

Международная научно-практическая конференция
молодых специалистов, учёных и аспирантов по
физике ядерных реакторов (Волга-2026)
Национальный исследовательский ядерный университет
«МИФИ»

*Научно-исторический круглый стол Ядерного общества
(совместно с Музеем мировой атомной энергетики)*

Влияние внешних условий на изменение принципов развития ИЯЭС и
системные требования к БР

Андрианова Е.А., Бландинский В.Ю., Кормилицын М.В., Кузенкова Д.С.,
Субботин С.А.

НИЦ "Курчатовский институт", Москва, Россия

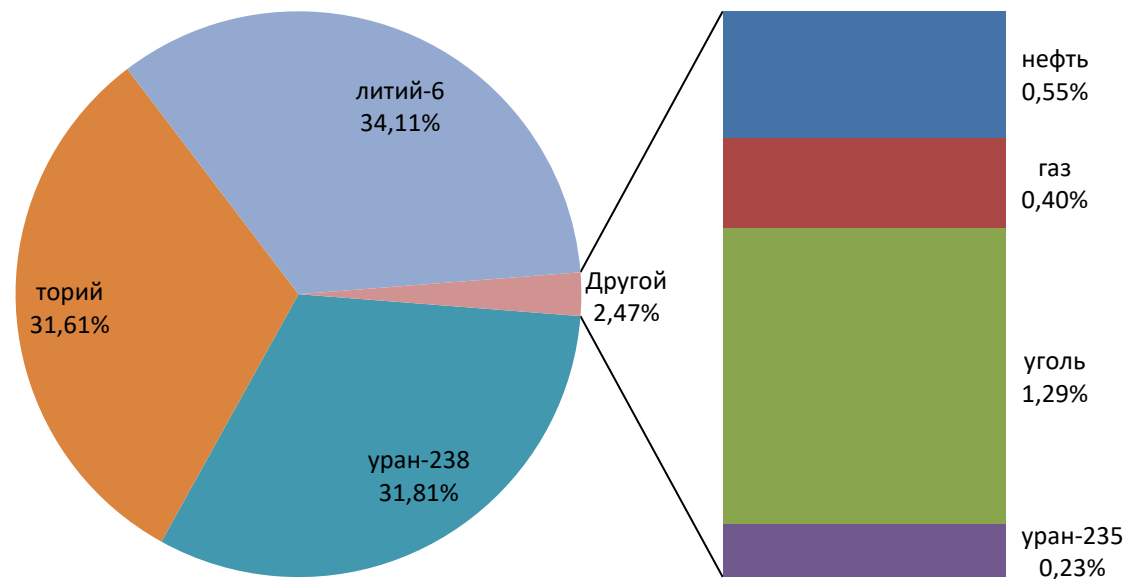
31 августа – 4 сентября 2026

Этапы развития:

В мире заканчивается первый этап конкурентного создания отдельных энергетических установок:

- **ЯЭ - побочный продукт развития оборонного направления: поиск ресурсов, обогащение, изготовление топлива, облучение, переработка.**
- **Конкурентное производство энергии**
- Использование закономерностей, свойств, конструкций, технологий, развитых «до того».
- Потребление запасенных природных ресурсов для непосредственного получения выгод и прибылей при возможностях перенесения рисков на природу и общество в целом.

Мировое распределение энергетических ресурсов, %



Исходные предположения:

согласно оценкам «Красной книги» [2] предполагается, что мировые ресурсы тория составляют 7 млн. т; тритий производится только из лития-6, мировые ресурсы лития приняты по данным U.S. Geological Survey [4].

Мировые энергетические ресурсы, млрд. т.н.э.

нефть	газ	уголь	уран-235	уран-238	торий	литий-6	итого
236	169	552	98	13577	13489	14555	42676

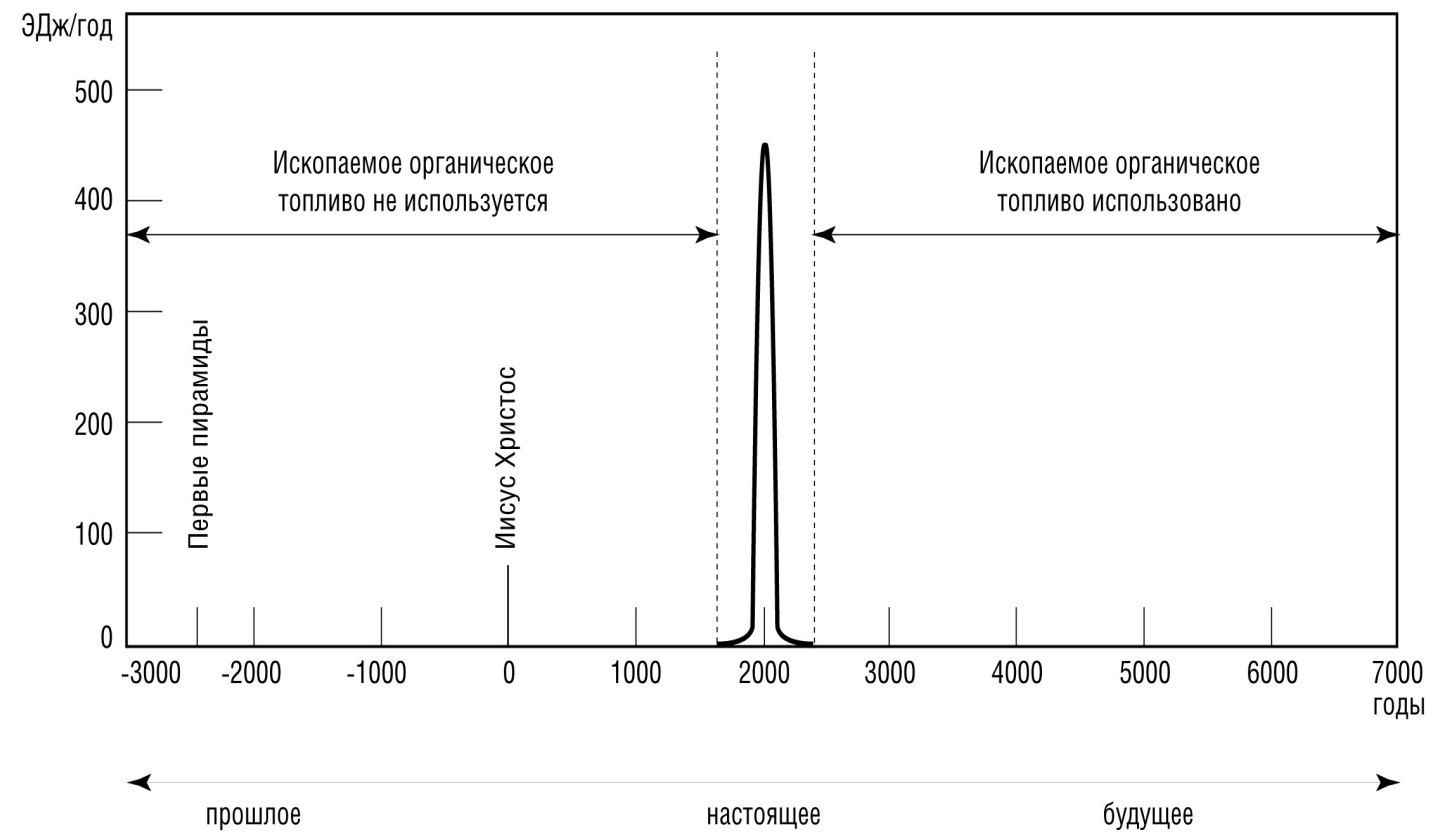
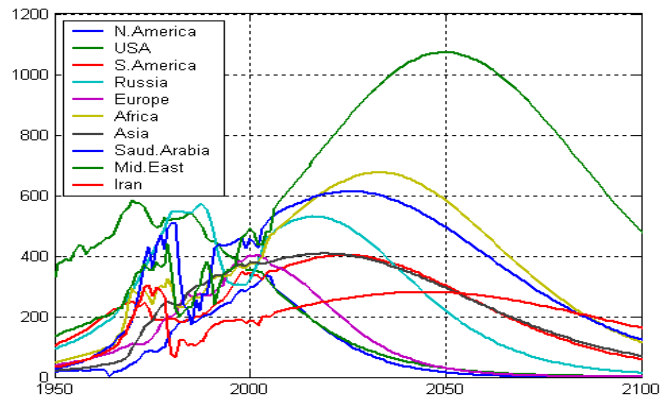
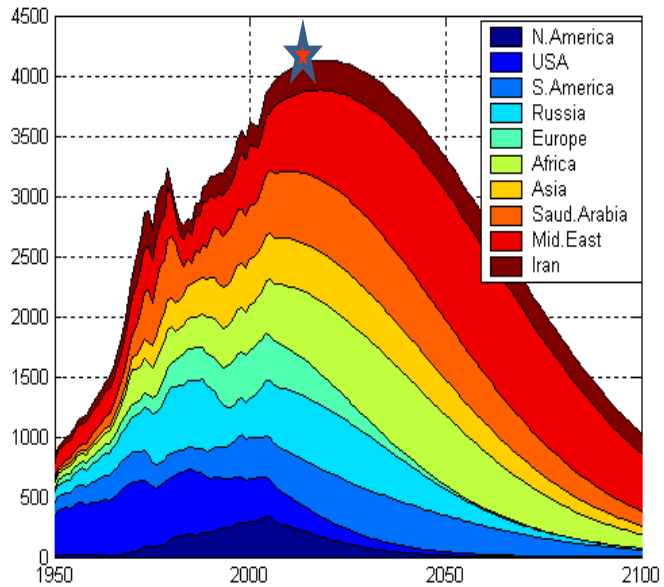


