МЕЖДУНАРОДНЫЙ
СИМПОЗИУМ
«СОЗДАВАЯ БУДУЩЕЕ»

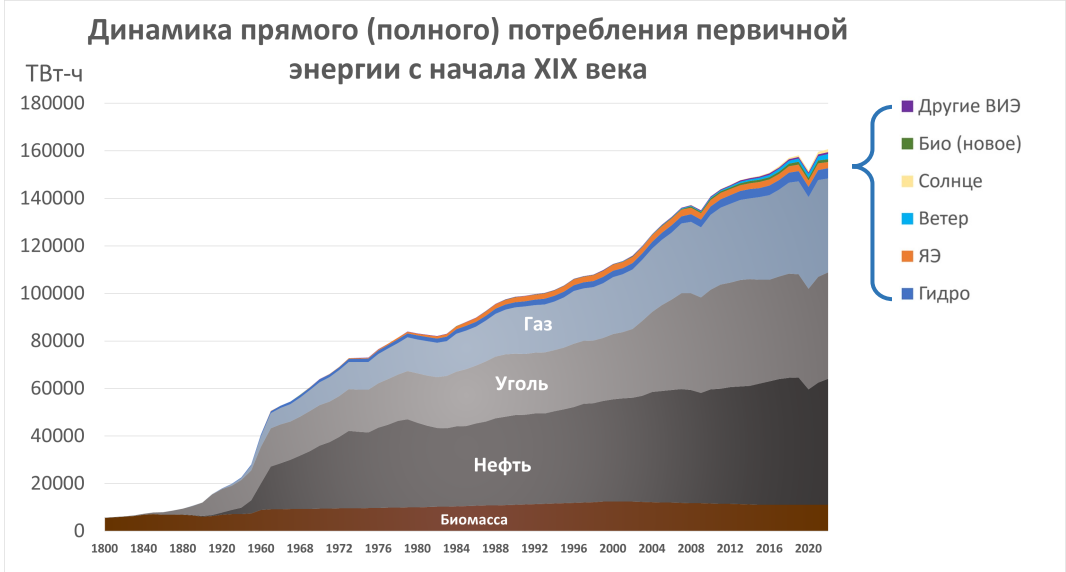
Атомная энергетика - от реальности до фантастики

ЕВГЕНИЙ АДАМОВ

НАУЧНЫЙ РУКОВОДИТЕЛЬ
ПРОЕКТНОГО НАПРАВЛЕНИЯ
«ПРОРЫВ»

ЧИСТАЯ
ЭНЕРГЕТИКА
БУДУЩЕГО

Потребление первичной энергии



Источник: Обзор мировой энергетики Энергетического института (2023); данные проекта Global Change Data Lab на базе расчета прямого (полного) потребления первичной энергии.

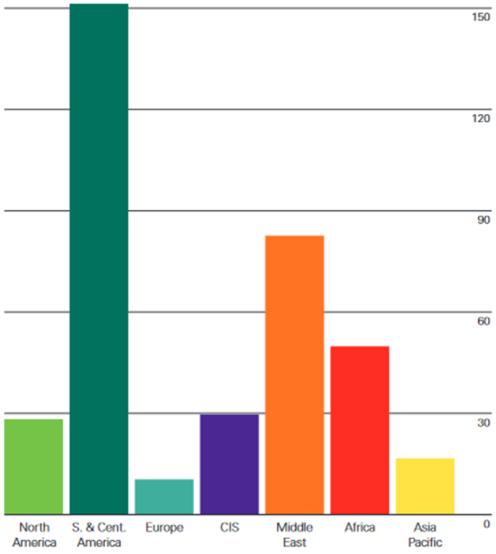
Источник: По данным IEA, ООН

- **Доля нефти, угля и газа** в прямом потреблении первичной энергии **составляет 85%**
- Для достижения поставленных целей по низкоуглеродному развитию **необходима технологическая трансформация электроэнергетики**

Запасы нефти, угля и газа

Нефть

Отношение запасы/добыча, кол. лет

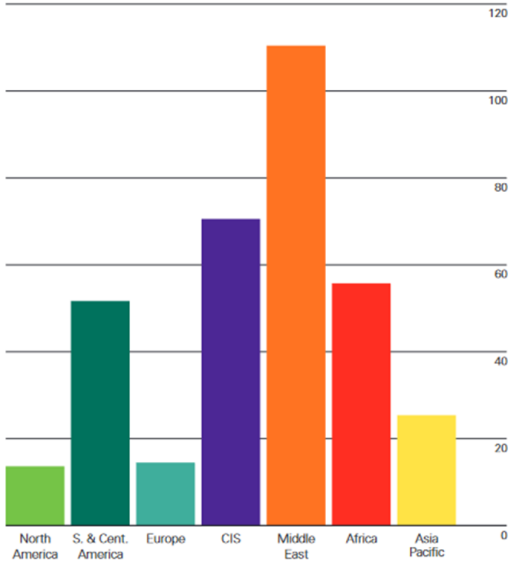


При существующем уровне добычи и потребления, мировых доказанных запасов нефти хватит на

50 лет

Природный газ

Отношение запасы/добыча, кол. лет

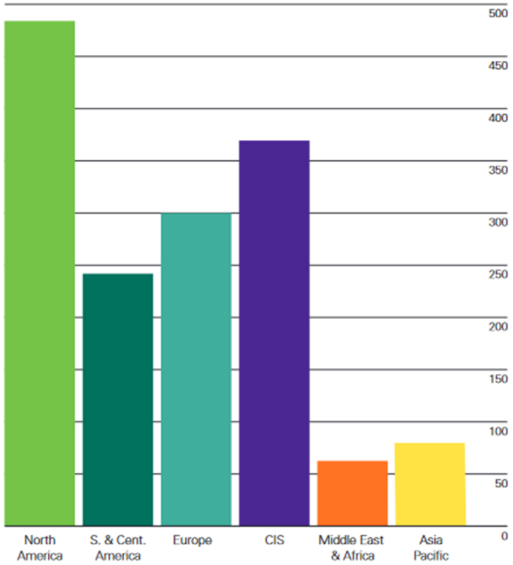


При существующем уровне добычи и потребления, мировых доказанных запасов природного газа хватит на

