

# Энергетика: социальные и экономические вызовы\*

**КАРПОВ Сергей Алексеевич,**  
и.о. руководителя СТИ НИУ МИФИ,  
кандидат физ.-мат. наук, доцент

\* Использованы материалы презентаций:  
НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ ЗЯТЦ ДВУХКОМПОНЕНТНОЙ ЯЭ  
Научный руководитель НИОКР ПН "ПРОРЫВ"  
В.И. РАЧКОВ, Ю.С. ХОМЯКОВ

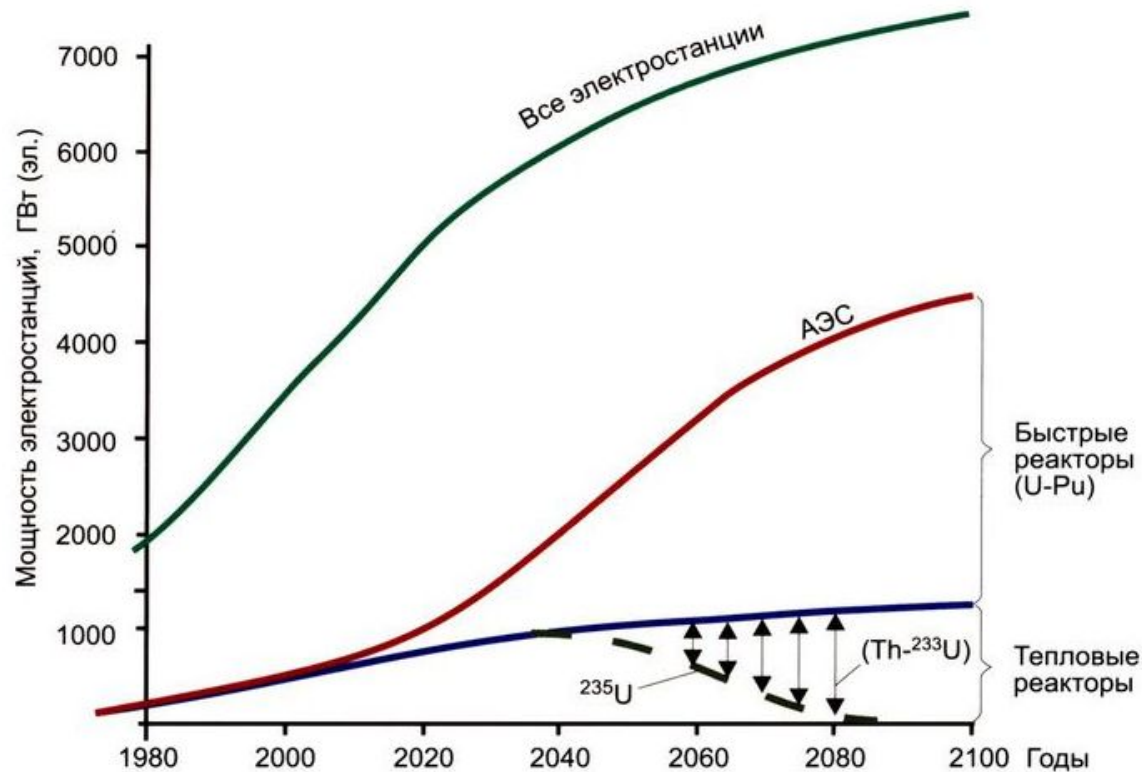
Реакторная установка БРЕСТ-ОД-300: этапы разработки и обоснования  
А.В. Моисеев  
Томск, 17 октября 2018 г.

29 октября 2018 г.

1

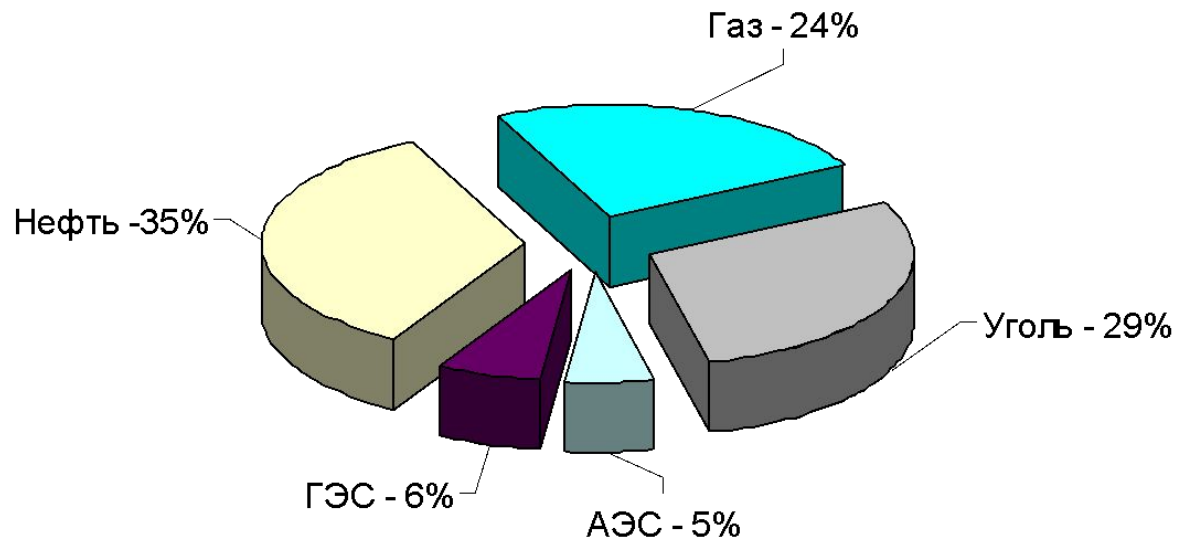
# СТАРТОВЫЕ ОЖИДАНИЯ И СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ЯДЕРНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ

# Прогноз роста мировых ядерных энергогенерирующих мощностей



В 70-ых годах прошлого века мировое экспертное сообщество видело прогноз развития ядерной энергетики (ЯЭ) в безусловно оптимистичных тонах, предполагая дальнейшее стремительное развитие данной отрасли, вплоть до того, что к 20-ым годам 21 века ЯЭ должна была занять 30% в мировом объеме энергопроизводства. Однако, данным прогнозам не суждено было сбыться

# Роль современной ЯЭ в мире



**Энергопроизводство в 2015 г.**

# Масштабы развития ЯЭ в рамках общего производства электроэнергии в России (по прогнозу ИНЭИ-2016), ТВт·ч

	2013	Вероятный сценарий					Критич. сценарий 2040	Благопр. сценарий 2040
		2020	2025	2030	2035	2040		
Всего	1058	1099	1170	1235	1310	1380	1290	1510
Нефть	9	5	4	3	2	2	1	2
Газ	518	498	533	561	582	586	543	679
Уголь	162	147	150	151	149	143	132	165
<b>ЯЭ</b>	<b>173</b>	<b>221</b>	<b>223</b>	<b>229</b>	<b>250</b>	<b>280</b>	<b>245</b>	<b>294</b>
Гидро	181	198	208	215	222	222	222	222
Био	3	3	3	4	6	8	8	9
Др. ВИЭ	12	26	49	72	99	139	138	139

- Для России разработаны три сценария, в своей логике продолжающие мировые сценарии. Вероятный сценарий включает все предпосылки соответствующего мирового сценария в сочетании с сохранением текущей эффективности экономики и энергетики самой России. Экономика России в этом сценарии после 2020 г. выйдет на умеренные среднегодовые темпы роста 2,2–2,4 %
- Более высокая энергоёмкость российской экономики по сравнению с другими странами сохранится на всю рассматриваемую перспективу во всех сценариях
- Структура энергетического баланса по видам топлива сохранится в России практически неизменной
- Основой российской электроэнергетики останутся тепловые электростанции, обеспечивающие во всех сценариях около 62 % выработки в 2040 г.

# Масштабы развития ЯЭ в рамках общего производства электроэнергии в Море (по прогнозу ИНЭИ-2016), ТВт·ч

	2013	Вероятный сценарий					Критич. сценарий 2040	Благопр. сценарий 2040
		2020	2025	2030	2035	2040		
Мир	2478	3117	3423	3886	4184	4433	4154	4718
США	822	886	921	899	869	870	858	896
Европа	903	872	779	836	793	762	688	803
Китай	153	389	585	805	994	1147	1080	1207
<b>Россия</b>	<b>173</b>	<b>221</b>	<b>223</b>	<b>229</b>	<b>250</b>	<b>280</b>	<b>245</b>	<b>294</b>
Индия	34	79	120	159	195	229	203	257

**2**

ПОЧЕМУ ТАК ?

## Пределы роста ЯЭ на «старой» технологической платформе: тяжелые аварии

**Технологическая база ЯЭ на основе LWR достаточна для прогнозируемых (до 2050 г.) масштабов строительства АЭС.**

**Однако потенциал её в решении долгосрочных энергетических проблем ограничен из-за несоответствия уровня технической безопасности основному требованию к крупномасштабной ЯЭ – исключению аварий, требующих эвакуации населения**

**Три Майл Айленд – 1979 г.**

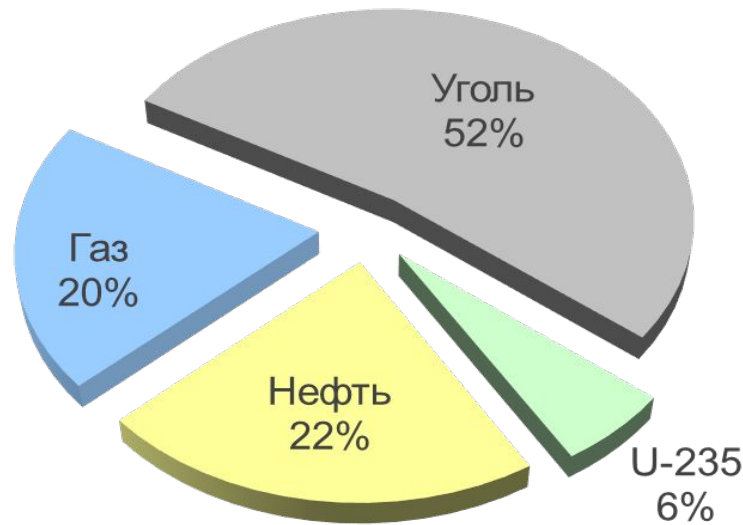
**Чернобыль – 1986 г.**

**Фукусима – 2011 г.**



# СИСТЕМНЫЕ ПРОБЛЕМЫ “старой” технологической платформы ЯЭ: сырье, РАО и нераспространение

1. Низкая эффективность использования природного урана.



Относительный энергетический потенциал природных ресурсов мира (для органического топлива: данные ВР на конец 2008 г., для урана - 235: RAR 3,3 млн.т - IAEA - TECDOC-1629, 2009)

2. Отсутствие экологически приемлемого обращения с РАО

3. Риск переключения ДМ, обращающихся в ЯТЦ, на военные или террористические цели