Рис. 1-2. Эпоха органического топлива

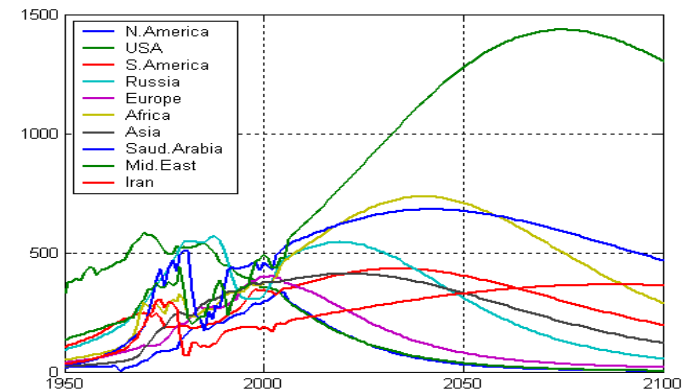
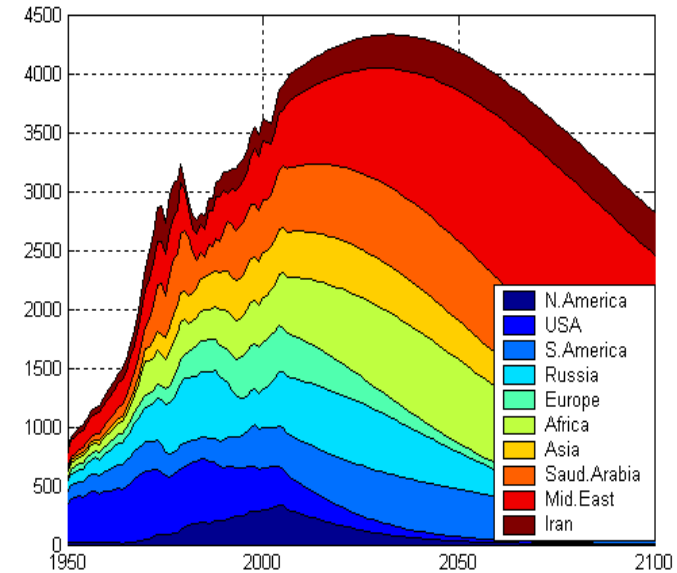
Почему никого не пугает?

Добыча нефти (2005: уже добыто 152 млрд.. т ;доказанные резервы 179 млрд.. т)

450 bill. t

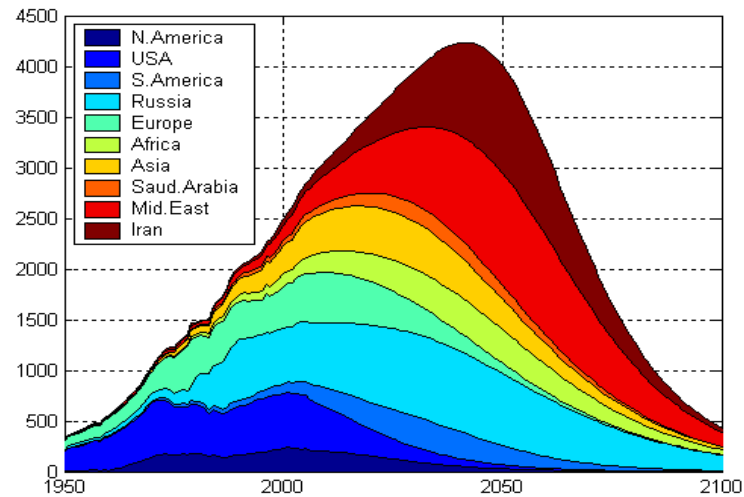


800 bill. t

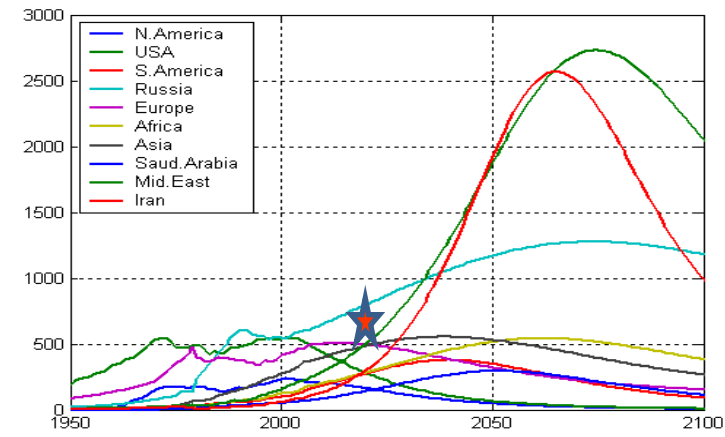
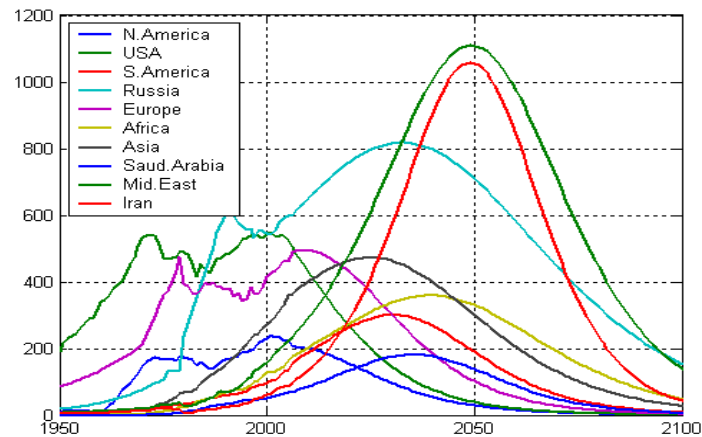
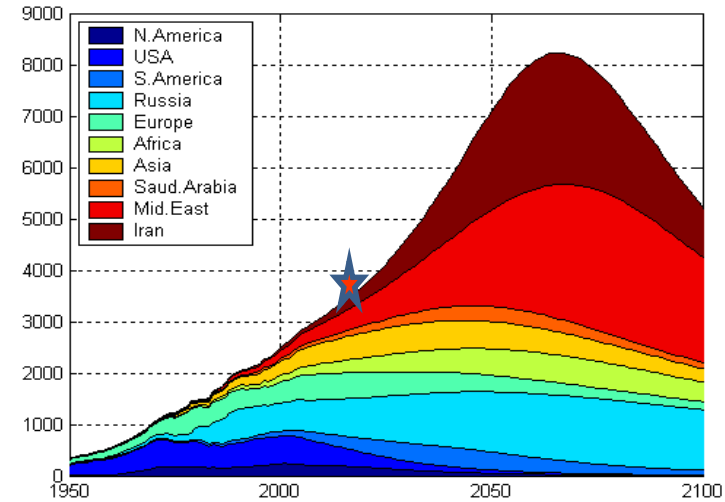


Добыча газа (2005: уже добыто 86 трлн. куб. м ; доказанные резервы 180 трлн.. куб. м)

300 trill. cub. m



800 trill. cub. m



Первый этап развития ЯЭ наложился на область принципиальной неустойчивости экономики, материальной основой которой стало использование невозобновляемых ресурсов.



Estimated share of GDP spent on energy end-use

% of GDP

1/3 < >



Source: [OECD Economic Outlook, November 2022](#)

Настоящее

- Сейчас в Море почти 400 ГВт эл. реакторов на тепловых нейтронах, использующих уран 235 для получения энергии.
- Накоплено и постоянно увеличивается огромное количество отходов обогатительных производств (более 2 млн т);
- наработано более 300 тыс. т ОЯТ, в котором содержится более 3 тыс. т плутония, которого могло бы уже хватить на ввод примерно 300 ГВт эл. БР.

Но пока так и не появились новые адекватные требования со стороны общества и системы ЯЭ к БР, которые все это время развивались в направлении совершенствований: то безопасности, то конкурентоспособности, как с существующими ЛВР, так и с ВИЭ.

По сути «требования» к БР рождались самими создателями различных конструкций и направлений БР, которые соревновались друг с другом, так и не выясняя того, что же нужно от БР системе ЯЭ.

Второй этап развития ЯЭ:

- Ближайшая перспектива: Основа устойчивого развития энергетики.
- Среднесрочная перспектива:
 - Производство энергии как побочного и неизбежного продукта получения инновационных нуклидов и материалов в нейтронном поле.
 - Плата за энергию служит возврату инвестиций в технику и технологии.
- Дальнесрочная перспектива: Практически нулевая стоимость энергии при производстве нуклидов позволяет устранить источники многих конфликтов и рассматривать избытки нуклидов, наработанных для оборонных целей, как инвестиционный потенциал для развития БР и введения тория в ЯЭ.

Проявляются различные проблемы и сложности (экономические, политические, правовые, естественнонаучные) перехода ко второму этапу развития ядерных технологий в рамках развития системы ЯЭ, отвечающей требованиям устойчивого развития.

При этом стоит иметь в виду, что:

- **Передовые технологии никогда не могут быть совершенными при своем возникновении и чрезмерная нормативная регуляция, свойственная ядерным технологиям, проявляет себя весьма дезориентирующим фактором на этапе развития ЯЭ как системы.**
- **На этапе развития ЯЭ как системы инновационные образцы передовых технологий должны не столько демонстрировать выгоды, конкурентоспособность и безопасность самих этих конструкторских и технологических решений, а помочь выявлять и решать проблемы, которые нет возможности постичь на эксперименте и которые проявляются только в реальном окружении в рамках и масштабах тех гигантских систем, институтов и традиций: экономических, правовых и нравственных, в которые должны вписываться не столько отдельные установки, а крупномасштабные инновационные системы.**

Занимаясь экономической деятельностью, мы не знаем ни потребностей других людей, ни источников получаемых нами благ.

Практически все мы помогаем людям не только с которыми не знакомы, но о существовании которых и не подозреваем. И сами мы постоянно пользуемся услугами людей, о которых нам ничего не известно.

Все это становится возможным благодаря тому, что, подчиняясь определенным правилам поведения, мы вписываемся в гигантскую систему институтов и традиций: экономических, правовых и нравственных.

Фридрих Август фон Хайек.



Рис.1.5. Междисциплинарный характер институциональной экономики.

Новым источником неэффективности экономики стала невозможность управления рисками

В частности за счет невероятной сложности широкого спектра новых финансовых продуктов и рынков, возникших благодаря развитию средств обработки данных и коммуникаций.

А.Гринспен «Карта и территория. Риск, человеческая природа и проблемы прогнозирования» ООО «Алина Паблишер», 2015 г.

Деятельность человека, которая связана только с опасностями и не приносит никаких выгод, подлежит запрету в рамках правового режима, а не регулированию. Таким образом, основной особенностью законодательства в области использования ядерной энергии является то, что оно учитывает как риски, так и выгоды. (Справочник по ядерному праву, МАГАТЭ, Вена, 2006).

Изменение стратегических целей:

- Первоначальная стратегическая задача долговременных планов масштабного развития ЯЭ при ограниченной ресурсной базе природного урана заключалась в переходе на эффективное использование урана ^{238}U за счет создания реакторов на быстрых нейтронах, способных потреблять плутоний при КВ больше единицы. При этом выдвигались довольно жесткие требования к времени удвоения мощностей этих реакторов, работающих в режиме самообеспечения плутонием. С точки зрения нейтронной физики в плане масштабного развития БР обладали явными преимуществами по сравнению с ТР по темпам развития в условиях самообеспечения.
- Но с тех пор многое изменилось в том политическом, экономическом, технологическом окружении ЯЭ, которое допустило масштабное развитие ТР и оставило БР буквально в зачаточном состоянии. В частности этому способствовали: увеличение доступности природного урана и методов его обогащения; успешность применения донорных технологий, материалов, теорий, баз данных, научных подходов для создания легководных реакторов; и что не менее важно, экономических конкурентных механизмов, приемлющих эффективное использование урана ^{235}U для получения энергии и тормозящих вовлечение урана ^{238}U и тория ^{232}Th , в силу превалирования краткосрочных целей, интересов и высоких норм получения выгод на инвестируемый капитал.

«Ядерная энергетика и ее роль в техническом прогрессе» -
Генеральный адрес, зачитанный на открытии VII Мирового
энергетического конгресса, 1968 г.

А. П. Александров:

«Накопление плутония в реакторах на тепловых нейтронах имеет первостепенное значение для будущего энергетики, хотя сейчас экономически выгоднее путем глубокого выгорания ядерного горючего достигать более низкого значения стоимости топливной составляющей, что сильно уменьшает выход плутония.

Однако этот процесс управляем и может быть приведен к оптимизации соответствующей политикой цен и налогов.

Будущая крупная атомная энергетика должна быть способной, в смысле ядерного топлива, к саморазвитию... с подачей в топливный цикл извне только недефицитного U-238...

Предпосылки к постановке задачи

«Саммит тысячелетия» 6 - 8 сентября 2000 Президент России В.Путин:

«Развитие крупномасштабной энергетики на основе новых ядерных технологий позволит сохранить органические ресурсы планеты для их неэнергетического использования настоящим и будущими поколениями, стабилизировать, а в дальнейшем и уменьшить влияние парникового эффекта, экономически и экологически оптимально обеспечить рост мирового энергопотребления.

Решать все эти задачи отдельно взятому государству чрезвычайно сложно. Мы предлагаем объединить усилия всех заинтересованных стран под эгидой Международного агентства по атомной энергии в рамках международного проекта.

Россия готова взаимодействовать со всеми странами на этом стратегическом направлении по энергетическому обеспечению устойчивого развития человечества, кардинальному решению проблем нераспространения ядерного оружия и экологическому оздоровлению планеты Земля.»

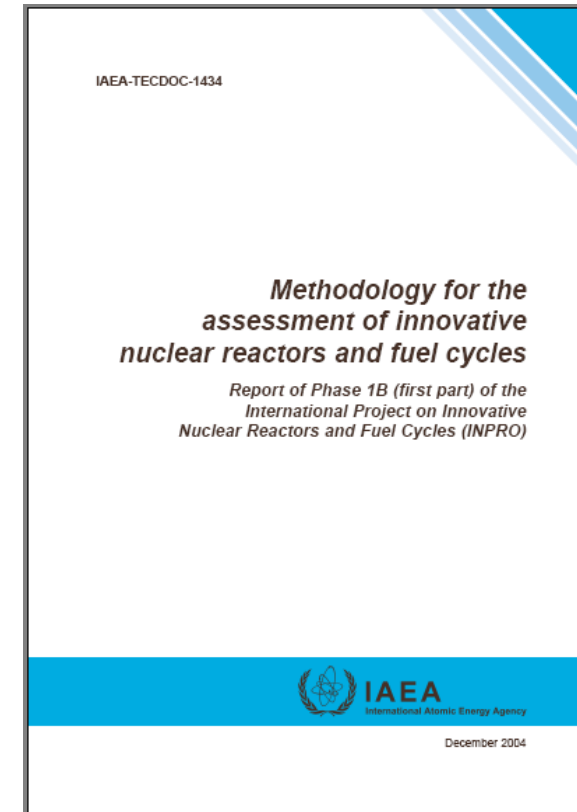
Международный ИНновационный ПРОект (ИНПРО) МАГАТЭ по разработкам АЭС и ЯТЦ для будущей ЯЭ

Методология INPRO является инструментом, который может использоваться:

- Для анализа ИЯЭС на предмет ее способности выполнить требования устойчивого развития;
- Для сравнения различных ИЯЭС, чтобы найти предпочтительные или оптимальные ИЯЭС, удовлетворяющие требованиям данного государства;
- Для определения НИР, ОКР, демонстрационных установок, требуемых для совершенствования имеющихся установок и создания недостающих новых компонентов ИЯЭС.

Оценка должна включать все компоненты системы ИЯЭС для того, чтобы получить целостное видение и быть уверенным в том, что система отвечает требованиям устойчивости.

Методология ИНПРО IAEA-TECDOC-1434



Базовые группы «требований» «Международного проекта по инновационным реакторам и ядерным топливным циклам - ИНПРО»:

- Экономика.
- Отходы.
- Безопасность.
- Окружающая среда, ресурсообеспеченность.
- Нераспространение.
- Инфраструктура.

Постановка задачи

Саммите Энергетической безопасности (Санкт-Петербург, 2006 г.) :

«Те из нас, кто уже разработал или рассматривает планы, связанные с использованием атомной энергии и/или развитием безопасной ядерной энергетики, считают, что ее развитие будет способствовать глобальной энергетической безопасности, позволяя одновременно сократить загрязнение атмосферы и решить проблему изменения климата...

Разработка инновационных ядерных энергетических систем считается важным элементом развития эффективной и безопасной ядерной энергетики. В этом отношении мы высоко ценим взаимодополняющую деятельность в рамках проекта INPRO и Международного форума «Поколение IV»...

Мы подтверждаем цель - обеспечить всем странам надежный доступ к ядерной энергии на конкурентной основе, в соответствии с обязательствами и стандартами в области нераспространения.»

Предпосылки к новой итерации постановки задачи

Владимир Путин «О наших экономических задачах», 30.01.2012 :

«Время национальных рынков прошло. Уютных ниш больше не будет. В высокотехнологичном производстве существует только один – глобальный рынок.»

Юбилейная сессия ООН в сентябре 2015 года, В.В.Путин:

«...среди проблем, которые затрагивают будущее всего человечества, такой вызов, как глобальные изменения климата.

Нам нужны качественно иные подходы. Речь должна идти о внедрении принципиально новых, природоподобных технологий, которые не наносят урон окружающему миру, а существуют с ним в гармонии и позволят восстановить нарушенный человеком баланс между биосферой и техносферой...

Нам необходимо объединить усилия, и прежде всего тех государств, которые располагают мощной исследовательской базой, заделами фундаментальной науки.

Предлагаем созвать под эгидой ООН специальный форум, на котором комплексно посмотреть на проблемы, связанные с исчерпанием природных ресурсов, разрушением среды обитания, изменением климата. Россия готова выступить одним из организаторов такого форума.»

Изменение постановки задачи

Изменились не только условия, но и постановка задачи для дальнейшего развития БР:

- в основе развития ядерных технологий лежит процесс превращения урана 238 и тория 232 в продукты деления при помещении их и продуктов их трансмутации (плутоний, америций, кюрий, протактиний, уран-232, 233, 234, 235, 236) в нейтронное поле, которое можно организовать в нужных масштабах пока только с помощью своего рода инвестиций урана 235 в качестве источника нейтронов;
- наиболее эффективно воспроизводство нейтронного потенциала можно организовать в уран-ториевом топливном цикле в реакторах на тепловых нейтронах и в уран-плутониевом топливном цикле в реакторах на быстрых нейтронах.



Многокомпонентная система ядерной энергетики с замкнутым топливным циклом для всех актинидов

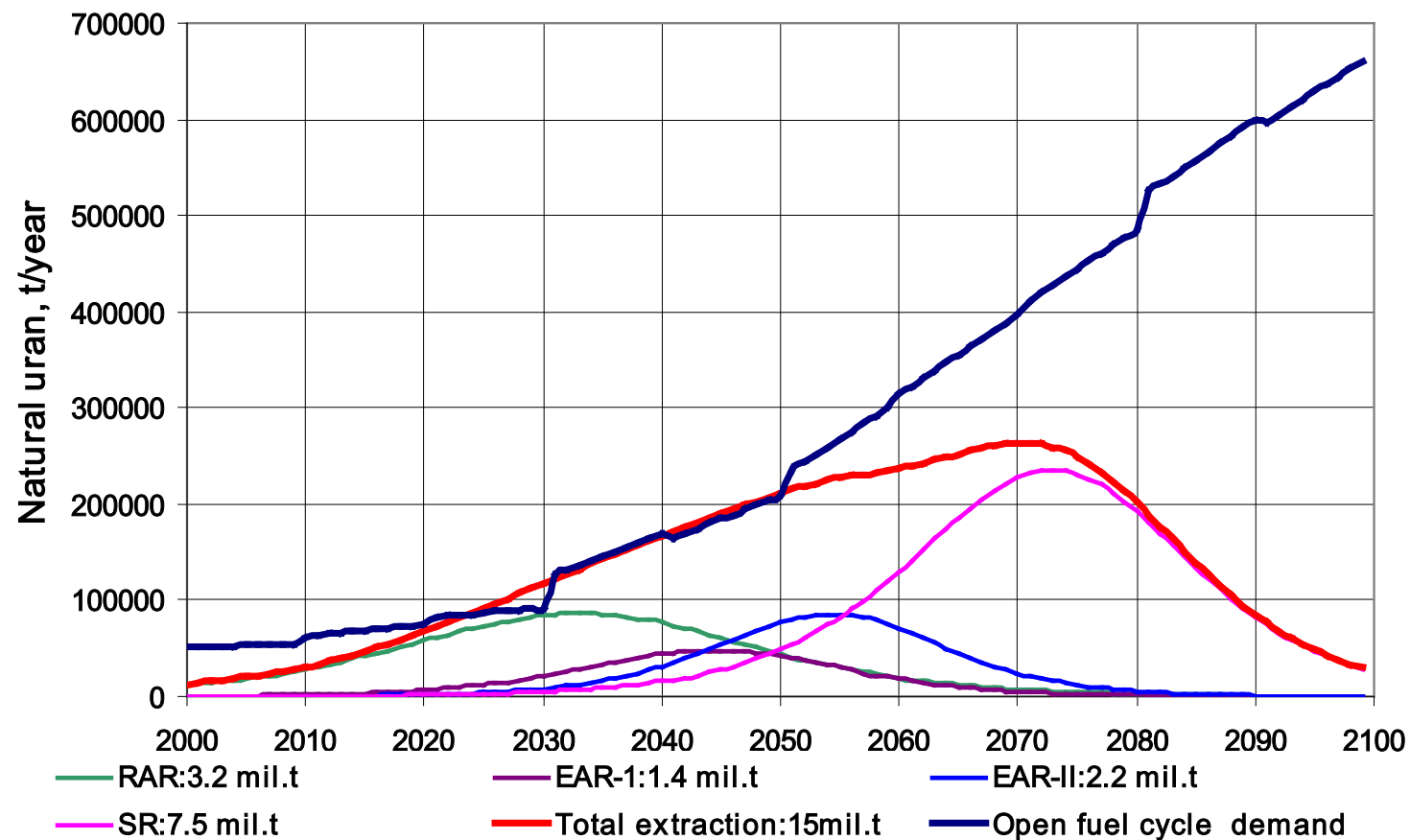
Центральная стратегическая задача ЯЭ РФ - создание ЗТЦ для решения проблемы накопления ОЯТ и максимального использования сырьевого потенциала урана-238 и тория-232 на базе ТР и БР.



Многокомпонентность наряду с возможностями реализации различных топливных схем в реакторах создает широкие возможности маневра в структуре ядерного топливного цикла, которые могут в приемлемые временные периоды компенсировать возможные риски.

Потребности в природном уране (открытый топливный цикл)
2030 г. - 600ГВт и 2050 г - 1500 ГВт

Uranium demand and annual extraction potential .



Адаптация постановки задачи

- ТР уже есть и их достаточно много для того, чтобы приступить к масштабному вовлечению тория в ЯТЦ.
- Системные модели для расчета интегрального нейтронного баланса при переводе всего добываемого урана и тория в продукты деления позволяют оценить требуемую асимптотическую структуру системы ЯЭ.
- Асимптотические оценки позволяют выдвинуть рекомендации к требованиям при создании конструкций реакторов различных типов.
- Сложности организации нейтронного баланса системы ЯЭ однозначно приводят к рекомендациям по минимизации количества продуктов деления в нейтронном поле (снижение глубин выгорания топлива для ТР и БР и он-лайн выведение ПД из ЖСР), использованию воспроизводящих экранов в БР, замыканию ЯТЦ по МА с помощью ЖСР.

Сдерживающие факторы

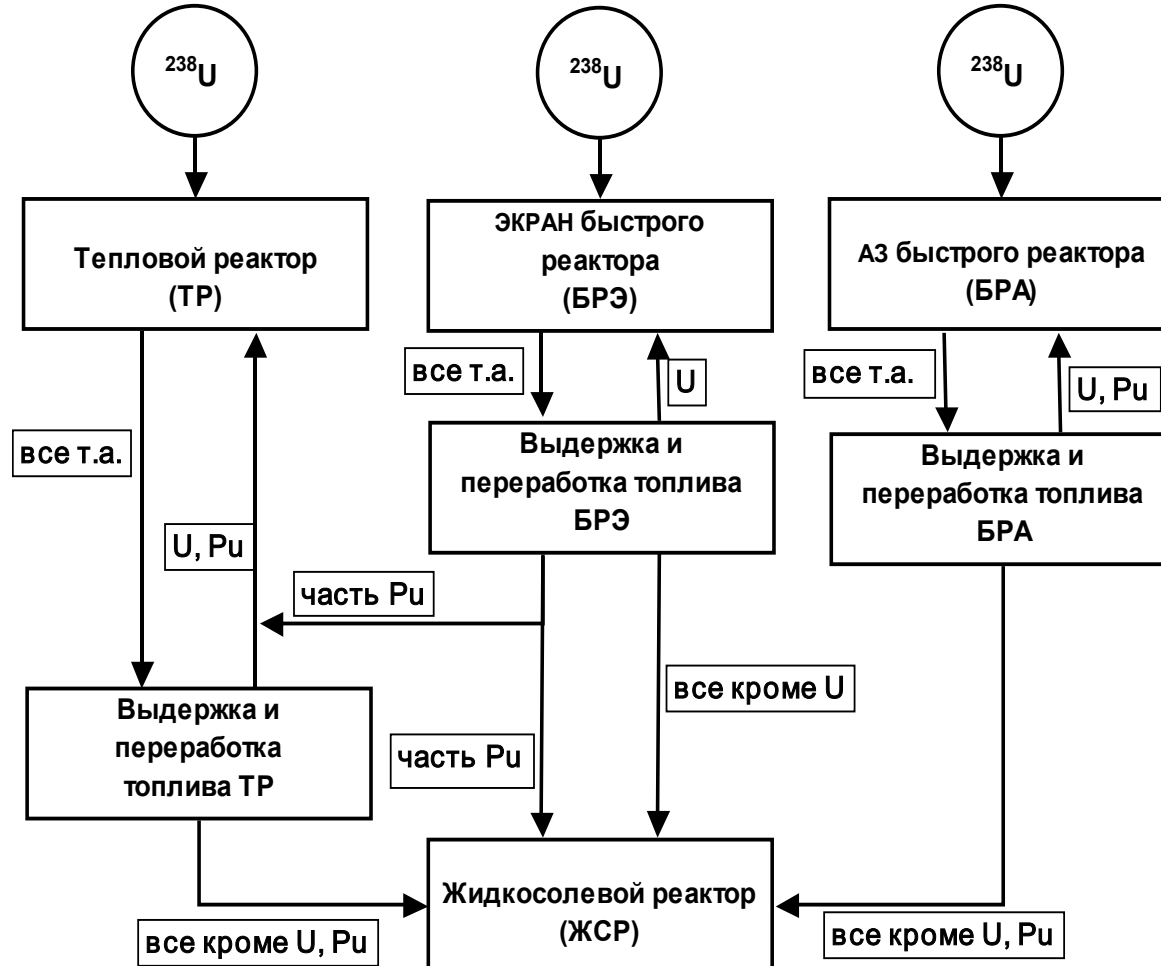
- Но низкие темпы саморазвития БР, большая их доля в системе для достижения КВ системы больше 1 выливаются в длительные временные интервалы и огромные затраты на их ввод и создание соответствующих технологий замыкания ЯТЦ.
- И существующие сейчас ТР, заботясь о собственном будущем и имея длительные жизненные циклы пока не осознают, но должны осознавать необходимость вложений инвестиций в создание технологий ЯТЦ и БР с соответствующими параметрами воспроизводства нейтронного потенциала, при этом и сами ТР должны изменить соответствующим образом свой режим работы и даже начать использовать торий и уран 233.



Структура инновационных технологий ЯЭ

- Новые типы реакторов на тепловых нейтронах в широком диапазоне мощностей с гибким топливным циклом для различных потребителей.
- Реакторы на быстрых нейтронах для базового производства энергии, воспроизводства топлива (Pu, уран 233), замыкания топливного цикла по U и Pu.
- Жидкосолевые реакторы для замыкания топливного цикла по минорным актинидам и вовлечения тория в ЯЭ.
- Гибридные системы «синтез-деление» для повышения темпов вовлечения урана 238 и тория 232 в топливный цикл
- «Передача» нейтронов от урана 238 в торий 232 – новая «физика»

Структура ИЯЭС для варианта уран-плутониевого ЯТЦ



Доля мощности
реакторов в системе

59% ТР

33% БР

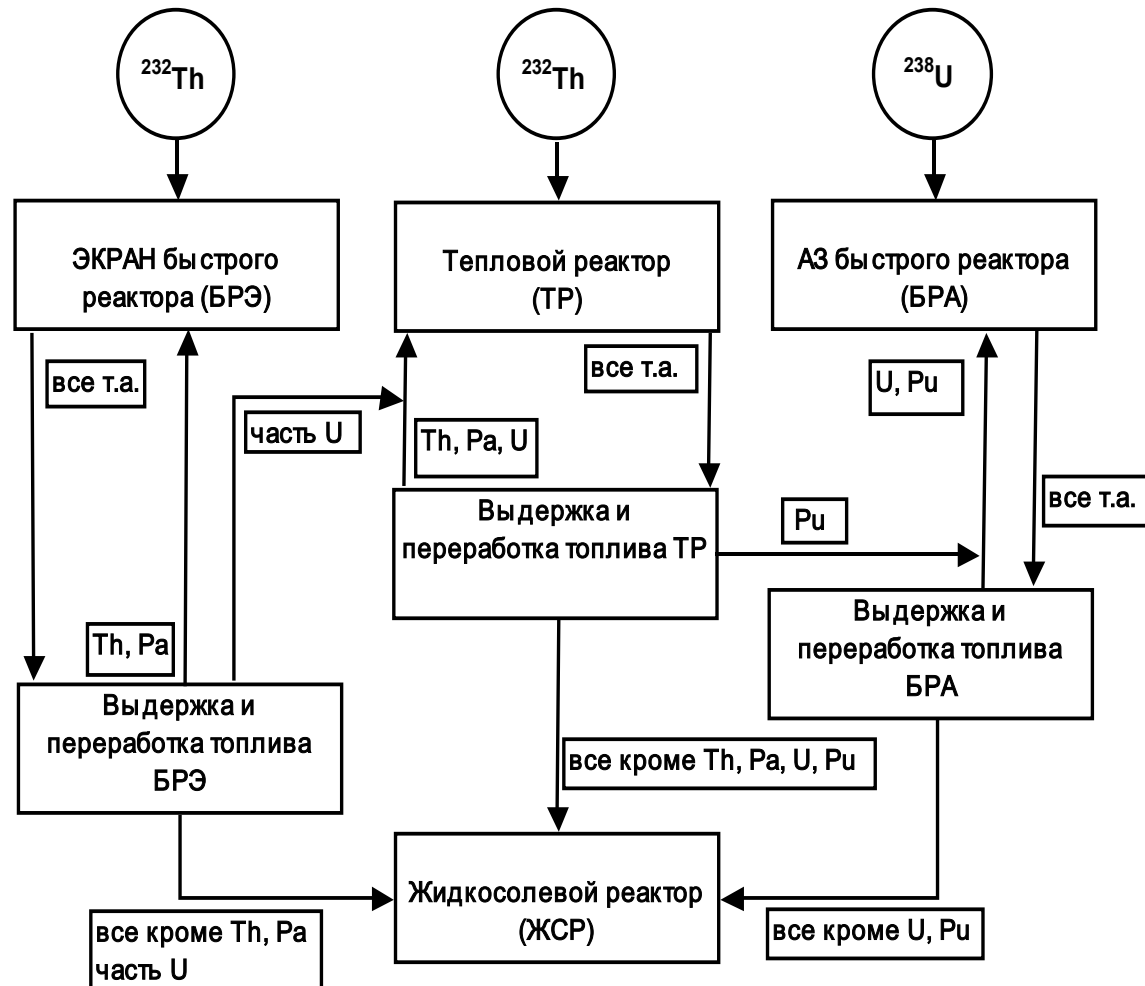
8% ЖСР

Количество топлива
на 1ГВт(э)

**Всего в ИЯЭС
285.0 т т.н.**

**Во внешнем ЯТЦ
175.3 т т.н.**

Структура ИЯЭС для варианта уран-плутоний-ториевого ЯТЦ



Доля мощности реакторов в системе

88% ТР

9% БР

3% ЖСР

Количество топлива на 1ГВт(э)

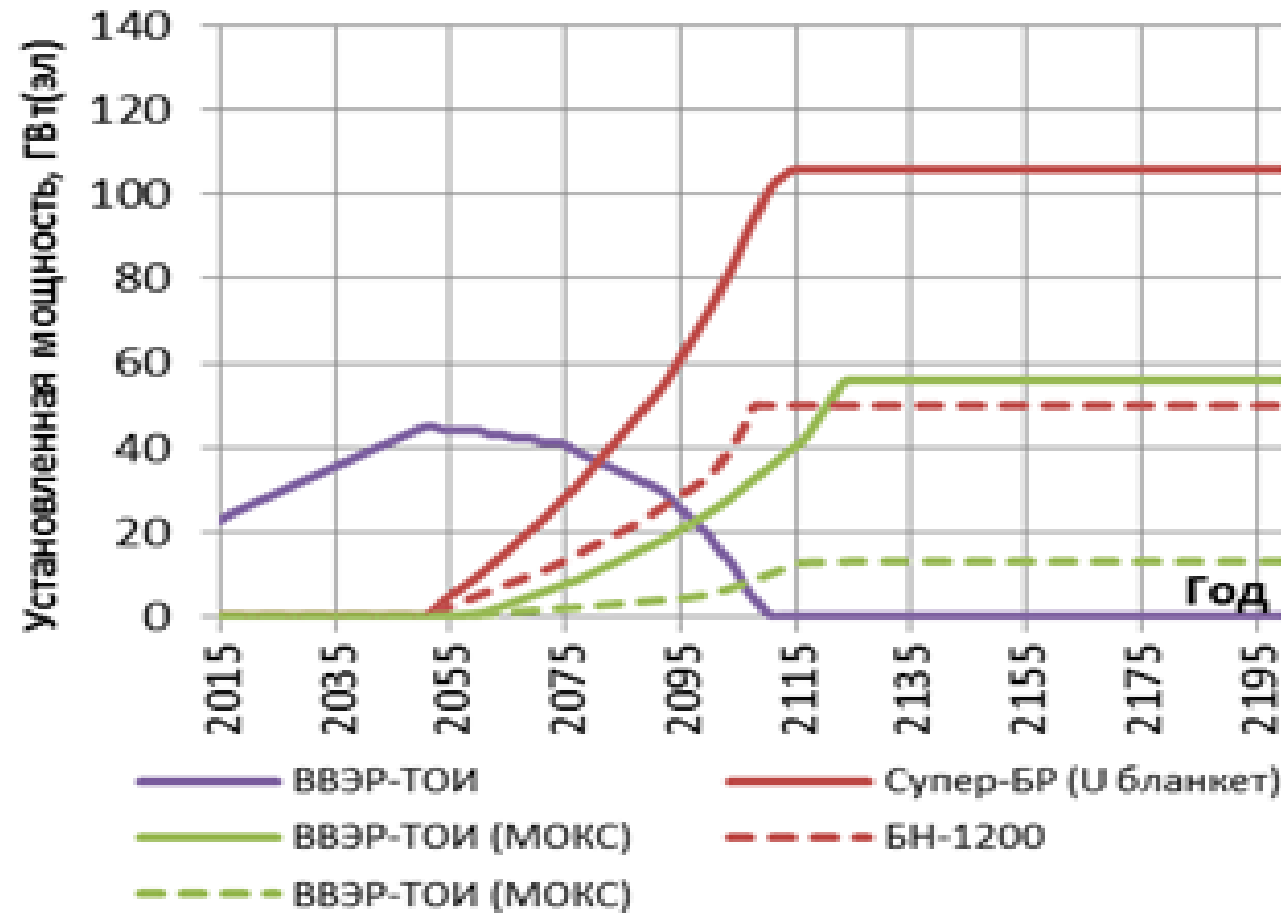
Всего в ИЯЭС

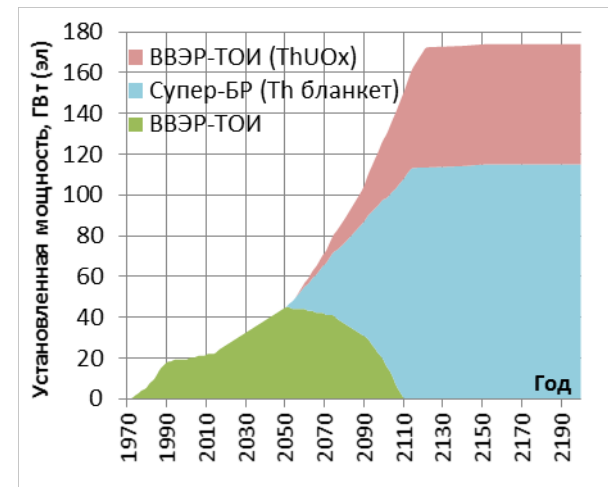
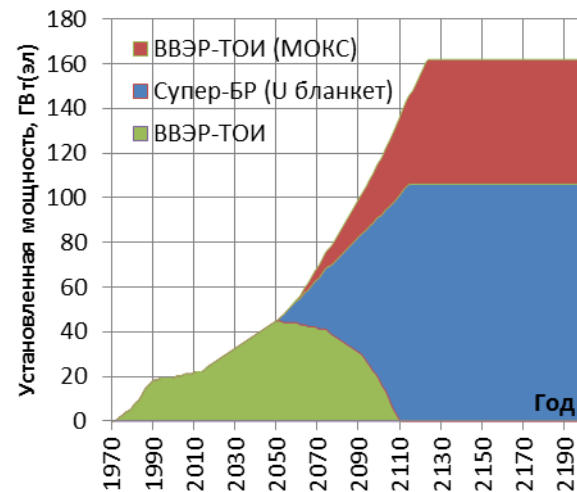
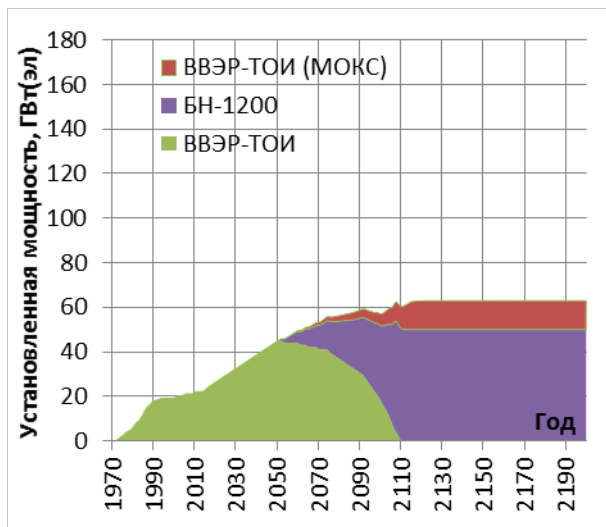
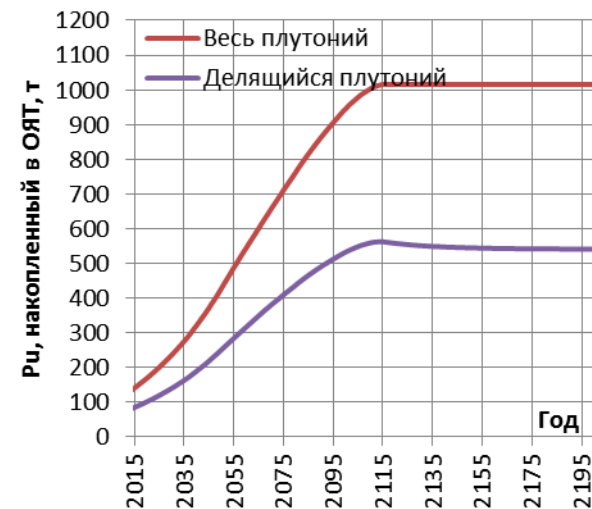
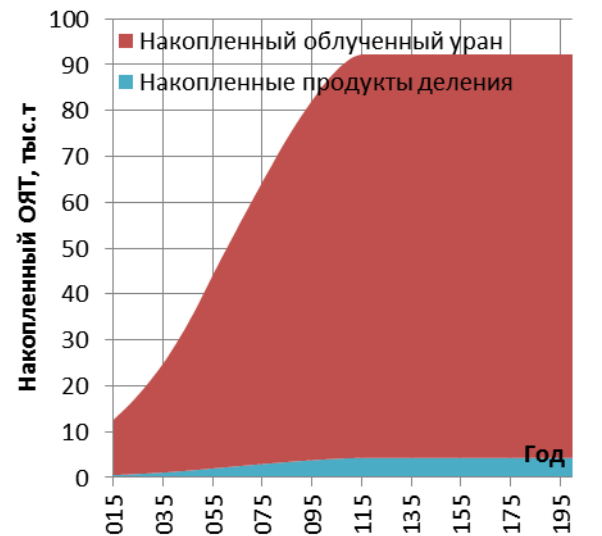
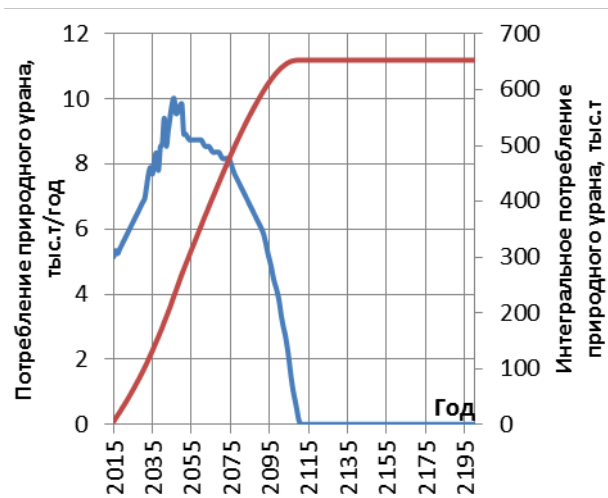
136.2 т т.н.

