплавы на основе Мо или W.

Главные направления разработки ТВЭЛ в концепции ФЭИ

Эволюционное развитие лучших достижений по технологиям создания высокотемпературных ТВЭЛ с применением уже созданных и освоенных промышленностью материалов. Проектирование, изготовление и сопровождение изделия на всем жизненном цикле на базе PLM, CAD, CAM программ, обрабатывающих центров с ЧПУ, создание «безлюдных» технологий.

Основные проектные решения ГНЦ РФ-ФЭИ в термоэмиссионных ЭГК, обеспечившие создание высокотемпературных ТВЭЛ/ЭГК

- **Применение монокристаллических оболочек на основе сплавов Мо.**

Все попытки применения в высокотемпературных ТВЭЛ поликристаллических сплавов на основе Мо и W для термоэмиссионных ЭГК оказались неудачными – рекристаллизационное и радиационное охрупчивание, трудности в получении тонкостенных труб твэльного качества, диффузия продуктов деления топлива в оболочку по границам зерен и т.д. Высоколегированные рением сплавы Мо и W для высокотемпературных ТВЭЛ в ФЭИ не исследовались.

- **Реализация идеи использования в ТВЭЛ комбинированного сердечника с топливными дисками на основе диоксида урана и проставками из тугоплавких металлов, позволившая решить проблему работоспособности ТВЭЛ, в том числе проблему термомеханики "топливо-оболочка".**
- **Реализация идеи организованного вывода ГПД из топлива с помощью специальных газоотводных устройств, позволяющая разгрузить оболочку от давления газовых продуктов деления.**
- **Реализация идеи составного ТВЭЛ, позволяющая реализовать возможность применения монокристаллических оболочек ограниченной длины.**

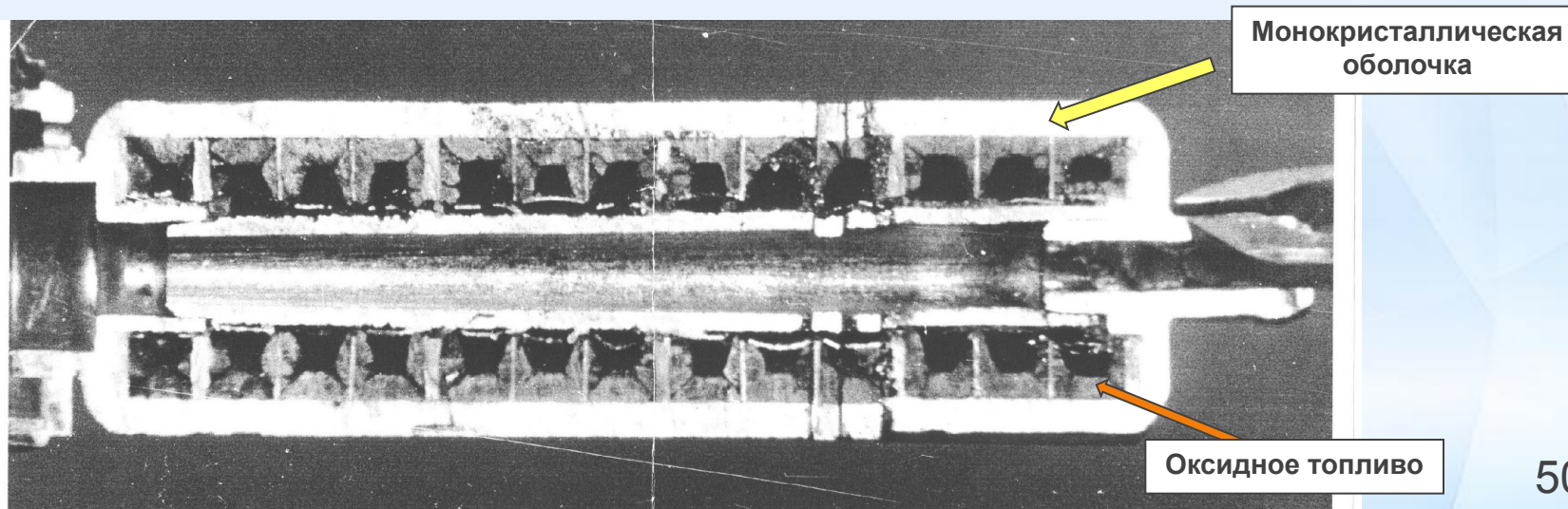
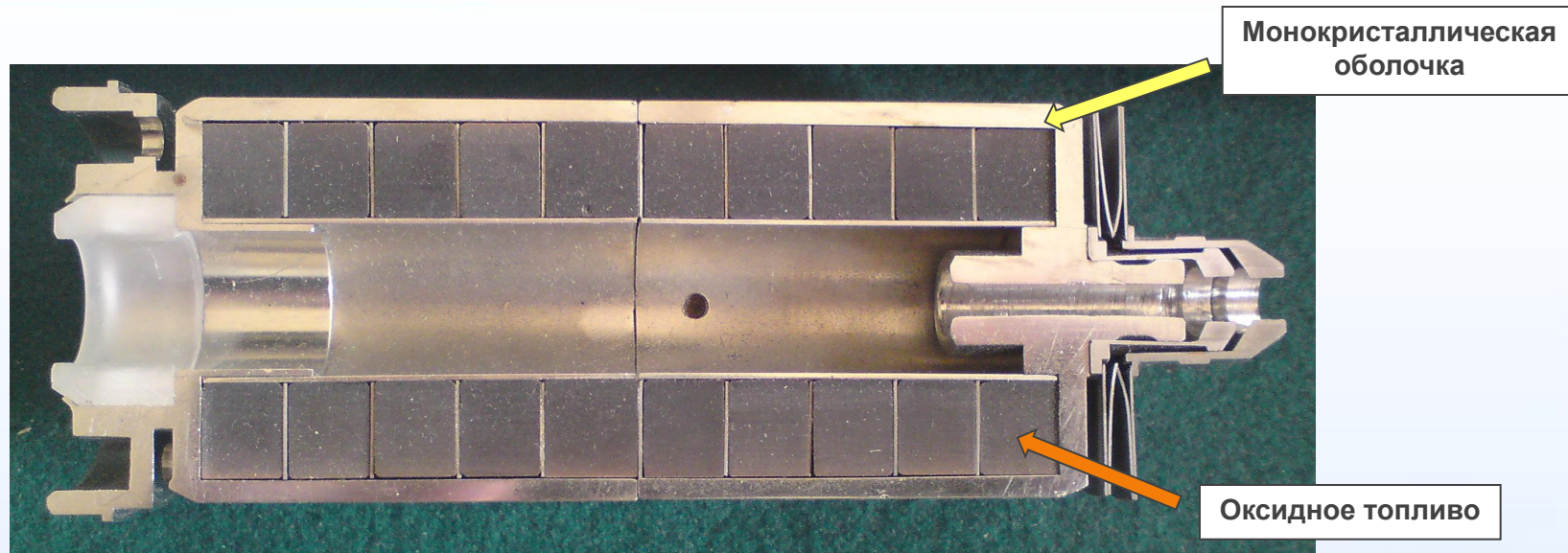
Результаты петлевых реакторных испытаний ТВЭЛ/ЭГК с диоксидным топливом в монокристаллической оболочке на основе молибдена

Год спытания	Индекс	Кол-во твэл	Температура оболочки ТВЭЛ, °С	Материал оболочки	Время испытаний, час	Результат испытаний
1974-1975	КЭТ-37	5	1500-1550	Монокристалл Мо	8857	Сохранение геометрической стабильности твэла
1977-1978	КЭТ-50	5	1500-1550	Монокристалл Мо	10187	Сохранение геометрической стабильности твэла
1979-1981	КЭТ-51	5	1550-1650	Монокристалл Мо	4940	Сохранение геометрической стабильности твэла
1981-1982	КЭТ-65	40	1550-1700	Монокристалл Мо	5434	Сохранение геометрической стабильности твэла
1985-1986	КЭТ-79Л	60	1660-1700	Монокристал. сплав Мо-Nb-Zr	6100	Сохранение геометрической стабильности твэла
1986-1988	КЭТ-86	20	1660-1700	Монокристал. сплав Мо-Nb-Zr	10`800	Сохранение геометрической стабильности твэла
1988-1991	КЭТ-87	20	1660-1700	Монокристал. сплав Мо-Nb-Zr	13`000	Сохранение геометрической стабильности твэла

Примечание: с монокристаллической молибденовой оболочкой ТВЭЛ в составе ЭГК с диоксидным топливом были испытаны

- в период 1975-1984 гг. – четыре наземных прототипа ЯЭУ «ТОПАЗ» (изделия 4С, 7СВ, 11С и 14С);
- в период 1987-1988 гг. – две штатных ЯЭУ в процессе ЛКИ на КА «Плазма-А».

Разрез по эмиттерной оболочке ЭГЭ с ГОТ до и после реакторных испытаний



Предлагаемая ГНЦ РФ-ФЭИ конструкторско-технологическая концепция ТВЭЛ с диоксидным топливом на стадии «эскизный проект»

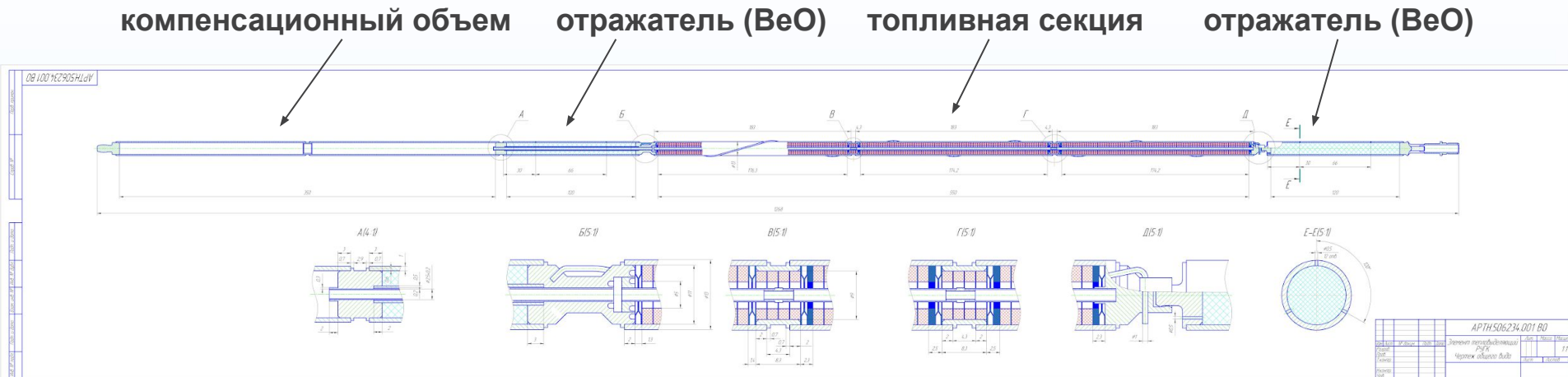
Предлагается ТВЭЛ составного типа с оболочкой из монокристаллического сплава Мо и топливом на основе дисков из диоксида урана с проставками из Мо или сплава W-Re, с выводом ГПД в компенсационный объем с помощью газоотводного устройства.

ТВЭЛ для экспериментальной отработки и реакторных испытаний:

- **оболочки ТВЭЛ из монокристаллического сплава Mo-Nb-Zr** изготавливаются в ФЭИ из прутков, соответствующих ТУ48-0531-226-80, с использованием обрабатывающих автоматизированных центров с учетом опыта получения эмиттерных оболочек, приобретенного в ФЭИ в 2009-2010 годах;
- **топливо из диоксида урана** изготавливается в ФЭИ в виде дисков по технологиям, в основном соответствующим заводским ТУ на топливо для ЭГК реактора "Топаз«;
- **проставки из поликристаллического Мо или сплава ВР-27** изготавливаются в ФЭИ по технологиям, в основном соответствующим технологическим процессам на проставки для ЭГК реактора "Топаз".

ТВЭЛ с диоксидным топливом по технологии ГНЦ РФ-ФЭИ для РУ ЯЭДУ мегаваттного класса

Элемент тепловыделяющий РУГК (чертеж общего вида)



Основной вариант

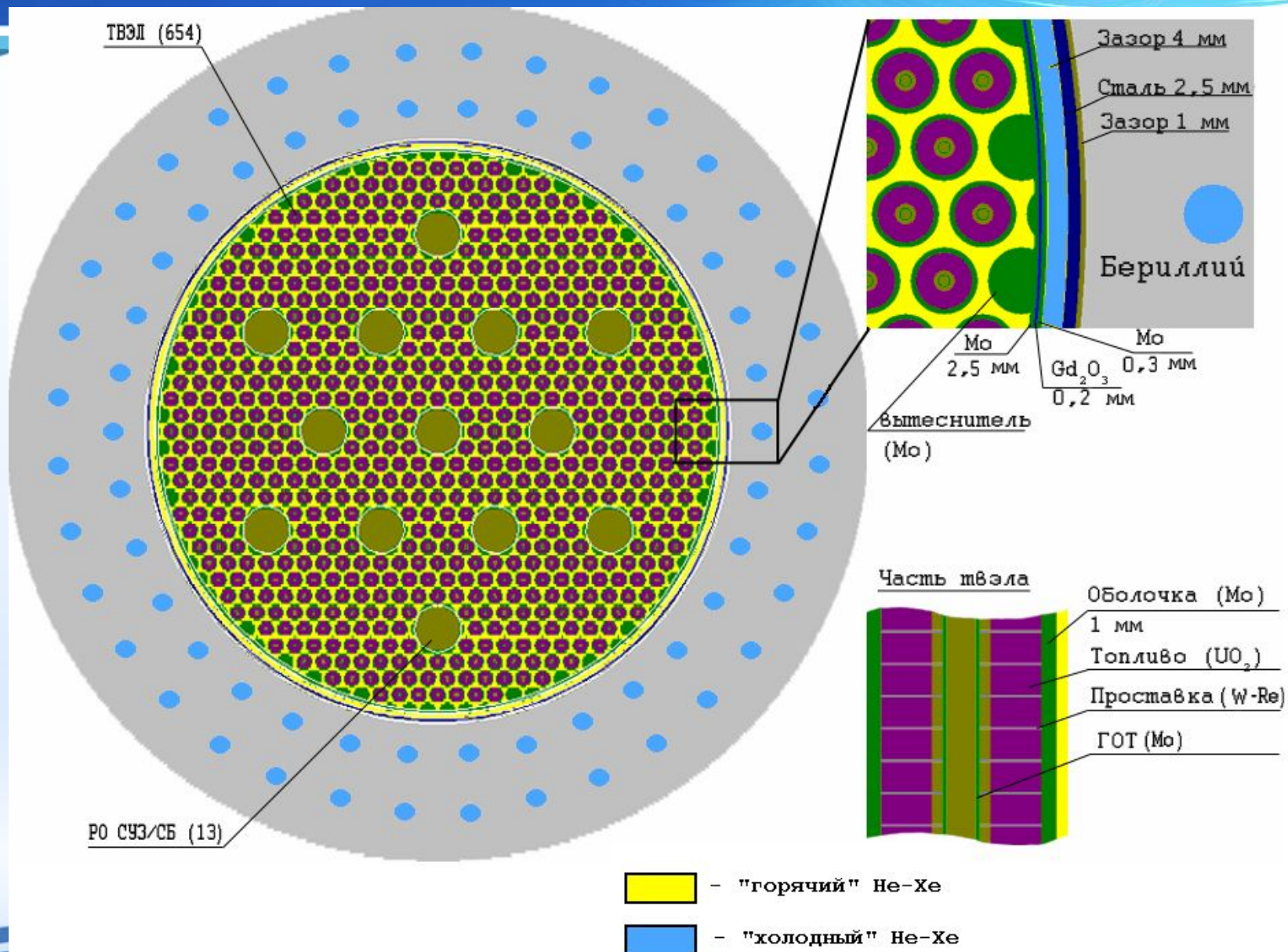
Составной ТВЭЛ состоит из топливной секции, верхнего и нижнего отражателей и компенсационного объема. Топливная секция формируется из трех монокристаллических оболочек из легированного Мо, соединенных сваркой.