50 лет

Уголь

Отношение запасы/добыча, кол. лет



При существующем уровне добычи и потребления, мировых доказанных запасов угля хватит на

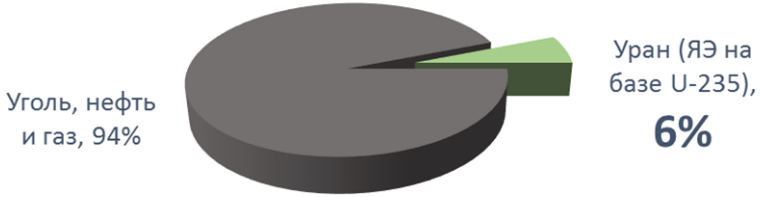
139 лет

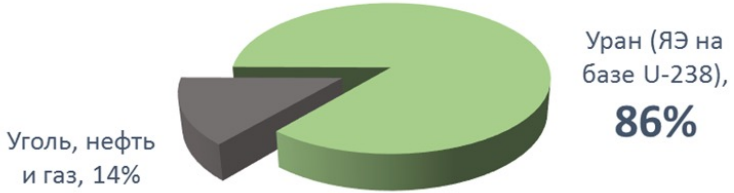
Источник: BP Statistical Review of World Energy 2021

Замкнутый ЯТЦ - отсутствие ограничений ЯЭ по сырьевой базе

ПРОРЫВ
РОСАТОМ

Энергоемкость различных природных энергетических ресурсов



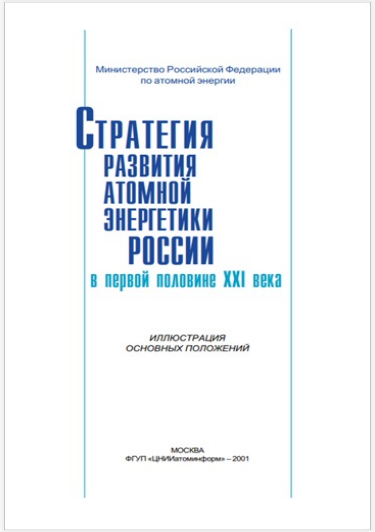


- **Открытый ЯТЦ**
- ограничен ресурсной базой природного урана

- **Замкнутый ЯТЦ**
- на базе быстрых реакторов за счет использования ^{238}U принципиально снимает проблему топливных ресурсов ЯЭ

Белая книга ядерной энергетики. Замкнутый ЯТЦ с быстрыми реакторами / под общ. ред. проф. Е.О. Адамова. – М.: Изд-во АО «НИКИЭТ», 2020. – 498 с. – ISBN 978-5-98706-129-9.

Потенциал развития ядерной энергетики

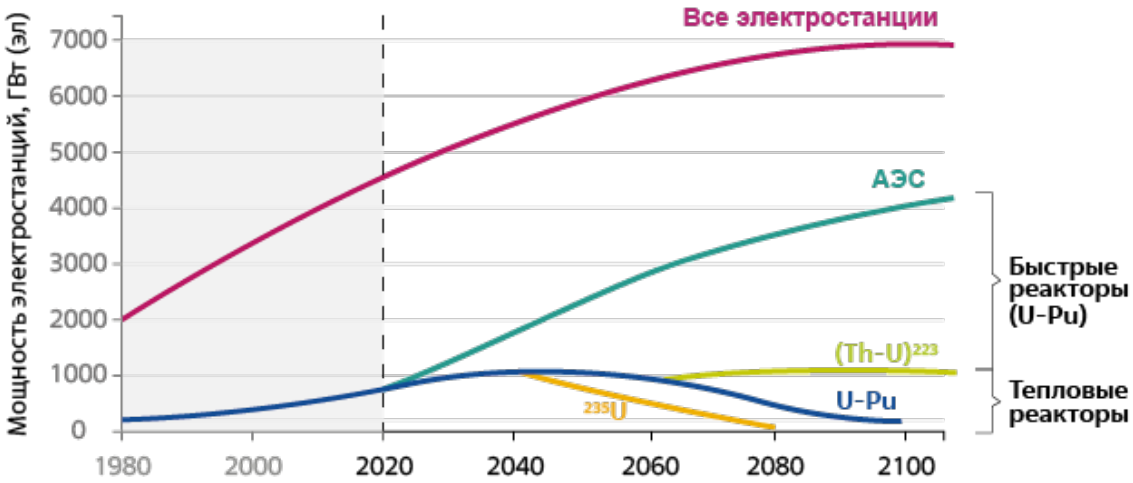

Министерство Российской Федерации
по атомной энергии

СТРАТЕГИЯ
РАЗВИТИЯ
АТОМНОЙ
ЭНЕРГЕТИКИ
РОССИИ
в первой половине XXI века

ИЛЛЮСТРАЦИЯ
ОСНОВНЫХ ПОЛОЖЕНИЙ

МОСКВА
ФГУП «ЦНИИатоминформ» – 2001

Топливный потенциал развития ядерной энергетики при использовании быстрых реакторов[1]



В 2000 г. Министерством Российской Федерации по атомной энергии, **совместно с РАН,** была разработана и одобрена Правительством РФ **«Стратегия развития ЯЭ в РФ в первой половине XXI века»**

Ядерная энергетика, отвечающая требованиям крупномасштабной энергетики по безопасности и экономике, могла бы взять на себя существенную часть прироста мировых потребностей в топливе и энергии.

