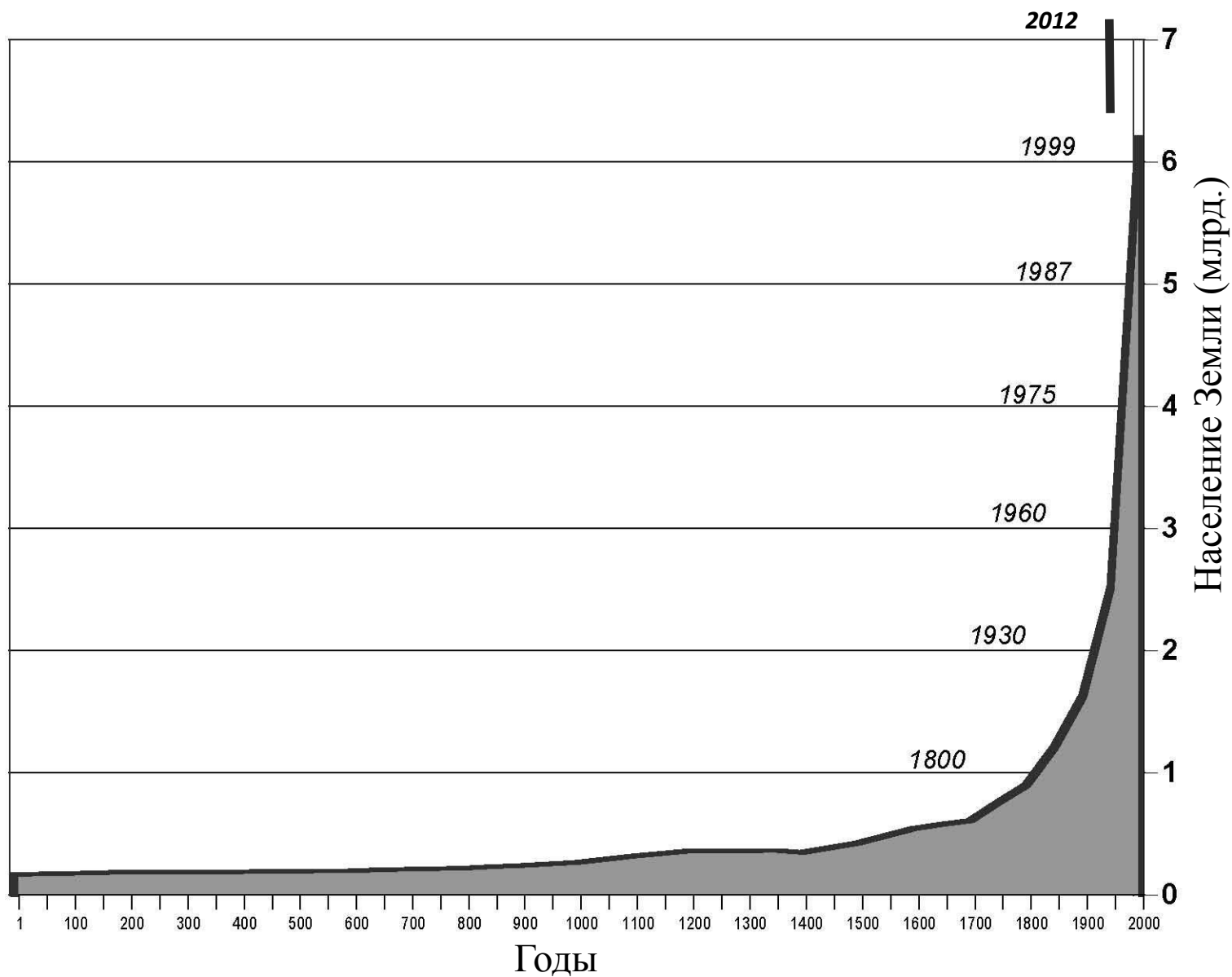


Лекция 13

Перспективы атомной энергетики

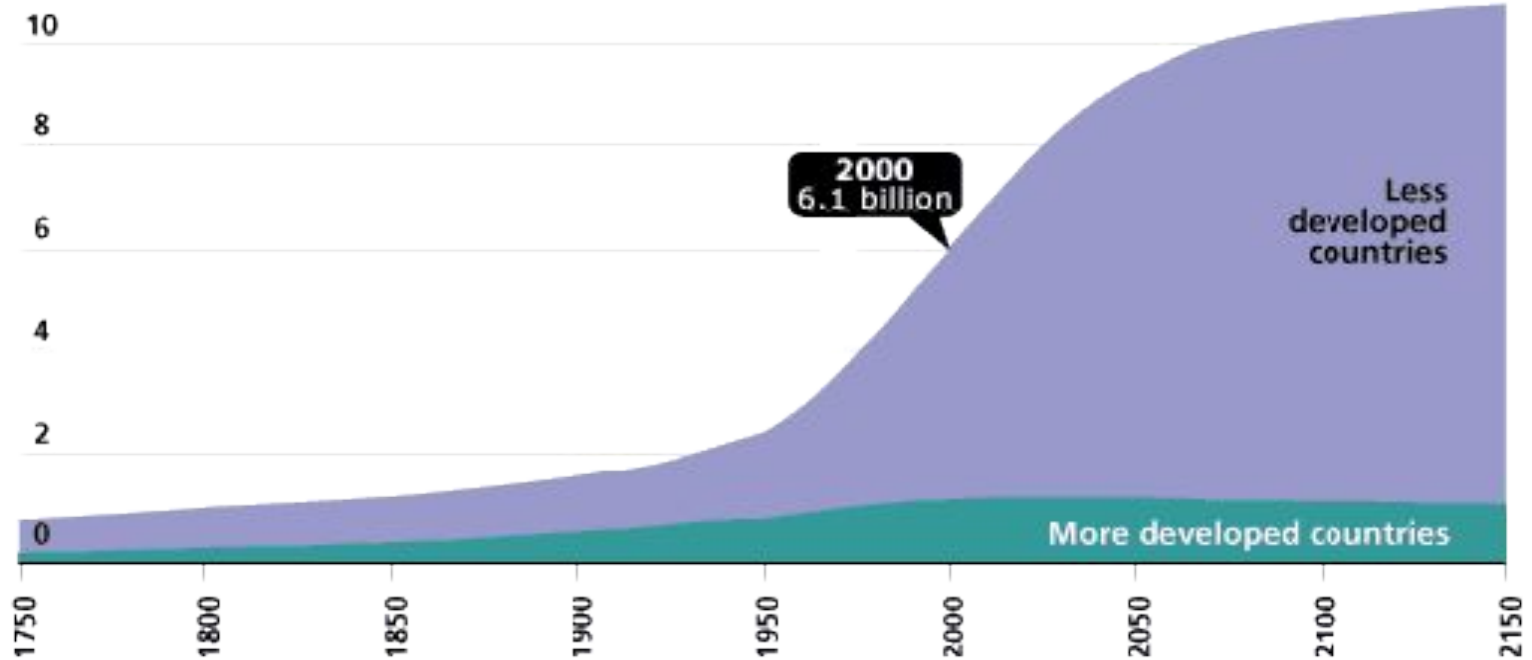
- Ядерная энергия – самое крупное достижение человека со времени овладения огнём (химическая энергия);
- Современная ядерная энергетика на тепловых нейтронах не имеет долгосрочных перспектив;
- Необходима новая ядерная энергетика на быстрых нейтронах с замкнутым ядерным топливным циклом.

Рост населения Земли с начала нашей эры



World Population Growth, 1750–2150

Population (in billions)



Две группы людей

Развитые страны

Численность населения –

1581млн.чел

Потребление первичной энергии

7.2 млрд.тнэ/год

ВВП- 50.2 \$ трлн

Удельный ВВП

31700 \$/чел

Удельное потребление энергии

~6 кВт/чел

В США 12 кВт/чел.