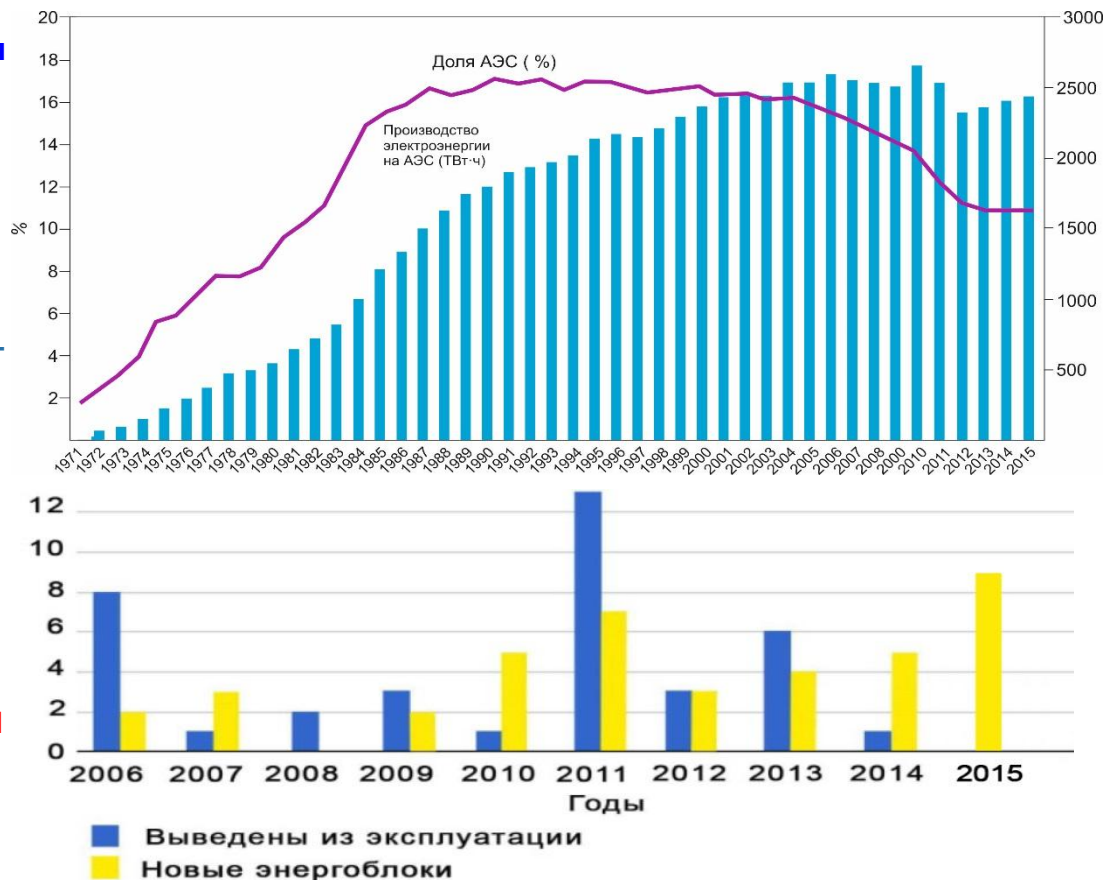
# Барьеры на пути развития глобальной ЯЭ: экономика

Глобальная ЯЭ в последние 30 лет находится в кризисном состоянии. Максимальная доля АЭС в выработке глобальной электроэнергии в 18% была достигнута в начале 90-х. На сегодня она снизилась до 10,7%. Прогнозы признанных энергетических организаций, указывают на вероятность дальнейшего снижения этой доли до уровня однозначных цифр.

Ввод новых блоков АЭС за 10 последних лет примерно равен выводу из эксплуатации и уступает по масштабам вводу мощностей альтернативной энергетики

**Основным барьером на пути развития современной ЯЭ, является проблема конкурентоспособности, которая упирается в проблему безопасности**

Попытки решить проблему безопасности путём создания дополнительных активных средств защиты привели к **снижению конкурентоспособности ЯЭ** в сравнении с органической энергетикой.



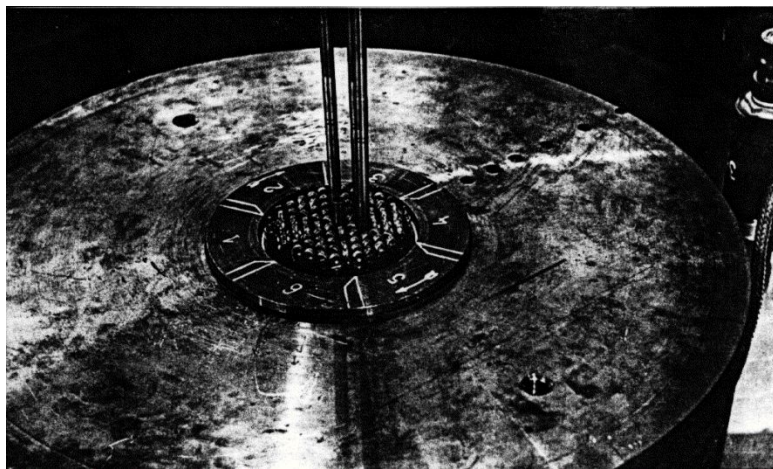
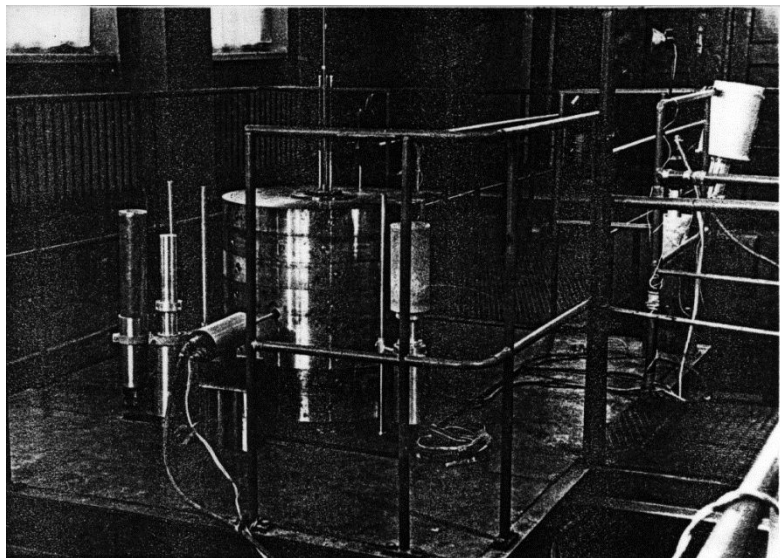
# Социальные и экономические вызовы для ядерной энергетики XXI века

