



РОСАТОМ

ГОСУДАРСТВЕННАЯ КОРПОРАЦИЯ ПО АТОМНОЙ ЭНЕРГИИ «РОСАТОМ»

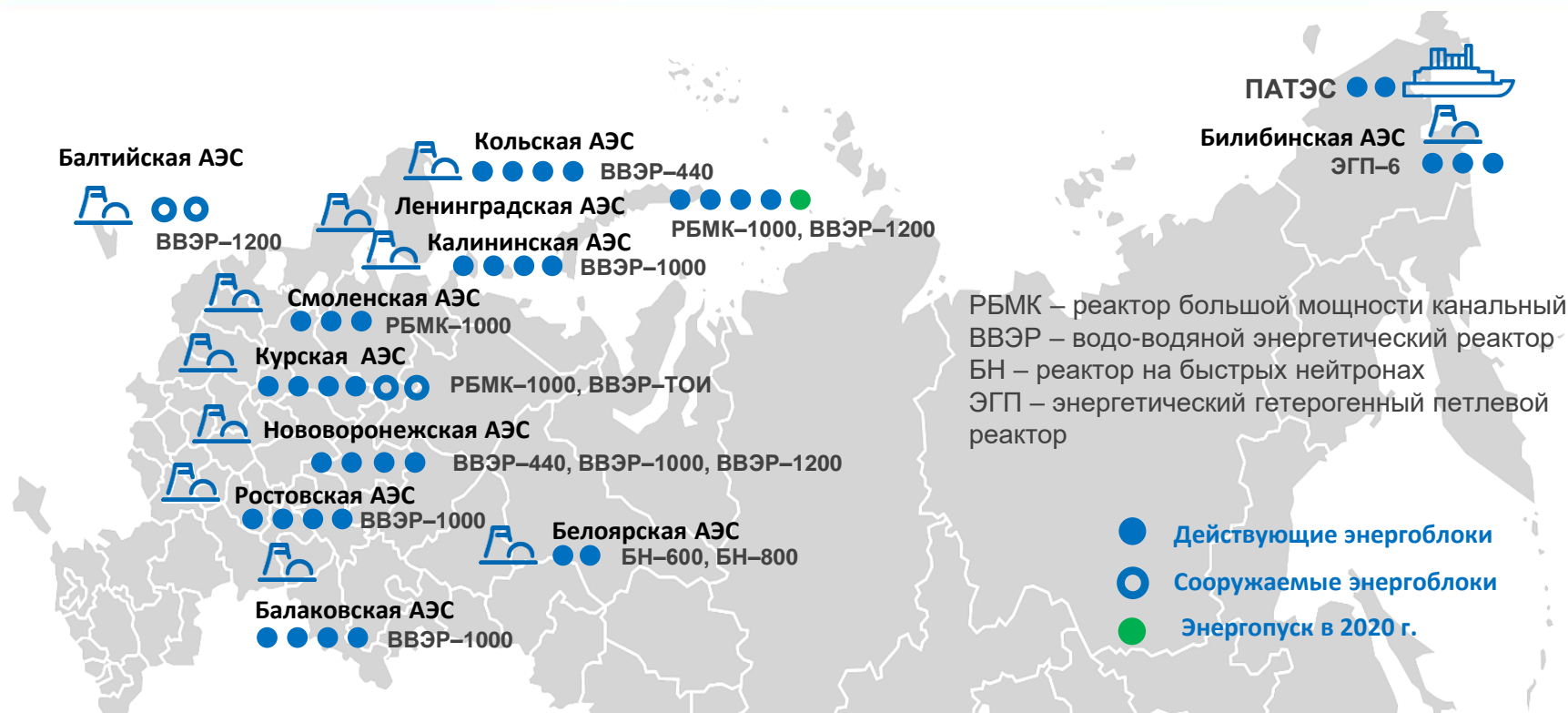
Отечественная ЯЭ: от Первой в мире до проектов 21 века

Владимир Григорьевич Асмолов

Советник Генерального директора Госкорпорации «Росатом»
д.т.н., профессор

26 сентября 2023 года, Москва

Карта расположения действующих и строящихся энергоблоков АЭС России



11	Действующих АЭС (в том числе ПАТЭС, введена в эксплуатацию с 22.05.2020)
38	Действующих энергоблоков (в т.ч. 2 РТГ ПАТЭС)
1	Энергоблок № 2 ЛенАЭС-2
4	Строящихся энергоблока
29.5 ГВт	Установленная мощность
222 млрд.кВт.ч / 19,0%	Выработано электроэнергии в 2022 году /доля АЭС в энергетике России

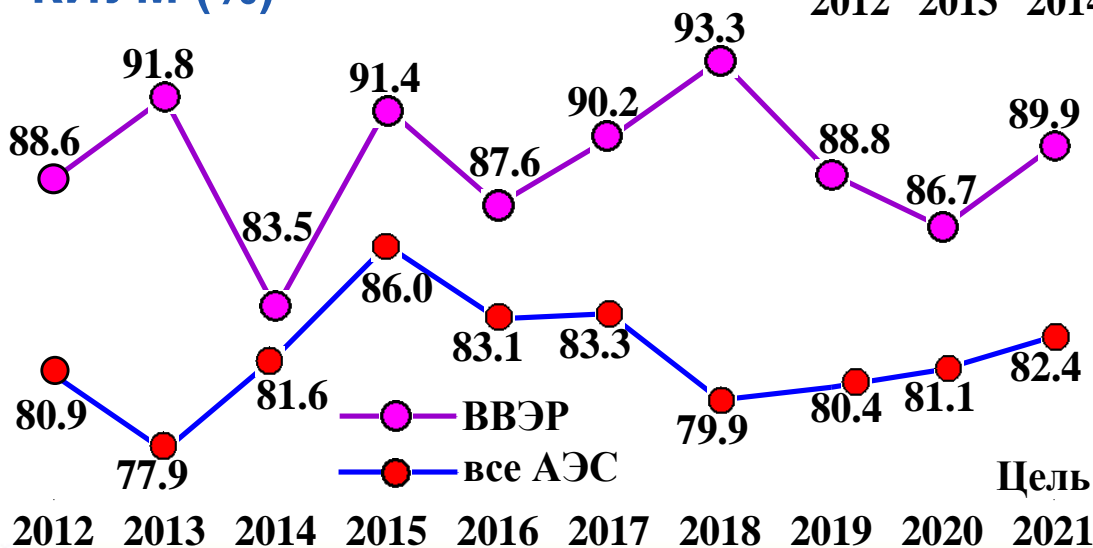
Основные показатели работы АЭС России



Выработка электроэнергии (млрд.кВт.ч)



