



Национальный исследовательский центр
«Курчатовский институт»



О стратегии создания двухкомпонентной системы замкнутого ядерного топливного цикла

**Алексеев П.Н., Гагаринский А.Ю., Калугин М.А.,
Семченков Ю.М., Сидоренко В.А., Субботин С.А.**

21-я ежегодная конференция МО ЯОР
«Будущее атомной энергетики»
к 40-летию Курской АЭС

14 декабря 2016 г.

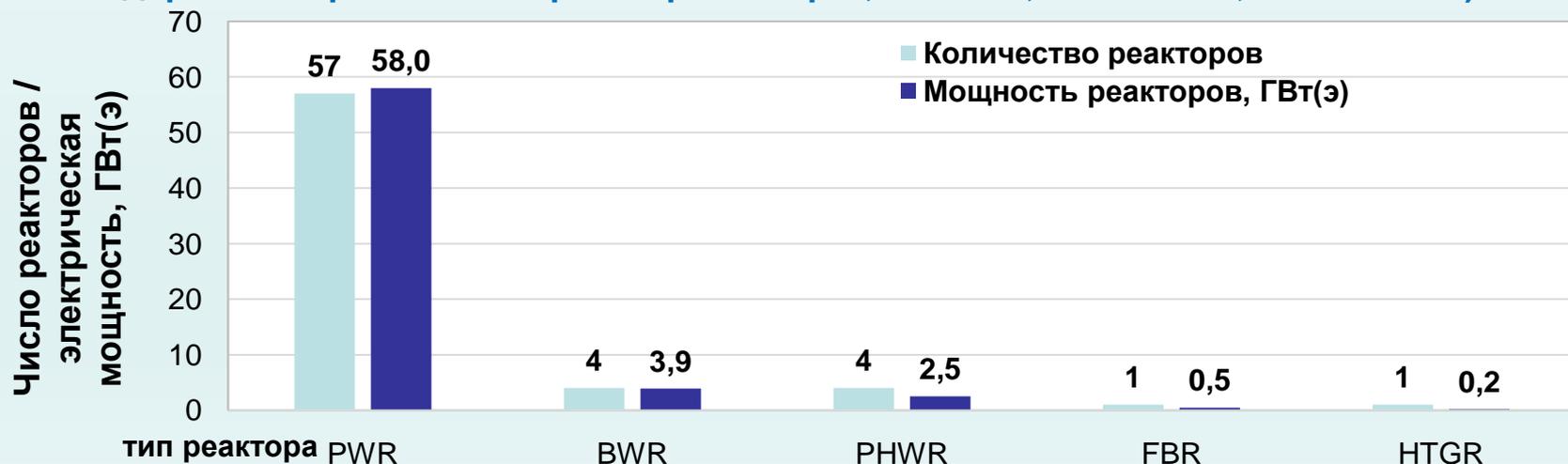
Ядерные реакторы в мире и России

Корпусные водоохлаждаемые реакторы в мире

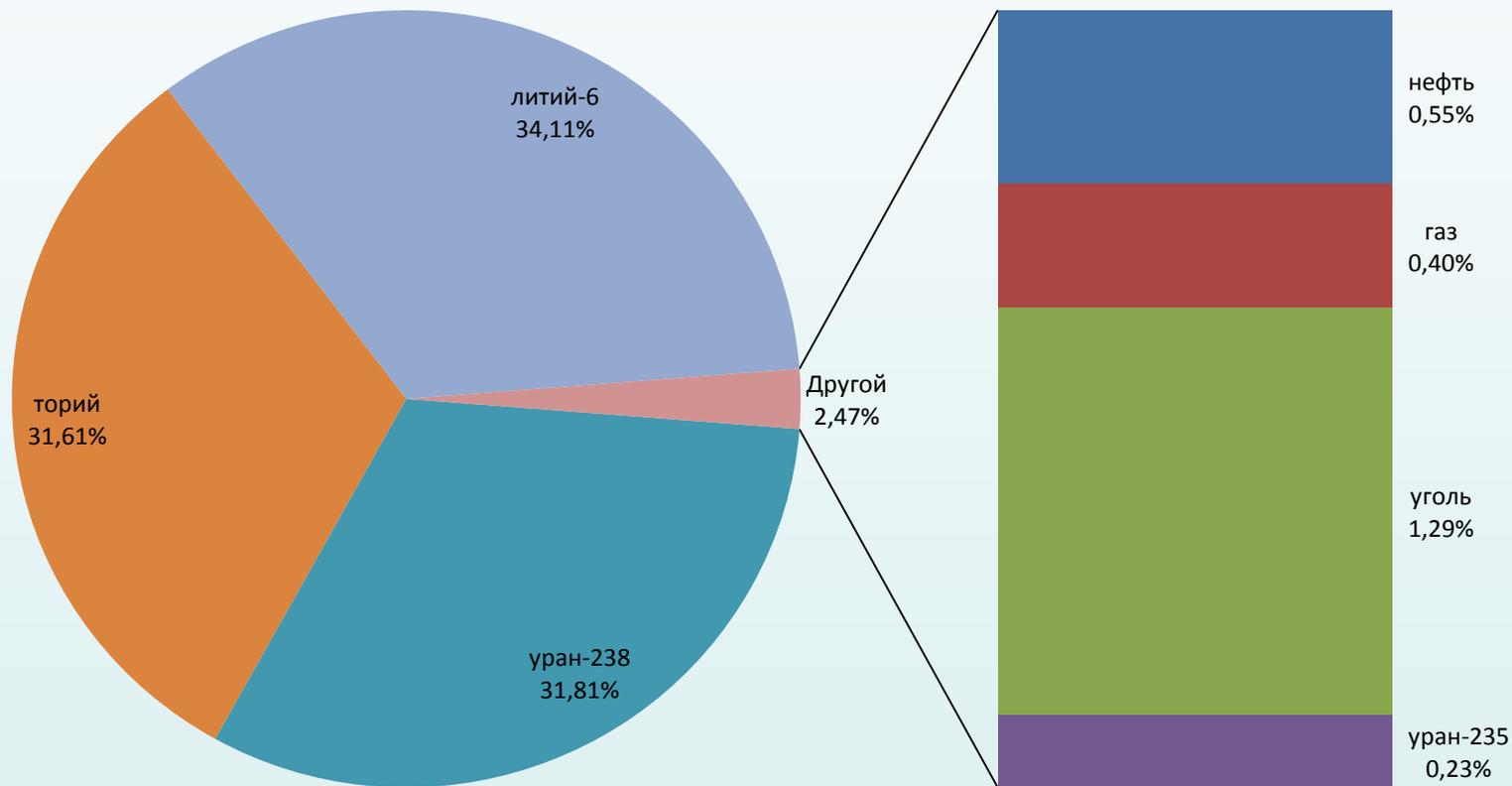
Наибольшего успеха человечество добилось, сконцентрировавшись на одной реакторной технологии, сделав ее наиболее продвинутой и накопив наибольший объем знаний и опыта. Это корпусные водоохлаждаемые реакторы, которые сегодня (с учетом морской энергетики, эксклюзивно использующей реакторы PWR) составляют 95% реакторного парка мира.

Тип реактора	Число реакторов	Суммарная мощность, ГВт(э)	Доля в мировом реакторном парке, %	Число стран, где эксплуатируются
PWR	227	222,6	58	17
BWR	78	75,2	20	10
ВВЭР	55	41,1	11	10
Другие (PHWR, GCR, РБМК, FBR)	81	68,3	11	10

Количество и мощность строящихся в мире реакторов различного типа (на 31 декабря 2015 г. "Ядерные энергетические реакторы в мире", МАГАТЭ, IAEA-RDS2, 2016 Edition)



Мировое распределение энергетических ресурсов, %



Постановка задачи организации ЯТЦ

Для того чтобы ЯЭ могла решить поставленные перед ней в рамках международного проекта ИНПРО задачи по участию в обеспечении устойчивого развития она должна:

- Перейти на максимальное использование сырьевого потенциала урана 238 и тория 232.
- Замкнуть ЯТЦ по МА для решения проблем управления и изоляции РАО
- Фракционировать продукты деления для их использования в народном хозяйстве (*развитие нуклидной экономики*)

Этапы развития ядерной энергетики:

-Открытый топливный цикл (эффективное потребление урана-235);

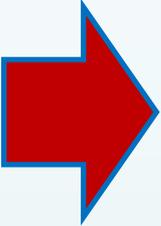
-Переходный этап от открытого к замкнутому топливному циклу (двухкомпонентная ЯЭ);

-Замкнутый топливный цикл (переход к максимальному использованию сырьевого потенциала урана-238 и тория-232) с реализацией расширенного воспроизводства делящихся изотопов.

