



**Научно-исторический круглый стол: АЭС с реакторами на  
быстрых нейтронах: вчера, сегодня, завтра  
(ретроспектива и перспективы)**

**Стратегическая оценка развития «быстрой» тематики  
в мире**

Субботин С.А.

г. Обнинск, Дом учёных, 25 июня 2021 г. (11.00 – 14.00)

**Первоначальная стратегическая задача БР при наличии долговременных планов масштабного развития ЯЭ и ограниченной ресурсной базе природного урана это расширение топливной базы ЯЭ, более конкретно - переход на эффективное использование урана 238 за счет создания реакторов на быстрых нейтронах, способных потреблять плутоний при КВ больше единицы.**

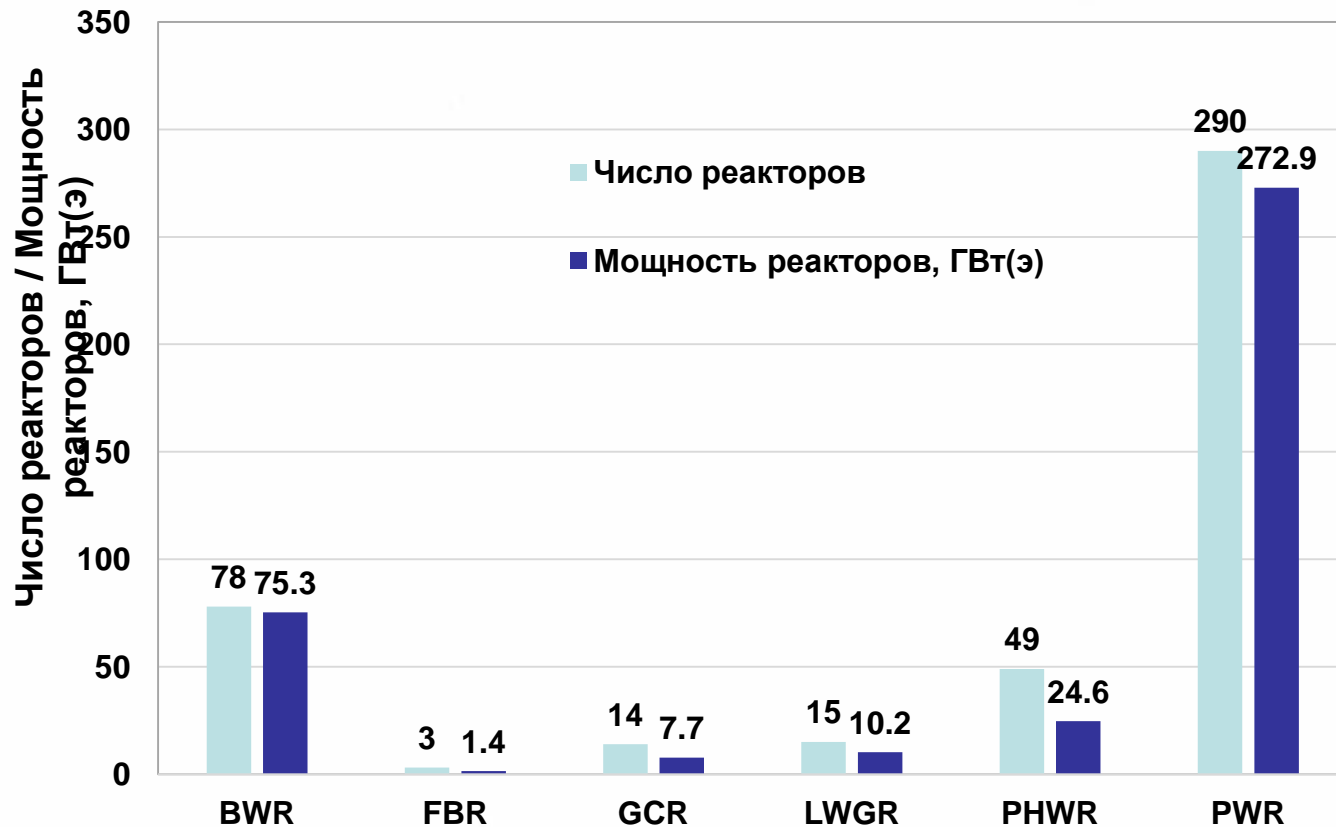
При этом выдвигались довольно жесткие требования к времени удвоения мощностей этих реакторов, работающих в режиме самообеспечения.