1- Источник: Стратегия развития атомной энергетики России в первой половине XXI века. Иллюстрация основных положений. 2001

Нерешенные вопросы ЯЭ, ограничивающие ее развитие в эпоху спроса на «зеленые» энерготехнологии

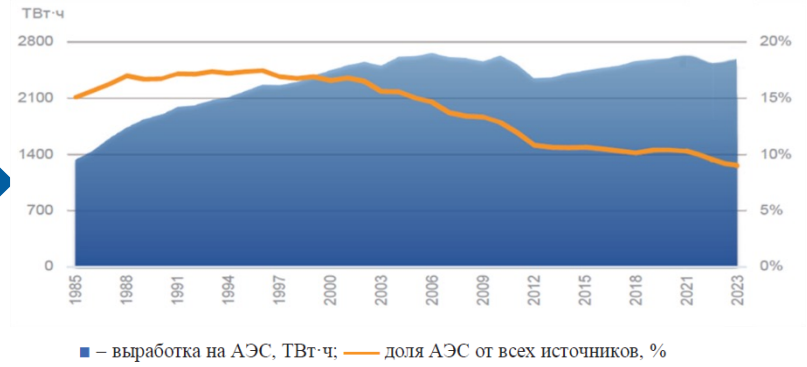
ПРОРЫВ РОСАТОМ

Тяжелые аварии

Три-Майл-Айленд

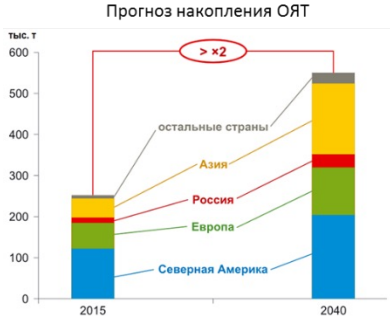
Чернобыль

Фукусима



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

Отложенное решение по ОЯТ



Опасность долговременного хранения отходов

+

проблемы поддержки режима нераспространения ядерного оружия

Комплексное решение проблем ЯЭ

- Исключение тяжелых аварий на АЭС, требующих эвакуации населения
- Полное использование энергетического потенциала уранового сырья (независимость от сырьевой составляющей и волатильности цен на органику)
- Последовательное приближение к радиационно-эквивалентному (по отношению к природному сырью) захоронению РАО
- Технологическое усиление режима нераспространения
- Обеспечение конкурентоспособности ЯЭ, в сравнении с другими видами генерации по стоимости энергии
- Цифровизация НИОКР, проектной и конструкторской деятельности, единое информационной пространство

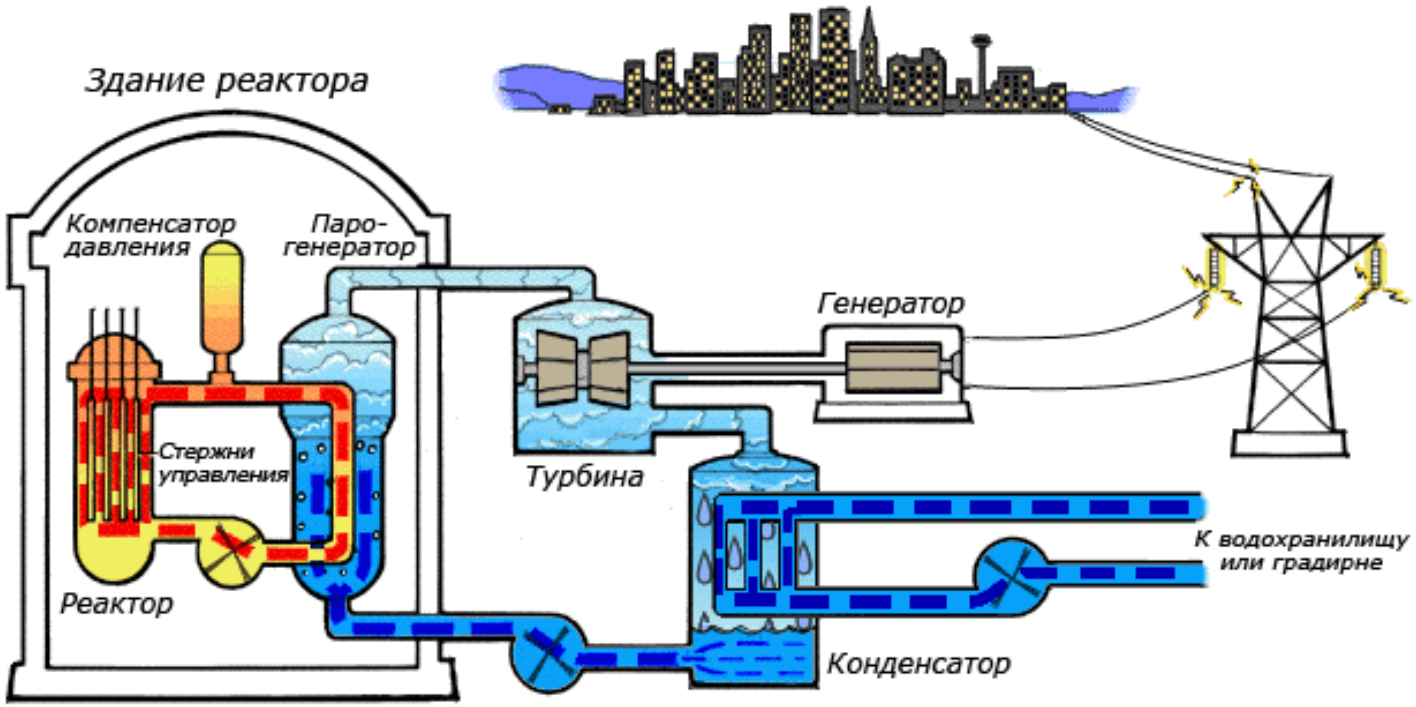
УДК 621.039.5

НЕТРАДИЦИОННЫЕ КОНЦЕПЦИИ АЭС С ЕСТЕСТВЕННОЙ БЕЗОПАСНОСТЬЮ (НОВАЯ ЯДЕРНАЯ ТЕХНОЛОГИЯ ДЛЯ КРУПНОМАСШТАБНОЙ ЯДЕРНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ СЛЕДУЮЩЕГО ЭТАПА)*

Орлов В.В., Аврорин Е.Н., Адамов Е.О., Васильев А.П., Велихов Е.П., Вертман А.А., Горынин И.В., Громов Б.Ф., Звездин Ю.И., Игнатов В.А., Слесарев И.С., Солонин М.И., Субботин В.И., Хромов В.В., (НИКИЭТ ВНИИТФ, ИАЭ им. И.В. Курчатова, ЦНИИТмаш, ЦНИИКМ, ФЭИ, ВНИИНМ им. А.А. Бочвара, МИФИ)

«Атомная энергия» 1991 г.