Вариант

"Псевдосоставной" ТВЭЛ – отличается использованием цельных оболочечных труб для топливной секции из поликристаллического сплава ВР-27 (или МР-47), в остальном идентичен основному варианту.

Экспериментальная отработка варианта возможна не ранее 2012 года, после изготовления опытных образцов труб из этих сплавов и предварительной оценки их служебных свойств.

Концепция а.з. РУ ЯЭДУ мегаваттного класса с ТВЭЛ по технологии ГНЦ РФ-ФЭИ



Сравнение масс элементов РУ с по технологиям НИИ НПО «Луч» и ГНЦ РФ-ФЭИ

	Твэл с карбонитридным топливом по технологии НИИ НПО «Луч»	Твэл с диоксидным топливом по технологии ГНЦ РФ-ФЭИ	Разница масс, кг
Количество твэл	612	654	–
Масса одного твэл, кг	0,995	0,93	0,075
Масса всех твэл, кг	635	609	-26
Масса отражателя (Ве), кг	270	284	+14
Количество СУЗ с СЯБ	19	13	–
Масса СУЗ с СЯБ, кг	400	273	-147
Масса РЗ, кг	–	–	+70
Сумма, кг	–	–	-69

Оценка температуры оболочки ТВЭЛ с диоксидным топливом при различных значениях коэффициента теплоотдачи

Коэффициент теплоотдачи, Вт/(м ² К)	Максимальная температура оболочки, К	Максимальная температура топлива, К
300	2315	2411
500	1997	2086
1000	1734	1820

Программа реакторных ампульных испытаний ТВЭЛ в 2010-2011 гг. для РУ ЯЭДУ мегаваттного класса

Испытания в реакторах с высоким потоком и быстрым спектром нейтронов при наборе максимального флюенса :

- Проведение ускоренных сравнительных испытаний конструкций полноразмерных макетов **секции нижнего отражателя** в условиях заданных ТЗ на РУ по давлению, температуре, составу теплоносителя.
- Проведение ускоренных сравнительных испытаний конструкций полноразмерных макетов **секции верхнего отражателя** в условиях заданных ТЗ на РУ по давлению, температуре, составу теплоносителя.
- Подтверждение работоспособности **сварных швов** конструкции твэла при ускоренных испытаниях в условиях заданных ТЗ на РУ по давлению, температуре, составу теплоносителя.
- Материаловедческие испытания **оболочки топливной секции** при имитации давлений, температур, среды теплоносителя РУ.
- Экспериментальное определение **интегрального газовыделения** из элементов топливной секции, работающих при температурах оболочки 142 0К, 1685 К и 1950 К.

Сравнительные испытания полноразмерных конструкций топливной секции ТВЭЛ РУ (различного исполнения) для ЯЭДУ мегаваттного класса в условиях заданных ТЗ на градиент температуры по высоте активной зоны РУ, энерговыделение в твэле, давление теплоносителя (в реакторе ИВВ-2М).

Основные работы по отработке ТВЭЛ конструкции ГНЦ РФ-ФЭИ в 2010-2011 гг.

2010г.

- Разработка **конструкции** экспериментального **ТВЭЛ** для реакторных испытаний, отработка технических и технологических решений по ТВЭЛ, изготовление комплектующих (топливо, оболочки, концевые детали и др.).
- Изготовление образцов **секций верхнего и нижнего отражателя**, макетов **топливной секции**, оболочек и сварных соединений для реакторных испытаний.
- Разработка **конструкции облучательного устройства** для сравнительных испытаний ТВЭЛ различной конструкции в реакторе ИВВ-2М. Изготовление сборочных единиц макета облучательного устройства.

2011г.

- Реакторные **испытания** макета облучательного устройства на базе **300 часов**.
- Изготовление экспериментальных твэлов в варианте ФЭИ, изготовление облучательных устройств №1, 2. Проведение **длительных реакторных испытаний**.
- Технологическая и конструкторская **отработка элементов и узлов составного ТВЭЛ**.
- **Расчетно-экспериментальное** определение **коэффициента теплоотдачи** между оболочкой ТВЭЛ и рабочим телом на основе теории подобия систем воздух и гелий-ксеноновая смесь.
Экстраполяция стендовых экспериментальных **результатов, полученных на семистержневом макете активной зоны** с электрическими имитаторами твэл при воздушном охлаждении.
- Расчетные, конструкторские и технологические работы в **обоснование эскизного проекта** ТВЭЛ.

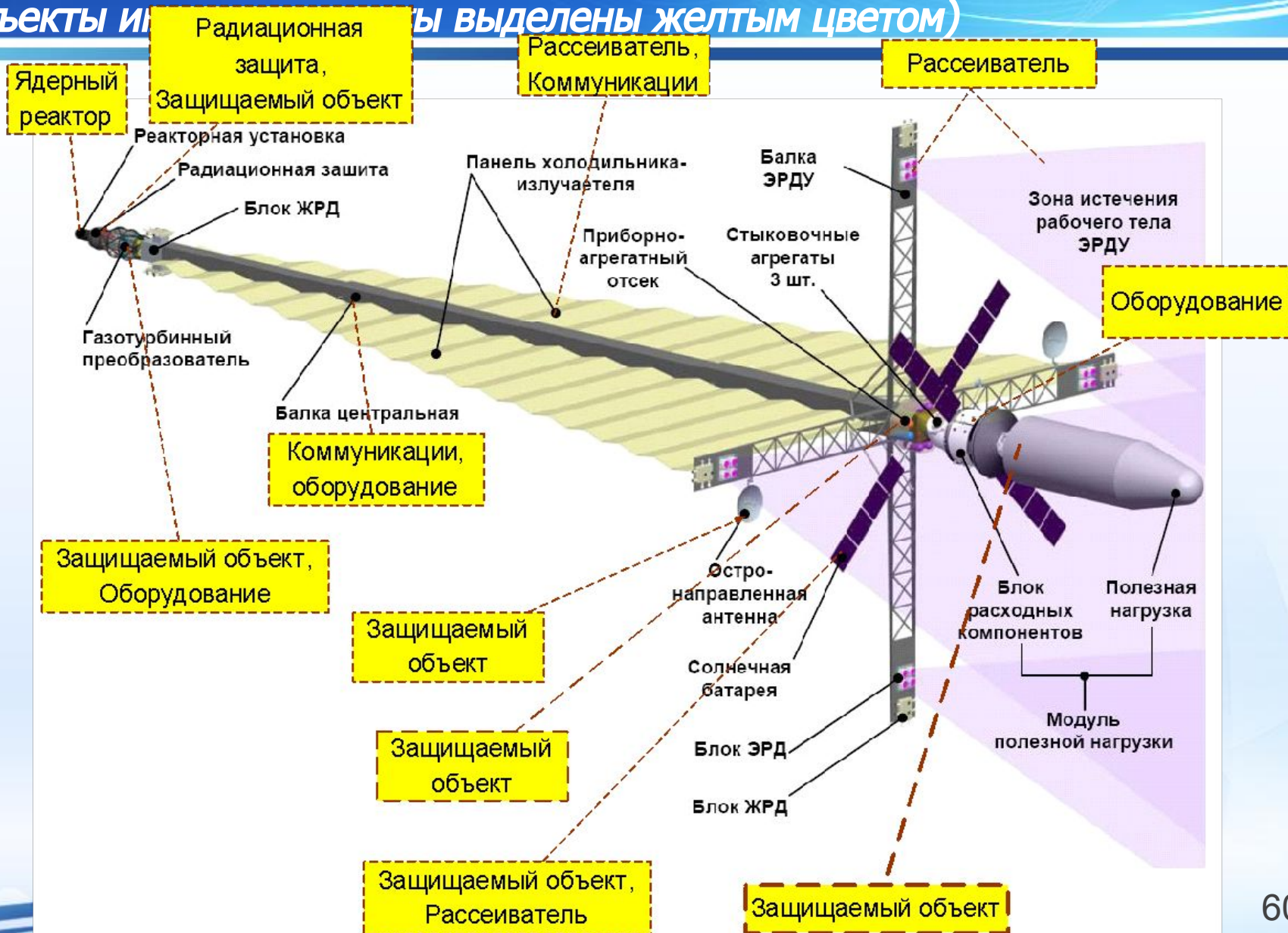
Ключевые развилки ОКР по отработке ТВЭЛ

- ☐ Работоспособность оксидного ТВЭЛ при большом) градиенте температуры (~ 500 градусов) по высоте либо подтверждается реакторными испытаниями, либо необходим переход на другую концепцию активной зоны (поперечное обтекание).
- ☐ Возможность получения параметров рабочего тела на выходе из активной зоны при заданных ТЗ конструкции ТВЭЛ и характеристик а.з. подтверждается либо величиной коэффициента теплоотдачи, полученной экспериментальным путем, либо изменением ТЗ на а.з. и ТВЭЛ.
- ☐ Возможность использования для оболочек сплавов на основе высокорениевых сплавов W и Mo либо должна быть подтверждена реакторными испытаниями, либо единственным материалом для оболочек будут монокристаллические сплавы Mo и W.

Расчётное обоснование проектных решений по ТЭМ с ЯЭДУ мегаваттного класса

Область расчета системы радиационной защиты - ТЭМ

(объекты и системы выделены желтым цветом)



Задачи радиационной защиты при проектировании ТЭМ

- Выбор оптимального облика (оптимальной компоновки подсистем) космического аппарата, обеспечивающего минимальные массогабаритные характеристики ТЭМ и приемлемые радиационные нагрузки на защищаемых объектах.
- Выбор оптимального конструктивного облика блока радиационной защиты, обеспечивающего
 - рабочие температурные режимы материалов защиты;
 - заданные уровни излучения на защищаемых объектах;
 - минимальные массогабаритные характеристики радиационной защиты и реакторной установки в целом.
- Сравнение и выбор реакторной установки с лучшими массогабаритными параметрами. Параметры сравнения – топливо (карбонитрид или диоксид урана), регулирование (стержни или барабаны), способ организации тракта теплоносителя и пр.

Физико-технические проблемы при оптимизации характеристик РЗ ТЭМ

- Жесткое ограничение на массу реакторной установки. Масса реактора и защиты не более 2.7 т.
- Отсутствие данных по радиационной стойкости и размещению защищаемых объектов.
- Отсутствие документированной информации по компоновкам и материальному наполнению практически всех подсистем ТЭМ за исключением реакторной установки.
- Доступная рабочая информация неполна и противоречива.

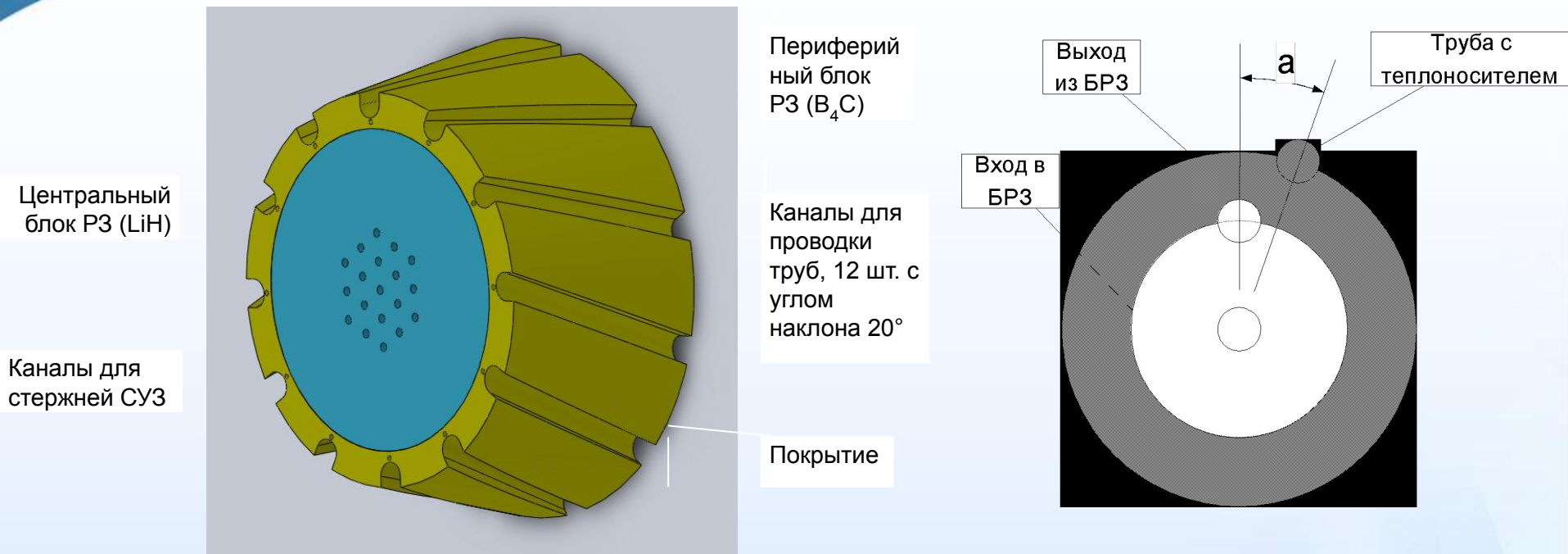
В 2010 году рассмотрены следующие варианты ТЭМ в различных сочетаниях

- Три компоновки реакторной установки (реактор + блок РЗ).
 - №1 Топливо-карбонитрид, проводка теплоносителя над боковым отражателем.
 - №2 Топливо-карбонитрид, проводка теплоносителя между аз и боковым отражателем.
 - №3 Топливо-диоксид, проводка теплоносителя над боковым отражателем.
- Две компоновки турбоотсека №1 и №2.
- Три компоновки ТЭМ.
 - С капельным холодильником-излучателем 2 варианта.
 - С панельным холодильником излучателем 1 вариант.