В те времена ТР, также как и БР, только начинали внедряться в энергетику.

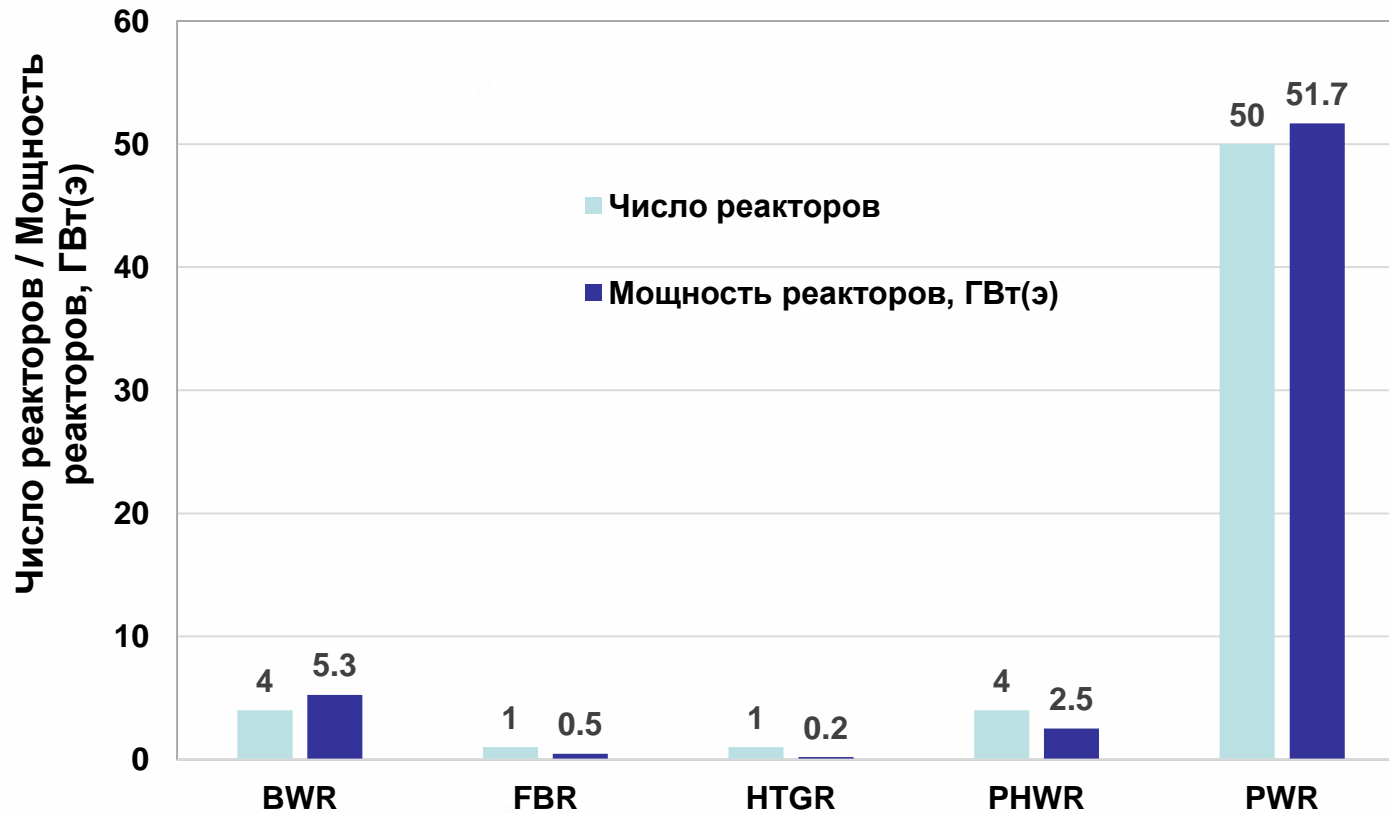
В плане масштабного развития БР с точки зрения физики обладали явными преимуществами по сравнению с ТР.