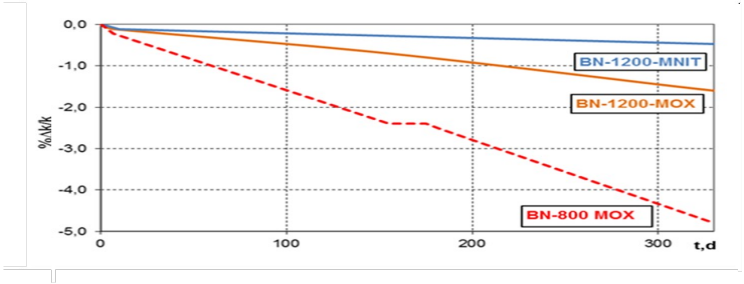
Петлевая схема ЯЭУ



«Прорыв»: решение проблем безопасности РБН и ОЯТ

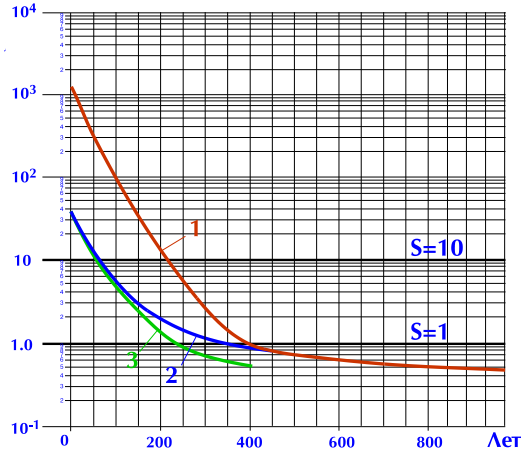
Интегральная конструкция РУ:
локализация течи теплоносителя в объёме корпуса и исключение осушения активной зоны и аварий с потерей отвода тепла от активной зоны

Равновесное плотное топливо:
снижение запаса реактивности и исключение реактивностных аварий в РУ, требующих эвакуации и/или отселения

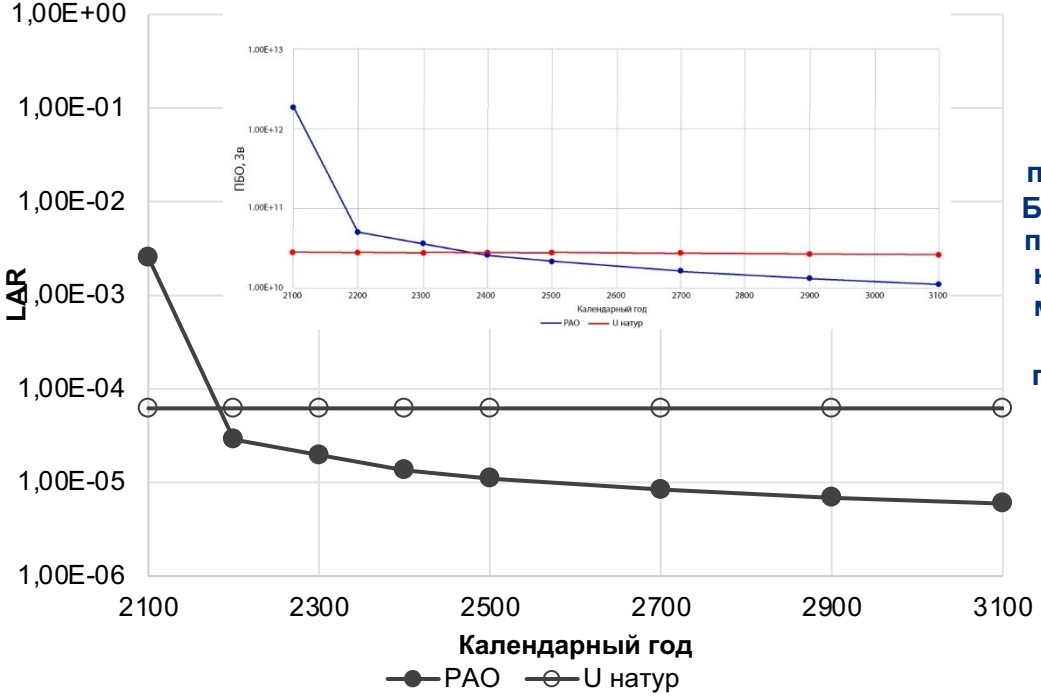


Кривая	Доля, идушая в отходы, %				
	Sr	Cs	U	Pu	MA (Np+Am+Cm)
1	10	15	0,05	0,1	0,1
2	0,1	1	0,05	0,1	0,1
3	0,1	1	0,01	0,01	0,1

Радиационный баланс:
без учета (S = 1) и с учетом (S = 10) миграции нуклидов, в зависимости от времени выдержки долгоживущих высокоактивных отходов (ДВАО)



Радиологическая эквивалентность и ПБО РАО (природоподобие)



Пожизненный атрибутивный риск РАО после переработки ОЯТ ТР и БР и уранового сырья, полученный по дозам, нормированным на 1 мЗв ПБО природного урана. Точки пересечения кривых: через ~ 300 лет для ПБО через ~ 100 лет для LAR

Выравнивание пожизненных радиационно-обусловленных рисков возможной индукции онкозаболеваний от РАО и от уранового сырья (***радиологическая эквивалентность***) достигается через ~ 100 лет после переработки ОЯТ в 2100 г.