Развивающиеся страны

Численность населения –

4895млн.чел

Потребление первичной энергии

3.1 млрд.тнэ/год

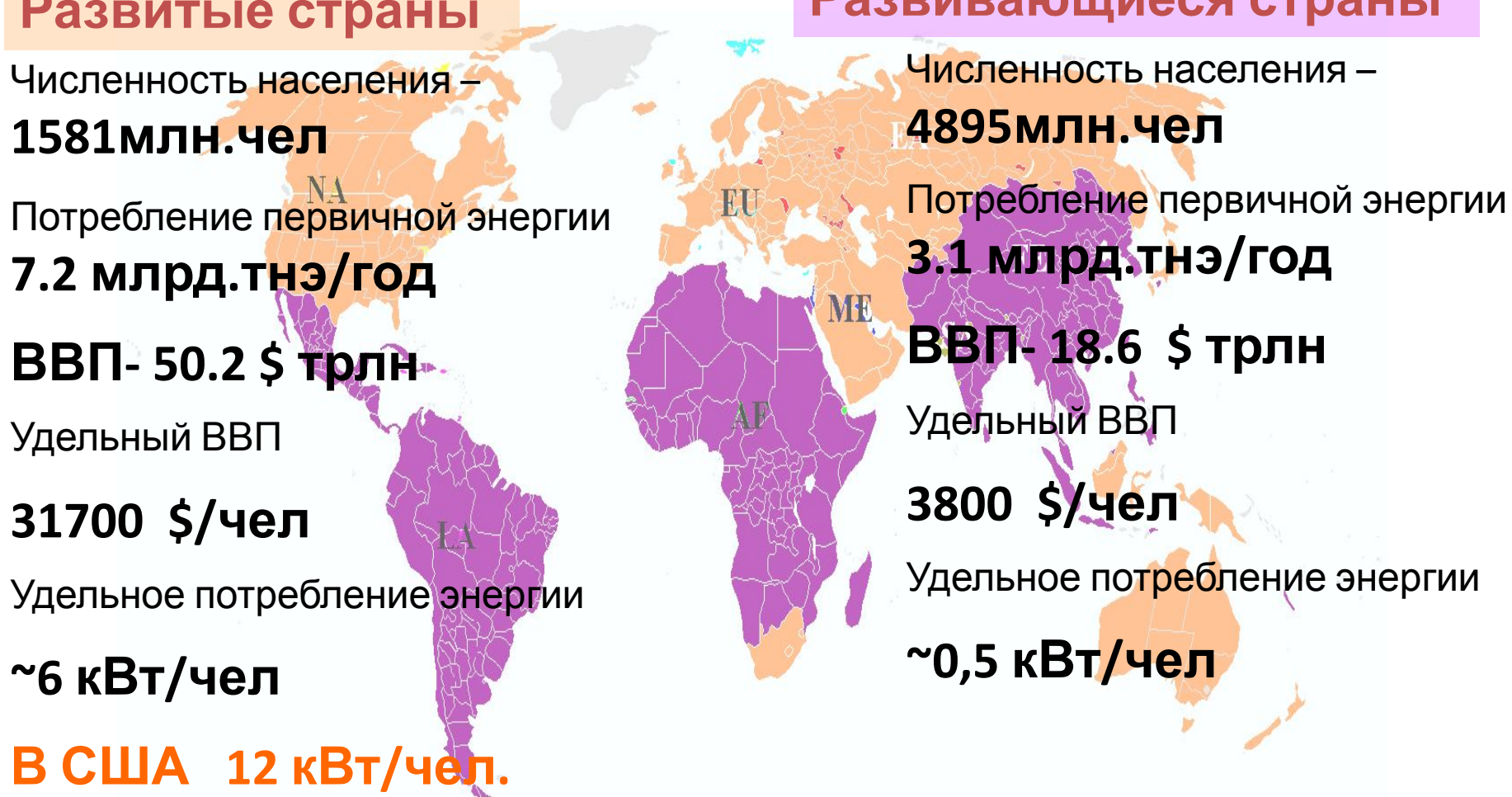
ВВП- 18.6 \$ трлн

Удельный ВВП

3800 \$/чел

Удельное потребление энергии

~0,5 кВт/чел



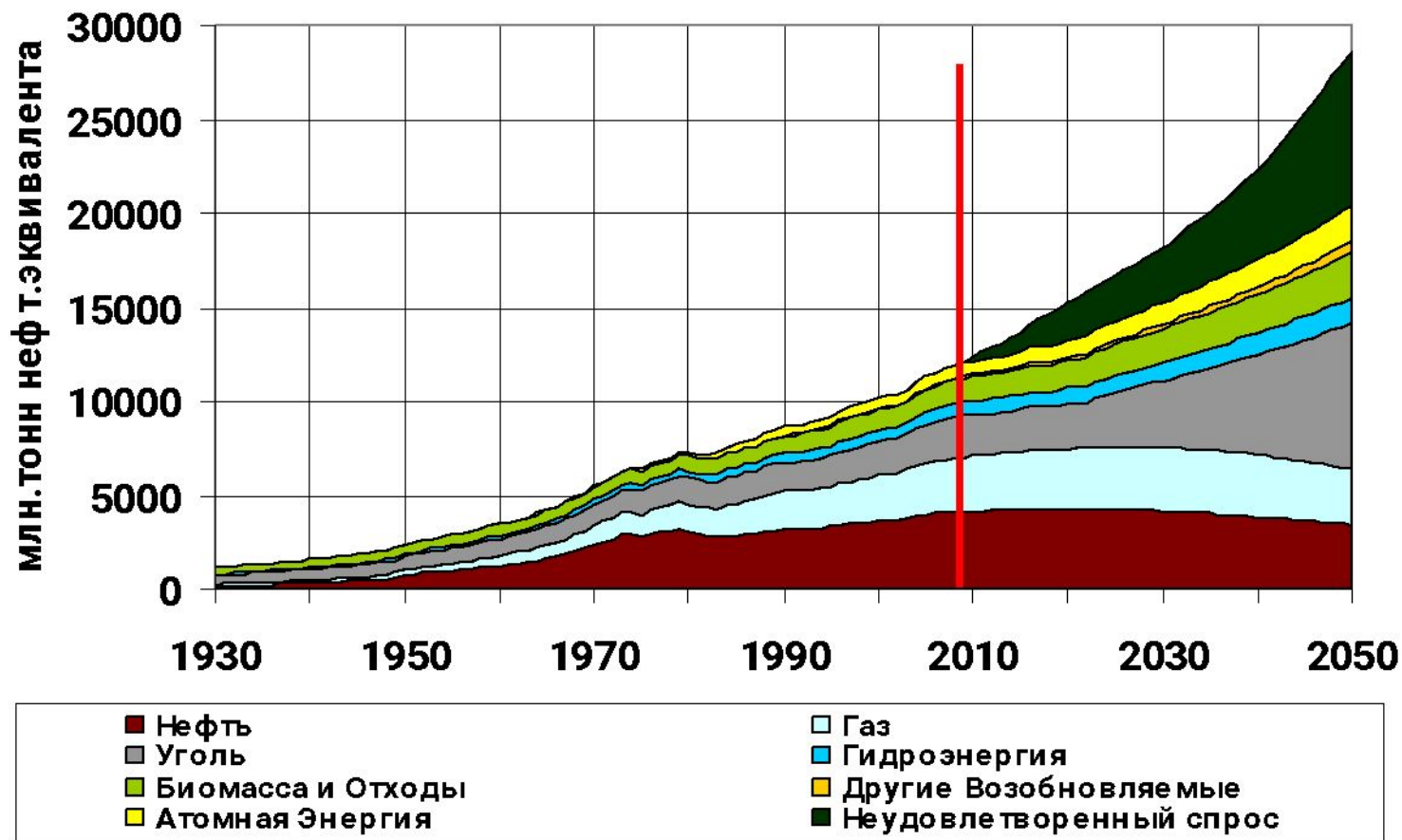
Ресурсы топлива на Земле *)

Реакция	Ключевой элемент	Среднее содержание в литосфере (г/г)	Среднее содержание в океане (г/г)	Удельная энергия (Дж/г)	Ресурсы на Земле (Дж)	Доступные ресурсы (Дж)	Ресурс (лет)
$C + O_2 \rightarrow C + O_2 + 4.2 \text{ эВ}$	Нефть+ газ, уголь	—	—	$\sim 3 \cdot 10^4$	$\sim 2 \cdot 10^{22}$ $\sim 5 \cdot 10^{23}$	$\sim 2 \cdot 10^{22}$ $\sim 2 \cdot 10^{23}$	~ 50 ~ 500
$n + U \rightarrow \text{фрагменты} + 200 \text{ МэВ}$	^{238}U	$4 \cdot 10^{-6}$	$1.5 \cdot 10^{-9}$	$0.82 \cdot 10^{11}$	$\sim 3 \cdot 10^{28}$	$\sim 10^{24}$	~ 2000
$n + Th \rightarrow \text{фрагменты} + 200 \text{ МэВ}$	^{232}Th	10^{-5}	$< 5 \cdot 10^{-10}$	$0.82 \cdot 10^{11}$	$\sim 8 \cdot 10^{28}$	$\sim 3 \cdot 10^{24}$	~ 6000
$d + d \begin{cases} \rightarrow \text{}^3\text{He} + n + 3.3 \text{ МэВ} \\ \rightarrow t + p + 4.0 \text{ МэВ} \end{cases}$	d	$1.5 \cdot 10^{-6}$	$1.6 \cdot 10^{-5}$	$0.9 \cdot 10^{11}$	$\sim 2 \cdot 10^{30}$?	?
$d + t \rightarrow \text{}^4\text{He} + n + 17.6 \text{ МэВ}$	${}^6\text{Li}$	$5 \cdot 10^{-5}$	10^{-7}	$2.9 \cdot 10^{11}$	$\sim 10^{30}$?	?
$d + \text{}^3\text{He} \rightarrow \text{}^4\text{He} + p + 18.3 \text{ МэВ}$	${}^3\text{He}$	$7.3 \cdot 10^{-19}$	—	$4.9 \cdot 10^{11}$	$\sim 10^{15}$?	0

*) Для оценок принято: масса литосферы на глубину 300 м равна $\sim 10^{23}$ г, масса океана $\sim 10^{24}$ г. Ресурсы урана в океане $\sim 10^{25}$ Дж.