- 1. Техническая безопасность ЯЭ:** исключение аварий, требующих эвакуации населения может открыть возможность крупномасштабного развития ядерной энергетики
- 2. Экологическая безопасность ЯТЦ:** решение проблем обращения с ВАО и накопления ОЯТ
- 3. Политическая нейтральность ЯТЦ:** технологическая поддержка режима нераспространения
- 4. Устойчивое топливообеспечение ЯЭ:** долговременная обеспеченность ЯЭ (на тысячи лет) топливными сырьевыми ресурсами
- 5. Конкурентоспособность ЯЭ:** стоимость производства электроэнергии (коп./кВт.ч)

3

ЗАМКНУТЫЙ ЯДЕРНЫЙ  
ТОПЛИВНЫЙ ЦИКЛ С  
РЕАКТОРОМ НА БЫСТРЫХ  
НЕЙТРОНАХ КАК БАЗА  
НОВОЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ  
ПЛАТФОРМЫ  
ЯДЕРНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ

# Воспроизводство топлива –ключевая особенность быстрых реакторов и основа ЗЯТЦ



**БР-1:**

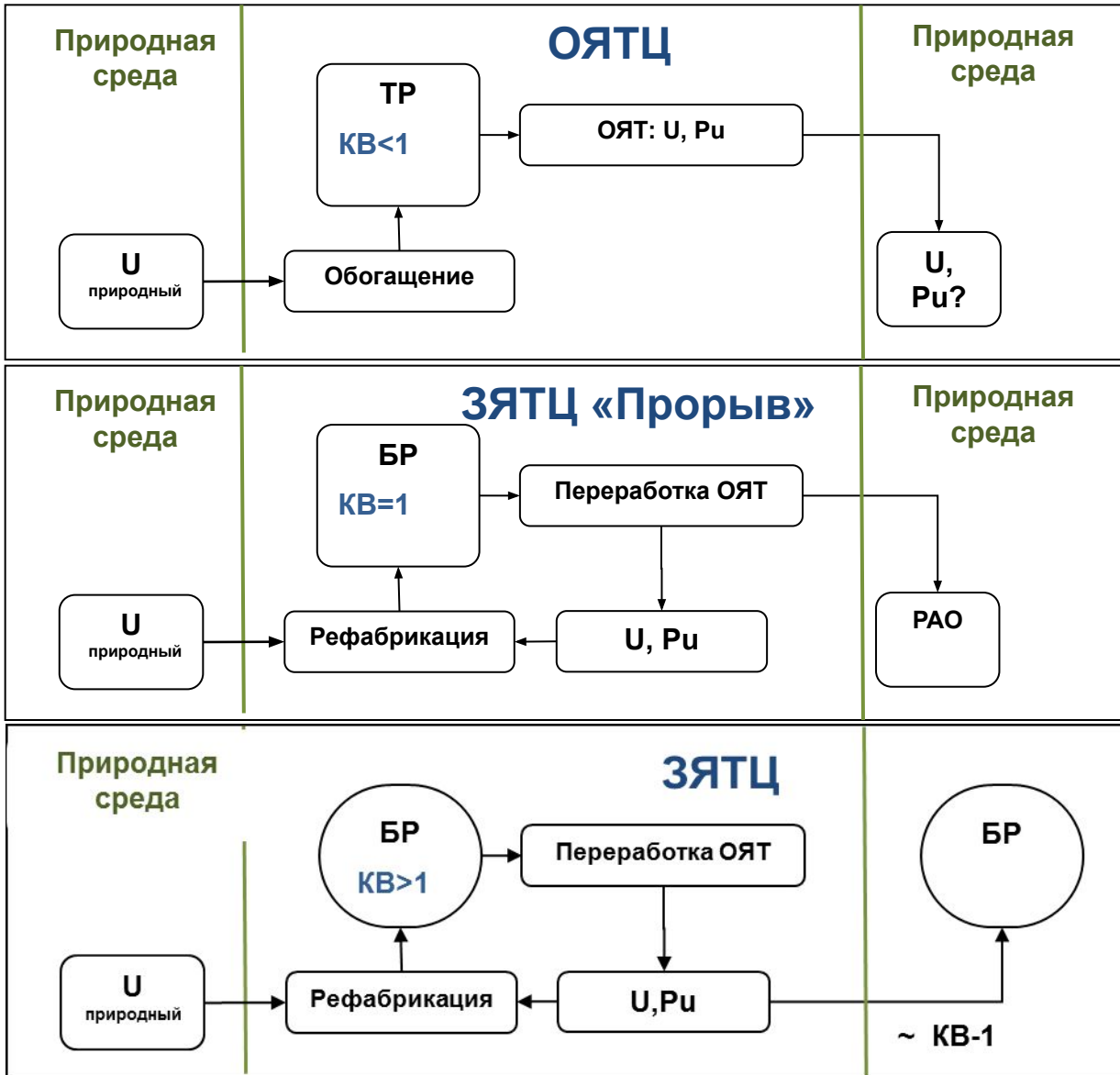
**КВ =  $2.5 \pm 0.2$**

**без учета  $U^{238}(n,f)$  : КВ =  $2.0 \pm 0.2$**

A. I. Leypunsky, I.I.Bondarenko et al. Experimental fast reactors in USSR // Proceedings of the 2nd International Conference for Peaceful Use of Nuclear Power, Geneva, 1958, Presentations of Soviet scientists, P/2129.