Но с тех пор многое изменилось в том окружении ЯЭ, которое может быть в силу непонимания физических преимуществ БР, оставило БР в зачаточном состоянии, востребовав ТР. 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  $^{235}\text{U}$  для получения энергии и тормозящих вовлечение урана  $^{238}\text{U}$  и тория  $^{232}\text{Th}$  в силу превалирования краткосрочных целей, интересов и высоких норм получения выгод на инвестируемый капитал (финансы).



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.)

## Причины торможения внедрения БР (не путать с развитием)

Можно сделать вывод, что БР затормозили свое развитие:

- как за счет **необходимости самостоятельной разработки технологий получения смешанного уран-плутониевого топлива и радиационно-стойких материалов** (с чем более или менее разработчики БР 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).

**То есть история показала, что на эргодичность (возможность сохранения неизменными взглядов, мнений, критериев, планов при отодвижении сроков начала масштабного ввода БР в систему ЯЭ) механизмов развития ЯЭ полагаться не стоит.**

Ситуация изменилась:

- В Мире почти 400 ГВт эл. реакторов на тепловых нейтронах, использующих уран 235 для получения энергии.
- Накоплено и постоянно увеличивается огромное количество отходов обогатительных производств (примерно 2млн т ОГФУ).
- Нарботано более 300 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).

Но пока так и не появилось новых адекватных требований со стороны общества и системы ЯЭ к БР, которые все это время развивались в направлении совершенствований:

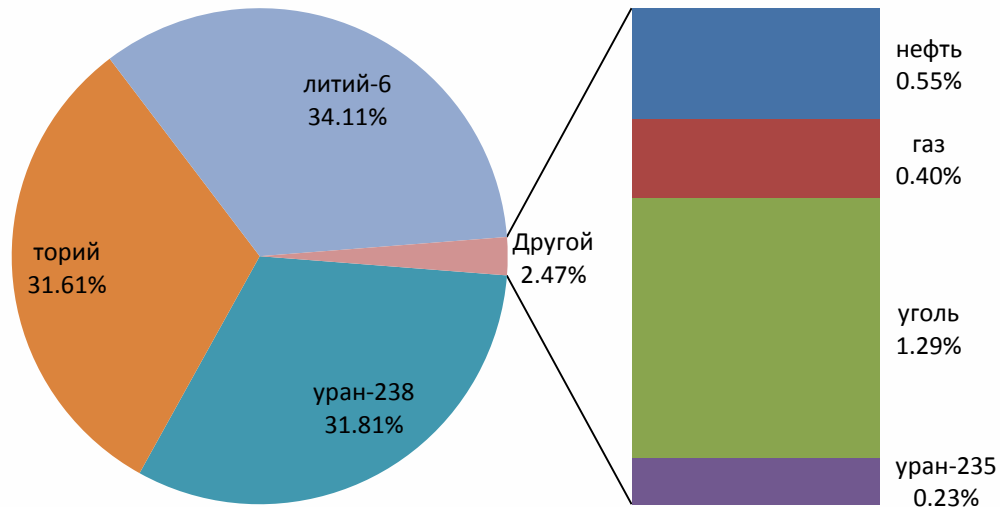
- то безопасности, вплоть до отказа от принципиальных преимуществ в плане наработки избыточного ядерного топлива (отказ от воспроизводящих экранов для достижения отрицательного пустотного эффекта в реакторах в которых не возможно даже представить мгновенный слив ТН, который даже в случае отрицательного НПЭР сопровождается расплавлением топлива...),
- то конкурентоспособности,
  - как с существующими ЛВР (которые пока как бы единственно способные «выкормить» БР собственным плутонием до периода зрелости БР, когда они сами будут как отдельная подсистема развиваться с необходимым временем удвоения – время возврата кредита делящихся нуклидов для создания конфигурации, обеспечивающей поддержание нейтронного поля с требуемым КИУМ),
  - так и с ВИЭ, долговременные перспективы которых без системы ЯЭ, отвечающий требованиям устойчивого развития (необходимая довольно значительная доля БР в системе ЯЭ) весь очевидно плачевны.