Спрос на энергию в мире и возможности его удовлетворения за счет разных первичных энергоисточников

Баланс первичных энергоисточников



Хронология атомной эры

1911 г. – открытие ядра.

1932 г. – открытие нейтрона.

1939 г. – открытие деления ядра.

1942 г. – пуск первого ядерного реактора.

1945 г. – взрыв первой атомной бомбы.

1954 г. – первая атомная электростанция (АЭС).

2014 г. ~ **437** АЭС общей мощностью **373 ГВт(эл.)**.

~ **400** кораблей и лодок с атомными двигателями.

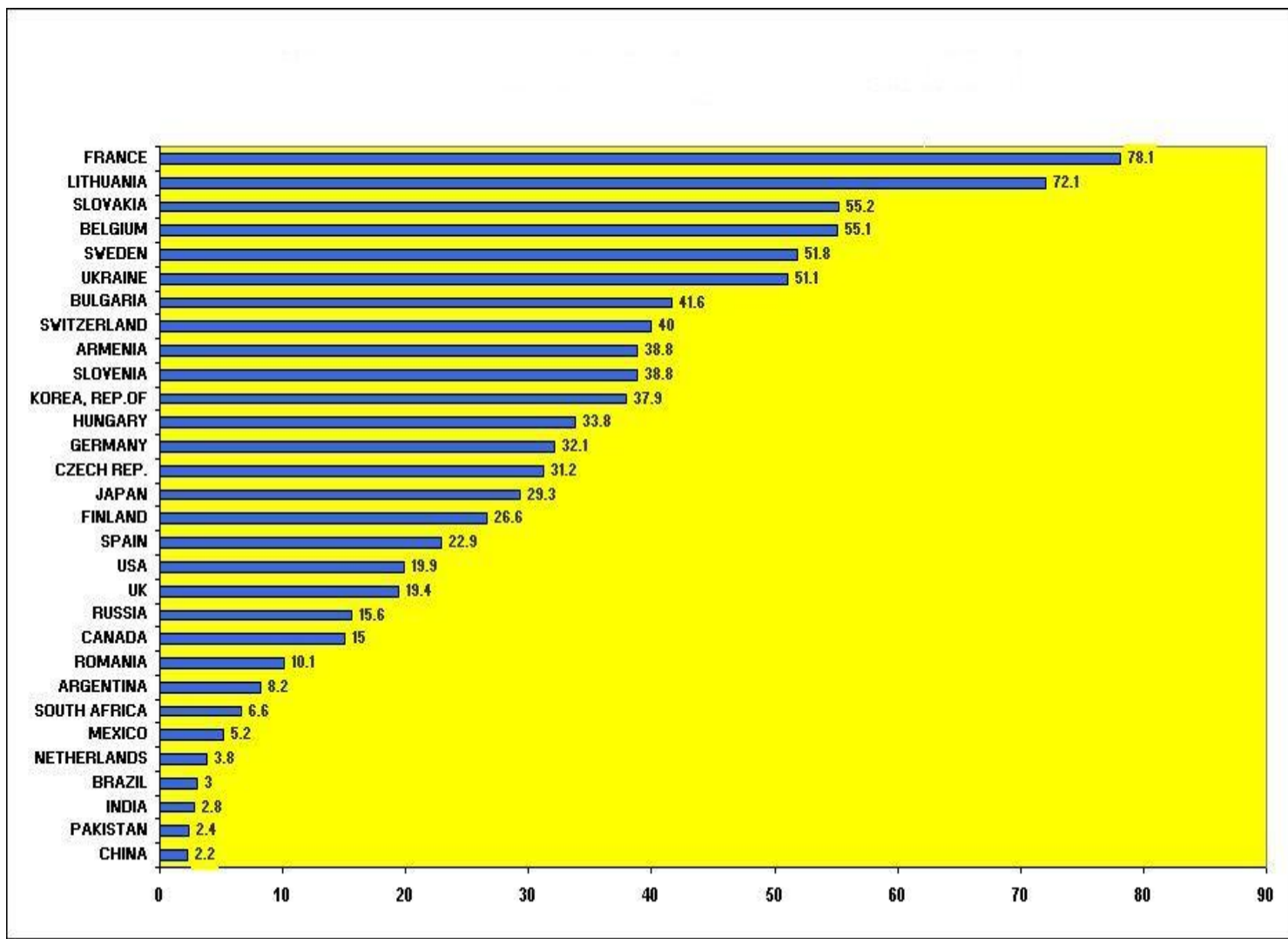
~ **6%** общей выработки энергии.

~ **16%** электричества.

Ядерная энергетика сегодня

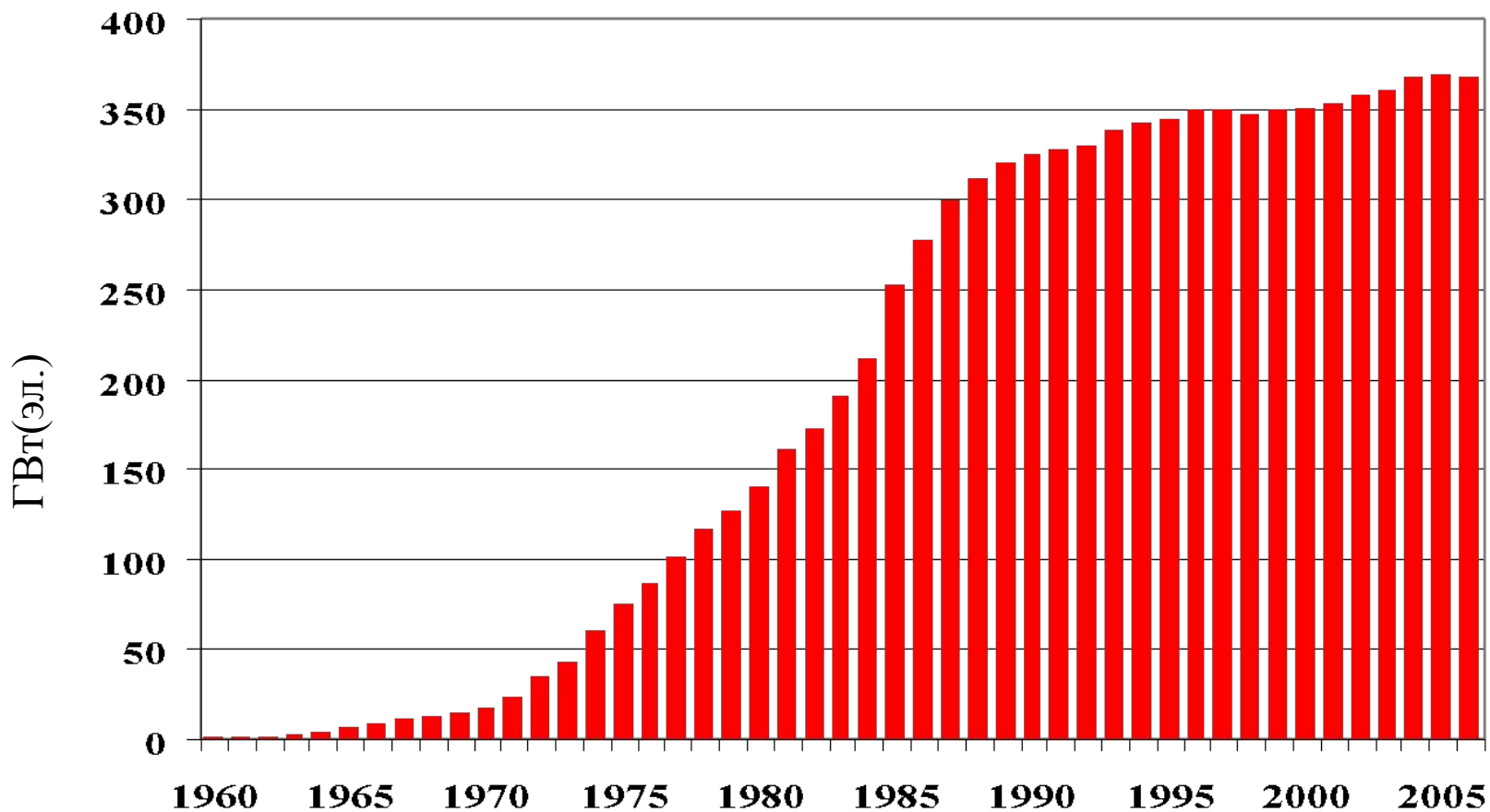
- 437 энергетических реакторов;
- Общая мощность – 373 ГВт(эл.);
- 16% электрических мощностей планеты;
- 80% - водо-водяные реакторы (ВВЭР);
- 1 промышленный быстрый реактор;
- Потребление U-235 – ~ 600 т/год;
- Разведанные запасы - ~ 50 тыс. т.