Воздействие радиационных и нерадиационных факторов на здоровье населения

РОСАТОМ

Классификация инцидентов	Число инцидентов	Число пострадавших с клиническими симптомами		
		Всего	В том числе с острой лучевой болезнью	Умерших
Инциденты на радиоизотопных установках и источниках излучения	88	163	45	16
В том числе с ^{60}Co	17	28	15	3
с ^{137}Cs	19	59	13	9
с ^{192}Ir	34	50	10	1
другие γ-излучающие	8	10	2	—
γ—β-излучающие	2	2	—	—
β-излучающие	8	14	5	3
Инциденты на рентгеновских установках и ускорителях	38	39	1	—
В том числе рентгеновские установки	26	26	—	—
ускорители электронов	9	10	1	—
ускорители протонов	3	3	—	—
Реакторные инциденты и потеря контроля над критичностью делящегося материала (без аварии на Чернобыльской АЭС)	34	83	73	13
В том числе потеря контроля над критичностью	16	42	42	10
реакторные инциденты (другие причины)	18	41	31	3
Аварии на атомных подводных лодках	4	133	85	12
Другие инциденты	11	16	6	2
Всего	175	434	210	43
Авария на Чернобыльской АЭС	1	134	134	28
Итого	176	568	344	71

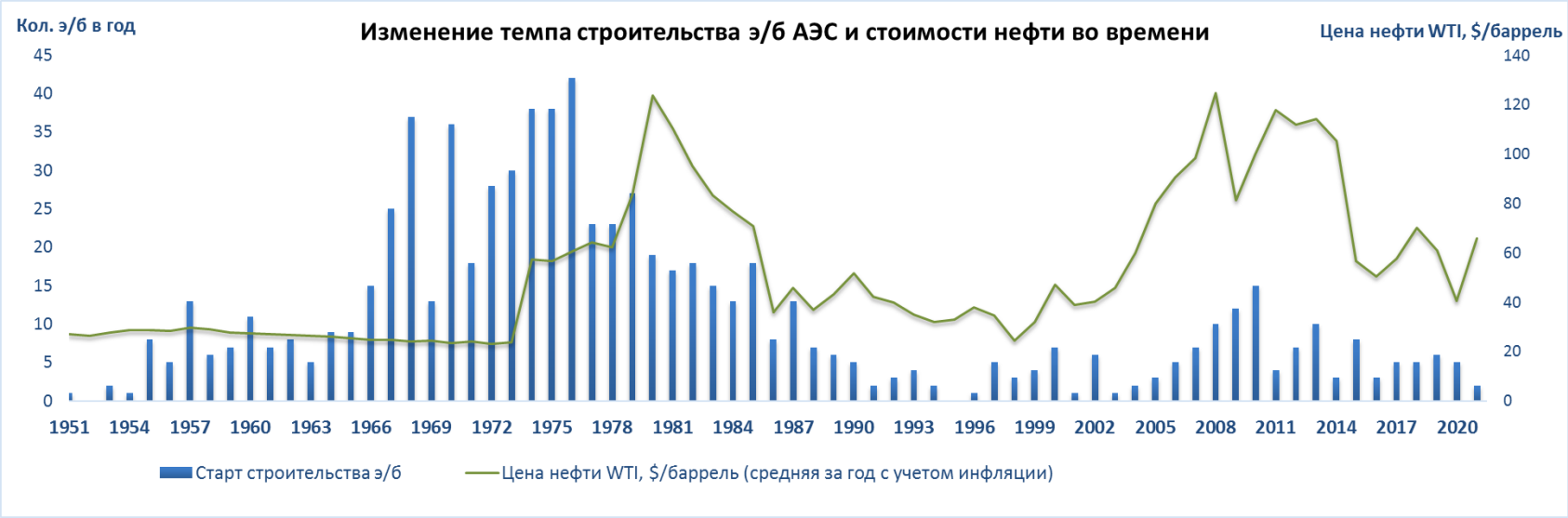
*Исключая случаи на предприятиях ПО «Маяк» 1949—1956 гг., не включенные в регистр.

Ильин Л. А. Радиационные аварии: медицинские последствия и опыт противорадиационной защиты // Атомная энергия. Том 92, вып. 2

Причина смерти	Среднее кол-во чел./год	Среднее кол-во чел./сутки
Сезонный грипп	от 250 000 до 650 000	от 685 до 1 780
Голод	600 000	1 650
Заболевания сердца	18 000 000	50 000
Раковые заболевания	10 000 000	27 000
Инсульт	7 000 000	19 000
Сахарный диабет	1 500 000	4 100
ВИЧ / СПИД	1 000 000	2 700
Самоубийства	800 000	2 200
ДТП	1 200 000	3 300
Авиакатастрофы	900	3
COVID-19	2 500 000	7 000