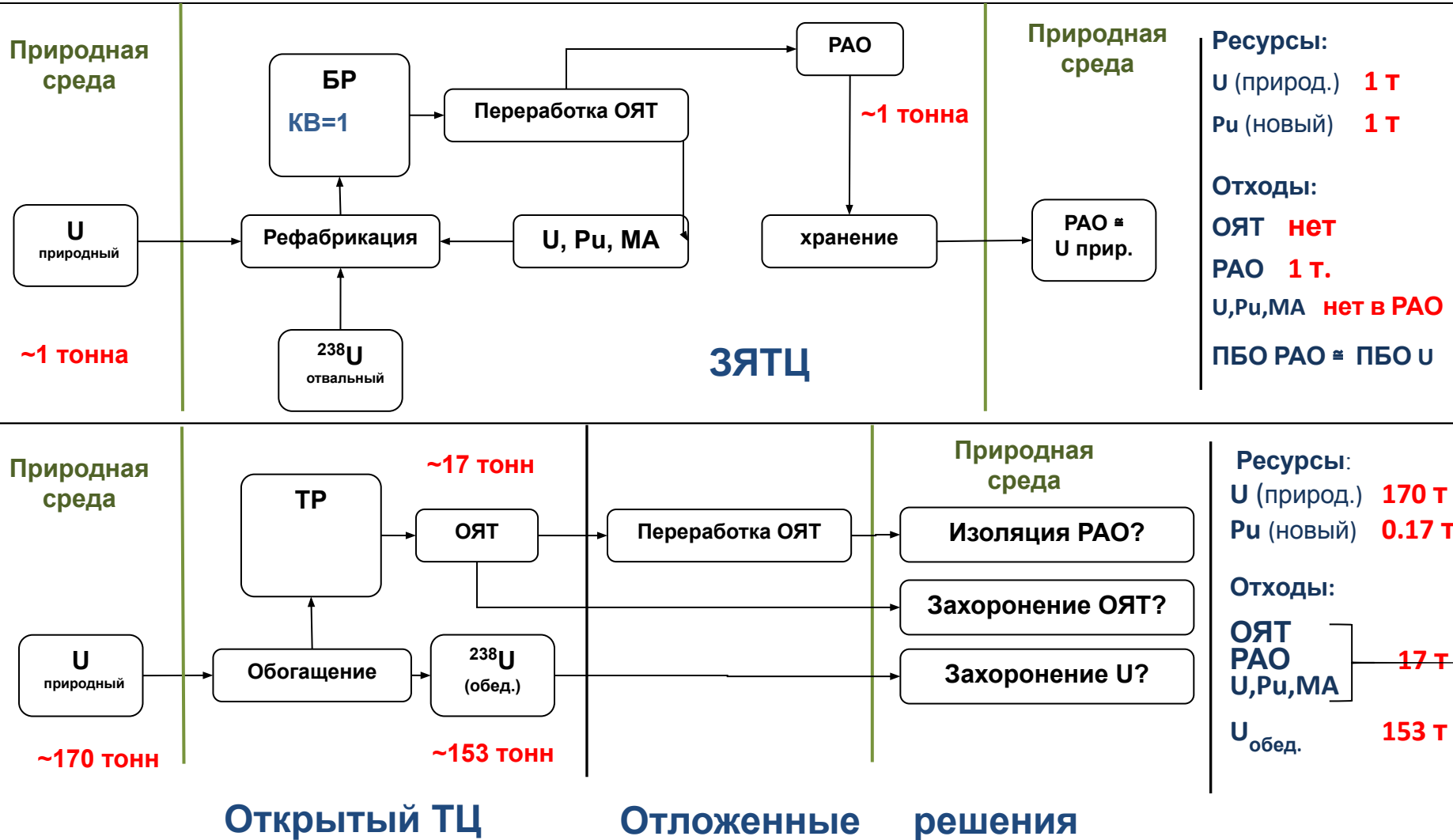


# Принципиальные схемы ЯТЦ



- В открытом ЯТЦ количество делящегося материала постоянно уменьшается, а даже имеющийся U-235 «недожигается» (в зависимости от выгорания)
- В ЗЯТЦ (принят в проекте «Прорыв») с  $KV=1$  Pu играет роль «катализатора» количество которого неизменно, а потребляется только природный уран
- ЗЯТЦ с расширенным воспроизводством с  $KV > 1$  : Pu постоянно накапливается и может быть использован для увеличения парка быстрых реакторов **14**

# Сравнение ОЯТЦ и ЗЯТЦ



## Преимущества ЗЯТЦ перед открытым ЯТЦ в минимизации потоков ресурсов и РАО

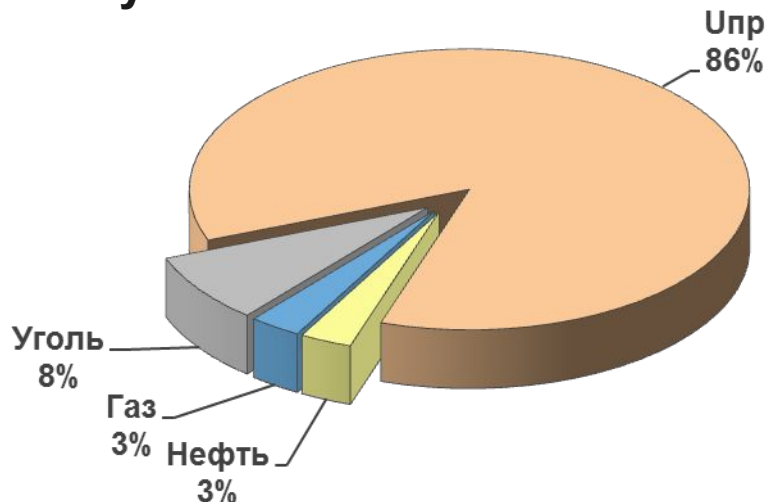
Параметр	ОЯТЦ	ЗЯТЦ
Годовое потребление U на 1 ГВт·год (эл)	170 тонн	1 тонна
Потребление U за 60 лет на 1 Гвт(эл)	10 000 тонн	60 тонн
Максимальная мощность ЯЭ при 600÷700 тыс. тонн природного урана	60÷70 ГВт в течение 60 лет	600÷700 ГВт в течение 1000 лет
ОЯТ, ВАО (актиниды) на 1ГВт·год	17 тонн	Переработанное ОЯТ
РАО в виде осколков деления на 1ГВт·год	1 тонна	1 тонна



