



Конференция
«Будущее атомной энергетики - AtomFuture 2023».
Студенческое научное общество **ИАТЭ НИЯУ МИФИ**
круглый стол
**«О направлениях развития атомной энергетики в краткосрочной
и долгосрочной перспективе».**

«Мировая атомная энергетика – тернистый путь развития»
Субботин С.А.
Обнинск 27 ноября 2023

Почему «тернистый» путь?

Выражение «тернистый путь» означает нелегкую, полную всевозможных препятствий судьбу. Для христиан оно символизирует череду испытаний, которую они должны пройти, чтобы попасть в рай.

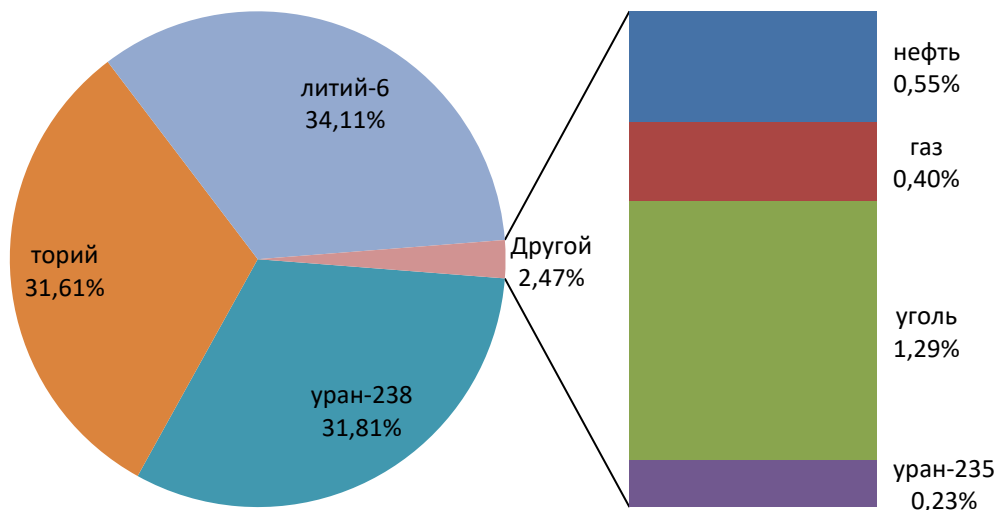
Принцип инновационного развития: «Всегда выбирайте самый трудный путь - на нем вы не встретите конкурентов»

Шарль де Голль

Результат - Источник неприятностей как энергетических, экономических, так и прочих в том, что мы со старыми картами, схемами, представлениями зашли на новую территорию

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

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

Место ЯЭ в общей картине хозяйственной деятельности



Энергетика:

С одной стороны – отрасль хозяйственной (экономической) деятельности.

С другой стороны:

- силовая часть системы управления механизмом получения и распределения природных благ;
- «система трансформации всех потенциальных ресурсов в совокупный капитал социума» В.В.Бушув

При современном научном подходе, сосредоточенном на получении выгод, когда за прогнозы и риски практически никто не отвечает:

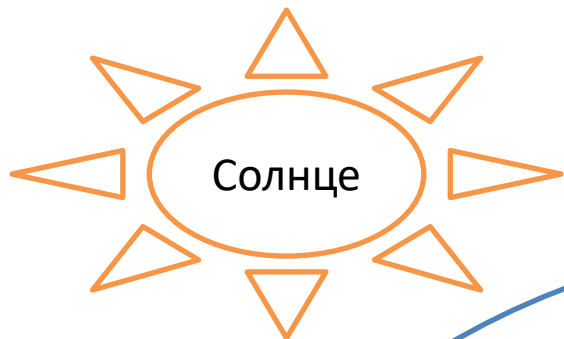
- *можно представить экономически эффективный и безопасный и экологически приемлемый способ получения энергии,*
- *но не возможно представить безопасного и экологически приемлемого способа использования энергии.*

Три потока ресурсов (энергия, материалы, информация), необходимых для обеспечения устойчивого развития цивилизации



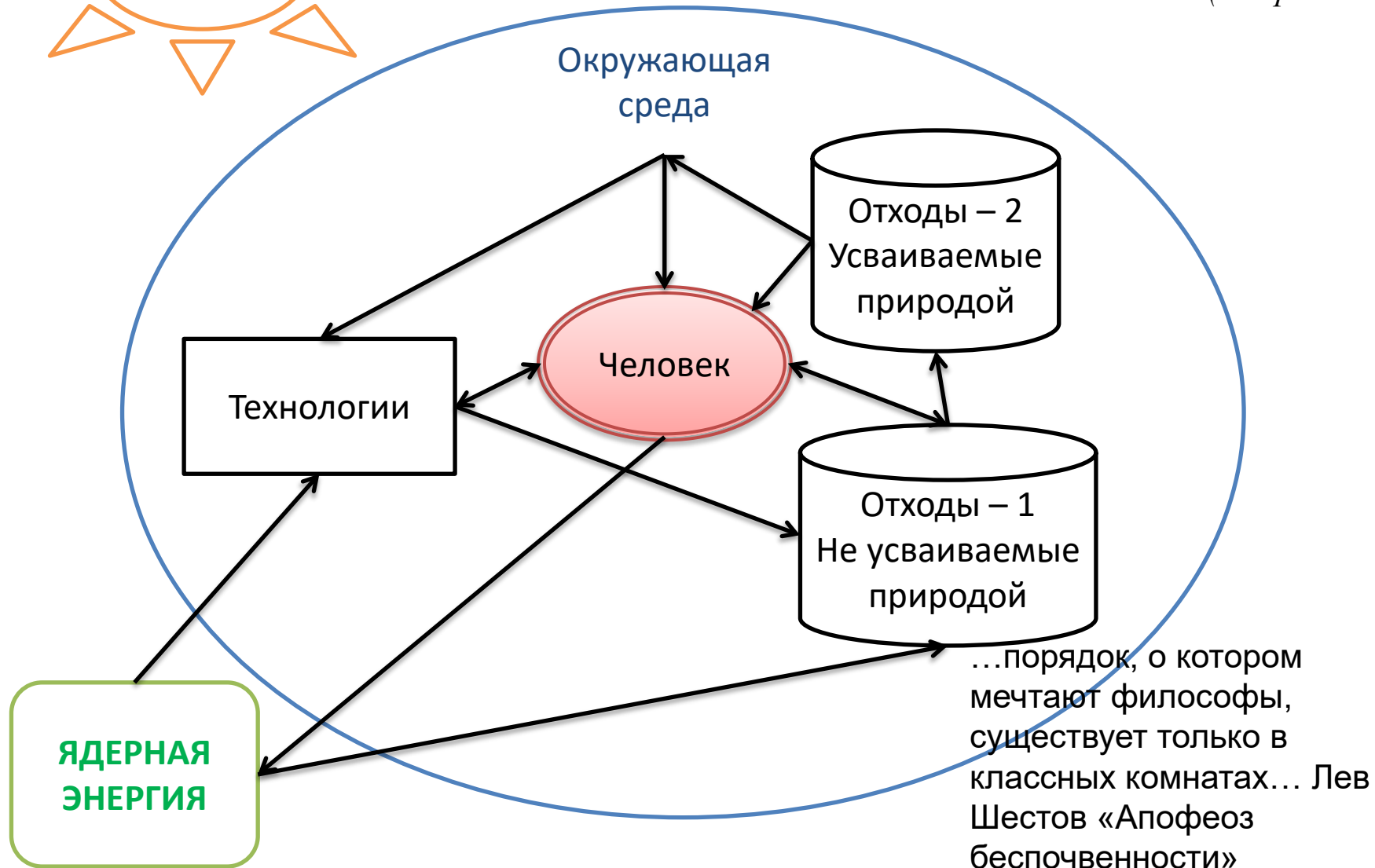
ЯЭ это:

- **новый источник энергии;**
- перспективный поставщик нуклидов и технологий их рециклирования;
- стимул актуализации интереса к этике, как необходимому условию дальнейшего устойчивого развития;
- генератор новых моделей и понятий, расширяющих возможности **понимания** (Э.Кант: что я могу знать? (метафизика); что я должен делать? (мораль); на что я смею надеяться? (религия); что такое человек? (антропология))