Во внешнем ЯТЦ

87.8 т т.н.

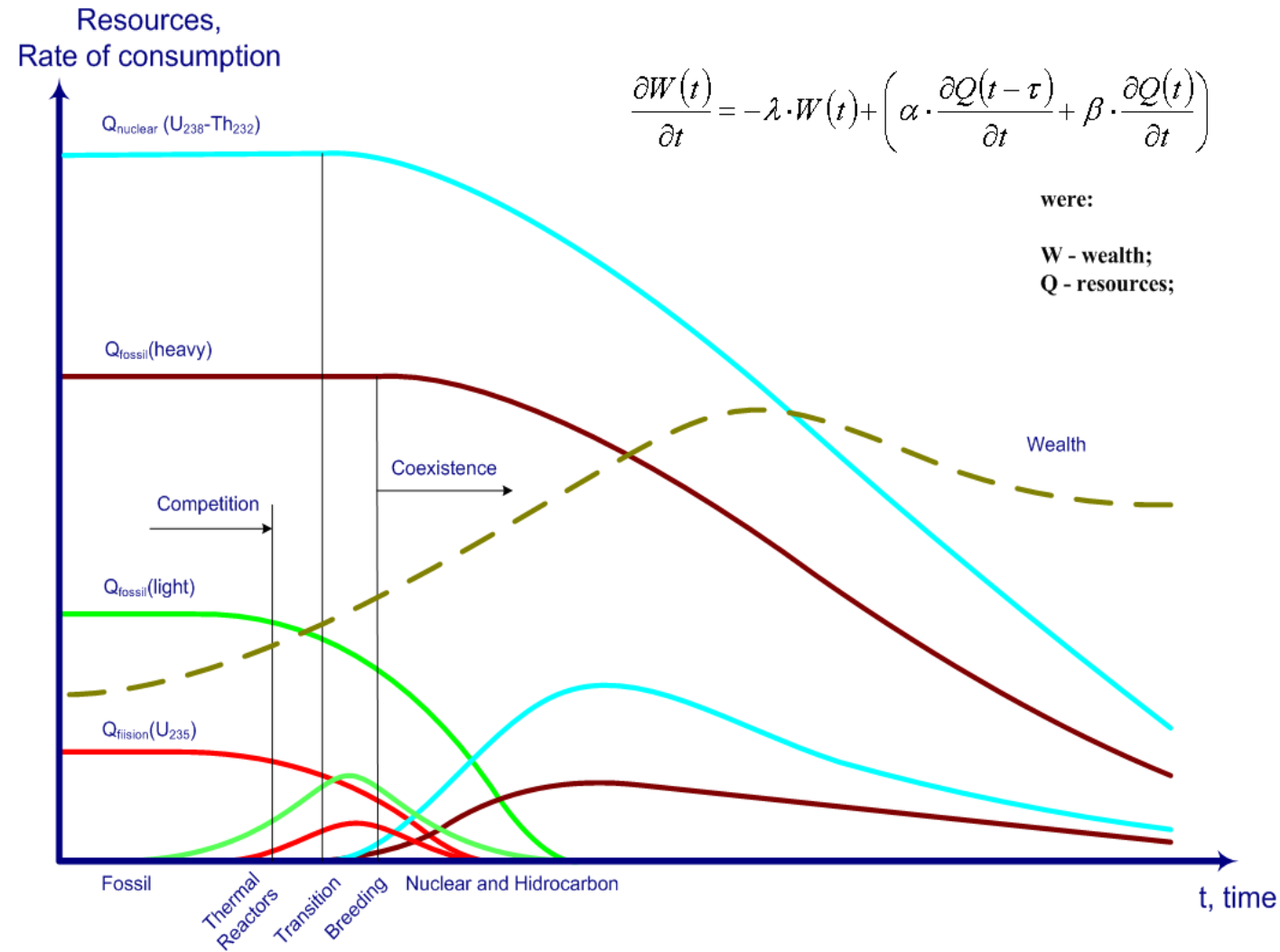
**Влияние характеристик БР на масштабы развития
двухкомпонентной ЯЭ**
(программный комплекс *DESAE* – расчет материальных балансов и
экономических показателей)