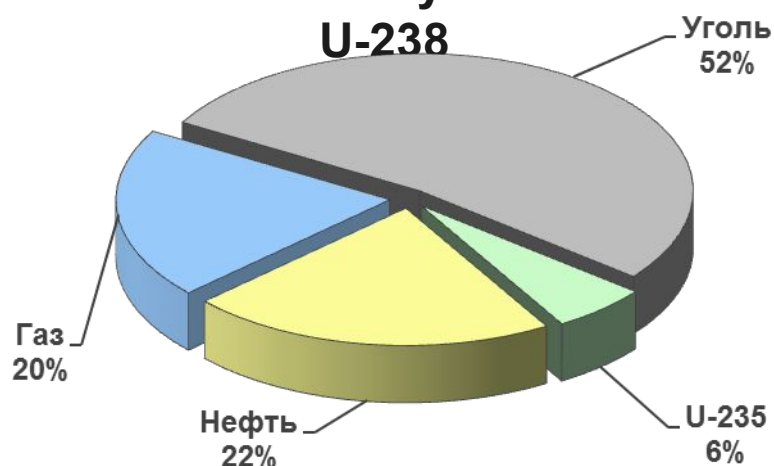
## СЫРЬЕВАЯ УСТОЙЧИВОСТЬ НТП: U-238

Все типы БР в ЗЯТЦ позволяют сменить сырьевую базу ЯЭ с ограниченного U-235 (0,7% природного U) на практически неограниченный U-238 (99,3%). БР на 1 ГВт (эл.) потребляет в год 0,7 т отвального урана, по сравнению со 160 т природного урана в ВВЭР. Такая сырьевая база открывает перспективы масштабного использования АЭ для решения проблем устойчивого развития.

С учетом U-238



Без учета U-238



## Риторический вопрос?

Преимущества ЗЯТЦ в части решения ключевых проблем топливного цикла:

- **топливные ресурсы:** наличие, доступность, удельное потребление на 1 ГВт\*год (кВт\*час), их цена
- **отходы:** количество, опасность

настолько очевидны, что специалисты во всем мире не сомневаются в его необходимости, если, конечно, в целом, ядерный способ получения энергии окажется конкурентоспособным и безопасным (это задача общая и ключевая всей ЯЭ).

Переход к двухкомпонентной ЯЭ в которой наряду с существующими реакторами на тепловых нейтронах (ВВЭР) появятся реакторы на быстрых нейтронах (РБН) **неизбежен. Когда?**

Так почему пока ЗЯТЦ не реализован ни в одной стране мира?

В чем основная проблематика ЗЯТЦ, нерешенные проблемы, основные вопросы научно-технических дискуссий на эту тему?

# Почему ЗЯТЦ не реализован?

## Развитые страны

- ЯЭ сформировалась, потребностей расширения нет – ждем выбывания мощностей
- Для ЗЯТЦ нужны БР, а их в существующей ЯЭ нет
- БР дороги, наличие в цикле «оружейного Pu»
- Технологическая база ТР существует, не выработала свой ресурс, а ЗЯТЦ требует вложений
- В целом ЯЭ не востребована: безопасность, ОЯТ и РАО, конкурентоспособность

## Развивающиеся страны

- Нет отработанных и референтных технологий ЗЯТЦ
- Нет референтных серийных БР
- БР дороги
- ЗЯТЦ дорог:
  - Переработка дороже хранения ОЯТ
  - МОХ, СНУП (смешанное топливо) дороже уранового
- **Нет Pu**

4

ФОРМИРОВАНИЕ  
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ  
ЭЛЕМЕНТОВ НТП до 2035 г.  
и переход к  
ДВУХКОМПОНЕНТНОЙ ЯЭ на  
перспективу до 2100 г.

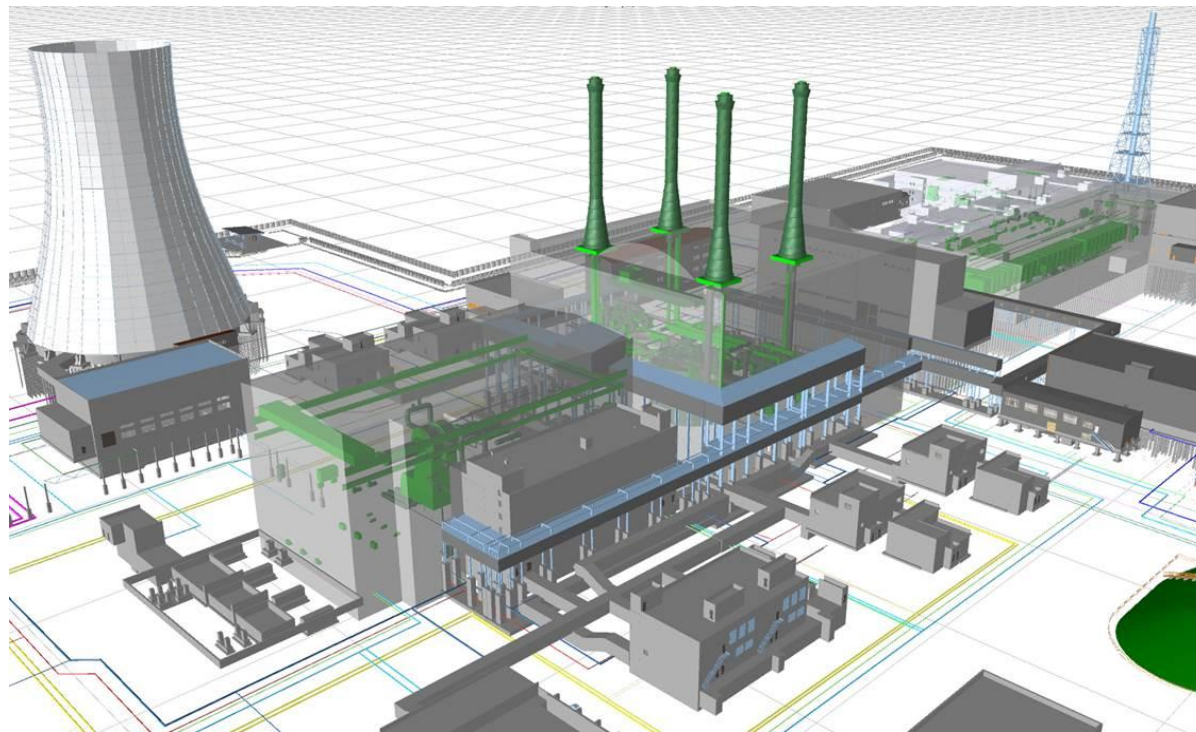
# Цель – создание крупномасштабной ядерной энергетики на основе АЭС с быстрыми реакторами и их ЯТЦ для производства электроэнергии

**Высокая стоимость АЭС – это, прежде всего, плата за безопасность** и гармонизировать эти два противоречащих друг другу требования можно только путем повышения безопасности не инженерными средствами, а в основном путем последовательной реализации природных закономерностей, свойств и качеств, внутренне присущих БР и его наиболее важным компонентам.

## **Базовый принцип технологии естественной безопасности:**

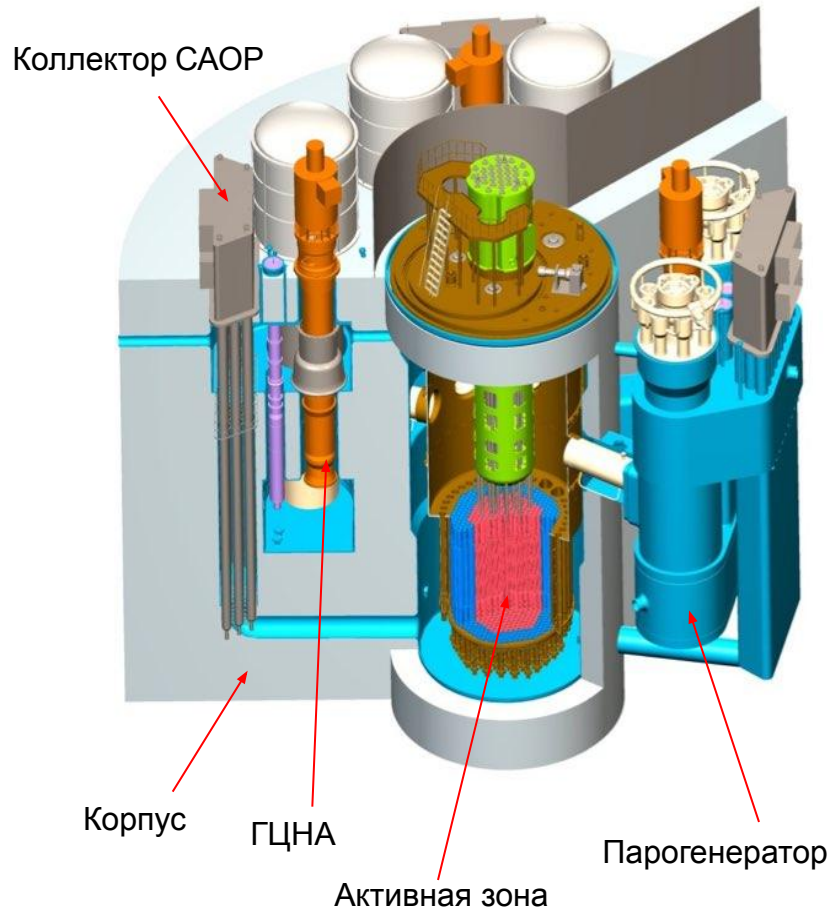
Преимущественное использование для обеспечения безопасности прежде всего, нейтронно-физических и физико-химических свойств топлива, теплоносителя, конструкционных материалов, а также конструкторских решений, позволяющих в полноте реализовать эти свойства, и тем самым исключить целые классы аварий и при этом уменьшить наращивание инженерных мер и систем безопасности.

# Реализация проекта в Опытно-демонстрационном энергетическом комплексе (ОДЭК, г. Северск Томской области)



- ❑ выход в равновесный режим в ЗЯТЦ
- ❑ ресурс изделий активной зоны
- ❑ опыт эксплуатации, ресурсные характеристики элементов РУ
- ❑ выработка электроэнергии

# Концепция быстрого реактора естественной безопасности РУ БРЕСТ-ОД-300



**Использование СНУП-топлива** и тяжелого свинцового теплоносителя позволяют обеспечить воспроизводство делящихся материалов в активной зоне (КВА ~1,05).

**Применение свинцового теплоносителя** с высокой температурой кипения, малоактивируемого, не вступающего в бурное взаимодействие с водой и воздухом в случае разгерметизации контура.

**Интегральная компоновка** в сочетании с многослойным металлобетонным корпусом (нет выхода теплоносителя за пределы корпуса) для исключения потери теплоносителя.

**Отсутствие запорной арматуры в первом контуре** – невозможно прекращение циркуляции. Схема циркуляции теплоносителя с перепадом свободных уровней – гарантированное продление циркуляции при обесточивании.

**Применение пассивной системы аварийного расхолаживания** с естественной циркуляцией и отводом тепла к атмосферному воздуху.

# Ожидаемые результаты внедрения технологий БРЕСТ

**Качественное изменение уровня безопасности** – исключение тяжёлых аварий АЭС (реактивностные, потеря охлаждения, пожары, взрывы), требующих эвакуации и отселения населения

**Существенное изменение топливной базы** – независимость от добычи природного урана за счет замыкания ЯТЦ с БР - полное использование энергетического потенциала уранового сырья

**Доказательное решение проблемы радиоактивных отходов** – последовательное приближение к радиационно-эквивалентному (по отношению к природному сырью) захоронению РАО

**Снижение риска распространения ядерных материалов** – технологическое усиление режима нераспространения (отказ от выделения Pu при переработке ОЯТ БР и обогащения урана)

**Обеспечение конкурентоспособности ЯЭ** в сравнении с другими видами электрогенерации.



# КОНКУРЕНТОСПОСОБНОСТЬ НТП

## исключение и упрощение ряда систем безопасности

ΔЭС

### Сопоставление перечня Систем Безопасности РУ ВВЭР и БРЕСТ (без общестанционных)

#### *ВВЭР*

- аварийная защита реактора;
- система пассивного отвода тепла;
- система аварийного газоудаления;
- система аварийного и планового расхолаживания первого контура и бассейна выдержки;
- система аварийного расхолаживания парогенератора;
- система пассивного залива активной зоны;
- система аварийного впрыска высокого давления;
- система аварийного охлаждения низкого давления;
- система аварийного охлаждения высокого давления;
- система защиты первого контура от превышения давления;
- система защиты второго контура от превышения давления.