Данные Всемирной организации здравохранения и Университета Джонса Хопкинса

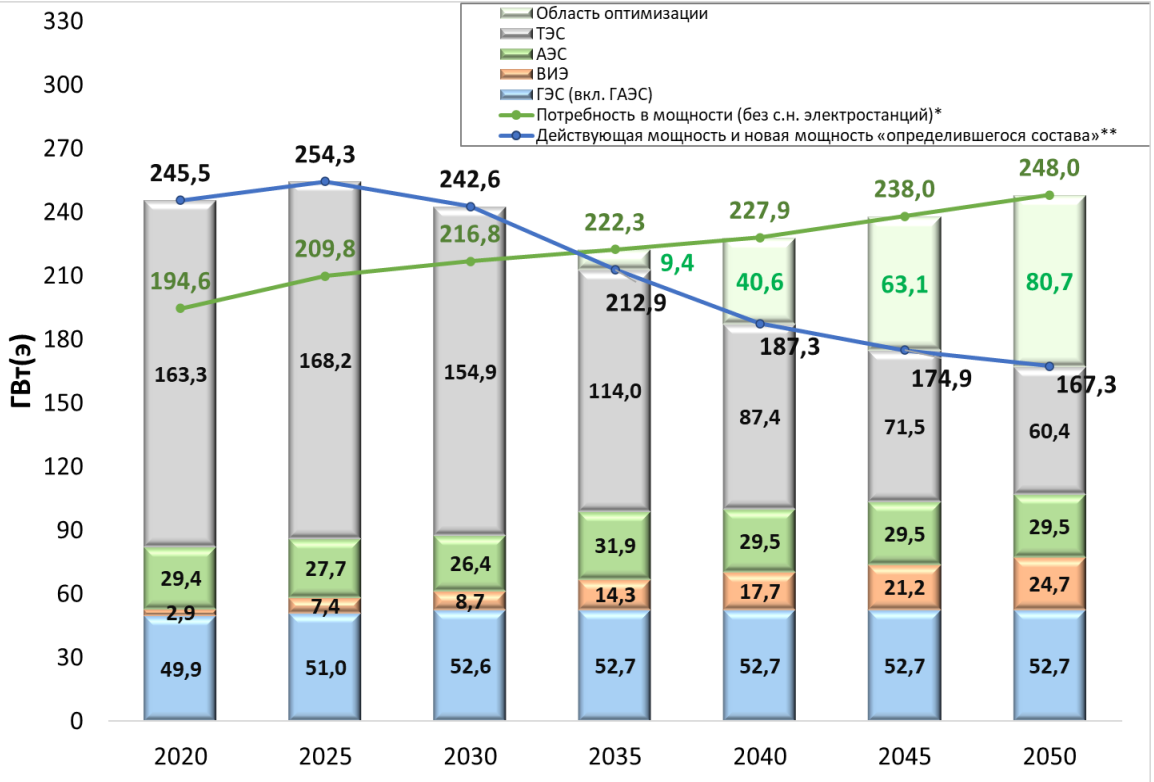
Атом и нефть



Источник: Информационный ресурс Macrotrends.net

Величина оптимизируемой в период до 2050 г. мощности электростанций ЕЭС России (ИНЭИ РАН, 2023 г.)

ПРОРЫВ РОСАТОМ



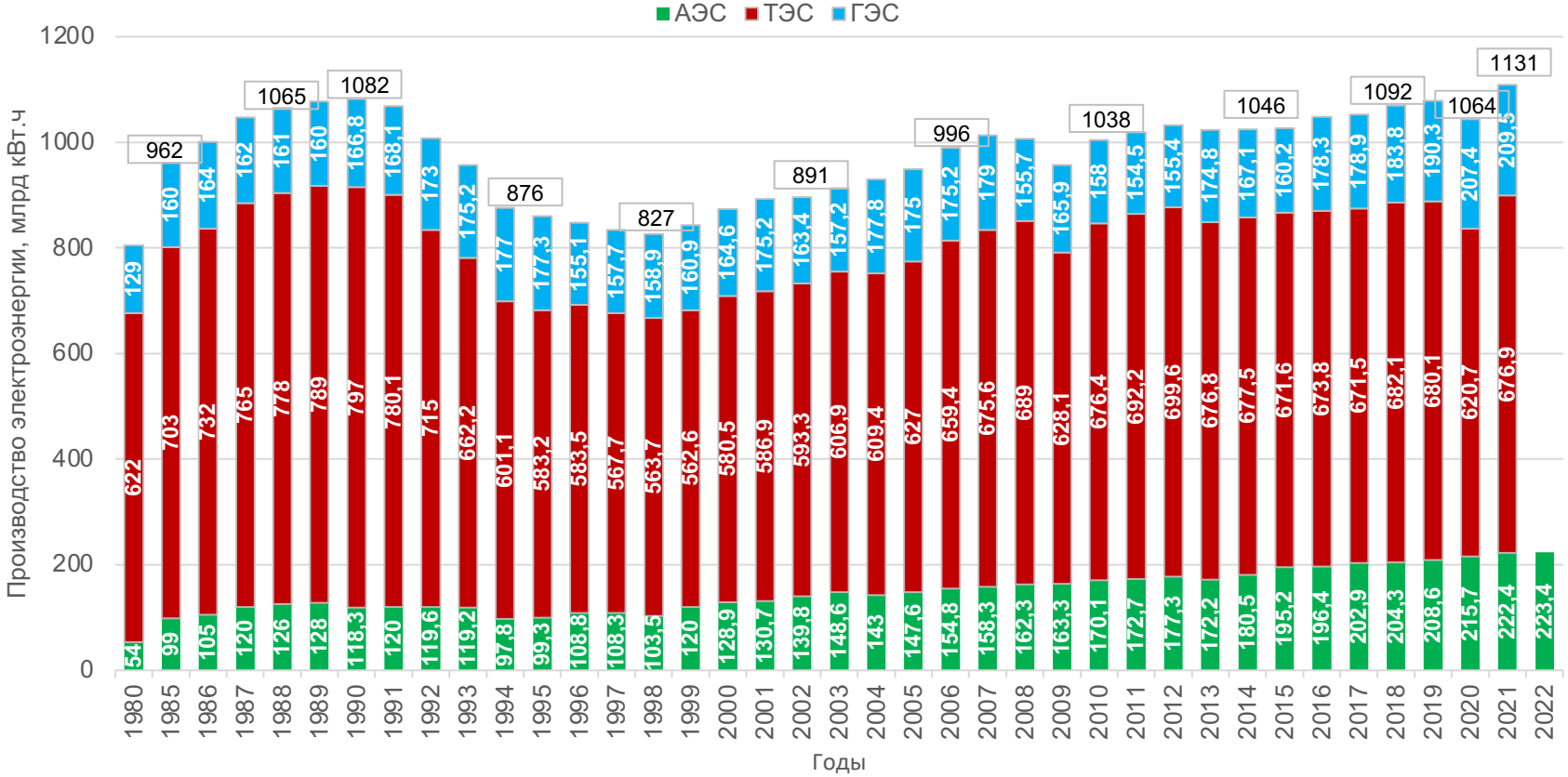
- Область оптимизации определяется разностью между потребностью в генерирующей мощности и мощности «определившегося состава»
- До 2030 г. не требуются инвестиционные решения по развитию генерирующих мощностей, но с их выбытием область оптимизации инвестиционных решений значительно увеличится: от **41 млн кВт в 2040 г. до 81 млн кВт в 2050 г.**
- На этот объем вводов претендуют не только новые мощности «традиционных» технологий (крупных ТЭС, АЭС, ГЭС), но и технологии ВИЭ