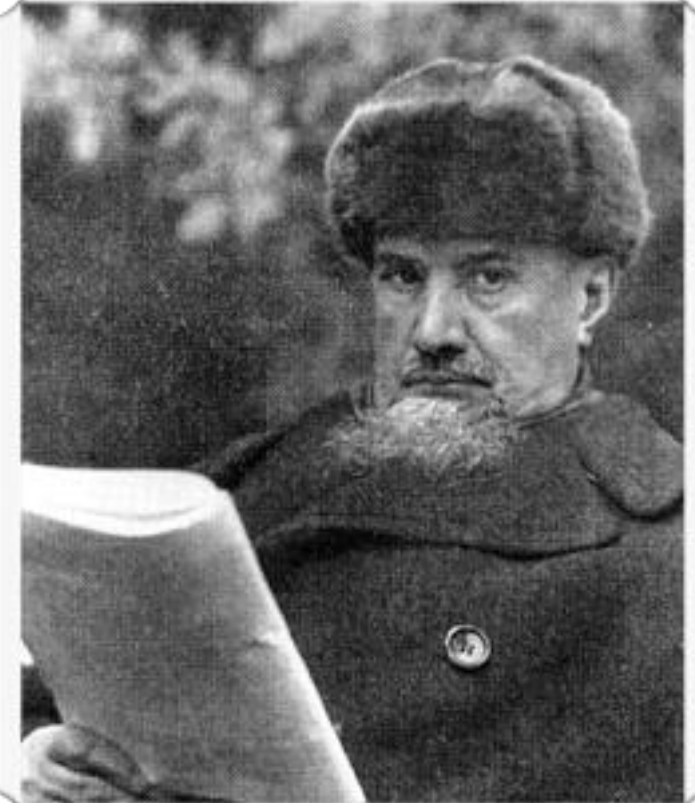
КИУМ (%)



Обеспечить безопасность государства:
(создание атомного оружия)

**Обеспечить энергетическую
безопасность:**
(мирное использование ядерной энергии)

**Обеспечить безопасность при
использовании ядерных
энергоисточников**



26

октября

1945

Решение Спецкомитета при ГКО:

«Техсовету рассмотреть вопрос об организации исследовательских работ по использованию внутриатомной энергии в мирных целях»

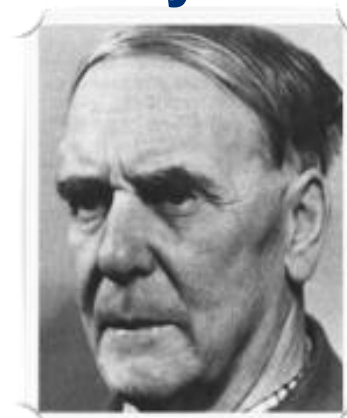
18

декабря

1945

Письмо П. Л. Капицы В. М. Молотову

«...Главное значение в применении атомной энергии лежит в мирных культурных целях, где ей предстоит революционизировать энергетику»

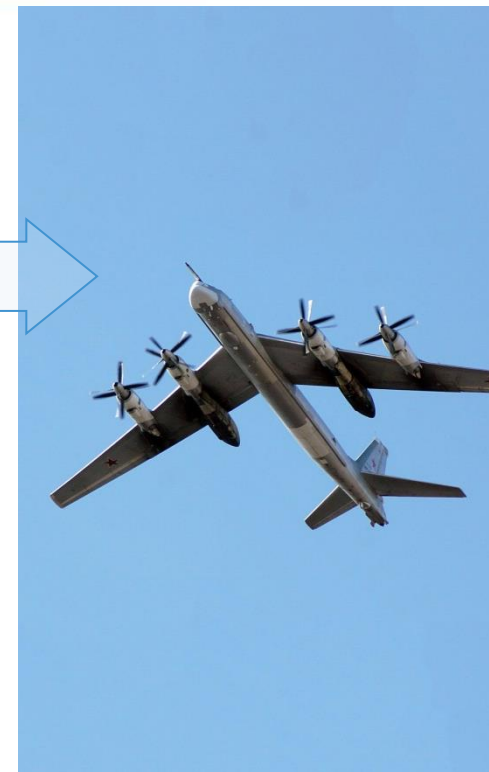


«Война и мир» атомной отрасли



Авторы:
Курчатов И.В.
Александров А.П.

Перспективные направления



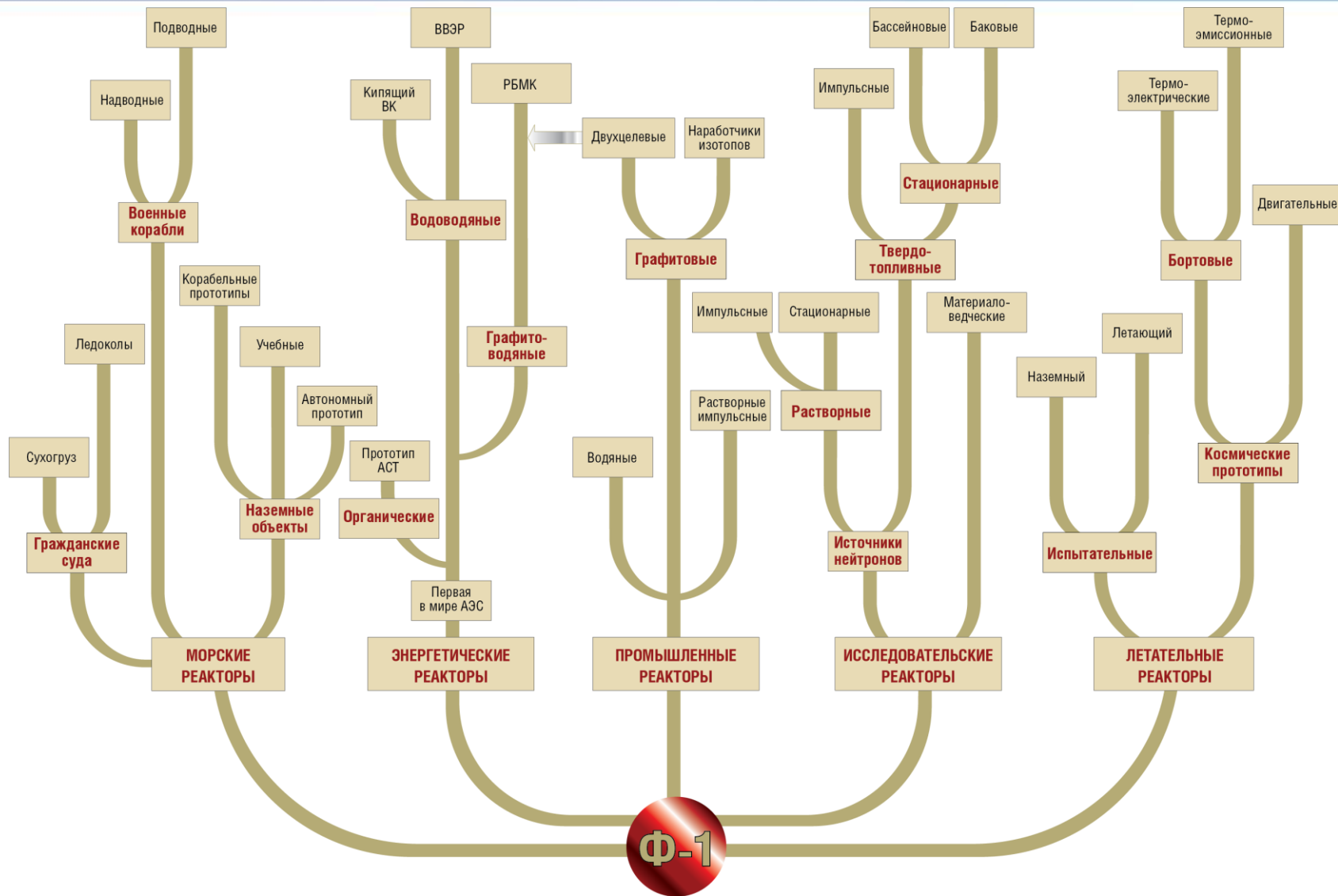
В ЛИПАНе выпущен отчет, в котором обозначены перспективные направления создания ЯЭУ для кораблей, для авиации, для стационарных электросиловых установок



Реакторное древо отрасли. Создано ~ 700 реакторов



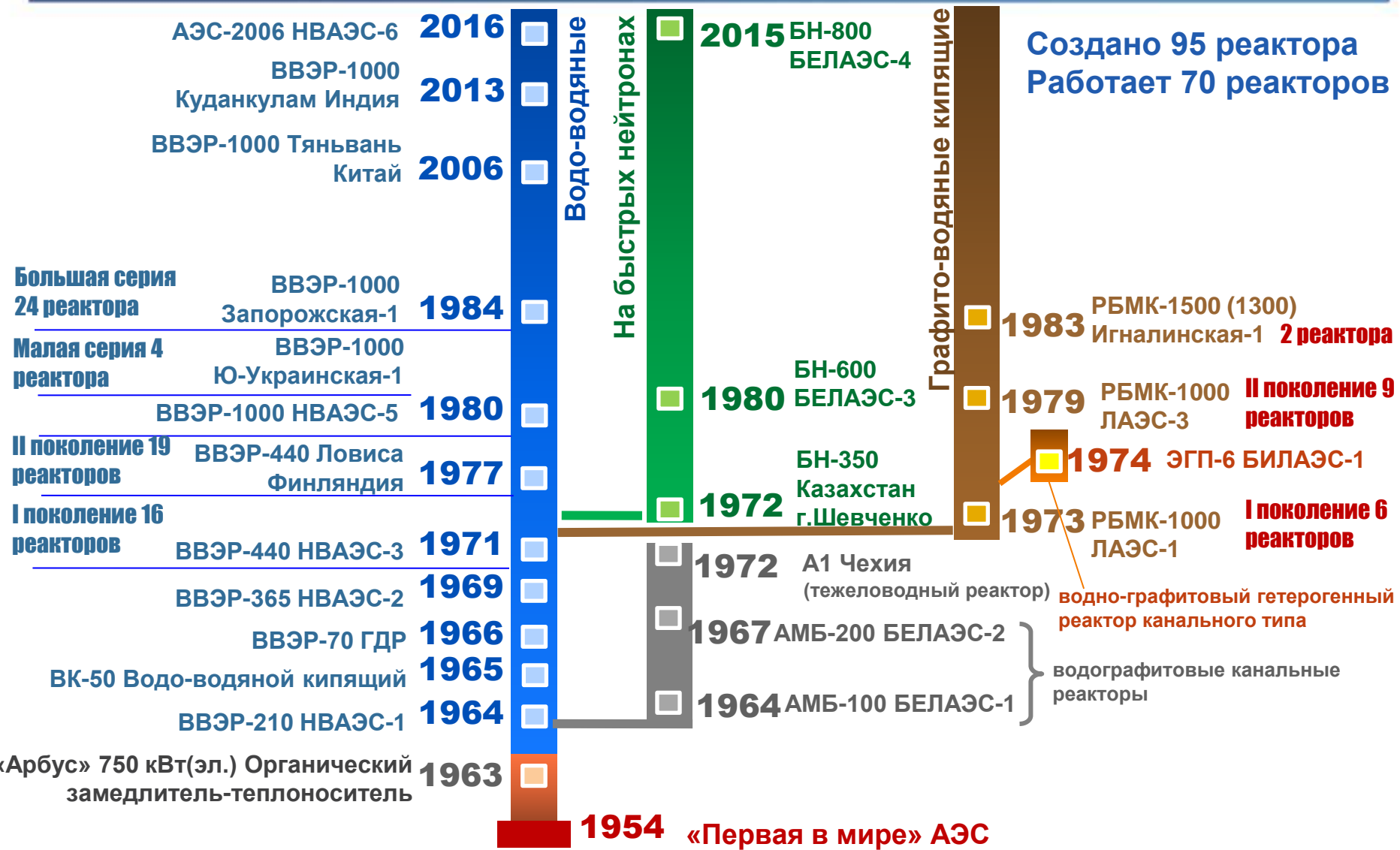
РОСАТОМ



26 июня 1954 – День рождения Атомной энергетики



Энергетические реакторы



2011 – Фукусима, плавление топлива на 3-х энергоблоках

1986 – ЧАЭС – разгон реактора на мгновенных нейтронах

1979 – ТМІ -2 – плавление топлива

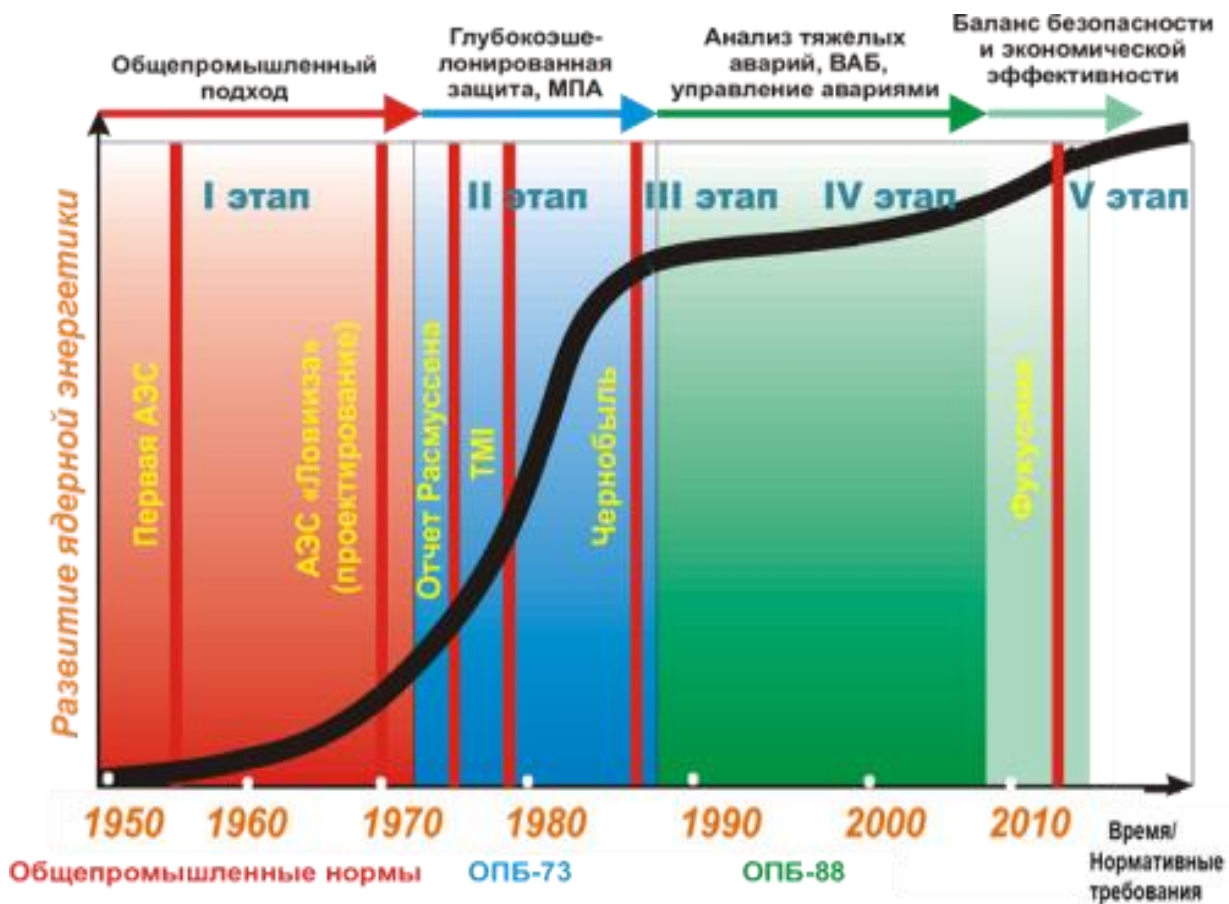
1957 – Челябинск – 70, Кыштымская авария

1957 – Windscale, пожар графитовой кладки

1955 – EBR-1 (расплавление 45% АЗ)

1952 – Чок-Ривер, Канада (частичное расплавление АЗ)

Ядерная энергетика. Сквозь огонь, воду и медные трубы



I этап:

Технологический успех, демонстрация возможности создания нового энергоисточника

II этап:

Ускоренное развитие ЯЭ, опережающее запрос общества, демонстрация конкурентоспособности, переоценка «зрелости» технологии

III этап:

Тяжелые аварии на АЭС, резкий спад роста

IV этап:

Второе рождение — демонстрация реальной «зрелости» технологии: гарантированная безопасность и экономическая эффективность

V этап:

Постфукусимский синдром



- **Предотвращение аварии**
(в проекте АЭС должно быть обосновано не превышение порогов разрушения ТВЭЛОВ при всех возможных исходных событиях)
- **Невозможность принятия мер по управлению аварией**

Чернобыльская авария – совокупность человеческих ошибок



Ошибки эксплуатационного
персонала

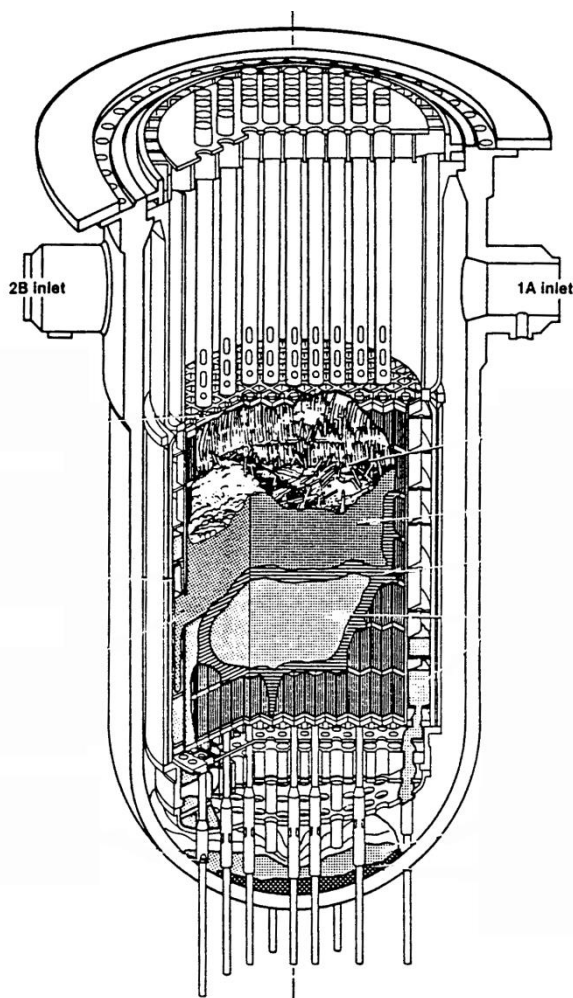


Ошибки в конструкции органов
регулирования СУЗ



Неполное знание физики
реактора





TMI-2

Развитие аварии

с потерей охлаждения на АЭС ВВЭР представляет собой последовательность состояний АЭС, в которой каждое следующее состояние является более тяжелым, т.е. характеризуется большим разрушением барьеров безопасности, чем предыдущее

ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЕ ПРОГРАММЫ В РОССИИ

с участием западных партнеров

- Теплогидравлика-интегральные эксперименты
- Водород (горение, детонация)
- Расплав, Маска
- Взаимодействие расплав-бетон
- Термомеханика твэла
- Термомеханика корпуса реактора
- Реактивные аварии

ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЕ ПРОГРАММЫ

на западных установках совместно с Россией

- Теплогидравлика – РМК (Венгрия), РАСТЕЛ (Финляндия)
- Разрушение активной зоны CORA (Германия)
- Водород – HDR (Германия)
- Взаимодействие расплав-бетон: BETA (Германия), ACE (США)
- Фильтры при сбросе давления из защитной оболочки: ACE (США), TYPHOON (Германия)

МЕЖДУНАРОДНЫЕ ПРОГРАММЫ

(банки данных, коды)

- Теплогидравлика: CAMP, ICAP, NEA, OECD Программы ЕС, МАГАТЭ
- Тяжелые аварии CSARP, NEA, OECD Программы ЕС, МАГАТЭ

РАСЧЕТНЫЙ ИНСТРУМЕНТ

Основные постулаты методологии обоснования безопасности



Накопленный уровень знаний о процессах и явлениях при тяжелых авариях позволяет решить проблему управления опасностью за счет:



Качества проекта АЭС и накопленного опыта эксплуатации
(предотвращение аварии)



Управления опасностью, которое заключается в последовательной борьбе за сохранение целостности физических барьеров безопасности, причем каждый барьер рассматривается как последний на пути распространения опасности
(управление аварией)

Изменения концепции безопасности в НТД России (INSAG-3)



**СТАРАЯ
КОНЦЕПЦИЯ
БЕЗОПАСНОСТИ**

**Глубина
рассмотрения -
проектные аварии и
постулированные
исходные события.**

**Число учитываемых
отказов в процессе
развития проектных
аварий ограничено
принципом
единичного отказа.**

**НОВАЯ
КОНЦЕПЦИЯ
БЕЗОПАСНОСТИ**

**Рассмотрение
запроектных аварий с
возможным тяжелым
повреждением
активной зоны вплоть
до ее полного
расплавления.**

**При рассмотрении
запроектных аварий
снимается
ограничение
принципа единичного
отказа.**



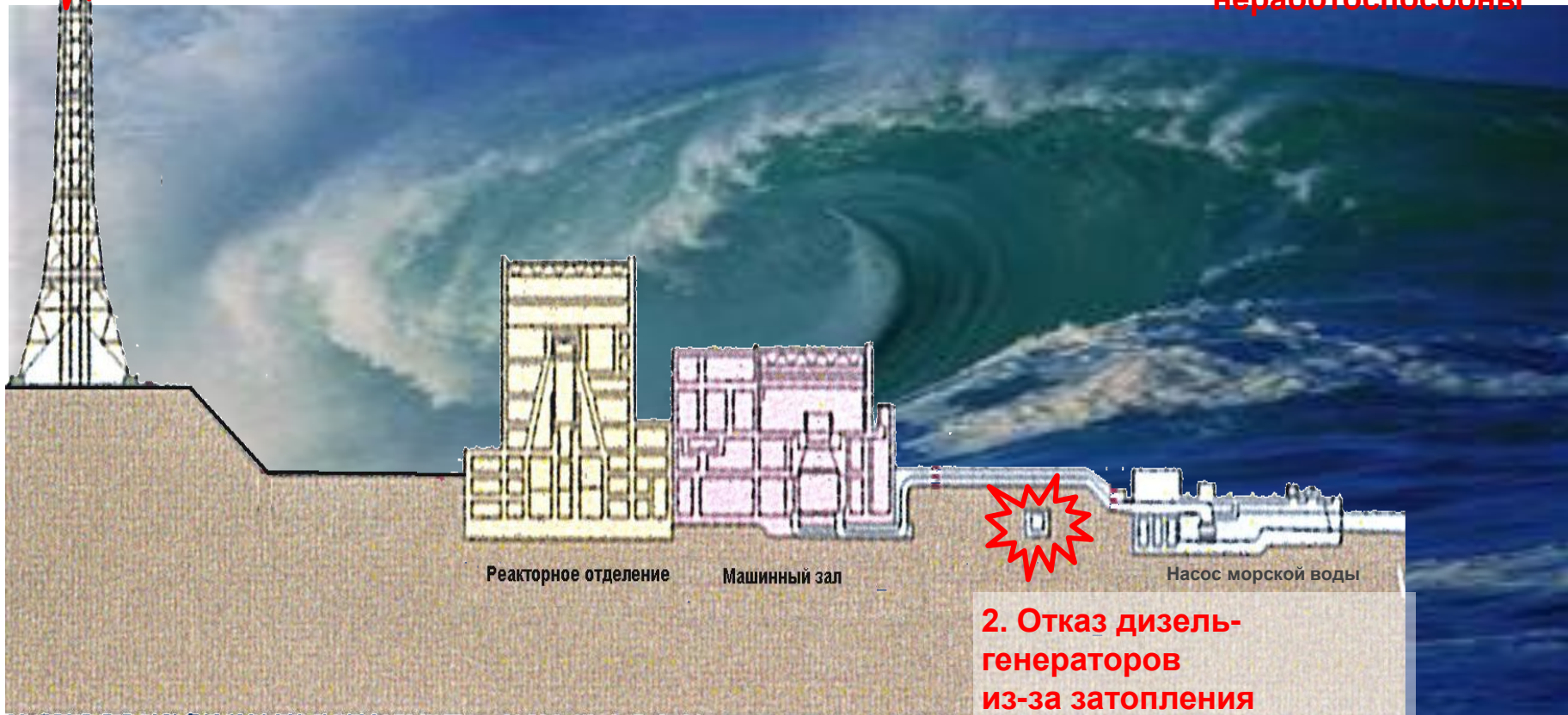
Авария на АЭС Фукусима

11 марта в 14:46 произошло землетрясение. Магнитуда 8,9. Эпицентр приблизительно в 170 км от станции. Максимальное ускорение 0,35G (АЭС Фукусима по проекту рассчитана на ускорение 0,18G)

1. Потеря внешнего электроснабжения вследствие землетрясения

1 + 2
полная потеря электроснабжения АЭС

➔ **Все электрические насосы стали неработоспособны**



1. Базовые принципы безопасности остаются неизменными и эффективны при правильном применении. При этом меры по предотвращению аварии и меры по управлению аварией имеют равный приоритет
2. Главная ответственность за безопасность лежит на эксплуатирующей организации, и реализуется за счет ее незамедлительных и отработанных действиях по восстановлению утраченных функций безопасности
3. Проектные свойства безопасности АЭС должны обеспечивать достаточное время для оператора для применения эффективных действий по управлению аварией

4. При анализе безопасности на многоблочной АЭС необходимо учитывать синергетический эффект при отказе по общей причине.
5. Разрыв между имеющейся базой знаний о процессах при тяжелых авариях и ее применением на практике.
6. Неадекватная защита в глубину национальной инфраструктурной системы ядерной безопасности привело к тому, что техническая глубокоэшелонированная защита объекта не смогла выполнить свою функцию.

Уровень глобализации ядерной энергии



производят 73%
ядерной
электроэнергии
мира



имеют
продвинутое
разработки по
быстрым
реакторам



ведут
промышленное
обогащение
урана



имеют мощности по
переработке ядерного
топлива



составляют
80%
реакторного
парка мира

Корпусные водо-охлаждаемые реакторы типа LWR являются наиболее продвинутой технологией

Реакторы типа LWR сегодня составляют **90%** реакторного парка мира

Действующие реакторы: 452 блока, 399,4 ГВт (эл)

Тип реактора	Число реакторов	Суммарная мощность, ГВт(эл)	Доля в мировом реакторном парке, %	Число стран, где эксплуатируются
PWR	238	233.3	58	17
BWR	73	71.5	18	8
ВВЭР	62	51.6	13	9
Другие (PHWR, GCR, РБМК, FBR)	79	43.0	11	11

Строящиеся реакторы: 54 блока, 55,4 ГВт (эл)

Тип реактора	Число реакторов	Суммарная мощность, ГВт(эл)	Доля в мировом реакторном парке, %	Число стран, где строятся
PWR	29	30.9	52	10
BWR	4	5.3	9	1
ВВЭР	19	20.3	34	7
Другие (PHWR, GCR, РБМК, FBR)	6	3.2	5	2

Из всех строящихся реакторов в мире реакторов типа LWR- **95%**

Статус

**Системообразующий,
эффективный и безопасный
энергоисточник**

19.8% всей производимой электроэнергии России

40% электрогенерации в Европейской части России

Экспорт АЭС – один из ключевых несырьевых экспортов страны

Риски

Обострение конкуренции на внешнем рынке за счет появления кроме традиционных конкурентов (США, Франция, Япония, Канада) новых игроков (Китай, Южная Корея), предлагающих:

аналогичные технологии по более низкой цене за счет «дешевой безопасности»

дешевые кредиты в неограниченном объеме

Цели

Сохранение и развитие как атомной генерации внутри страны, так и атомного экспорта за счет:

повышения эффективности и безопасности технологии ВВЭР

внедрения в ЯЭС ядерных энерготехнологий нового поколения на базе реакторов на быстрых нейтронах ЗЯТЦ

Стратегия развития ядерной энергетики России

Стратегия развития
ядерной энергетики России
до 2050 года
и перспектива до 2100 года

ГК «РОСАТОМ»
2018

Требования к крупномасштабной ЯЭС России 21 века



Потребительская привлекательность

- гарантированная безопасность;
- экономическая эффективность

Масштабы производства на рынке электроэнергии

- не менее 30% к середине века

Структура энергопроизводства

- должна обеспечивать многоцелевое использование по областям применения, т.е. расширение рынков сбыта, и многокомпонентность как фактор гибкости и устойчивости к возможным рискам

Сырьевая база

- не должна иметь ограничений на исторически значимый период времени (сотни лет)

Обращение с отходами

- должно обеспечить безопасную окончательную изоляцию РАО

КЛЮЧЕВОЕ НАПРАВЛЕНИЕ РАЗВИТИЯ ЯЭ

Двухкомпонентная
структура с
замыканием ЯТЦ

Позволит решить системные
проблемы нынешней АЭ:

Сократить накопление ОЯТ
и снизить объемы РАО

Повысить эффективность
использования урана

Повысить экологические показатели ЯЭ
и ее конкурентоспособность

Синергетический принцип
развития обоих компонентов
(базовый):

Технология ВВЭР

Технологии РБН

Сценарий формирования двухкомпонентной ядерной энергетики России



**Двухкомпонентная ЯЭ
с замкнутым ЯТЦ**

**Постепенное замещение действующих АЭС энергоблоками обоих типов
повышенной безопасности и эффективности**

**Развитие технологии ВВЭР и
РБН**


**Увязка топливных балансов
ВВЭР и РБН**

Реально сложившаяся структура ЯЭ страны с открытым ЯТЦ


Этапы развития ЯЭС России




Текущий этап (до 2030 года):




наращивание ядерных энергетических мощностей на базе развития технологии ВВЭР, как практической основы промышленной ядерной энергетики на длительную перспективу



замыкание ЯТЦ, создание и отработка базовых элементов двухкомпонентной структуры ЯЭС, обеспечивающих требования к ЯЭС XXI века (фабрикация топлива, разработка проектов и реализация головных энергоблоков, регенерация)



обеспечение роста экспорта референтных ядерных энерготехнологий



исследование потребностей рынка для региональной ЯЭ малой и средней мощности и ее «неэлектрического» применения, разработка проектов энергоблоков с кардинально улучшенными технико-экономическими характеристиками

Последующие этапы 2040 год и далее:

²³⁹


Pu

развертывание замкнутой по урану и плутонию крупномасштабной двухкомпонентной ЯЭС, как основы устойчивого развития России в третьем тысячелетии

²³²

Th

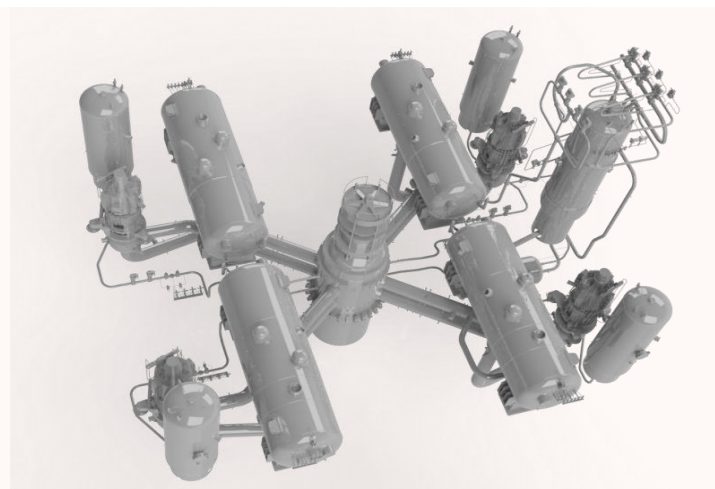
определение перспектив внедрения в ЯТЦ тория, возможное использование жидкосолевых реакторов, бесхимического бридера



обоснование необходимости и возможности использования термоядерного источника для воспроизводства ядерного топлива и гибридного реактора

Стратегические цели развития технологии ВВЭР

- Встраивание в двухкомпонентную ЯЭС;
- Обеспечение высокой безопасности;
- Повышение КПД и КВ, возможность работы на 100% загрузке МОКС-топлива;
- Конкурентоспособность экспортных продуктов в долгосрочном горизонте



Целевые показатели	ВВЭР-1200	ВВЭР-ТОИ	ВВЭР-С-СМ	ВВЭР-СКД
Мощность эл. / тепл.	1170 / 3200	1255 / 3300	600 / 1600	550 / 1250
Удельный CAPEX, %	118%	100%	120%*	-
Время сооружения, лет	6	6	5	<5
Внедрение, год	2017	2025	2035	>2045

* Более высокий удельный CAPEX обусловлен более низкой мощностью, при равной мощности удельный CAPEX был бы в диапазоне 80-85%.

Направления совершенствования Проекта АЭС ВВЭР-ТОИ

- Повышение параметров безопасности;
- Повышение КПД и маневренности;
- Снижение капитальных и эксплуатационных затрат;
- Сокращение сроков сооружения



Ураганы, смерчи
Расчетная скорость ветра – 68,5 м/с

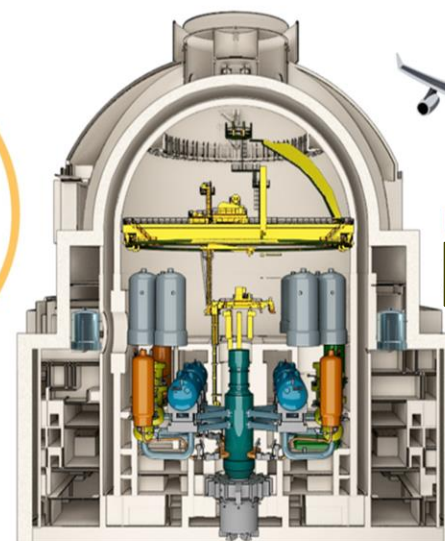
Падение самолета
Весом 400 тонн, со скоростью 150 м/с



Ударная волна
с давлением во
фронте 30 КПа



Сейсмические воздействия
MP3-8 баллов по шкале MSK-64



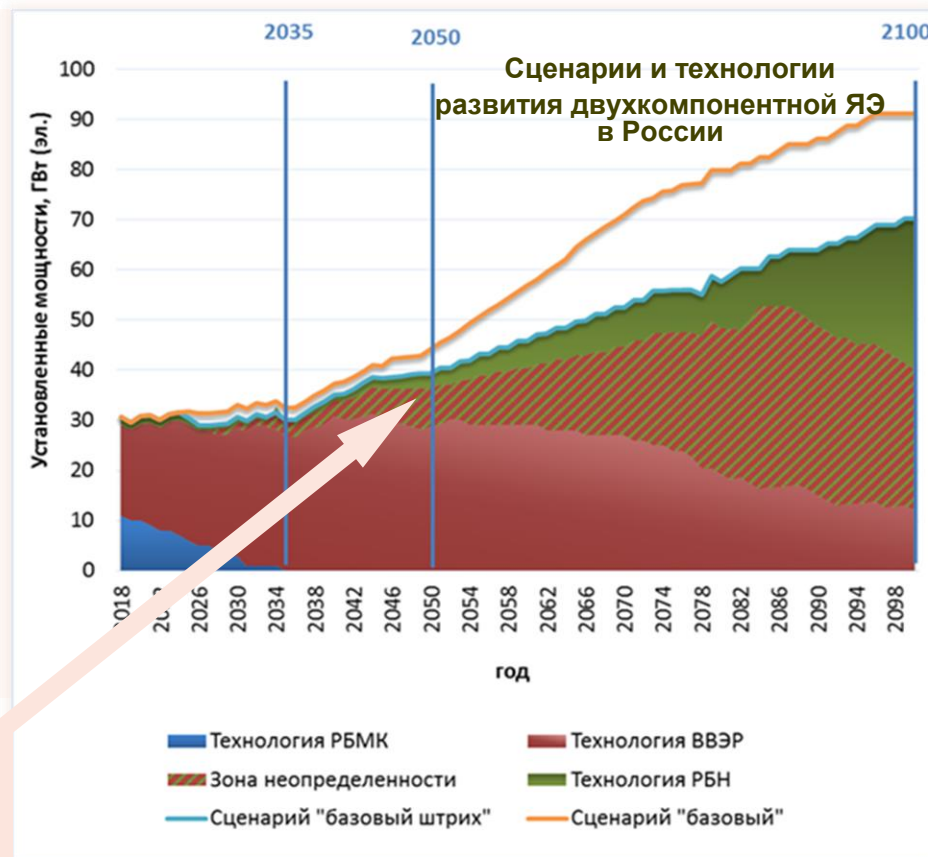
Наводнения



Направления развития технологии ВВЭР: проекты ВВЭР-С и ВВЭР-СКД

- Повышение коэффициента воспроизводства топлива;
- Снижение расхода природного урана;
- Отказ от борного регулирования (как минимум при работе на мощности);
- Повышение КПД

Развитие технологии ВВЭР хеджирует возможные отставания темпов/масштаба ввода АЭС с РБН



Временные рамки развития эволюционного варианта ВВЭР-С средней мощности на площадке Кольской АЭС-2



**2022–
2024 гг.**

Разработка ТЗ, эскизного и концептуального проектов, выполнение предпроектных и базовых НИОКР (материалы, коды, базы данных, бенчмарки, стендовая база)

**2025–
2030 гг.**

Проектирование АЭС, включая разработку технического проекта РУ. Завершение НИОКР в обоснование проектных решений

**2030–
2035 гг.**

Сооружение головной АЭС, ПНР, физический пуск, включение в сеть

Основные целевые установки инновационного ВВЭР-СКД

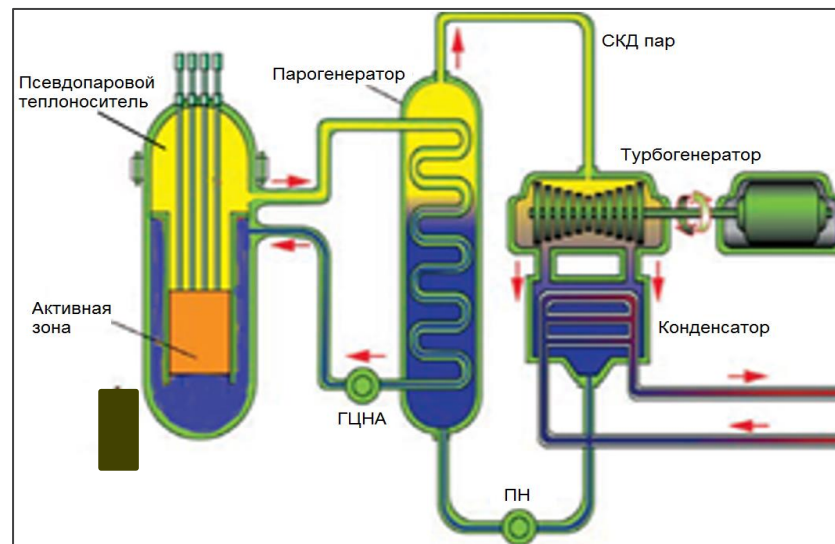
Создание коммерческого энергоблока с высоким КПД для работы в ЗЯТЦ с самообеспечением топливом:

- Эффективное использование делящихся материалов
КВ ~ 1.0–1,02;
- Повышение термодинамической эффективности
КПД ~ (40–45)%;
- Приемлемые требования безопасности –
уровень требований Gen IV (The Generation IV
International Forum (GIF)).

ЯЭУ ВВЭР-СКД

БАЗИСНЫЕ ПРЕДПОСЫЛКИ:

- Опыт технологии ВВЭР;
- Опыт тепловой энергетики в работе со сверхкритическими параметрами теплоносителя;
- Повышение КПД при увеличении перепада температур теплоносителя в активной зоне (вход/выход), снижение замедления нейтронов в сверхкритическом диапазоне;
- Инновационное ядерное топливо и конструкционные материалы.



Основные характеристики	Значение
Тепловая мощность, МВт(т)	1250
Электрическая мощность на клеммах генератора, МВт (эл.)	580
КПД ЯЭУ, %	46,4
Схема реакторной установки	двухпетлевая
Количество ГЦНА на петлю, шт.	2
Схема паротурбинной установки	1 ЦВСД + 2 ЦНД

- Развитие ядерной энергетики России до середины века обеспечено доступными ресурсами делящихся материалов;
- Технологический потенциал обеспечивает требуемые масштабы развития ядерной энергетики на длительную перспективу;
- Коммерческий заказ для ядерно-энергетического сектора экономики в ближайшие 20 лет будет сосредоточен на технологии ВВЭР;
- Уже сегодня должен быть начат переход к двухкомпонентной ядерно-энергетической системы ядерной энергетики страны с внедрением в существующую структуру быстрых реакторов и отработкой базовых компонентов ее ядерного топливного цикла;
- Освоение новых технологических направлений должно опираться на развитие научных исследований, совершенствование экспериментальной базы и сохранение возможностей международной кооперации



Спасибо за внимание