## Основные направления работ при создании ИЯЭС

- 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.**

## 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

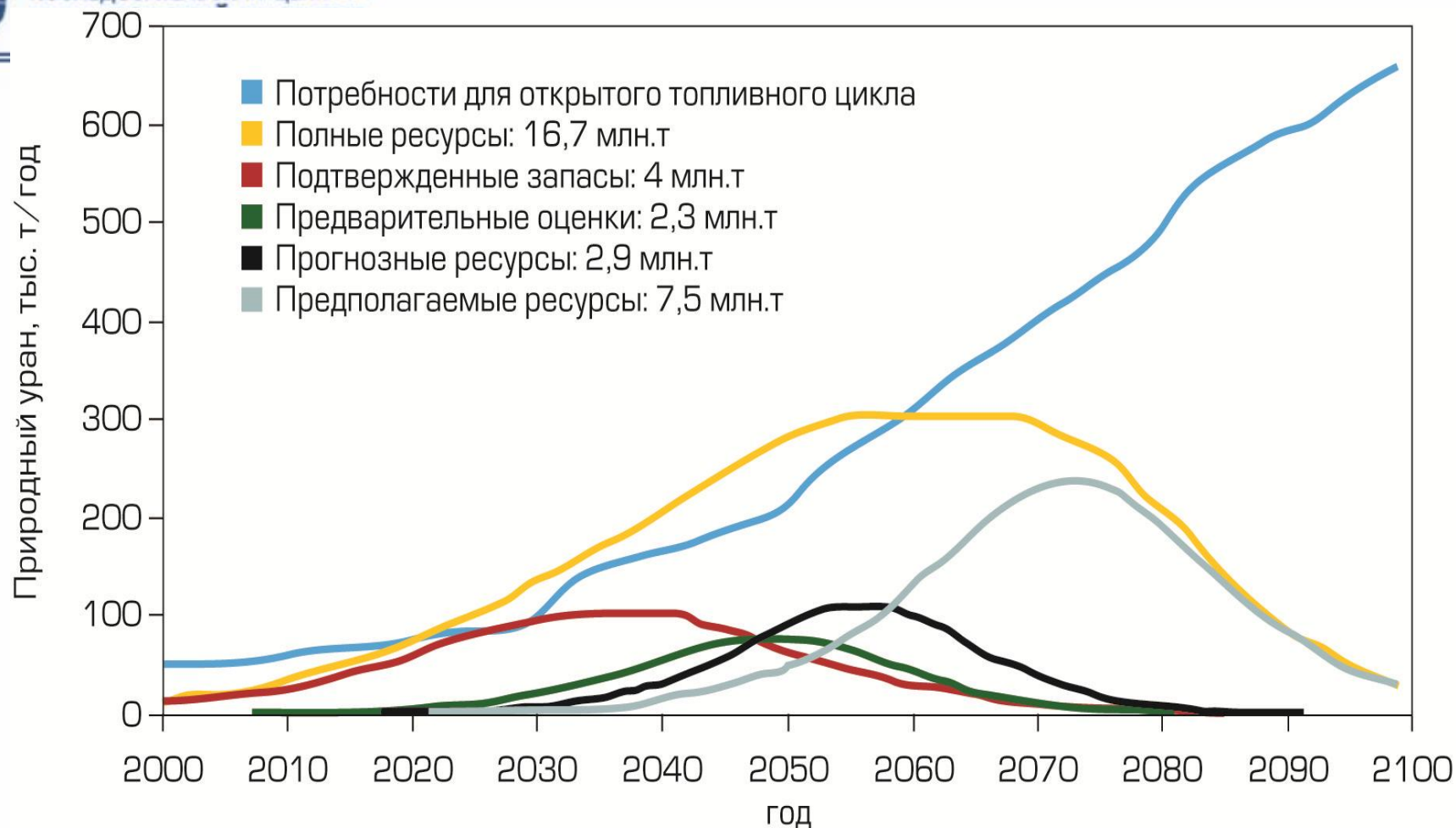


Рис. 5–1. Оценка потенциала годовой добычи природного урана



По сути «требования» к БР рождались самими создателями различных конструкции и направлений БР, которые соревновались друг с другом, так и не выясняя того, что же нужно от БР системе ЯЭ, которая уже стала объективной масштабной реальностью в виде множества ТР, продолжающих потреблять уран 235 для получения энергии (уже при наличие подозрений, что **уран 235 является единственным масштабным и доступным источником нейтронов**, который необходим для организации эффективного потребления урана 238, уже добытого для получения урана 235 и тория 232, добываемого в качестве сопутствующего нуклида при получении редких земель, необходимых для развития всего того, что связано с компьютерным моделированием, базами данных, искусственным интеллектом).