*Предусмотрены также специальные системы управления запроектными авариями:*

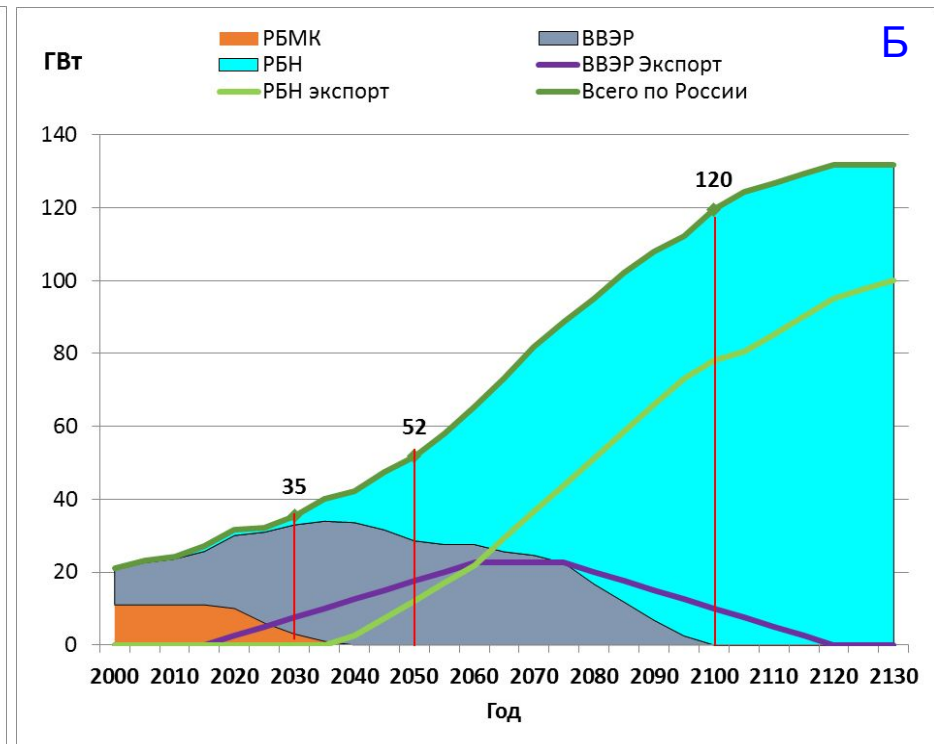
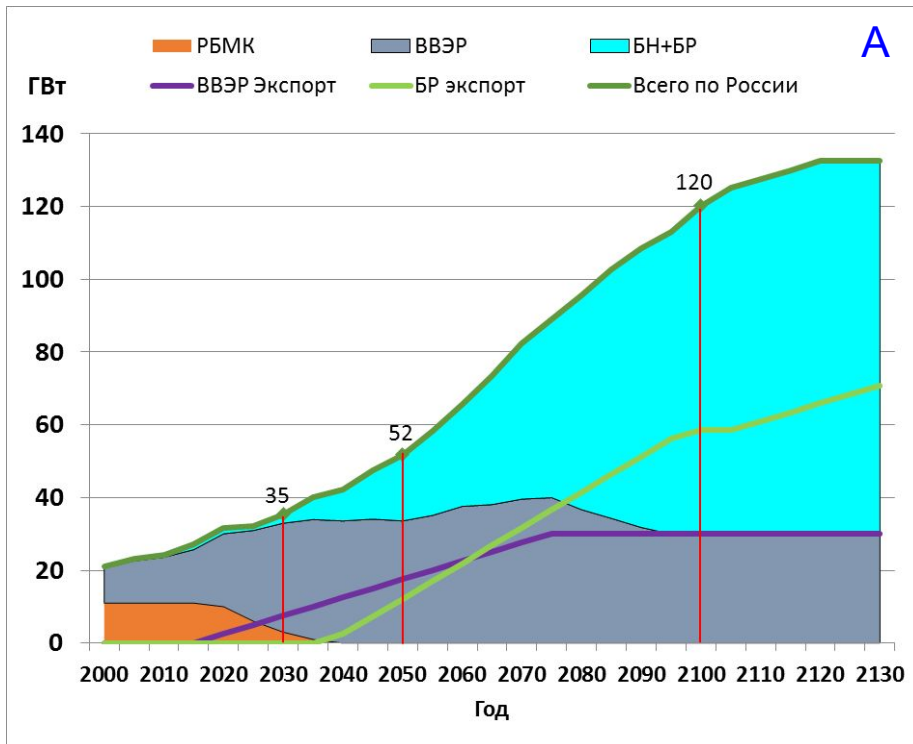
- быстрого ввода бора;
- аварийного снижения давления в первом контуре;
- удержания расплавленной активной зоны.

#### *БРЕСТ-ОД-300*

- **аварийная защита реактора;**
- **система аварийного охлаждения реактора (пассивная);**
- **система локализации аварии (защиты от превышения давления в 1 контуре);**
- **система защиты второго контура от превышения давления.**

# Возможная динамика структуры генерирующих мощностей АЭС России

## Установленные мощности



- А) Формирование перманентной 2-компонентной ЯЭ
- Б) Полный переход на НТП к 2100 г. с доминированием РБН
- Предусмотрен экспорт АЭС на уровне до 100% от собственных (ВВЭР) и 50-100% для РБН, топлива ВВЭР, топлива первых загрузок и начальных подпиток РБН, ПЯТЦ РБН

**СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ!**