Доля ядерной энергии в производстве электроэнергии в 2004 году

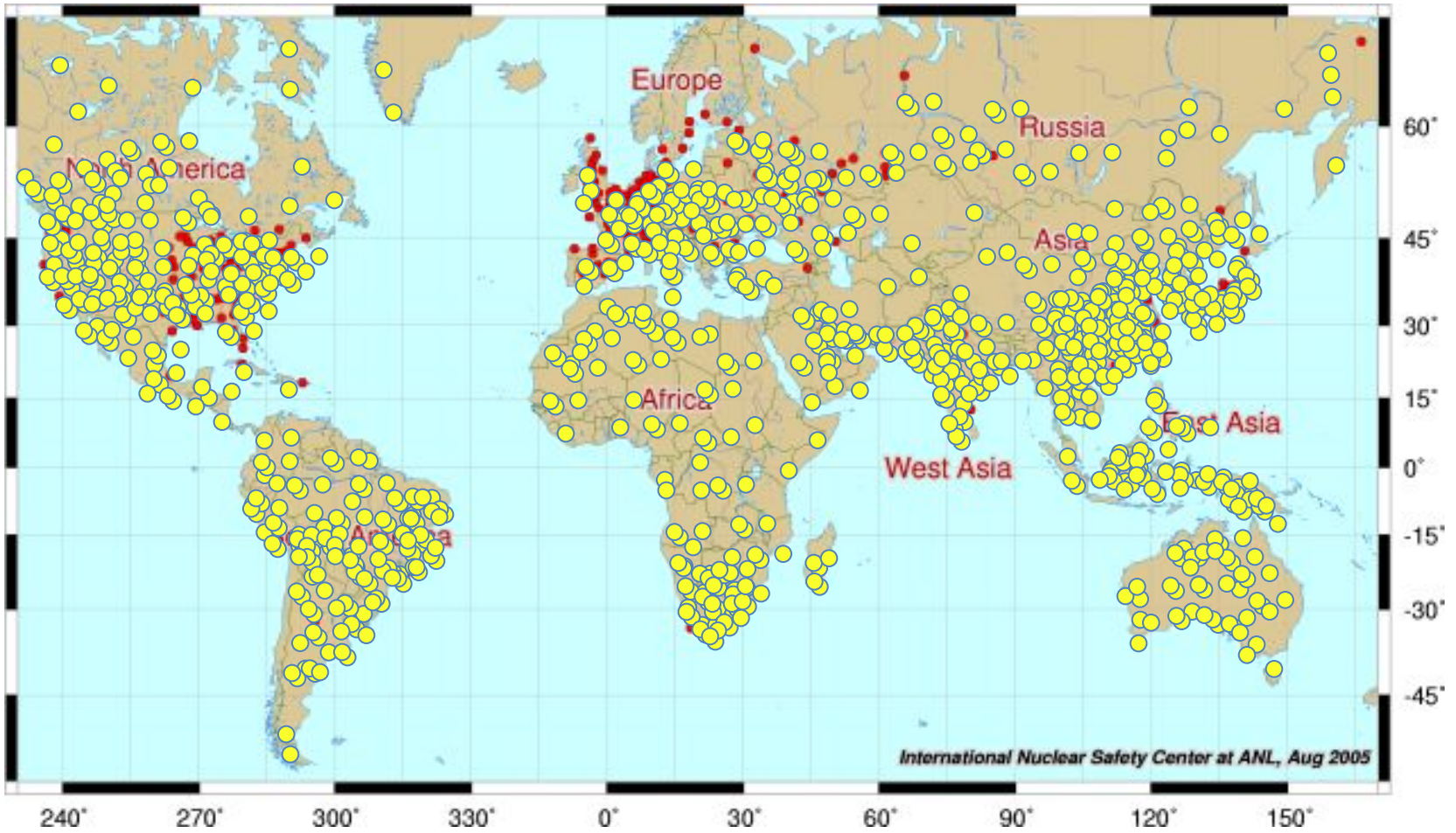


Динамика роста мощностей АЭ в мире :

Сегодня в 33 странах мира работают 439 АЭС, с суммарной мощностью 372 ГВт.



Reactors Start to Spread in Waves



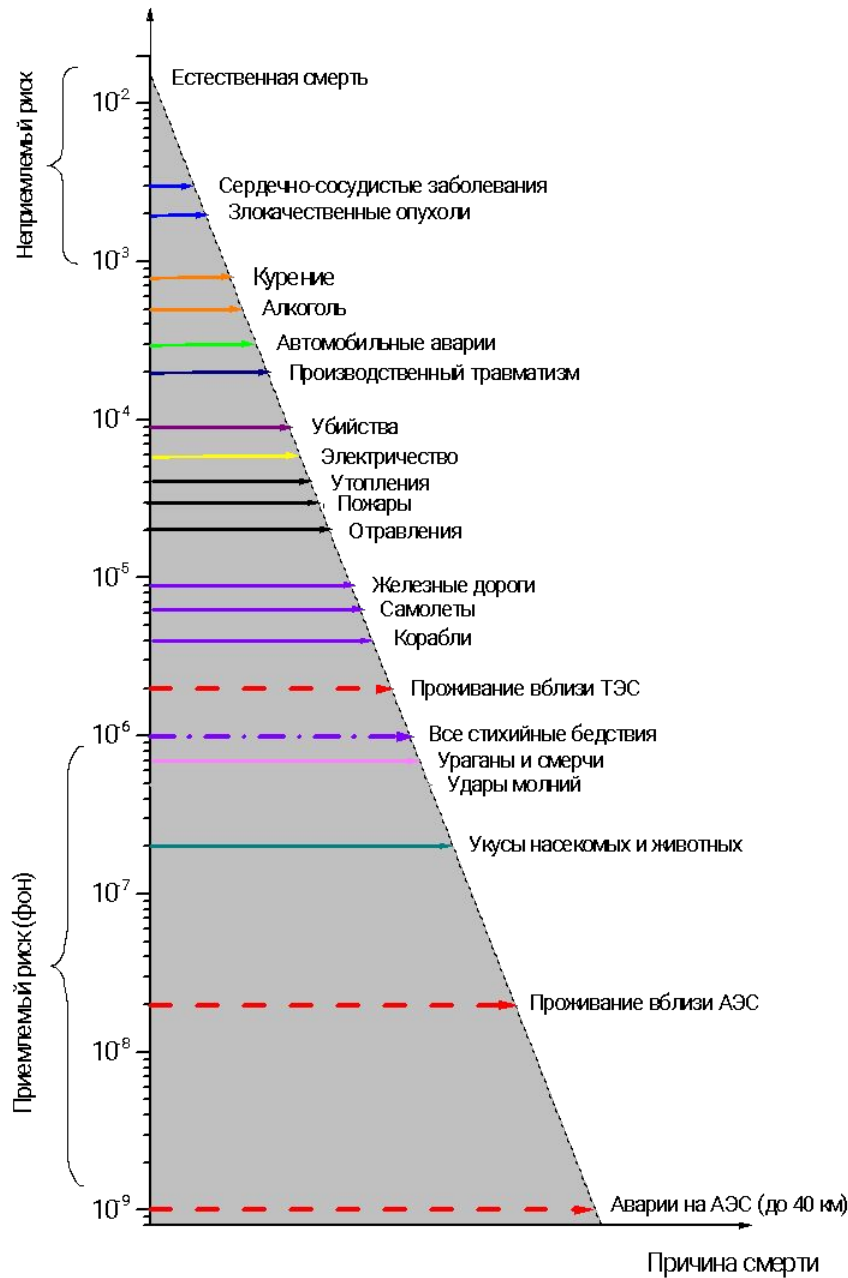


ТЭЦ



Нововоронежская АЭС

Вероятность
смерти/год (США)



На 1 ГВт(эл.) в топливном цикле угольных станций гибнет ~300 чел., а в цикле АЭС – в 500 раз меньше.

Безопасность

За **60 лет** существования ядерной энергетики было 3 крупных аварии: **Three Mile Island** (США), **Чернобыль** (СССР) и **Фукусима** (Япония). В Чернобыле от радиации погибло **59 человек**, по оценкам, следует ожидать еще **~4 тыс.** смертей, общий ущерб оценивается в **200-300 млрд.** долларов. В Японии и США – ни одного.