Предполагаем все задачи решены и:

- БР безопасный, надежный экономически эффективный создан :)))
- Переработка ОЯТ позволяет замыкать ЯТЦ по всем значимым актинидам при минимальных потерях опасных для окружающей среды нуклидов.
- 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.*

То есть изменились не только условия, но и постановка задачи для 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 используя только уран 235 в качестве источника нейтронов (серьезные вложения в уран-плутониевый ЯТЦ для целей обороны пока не привели к созданию эффективного ЗЯТЦ для БР).
- 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. ТР уже есть и их достаточно много для того, чтобы приступить к масштабному вовлечению тория в ЯТЦ, особенно при развитии ВТГР для производства водорода (но нет донорных технологий для уран-ториевого ЗЯТЦ).
- Системные модели для расчета интегрального нейтронного баланса при переводе всего добываемого урана и тория в ПД позволяют оценить требуемую асимптотическую структуру системы ЯЭ, в которой ТР, БР, ЖСР задаются спектром нейтронов и плотностью потока нейтронов, оценить количество различных нуклидов и их потоки между типами реакторов, складами и хранилищами.
- Эти асимптотические оценки позволяют выдвинуть рекомендации к требованиям при создании конструкций реакторов различных типов. В частности и для ТР, и для БР. Сложности организации нейтронного баланса системы ЯЭ однозначно приводят к рекомендациям по минимизации количества ПД в нейтронном поле (минимизация глубин выгорания для ТР и БР и он-лайн выведение ПД из ЖСР), использованию воспроизводящих экранов в БР, замыкание ЯТЦ по МА с помощью ЖСР.

- **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...).



Таким образом, **институты 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, но соответствующего масштабного инвестиционного интереса они не вызовут** не потому, что они не достаточно безопасны и дешевы, а потому что слишком велики риски невозврата кредитов как нейтронных источников (делящихся нуклидов для первоначальной загрузки в реактор и во внешний ЯТЦ), так и финансовых.

Можно наметить предварительный список институциональных проблем, в решении которых должны уже быть заинтересованы создатели БР:

- 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).

Это позволит перейти от начальных принципов реализации ЯЭ (безопасность, конкурентоспособность) к реализации второго этапа развития ЯЭ на более адекватных базовых принципах устойчивого развития ЯЭ:

- Риск пропорционален мощности ЯЭ, а не интегральной энерговыработке (замыкание ЯТЦ по всем опасным радионуклидам).
- Нейтронная эффективность ЯЭ должна возрастать (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).

Но если создателям БР кажется, что общее рассмотрение проблемы развития ЯЭ выходит за рамки их компетенций («заработной платы»), они имеют возможность более ясно наметить для себя целевые ориентиры создания ТР и БР, входящих в систему ЯЭ, отвечающей требованиям устойчивого развития (ИНПРО) в свете современного видения проблем и перспектив развития:

- Реакторы на тепловых нейтронах – расширение области использования ЯЭ, минимизация количества плутония в ЯТЦ (снижение обогащения и глубины выгорания топлива, использование тория и урана 233).
- Реакторы на быстрых нейтронах – обеспечение нейтронного баланса в системе ЯЭ (повышение энергонапряженности – снижение загрузки, увеличение наработки избыточного топлива за счет использования плотного топлива, воспроизводящих экранов, снижения глубины выгорания, минимизации времени внешнего ЯТЦ).
- Жидкотопливные реакторы - минимизация количества минорных актинидов в системе ЯЭ.
- Термоядерные источники нейтронов – повышение темпов вовлечения тория-232 и урана-238 в ядерный топливный цикл, повышение нейтронного потенциала системы ЯЭ.