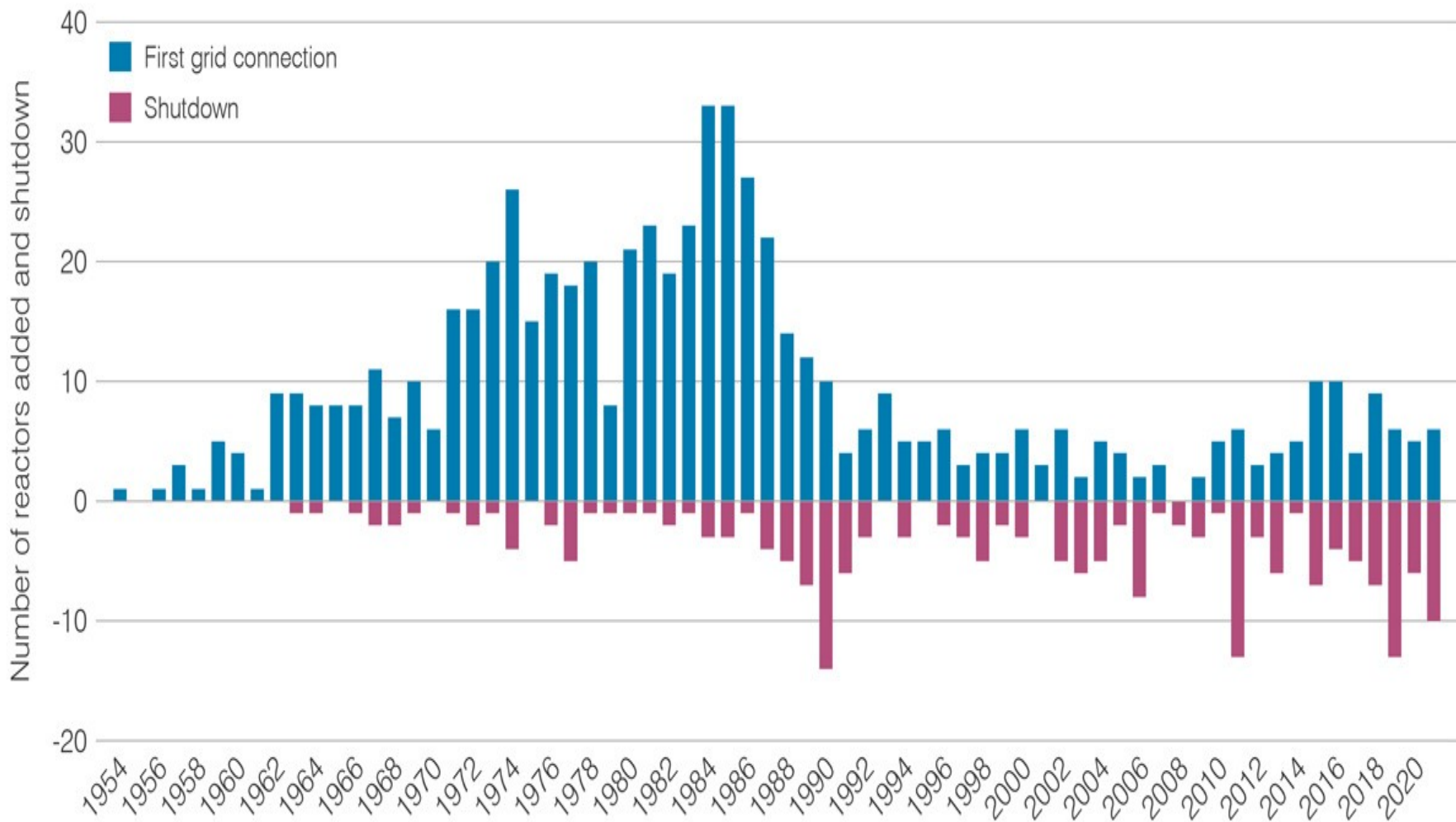


Э.Кант:

- что я могу знать? (метафизика);
- что я должен делать? (мораль);
- на что я смею надеяться? (религия);
- что такое человек? (антропология)



Вводы в эксплуатацию и выходы из эксплуатации блоков АЭС



А.П.Александрова из выступления с Генеральным адресом на VII Мировом Энергетическом конгрессе 1967 г.

- «Энергетика на тепловых реакторах подготавливает будущее развертывание энергетики с реакторами-размножителями на быстрых нейтронах... 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 или налогов. Будущая крупная атомная энергетика должна быть способной, в смысле ядерного топлива, к саморазвитию, т.е., используя процесс размножения плутония в реакторах на быстрых нейтронах должна обеспечить полное снабжение себя вторичным ядерным горючим - плутонием, с подачей в топливный цикл извне только недефицитного урана-238.»
- По сути А.П.Александров говорил о стратегическом аспекте развития двухкомпонентной системы ЯЭ. **Двухкомпонентность ЯЭ и двусторонность ее рассмотрения в плане материальной и интеллектуальной составляющих, по-видимому, естественный шаг в ее развитии по пути совершенствования как структуры, так и систем ее реагирования на различного рода неопределенности и управления не только тактического, но и стратегического.**

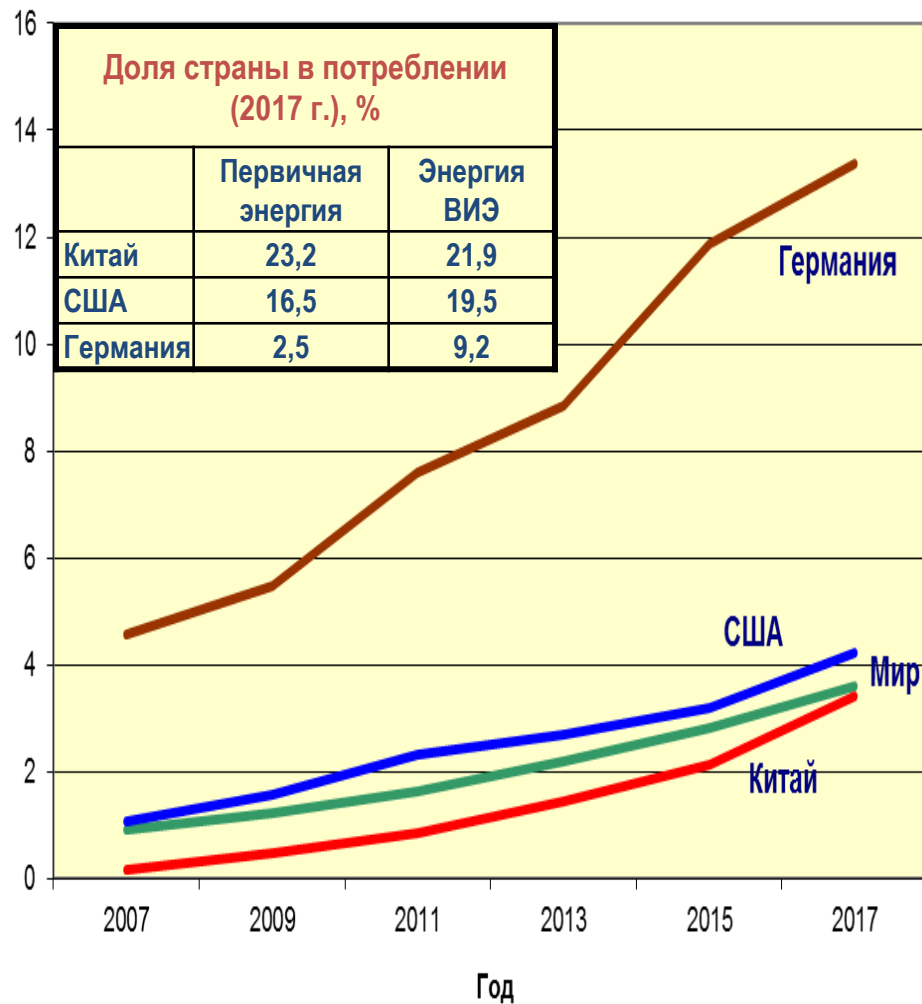
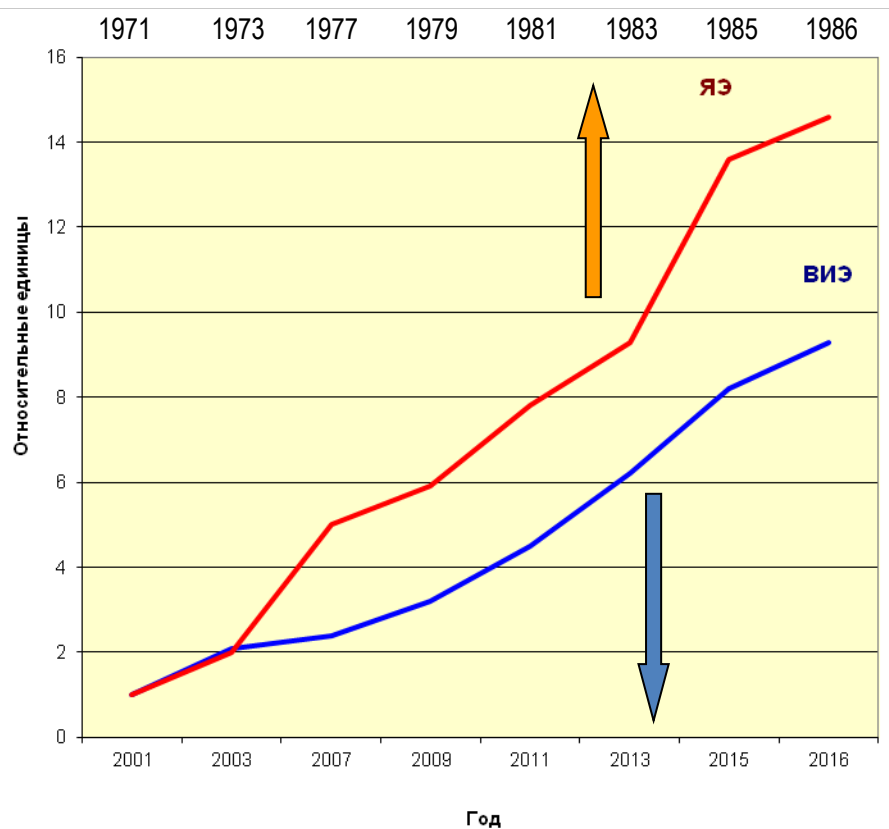
Современная ситуация