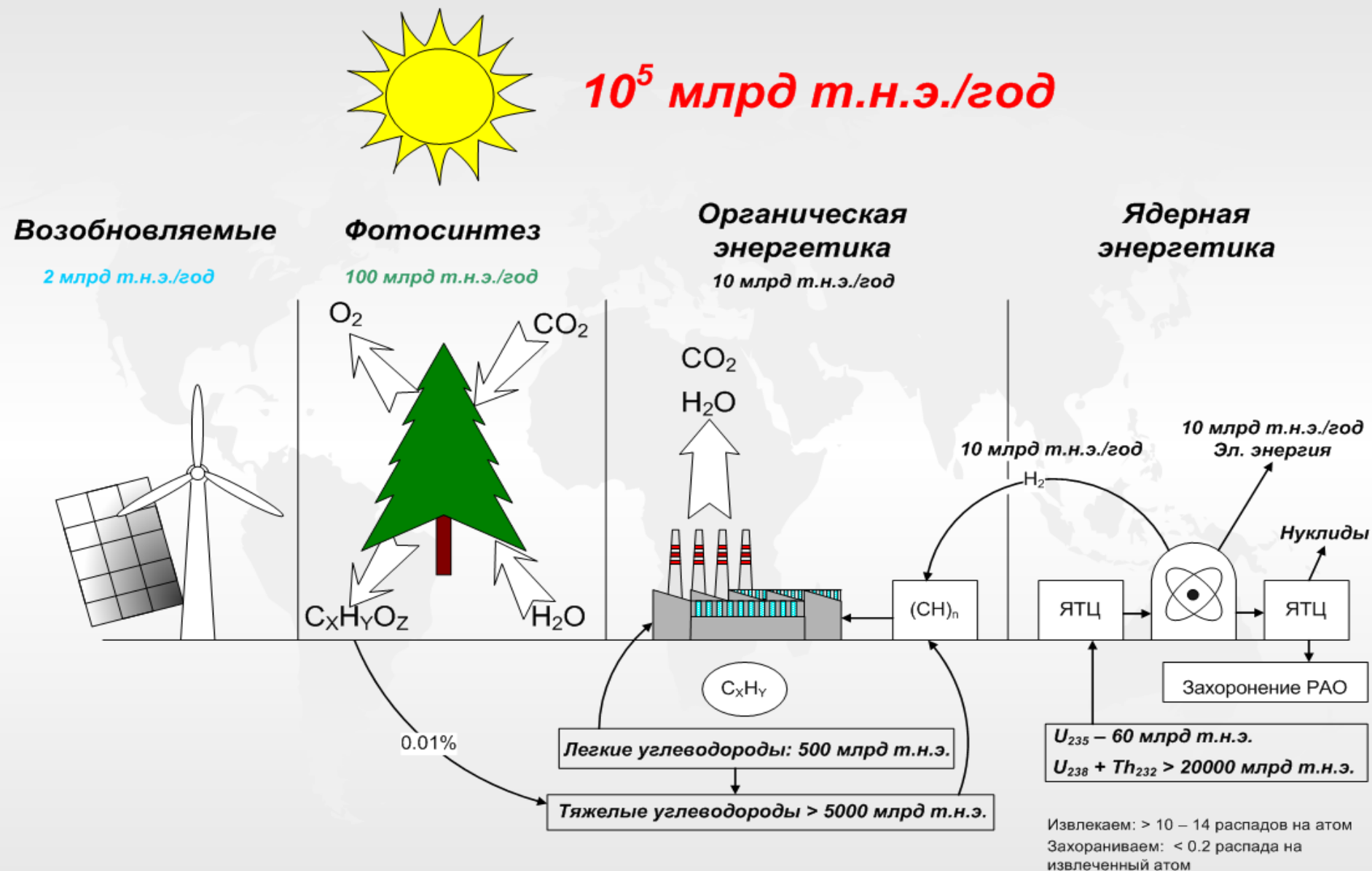


Примеры влияния изменений требований к БР со стороны ТР

Схема перехода от конкуренции энерготехнологий к их взамосогласованному сосуществованию



Потенциальные возможности ЯЭ, как основы устойчивого развития



В.В.Путин, Давосский форум, 2020 г.:

Важное направление, где необходима координация работы всего мирового сообщества, – это сохранение климата и природы нашей планеты.

- Конкуренция, соперничество между странами в мировой истории не прекращались, не прекращаются и не прекратятся никогда.
- Противоречия, столкновение интересов - естественная вещь для столь сложного организма, как человеческая цивилизация.
- В переломные моменты это не мешало, а напротив, побуждало объединять усилия на самых важных и судьбоносных направлениях.
- Очень важно честно оценивать ситуацию, сосредоточиться не на мнимых, а на реальных глобальных проблемах, на устранении дисбалансов, критически важных для всего мирового сообщества.

Источник неприятностей как энергетических, экономических, так и прочих? - Парадокс сложности:

В.В.Путин (Валдай-2025, октябрь):

- *Сегодняшний мир – чрезвычайно комплексная, многоаспектная система.*
- *Чтобы правильно описать, осмыслить ее, недостаточно простых законов логики, причинно-следственных связей и возникающих из этого закономерностей. Тут нужна философия сложности.*

А.Гринспен: «Дело в том, что все наши модели, как бы сложны они не были, слишком просты»

Есть ли будущее у ядерной энергетики?

Ответ на этот вопрос зависит от того, что мы понимаем под будущим:

50 лет? **100** лет? **1000** лет?

У современной ядерной энергетики на тепловых нейтронах длительного будущего нет.

Без ядерной энергетики будущего нет у современной цивилизации.

Академик Л.И.Пономарев

Аксиологические аспекты развития сложных технологических систем

Когда физика используется в биологии, то она перестает быть только физикой, поскольку явления и процессы при этом возникающие выходят далеко за пределы физики, поэтому важно осознать то, чем различные науки становятся тогда, когда их пытаются использовать для развития сложных хозяйственных и природных систем.

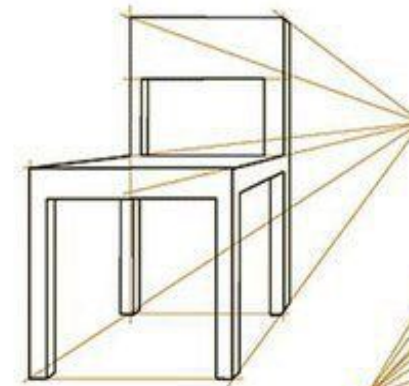
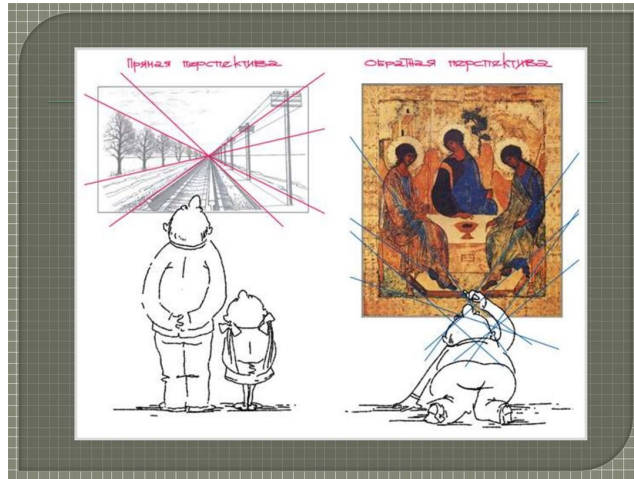
Помимо важного индикатора ресурсобеспеченности создаваемого и уже созданного богатства, ключевой проблемой становится необходимость учета того, что каждая единица добываемых ресурсов позволяет получать не только добавленную стоимость, то есть соответствующий прирост богатства при каждом переделе, но и то, что как при добыче, так и при каждом переделе и при использовании ресурсов постоянно увеличивается не только количество отходов, но и уровень непредсказуемых, не страхуемых, не управляемых воздействий на вмещающие системы, приемлемость которых основывается на запасах до пределов применимости имеющихся теорий.

В настоящее время важно попытаться донести до неспециалистов особенности, преимущества и потенциалы решения проблем ядерных технологий (например, минимум отходов на единицу дохода от производства продукции). Цель заключается в демонстрации того, что мир на подходе к совершенно новой технологии (вовлечение нейтронов в технологические процессы), которая изменит не только «реальность», но и мышление.

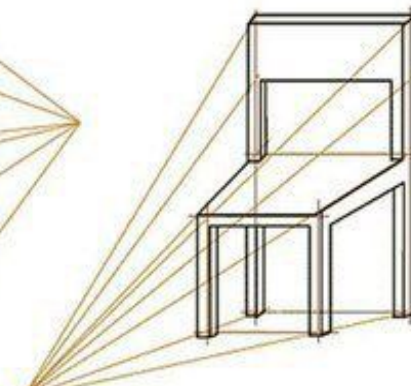
Необходимые институты при переходе к масштабному развитию ЯЭ

- **Уран – 235, как источник нейтронов, а не только энергоресурс**
- Различные типы собственности и их особенности и отличия: Уран 235 и плутония и уран 233, уран 238 и торий 232, америций, нептуний, кюрий, ПД
- Уран 235 как кредит на создание ЯЭ (посевной материал)
- Стоимость плутония на складе, транзакционные издержки, связанные с плутонием, ограничение использования плутония в ТР
- Требования к запасам урана 235 и плутония на складах (КИУМ)
- Наличие долговременной стратегии (**условие принятия эффективных решений в плане устойчивого развития**)
- КВ системы больше 1 (**воспроизводство нейтронного потенциала**)
- Двухкомпонентность системы ЯЭ (**для будущего важны как материальная, так и интеллектуальная составляющие истории развития ядерных технологий**)
- «Заповеди» для системы (**история как основа установления отношений по пространству и времени**)
- Баланс нейтронов в системе (**дифференциального и интегрального**)
- Нуклидная экономика (**накопление богатства в виде полезных нуклидов**)
- Преодоление правового парадокса (**история как основа решения проблемы интересов будущих поколений**)

История позволяет избавиться от детской привычки жить настоящим. Очень многое в судьбе ЯЭ свершалось и свершается не в материальной, а в ментальной сфере.



Прямая перспектива

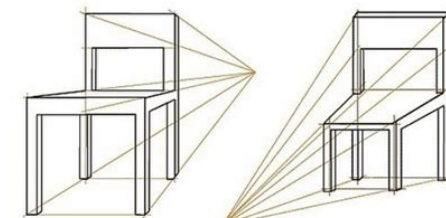


Обратная перспектива



Твоя перспектива

«История часто «читается наоборот», в «обратной перспективе»: на первом плане — результаты, на втором — средства, на третьем — условия, на четвертом — сам процесс жизни и деятельности людей. Ход истолкования (или исследования) истории оказывается при этом противоположным ходу ее воспроизводства и обновления человеческими индивидами.» Новая философская энциклопедия, 2010г.



ПРЯМАЯ ПЕРСПЕКТИВА

ОБРАТНАЯ ПЕРСПЕКТИВА



ТВОЯ ПЕРСПЕКТИВА



**Благодарю Вас
за внимание**

Subbotin_SA@nrcki.ru