## ***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
- Гибридные системы «синтез-деление» для повышения темпов вовлечения урана 238 и тория 232 в топливный цикл

## Трудности реализации сценариев с ТИН и БР

- Ссылка на своего рода доказанность теоремы о возможности создания реакторов на быстрых нейтронах и технологий замкнутого ядерного топливного цикла убедительна для специалистов с техническим складом ума, но она не является достаточной для принятия соответствующих решений в экономической области решения проблем развития ЯЭ.
- А то, что ТИН вполне привлекателен с экономической точки зрения и то, что государства выделяют на его разработки вполне достаточные средства, пока не приводит к доказательству теоремы его реализуемости, может быть и по той причине, что у разработчиков постоянно присутствует желание создать что-то лежащее за гранью возможного, и претендующего на решение задач, непосильных термоядерным реакторам в силу пока неготовности соответствующих принципов и теорий.



**Благодарю Вас  
за внимание**

# Сценарии развития ЯЭ в мире

(WNA - 2008; IAEA - 2010; IAE - 2012)



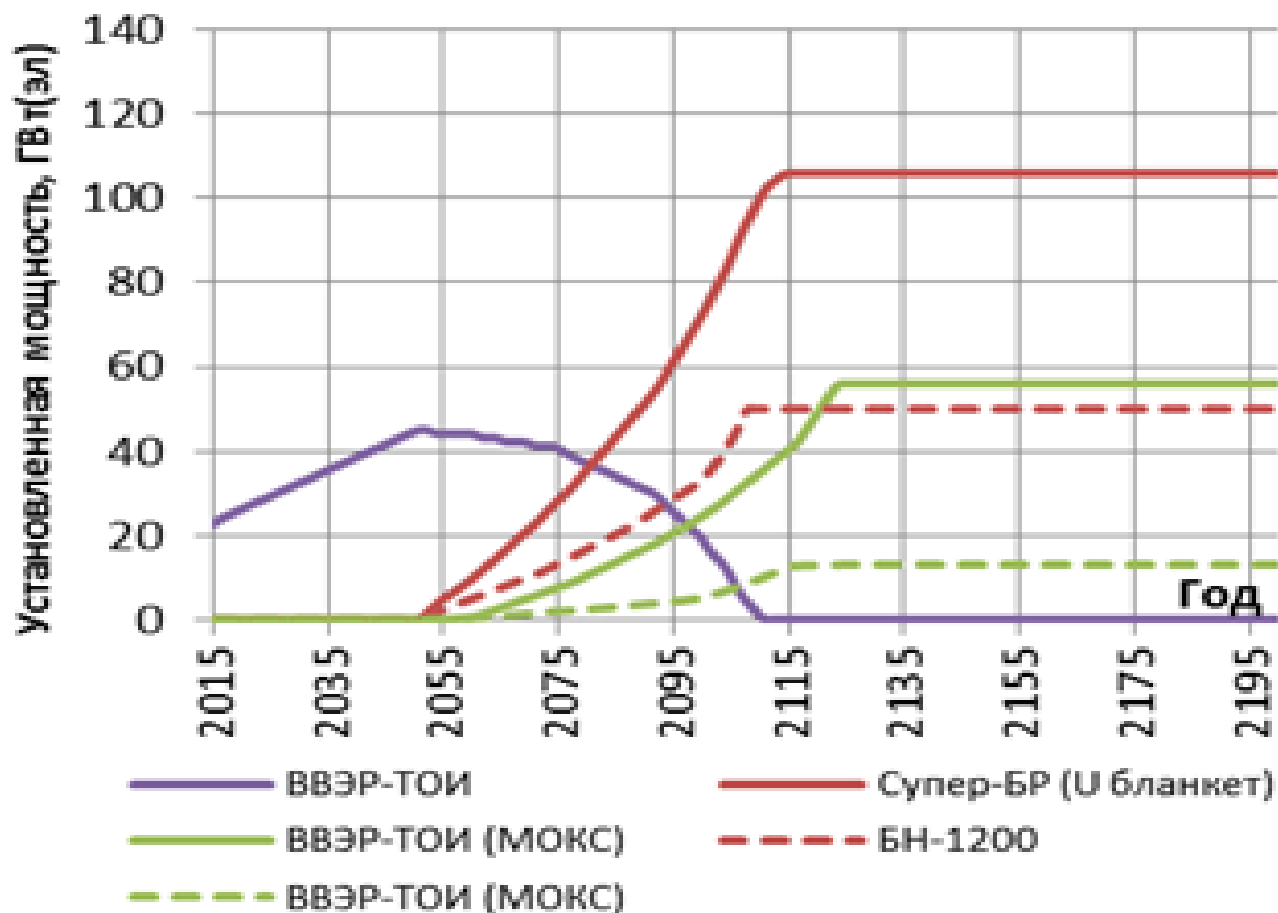
\* Nuclear Energy Development in the 21st Century: Global Scenarios and Regional Trends. – Vienna: IAEA, 2010. – (IAEA Nuclear Energy Series № NP-T-1.8)