Выбран облик блока радиационной защиты, учитывающий специфику высокотемпературного газоохлаждаемого реактора

- Выбран оптимальный способ проводки труб с горячим теплоносителем через блок РЗ
- Исследован выход n, γ -излучения из блока радиационной защиты
- Выполнено профилирование локальной защиты блока приводов и турбинной системы

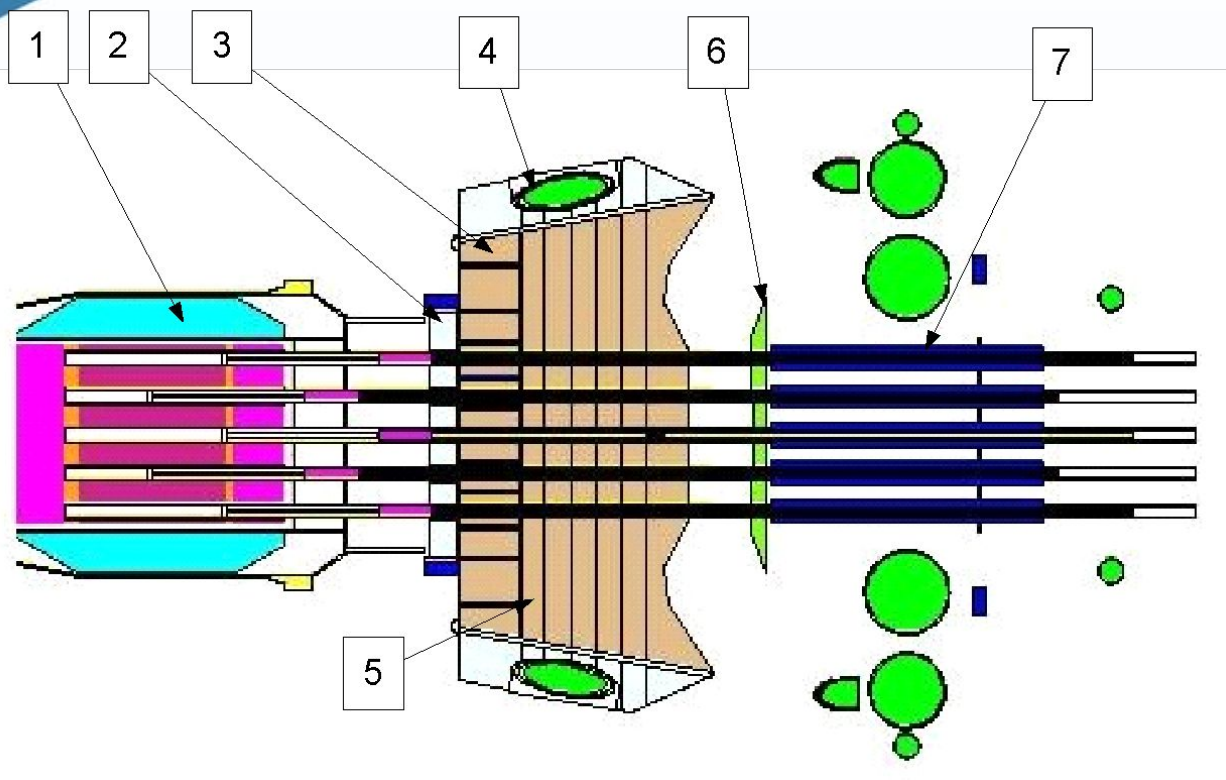
Найдены и обоснованы технические решения по проводке труб теплоносителей через РЗ



Рабочая температура гидрида лития $450...500^\circ\text{C}$

- 1 Горячие трубы укладываются в каньоны в теплоизолирующем материале (B_4C или Be).
- 2 Для уменьшения прострела излучения каналы повернуты относительно образующей на угол α .

Обоснованная конфигурация РЗ ТЭМ



- 1 – реактор;
- 2 – тепловой экран из B_4C ;
- 3 – охлаждаемый слой LiH ;
- 4 – труба с He-Xe в экране из B_4C ;
- 5 – неохлаждаемый слой LiH ;
- 6 – профилированный локальный экран из U^{238} ;
- 7 – привод ОР и СБ.

Радиационная защита обеспечивает:

	флюенс нейтронов	дозу гамма
на ПАО	$< 10^{12} \text{ н/см}^2$,	$< 10^6 \text{ рад}$
на приводах	$< 10^{16} \text{ н/см}^2$	$< 10^8 \text{ рад}$

Массогабаритные характеристики БРЗ

Вариант РУ	Толщина гидрида лития	Масса, кг				
		Гидрид лития	Карбид бора с трубами	Карбид бора – тепловая защита	Металло- конструкции в гидриде лития	Сумма
№ 1 КБНТ	65	422	473	30	79	1004
№2 КБНТ	70	333	383	25	70	811
№3 диоксид	60	532	428	68	118	1145

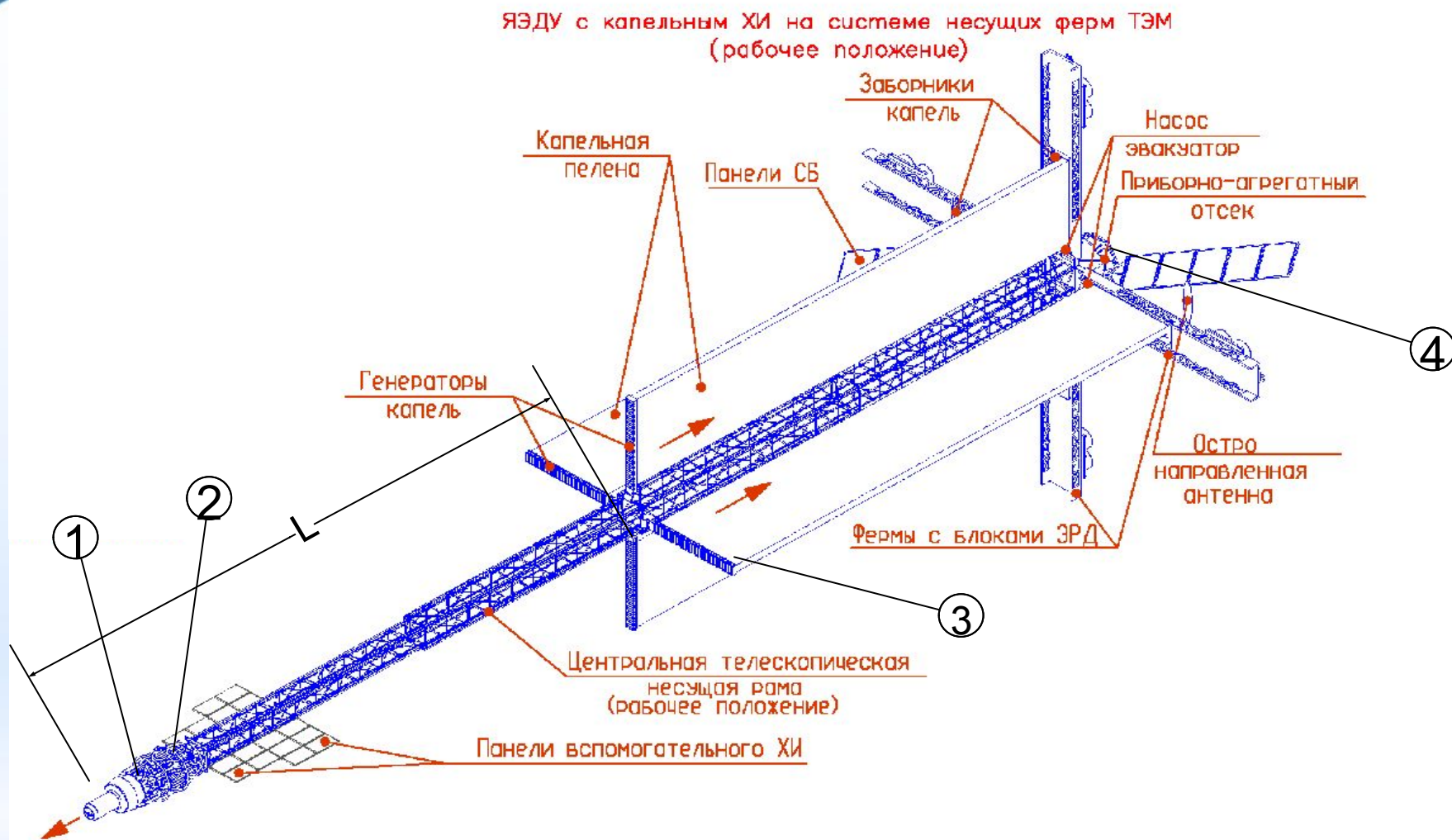
Из всех вариантов РУ выходит примерно одинаковое количество излучения.

Исследование закономерностей переноса реакторного излучения в пространстве ТЭМ

Рассмотрены ТЭМ с капельным и панельным холодильниками-излучателями.

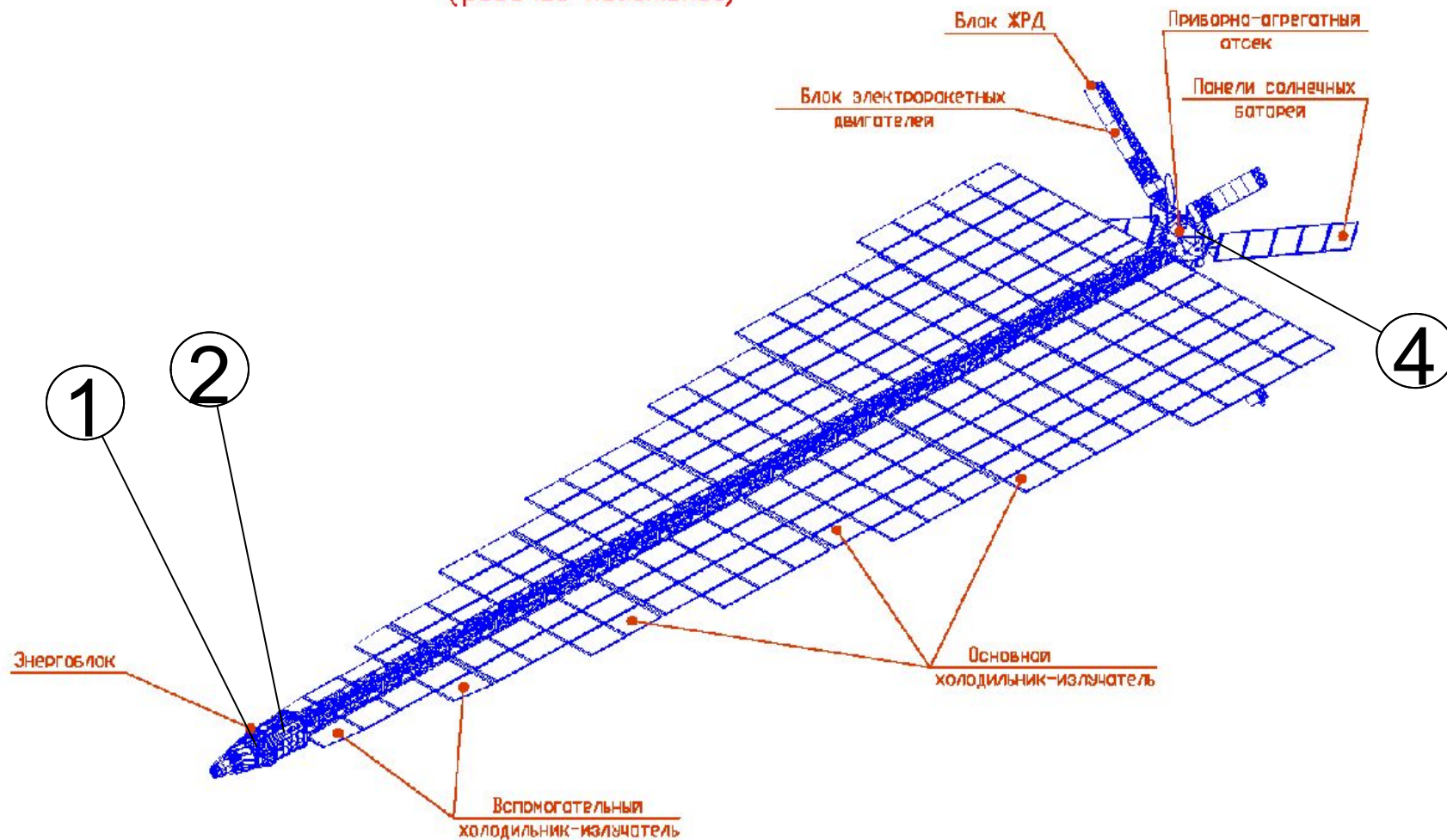
- Изучались закономерности ослабления и рассеяния излучения на подсистемах ТЭМ.
- Рассчитывались распределения функционалов излучения (флюенс нейтронов и поглощенная доза фотонов).
- Проводилась частичная оптимизация и прогнозировались массы БРЗ.

Компоновка ТЭМ с капельным холодильником-излучателем



Компоновка ТЭМ с панельным холодильником-излучателем

ЯЭДУ с панельным ХИ на системе несущих ферм ТЭМ
(рабочее положение)



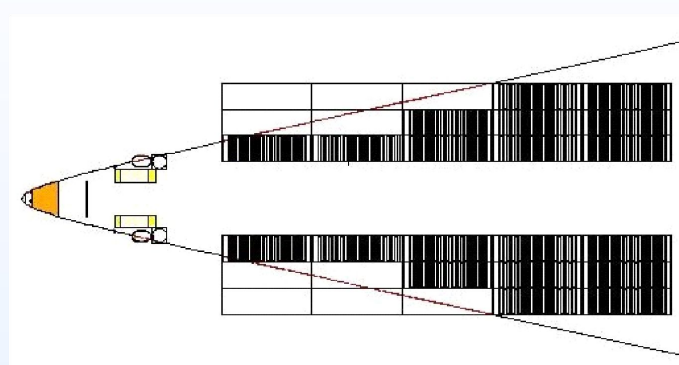
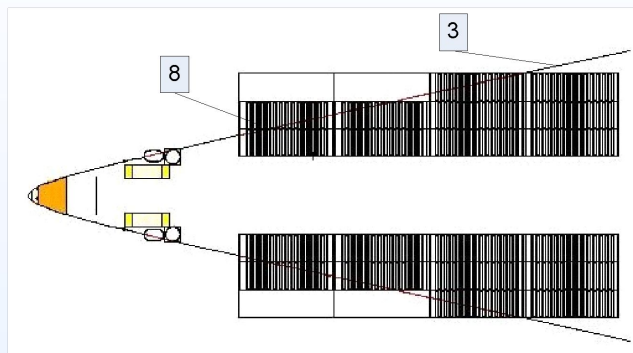
Для всех подсистем ТЭМ разработаны расчетные трехмерные геометрические модели, в том числе

- Турбинный преобразователь: турбогенератор-компрессор, теплообменник-рекуператор, промежуточный теплообменник, баллоны с рабочим телом, баллоны измерения давления, элементы несущей фермы.
- Вспомогательный и панельный ХИ: коллекторы, трубы, излучающая поверхность.
- Капельный ХИ: генератор и приемник капель, капельная пелена.
- ЭРДУ: ЭРД (ИД-60) на вспомогательной ферме.
- Панели солнечных батарей.
- Несущая продольная ферма ТЭМ.