Для сравнения:

авария на химическом заводе в **Бхопале** (Индия) единовременно унесла жизни **2,5 тыс.** человек и от ее последствий умерли еще **250 тыс.** чел.

Такие крупные аварии – не специфика ядерной энергетики, а следствие огромной концентрации энергии.

Примеры:

Саяно-Шушенская ГЭС (**76** погибших и сотни миллиардов рублей ущерба).

На дорогах России ежегодно гибнет **~ 30 тыс.** человек, а во всем мире – свыше **1 млн.** человек.

Кризис ядерной энергетики (ЯЭ)

Несмотря на успехи ЯЭ мы наблюдаем сегодня парадоксальную ситуацию:

- Развивающиеся страны (Китай, Индия, Иран, Аргентина, Бразилия,...) наращивают мощности ЯЭ.
- Индустриально развитые страны (Германия, Швейцария, Швеция, Италия, Испания,...) закрывают ЯЭ.

Как объяснить этот парадокс?

Проблемы современной ядерной энергетики

- Ресурсное обеспечение -нет
 - Естественная безопасность – нет
 - Гарантия нераспространения – нет
 - Замыкание ЯТЦ – нет
 - Надёжная утилизация РАО – нет
 - Экономическая целесообразность – нет
- Их корень в том, что современная атомная энергетика возникла как побочный продукт программы создания ядерного оружия.**

Экономика

Цена продукта (электричество) складывается из:

	Угольные станции
• Капитальные затраты на строительство станций(~60%)	[35]
• Топливо.....(~15%)	[45]
• Эксплуатационные расходы(~25%)	[20]
• Утилизация отходов(?)	[0]
• Обеспечение безопасности(?)	

Сегодня строительство новых АЭС окупается только через **30 лет** и противоречит рыночной экономике.

Экономика

Стоимость электроэнергии на работающих **АЭС** в **2-3** раза меньше, чем на **ТЭС**, однако стоимость строительства **АЭС** окупается только через **~ 30 лет**.

В условиях рыночной экономики без поддержки государства задачу развития **новой ЯЭ** не решить.

Энергия – такой же элемент социальной стабильности как **образование и медицина**, поэтому **ядерная энергетика**

должна стать особой заботой государства – наряду с **НИМИ**.

Виды энергии

тепловая

химическая ($C + O_2 \rightarrow CO_2 + 4.2 \text{ эВ}$)

ядерная ($U \rightarrow \text{осколки} + 200 \text{ МэВ}$)

Источники энергии сегодня

Биомасса

Гидро, ветер

Уголь

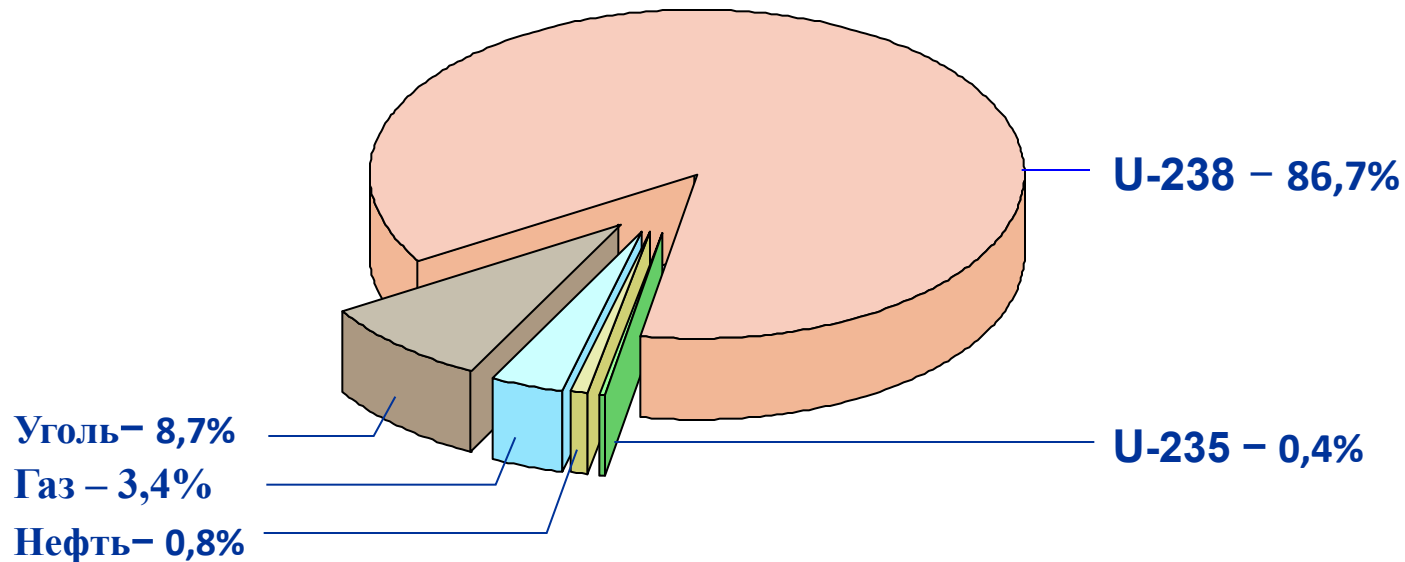
Нефть

Газ

Ядра – деление

Ядра – синтез

СОЛНЦЕ



Ресурсы ^{235}U

- Разведанные и прогнозируемые запасы U : **~ 10 млн. Т.**
- Содержание ^{235}U : **0.72 %.**
- Извлечение ^{235}U : **~ 0.5 %.**
- Общие запасы ^{235}U : **~ 50 тыс. тонн.**
- Для реактора **1 ГВт(эл.)** необходимо **~ 1 т ^{235}U /год.**
- Современное потребление ^{235}U : **~ 600 т/год.**
- К середине века **~1 тыс. т/год**, т.е
• ^{235}U хватит еще на **50-100 лет.**

Сравнение ТР и БР

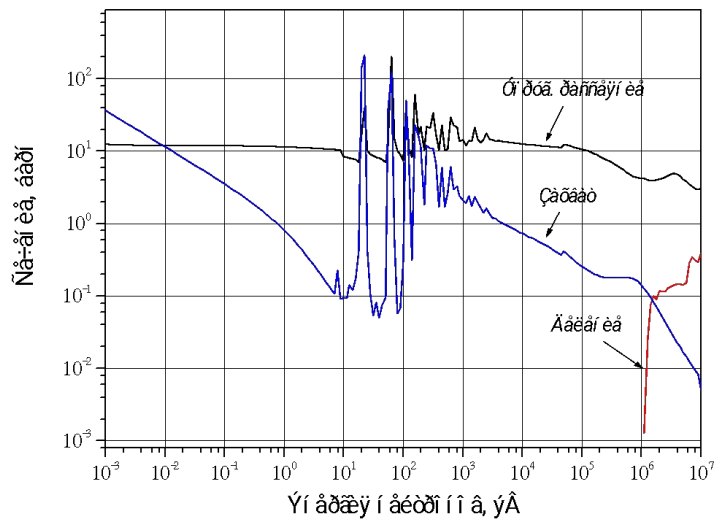
Изото п	$E_n = 0,025\text{эВ}$				$E_n = 2\text{ МэВ}$			
	ν	α	η	δ	ν	α	η	δ_0
^{235}U	2,42	0,167	2,07	1,07	2,67	0,047	2,55	1,55
^{238}U	-	$\sim 10^5$	$\sim 10^{-5}$	-	2,64	0,107	2,38	1,38
^{239}Pu	2,88	0,358	2,12	1,12	3,18	0,011	3,15	2,15
Нат.У	2,42	0,813	1,34	0,34	2,66	0,088	2,44	1,44

$\alpha = \bar{\sigma}_c / \bar{\sigma}_f$; $\eta = \nu / (1 + \alpha)$; $\delta_0 = \eta - 1$ - нейтронный избыток