\*\* Energy Technology Perspectives 2012. Pathways to Clean Energy System. – France: OECD/IEA, 2012



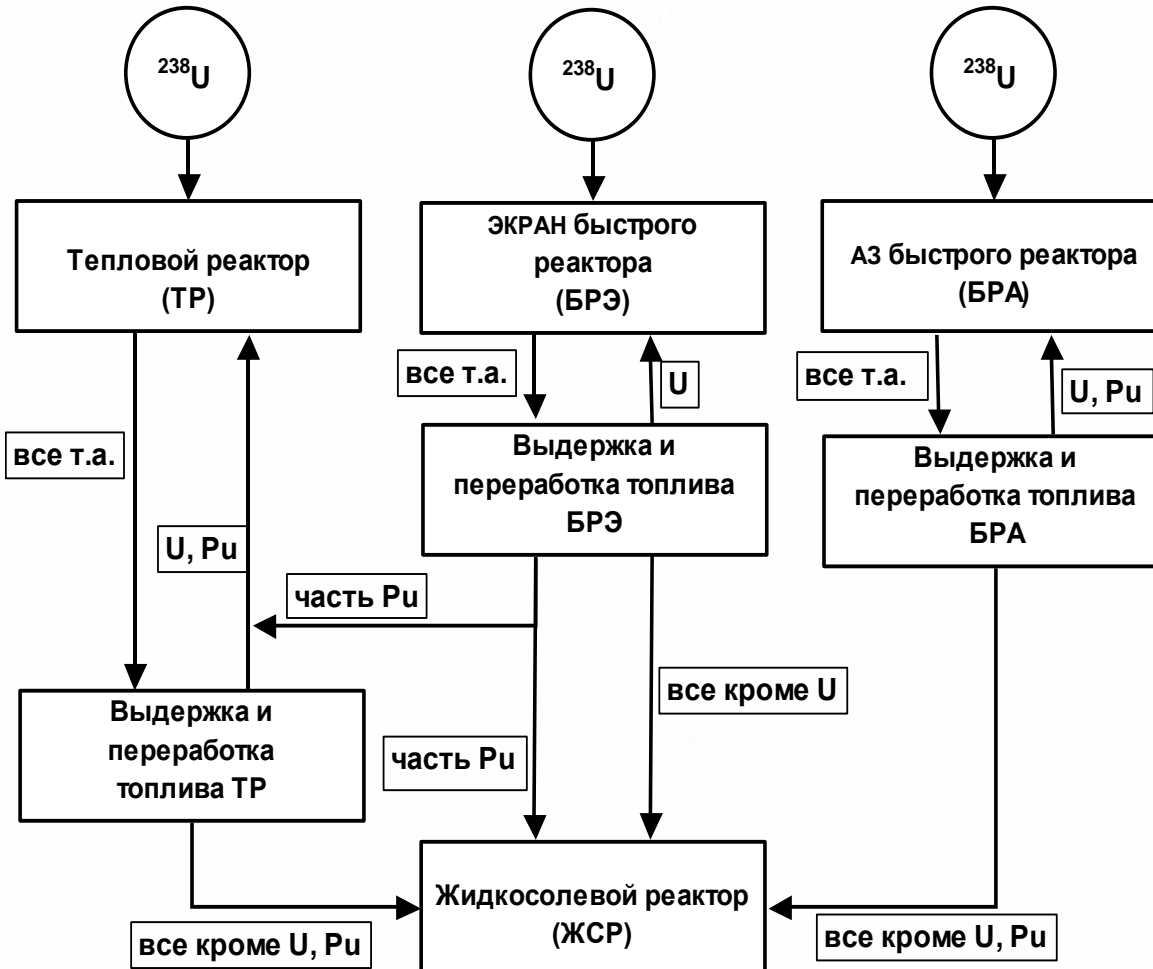
## Влияние характеристик БР на масштабы развития двухкомпонентной ЯЭ