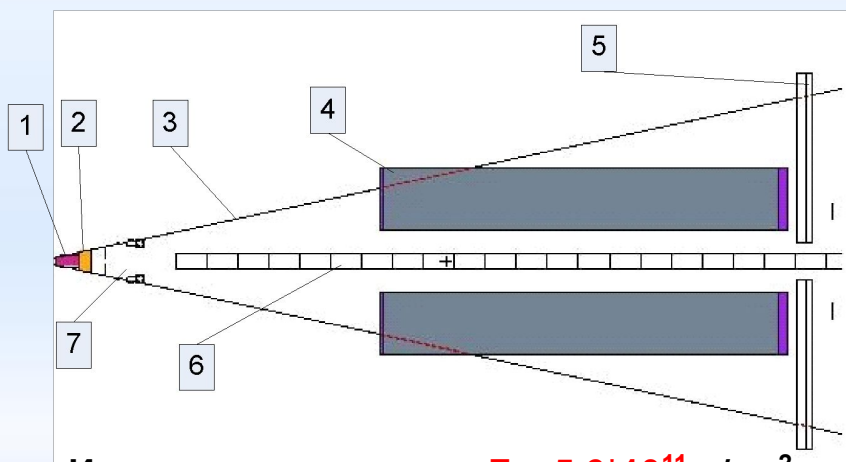
Пример перекомпоновки ТЭМ с капельным ХИ

Перекомпоновка вспомогательного и отодвижение капельного ХИ снижает вклад рассеянного излучения в 7 раз

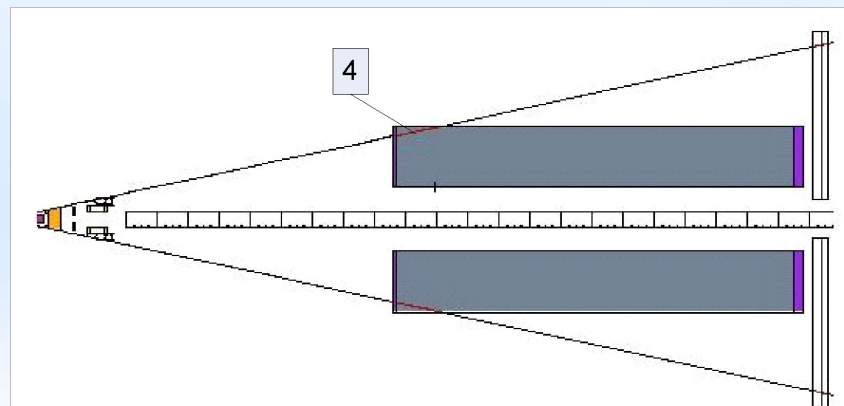
Вспомогательный ХИ



Капельный ХИ



Исходная компоновка $F_s = 5.6 \cdot 10^{11}$ н/см²



КХИ сдвинут на 2.4м $F_s = 8.0 \cdot 10^{10}$ н/см²

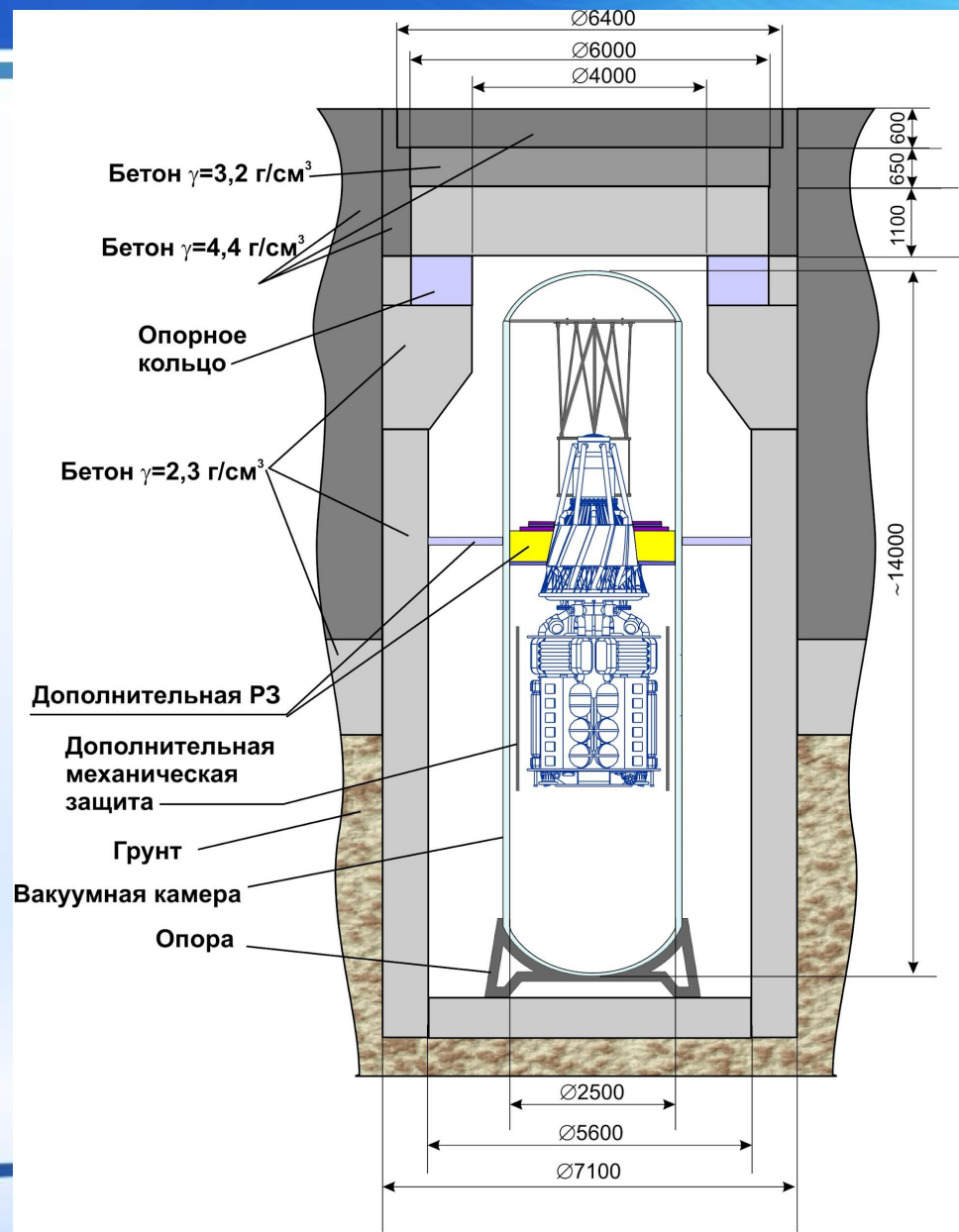
Текущие достижения школы ГНЦ РФ-ФЭИ по РЗ в мегапроекте

- Проведенные исследования закономерностей переноса реакторного излучения в пространстве ТЭМ дают информацию для дальнейших работ по выбору оптимального облика ТЭМ и компоновки электронного оборудования и организации локальных защит в ПАО.
- При проведении расчетно-конструкторской оптимизации компоновки РУ, БРЗ, ЯЭДУ и ТЭМ в целом возможно достижение массы БРЗ в 700-800 кг.
- При жестких ограничениях на радиационную стойкость изоляции приводов ОР и изоляции турбогенератора (108 рад) необходимо введение локального экрана (обедненный уран, вольфрам) массой 150-200 кг.
- В целом можно прогнозировать, что при проведении расчетно-конструкторской оптимизации масса радиационной защиты не превысит 1 т, а масса РУ уложится в отведенный лимит 2.7 т.

Направления дальнейших исследований системы радиационной защиты

- Составить и согласовать базу исходных данных по компоновкам подсистем, их материальному наполнению, радиационной стойкости и местоположению чувствительных объектов. Пополнять этот набор по мере изменения с обязательной информацией участников работ по радиационной защите.
- Разработать программу облучательных экспериментов для восполнения данных по радиационной стойкости элементов ЯЭДУ и ТЭМ.
- Продолжить расчеты и оптимизацию системы радиационной защиты в части компоновки холодильников-излучателей, турбинного отсека, профилирования блока РЗ и локальных экранов.

Энергоблок в вакуумной камере, размещенной в бетонном колодце испытательного комплекса



Основные задачи радиационной защиты и безопасности при размещении энергоустановки в колодце испытательного комплекса зд.224А

- Обеспечить при работе установки на номинальных параметрах $P_{\text{ТЕПЛ}} = 3,5 \text{ МВт}$, $T_{\text{КАМП}} = 3$ года допустимые уровни флюенса нейтронов $\Phi_n \leq 10^{16} \text{ н/см}^2$, $D_\gamma \leq 10^8 \text{ рад}$.
- Обеспечить при работе установки на номинальном режиме допустимые уровни мощности дозы для персонала на бетонной крышке стенда $D \leq 0,032 \text{ мкР/с}$. Обеспечить заданный уровень мощности дозы в смежных помещениях испытательного комплекса.
- Обеспечить допустимый уровень флюенса быстрых нейтронов на бетонных стенках колодца $\Phi_n \leq 10^{19} \text{ н/см}^2$.
- Обеспечить допустимый уровень температуры в бетонных стенках испытательного комплекса.
- Обеспечить выход газообразных радионуклидов в воздушном пространстве стенда ($_{18}\text{Ar}^{41}$, $_6\text{C}^{14}$, $_1\text{H}^3$ - тритий), не превышающий нормативные требования.
- Рассчитать наведенную активность различных узлов стенда радиоактивных элементов и оценить радиационную обстановку на стенде после завершения

Состояние нормативной базы по обеспечению ядерной и радиационной безопасности

Требуется разработка отсутствующих для КЯЭУ обязательных нормативных документов (НД)

1. Правила ядерной безопасности(ПБЯ);
2. Общие положения обеспечения безопасности (ОПБ);
3. Санитарные Правила (СП);

* * *

Выпуск тома обеспечения безопасности (ТОБ)

Статус разрабатываемых НД

- В связи с тем, что надзор за проведением работ осуществляется УГН ЯРБ МО, решено предполагаемые к разработке документы отнести к разряду межведомственных с возможным поднятием их статуса до федерального.

Рабочая группа определила исполнителей

- ОПБ и ТОБ – НИЦ «Курчатовский институт».
- ПБЯ – ГНЦ РФ-ФЭИ с участием НИЦ «Курчатовский институт».
- СП – ФГУП «Красная Звезда».

Текущие представления о статусе НД

До разработки соответствующих ПБЯ и ОПБ возможно ориентироваться на федеральные нормы и правила, в том числе на НП-033-01 (Общие положения обеспечения безопасности исследовательских ядерных установок) и НП-009-04 (Правила ядерной безопасности исследовательских ядерных установок).

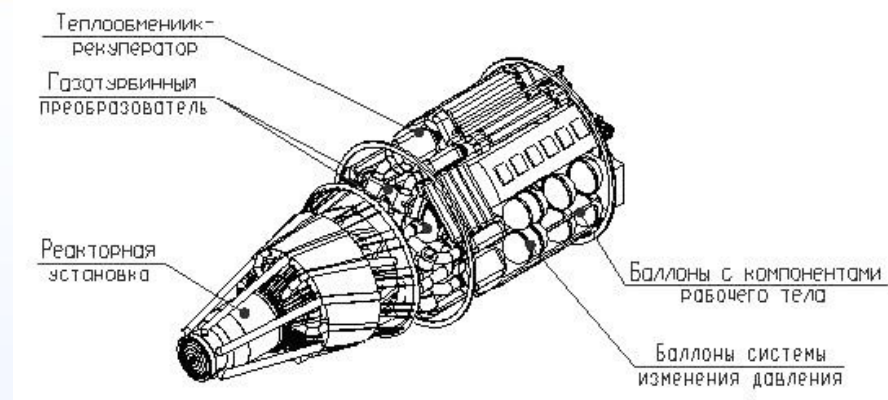
Создание испытательного комплекса для проведения наземных ресурсных испытаний энергоблока ЯЭДУ мегаваттного класса поручено ГНЦ РФ-ФЭИ

**Организационно-техническое
формирование кооперации исполнителей
разработки, изготовления, подготовки
наземных испытаний, проведения
ресурсных испытаний и поставки изделий
заказчику**

Особенности ИД и ТТ для наземного испытательного комплекса (ОАО «НИКИЭТ»)

ИД:

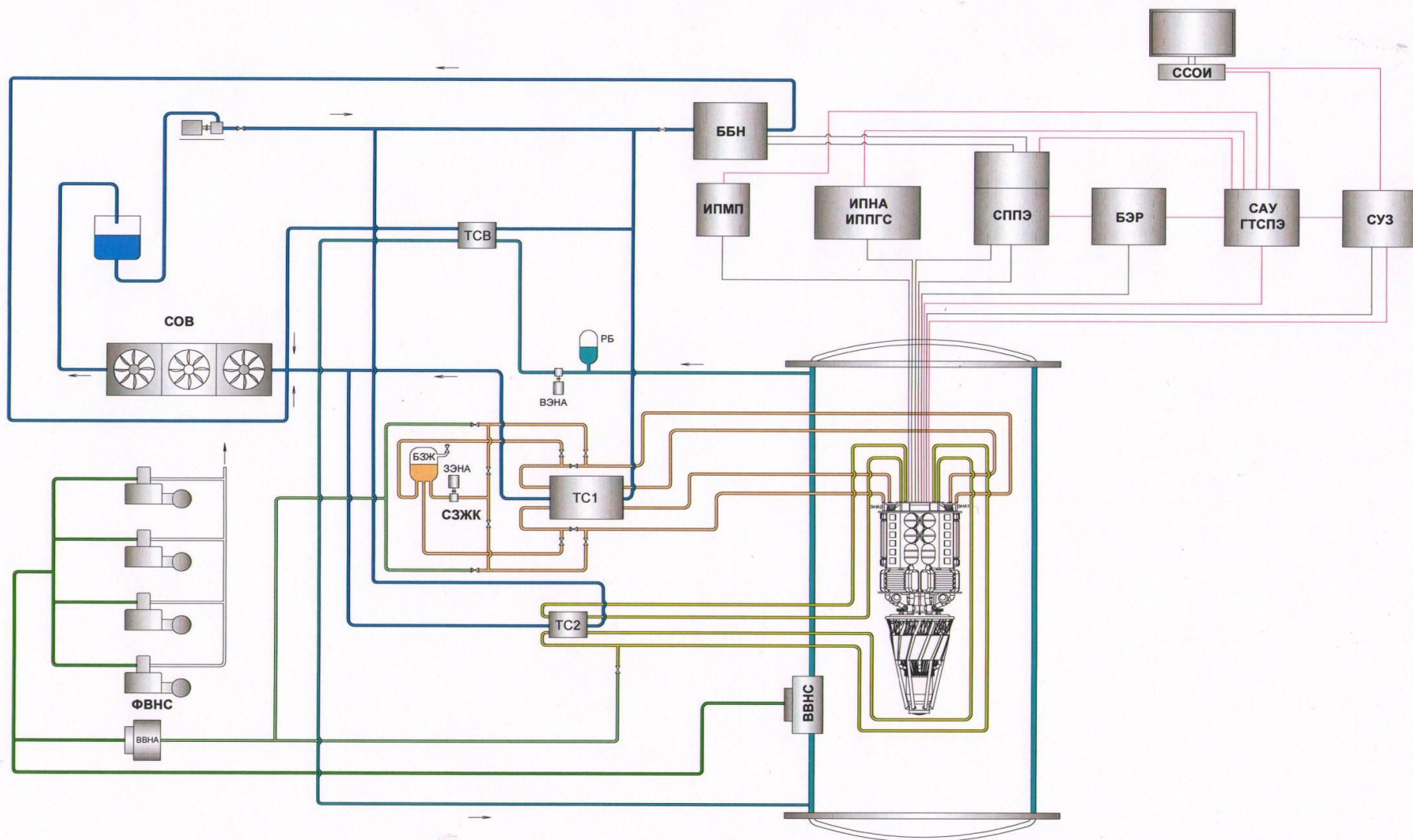
- Тепловая мощность РУ – до 3500 кВт
- Электрическая мощность ЭБ – до 1000 кВт
- Теплоноситель – гелий-ксеноновая смесь
- Температура газа перед турбиной – до 1500 К
- Рабочее давление газа – до 40 атм.
- Продолжительность наземных испытаний ЭБ – до 90000 час.



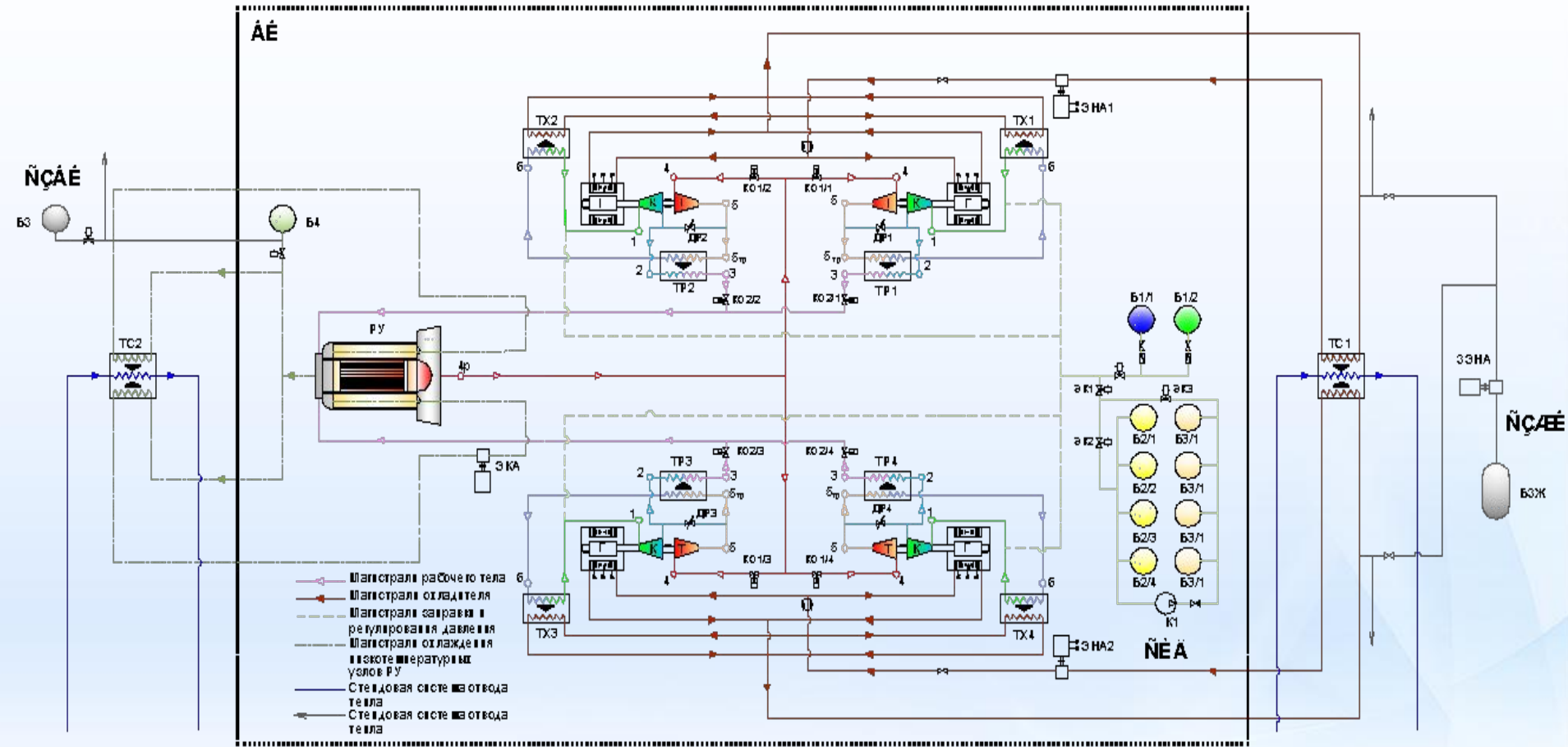
ТТ:

- Давление остаточного газа в ВК – не выше $1 \cdot 10^{-5}$ Торр
- Класс чистоты зала сборки ЭБ – 8
- Размещение теплообменников ТС1 и ТС2 – вне ВК
- Присоединение ТС 1 и ТС2 к магистралям ЭБ – после установки ЭБ в ВК
- Система обратного водоснабжения – сброс тепловой мощности до 4 МВт

Принципиальная схема проведения наземных испытаний ЭБ (ИЦ им. М.В. Келдыша)



Принципиальная пневмогидравлическая схема ЭБ для наземной отработки при проведении наземных испытаний (ИЦ им. М.В. Келдыша)



Особые требования к системам испытательного комплекса для объекта испытаний мегаваттного класса (ФГУП «Красная Звезда»)

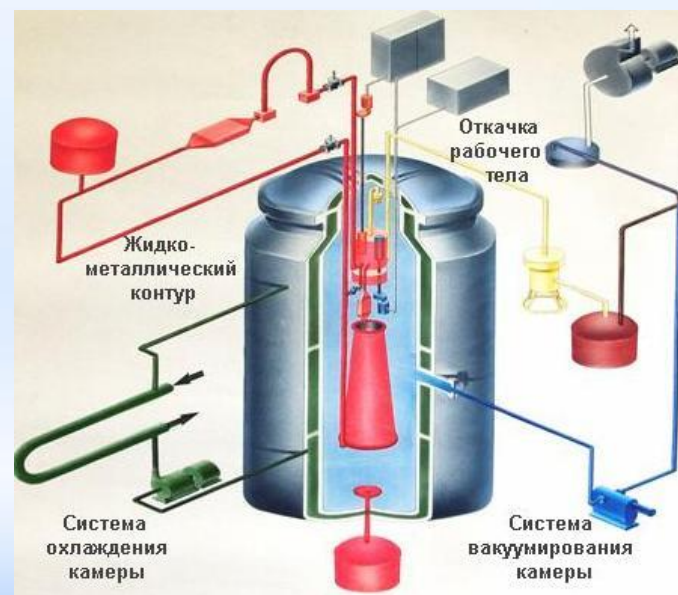
Наименование системы	Краткая характеристика системы
Система вакуумирования вакуумной камеры (ВК)	При использовании в конструкции объекта испытаний высокотемпературных и композиционных материалов давление в ВК не должно превышать 10^{-5} мм.рт.ст: - корпус ВК – титановый, вакуум – безмасляный. Должна быть предусмотрена система локализации продуктов утечки рабочего тела капельного ХИ
Система теплоотвода	С учетом соответствующего запаса полная тепловая мощность отводимая от объекта испытаний (от теплообменного устройства) и стенок ВК должна составлять не менее 5 МВт
Газовая система высокого давления	Система должна обеспечивать подготовку смеси гелия и ксенона заданного состава и заправку контура объекта испытаний при давлении до 40 атм
Штатная и аварийная системы сброса давления из контура объекта испытаний	Должен предусматриваться аварийный сброс давления из контура (давление до 40 атм) для предотвращения недопустимого разгона ТКГ при отказах в имитаторе эл. нагрузки
Система аварийного расхолаживания реактора при авариях в газовом контуре объекта испытаний	Парирование заброса температуры топлива при прекращении прокачки теплоносителя или при разгерметизации его контура. Уровень остаточного тепловыделения в реакторе до 50 кВт

Особые требования к системам испытательного комплекса для объекта испытаний мегаваттного класса (ФГУП «Красная Звезда») - продолжение

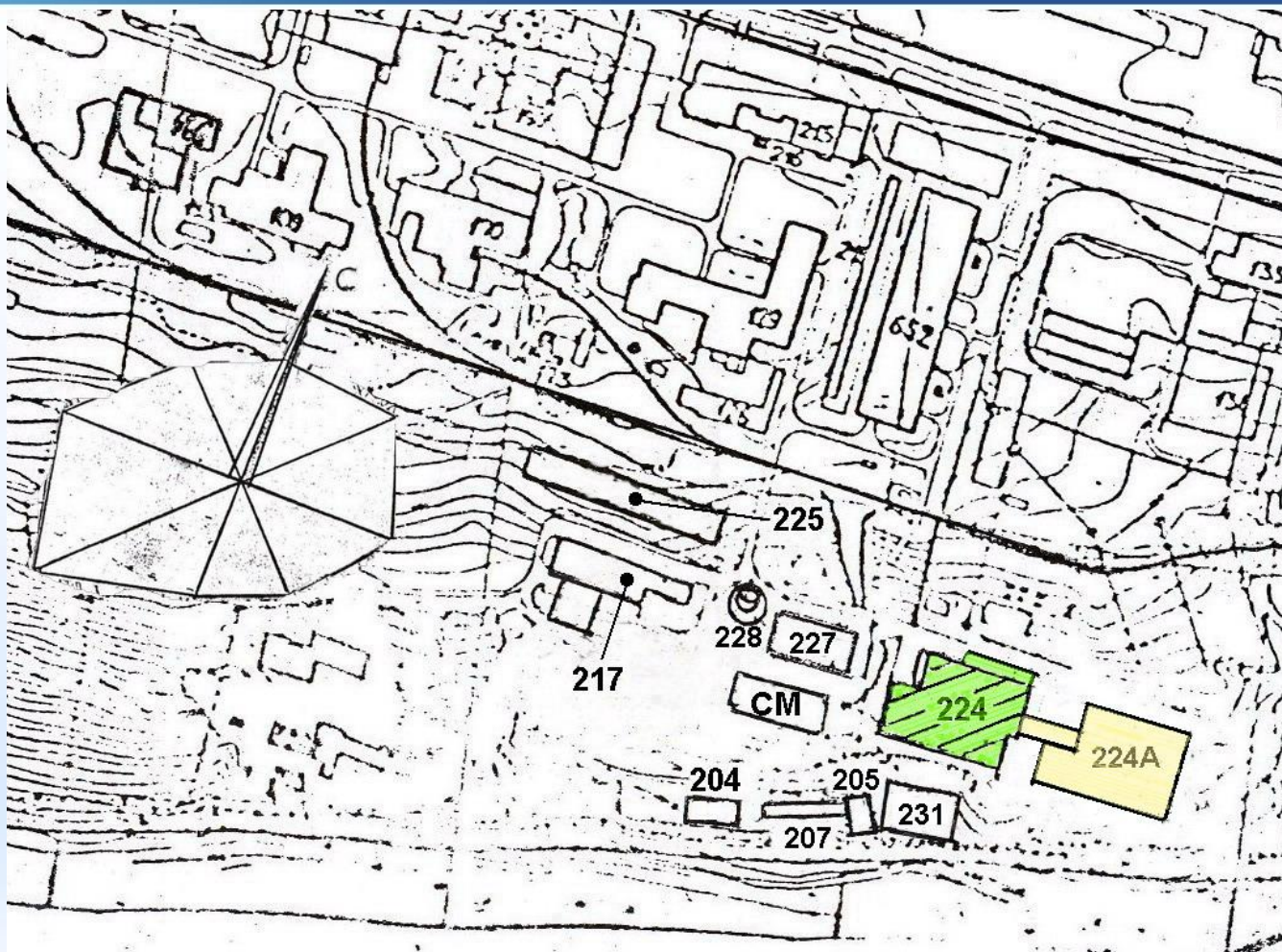
Наименование системы	Краткая характеристика системы
Пусковая система электроснабжения	Требуемая для пуска каждого генератора мощность (на преодоление пускового момента, затрат на трение и преодоление сил инерции) составляет около 50 кВт. При этом используется пусковой преобразователь мощностью до 50 кВт с регулируемым напряжением на выходе по амплитуде и частоте. Общее энергопотребление объекта испытаний при пуске 70...80 кВт, включая потребление регуляторов возбуждения (15 кВт) и агрегатов СТО
Имитатор электрической нагрузки мегаваттного уровня	Отводимая электрическая мощность около 1 МВт с имитацией циклограммы энергопотребления в соответствии с ТЗ
Система безопасности подготовки и проведения испытаний объекта мегаваттного класса	Повышенные требования определяются 5-кратным превышением по загрузке урана-235 (около 200 кг) по отношению к существующим проектам и наличием высокого давления в реакторе (до 40 атм)
Биологическая защита реактора и технологического оборудования	Защита должна быть рассчитана на продолжительную (более года) работу реактора на мощности до 5 МВт
Грузотранспортные устройства	Масса объекта испытаний в составе испытываемого комплекса (включая крышку ВК) составит не менее 10 тонн

Испытательный комплекс термоэмиссионных ЯЭУ (здание 224)

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

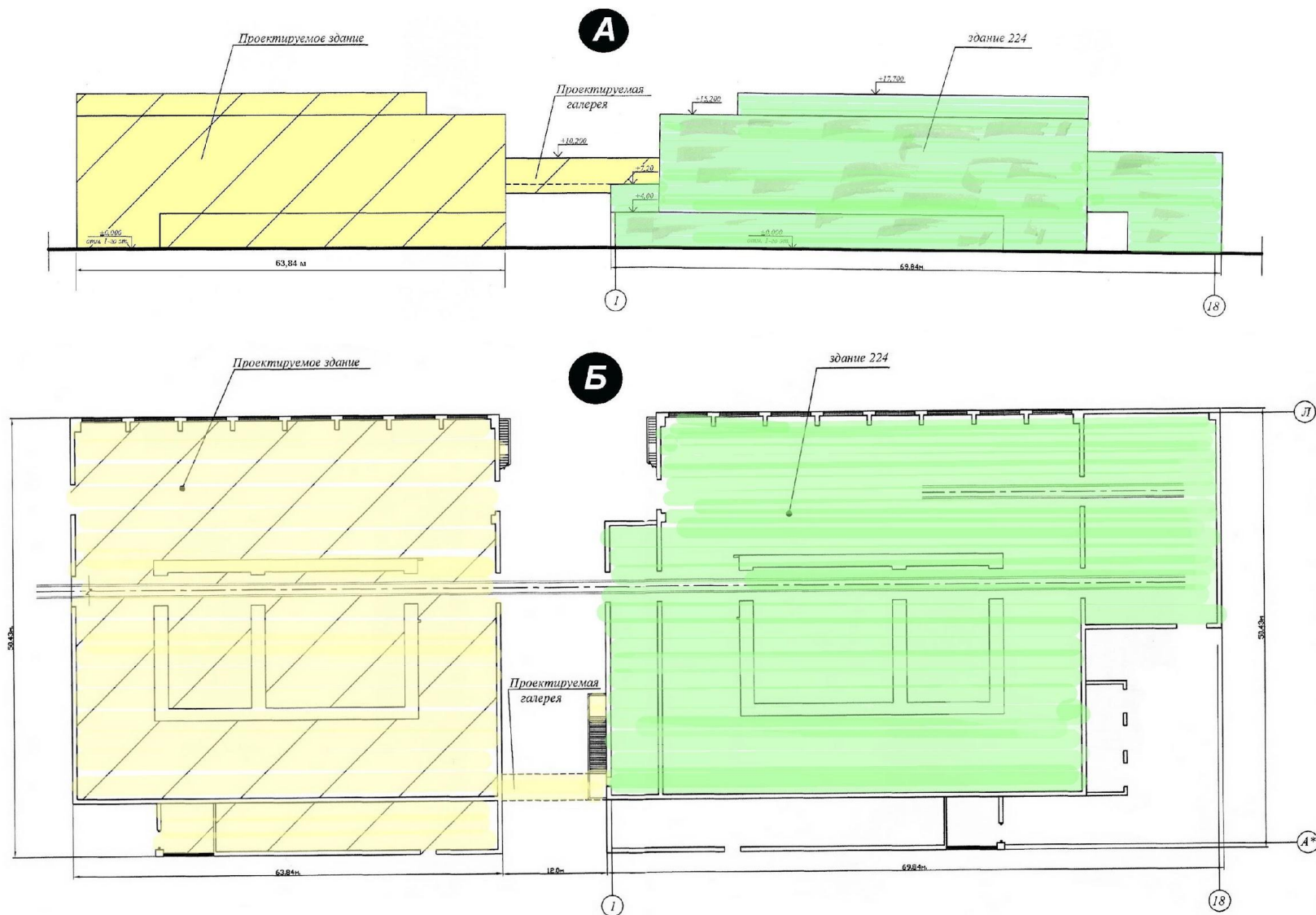


Фрагмент ситуационного плана размещения комплекса зданий, связанных со зданием 224

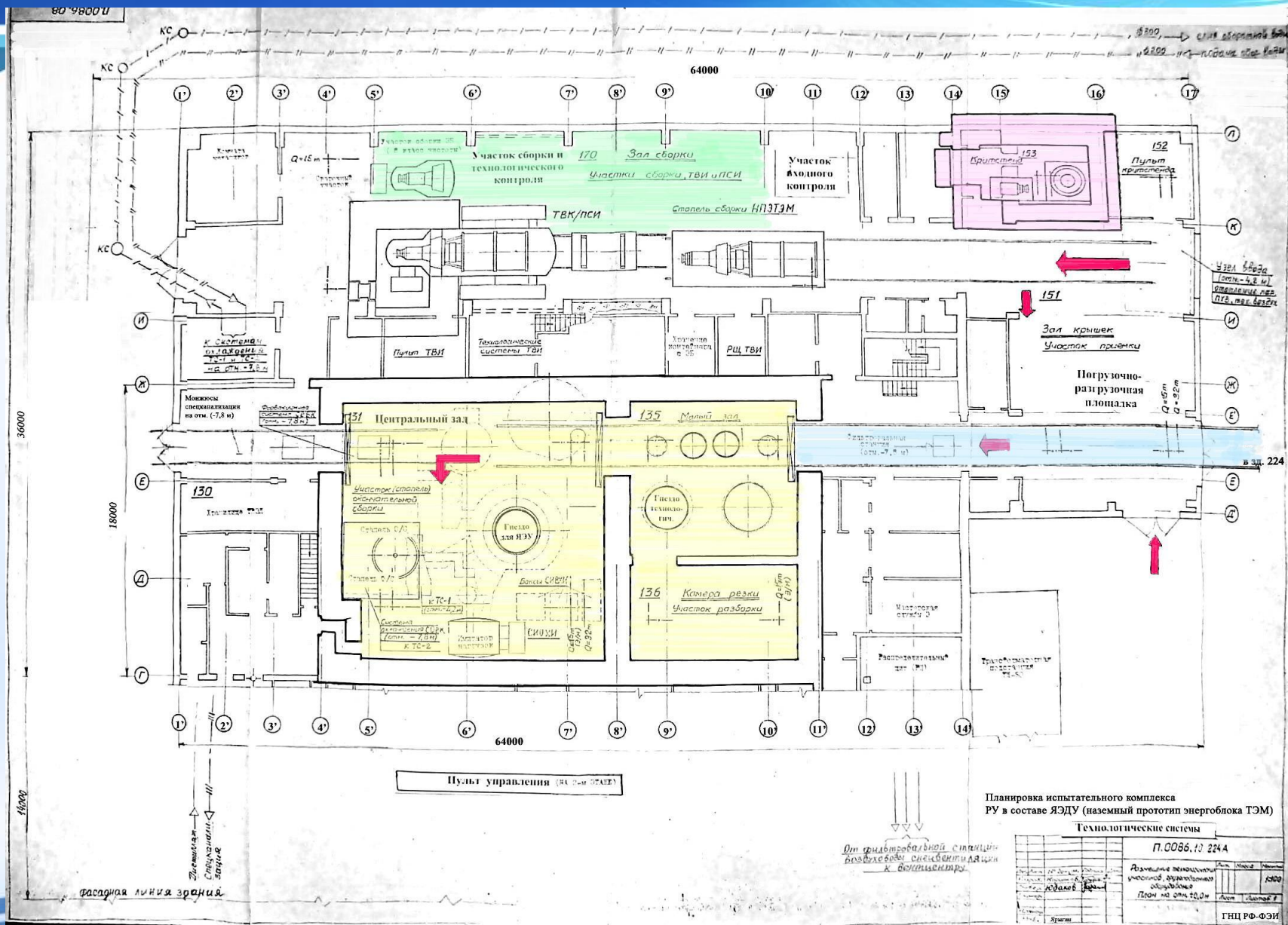


зд. 204 – градирня; зд. 205 – насосная (оборотное водоснабжение); зд. 207 – отстойник;
зд. 217 – нейтронно-физическая лаборатория; зд. 227 – вентиляторная; зд. 228 – труба.

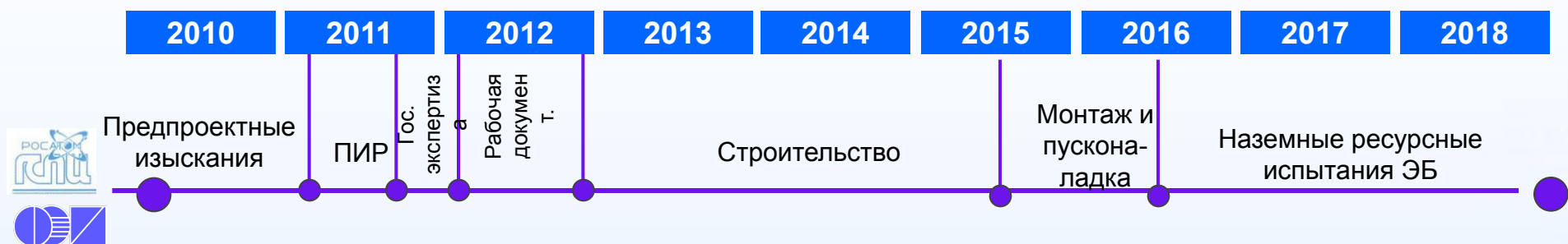
Схема размещения зданий 224 и 224а в технологическом интерфейсе единого ИК



Планировка ИК здания 224А для наземных испытаний энергоблока ТЭМ



План-график создания ИК для наземных ресурсных испытаний энергоблока ЯЭДУ мегаваттного класса



?... Уже наметилось отставание величиной ~3 месяца от план-графика ОАО «НИКИЭТ»...?

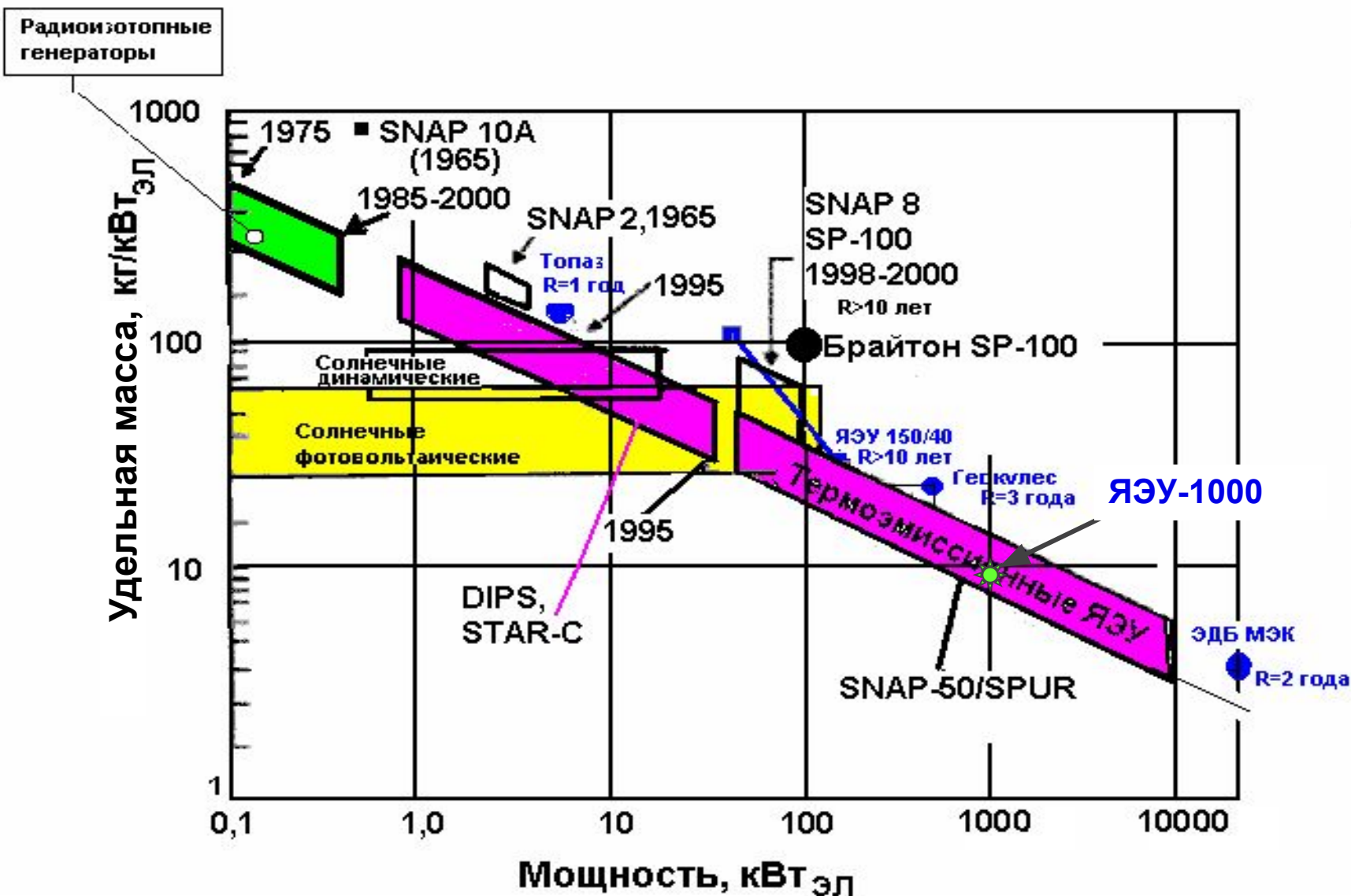
Текущее состояние работ по созданию ИК

- Проведённые технико-экономические исследования по анализу возможностей обеспечения проведения в здании 224 ГНЦ РФ-ФЭИ испытаний энергоблока ЯЭДУ мегаваттного класса проводятся и показывают, что затраты на строительство пристройки к зд. 224 (здания 224А) не превышают соответствующие затраты на реконструкцию собственно здания 224.
- Разрабатываются ТЗ на наземный объект испытаний, ТЗ на создание ИК, паспорт инвестиционного проекта, задание на проектирование реконструкции зд. 224 в части зд. 224А и др. НТД.

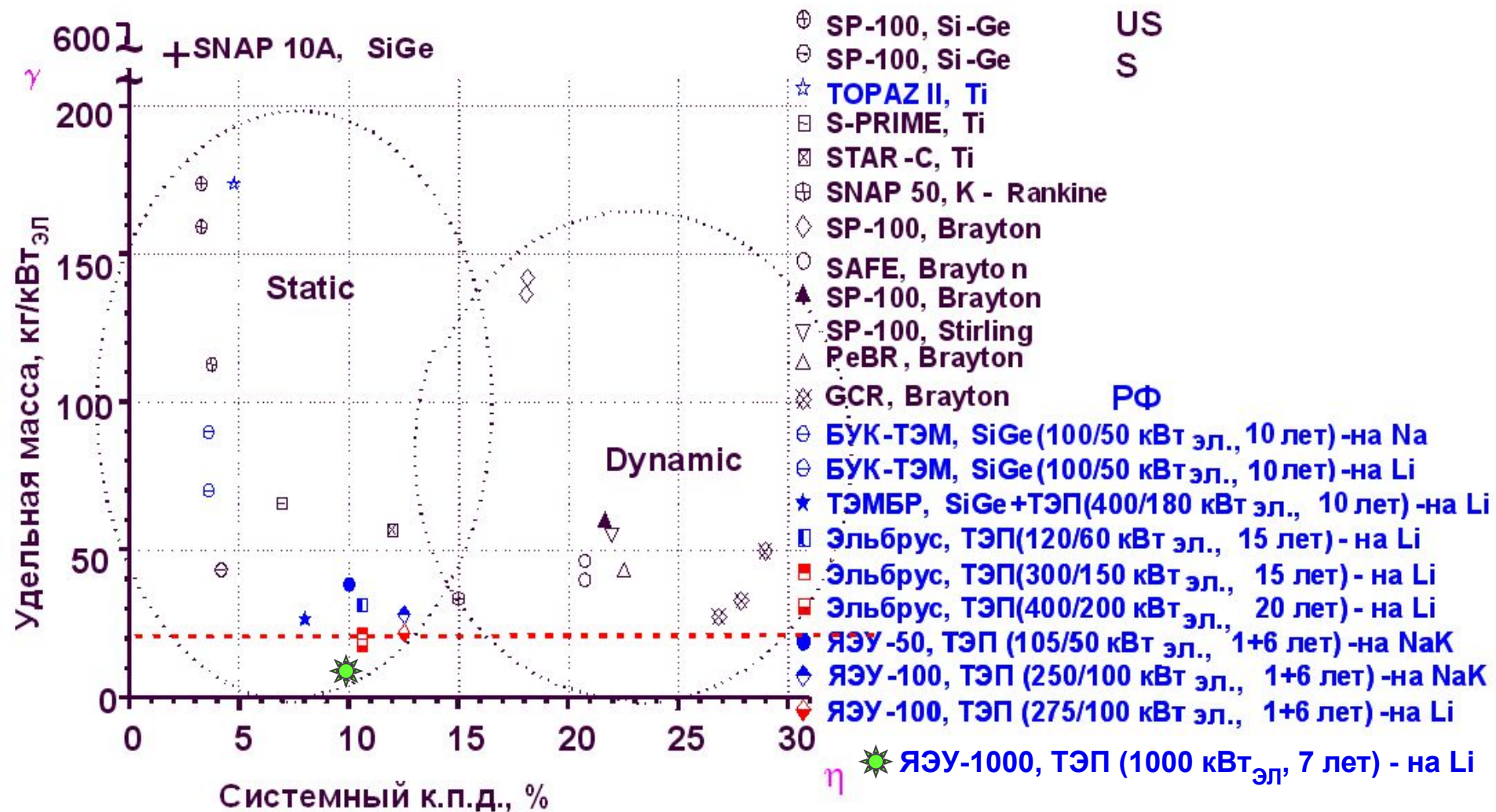
Что даёт ГНЦ РФ-ФЭИ участие в мегапроекте?

- Обновление высокотехнологичной экспериментальной и уникальной испытательной базы с современным оборудованием. Возможность стать международным центром по космической ядерной энергетике.
- Создание новых рабочих мест для высококвалифицированных специалистов и рабочих. Увеличение бюджетного финансирования.
- Сохранение международного приоритета в области космической ядерной энергетике.
- Подготовка кадров через высшие образовательные учреждения города для выполнения проекта в целом.
- Развитие научной школы по космической ядерной энергетике.

Характеристики ЯЭУ с различными схемами преобразования энергии



Сравнение системных критериев



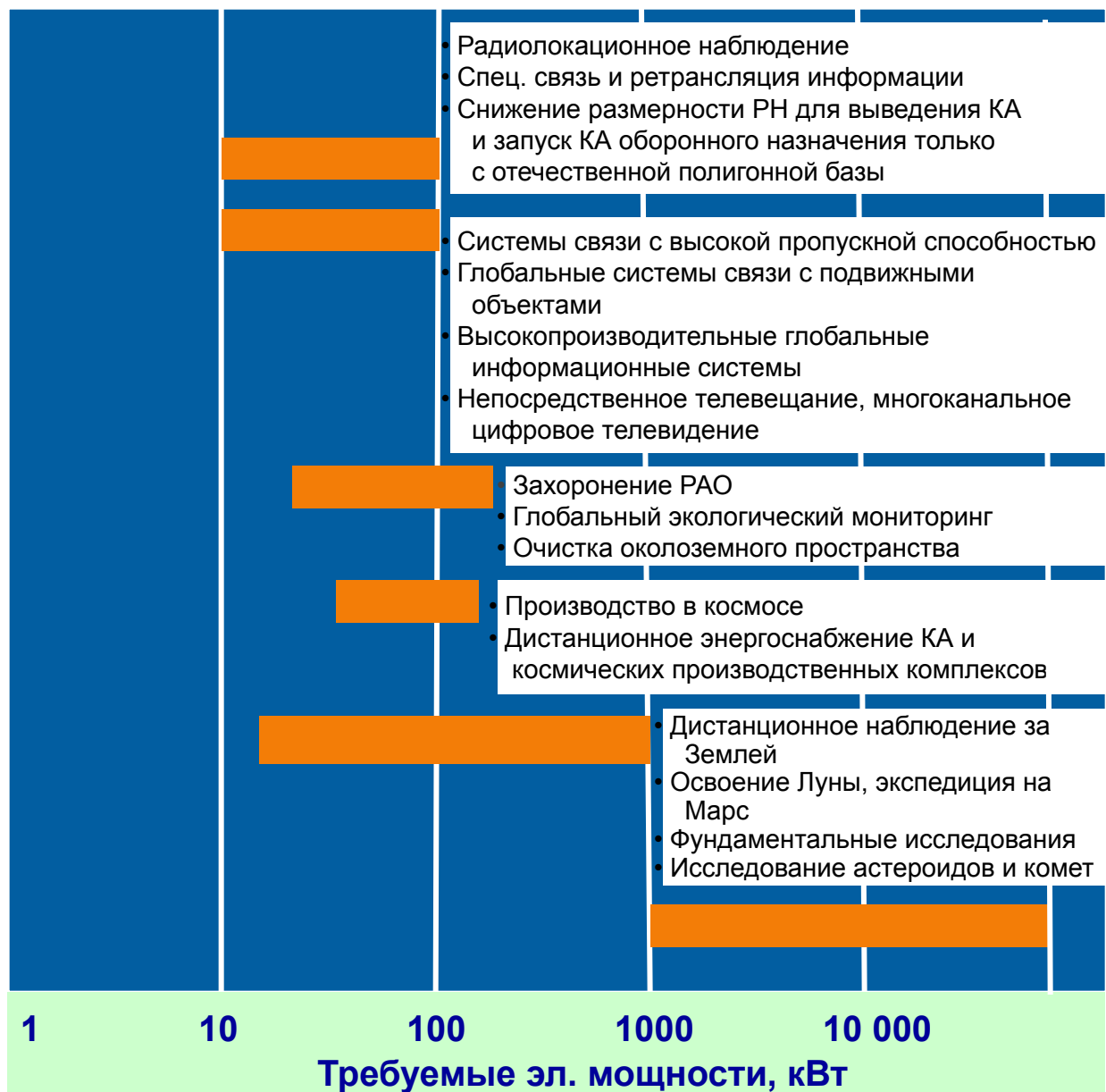
Основные задачи использования КА с ЯЭУ

Космические задачи ближайшей перспективы

- Задачи обороны
- Связь и телевидение

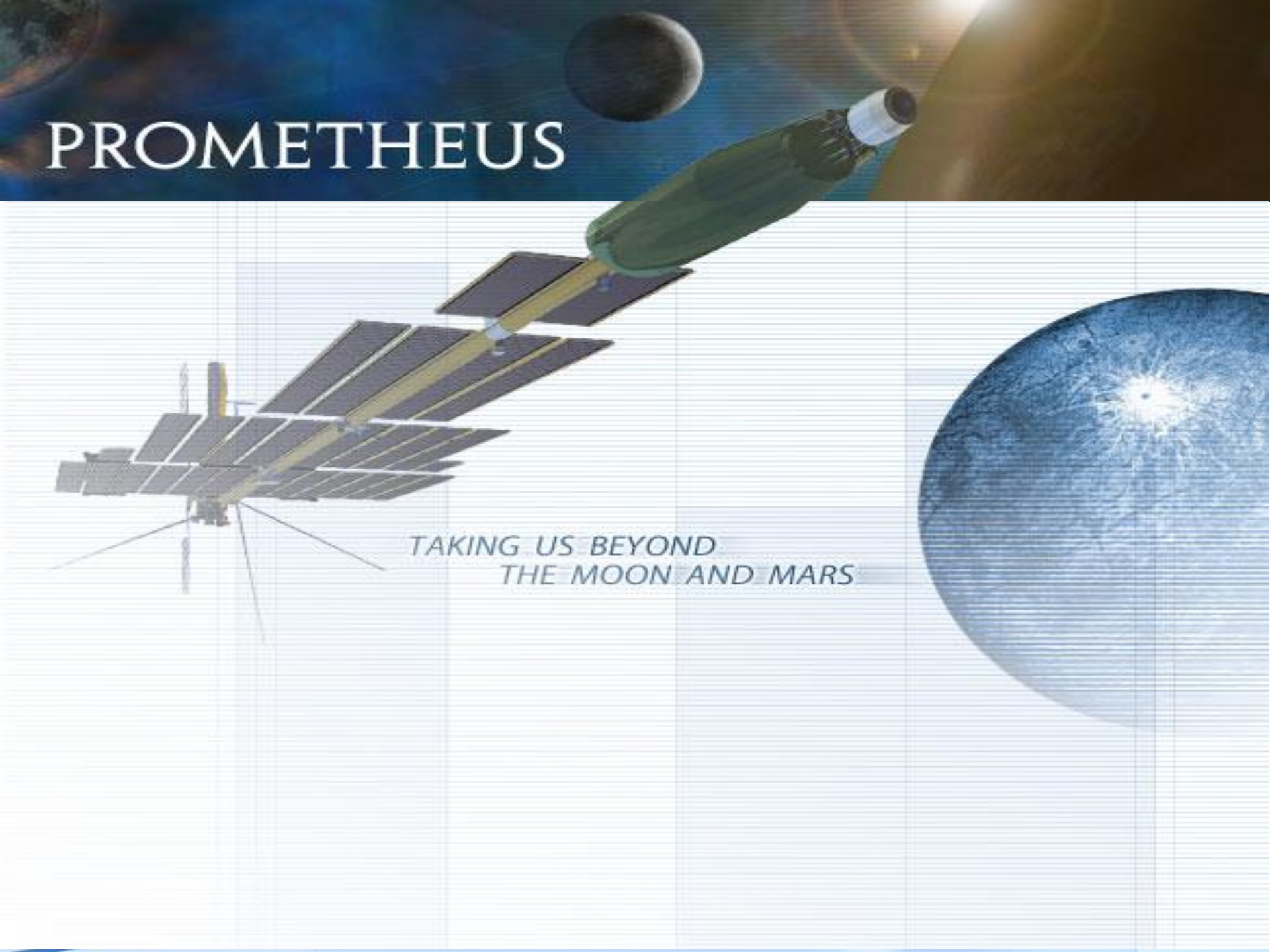
Космические задачи отдаленной перспективы

- Задачи экологии
- Энергетика и производство в космосе
- Научные задачи
- Глобальные задачи
 - Энергоснабжение Земли из космоса
 - Освещение локальных участков Земли
 - Добыча сырья из астероидов
 - Разрушение ядер зарождающихся тайфунов
 - Вывод в космос опасных производств



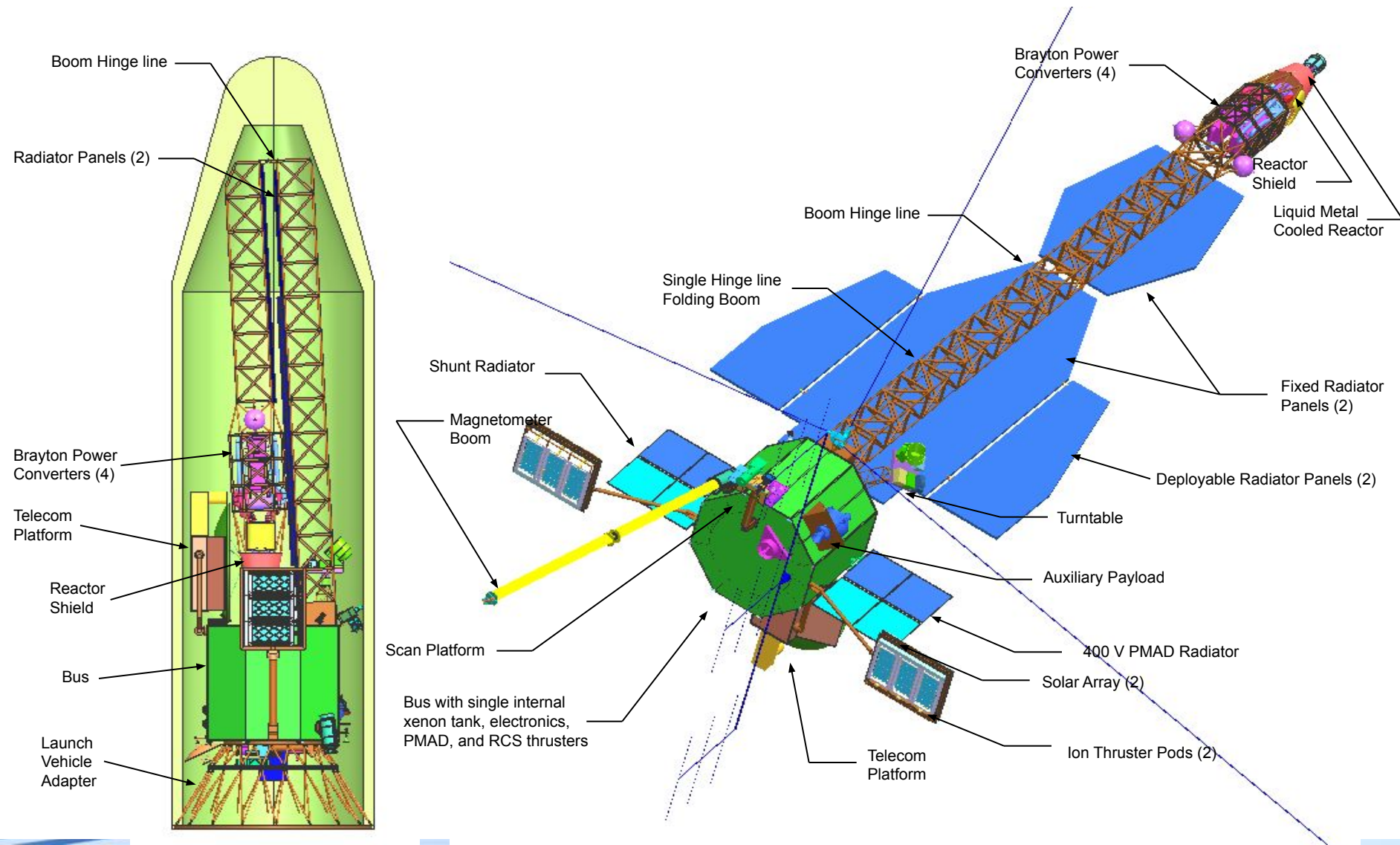
PROMETHEUS

*TAKING US BEYOND
THE MOON AND MARS*





PROMETHEUS





Extensive hardware development history

- BRU 40,000+ Hrs
- Mini-BRU 2,000+ Hrs



Space Solar Power Satellite



Bi-modal Nuclear Thermal Rocket



Mars Surface Power



Nuclear Electric Propulsion Vehicle

- Brayton systems are being considered for a wide range of future mission applications**
- Earth Orbit, Moon, Mars, Deep Space, Military
 - Solar, Reactor, Isotope
 - Kilowatts to Megawatts

Текущие данные американских специалистов по испытанию 2-х ТКГ с циклом Брайтона

NASA/TM—2009-215511

AIAA-2008-5735



Experimental and Analytical Performance of a Dual Brayton Power Conversion System

*David S. Hervol and Maxwell Briggs
Analex Corporation, Brook Park, Ohio*

*A. Karl Owen
U.S. Army Research Laboratory, Glenn Research Center, Cleveland, Ohio*

*Thomas A. Lavelle
Glenn Research Center, Cleveland, Ohio*

Данные о запуске ТКГ в режим генерирования на стенде NASA

Стенд NASA

Результаты экспериментов:

Минимальная температура на входе турбины, при которой обеспечивается генерирование энергии – 600K.

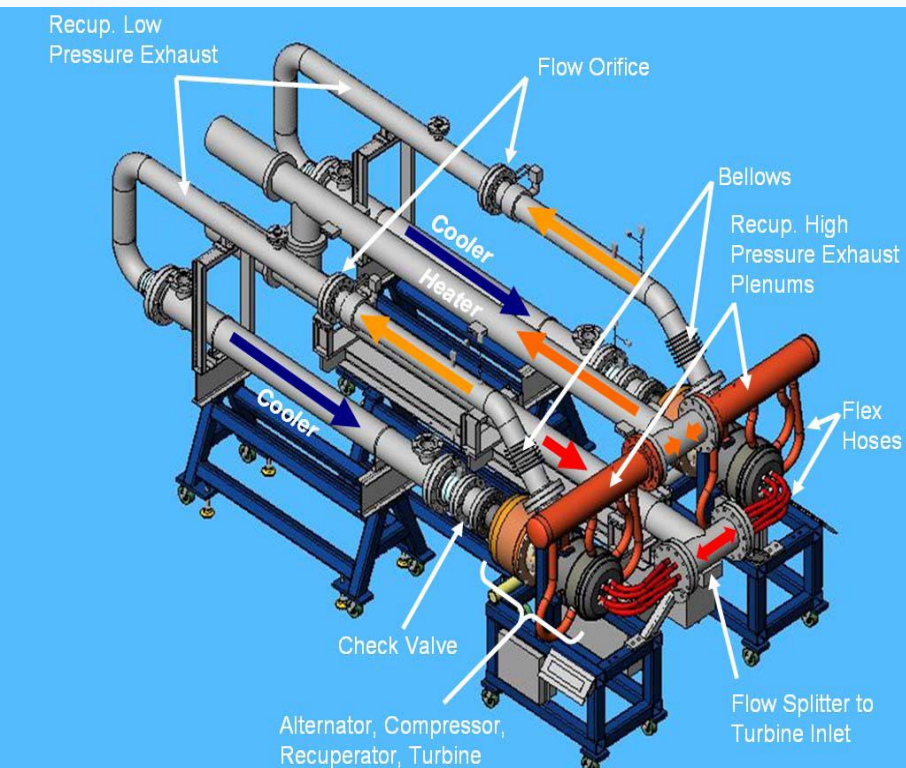
Минимальная скорость вращения, на которой при 600K генерируется энергия – 34000 об/мин.

Минимальные затраты энергии на запуск – 0,4 КВтч (при одновременном запуске двух преобразователей на постоянной скорости вращения 34000 об/мин).

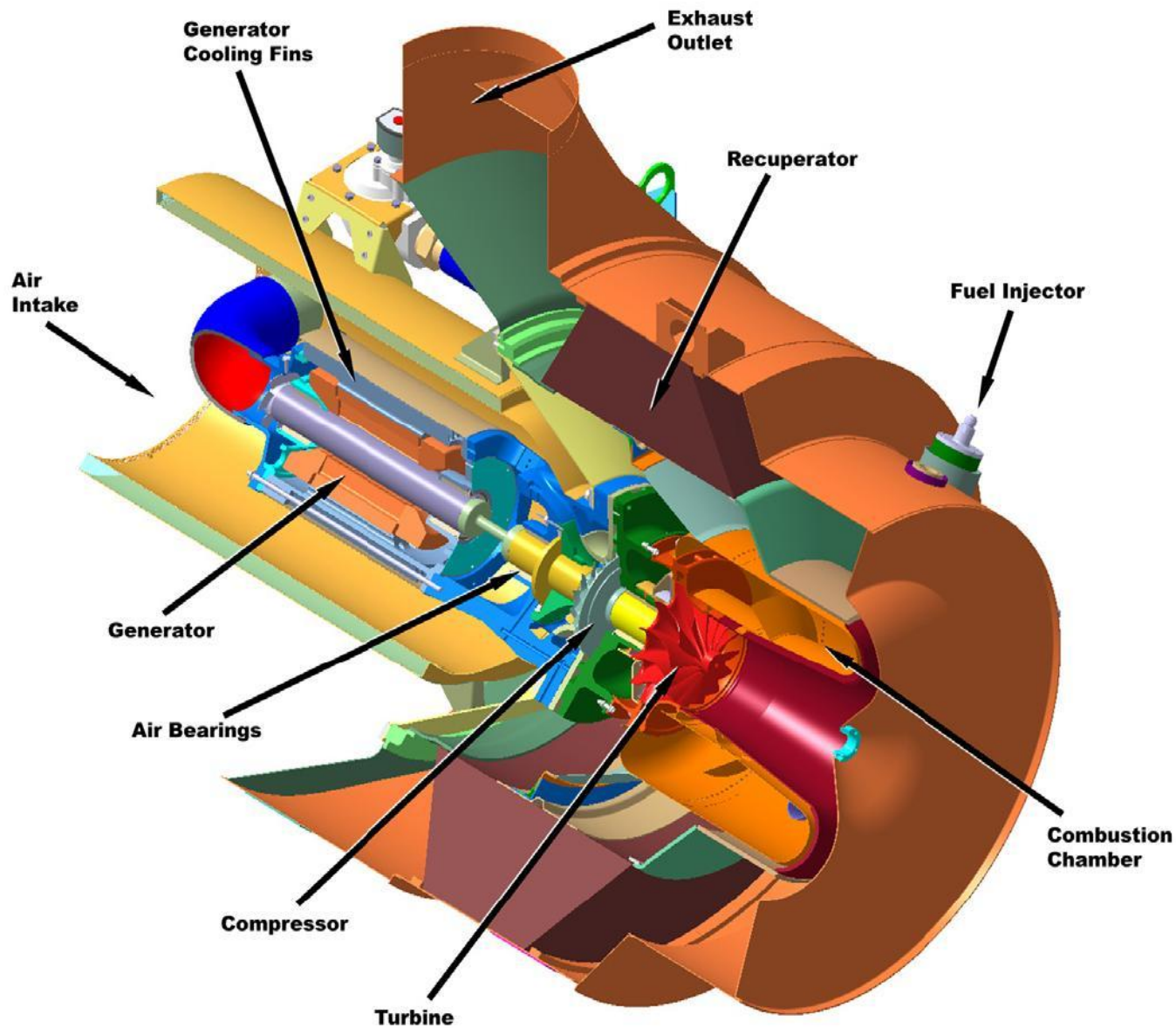
Время запуска – 18 мин (до момента начала генерирования электроэнергии).

Внешний вид и характеристики ТКГ на стенде NASA

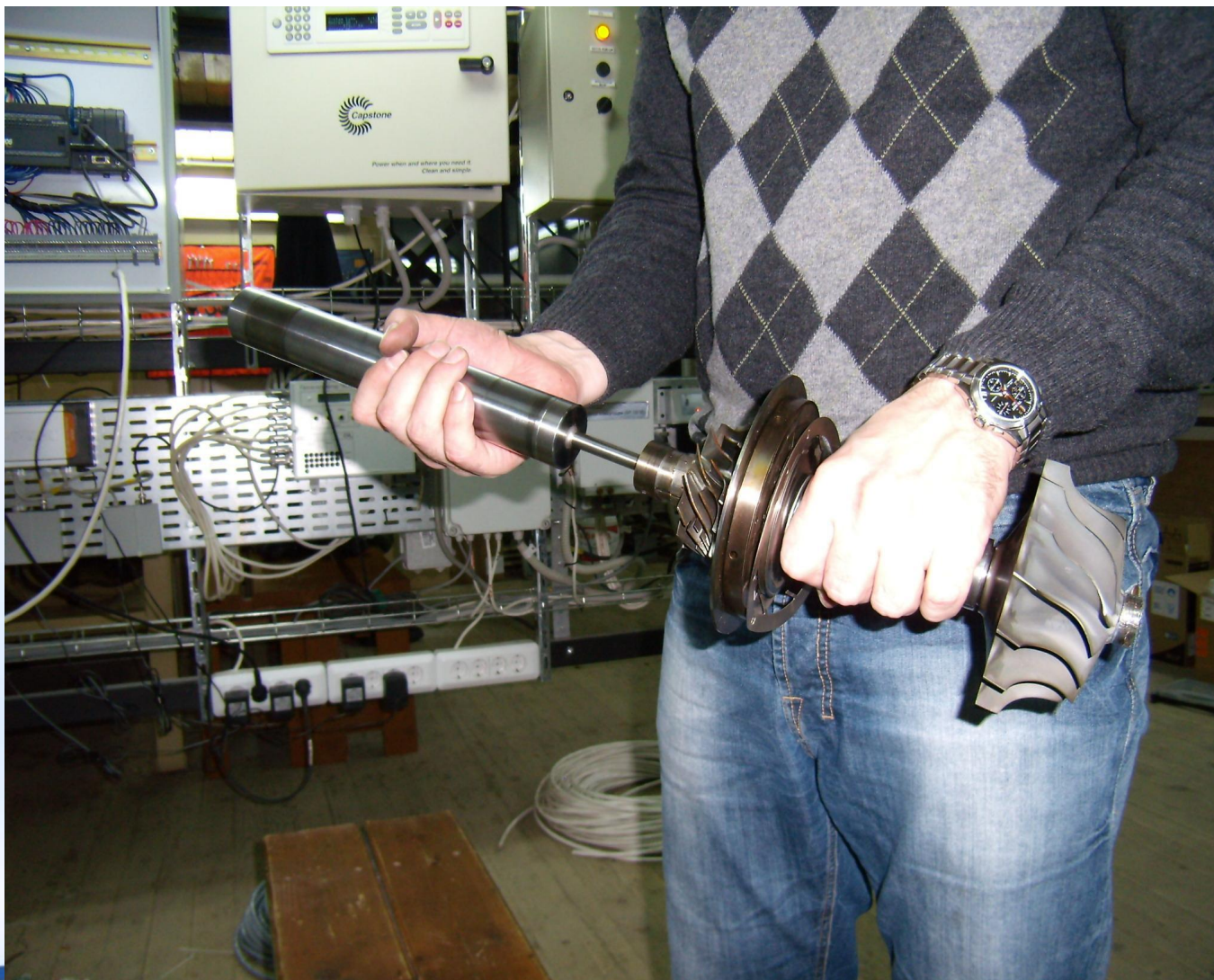
ТКГ – CAPSTONE (1144/294К, 96000 об/мин, 30 кВт)



Компоновочные решения, использованные в ТКГ на стенде NASA



Внешний вид вала ТКГ на стенде NASA



ФИЛЬМ НАСА О “JIMO”-МИССИИ

ВМЕСТО РЕЗЮМЕ...

Анализ технических заданий по различным направлениям ОКР мегапроекта, графика проведения и финансирования соответствующих работ, осуществляемых под руководством предприятия Главного конструктора в части РУ (ОАО «НИКИЭТ») кооперацией предприятий из Росатома, Роскосмоса и НИЦ «Курчатовский институт», и по энергоблоку в целом, позволяет на текущем этапе прийти к следующим основным констатациям и выводам.

1. Очевиден декларативный стиль и финансовый эгоизм предприятия Главного конструктора в управлении ОКР по созданию РУ. К сожалению, даже на стадии эскизного проекта отсутствует должная вариантность исполнения РУ как в части выбора схем организации охлаждения активной зоны, рабочего процесса преобразования энергии в замкнутом цикле Брайтона, так и в части расчётного обоснования нейтронно-физических характеристик различных схем а.з. и др. Предприятие Главного конструктора не имеет практического опыта создания КЯЭУ.

ВМЕСТО РЕЗЮМЕ... (продолжение)

2. Недофинансирование текущих ОКР по созданию экспериментальной базы наземных реакторных испытаний энергоблока, отсутствие в настоящее время предложений Главного конструктора по технологической схеме жизненного цикла и программе дальнейших (после 2018 г.) реакторных испытаний не просто затрудняет, но может полностью остановить в ГНЦ РФ-ФЭИ работы по созданию ИК.
3. Важнейшей проблемной задачей, обеспечивающей проведение ОКР по мегапроекту и др., в краткосрочной перспективе стали подбор, обучение и расстановка новых кадров для управления различными направлениями работ, а также технических и научных специалистов в области космической ядерной энергетики в целом.
4. Мегапроект для ГНЦ РФ-ФЭИ является, безусловно, методологически и технически интереснейшим направлением работ, которые не только консолидируют усилия различных специалистов, не просто реанимируют приостановленные 15-20 лет назад отдельные направления ОКР в области космической ядерной энергетики, но и создадут существенный задел по экспериментально-технологической и методологической базам для новых проектов ЯЭУ термоэмиссионного преобразования и др.

Спасибо за внимание!

Прогноз массы БРЗ после учета ослабления конструкциями и оптимизации компоновки ТЭМ

Компоновка ТЭМ	Компоновка РУ			
	№1 (было 1000 кг)		№2 (было 810 кг)	
	Толщина LiH, см	Масса БРЗ, кг	Толщина LiH, см	Толщина LiH, см
КХИ От ЦАЗ до ПАО 42.5 м	56	880	Нет решения из-за большого вклада рассеянного	
КХИ От ЦАЗ до ПАО 44.9 м перекомпоновка	54	850	65	760 ^{*)}
КХИ От ЦАЗ до ПАО 52.5 м	51	770	60	680
ПХИ От ЦАЗ до ПАО 64.5 м	51	770	69 65	800 760 ^{*)}

- 1 Приведенные защитные композиции обеспечивают на дозовой плоскости флюенсы нейтронов не более $5 \cdot 10^{11}$ н/см².
- 2 Поглощенная доза для этих компоновок в диапазоне от 100 до 300 крад.
- 3 Масса блока радиационной защиты может быть уменьшена на 100-200 кг.