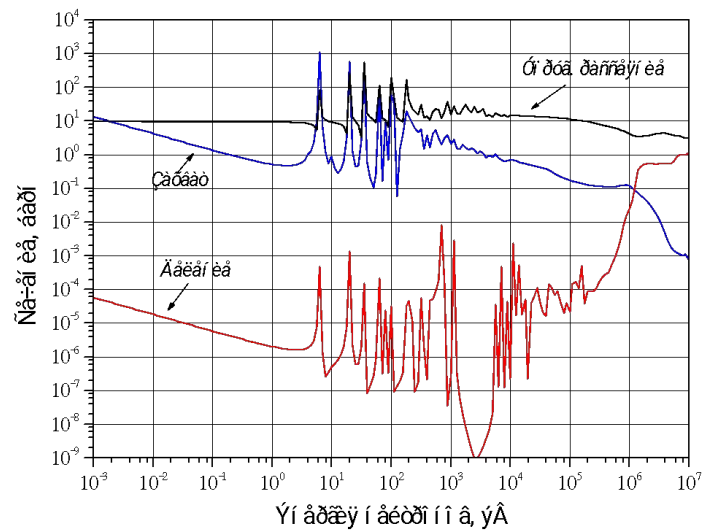
Параметры Th-U и U-Pu циклов

$E_n = 0,025 \text{ эВ}$					$E_n = 2 \text{ МэВ}$			
Изотоп	ν	$\sigma_f, \text{ барн}$	$\alpha = \frac{\sigma_c}{\sigma_f}$	$\eta = \frac{\nu}{1+\alpha}$	ν	σ_f	α	η
^{233}U	2,49	529	0,086	2,29	2,67	1,94	0,041	2,56
^{235}U	2,42	583	0,169	2,07	2,67	1,27	0,047	2,55
^{239}Pu	2,88	748	0,360	2,12	3,18	1,96	0,011	3,15

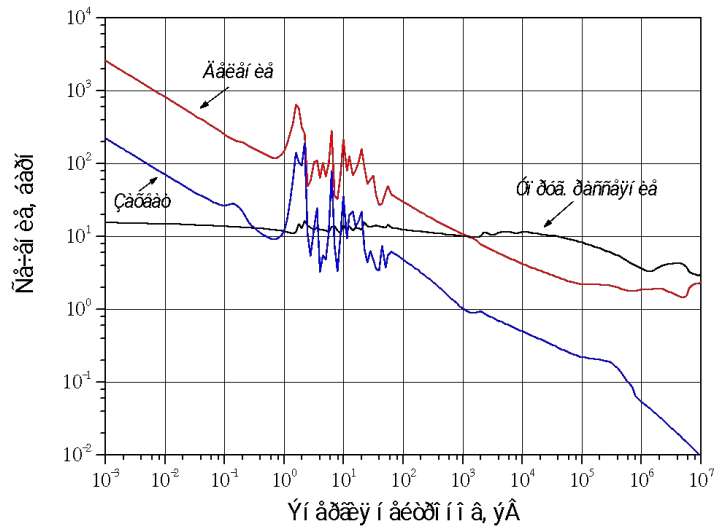
Th-232



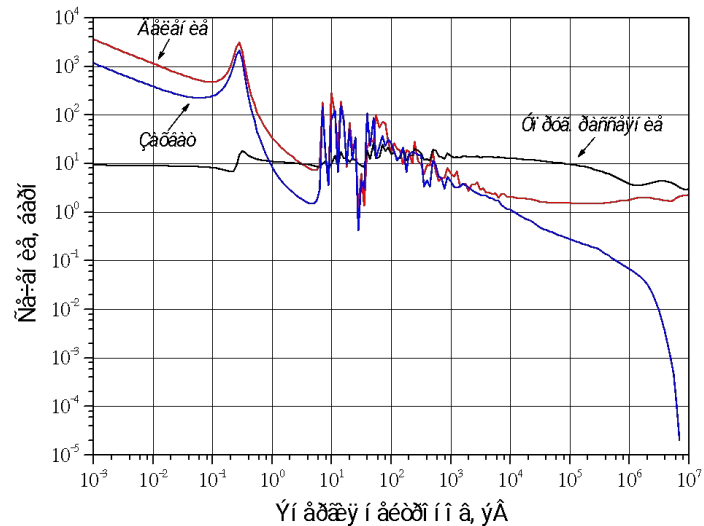
U-238



U-233



Pu-239



Коэффициент воспроизводства (КВ)

$$KB = \bar{\eta} - 1 - \bar{a} - \bar{l} - \bar{f};$$

\bar{a} - паразитное поглощение в конструкционных материалах;

\bar{l} - утечка нейтронов из активной зоны;

\bar{f} - вклад в деление U-238 и Pu-240 быстрыми нейтронами;

В тепловых реакторах $KB = 0,5 - 0,7$;

В быстрых реакторах $KB \sim 1,2 - 1,5$

Бридинг ядерного топлива возможен при $KB > 1$, может быть т.е. только в быстрых реакторах.

Кроме того, в быстрых реакторах выгорание топлива может быть повышено до 100 ГВт·сут/т.

Бридинг ядерного топлива

Идея бридинга возникла сразу же, в 1943 г. Одна из идей – наработка Pu с помощью ускорителей протонов была довольно быстро оставлена, поскольку затраты энергии на производство Pu превышали потенциальную энергию в нём заключённую.

В реакторе с быстрым спектром нейтронов теоретический коэффициент воспроизводства нейтронов $\sim 1,5$ вместо $\sim 0,7$ в тепловом реакторе.

Требования к новой ядерной энергетике

- Внутренняя безопасность (*inherent safety*);
- Защита от несанкционированного распространения ядерных материалов (*proliferation resistant*);
- Замыкание ядерного топливного цикла;
- Надёжная утилизация радиоактивных отходов;
- Обеспечение экономической целесообразности.

Баланс нейтронов для различных элементов

Семейство	Тепловой спектр $\Phi = 10^{14} \text{ n/sm}^2\cdot\text{s}$	Быстрый спектр $\Phi = 10^{15} \text{ n/sm}^2\cdot\text{s}$
^{235}U	0.60	0.86
^{238}U	- 0.10	0.62
^{232}Th	0.16	0.36
^{239}Pu	0.69	1.46
^{242}Pu	- 1.27	0.49
^{241}Am	- 1.07	0.54
^{243}Am	- 0.32	0.67

Три основные задачи ЯЭ

- Создать быстрый реактор, внутренне безопасный и экономически приемлемый;
- Разработать замкнутый топливный цикл, позволяющий многократно использовать в качестве топлива **ОЯТ**;
- Разработать технологию надёжного захоронения и утилизации **РАО**.

Все это можно осуществить только при условии государственной поддержки атомной науки и технологии.

Опасности

- Если мы не создадим безопасный быстрый реактор достаточно быстро, то тепловые реакторы сожгут весь ²³⁵U и мы потеряем доступ к практически неисчерпаемым запасам ядерной энергии.
- При неограниченном росте производства энергии мы рискуем разрушить биосферу Земли.

Требования к быстрому реактору

- Минимальный запас реактивности;
- Отрицательные температурный и плотностной коэффициенты;
- Отсутствие химически активных и пожароопасных теплоносителей;
- Отсутствие давления в первом контуре.

Это условия, необходимые для исключения крупных аварий с ядерным разгоном реактора и выходом радиоактивности за пределы АЭС.

Требования к топливному циклу

- Многократное возвращение ОЯТ в реактор;
- Сокращение времени топливного цикла от ~ 10 лет до ~ 1 года;
- Снизить потери РАО при переработке:
 - 0,1% - U, Pu, Am, Np, Cm;
 - 1% - Cs, Sr, Tc, I;
 - 100% - надёжно хоронить все остальные РАО.

Быстрый реактор: современное состояние проблемы

- Сегодня в мире работает только один быстрый реактор: **БН-600** и скоро заработает второй **БН-800** (Россия). Кроме того работает несколько стендов и исследовательских реакторов в России, Индии, Японии, Китае и т.д.
- В качестве теплоносителя в этих реакторах используется пожароопасный и химически активный натрий, т.е. он исходно опасен.
 - Натриевым реакторам присущ положительный пустотный эффект, т.е. такой реактор не застрахован от ядерных аварий, связанных с потерей теплоносителя.
 - Замыкание ЯТЦ в настоящее время ещё не реализовано.
 - Сейчас сооружение быстрого реактора, намного дороже теплового реактора.

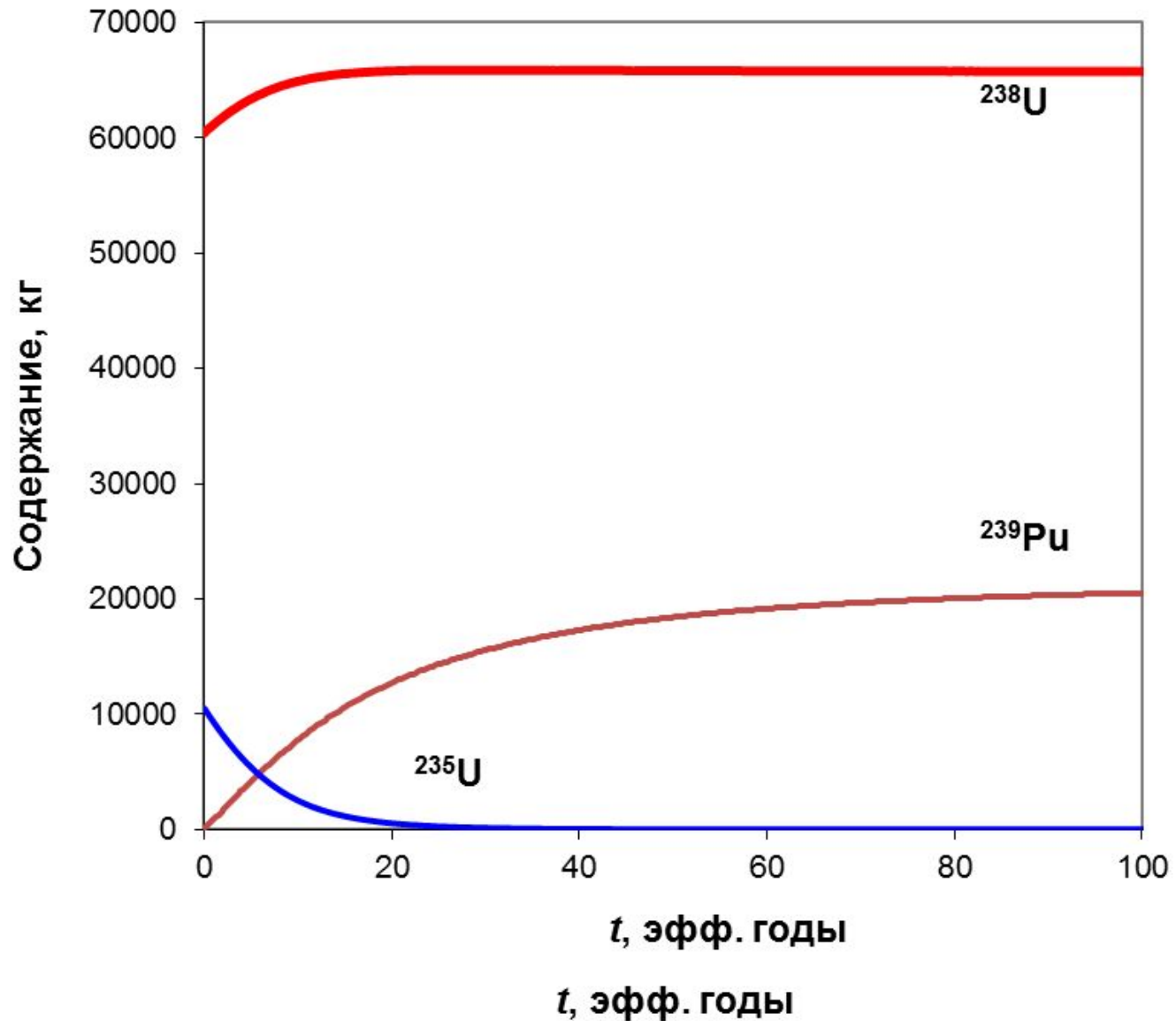
Равновесный режим

В быстром реакторе возможен равновесный режим работы, т.е. он может работать только на Pu-239 , наработанном в самом реакторе из U-238 .

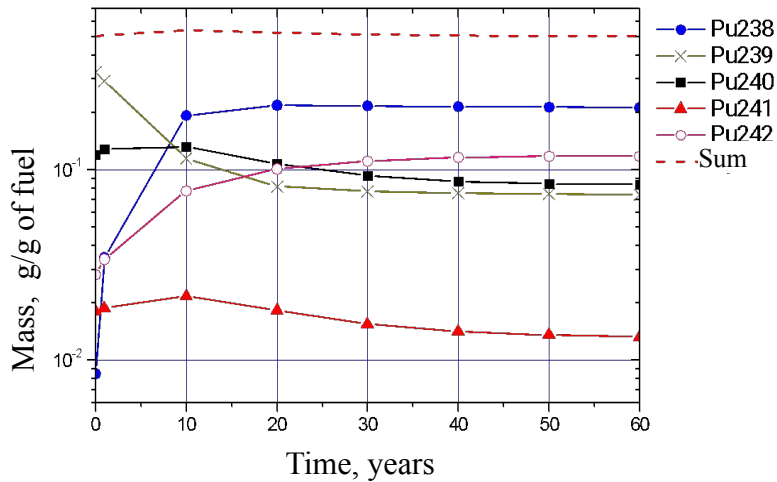
Такой режим достигается при составе топлива
 $\sim 10\% \text{Pu-239} + 90\% \text{U-238}$ или $\sim 15\% \text{U-235} + 85\% \text{U-238}$

В этом случае достигается равновесие:
скорость наработки Pu-239 сравнивается со скоростью его сжигания и реактор подпитывается только U-238 .

Выход в равновесный режим

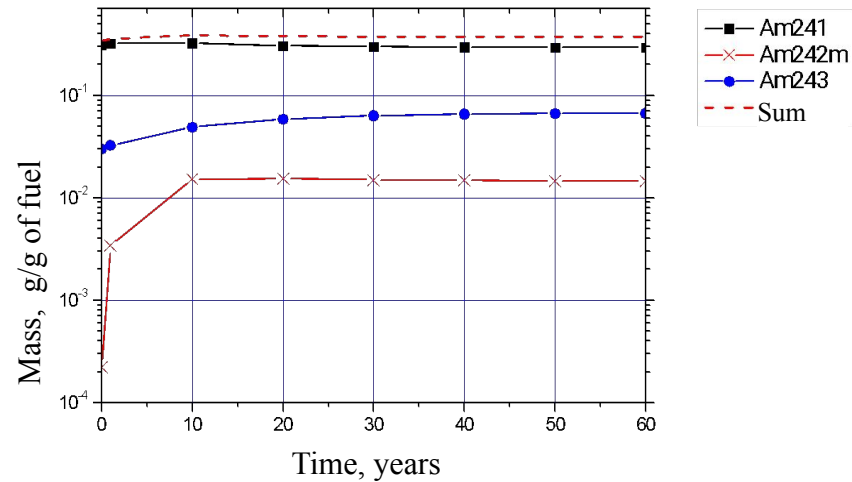


Pu



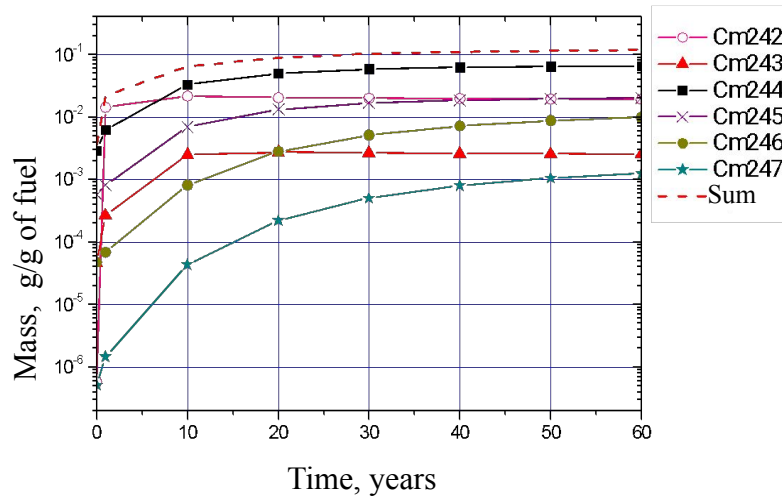
Dynamics of *Pu* isotopes accumulation

Am



Dynamics of *Am* isotopes accumulation

Cm



Dynamics of *Cm* isotopes accumulation

Современное состояние ЯЭ

- Естественная безопасность – нет
- Гарантия нераспространения ядерных материалов – нет
- Замыкание ЯТЦ – нет
- Надёжная утилизация РАО – нет
- Экономическая целесообразность - нет

Пути решения проблем ЯЭ

Четыре поколения реакторов:

Generation I – первые коммерческие реакторы ~ 1960 гг.

Generation II – стандартные коммерческие реакторы 1970 – 1990 гг.

Generation III – усовершенствованные реакторы
Generation II

Generation IV – программа обнародована в 2000 г. и предлагает пути решения всех упомянутых проблем.

Для исследований и разработки выбрано **6 типов** реакторов.

Generation IV: Nuclear Energy Systems Deployable no later than 2030 and offering significant advances in sustainability, safety and reliability, and economics

Generation I

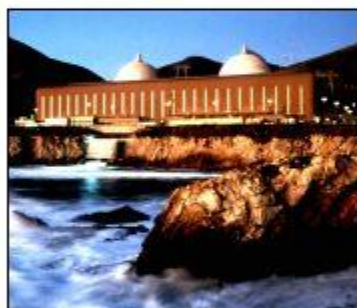
Early Prototype Reactors



- Shippingport
- Dresden, Fermi I
- Magnox

Generation II

Commercial Power Reactors



- LWR-PWR, BWR
- CANDU
- VVER/RBMK

Generation III

Advanced LWRs



- ABWR
- System 80+
- AP600
- EPR

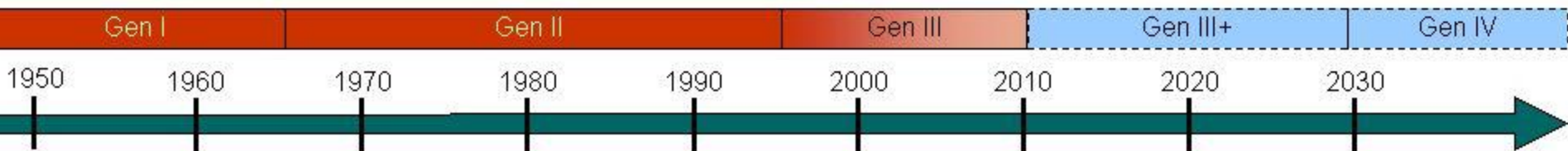
Near-Term Deployment

Generation III+ Evolutionary Designs Offering Improved Economics

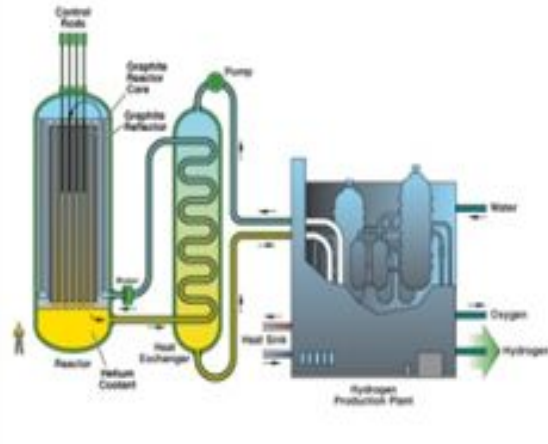
.....

Generation IV

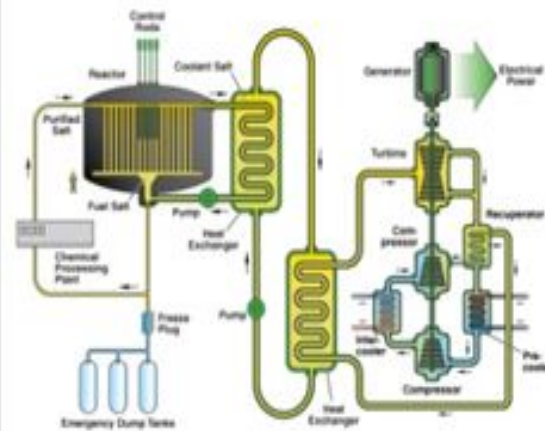
- Highly Economical
- Enhanced Safety
- Minimal Waste
- Proliferation Resistant



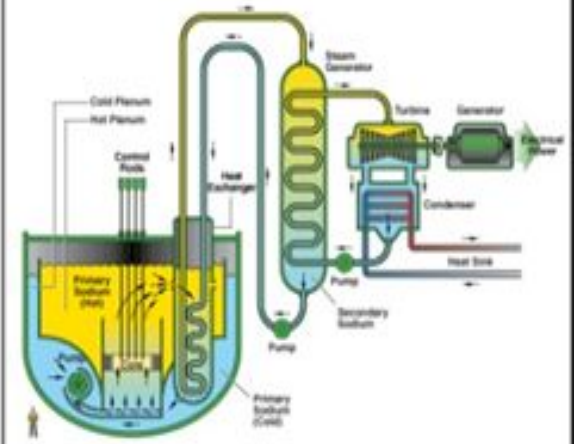
Very-High-Temperature Reactor



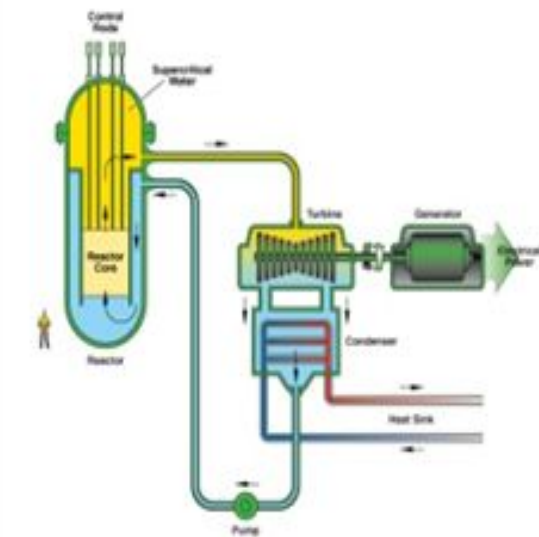
Molten Salt Reactor



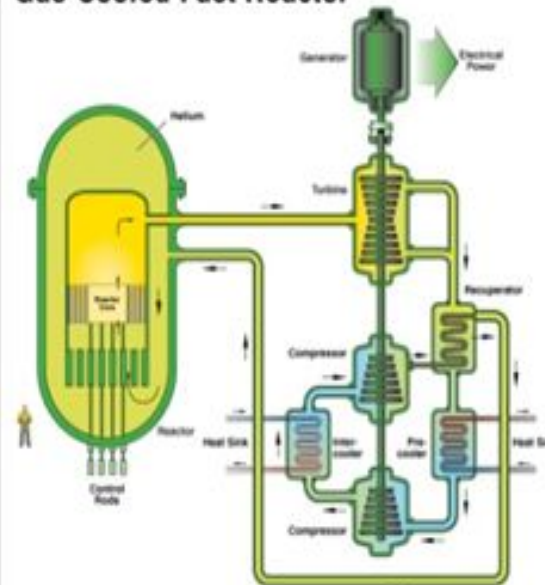
Sodium-Cooled-Fast Reactor



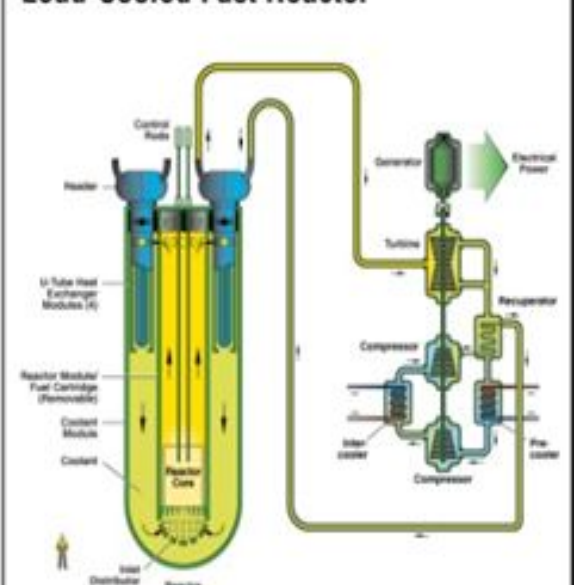
Supercritical-Water-Cooled Reactor



Gas-Cooled Fast Reactor



Lead-Cooled Fast Reactor



Перспективы атомной энергетики

- Ядерная энергия – самое крупное достижение человека со времени овладения огнём (химическая энергия);
- Современная ядерная энергетика на тепловых нейтронах не имеет долгосрочных перспектив;
- Необходима новая ядерная энергетика на быстрых нейтронах с замкнутым ядерным топливным циклом.

Есть ли будущее у ядерной энергетики?

Ответ на этот вопрос зависит от того, что мы понимаем под будущим:

50 лет? **100** лет? **1000** лет?

У современной ядерной энергетики на тепловых нейтронах длительного будущего нет.

Без ядерной энергетики будущего нет у современной цивилизации.

Термоядерный синтез



В бесконечном урановом blankets термоядерный нейтрон дает:

- 1 деление (200 МэВ) и
- 2,7 ядра плутония (540 МэВ).

Итого ~750 МэВ - в 50 раз больше энергии синтеза (17,6 МэВ).

Для производства трития (в природе его нет) в реакции



Надо затратить один нейтрон, т.е. потенциально ~200 МэВ.

ИТОГ:

Синтез	17,6	МэВ;
Деление	740	МэВ;
Производство трития	200	МэВ;
Синтез + деление	560	МэВ.

Поэтому «чистый термояд» без blankets – это чистая химера.

Summary Evaluation of Advanced Nuclear Technologies

	GEN III+ LIGHT- WATER REACTORS	HIGH- TEMPERATURE GAS REACTORS	SALT- COOLED THERMAL REACTORS	SUPER- CRITICAL WATER REACTORS	SODIUM- COOLED FAST REACTORS	LEAD- COOLED FAST REACTORS	GAS- COOLE FAST REACT
INHERENT SAFETY							
AMBIENT PRESSURE	NO	NO	YES	NO	YES	YES	NO
MELTDOWN RESISTANT FUELS	NO	YES	YES	YES	YES	YES	YES
SAFE COOLANT*	YES	YES	YES	NO	NO	NO	YES