(программный комплекс *DESAE* – расчет материальных балансов и экономических показателей)



# Структура ИЯС

## для варианта уран-плутониевого ЯТЦ



Доля мощности  
реакторов в системе

**59% ТР**

**33% БР**

**8% ЖСР**

Количество топлива  
на 1ГВт(э)

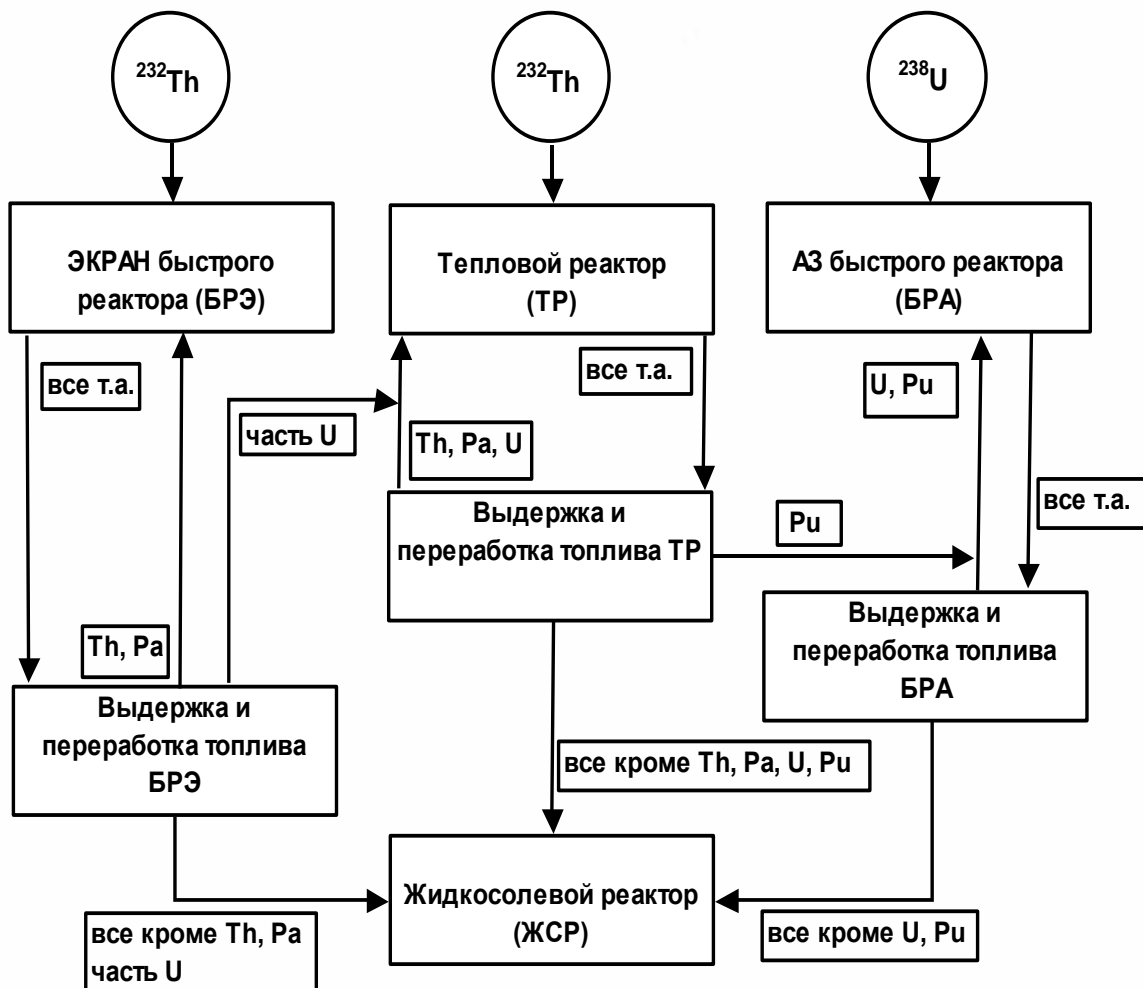
**Всего в ИЯЭС**

**285.0 т т.н.**

**Во внешнем ЯТЦ**

**175.3 т т.н.**

# Структура ИЯС 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.