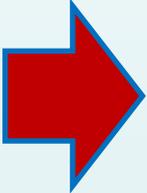
Переходный этап к ЗЯТЦ в ядерной энергетике России

- ❑ Замыкание ЯТЦ только для тепловых реакторов на основе смешанного уран-плутониевого топлива позволяет решить проблему накопления ОЯТ, вовлечь в ЯТЦ регенерированный плутоний, *но не позволяет решить проблему топливообеспечения ЯЭС на всем жизненном цикле и может служить лишь переходным этапом к развитию двухкомпонентной ЯЭ с реакторами на тепловых и быстрых нейтронах.*
- ❑ *Быстрые реакторы в одиночку не решают проблемы долгосрочного устойчивого развития ЯЭ России. **Необходим этап построения сбалансированной системы с тепловыми и быстрыми реакторами. Система ВВЭР и БН позволит обеспечить поддержку экспортного потенциала и расширить спектр предложений ГК Росатом на внешнем рынке.***

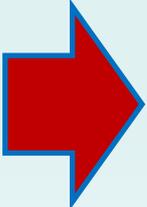
Задачи перехода к ЗЯТЦ в ядерной энергетике России



Задача: «Разработка ядерной энергетической системы с реакторами ВВЭР и БН, работающей в замкнутом ядерном топливном цикле» получила первый приоритет в списке перспективных НИОКР на Президиуме НТС Госкорпорации Росатом 30.09.2015,



Стратегическая задача ядерной энергетики России – создание ЗЯТЦ для решения проблемы накопления ОЯТ и максимального использования сырьевого потенциала урана-238 и тория-232 на основе системы с тепловыми реакторами и реакторами бридерами на быстрых нейтронах.



В перспективе - создание многокомпонентной системы ЯЭ для создания возможностей маневра в структуре ядерного топливного цикла, которые могут в приемлемые временные периоды компенсировать возможные неудачи развития отдельных технологий или отклонений реального развития от намечаемых сценариев.

Цели перехода к ЗЯТЦ

Управление накоплением ОЯТ, РАО и Pu:

- сокращение ОЯТ и РАО в системе;
- максимальное использование энергетического потенциала ОЯТ;
- построение ЯЭС, потребляющей регенерированные материалы U и Pu;
- оптимизация затрат процесса перехода к замкнутому ЯТЦ;
- повышение уровня безопасности объектов ЯЭ;
- контроль за нераспространением ядерных материалов;
- повышение уровня экономической конкурентоспособности ЯЭ на внутреннем и внешнем рынках;
- формирование облика перспективной ЯЭ.

Гарантированная ресурсобеспеченность:

- минимизация потребления природных ресурсов;
- обеспечение технических решений, позволяющих управлять воспроизводством топлива в ЯЭС;
- дальнейшее повышение уровня безопасности;
- дальнейшее повышение уровня экономической конкурентоспособности;
- решение вопроса окончательной изоляции РАО и вывода из эксплуатации объектов ЯЭ.

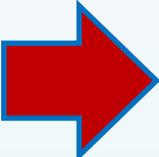
Развитие направления ВВЭР

- Расширение мощностного ряда;
- **Повышение потребительской привлекательности (надежность, безопасность, маневренность, сейсмоустойчивость);**
- Присутствие российской реакторной технологии на мировом рынке;
- **Создание оптимальной структуры ядерного топливного цикла (улучшение топливоиспользования, повышение коэффициента воспроизводства, вовлечение ресурсов тория, работа в ЗЯТЦ с БН);**
- Развитие технологий ВВЭР (парогенератор новой конструкции, повышение водородной безопасности, устойчивости к сейсмическим и ударным нагрузкам и др.);
- Увеличение ресурса оборудования ;
- Повышение эффективности преобразования энергии;
- **Разработка ВВЭР-С и ВВЭР-СКД.**