* без учета затрат на собственные нужды

** мощность действующих электростанций, не достигающих предельного ресурса эксплуатации и не требующих принятия инвестиционных решений, а также уже реализуемых и принятых инвестиционных решений по развитию генерирующих мощностей на среднесрочную перспективу

ПРОРЫВ
РОСАТОМ

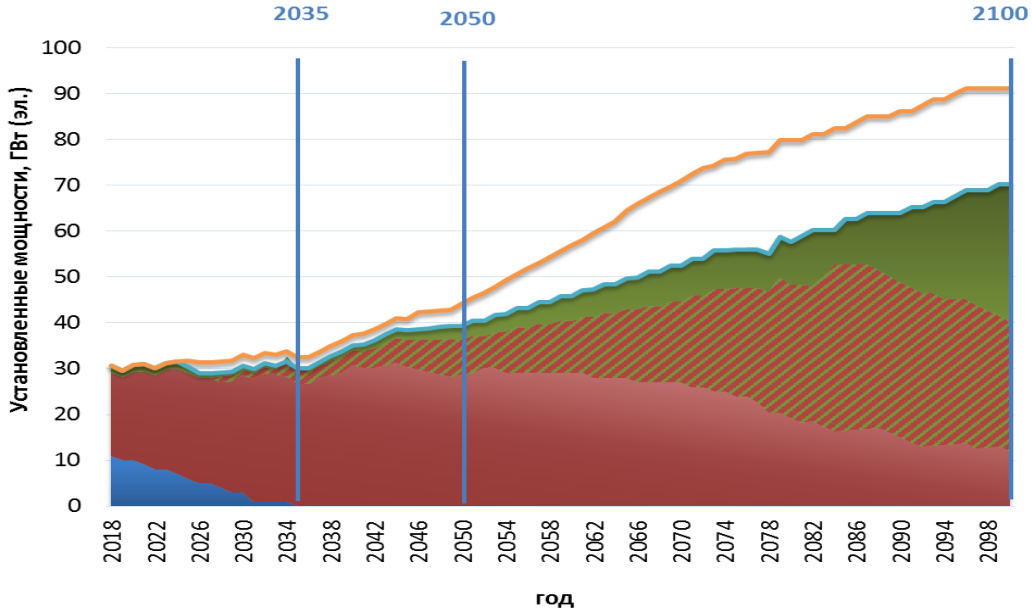
Производство электроэнергии в России по типам электростанций



Стратегия развития ядерной энергетики России до 2050 г. и перспективы на период до 2100 г. (Стратегия – 2018)

РОСАТОМ

Надежная технология **ВВЭР** + Воспроизводство Pu и дожигание минорных актинидов в **РБН** = **Двухкомпонентная АЭ с ЗЯТЦ и решение проблем наследия**



сценарий активного роста

сценарий умеренного роста

Дорожная карта* до 2045 года в части АЭС большой и средней мощности

РОСАТОМ

Генсхема 2042

Год	Ввод	Вывод
2023		
2024		КуАЭС бл. 2
2025	КуАЭС-2 бл. 1; БилАЭС бл. 2; БилАЭС бл. 3; БилАЭС бл. 4	
2026		
2027	КуАЭС-2 бл. 2	
2028		
2029		
2030	ЛАЭС-2 бл. 3	ЛАЭС бл. 4; ЛАЭС бл. 3
2031	КуАЭС-2 бл. 3	
2032	ЛАЭС-2 бл. 4	СмАЭС бл. 1; НВАЭС бл. 4
2033	Приморская АЭС бл.1; СмАЭС-2 бл. 1	КуАЭС бл. 3
2034	БелАЭС бл. 5; КуАЭС-2 бл.4	
2035	КолАЭС-2 бл. 1; Приморская АЭС бл.2; СмАЭС-2 бл. 2	КуАЭС бл. 4; СмАЭС бл. 2
2036	НВАЭС-2 бл.3; Южная АЭС бл.1	НВАЭС бл. 5
2037	КолАЭС-2 бл.2; Томская АЭС-2 бл.1	КолАЭС бл. 2
2038	ЮУральская АЭС бл.1	КолАЭС бл. 1
2039	Южная АЭС бл.2; Томская АЭС-2 бл.2	СмАЭС бл. 3
2040	КолАЭС-2 бл.3; ЮУральская АЭС бл.2	БелАЭС бл. 3
2041	Хабаровская АЭС бл.2; Рефтинская АЭС бл.1; Сибирская АЭС-2 бл.1	КолАЭС бл. 3
2042	Хабаровская АЭС бл.1; Сибирская АЭС-2 бл.2	
2043	КолАЭС-2 бл.4; Рефтинская АЭС бл.2	
2044	Амурская бл.1; Башкирская АЭС бл. 1	КолАЭС бл. 4
2045	Рефтинская АЭС бл. 3	

до 2045 года

–	ВВЭР-ТОИ (1200 МВт): блоки № 1, 2, 3, 4 КурАЭС-2;	4 эн.блока	4,8 ГВт	+ 33,0 ГВт
	ВВЭР-1200 (1150 МВт): блоки № 3 и 4 ЛАЭС-2;	2 эн.блока	2,3 ГВт	
	ВВЭР-1200-оптим (1200 МВт): с 2033 года	5 эн.блоков	6,0 ГВт	
	ВВЭР-1000: блоки №1 и 2 Приморской АЭС	2 эн.блока	2,0 ГВт	
–	БН-1200М (1250 МВт): блок № 5 БелАЭС;	1 эн.блок	1,25 ГВт	
	РБН (1255 МВт)	10 эн.блоков	12,55 ГВт	
–	ВВЭР-С/600 (600 МВт)	7 эн.блоков	4,2 ГВт	
–	энергоблоки, планируемые к выводу из эксплуатации	18 эн.блоков		- 11,8 ГВт