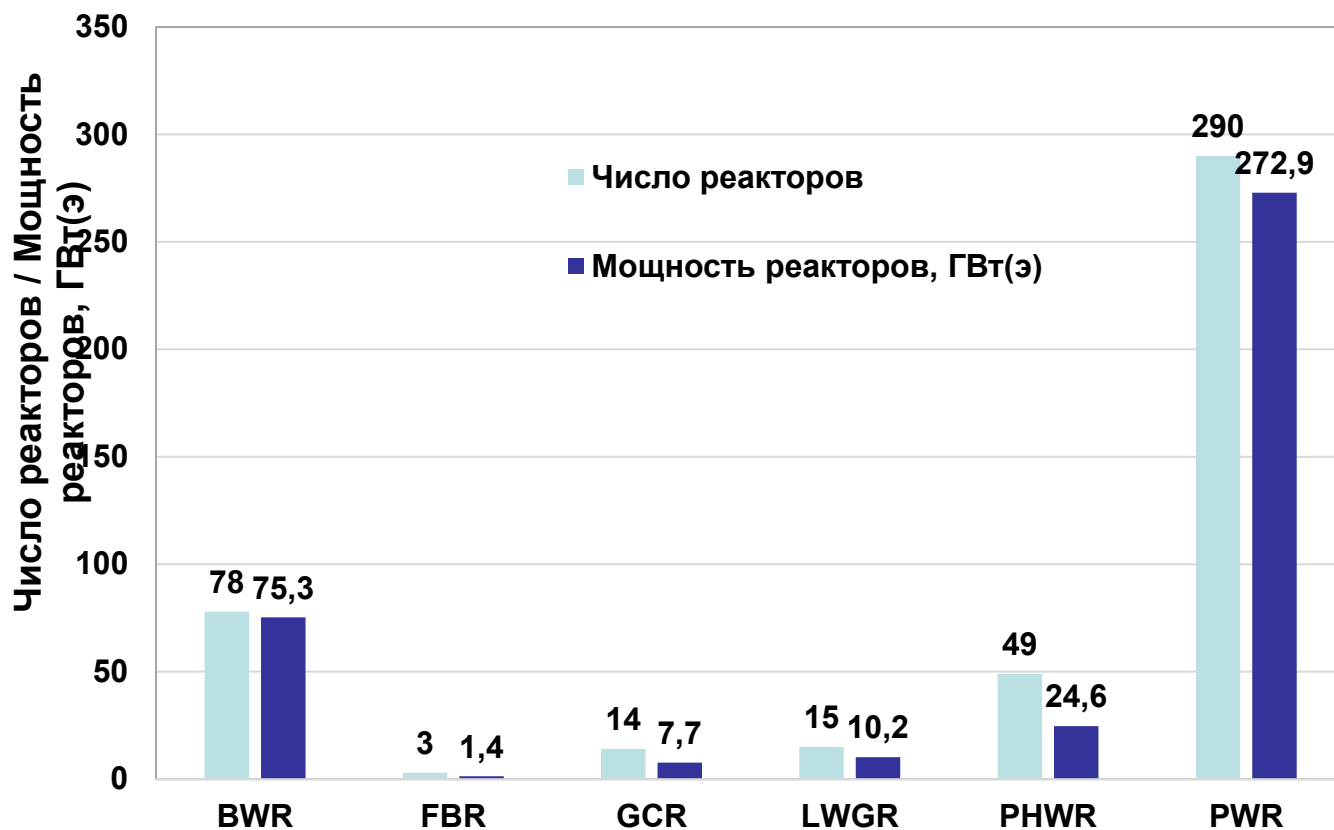
- В Мире почти 400 ГВт эл. реакторов на тепловых нейтронах, использующих уран 235 для получения энергии.
- Вырабатывается около 2600 Млрд. кВт часов электроэнергии
- Накоплено и постоянно увеличивается огромное количество отходов обогатительных производств (примерно 2млн т ОГФУ).
- Нарботано более 350 тыс. т ОЯТ, в котором содержится около 3 тыс. т плутония, которого могло бы уже хватить на ввод 300 ГВт эл БР (если бы создатели БР своевременно озаботились созданием системообразующей инфраструктуры ЗЯТЦ и соответствующих институциональных структур, как в области регулирования (право), так и экономики).

Сравнение темпов ввода АЭС и возобновляемых источников энергии

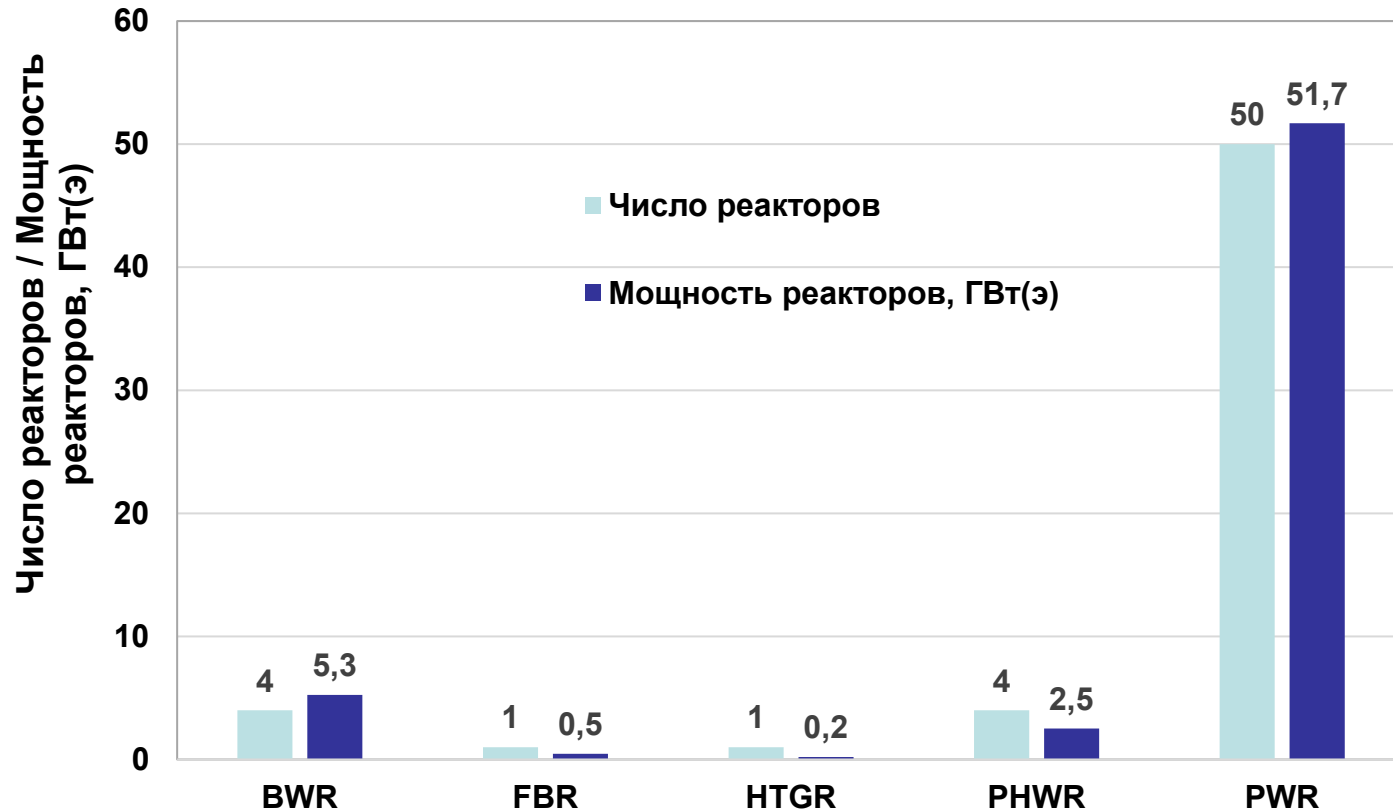
Производство электроэнергии ВИЭ и ЯЭ, отн. ед.

Доля ВИЭ в первичной энергии, %





Количество и мощность работающих в мире реакторов различного типа (по данным IAEA/PRIS на 1 марта 2017 г.)



Количество и мощность строящихся в мире реакторов различного типа (по данным IAEA/PRIS на 1 марта 2017 г.)