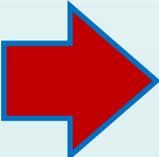
Вывод: Корпусные водоохлаждаемые реакторы – практическая основа промышленной ядерной энергетики в текущем столетии



Улучшение экспортного потенциала АЭС с ВВЭР

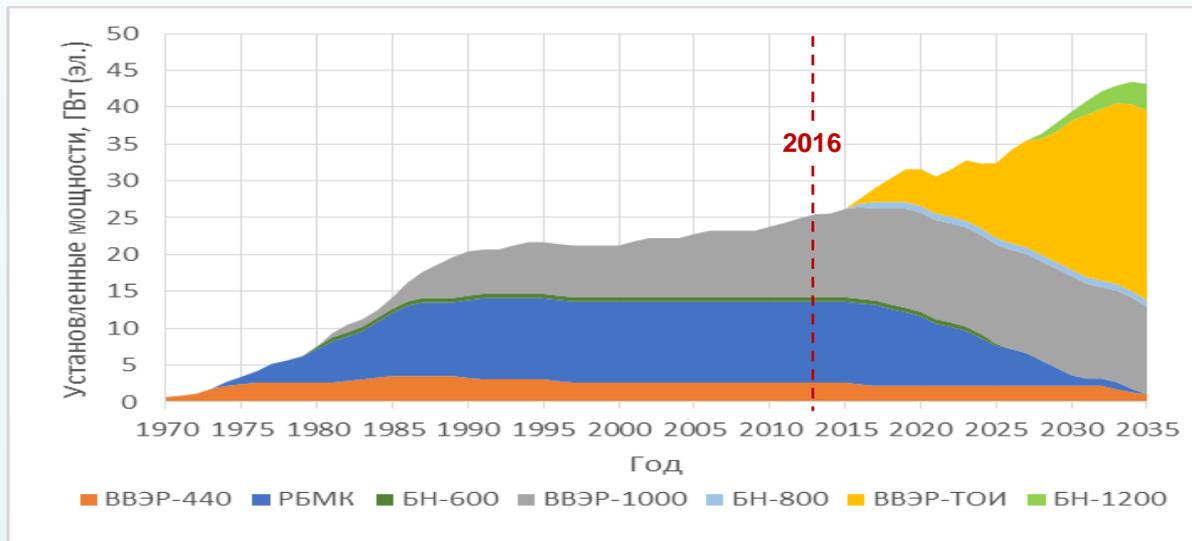


Внедрение замкнутого ЯТЦ позволит улучшить экспортный потенциал АЭС с ВВЭР, в том числе благодаря возможности **предоставления полного набора услуг по полному жизненному циклу ядерного топлива** - обеспечение поставок свежего топлива, переработка ОЯТ и компактизация РАО.