*** Проект ДК по предложениям Петрова А.Ю. (проект письма от 09.10.2024)**

Демонстрация принципиальной возможности ЗЯТЦ на базе технологий «естественной» безопасности

ПРОРЫВ
РОСАТОМ

Состоит из **трех ключевых элементов** – РУ с БРЕСТ-ОД-300, модуля фабрикации/рефабрикации ядерного топлива и модуля переработки ОЯТ

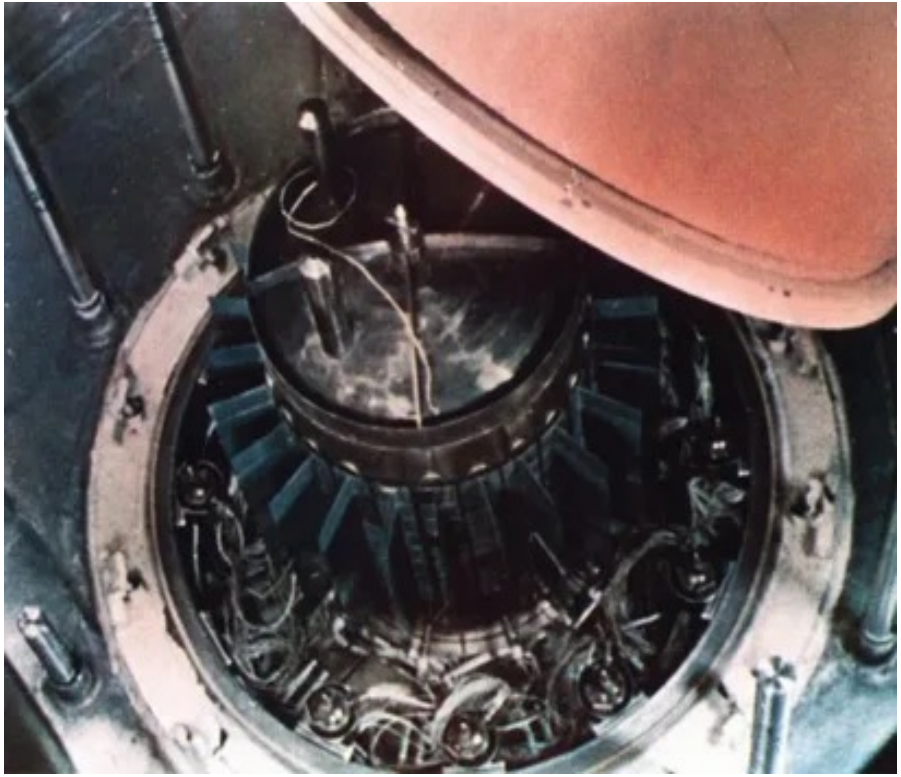
Использует **плотное смешанное нитридное уран-плутониевое (СНУП)** топливо

Реализует **пристанционный ядерный топливный цикл (ПЯТЦ)**

Обеспечит проверку работоспособности ключевых элементов технологической цепочки замкнутого ЯТЦ **для создания крупных промышленных энергокомплексов с реакторами большой мощности**

Подтвердит возможность рециклирования ЯМ и дожигания МА от реакторов на тепловых и быстрых нейтронах **для достижения условий радиационно-эквивалентного захоронения РАО**

ЯЭ в космосе, установки «Ромашка» и «Енисей»

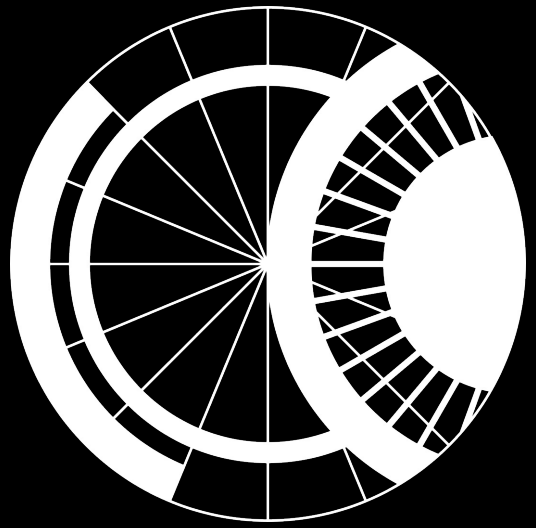


ПЕРСПЕКТИВЫ ЭНЕРГЕТИКИ

1. ЯЭ ПРИЗНАНА ЗЕЛЁНОЙ – САММИТ В БРЮССЕЛЕ (март 2024 г.)
2. НОВАЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ ПЛАТФОРМА
3. ВНЕДРЕНИЕ ЯЭ В СЕКТОР КОММУНАЛЬНОГО ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ И ПРОИЗВОДСТВО ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОГО ТЕПЛА
4. МАЛЫЕ АЭС ВО ВНЕСЕТЕВЫХ РЕГИОНАХ, НЕ ИМЕЮЩИХ ЛОКАЛЬНЫХ ЗАПАСОВ ОРГАНИКИ И НЕ ПЕРСПЕКТИВНЫЕ ДЛЯ ВИЭ
5. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ УРАН-ТОРИЕВОГО ЦИКЛА
6. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ТИН ДЛЯ НАРАБОТКИ Pu И СЖИГАНИЯ МА
7. ПОЛНОМАСШТАБНОЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ТЕРМОЯДА
8. НЕПОЗНАННЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ ПРОИЗВОДСТВА ЭНЕРГИИ НА НОВЫХ ФИЗИЧЕСКИХ ПРИНЦИПАХ

И.В. Курчатов

А.П. Александров

Н.А. Доллежаль

СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ!