

Атомная энергетика
как фактор глобальной стабильности

Н.Н. Пономарев-Степной

академик РАН

лекция

г. Екатеринбург, 28 июня 2017г.

**Атомные
самолеты, ракеты, космические
установки**

История

Атомные летательные аппараты

АТОМНЫЙ САМОЛЕТ

- В начале июня 1952 года Анатолий Петрович формулирует основные проблемы создания атомного самолета:

"Наши знания в области атомных реакторов позволяют поставить вопрос о создании в ближайшие годы двигателей на атомной энергии, применимых для ... тяжелых самолетов. ... Основной задачей здесь является создание собственно реактора с воздушным охлаждением с возможно более высокой температурой выходящих газов /температура стенки порядка до 1300 °С, температура газа порядка до 1000 °С/ Атомный реактор для тяжелого самолета имеет конечной целью разработку турбореактивного агрегата с воздушным охлаждением и защитой от излучения, обеспечивающей возможность работы персонала самолета."

*Наши знания в области атомных реакторов позволяют
поставить вопрос о создании в ближайшие годы
двигателей на атомной энергии, применимых для
тяжелых самолетов*

*Основной задачей
здесь является создание собственно реактора с
воздушным охлаждением с возможно более высокой
температурой выходящих газов (температура
стенки порядка 1300°, температура газа порядка 1000°)*

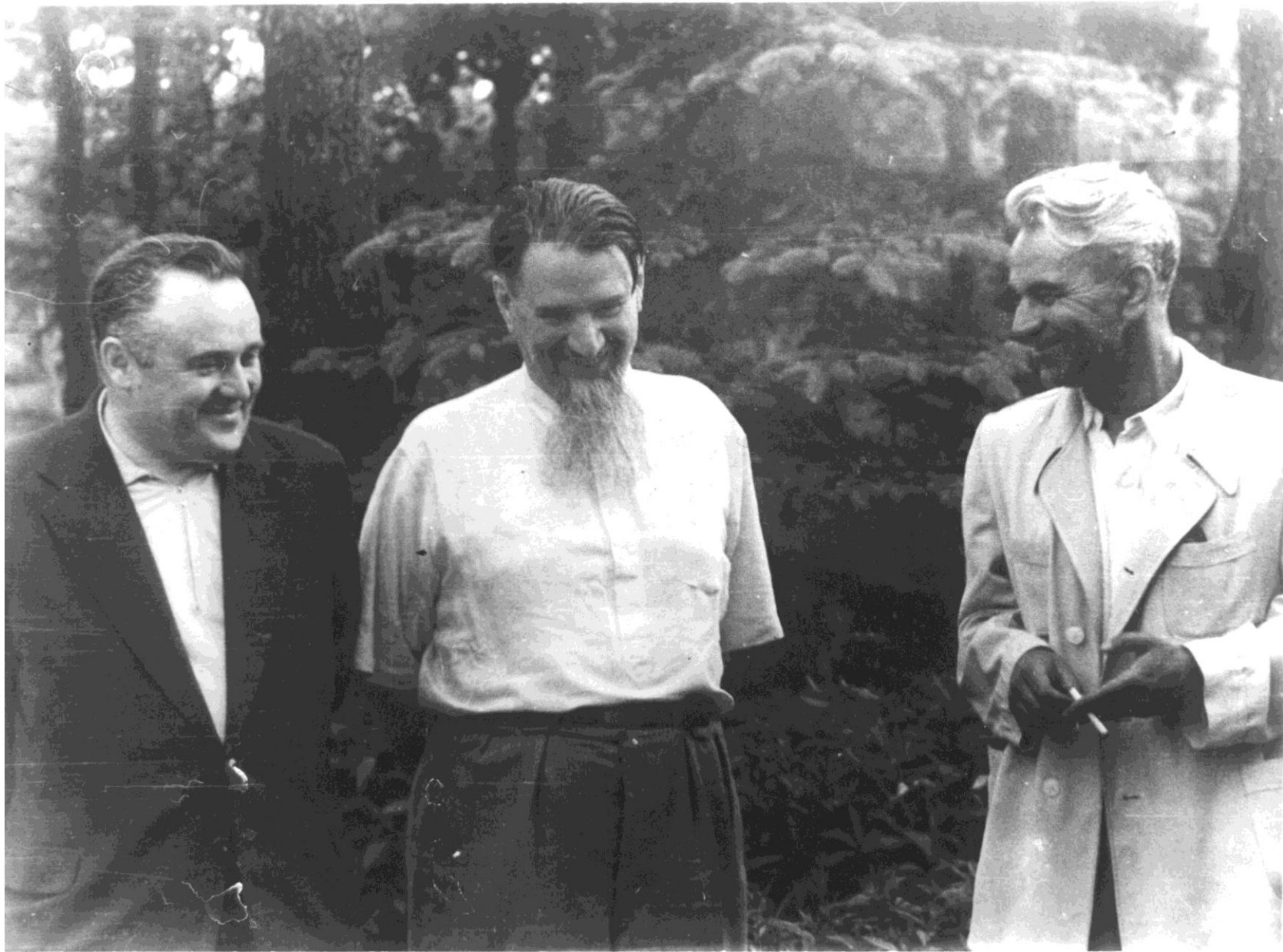
- Началась работа. В ней участвует созвездие крупнейших ученых, конструкторов, технологов: Курчатов, Александров, Туполев, Келдыш, Кузнецов, Лавочкин, Люлька, Лейпунский, Мясищев.

Атомные летательные аппараты



- **Атомный самолет.**

- ◆ прямоточные и турбореактивные двигатели,
- ◆ высокотемпературные реакторы с воздушным и с промежуточным (Na, Li, He) охлаждением ($T > 1200^{\circ}\text{C}$)
- ◆ керамические тепловыделяющие элементы



Атомные летательные аппараты

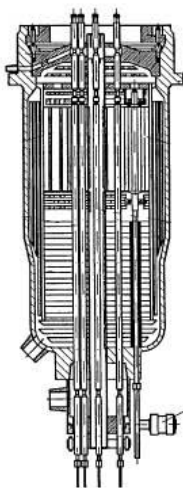
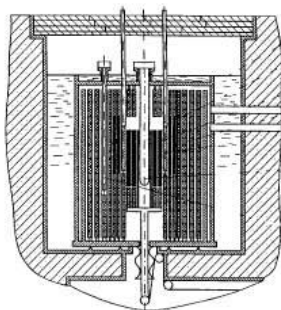
ЯДЕРНАЯ РАКЕТА

- Принципиальное преимущество ЯРД по сравнению с ЖРД
 - ♦ *рабочее тело с минимальным молекулярным весом, (H_2)*
 - ♦ *повышение удельной тяги двигателя. (900 сек и выше)*
- Обсуждение реакторов с твердофазной /схема А/ и газофазной /схема В/ активными зонами.
- Идея создать Импульсный Графитовый Реактор (ДОУД-3)

"Представляется важным изучение физических процессов в атомных реакторах при очень больших скоростях наращивания мощности... Большая плотность нейтронов позволит проводить важные физические исследования, в том числе пробные опыты с тепловыделяющими элементами для ракет с атомными двигателями" писали "на верх" Славский и Курчатов, конец 1957 года.



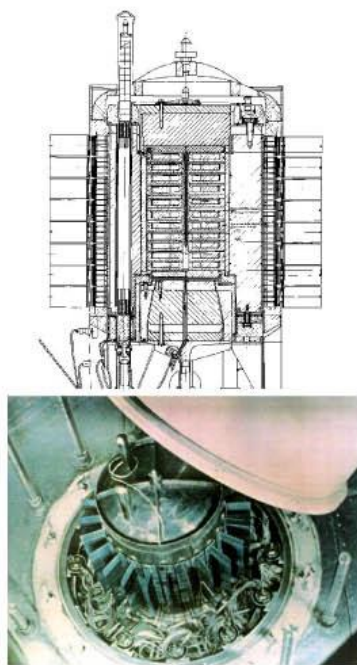
Атомные летательные аппараты



• Ядерная ракета.

- ♦ Высокотемпературные реакторы с твердофазной (схема А) и газофазной (схема В) активными зонами,
- ♦ Импульсный Графитовый Реактор (ИГР). С 1960 года на реакторе выполнены уникальные испытания тепловыделяющих элементов реакторов ядерных ракетных двигателей. (рис).
- ♦ реактор ИВГ для испытаний тепловыделяющих элементов и тепловыделяющих сборок реакторов ЯРД. (рис). Достигнуты рекордные параметры: по температуре подогрева водорода (3100К).
- ♦ стендовый вариант реактора ЯРД минимальной размерности (ИРГИТ)

Атомные летательные аппараты



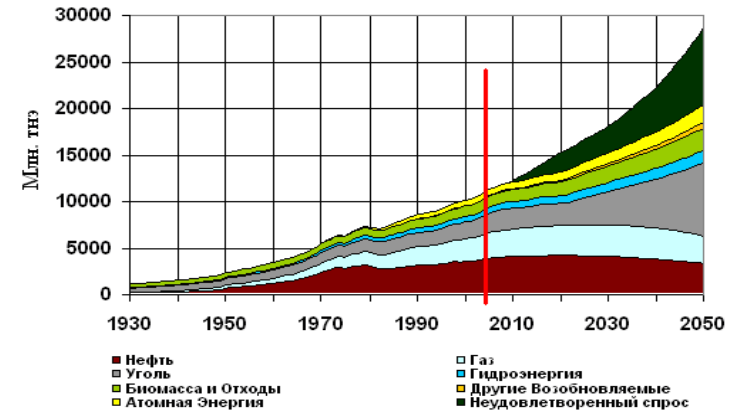
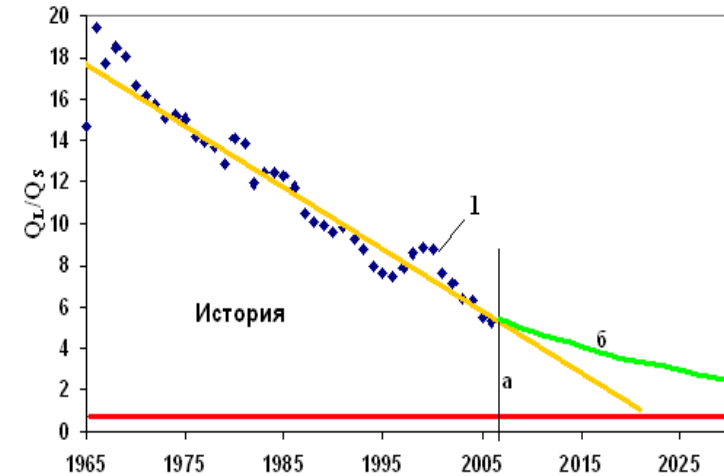
- **Космические ядерные установки.**

- ◆ первый в мире реактор-преобразователь "Ромашка".
- ◆ реактор-преобразователь со встроенными в активную зону термоэмиссионными электрогенерирующими элементами (Топаз–многоэлементные ЭГК, Енисей –одноэлементные ЭГК)
- ◆ испытания термоэмиссионной установки ЕНИСЕЙ в Альбукерке, штат Нью Мексико, США

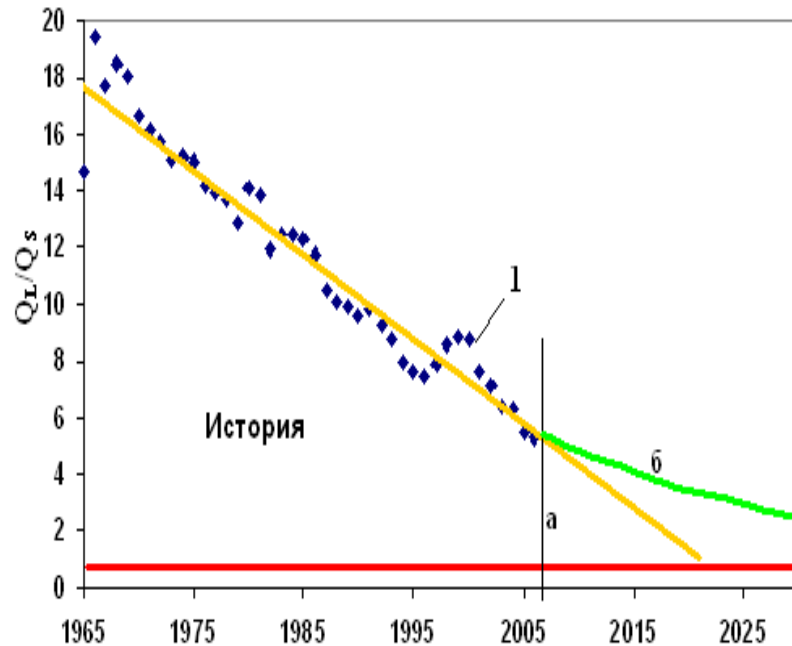
Энергетические вызовы 21 века

Энергетические вызовы 21 века

- Пережающий рост спроса на энергию развивающимися странами; *Азиатский вектор*
- Рост глобального потребления энергии; *Утроение к середине века*
- Потребители; *ЭЭ, тепло, энергоносители, топливо, водород*
- Ресурсы; *ВИЭ, атомные, углеродные,*
- Выбросы углеродной энергетики и экология; *CO2*



Выравнивание удельного потребления энергии развивающимися (Q_s) и развитыми (Q_L) странами



- В двадцатом веке в энергетическом диалоге развивающихся и развитых стран произошли принципиальные изменения – началось выравнивание потребления энергии на душу населения
- В середине двадцатого века соотношение потребления энергии на душу населения между развитыми и развивающимися странами составляло около 20 раз, к началу этого века оно сократилось более, чем в два раза

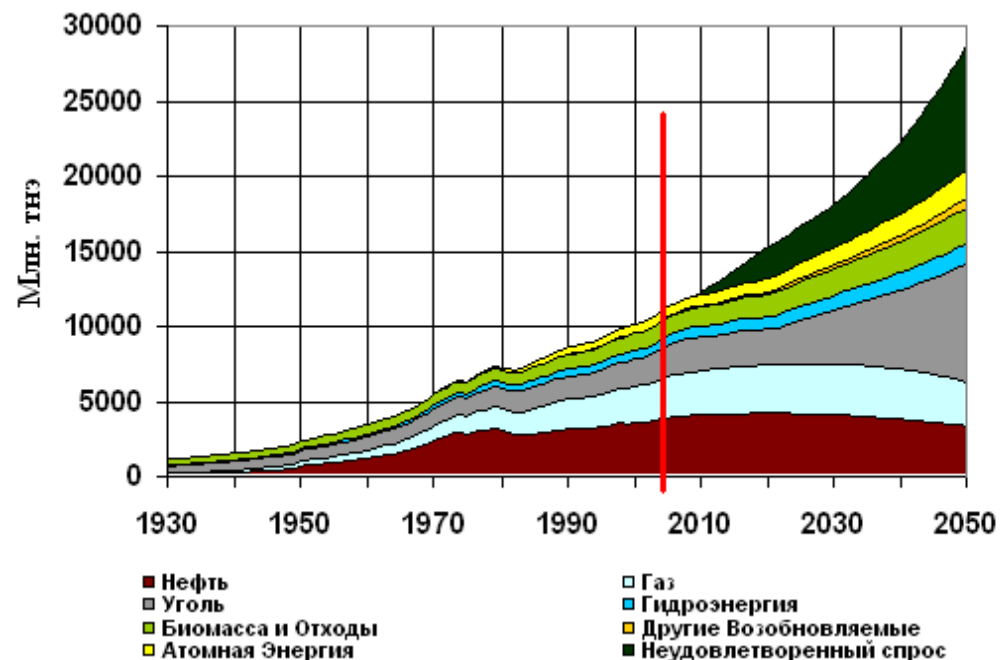
Что дальше?

Красная линия - равенство удельного энергопотребления в развитых и развивающихся странах. Равенство потребления - потребует увеличения источников энергии примерно в 3 раза.

Тренд а: Линейная экстраполяция – утроение источников энергии в ближайшее десятилетие. Это не реально.

Тренда б: Мягкое сближение - утроение источников энергии к середине века. Необходимое условие: стабилизация потребления в развитых странах и сокращении темпов роста развивающихся стран.

Баланс первичных источников энергии



- Баланс построен в предположении максимального использования всех источников энергии.
- Прогнозируется увеличение к середине столетия :
 - возобновляемая - в 10 раз,
 - угольная – 4 раза,
 - гидро – 2 раза,
 - атомная – 3 раза,
 - нефть и газ - стабильны
- Даже при таких оптимистических предположениях образуется область неудовлетворенного спроса (на диаграмме закрашена черным цветом), что ведет к дестабилизации мира.

Энергетические вызовы 21 века

Вопрос к размышлению

- Возможна ли стабилизация потребления в развитых странах?
- Возможно ли сокращение темпов роста потребления развивающихся стран? Китай? Индия? Влияние миграции?
- Ресурсы – углеродные/ядерные?
- Соотношение –ЭЭ/Энергоносители?
- Выбросы и климат?

Атомная энергетика как фактор стабильности

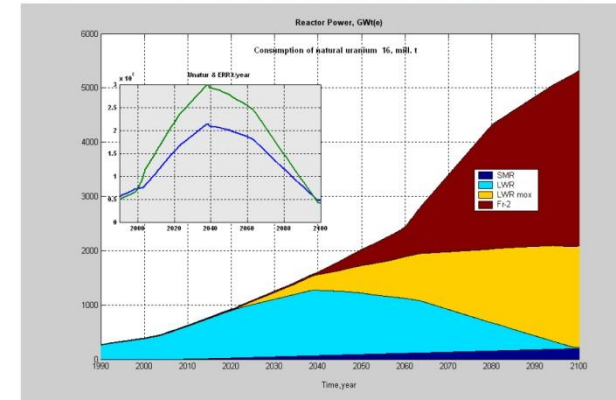
Атомная энергетика как фактор стабильности

- **Обладает практически неограниченными ресурсами топлива**
- **Она технологически подготовлена для масштабного развития**
- **Она обеспечит производство электричества, тепла и водорода**
- **Она экономически доступна для регионов мира**
- **Это экологически чистый источник энергии**

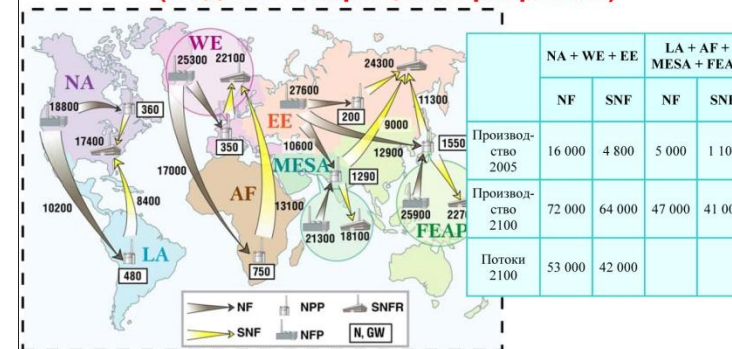
Для того, чтобы атомная энергетика способствовала стабильности мира требуется

- Увеличить масштаб использования атомной энергии в общем балансе энергоресурсов; **(более 10%)**
- Расширить круг стран и регионов, использующих атомную энергетику;
- Использовать реакторы не только для производства электричества, но и для замещения органического топлива в технологических процессах, на транспорте, в коммунальном секторе; **Это ЭЭ + водород**
- Обеспечить атомную энергетику неограниченными ресурсами ядерного топлива на долгий период времени; **Это ТР + БР с ЗЯТЦ**

Система ЯЭ на основе реакторов ЛВР, БР с учетом реакторов малой и средней мощности



Производство и трансрегиональные потоки свежего и облученного ядерного топлива в 2100 г., т/год; $N \approx 5000$ ГВт(э) (модель «сокращения разрыва»)



**Необходимое условие широкомасштабного
развития атомной энергетики -**

БЕЗОПАСНОСТЬ

**<ядерная, радиационная, экологическая
безопасность, устойчивость к
распространению, физическая защита>**

**во всех звеньях атомного энергетического и
промышленного комплекса и**

**на всех этапах жизненного цикла от добычи урана до
изоляции радиоактивных отходов.**

Основные этапы и технологические уклады ядерной энергетики

- Ядерная энергетика используется в секторе электроэнергетики и будет неуклонно наращивать в нём свою долю. В этом секторе действуют и длительное время будут работать АЭС с легководными реакторами. *ТР и открытый ЯТЦ = ЭЭ*
- Крупномасштабное развитие ядерной энергетики требует замыкания ядерного топливного цикла и использования быстрых реакторов с воспроизводством топлива в сочетании с тепловыми реакторами. Это решает проблему ресурса природного урана, снижает объемы хранения ОЯТ и РАО. *ТР+БР и замкнутый ЯТЦ = ЭЭ*
- Расширение сферы применения ядерной энергии за пределы производства электроэнергии - в промышленные технологии, в производство искусственного топлива и водорода. *ТР+БР + ВТГР и замкнутый ЯТЦ = ЭЭ + водород*

Структура глобальной атомной энергетики

- Решение этой задачи возможно только совместными усилиями международного сообщества.
- Ядерная энергетика явление глобальное. Безопасность атомной энергетики выше национальных границ.
- Не представляется возможным решать проблемы разработки ядерных технологий и обеспечения их безопасности изолированно, в отдельно взятой стране.
- В совокупности топливный цикл от добычи сырья до изоляции отходов экономически не доступен каждому пользователю реакторов. В этом плане и ставится вопрос о разработке структуры глобальной атомной энергетики.
- При разработке структуры глобальной ядерной энергетики тесно пересекаются две линии. Это
 - техническая линия: архитектура глобальной ядерной энергетики и
 - организационная линия: правовая и организационная база для определения поведения, которое ожидается от всех участников развития глобальной гражданской атомной энергетики.

Архитектура ядерной энергетической системы, удовлетворяющей требованиям стабильности и безопасности

- Реакторы на тепловых нейтронах в сочетании с реакторами на быстрых нейтронах с расширенным воспроизводством топлива.
- Замыкание топливного цикла с переработкой ОЯТ, многократным рециклом топлива, сепарацией, сжиганием МА и изоляцией РАО.
 - Это обеспечит неограниченность ресурса ядерного топлива за счет воспроизводства Pu и U-233 из урана и тория, снизит объемы хранилищ ОЯТ и решит проблему обращения с РАО
- Высокотемпературные реакторы для производства водорода, технологических процессов и коммунального сектора.
 - Это компенсирует нарастающий дефицит органического топлива в промышленности, на транспорте и в сфере быта (неэлектрическая сфера потребления энергетических ресурсов)



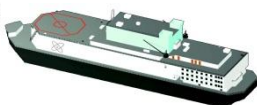
Региональная атомная энергетика

Цели

- надежное энергообеспечение изолированных (граничных) регионов;
- замена выработавших ресурс станций на органическом топливе;
- возможное внедрение атомной энергетики для перекачки газа.

Основа

- реакторы малой и средней мощности с использованием судовых технологии;
- плавучие АЭС



Задачи

- сокращение сроков строительства до 3-х лет и менее, в том числе за счет модульности станции, стандартизации и т.п.;
- снижение стоимости за счет заводского и серийного изготовления;
- сокращение сроков начала выплаты кредитов на строительство, снижение финансовых рисков и ускорение оборота капитала;
- повышение КИУМ, маневренность, коэффициента готовности и т.п.

Атомная энергетика как фактор стабильности

Вопросы к размышлению




- Атомная энергетика
 - стабильность \leftrightarrow опасность?
- Доля АЭ в топливном балансе?
- Атомная энергетика России: внутри/во вне?
- Двухкомпонентная? Однокомпонентная: ТР? БР?
- Двухкомпонентная АЭ: БР/ТР?
- БР: внешний рынок?
- Продуктовая линейка атомной энергетики: ЭЭ/ тепло/водород?
- Малые АС?

Стратегические инициативы технологического развития КРЭА

МЕГАПРОЕКТ Концерна по развитию новых направлений бизнеса на основе расширения международного сотрудничества в АТР и опережающего технологического развития

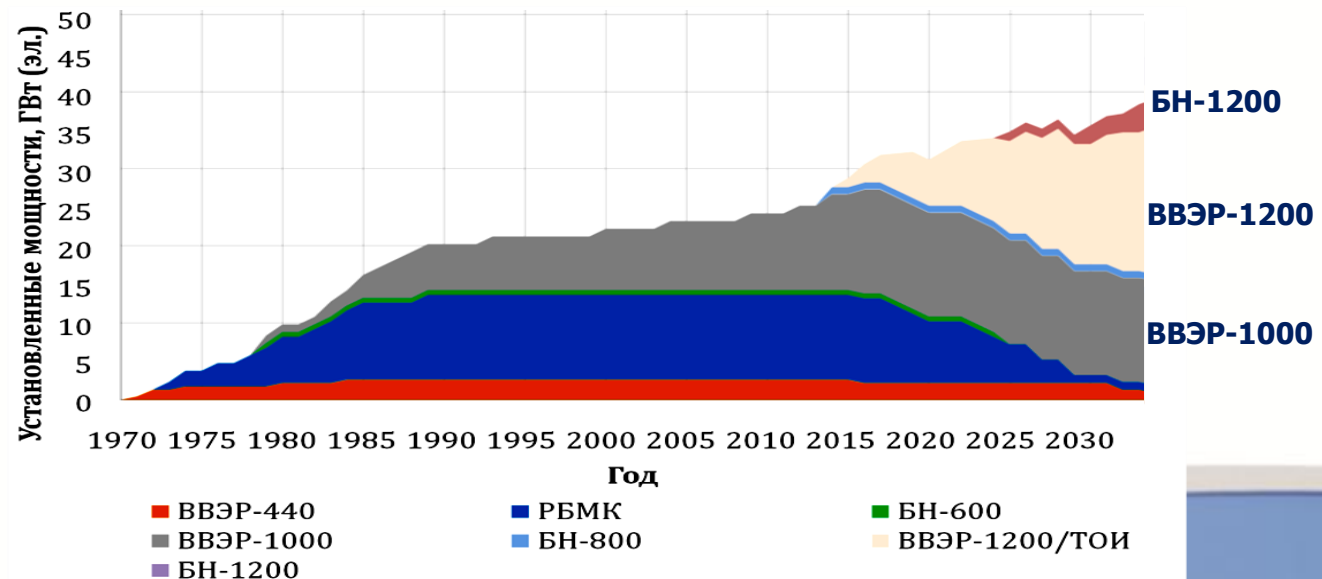


Ключевые проекты МЦ АЭТК ДВ – в планах опережающего технологического развития Концерна «Росэнергоатом» (Стратегическая сессия ГК «Росатом» 29.05.2017)

Ключевые направления	Технология	Ожидаемые результаты
<p>Двухкомпонентная ядерная энергетика с замкнутым ЯТЦ</p> <p>АЭС с БН-1200</p> 	<p>БН (1200) и ВВЭР (ТОИ) с централизованным замкнутым ЯТЦ, переработкой ОЯТ, многократным рециклом урана и плутония, кондиционированием и захоронением РАО</p>	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Создание ресурснезависимой АЭ ▪ Снижение затрат на хранение ОЯТ ▪ Выжигание долгоживущих МА ▪ Снижение активности и объемов РАО ▪ Конкурентоспособность экспорта ВВЭР при полном наборе услуг ЯТЦ ▪ Бизнес ОЯТ
<p>Малые мощности, модульные технологии и плавучие э/б</p> <p>АС ММ</p> 	<p>Развитие технологий малых мощностей и модульных АЭС с целью достижения затратных параметров, сравнимых с АЭС средних мощностей</p>	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Новое предложение для изолированных энергосистем ▪ Выход на новые региональные рынки со слабо развитой инфраструктурой
<p>Атомно-водородная энергетика</p> <p>ВТГР</p> 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Модульные высокотемпературные газовые реакторы и микротопливо ▪ Технологии переработки природного газа в водород без выбросов CO₂ 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Расширение областей использования ядерной энергии ▪ Новые продукты атомной генерации <ul style="list-style-type: none"> – водород как экологически чистый энергоноситель и как реагент – продукция на основе водорода (топливо, аммиак, этилен, пропилен и их переделы).
<p>"Новая" Энергетика</p> 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Развитие возобновляемых источников энергии ▪ Накопители электроэнергии 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Расширение продуктовой линейки

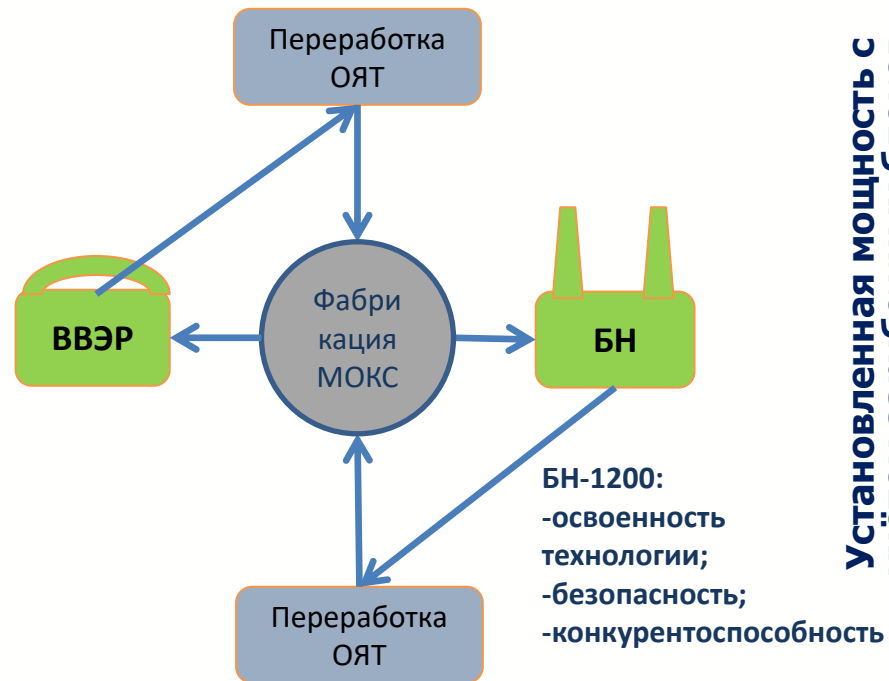
Атомная энергетика России: факт и перспективы до 2035г.

- 35 э/блоков АЭС с установленной мощностью -27,9 ГВт , из них 15,5ГВт - ВВЭР, 11 ГВт - РБМК, 1,4 ГВт – БН.
- **Энергетическая стратегия России до 2035г. и Схема территориального планирования РФ в области энергетики предписывают:**
 - Сохранение доли атомной генерации до 18%;
 - Рост суммарных установленных мощностей до ~38 ГВт(э) к 2035 г. с учетом выбывания действующих э/блоков с РБМК.
 - Основа развития ЯЭ – э/блоки с РУ ВВЭР.
- **Условие достижения цели Стратегии - Повышение экономической конкурентоспособности и инвестиционной привлекательности атомной энергетики**

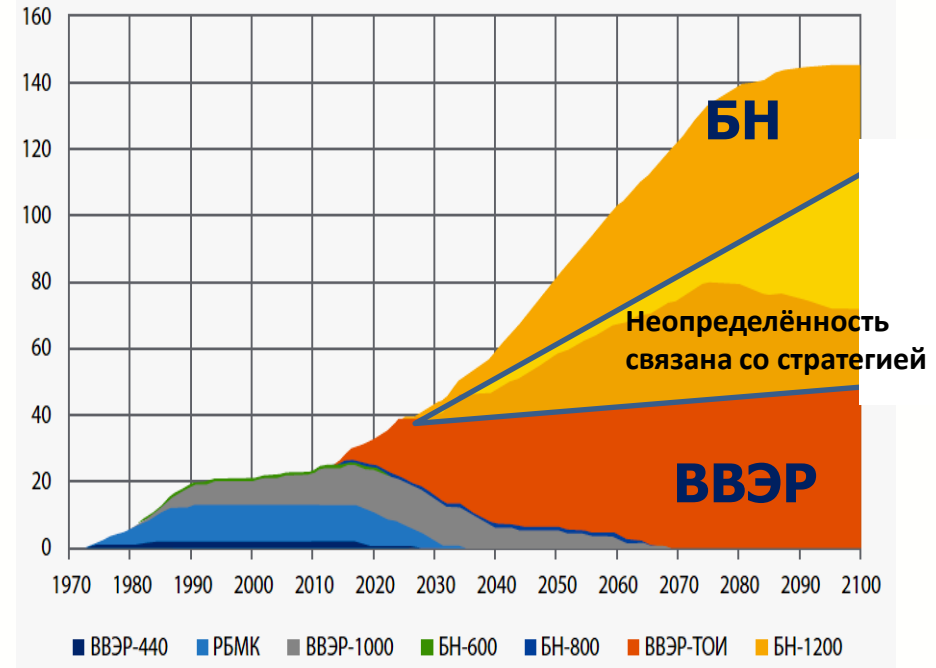


Позиция Концерна: переход к двухкомпонентной ядерной энергетической системе

Соотношение быстрых и тепловых РУ в 2-х компонентной системе зависит от внедряемой стратегии: от утилизации плутония и МА из ОЯТ ВВЭР до полного обеспечения ВВЭР (включая зарубежные) плутонием.



Установленная мощность с учётом зарубежных блоков



Основные положения двухкомпонентной ЯЭС с ВВЭР и БН и централизованным ЗЯТЦ

Энергоблоки сооружаются там, где есть потребитель энергии. Предприятия ЦЗЯТЦ размещаются вдали от концентрации населения.

Двухкомпонентная ЯЭС с централизованным ЗЯТЦ предусматривает переработку ОЯТ реакторов ВВЭР с использованием полученных урана и плутония для стартовых загрузок и перегрузок БН-1200. БН-1200 рассчитан на работу в режимах самообеспечения плутонием, расширенного воспроизводства плутония, утилизации МА. Нарботанный в режиме расширенного воспроизводства низкофоновый плутоний может использоваться в виде МОКС топлива в РУ ВВЭР-ТОИ.

В двухкомпонентной ЯЭС с централизованным замкнутым ядерным топливным циклом совместное функционирование энергоблоков с ВВЭР и с БН-1200 обеспечивает улучшение экономической эффективности выработки энергии путем оптимизации ядерного топливного цикла каждого из этих реакторов.

Двухкомпонентная ЯЭС открывает новые возможности Госкорпорации «Росатом» на внешнем рынке за счёт: экспорта ВВЭР с дополнительным набором услуг по хранению, переработке ОЯТ зарубежных АЭС и последующей утилизацией выделенных ядерных материалов в БН. Экспорт энергоблоков с БН в настоящее время не рассматривается

Преимущества двухкомпонентной ядерной энергетической системы

ЯЭС обеспечит экономическую эффективность ядерной энергетики на внутреннем рынке за счет:

- 1) использования неограниченного потенциала отвалного и природного урана для подпитки топливного цикла реакторов БН и ВВЭР при неминуемом дефиците урана и повышении его стоимости;
- 2) ликвидации запасов накопленного плутония;
- 3) сокращения объемов накопленных ОЯТ в результате его переработки и рецикла ЯМ – снижение затрат Концерна по обязательствам по обращению с ОЯТ;
- 4) значительного снижения активности РАО и их объёмов за счет выжигания в БН долгоживущих РАО - минорных актинидов;
- 5) наработки плутония в БН и его использования в виде МОКС-топлива в ВВЭР;

ЯЭС откроет новые возможности Госкорпорации «Росатом» на внешнем рынке за счёт:

- 6) экспорта ВВЭР совместно с «лизингом» ядерного топлива;
- 7) коммерческого и научно-технического сотрудничества по технологиям БН;
- 8) дополнительного набора услуг по хранению, переработке ОЯТ зарубежных АЭС и последующего использования выделенных ядерных материалов в БН.



Базовые технологии двухкомпонентной ЯЭС

Централизованный замкнутый ядерный топливный цикл

-используются существующие и создаваемые производства ПО «Маяк», СХК и ГХК;

-продукты переработки ОЯТ ВВЭР, а также зарубежного ОЯТ (уран, плутоний, МА) сжигаются в БН;

Смешанное уран-плутониевое оксидное топливо (МОКС)

-МОКС-топливо превосходит СНУП-топливо по энерговыработке примерно в 2 раза, что соответственно сокращает потоки топлива и стоимость МОКС-топлива в сравнении со СНУП;

-В двухкомпонентной ядерной энергетической системе с ВВЭР и БН оба типа реакторов рассчитаны на использование однотипного МОКС топлива,

Быстрый натриевый реактор (БН)

-Россия является мировым лидером в области технологий быстрых реакторов с натриевым теплоносителем;

-Суммарная наработка реакторов БН составляет более 150 реакторо-лет,

-Реакторы БН-600 и БН-800 находятся в промышленной эксплуатации АО «Концерн Росэнергоатом»

Роли в двухкомпонентной ядерной энергетической системе:

БН:

- Вырабатывает э/энергию в режиме базовой нагрузки; предполагает **маневрирование мощности в диапазоне 100%-75%-100%**.
- Использует для подпитки накопленный отвалный или регенерированный уран, производит плутоний, максимально пригодный для изготовления МОКС-топлива ВВЭР;
- Выжигает долгоживущие высокоактивные отходы - **младшие актиниды**, выделенные при переработке ОЯТ БН и ВВЭР;

ВВЭР:

- Вырабатывает э/энергию в режиме с выполнением требований системного оператора по маневренности;
- Частично использует **МОКС-топливо** взамен топлива из UO_2 ;
- **Поставляется за рубеж с услугой по возврату ОЯТ в Россию;**
- **Выделенный из ОЯТ ВВЭР плутоний** поступает на изготовление МОКС-топлива для БН.

Предприятия ЯТЦ :

- Обеспечивают переработку ОЯТ ВВЭР и БН, выделение ядерных материалов для повторного использования;
- Используют отвалный или регенерированный уран и выделенный из ОЯТ плутоний для изготовления МОКС-топлива;
- Обеспечивают фракционирование РАО с целью последующей утилизации младших актинидов и снижения рисков распространения ЯМ, кондиционирование и захоронение РАО.



Отработанность технологий быстрых натриевых реакторов.

Суммарная отработка технологии реакторов БН в России - более 150 реакторо-лет

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ
И ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЕ
РЕАКТОРЫ

БР-5/10



1959

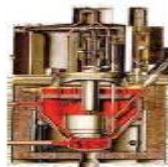
БОР-60



1969

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ РЕАКТОРЫ
РАЗРАБОТКИ АО «ОКБМ АФРИКАНТОВ»

БН-350



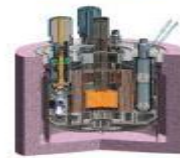
1973

БН-600



1980

БН-800

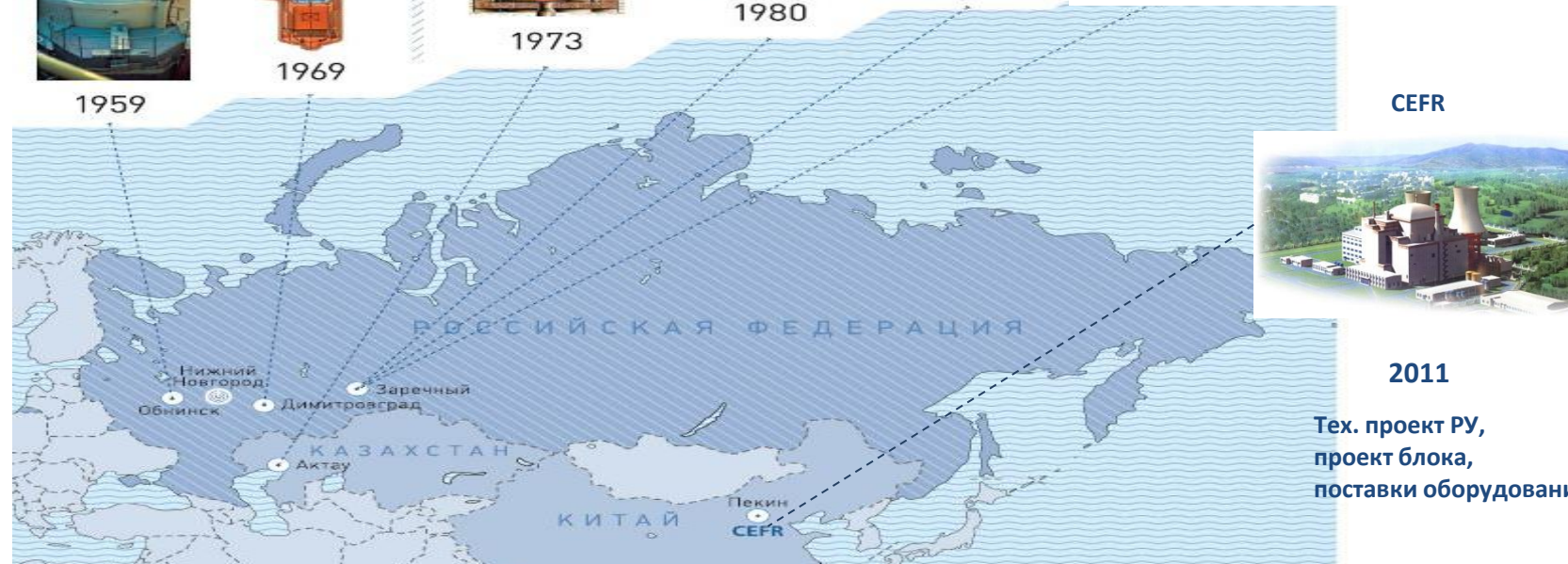


2016

БН-1200



Технический проект,
НИОКР



CEFR

2011

Тех. проект РУ,
проект блока,
поставки оборудования

Безопасность БН-1200: исключение необходимости эвакуации населения при авариях;
вероятность тяжелого повреждения а.з. меньше 10^{-6} на реактор в год;
удержание поврежденных при тяжелой аварии элементов а.з. внутри корпуса

Обоснование выбора централизованного замкнутого ЯТЦ

Централизованный ЯТЦ

- Централизованный ЯТЦ использует существующие и создаваемые объекты ядерного топливного цикла: Ц ПО «Маяк», СХК и ГХК;
- Предприятия централизованного ЯТЦ используются для переработки ОЯТ ВВЭР и последующего использования продуктов переработки (уран, плутоний, МА) в топливе БН; Такая схема операций с ОЯТ может быть использована и для предоставления коммерческих услуг по обращению с зарубежным ОЯТ

Пристанционный ЯТЦ

- ПЭК с пристанционным ЯТЦ не может быть продуктом для зарубежного рынка в связи с нарушением режима нераспространения;
- ПЭК с пристанционным ЯТЦ не имеет перспективы масштабного использования в России из-за ограничений по выбору площадок для сооружения ядерных объектов с открытой радиоактивностью;
- До настоящего времени отсутствуют нормы и правила для ПЭК, сочетающих на одной площадке ядерные энергоблоки (закрытая радиоактивность) и ядерные объекты по переработке ОЯТ и рефабрикации ядерного топлива (открытая радиоактивность).

Обоснование выбора МОКС топлива

- Стоимость производств МОКС - топлив на МФР ОДЭК оценивается в 2-4 раза дешевле СНУП из-за различия в производительности,
- Показатели достигнутого в БОР-60 к настоящему времени выгорания МОКС - топлива превосходит СНУП топливо примерно в 2 раза. Соответственно, объём производства ЗЯТЦ для СНУП должен быть в 2 раза больше, чем для МОКС.
- До настоящего времени не дано объяснения потери пластичности оболочки ТВЭЛ при испытаниях СНУП топлива в реакторе БН-600, что не позволяет дать обоснования работоспособности СНУП топлива для использования в реакторе.
- В двухкомпонентной ЯЭС унифицированным топливом для ВВЭР и БН может быть только МОКС, что позволяет снизить стоимости ЯТЦ, потому что стоимость производства двух типов продукции примерно в 1.4 раза выше, чем одного с той же производительностью.

Выбор топлива для БР

Сравнение МОХ – топлива и плотного (нитридного или металлического)

- **МОХ – топливо.**
 - Констатируется технологическая готовность и достаточная определенность эксплуатационных характеристик МОХ-топлива для его использования в тепловых и быстрых реакторах.
 - Технологии изготовления МОХ - топлива для тепловых и быстрых реакторов - созданы и отработаны в промышленном масштабе за рубежом, это топливо используется в действующих реакторах. В России завершаются НИОКР по реакторным технологиям МОХ - топлива для БН-800 и создается промышленное производство такого топлива.
- **Плотное топливо (и нитридное, и металлическое).**
 - Имеет потенциальные преимущества перед МОХ- топливом : большее удельное содержание делящихся атомов (U и Pu), меньшее количество легких ядер, лучшая теплопроводность и др.
 - Использование плотного топлива в реакторах на быстрых нейтронах может обеспечить более высокий коэффициент воспроизводства.

БН-800 – необходимый шаг на 1м этапе замыкания ядерного топливного цикла для отработки технологии ЗЯТЦ

- **В настоящее время разработка технологий замыкания ядерного топливного цикла по ФЦП ЯЭНП и ФЦП ЯРБ слабо скоординирована с программой сооружения энергоблока с БН-800.**
 - параметры активной зоны, ее элементов и режимов эксплуатации выбраны, в основном, исходя из требования генерирования энергии;
- **Необходимо**
 - разработать проект АКТИВНОЙ ЗОНЫ БН-800, который должен предусмотреть расширенное воспроизводство топлива в активной зоне и воспроизводящем боковом экране; должна быть предусмотрена возможность использования разных вариантов топлива и бланкета;
 - эксплуатация ЭБ БН-800 должна решать главную целевую задачу – отработка технологии замыкания топливного цикла, в части воспроизводства и рецикла топлива; проект должен быть увязан с системами замыкания топливного цикла: хранение, транспорт, переработка, производство и др.
 - оценки экономической эффективности должны быть выполнены заново с учетом откорректированного проекта активной зоны (производство энергии и топлива) и отработки технологий замкнутого топливного цикла.
- **К разработке новых подходов к расчету экономической эффективности энергоблоков с быстрыми реакторами и замкнутым топливным циклом должны быть привлечены Концерн «Росэнергоатом», Концерн ТВЭЛ, Дивизион ЯРБ, БУИ.**

Ключевой проект **Дальневосточная АЭС с БН-1200 в двухкомпонентной ЯЭС с замкнутым ЯТЦ**



- Учитывая нынешний спрос на электричество в этом регионе, для обеспечения полной нагрузки АЭС с БН-1200 предлагается сооружение в комплексе с АЭС энергоемкого промышленного производства и поставку электроэнергии за рубеж.

Обращение китайской стороны о сооружении ДВ АЭС с транспортом электроэнергии в Китай - один из путей решения этой проблемы.

- Китайская сторона будет заинтересована принять долевое участие в сооружении АЭС с БН-1200, работающими в замкнутом ЯТЦ. **Переговоры по этому вопросу предлагается продолжить по согласованию с ГК Росатом.**
- Япония может проявить интерес к проекту ДВ АЭС с БН-1200 с замкнутым ЯТЦ, так как для Японии важна возможность переработки ОЯТ японских АЭС и сжигания продуктов переработки.

Для конкретизации технико-экономических характеристик ДВ АЭС предлагается разработать инвестиционный замысел строительства новой двухблочной Дальневосточной АЭС с РУ БН-1200

Замыкание ЯТЦ

БР с воспроизводством +ТР

Вопросы к размышлению

- Коэффициент воспроизводства?
- Оптимальная мощность блока?
- ПЯТЦ или/и ЦЯТЦ?
- Возможен ли выход на внешний рынок БР?
- Экономика БР, производящих два продукта: энергия + топливо?
- Может ли конкурировать БР с ТР при производстве только энергии?

ВОДОРОД – НОВЫЙ КЛЮЧЕВОЙ ПРОДУКТ Концерна «Росэнергоатом»

Новый ключевой продукт Концерна «Росэнергоатом» - водород:

- Потребности и рынок водорода сравнимы в энергетическом эквиваленте с традиционным продуктом Концерна - электроэнергией
- Водород и его производные - востребованный на рынке товар
- Создание продуктовой линейки водорода базируется на разработанных в России технологиях Атомно-водородной энергетики

Особенности водорода, определяющие интерес потребителей:

- ✓ водород как энергоноситель
- ✓ водород как химический реагент
- ✓ неограниченные сырьевые ресурсы для производства водорода

Наибольший вклад в рост мирового спроса на водород следует ожидать от автотранспорта и систем рассредоточенного энергоснабжения при использовании водородных топливных элементов.

*Оценка масштаба мировой потребности в водороде в 21 веке, млн т:
2015 г. — 70, 2020 г. — 90, 2050 г. — 370, 2100 г. — 800.*

Ключевой проблемой водородной экономики является крупномасштабное производство водорода.

Атомно-водородная энергетика

- **Концепция**

(Разработана в нашей стране в начале 70-х годов XX века)

Широкое использование водорода, производимого из воды с помощью высокотемпературных ядерных реакторов

- **Мотивация**

- ♦ Водород: неограниченные ресурсы сырья (вода); преимущества как энергоносителя - отсутствие вредных выбросов при использовании, удобство накопления, транспортировки; эффективность производства ЭЭ в ТЭ;
- ♦ Ядерная энергия: ЭЭ+ высокотемпературное тепло, неограниченные ресурсы топлива, минимальное воздействие на окружающую среду

- **Формула**

«вода на входе + чистая ядерная энергия → водород → водород + кислород
= чистая энергия + вода на выходе»

Водородная экономика

Широкомасштабное применение водорода

- Водород – энергоноситель
Прямое преобразование в ЭЭ (ТЭ)
Транспорт, энергетика (накопители, энергоснабжение)
- Водород – химический реагент
Металлургия, нефтепереработка, аммиак, метанол

Крупномасштабное производство водорода

- Неограниченные ресурсы производства водорода: вода + чистая (возобновляемая, атомная) энергия

Обращение с водородом

- Хранение, транспортировка, распределение

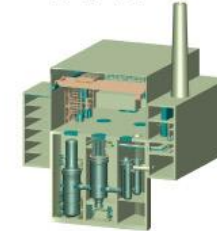
Результат

- Чистая окружающая среда
- Стабилизация мира

Масштаб рынка водорода в XXI веке
Млн.т.

годы	2000	2050	2100
транспорт	-	260	450
всего	40	370	800

Атомно водородная энергетика



Миссия ВТГР в атомной энергетике – расширение сферы применения атомной энергии

Роль и место ВТГР в инновационной атомной энергетике, определяется способностью:

- **производить водород;**
- **снабжать высокопотенциальным теплом промышленные технологии, включая производство синтетического топлива и опреснение морской воды**
- **обеспечить энергией коммунальный сектор с использованием транспорта тепла хемотермическим способом;**
- **эффективно генерировать электроэнергию: высокий КПД, маневренные режимы, сухие градирни. Региональные малые и средние АС;**
- **обеспечить высокий уровень безопасности за счет внутренних свойств и пассивных способов**
- **сжигать радиоактивные отходы;**
- **обеспечить высокий уровень воспроизводства ядерного топлива в быстрых ВТГР.**

Масштаб энерготехнологического применения ВТГР не уступает масштабу атомной электроэнергетики

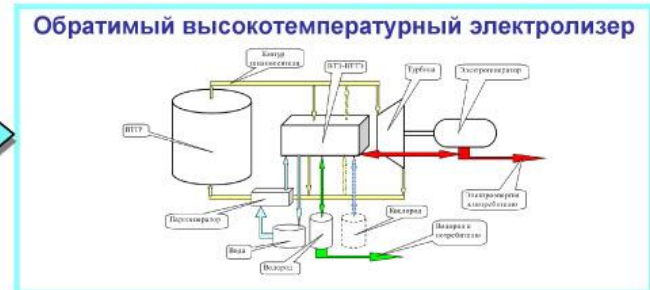
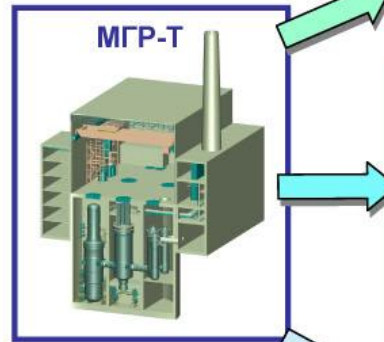
Производство водорода с использованием тепловой и электрической энергии ядерного реактора

- **расщепление воды**

- ◆ вода + тепло ($>800\text{ }^{\circ}\text{C}$) + (ЭЭ) → водород + кислород

- **паровая конверсия природного газа**

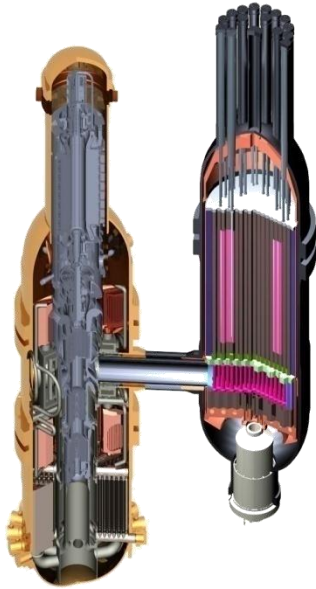
- ◆ вода + метан + тепло ($>800\text{ }^{\circ}\text{C}$) → водород + углекислый газ
- ◆ выход водорода в два раза больше, чем при пиролизе метана



Особенности ВТГР, которые стимулируют их применение в атомной энергетике

- **Высокие температуры повышают эффективность генерации электричества (~50%) и открывают возможность использования ВТГР для технологических процессов;**
- **Модульная конструкция реактора, пассивные системы расхолаживания, керамическая основа активной зоны, отрицательные обратные связи по температуре и мощности обеспечивают наивысший уровень безопасности и невозможность расплавления активной зоны при тяжелых авариях;**
- **Использование топлива в виде микрочастиц с многослойными керамическими покрытиями обеспечивает сверхвысокое выгорание (~десятки процентов) и сжигание минорных актинидов;**
- **Модульная компоновка эффективна для малых и средних АС с высоким уровнем внутренней безопасности и маневренностью, что важно при сооружении в труднодоступных районах, странах с энергетикой небольшого масштаба и при использовании реакторов для технологий.**

Особенности ВТГР, стимулирующие расширение сферы применения атомной энергии



- **Высокие температуры**
 - Возможность применения атомной энергии для технологических целей промышленности, для производства водорода, для производства синтетического жидкого топлива из угля и для коммунального теплоснабжения, региональные АС; высокий КПД; низкое воздействие на окружающую среду; сухие градирни,
- **Высокий уровень безопасности**
 - Обеспечивается внутренними свойствами и пассивными системами при минимальном количестве активных систем реакторной установки и станции
- **Высокий уровень выгорания топлива**
 - Эффективное использование топлива различного типа: уран, уран-плутоний, уран-торий; глубокое сжигание МА.

Керамическое топливо: микросферы топлива с многослойными покрытиями в графитовой матрице

- Нагрев теплоносителя до 1000°C
- Глубокое выгорание, эффективность топливного цикла
- Возможные варианты ядерного топлива (уран, плутоний, торий, актиниды)
- Эффективное сжигание оружейного плутония
- Сжигание актинидов
- Устойчивость при авариях
- Гарантии нераспространения
- Возможность захоронения ОЯТ без переработки



- В России разработаны проекты ВТГР для производства электроэнергии, для энерготехнологического применения, для атомных станций средней и малой мощности.
- Создана экспериментальная база, разработаны и экспериментально отработаны ключевые технологии реактора, керамического топлива, системы преобразования энергии, оборудования и конструкционных материалов.
- С участием Концерна «Росэнергоатом» разработаны проекты модульных реакторов, обладающих исключительными свойствами безопасности для энерготехнологического применения:
 - - МГР-Т для производства водорода и электричества (тепловая мощность блока – 600 МВт);
 - - МГР-МВС для производства метано-водородной смеси (тепловая мощность блока 250 МВт).

Опыт разработки ВТГР в России

Характеристики	ВГР-50	ВГ-400	ВГМ	ВГМ-П	ГТ-МГР	МГР-Т
Тепловая мощность, МВт	136	1060	200	215	600	600
Назначение	Выработка эл/энергии и рад. модификация материалов	Выработка эл/энергии и тепла для промышленных производств	Выработка эл/энергии и тепла для промышленных производств	Выработка тепла для нефтеперерабатывающего завода	Выработка электроэнергии	Выработка эл/энергии и водорода
Топливо/ Обогащение, %	U / 21	U / 6,5	U / 8	U / 8	U / 14, Pu / 93	U / 14
Теплоноситель	гелий	гелий	гелий	гелий	гелий	гелий
Температура гелия на выходе из активной зоны, °С	810	950	950	750	850	950
Статус	Тех. проект, 1978	Тех. проект, 1987	Тех. проект, 1992	Тех. предлож., 1996	Эскизный проект, 2002	Тех. предлож., 2004

Разработаны проекты, создана экспериментальная база, разработаны ключевые технологии, проводится экспериментальная отработка топлива, реактора и системы преобразования энергии, оборудования и конструкционных материалов

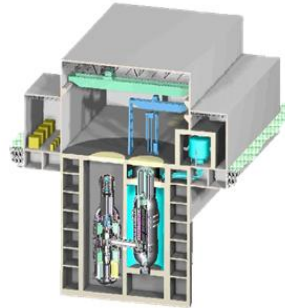
Уровень готовности технологий ВТГР в России

- **Ключевые технологии, разработанные в рамках российских программ ВТГР**
 - ✓ топливо ВТГР (покрытые частицы, шаровые твэлы, ТВС)
 - ✓ металлические и композиционные конструкционные материалы
 - ✓ высокотемпературные парогенераторы
 - ✓ высокотемпературные теплообменники
 - ✓ циркуляторы с гелиевым теплоносителем
 - ✓ комплексы перегрузки топлива
 - ✓ системы воздействия на реактивность
 - ✓ технология гелиевого теплоносителя
 - ✓ системы расхолаживания
 - ✓ система преобразования энергии с замкнутым газотурбинным циклом и её компоненты
 - ✓ методики расчетно-экспериментального обоснования проектов
- **Оценка статуса разработок: уровень готовности технологий позволяет в кратчайшие сроки развернуть работы по реализации проектов ВТГР в России**

Атомная энерготехнологическая станция с высокотемпературным газоохлаждаемым реактором (АЭС ВТГР)

Участники работ (консорциум)

АО «ОКБМ Африкантов», АО «АСЭ», Eskom



Конечный продукт: производство тепла, э/э, водорода, перегретого пара, синтетическое жидкое топливо из угля

ТЕКУЩИЙ СТАТУС РАБОТ

1970-1990 гг.:

Проектирование атомных энергоисточников с ВТГР. Постановление СМ СССР № 0794-191 от 16.07.1987 «О создании и внедрении в народное хозяйство атомных энерготехнологических комплексов на базе ВТГР» в целях замещения органического топлива, расходуемого в энергоемких технологических процессах.

1990-2010 гг.:

Различные варианты исполнения атомных станций с ВТГР:

- ✓ АЭС МГР-Т для производства водорода и электричества (2008г.)
- ✓ АЭС ГТ-МГР производства электроэнергии (2001г.)
- ✓ АС с РУ МГР-100 для производства метано-водородной смеси (2010г.)

2015-2016 гг.:

- ✓ Выиграла ГК «Росатом» (АСЭ, NUKEM, ОКБМ) совместно с локальными партнерами из Индонезии в составе консорциума RENUCO. Выполнены проектно-конструкторские исследования в обеспечение улучшения технико-экономических характеристик
- ✓ В соответствии с Распоряжением ГК «Росатом» по реализации проекта ОКБМ разработало комплект документации в объеме концептуального проекта по РУ, состоящий из 26 отчетов
- ✓ АО «ОКБМ Африкантов» в инициативном порядке начало разработку технического проекта РУ. Определены потенциальные поставщики основного оборудования РУ. Документация технического проекта РУ будет разработана в соответствии с российскими нормами и правилами

ВЫПОЛНЕНО

Наименование	Энергоблок с РУ ВТГР
Электрическая мощность энергоблока, МВт	287
Тепловая мощность энергоблока, МВт	600
Температура на выходе из реактора, °С	850
КПД, %	~48
Срок службы, лет	60
Потенциальный срок создания головного энергоблока	5 лет
Стоимость серийной АЭС, млн. \$.	900 – 1200

ВТГР в мире: текущие разработки



АТОМНЫЙ ХИМИКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ КЛАСТЕР ДЛЯ ПЕРЕРАБОТКИ ПРИРОДНОГО ГАЗА В ЧИСТЫЙ ВОДОРОД

- Проект экологически чистого производства водорода из природного газа основан на технологиях безопасных модульных высокотемпературных гелиевых реакторов (ВТГР) и переработки углеводородов в водород и его производные без выбросов в атмосферу CO₂. Реализация этого проекта откроет новую продуктовую линейку производства чистого водорода.
- Проект крупномасштабного экологически чистого производства водорода из природного газа представляет интерес для зарубежных партнеров и может разрабатываться с ними как совместный проект. Одним из наиболее заинтересованных партнеров может быть Япония, которая нацелена на широкомасштабное использование водорода.
- Атомный химико-технологический кластер может быть размещен на территории опережающего развития (ТОР) на дальневосточном побережье, или на Сахалине, или на одном из Курильских островов. Природный газ будет подаваться по трубопроводам от месторождений, находящихся на материке или на острове Сахалин.

Опыт разработки ВТГР за рубежом

AVR
(Германия)
1967-1988



Reach-Bottom
(США)
1967-1974



FSV
(США)
1976-1989



THTR-300
(Германия)
1984-1989



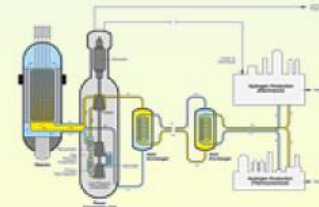
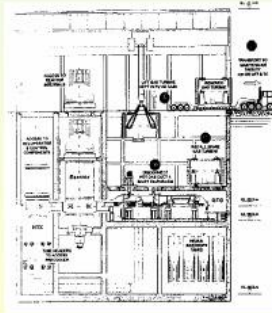
HTTR
(Япония)
1998



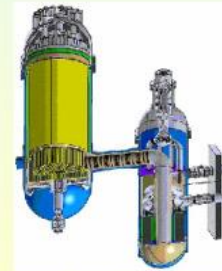
HTR-10
(Китай)
2000



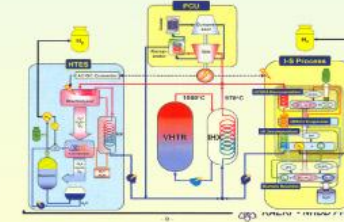
GTHTTR 300
(Япония)



МГР-Т
Обратимый

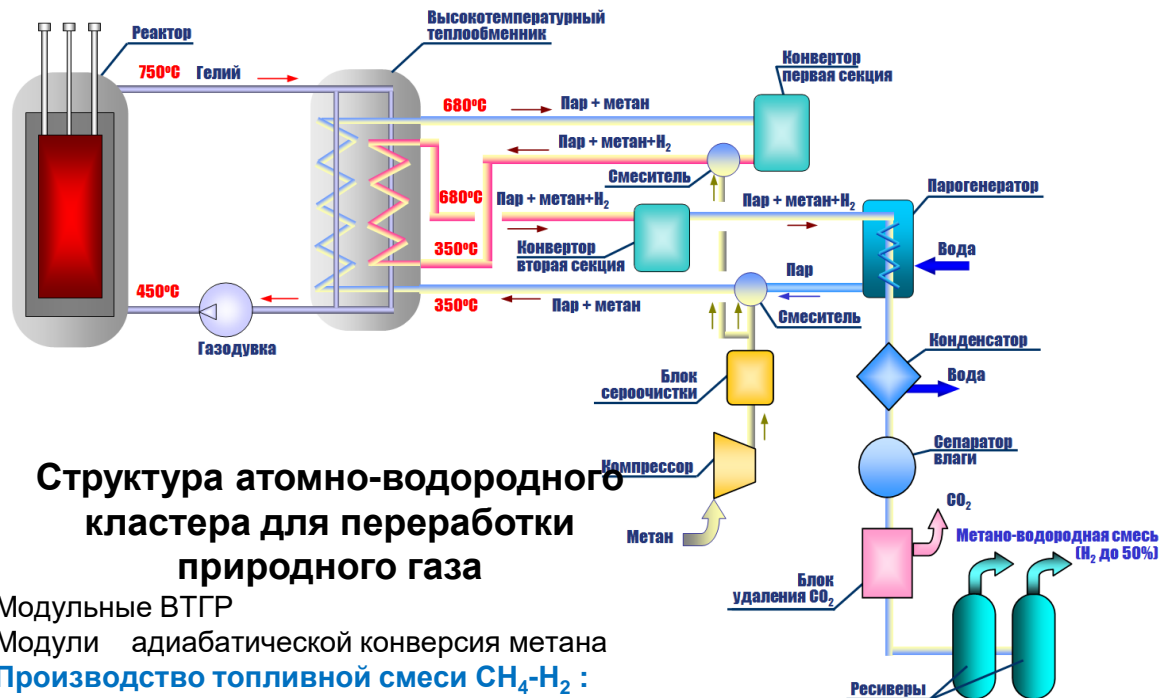


ANTARES
(Франция)



NHDDP
(Республика Корея)

Опыт эксплуатации ВТГР в США, Германии и Японии при температуре гелия до 950 °С показал устойчивость работы реактора, уникально высокий уровень безопасности и низкий уровень активности первого контура



Структура атомно-водородного кластера для переработки природного газа

Модульные ВТГР

Модули адиабатической конверсии метана

Производство топливной смеси $\text{CH}_4\text{-H}_2$:

Содержание водорода в смеси - до 20%

Объем производства - до 50 млрд.м³

Модули мембранной технологии получения

водорода

Размещение

Территории опережающего развития: ДВ побережье, Сахалин, Курильские острова

Поставки

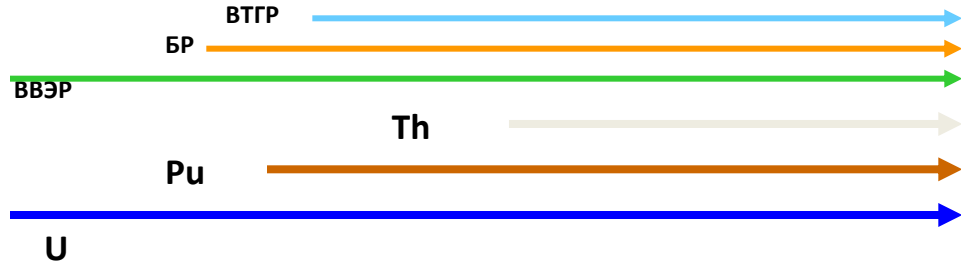
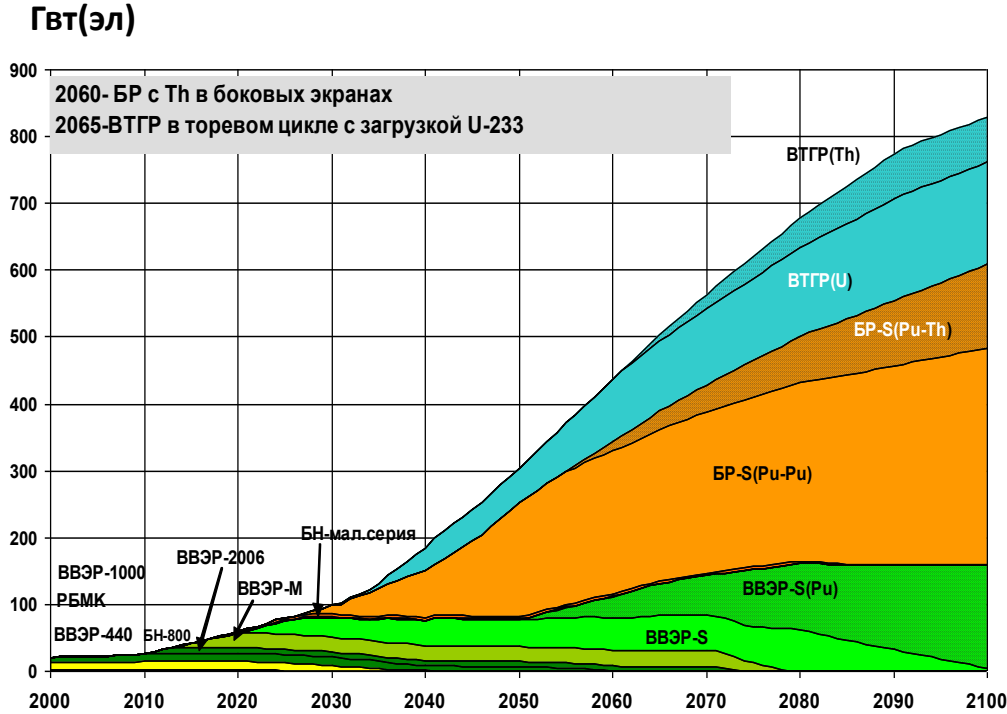
Япония, Р. Корея, страны АТР



Для конкретизации технико-экономических характеристик проекта предлагается разработать инвестиционный замысел строительства атомного энерготехнологического комплекса на основе ВТГР для производства водорода

Атомная энергетика России

оценки развития с учетом внешнего рынка



Создание термоядерного источника нейтронов (ТИН) позволит увеличить долю тепловых реакторов, уменьшив долю БР.
Сырьё: U?, Th?

Эффективность использования топлива

Реактор	Расход Уест т/ГВт	Начальная загрузка Pu т/ГВт	Избыточная наработка Pu кг/ГВт год
ВВЭР	170		
ВВЭР-S	135		
ВТГР	140		
БН		4.17	145
БР-S		2.83	345

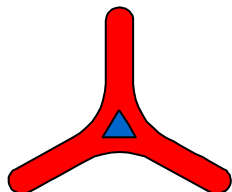
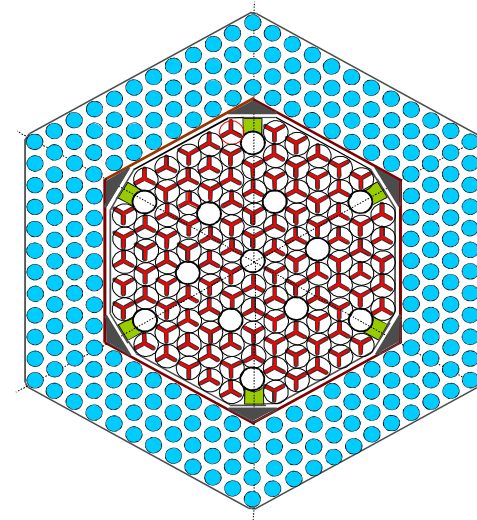
Этапы и направления развития атомной энергетики России

- Нарастивание атомных мощностей на основе усовершенствования технологий ВВЭР.
- Ввод в систему атомной энергетики быстрых реакторов с расширенным воспроизводством топлива и замкнутым топливным циклом.
- Внедрение атомных мощностей в производство водорода, в энергоемкие отрасли промышленности и в коммунальный сектор.



Конструктивная схема ТВС ВВЭР-Т

Схема Гетерогенной ТВС ВВЭР-Т с внутренней зоной ТВС запала и внешней зоной ТВС blankets

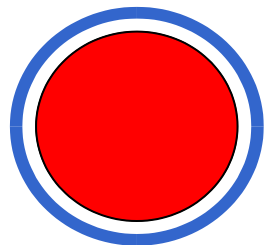


Эскиз твэла запала

Сердечник изготавливается на основе керамо-металлических или металло-металлических топливных композиций

Доля Pu/PuO₂ - 10%

Доля Zr - 90%



Эскиз твэла blankets

Торий-урановая оксидная топливная композиция

Доля урана ~11% (при обогащении по U-235 ~ 20%),

Доля тория ~ 89%

Концепция SiC-ТВЭЛ для ЛВР

Цель разработки SiC – ТВЭЛ:

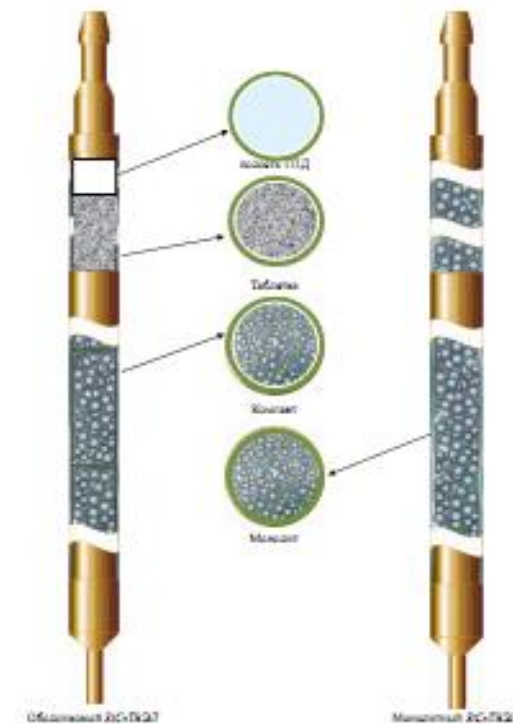
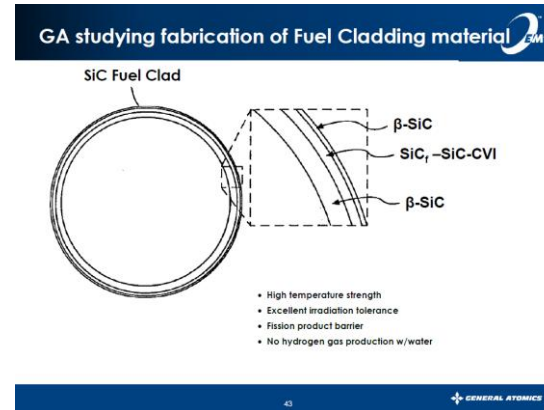
- повысить устойчивость топлива при аварийных режимах, благодаря химической стойкости SiC при высоких температурах в парах воды;
- улучшить эффективность топливного цикла, благодаря лучшим физическим характеристикам.

Условие разработки:

- совместимость с конструкцией ТВС ВВЭР;
- сохранение энергетических параметров реактора.

Варианты ТВЭЛ:

- оболочечный - оболочка: композит карбида кремния (SiC/SiC); сердечник: традиционные таблетки или компакты (частицы керамического топлива в матрице из SiC/SiC) (кер-кер компакт).
- монолитный - оболочка из SiC/SiC плотно соединена с сердечником типа кер-кер компакт.

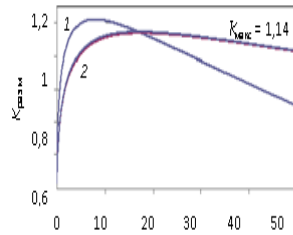


SiC-ТВЭЛ для ЛВР

Вопросы к размышлению

- **Разработка конструктивной схемы вариантов ТВЭЛ:**
 - оболочечный - оболочка: композит карбида кремния (SiC/SiC); сердечник: традиционные таблетки или компакты (частицы керамического топлива в матрице из SiC/SiC) (кер-кер компакт);
 - монолитный - оболочка из SiC/SiC плотно соединена с сердечником типа кер-кер компакт;
- **База данных, математическая модель и расчеты поведения SiC-ТВЭЛ при аварийных режимах.**

КОНЦЕПЦИЯ БЫСТРЫХ РЕАКТОРОВ С ОТКРЫТЫМ ТОПЛИВНЫМ ЦИКЛОМ



Р и с. 2. Зависимость размножающих свойств от выгорания для металлического урана ($\bar{K} = 1,14$) (обозначения кривых см. на рис. 1)

Мощность, МВт:

тепловая . . . 2800

электрическая . . . 1200

Удельная нагрузка, МВт/кг . . . 50

Объем активной зоны, м³ . . . 12

Число твэлов, тыс. . . . 420

Глубина выгорания, % . . . 10

Кампания, лет . . . 6

Годовая подпитка, т . . . 9

Изотопный состав топлива, %:

загружаемого

²³⁵U . . . 0,1

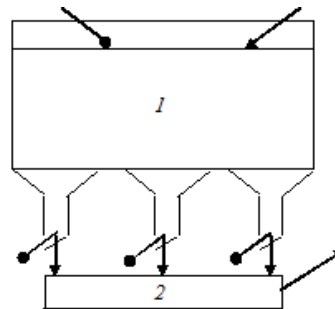
²³⁸U . . . 99,9

выгружаемого

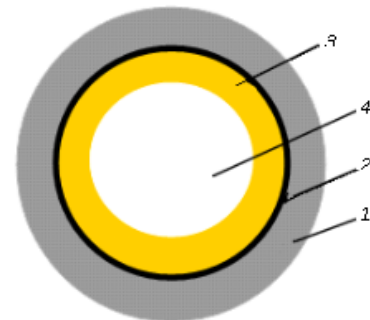
²³⁸U . . . 90,2

Pu . . . 9,3

Ридел . . . 7,8



Р и с. 4. Принципиальная схема реактора с засыпной активной зоной: 1 — активная зона; 2 — теплообменник; ●, → — контур циркуляции сферических твэлов и теплоносителя первого контура соответственно



Р и с. 5. Элементарная ячейка реактора: 1 — теплоноситель; 2 — оболочка; 3 — топливо — обедненный уран; 4 — газовая полость

Глобальная атомная энергетика и безопасность

**Факторы, влияющие на
уровень ядерной, радиационной,
экологической и физической безопасности и
снижения устойчивости к распространению**

- **Увеличение масштаба атомной энергетики**
- **Структурные изменения ядерного энергопромышленного комплекса**
- **Рост числа стран, использующих ядерную энергию, которые исторически не подготовлены к обращению с ядерной технологией (ядерная безопасность и гарантии нераспространения)**

Региональные ядерно-энергетические системы

Сценарий:

•выравнивание энергопотребления в мире за счет размещения ядерной генерации в развивающихся странах на уровне ~ 4000 кВт-часов в год

•размещение предприятий ЯТЦ (обогащение, фабрикация и его переработка) в США, Западная Европа, Россия, Япония, Индия, Китай.

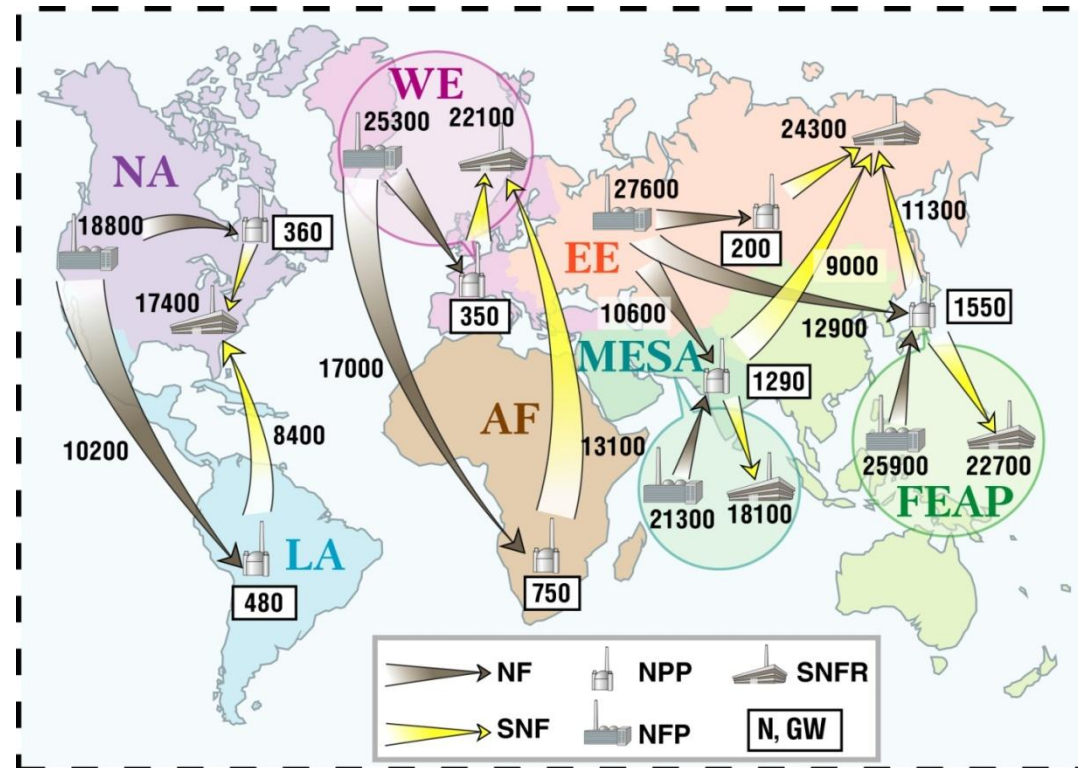
На рисунке показаны Установленные ядерные мощности, производства топлива и трансрегиональные потоки свежего и облученного ядерного топлива в 2100 г.

Масштаб проблемы

Объем производств ЯТЦ (до 100 000 тонн в год)

Транспортные потоки (до 50 000 тонн в год)

Мощности АС ~ 5000 ГВт(эл)).



Ядерная энергетика в новых странах

- Внедрение ядерной энергетики в странах, которые исторически не подготовлены к обращению с ядерной технологией (ядерная безопасность и гарантии нераспространения), будет осуществляться с помощью стран, владеющих ядерными технологиями.
- Необходимо разработать и обеспечить ряд условий поставки ядерных установок, которые бы помогли обеспечить ядерную и радиационную безопасность и гарантии нераспространения. Среди них:
 - Поставки АЭС с полным обеспечением экспортерами ядерных услуг (МЦЯТЦ, «от колыбели до могилы»): поставки свежего топлива, возврат облученного топлива, удаление с площадки АЭС РАО, снятие с эксплуатации.
 - Системы международного контроля, как условие поставки: объектами такого контроля должны быть все звенья АЭС и ЯТЦ, включая ядерные материалы (ЯМ), РВ и РАО в странах экспортерах и получателях.
 - Инструменты физической защиты и непрерывного контроля как обязательный элемент поставки.
 - Унифицированные компьютерные системы учета и контроля ЯМ, РВ и РАО, в сочетании с постоянным дистанционным мониторингом и детектированием РУ, ЯМ, РВ, РАО.

Международные центры ядерного топливного цикла

- **Цель** – помочь развивающимся странам использовать атомную энергию в мирных целях, решая проблемы экономичности, безопасности, нераспространения

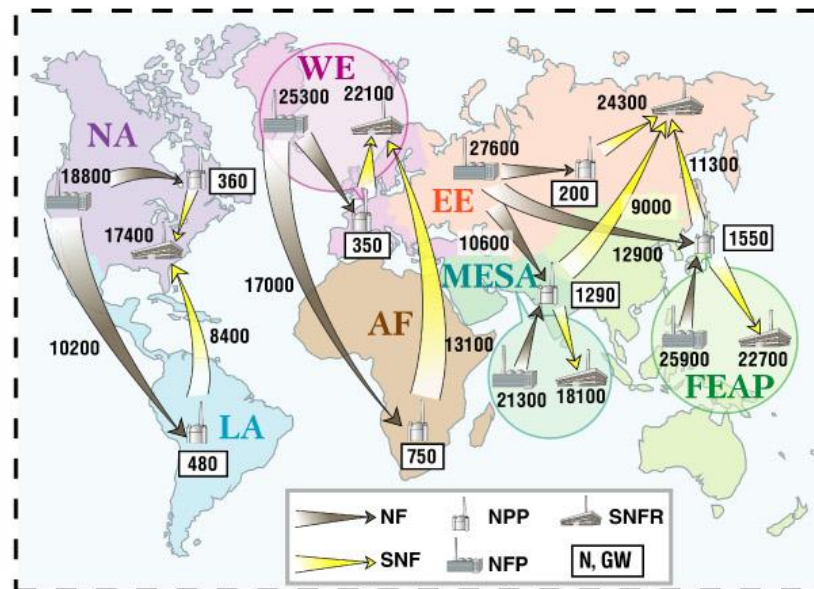
- **Функции:**

Банк и производство ядерного топлива,

Хранилище и переработка ОЯТ,

Ядерные энерго-технологические центры воспроизводства топлива, выжигания актинидов, производства водорода

Лизинг ядерного топлива, лизинг ЯЭУ



Глобальная атомная энергетика и безопасность

Вопросы к размышлению

- Как дать слабо развитым странам возможность использовать плоды атомной энергетики?
- Строю, владею, эксплуатирую – продаю энергию?
- Произвожу с помощью реакторов в МЦЯТЦ энергоноситель – продаю?