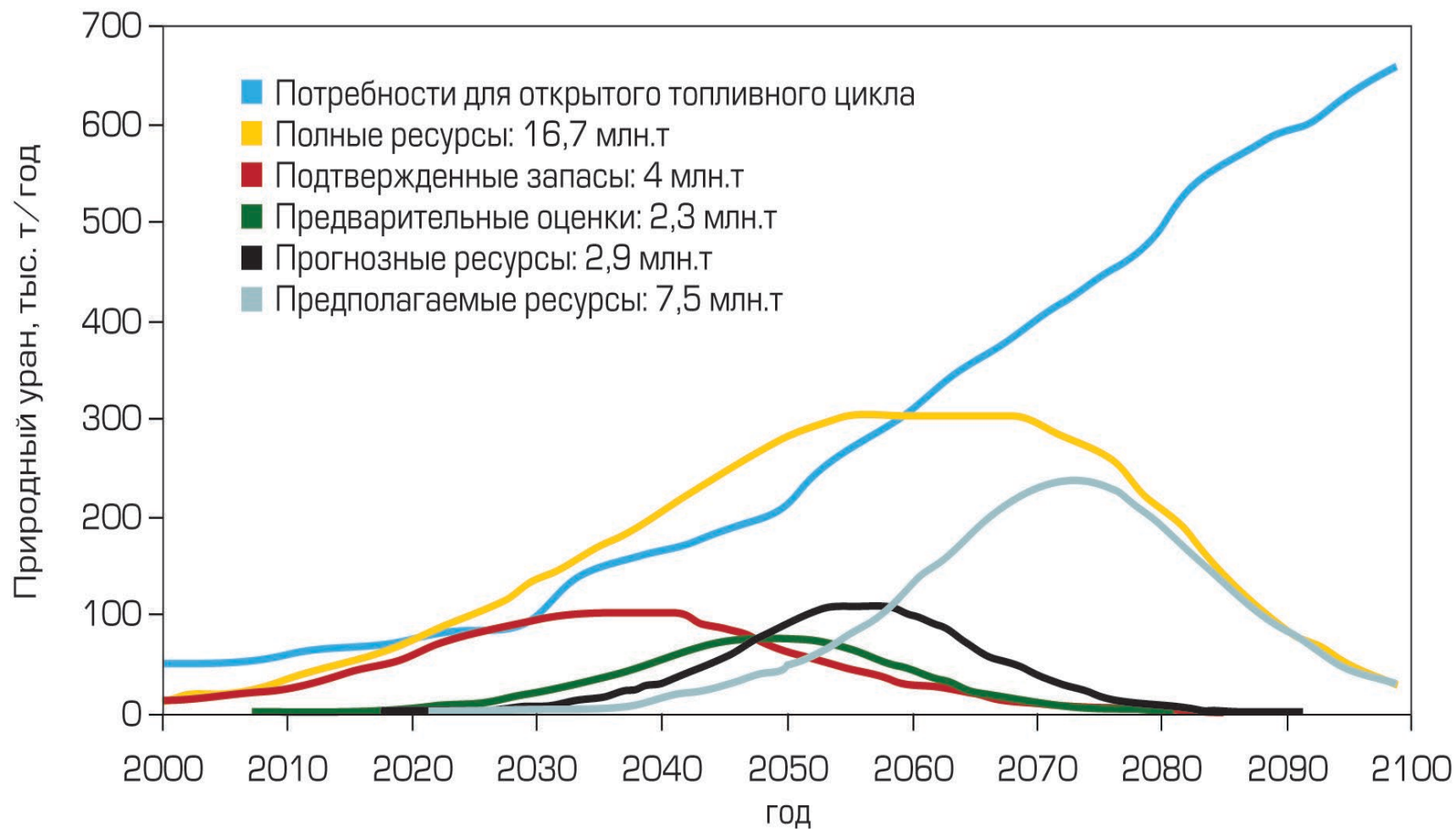


Рис. 5–1. Оценка потенциала годовой добычи природного урана

Схема перехода от конкуренции энерготехнологий к их взамогласованному сосуществованию

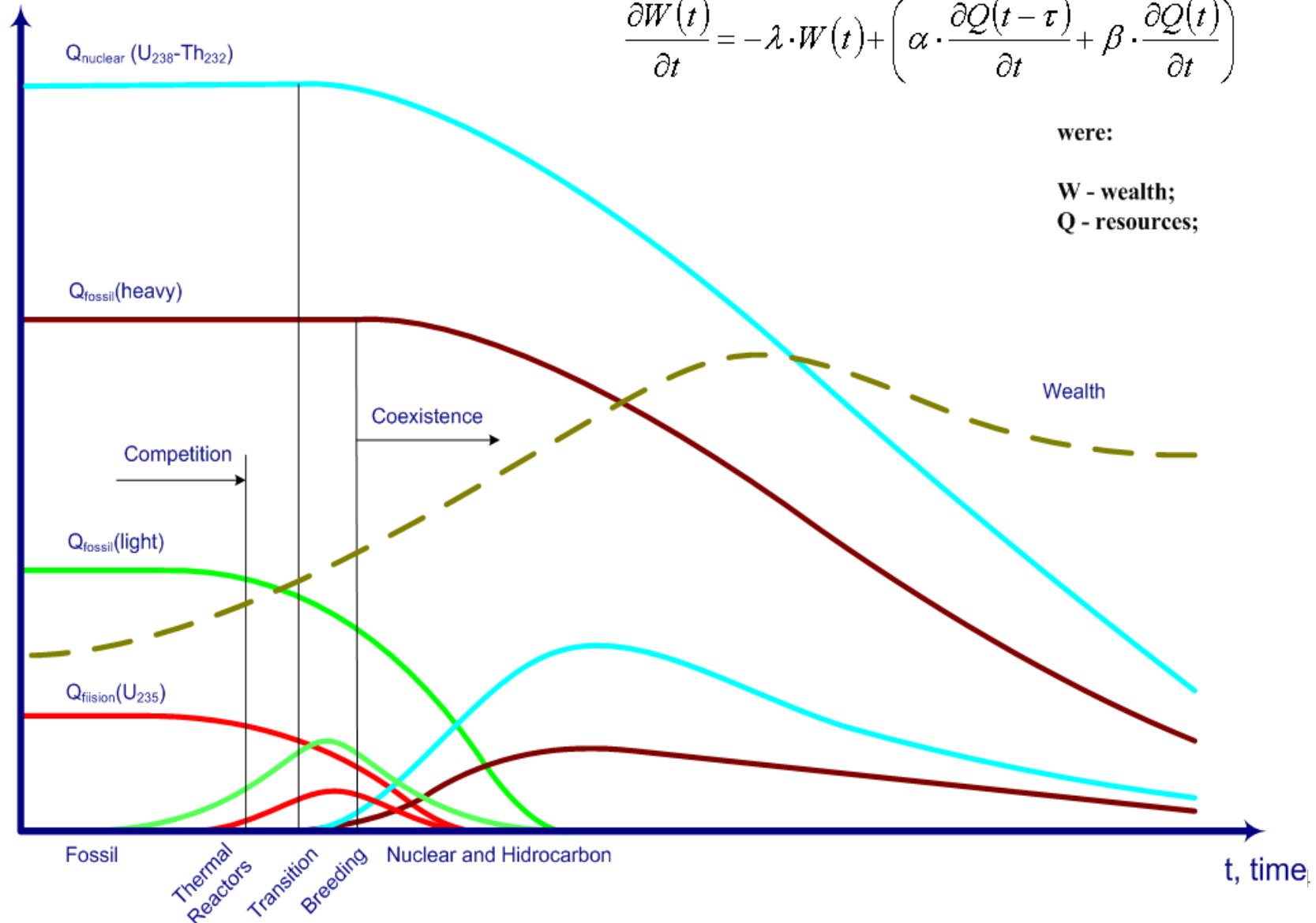
Resources,
Rate of consumption

$$\frac{\partial W(t)}{\partial t} = -\lambda \cdot W(t) + \left(\alpha \cdot \frac{\partial Q(t-\tau)}{\partial t} + \beta \cdot \frac{\partial Q(t)}{\partial t} \right)$$

were:

W - wealth;

Q - resources;





Причины торможения внедрения атомной энергетики:

- как за счет необходимости самостоятельной разработки технологий получения смешанного уран-плутониевого топлива и радиационно-стойких материалов (с чем более или менее разработчики справляются);
- так и за счет отсутствия готовых экономических механизмов, способных идти на долговременные финансовые риски с непредсказуемыми результатами в плане получения финансовых выгод (в развитие которых в плане повышения экономической приемлемости технологий БР и ЗЯТЦ серьезных работ не велось... и не ведется, а вероятность того, что экономика сама повернется к ЗЯТЦ и БР по всей видимости совпадает с вероятностью большого экономического кризиса глобального масштаба, после которого экономисты озаботятся ресурсообеспеченностью созданного богатства).

Различные проекции понимания двухкомпонентности инновационной системы ЯЭ

- Реакторы на тепловых и быстрых нейтронах
- ИНПРО (ЯЭ как система) и Gen IV (отдельные реакторные направления)
- ЯТЦ (как системообразующий фактор) и множество ЯЭУ
- Источники нейтронов (уран235, плутоний и уран 233 на складе; и «внешние»: ТИН, ускорительные системы)
- Деление тяжелых и синтез легких ядер
- Материальная инфраструктура ИЯЭС и ее **идеальный образ и интеллектуальное наполнение и сопровождение на основе различных типов моделей (сценарное моделирование для детализации постановки задачи и принятия решений, проектные, эксплуатационные, анализ последствий реализации принятых решений)**

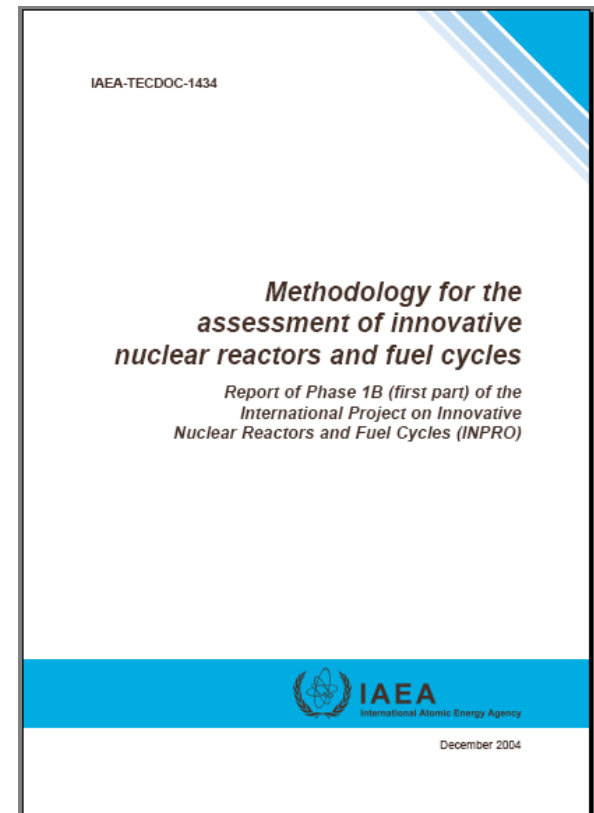
Международный ИНновационный ПРОект (ИНПРО) МАГАТЭ по разработкам АЭС и ЯТЦ для будущей ЯЭ

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



Ядерная энергетическая система (ЯЭС) (Nuclear Energy System)

охватывает полный спектр ядерных установок и связанных с ними институциональных мер.

В состав ядерных установок входят:

- установки для добычи и обогащения урана и/или тория, изготовления ядерного топлива,
- производства электроэнергии либо иной продукции,
- регенерации ядерного топлива,
- захоронения РАО

В жизненном цикле таких установок рассматриваются приобретение площадки, проектирование, строительство, изготовление и монтаж оборудования, ввод в эксплуатацию, эксплуатация, вывод из эксплуатации и освобождение либо закрытие промышленной площадки.

Институциональные меры состоят из соглашений, договоров, национальных и международных правовых рамок и конвенций (таких как ДНЯО, Международная конвенция по ядерной безопасности, Соглашение МАГАТЭ по гарантиям).

Инновационная ядерная энергетическая система (ИЯЭС)

это система, которая позволяет ядерной энергетике обеспечить значительный вклад в глобальное энергоснабжение 21го века.

ИЯЭС может включать как эволюционные, так и инновационные конструкции ядерных установок.

- **Эволюционная конструкция**— такая усовершенствованная конструкция, которая достигает улучшений по сравнению с существующими конструкциями за счет небольших либо умеренных модификаций с сильным уклоном на сохранение апробированной конструкции с целью сведения технического риска к минимуму.
- **Инновационная конструкция** является усовершенствованной конструкцией, которая включает радикальные концептуальные изменения в конструкторских решениях либо компоновке систем по сравнению с существующей практикой.

Nuclear Technology

Evolving Toward a Bright Future

Generation I



Early Prototype Reactors

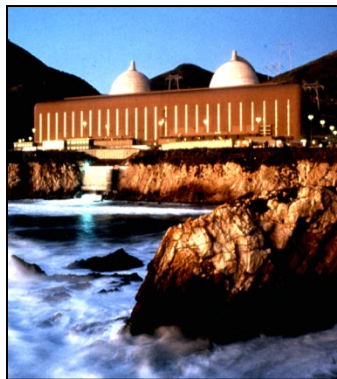


- Shippingport
- Dresden, Fermi I
- Magnox

Generation II



Commercial Power Reactors

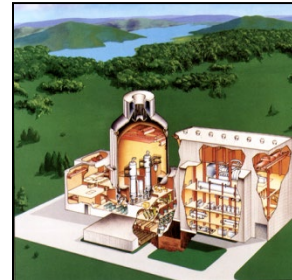


- LWR-PWR, BWR
- CANDU
- VVER/RBMK

Generation III



Advanced LWRs



- ABWR
- System 80+
- AP600
- EPR

Generation III+

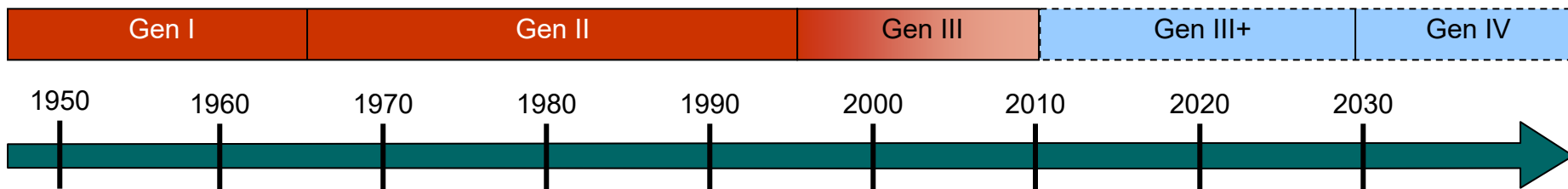


Generation III Evolutionary Designs Offering Improved Economics

- AP1000
- ACR700
- ESBWR



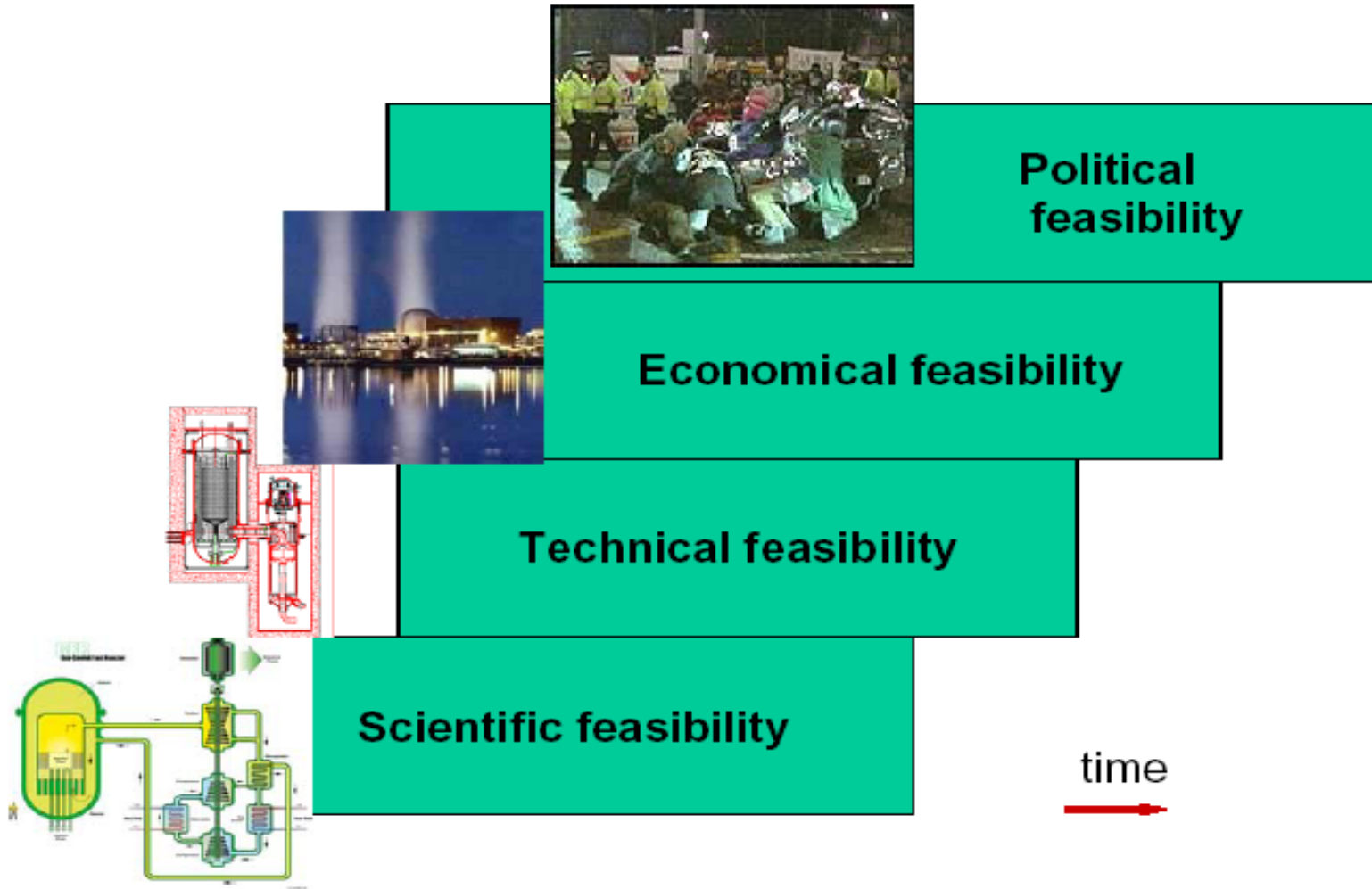
- Highly Economical
- Enhanced Safety
- Minimize Wastes
- Proliferation Resistant



Program Overview

Generation IV Systems

<i>System</i>	<i>Neutron Spectrum</i>	<i>Fuel Cycle</i>	<i>Size</i>	<i>Applications</i>	<i>R&D</i>
<i>Very-High-Temp. Reactor (VHTR)</i>	Thermal	Open	Med	Electricity, Hydrogen Production, Process Heat	Fuels, Materials, H ₂ production
<i>Supercritical-Water Reactor (SCWR)</i>	Thermal, Fast	Open, Closed	Large	Electricity	Materials, Safety
<i>Gas-Cooled Fast Reactor (GFR)</i>	Fast	Closed	Med to Large	Electricity, Hydrogen, Actinide Management	Fuels, Materials, Safety
<i>Lead-alloy Cooled Fast Reactor (LFR)</i>	Fast	Closed	Small	Electricity, Hydrogen Production	Fuels, Materials compatibility
<i>Sodium Cooled Fast Reactor (SFR)</i>	Fast	Closed	Med to Large	Electricity, Actinide Management	Advanced Recycle
<i>Molten Salt Reactor (MSR)</i>	Thermal	Closed	Large	Electricity, Hydrogen Actinide Management	Fuel, Fuel treatment, Materials, Safety and Reliability



Проблема: актуальная задача, для решения которой не хватает ресурсов.

Парадокс: проблема понимания, требующая инновационного подхода в мышлении.

- Рассмотрение реальности в рамках недостаточно проработанной теории приводит к парадоксам. Выявление парадоксов и их преодоление позволяет развивать теорию ЯЭ и создавать целостное видение системы.
- Наличие парадоксов – это свидетельство сложности рассматриваемого процесса или системы, понимание которых выходит за рамки общепринятой логики и привычных моделей.

Потенциальные возможности решения проблем ЯЭ

	ТР	БР	ЖСР	ТР+Б Р	ТР+БР+Ж СР
Различные сферы использования (регионы, технологии)	+	-	-	+	+
Эффективность использования ресурса (урана ²³⁵ , урана ²³⁸ , тория)	-	+/-	+	+/-	+
Утилизация минорных актинидов (Pa, Np, Am, Cm,...)	-	-	+	-	+
Утилизация плутония и минорных актинидов на завершающей стадии развития системы ЯЭ	-	-	+	-	+

Баланс нейтронов в различных реакторах, кг/ГВт эл. год

Кг/ ГВт год	ТР	БР с экр.	БР без экр.
Генерация нейтронов	12,6	12,2	12,2
Захват в уране 238, аз/экран	3,18	5,57	3,52
Деление на уране 238, аз/экран	0,33	1,04	0,67
Деление на актинидах, кроме урана-238	4,72	3,16	3,53
трансмутация актинидов, кроме урана-238	2,35	1,11	0,96
поглощение в продуктах деления	0,84	0,50	0,46
В-10	0,36		
поглощение в к.м. и т.н.	0,60	0,34	0,30
Утечка в отражатель	0,09	0,47	2,73

Темпы вовлечения ресурсов в систему ЯЭ

Время жизни нуклидов в реакторе / в системе ЯЭ
(время снижения количества в e раз), лет

	Th-232	U-233	U-235	U-238	Pu-239
• ТР	120/360	7/22	7,5/23	370/1100	2,7/8,2
• БР	82/160	10/21	13/39	100/200	14/28
• ЖСР	1,3	0,34	0,4	0,7	0,4
• ТР+БР+ЖСР	240	21	19	536	17

Экономическая специфика различных этапов ЯТЦ

	Этапы	Микро экономика	Макро экономика	Институциональная экономика
Добыча	запасы	+		
	ресурсы		+	
	хвосты			+
Конверсия		+		
Обогащение	продукт	+		
	отвал			+
Изготовление	ОЯТЦ	+		
	ЗЯТЦ		+	
Облучение	ОЯТЦ	+		
	ЗЯТЦ		+	
Охлаждение		+		
Перевозка				+
Переработка		+		
Промежуточное хранение	ПД	+		
	МА			+
	Плутоний			+
	Уран 235		+	
	Уран 233		+	
Изоляция от окружающей среды	Не окончательная	+		
	Окончательная			+

Основные направления работ при создании ИЯЭС с точки зрения «физиков»

- Разведка, подготовка и освоение в ближайшие десятилетия новых ресурсов урана, увеличение годовой добычи урана,;
- Разработка методов хранения и захоронения радиоактивных отходов;
- Увеличение мощности производств по обогащению урана;
- **Повышение эффективности топливоиспользования в реакторах на тепловых нейтронах;**
- **Разработка эффективных бридеров на основе реакторов с быстрым спектром нейтронов..**
- Разработка усовершенствованных методов переработки ОЯТ (неводных и комбинированных);
- **Разработка термоядерных источников нейтронов для конверсии сырьевых нуклидов в ядерное топливо;**
- **Разработка реакторов малой мощности** для автономного энергоснабжения различных регионов и различных технологических процессов.
- **Разработка ядерных энерготехнологических комплексов для производства водорода,** включая производство качественных жидких топлив из низкокачественных органических ресурсов.
- **Введение тория в систему АЭ;**
- **Разработка жидкотопливных реакторов–выжигателей минорных актинидов для замыкания ЯТЦ по минорным актинидам.**

Основные направления работ при создании ИЯЭС с точки зрения «аксиологических» наук (экономики и права) - Список институциональных проблем

- 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, трансакционные 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 (материальная и интеллектуальная составляющие).
- «Заповеди» для системы (основа установления отношений по «пространствам» и «временам»).
- Баланс нейтронов в системе (дифференциального и интегрального).
- Нуклидная экономика (накопление богатства в виде полезных нуклидов).
- Преодоление правового парадокса (интересы будущих поколений).

Асимптотическая постановка задачи

Предполагаем все задачи решены и:

- Переработка ОЯТ позволяет замыкать ЯТЦ по всем значимым актинидам при минимальных потерях опасных для окружающей среды нуклидов.
- БР безопасный, надежный экономически эффективный создан :)))
- Конкуренция преодолена, все стремятся сделать хорошо всем ! (в первую очередь разрабатываются те направления, которые позволяют ограничить рост выявленных проблем, найти пути их решения и предупредить появление прогнозируемых проблем и обременений – развитие в сторону увеличения возможностей адекватного реагирования на различного рода угрозы...)

Как наиболее эффективно использовать ресурсы энергии в виде урана 238 и тория 232 (урана 238 в двухкомпонентной системе ТР и БР в уран-плутониевом ЯТЦ, тория 232 в системе ТР – ТИН в уран-торий-литиевом нейтронном цикле)

Важно заранее получить ориентиры в какой степени следует использовать источники нейтронов в виде урана 235 и насколько его хватит и насколько необходимо использовать литий 6 (в ТР) для конвертации тепловых нейтронов в Т, который будет использоваться в качестве источника качественных нейтронов в ТИН для ускоренной конверсии тория 232 в уран 233.

Стратегический анализ

- Анализ экономических моделей позволяет сделать вывод о необходимости целенаправленных институциональных преобразований экономических моделей. Для организации масштабной технологии с длительным жизненным циклом и интегрируемыми обременениями, такой как обеспечение ураном 235 развивающейся ЯЭ, и переход на использование урана 238 и тория 232, риски должны быть нормированными, но процедура нормирования сдерживает развитие, если она не обладает адаптивной способностью с учетом прогнозов возможных ситуаций.
- Анализ правового пространства (в области ядерных технологий можно внедрять только то, что разрешено законом) позволяет сделать вывод о необходимости создания специальных моделирующих компьютерных комплексов для организации возможности осуществлять рациональную процедуру взвешивания рисков и выгод «далеко» разнесенных по пространству, государствам, регионам, временам при принятии решений (в отсутствии возможности разработать соответствующие законы, регламенты, требования на основе прошлого опыта, который по определению не достаточен для создания того, чего ранее не было...).

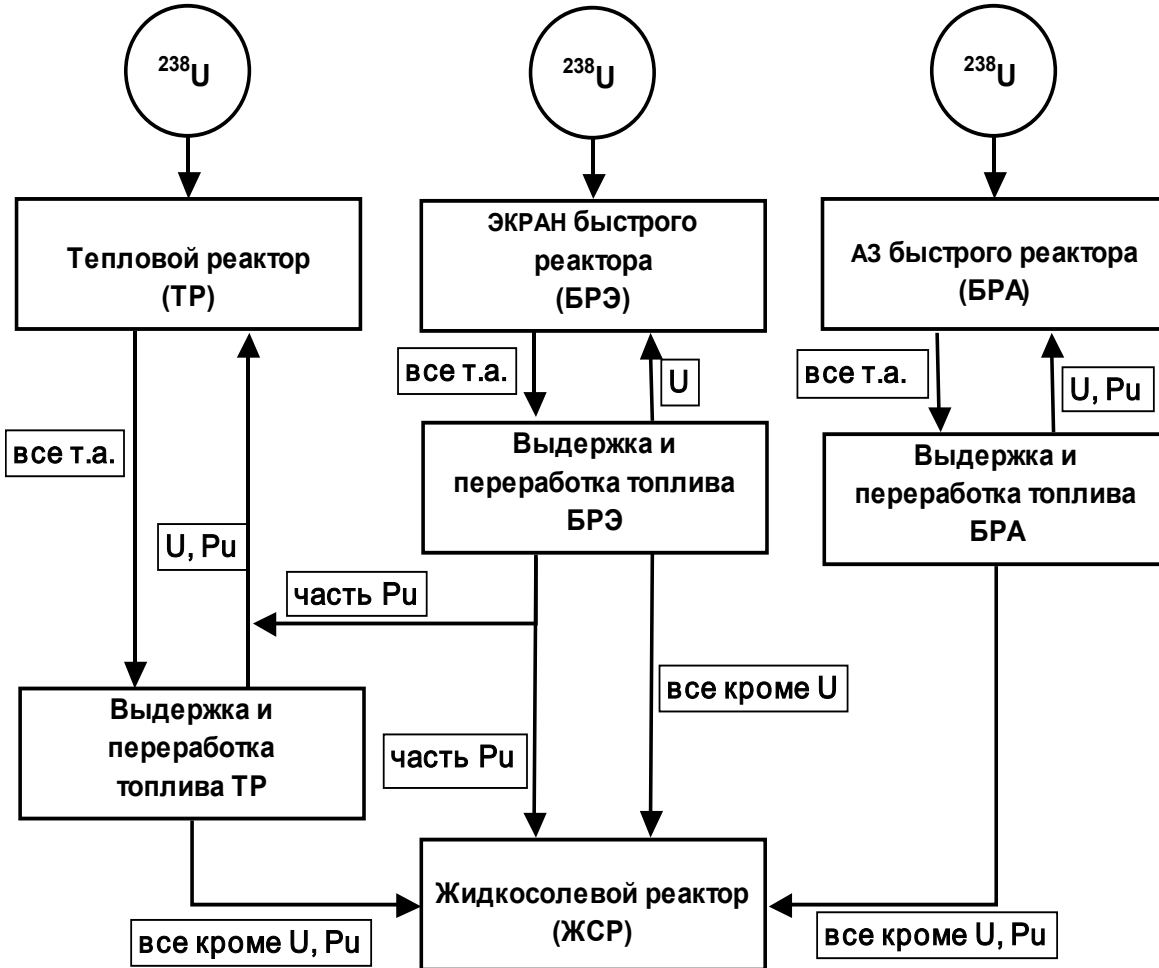
Институциональность

Институциональные инновации в экономике и праве необходимы для минимизации риска инвестиций в ЗЯТЦ и БР.

Это обусловлено тем, что технологические циклы получения выгод от создания ЗЯТЦ и введения БР в системы ЯЭ слишком непривычно длительны для современных экономических моделей и механизмов страхования финансовых рисков.

Без соответствующих институциональных преобразований можно еще очень долго и довольно эффективно для разработчиков создавать и совершенствовать конструкции АЭС с БР и технологии ЗЯТЦ, но соответствующего масштабного инвестиционного интереса они не вызовут не потому, что они не достаточно безопасны и дешевы, а потому что слишком велики риски не возврата кредитов как нейтронных источников (делящихся нуклидов для первоначальной загрузки в реактор и во внешний ЯТЦ), так и финансовых.

Структура ИЯС (асимптотика) для варианта уран-плутониевого ЯТЦ



**Доля мощности
реакторов в системе**

59% ТР

33% БР

8% ЖСР

**Количество топлива
на 1ГВт(э)**

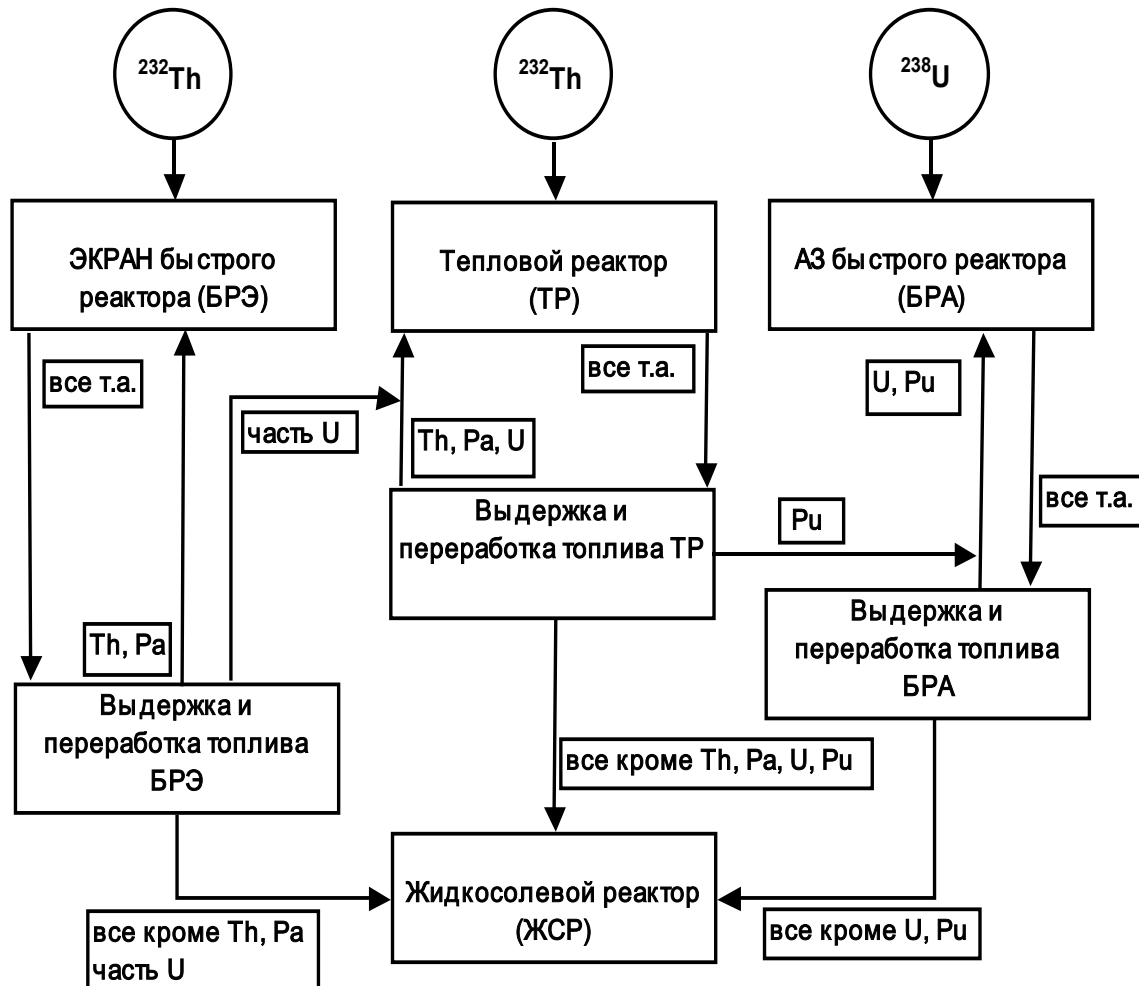
Всего в ИЯЭС

285.0 т т.н.

Во внешнем ЯТЦ

175.3 т т.н.

Структура ИЯС (асимптотика) 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.

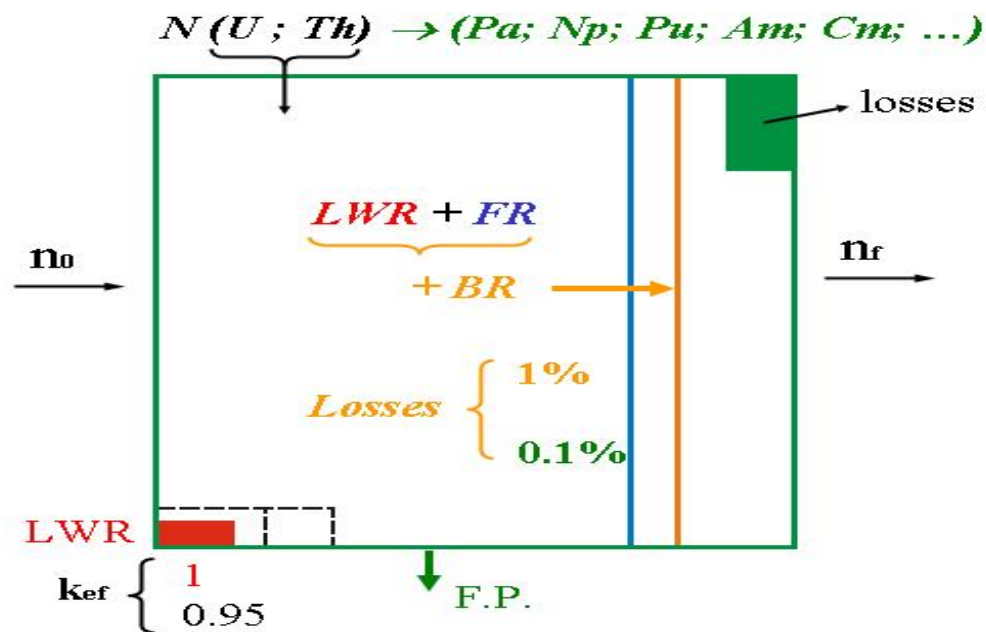
Проблемы Ядерной Энергетики

- Контроль и управление нейтронным полем – практически решена;
- Контроль и управление генерацией энергии – практически решена;
- Контроль и управление отводом энергии – требует инновационных подходов;
- Преобразование энергии – требует инновационных подходов;
- **Контроль и управление нуклидными составами и нуклидными потоками – требует наибольших вложений ресурсов, времени и интеллекта, без решения этой проблемы ЯЭ не может стать основой устойчивого развития**

Базовые физические принципы устойчивого развития ЯЭ, удовлетворение которым требует замыкания ЯТЦ

- Риск пропорционален мощности ЯЭ, а не интегральной энерговыработке (замыкание ЯТЦ по всем опасным радионуклидам);
- **Нейтронная эффективность ЯЭ должна возрасти (бридинг и внешние источники нейтронов);**
- Минимизация времени жизни (количества) опасных радионуклидов в системе (разные типы реакторов в системе ЯЭ);
- Эффективное использование радионуклидов, включая использование всего добываемого топлива (замыкание ЯТЦ по актинидам);