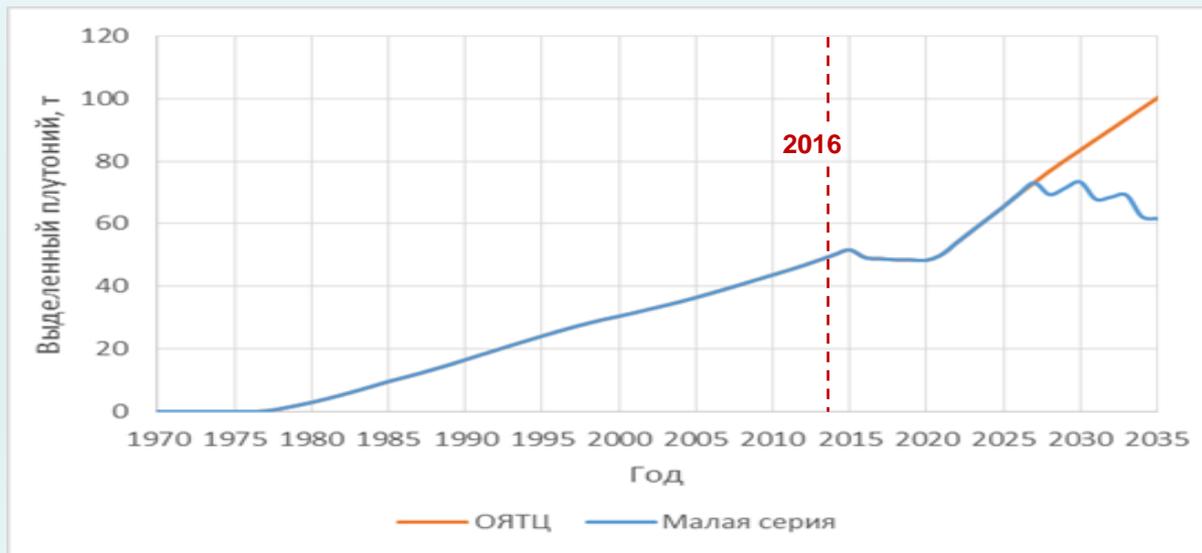


Возвращаемое ОЯТ может быть переработано в рамках централизованных предприятий или международных центров по переработке, а **извлекаемый плутоний в смеси с ураном может быть эффективно использован в виде топлива в быстрых натриевых реакторах.**

Влияние ввода малой серии БН-1200 на накопление плутония на складе



Установленные мощности ЯЭ РФ до 2035 г., ГВт(э) (дорожная карта РЭА)



Накопление Pu на складе с учетом ввода ОДЦ и малой серии БР

Баланс делящихся изотопов плутония



Без учета оружейного Pu
Без оружейного плутония
программа имеет дефицит