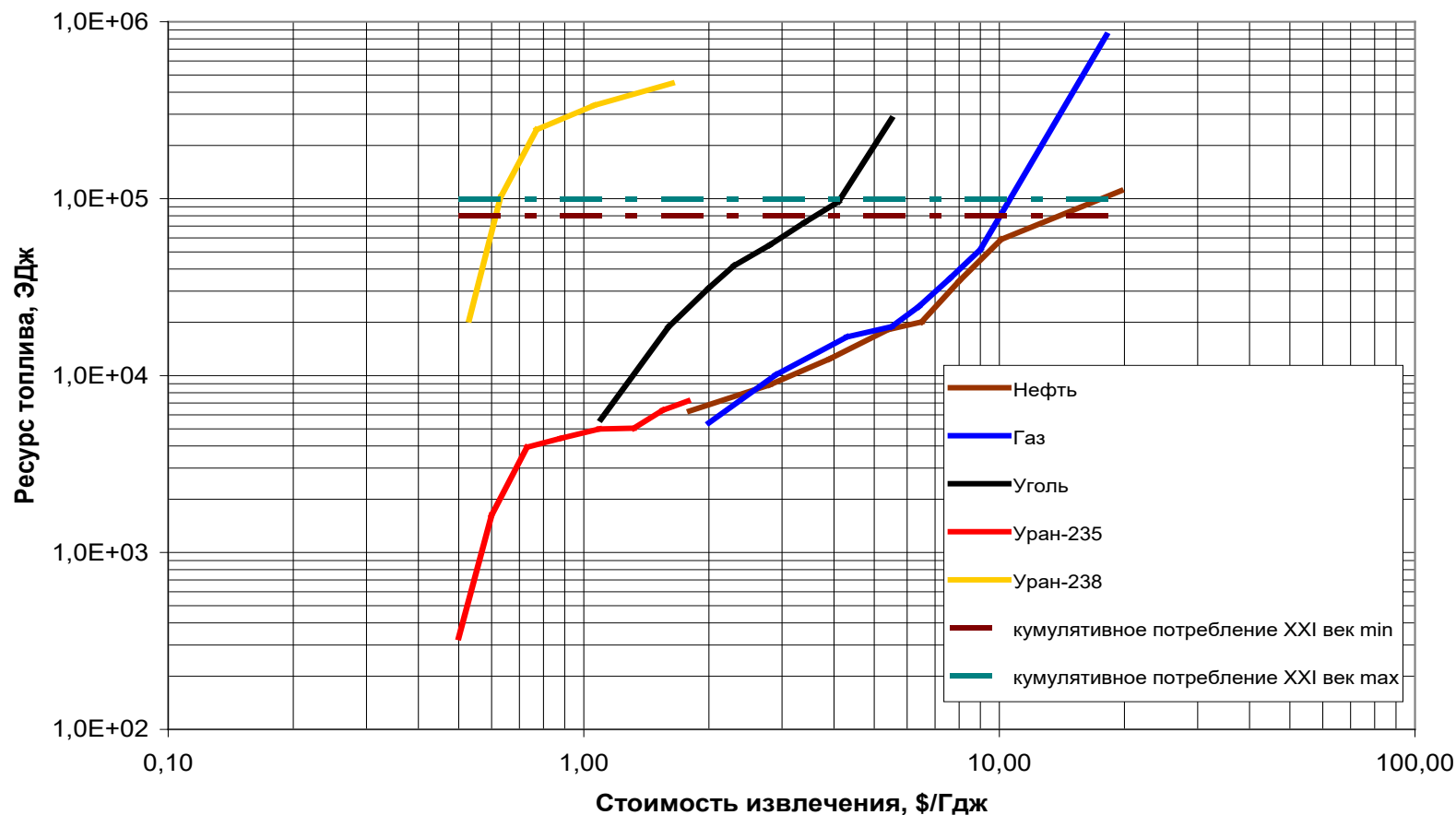
Потенциалы повышения эффективности использования ядерного топлива
 (от бесхимического бридера С.М.Фейнберга к ИНПРО)
 Возможности эффективного использования тяжелых нуклидов
 И наработки потенциала нуклидной экономики



Neutron gain : $NG = (n_f - n_0)/N$

	FR	LWR
U - 238	0,62	0
U - 235	0.88	0.62
Th-232	0.39	0.24

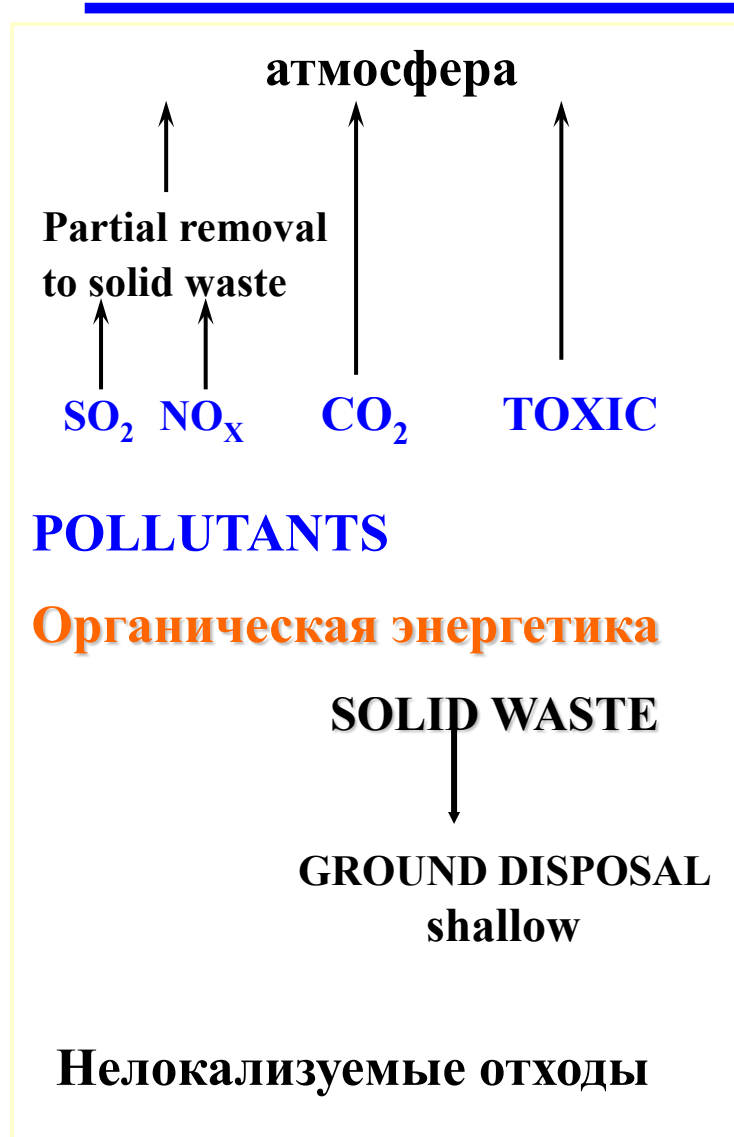
Зависимость доступности энергетических ресурсов от стоимости их извлечения (оценки СЭИ 2000 г.)



«?» Что проще – изменить экономический уклад,

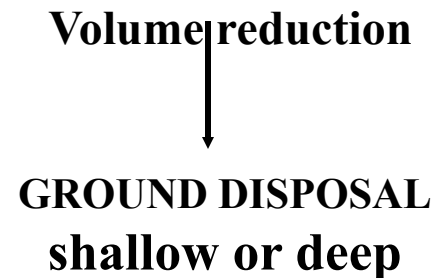
Или создать систему ЯЭ, отвечающую принципам устойчивого развития, обеспечивающую доступ к труднодоступным ресурсам низкого качества – создание системы ЯЭ, способной эффективно использовать уран-238 и торий в замкнутом топливном цикле

Две альтернативные стратегии



Ядерная энергетика

RADIOACTIVE WASTE



Стратегия локализации

ОТХОДОВ

Экономика органической энергетики – это экономика нелокализуемых отходов, и ее конкурентоспособность основана на отсутствии издержек на их локализацию.

Экономика ядерной энергетики – это экономика локализации отходов и ее конкурентоспособность ограничивается в основном издержками на технологические средства этой локализации.

Количественная оценка экономического эквивалента техногенного ущерба – это не открытие нового знания, а результат согласования различных интересов.

Институциональная особенность развития энергетики:

Происходит постепенный переход с этапа развития в условиях либеральной экономики, опирающегося на принцип «можно все, что не запрещено»

К эпохе «конституциональной» экономики, на котором используется принцип «можно только то, что разрешено».

Но единой окончательной модели, предназначенной для разработки законодательства в области использования энергии или для определения того, какая институциональная база наилучшим образом может обеспечить осуществление национального законодательства в области энергетики, не существует.

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.

В.А.Канке: Краткое концептуальное руководство для знатока ядерной энергетики

Осмысливая многолетний опыт нашего общения со специалистами ядерной энергетики мы осмеливаемся привести ряд рекомендаций, надеясь, что они могут быть полезными хотя бы для части читателей:

- **Уясните отличие ядерной энергетики от физики. Отождествление ядерной энергетики с физикой – признак плохого научного тона.**
- Уясните применительно к ядерной энергетике отличие теории от практики. Сделайте акцент на теории. Теория не следует за практикой, а предшествует ей. Практика входит в состав теории.
- **Рассматривайте, хотя бы мысленно, любой вопрос с позиций тех философских направлений, которые вам известны. При дефиците времени ограничьтесь аналитической философией, герменевтикой и постструктурализмом. Уясните себе свою собственную философскую теорию.**
- **Рассмотрите ряд этических теорий, упорядочите их и руководствуйтесь ими при оценке тех или иных событий в ядерной энергетике.**

**Благодарю Вас
за внимание**