топлива начиная с 2025 года



С учетом 34 тонн оружейного
Pu дефицит плутония будет
после 2045 года

Системные требования к ТР и БР, связанные с ограничениями по ресурсам урана

Двухкомпонентная ЯЭС с реакторами ВВЭР и БН, объединенных промышленной инфраструктурой централизованного замкнутого ЯТЦ, может обеспечить решение поставленной задачи устойчивого развития ЯЭ при условии необходимой модернизации каждого из реакторных направлений под системные требования.

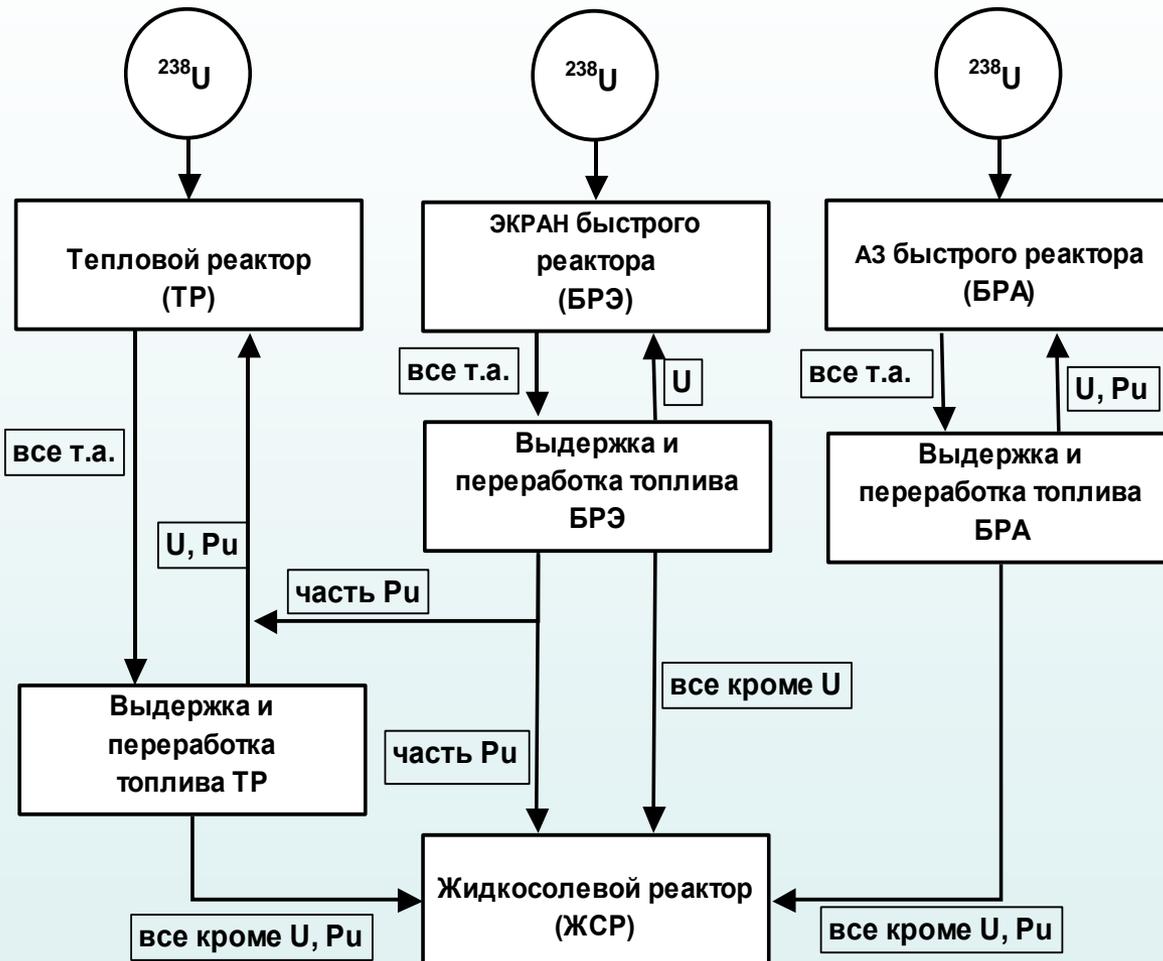
Для ТР и БР системными требованиями, связанными с ограничениями по ресурсам урана, являются:

- при работе ТР на урановом топливе - расход природного урана не более 130 т на ГВт·год электроэнергии;
- при работе ТР в замкнутом топливном цикле - коэффициент воспроизводства топлива ($K_B \sim 0,8$);
- Удельная загрузка БР по делящимся нуклидам (3,5-4,0) т на ГВт(э);
- Избыточная наработка в БР делящихся нуклидов (250 – 300) кг на ГВт(э)·год.

Для того, чтобы система ЯЭ с ВВЭР-ТОИ и БН-1200(с высоким K_B) в ЗЯТЦ с МОКС-топливом могла полностью обеспечить себя топливом за счет воспроизводства плутония, из каждых установленных 7 ГВт(э) в ЯЭ 5 ГВт(э) должно приходиться на БН-1200 и 2 ГВт(э) - на ВВЭР-ТОИ.

Перевод тепловых реакторов на замкнутый уран-ториевый топливный цикл позволяет решить задачу самообеспечения топливом системы ЯЭ при значительно меньшей доле БН.

Структура ИЯС для варианта уран-плутониевого ЯТЦ



Доля мощности
реакторов в системе

59% ТР

33% БР

8% ЖСР

Количество топлива
на 1ГВт(э)

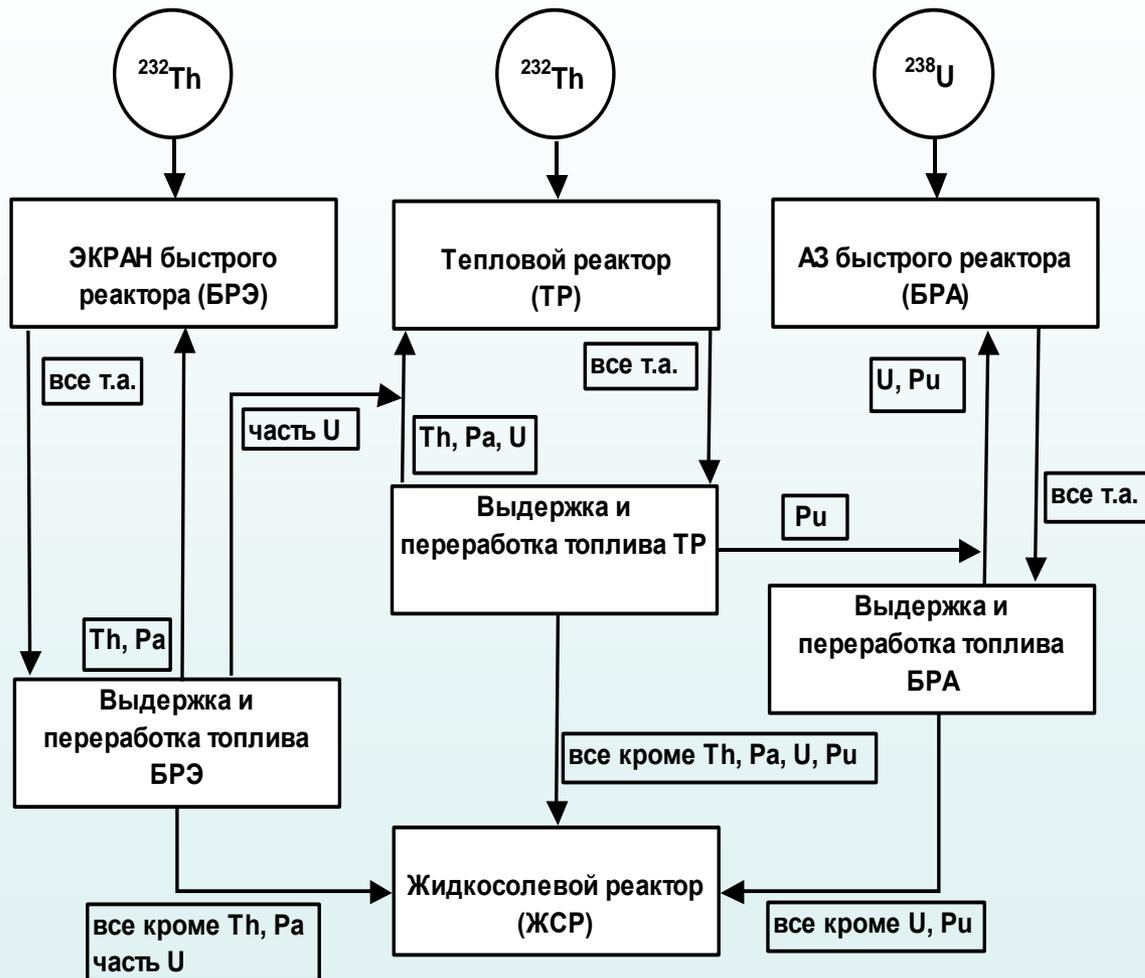
Всего в ИЯЭС

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

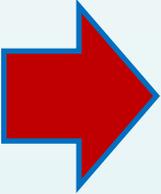
136.2 т т.н.

Во внешнем ЯТЦ

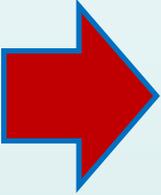
87.8 т т.н.

Предложения НИЦ КИ

Для комплексного решения проблем развития ЯЭ РФ, которое позволяет обеспечить указанные в ЭС-2035 ориентиры устойчивого развития и реально выйти на мировой рынок с новым продуктом, необходимо:



Развивать систему существующих и перспективных ВВЭР в совокупности с существующими и планируемыми к созданию реакторами БН, работающими в замкнутом уран-плутониевом топливном цикле;



В дальнейшем подготовить научно-технический базис постепенного перевода тепловых реакторов на замкнутый уран-ториевый топливный цикл; разработать гибридные ТИН с жидкосолевыми бланкетами для наработки урана 233

Механизм развития ИЯЭС

- При постановке задачи следует исходить из базового экономического принципа устойчивого развития ИЯЭС (ИНПРО): ИЯЭС должна быть технически реализуема с помощью экономических методов.
- При этом необходимо так поставить задачу развития ИЯЭС как системы, чтобы она стала инвестиционно привлекательна.

Проблемы реализации различных переделов ЯТЦ

	Этапы	Рыночные механизмы	Решения на уровне государства	Международные соглашения
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			+

Выводы

- **Двухкомпонентная ИЯЭС - это необходимый этап перехода к многокомпонентной ИЯЭС, она позволяет наряду с возможностями реализации различных топливных схем в реакторах обеспечивать широкие возможности маневра в структуре ядерного топливного цикла.**
- **Стратегическая задача создания замкнутого топливного цикла – решение проблемы накопления ОЯТ и эффективное использование сырьевого потенциала урана-238 и тория-232.**
- **Адаптация реакторов типа ВВЭР и БН к меняющимся условиям и требованиям в течение всего их жизненного цикла требует значительных временных, интеллектуальных и материальных ресурсов.**

**Благодарю Вас
за внимание!**

