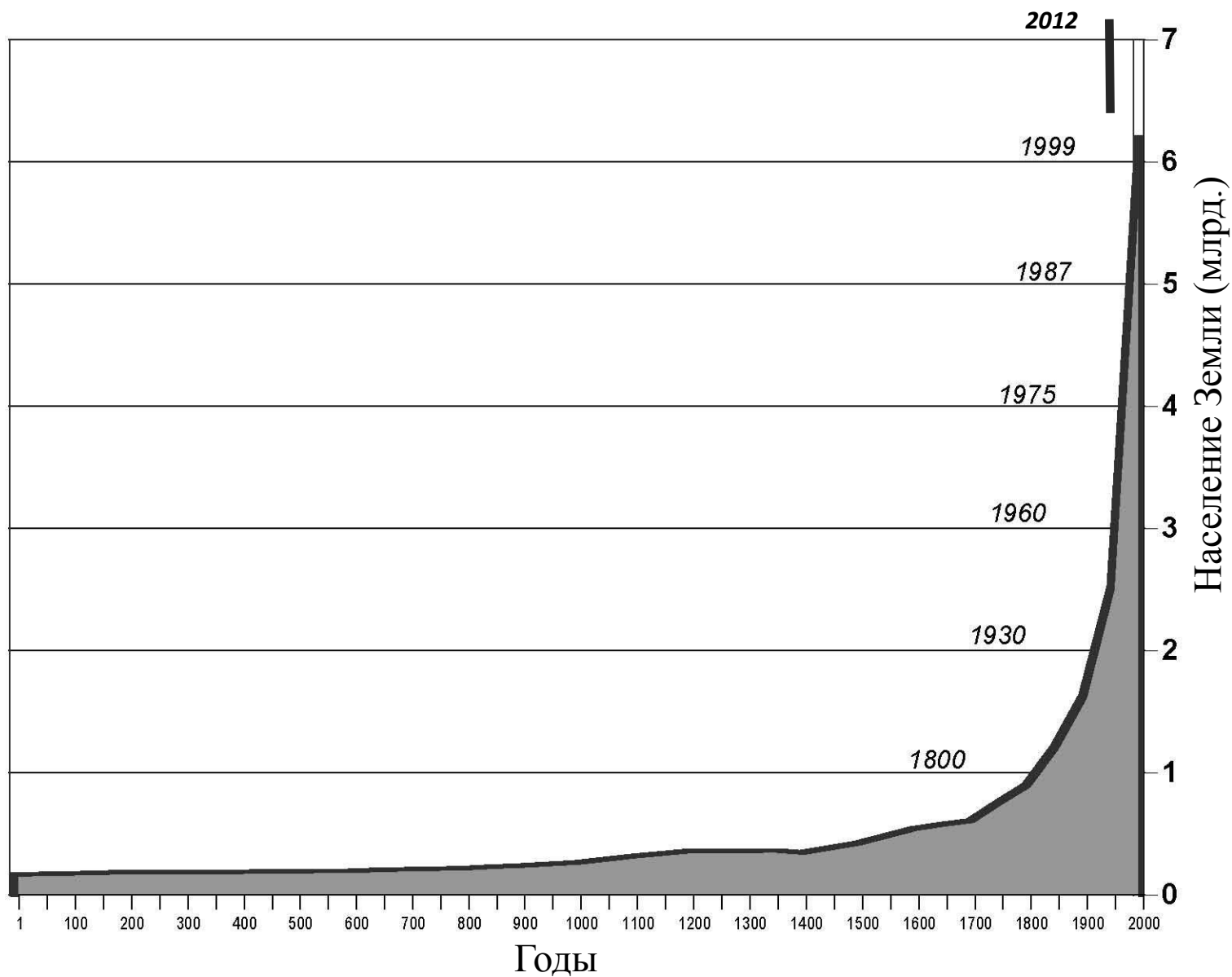


# Лекция 13

## Перспективы атомной энергетики

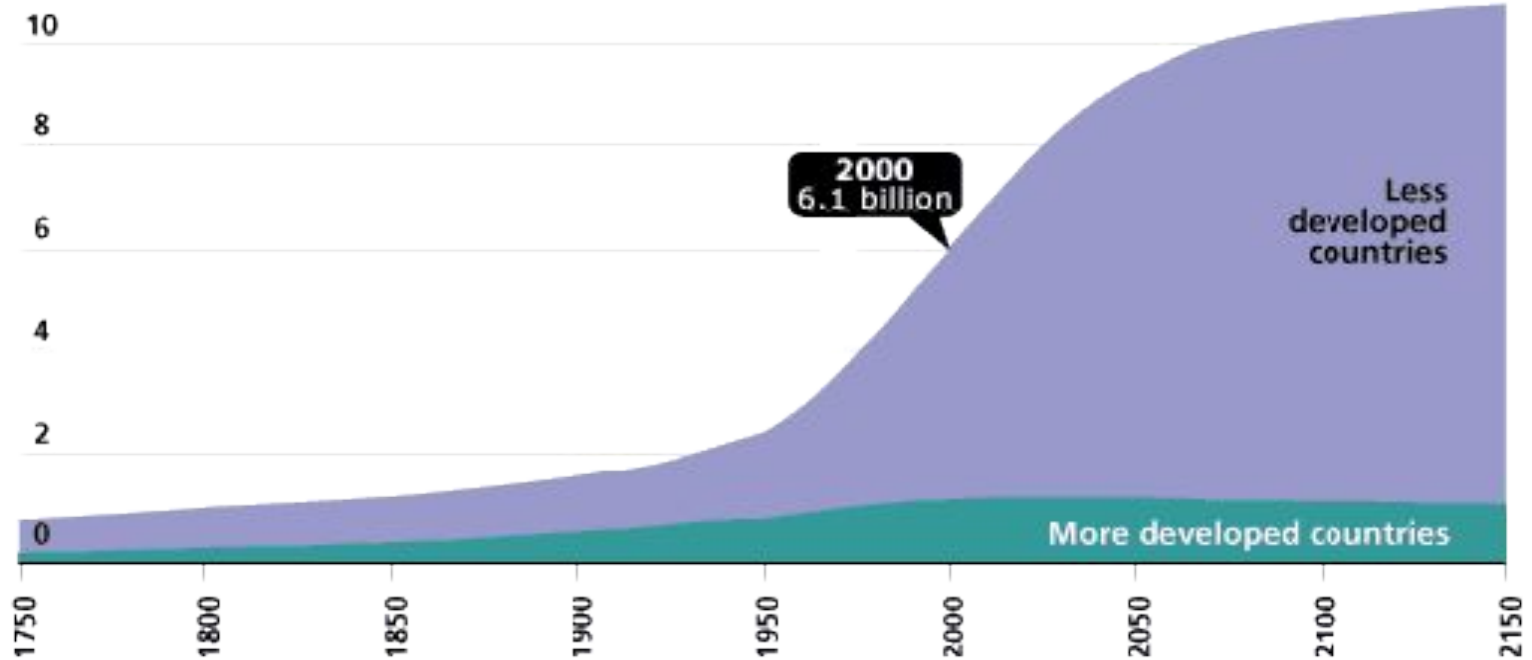
- Ядерная энергия – самое крупное достижение человека со времени овладения огнём (химическая энергия);
- Современная ядерная энергетика на тепловых нейтронах не имеет долгосрочных перспектив;
- Необходима новая ядерная энергетика на быстрых нейтронах с замкнутым ядерным топливным циклом.

# 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**



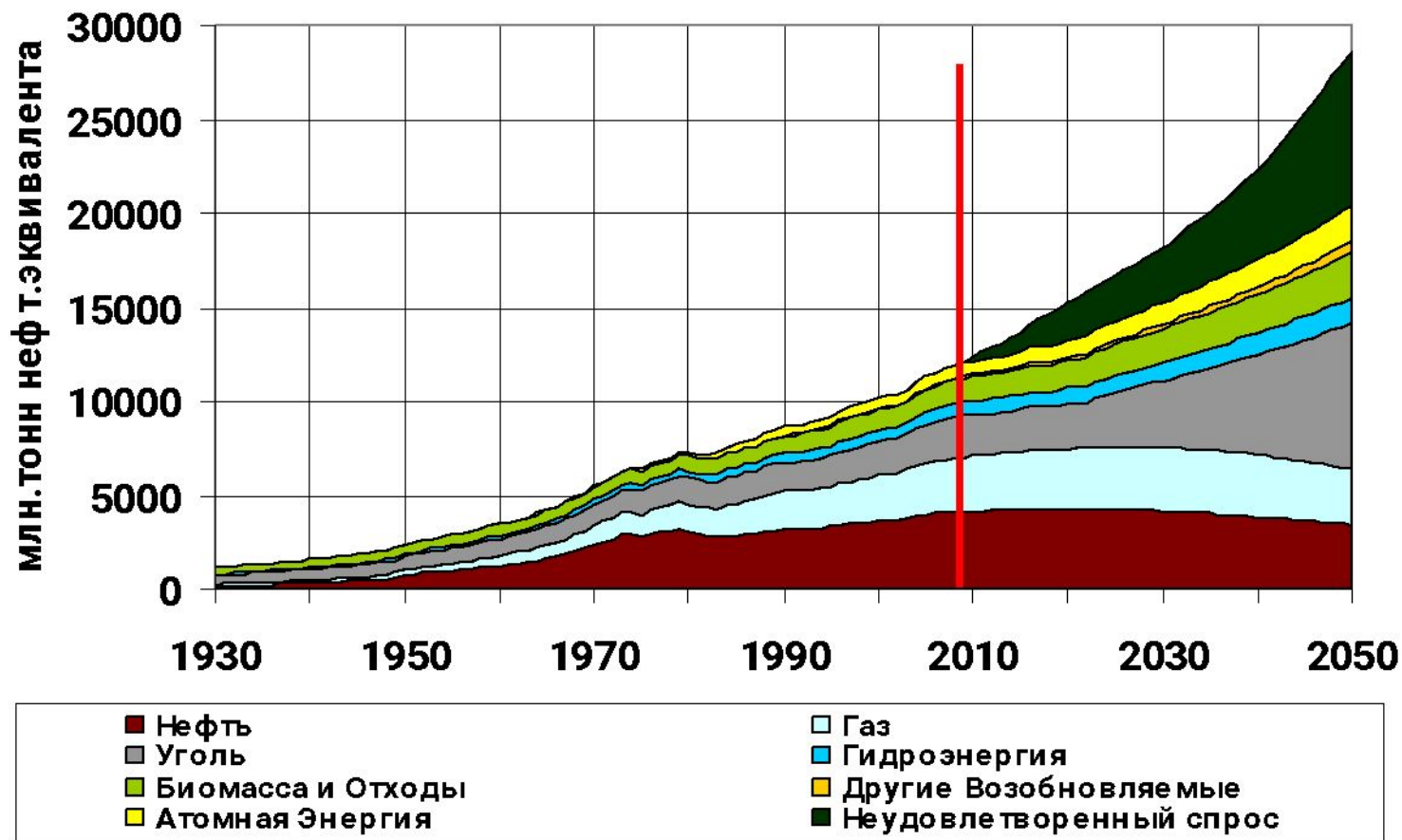
## Ресурсы топлива на Земле \*)

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	—	—	$\sim 3 \cdot 10^4$	$\sim 2 \cdot 10^{22}$ $\sim 5 \cdot 10^{23}$	$\sim 2 \cdot 10^{22}$ $\sim 2 \cdot 10^{23}$	$\sim 50$ $\sim 500$
$n + U \rightarrow \text{фрагменты} + 200 \text{ МэВ}$	$^{238}U$	$4 \cdot 10^{-6}$	$1.5 \cdot 10^{-9}$	$0.82 \cdot 10^{11}$	$\sim 3 \cdot 10^{28}$	$\sim 10^{24}$	$\sim 2000$
$n + Th \rightarrow \text{фрагменты} + 200 \text{ МэВ}$	$^{232}Th$	$10^{-5}$	$< 5 \cdot 10^{-10}$	$0.82 \cdot 10^{11}$	$\sim 8 \cdot 10^{28}$	$\sim 3 \cdot 10^{24}$	$\sim 6000$
$d + d \begin{cases} \rightarrow {}^3He + n + 3.3 \text{ МэВ} \\ \rightarrow t + p + 4.0 \text{ МэВ} \end{cases}$	$d$	$1.5 \cdot 10^{-6}$	$1.6 \cdot 10^{-5}$	$0.9 \cdot 10^{11}$	$\sim 2 \cdot 10^{30}$	?	?
$d + t \rightarrow {}^4He + n + 17.6 \text{ МэВ}$	${}^6Li$	$5 \cdot 10^{-5}$	$10^{-7}$	$2.9 \cdot 10^{11}$	$\sim 10^{30}$	?	?
$d + {}^3He \rightarrow {}^4He + p + 18.3 \text{ МэВ}$	${}^3He$	$7.3 \cdot 10^{-19}$	—	$4.9 \cdot 10^{11}$	$\sim 10^{15}$	?	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.

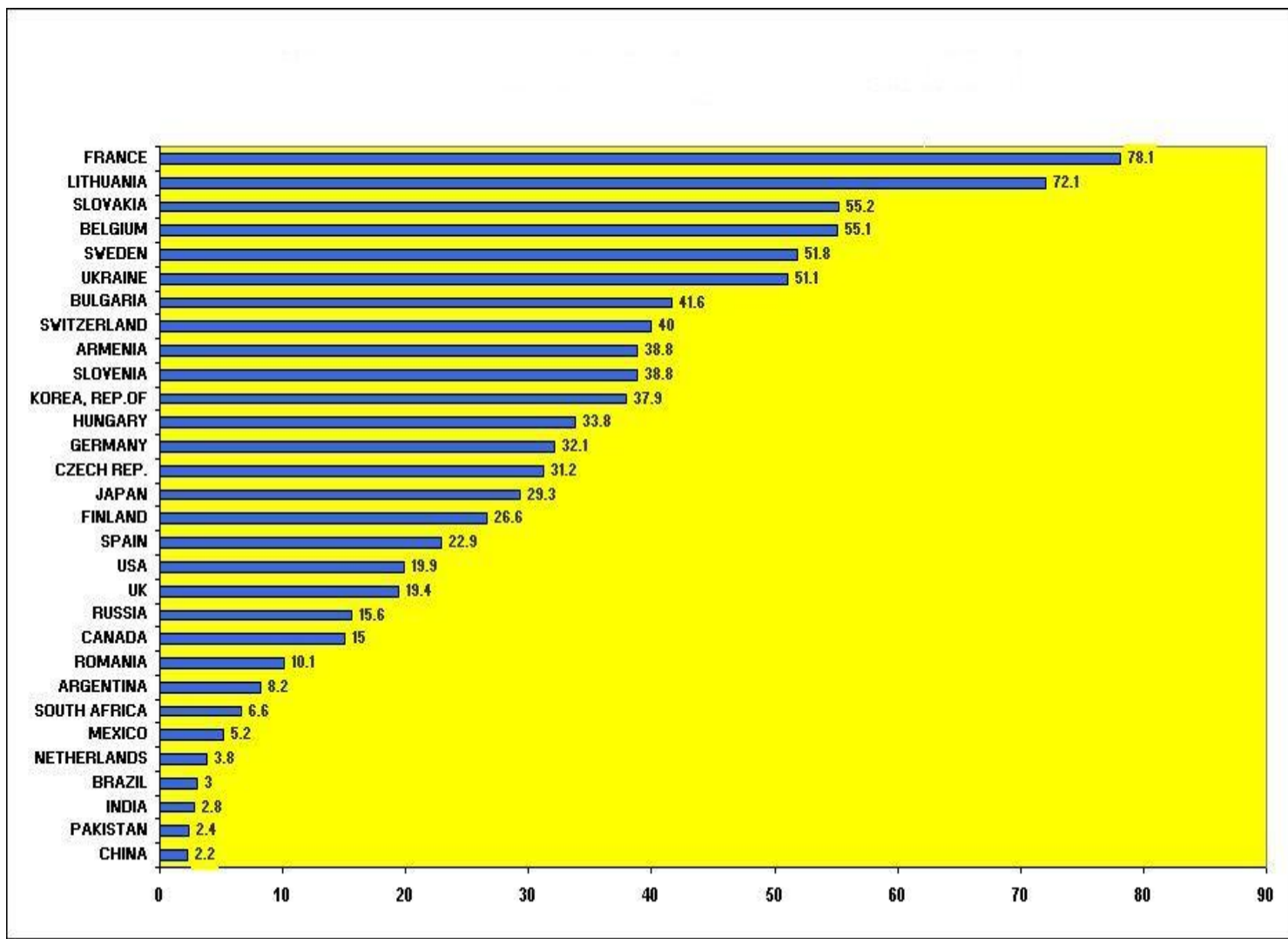
~ **16%** электричества.

# 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.

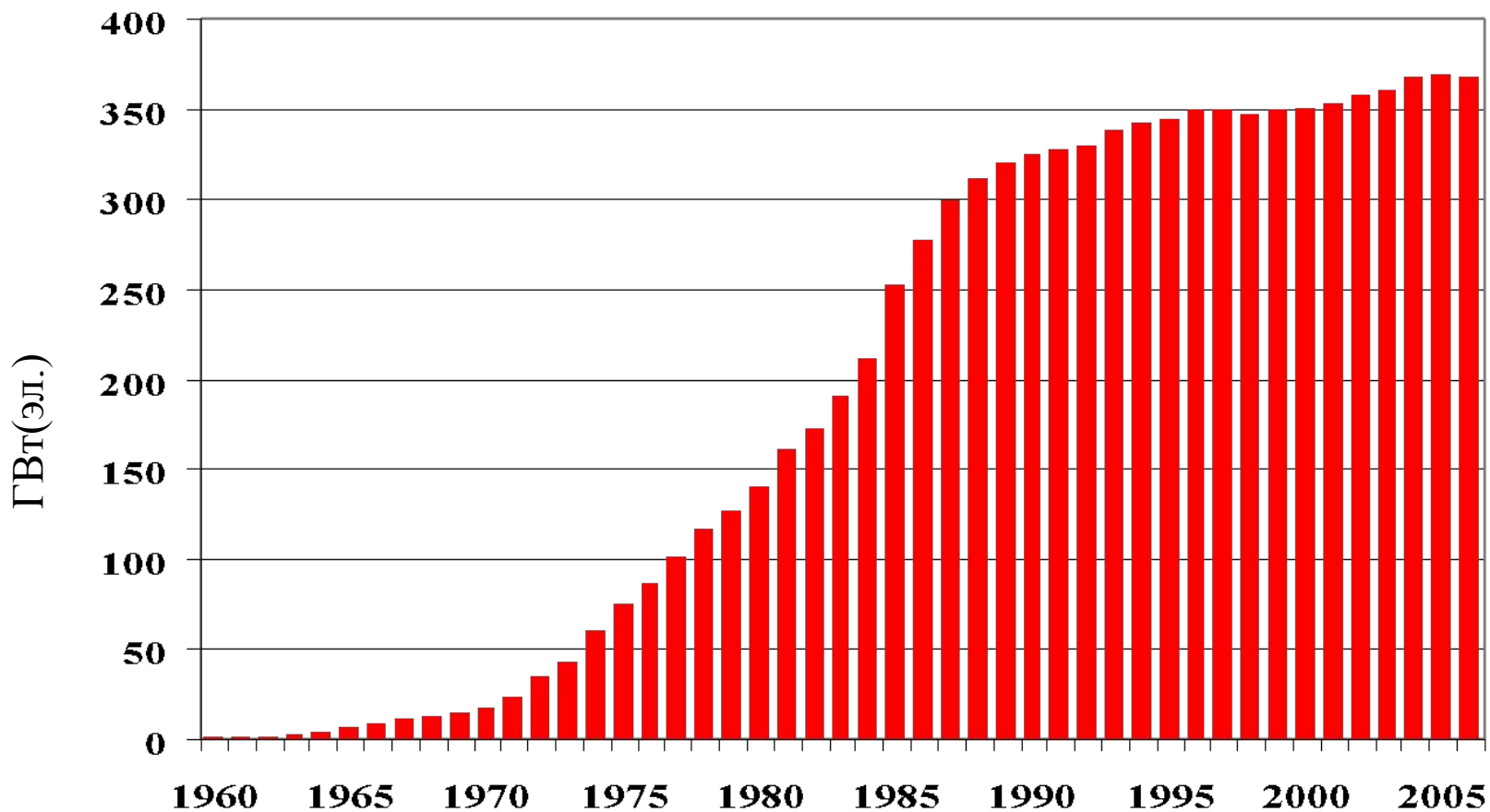


# Доля ядерной энергии в производстве электроэнергии в 2004 году

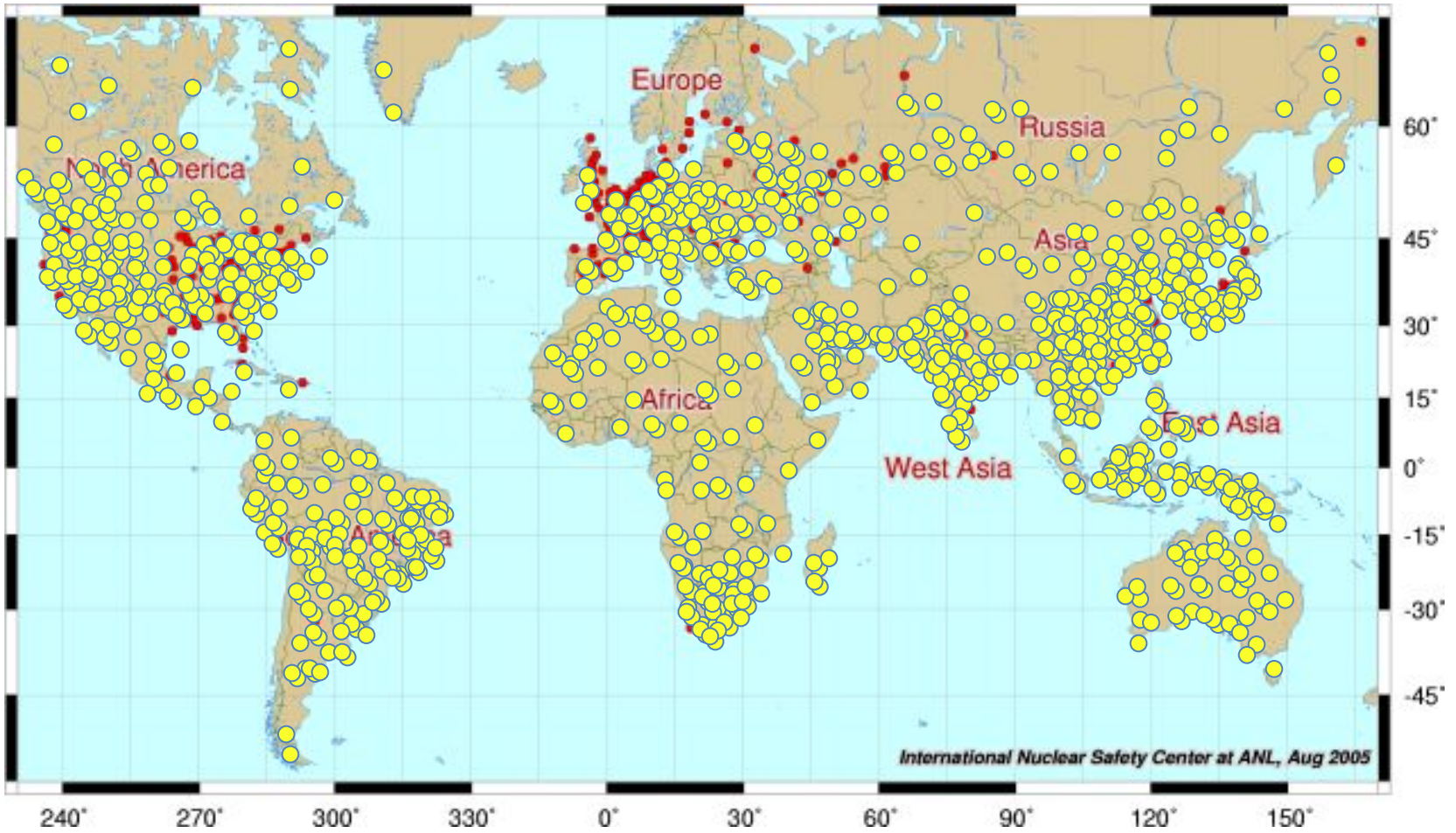


## Динамика роста мощностей АЭ в мире :

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



# Reactors Start to Spread in Waves



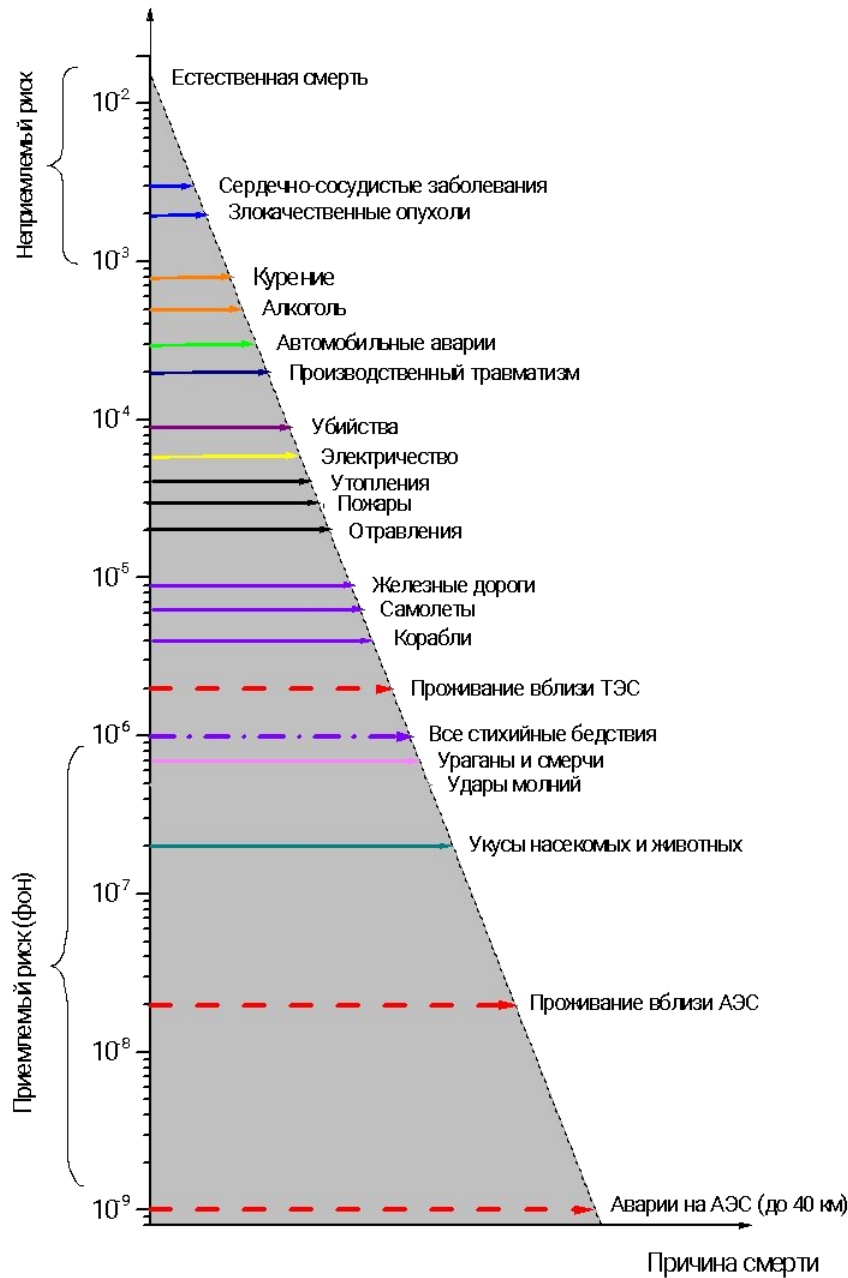


**ТЭЦ**



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

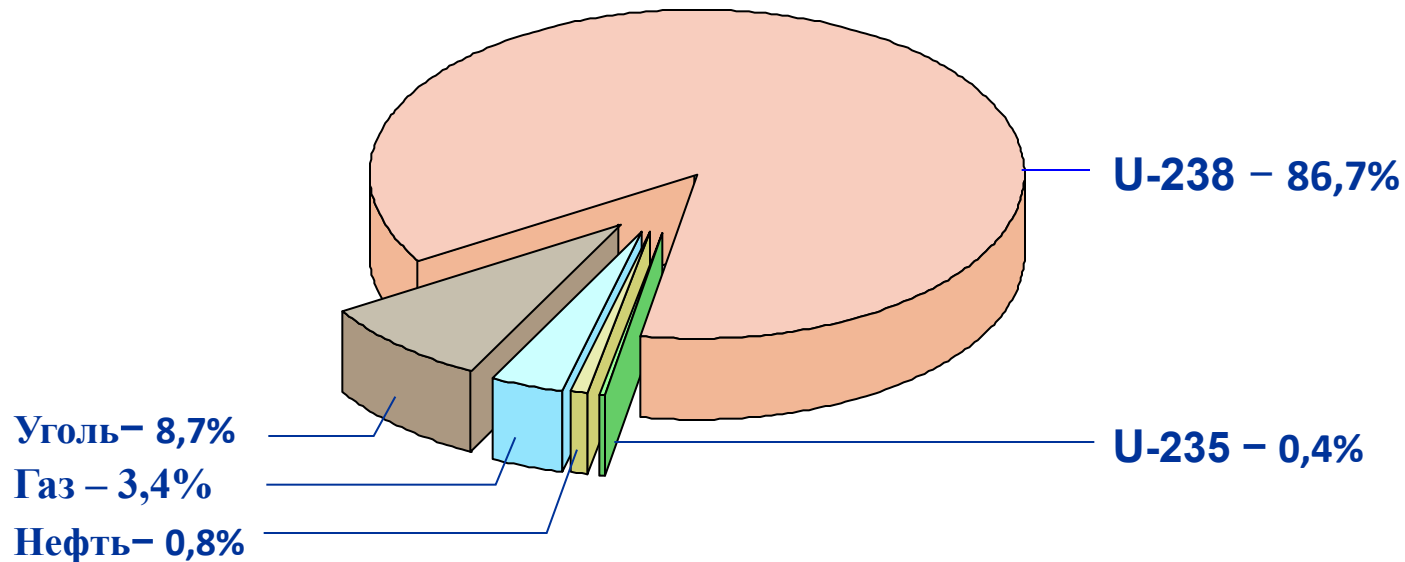
Нефть

Газ

Ядра – деление

Ядра – синтез

**СОЛНЦЕ**



# Ресурсы $^{235}\text{U}$

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

# Сравнение ТР и БР

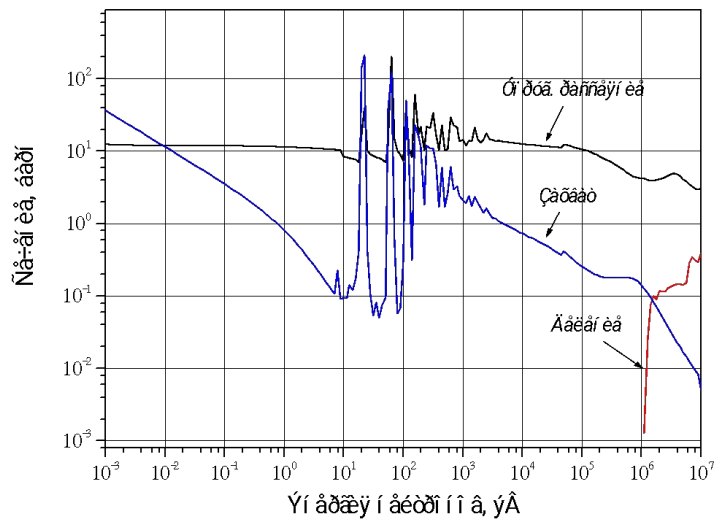
Изото п	$E_n = 0,025\text{эВ}$				$E_n = 2\text{ МэВ}$			
	$\nu$	$\alpha$	$\eta$	$\delta$	$\nu$	$\alpha$	$\eta$	$\delta_0$
$^{235}\text{U}$	2,42	0,167	2,07	1,07	2,67	0,047	2,55	1,55
$^{238}\text{U}$	-	$\sim 10^5$	$\sim 10^{-5}$	-	2,64	0,107	2,38	1,38
$^{239}\text{Pu}$	2,88	0,358	2,12	1,12	3,18	0,011	3,15	2,15
Нат. U	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

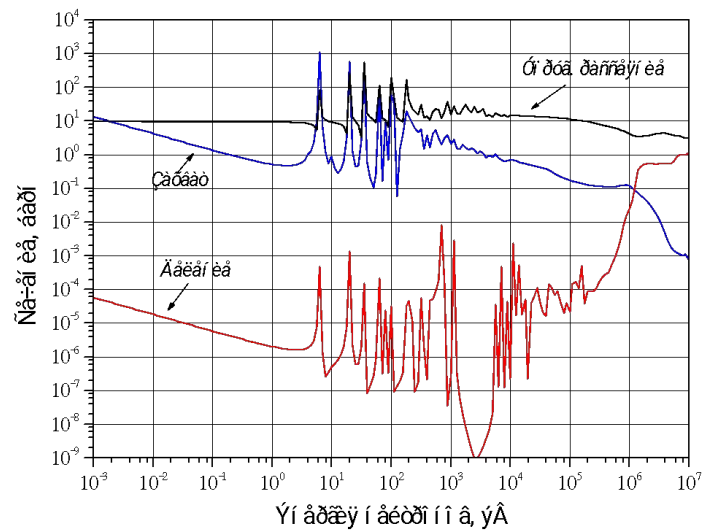
# Параметры Th-U и U-Pu циклов

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

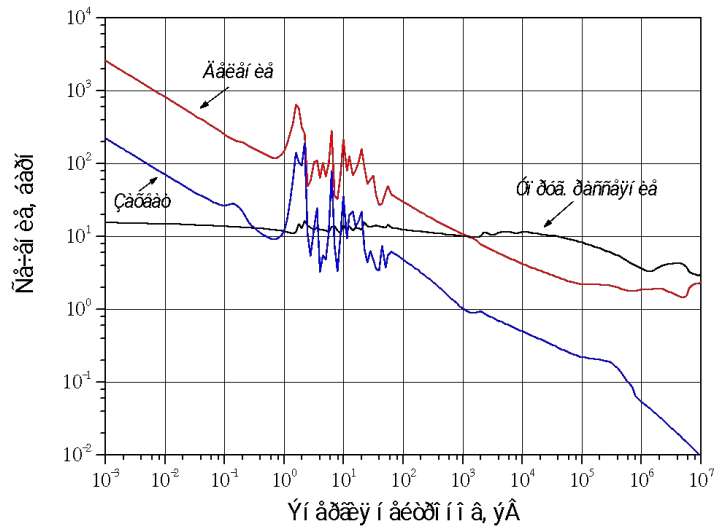
Th-232



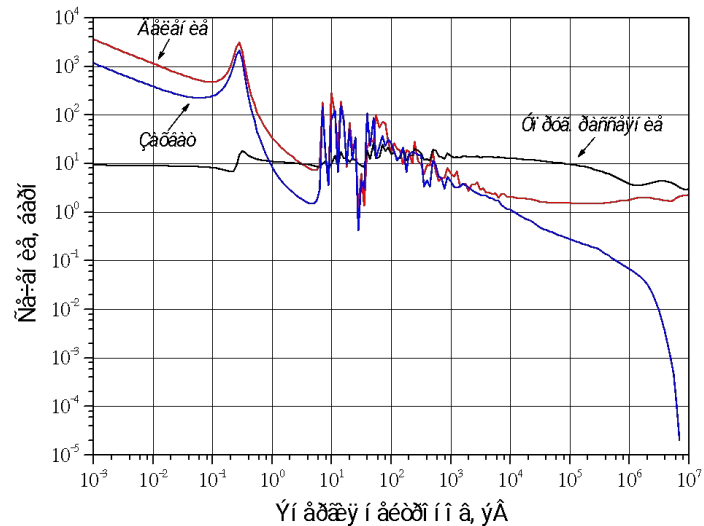
U-238



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

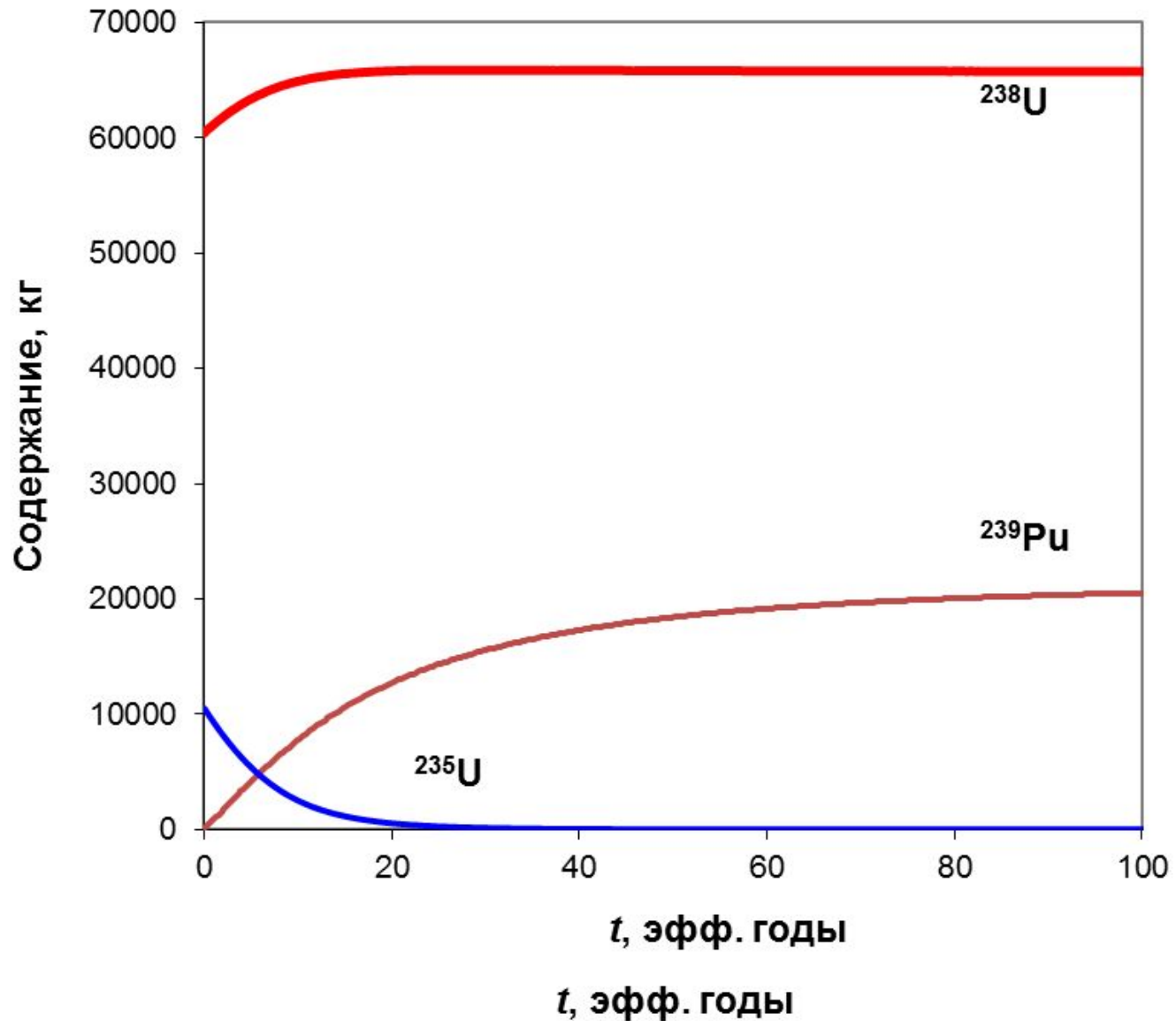
# Равновесный режим

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

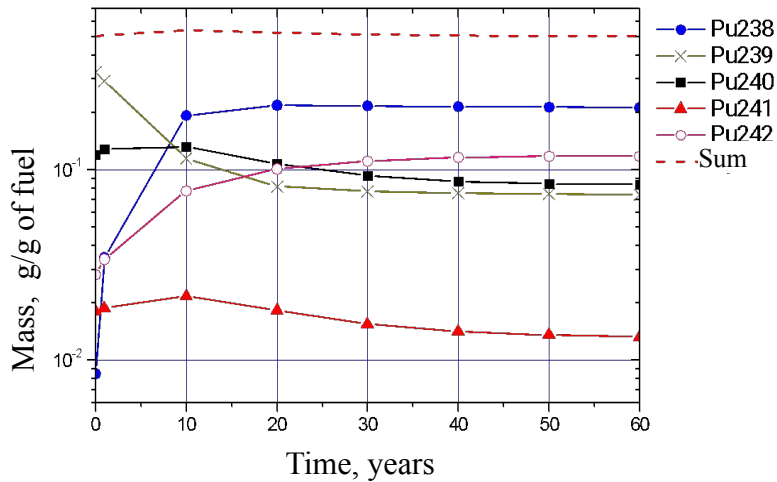
Такой режим достигается при составе топлива  
 $\sim 10\% \text{Pu-239} + 90\% \text{U-238}$  или  $\sim 15\% \text{U-235} + 85\% \text{U-238}$

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

# Выход в равновесный режим

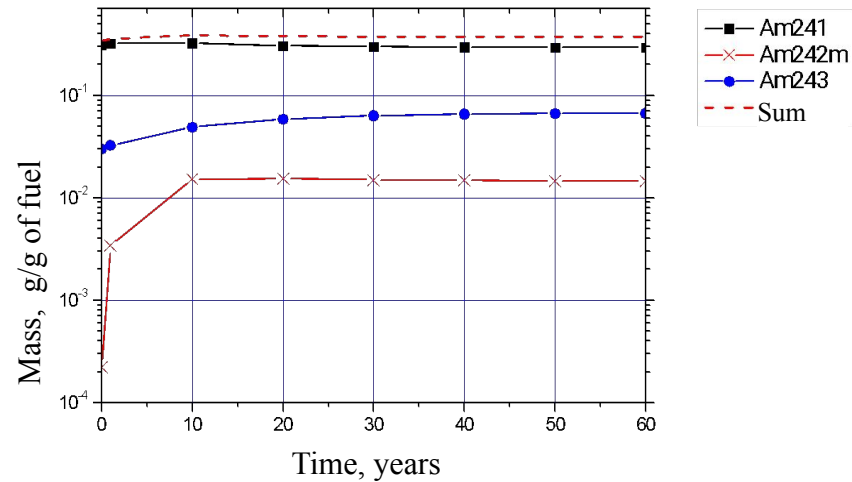


### Pu



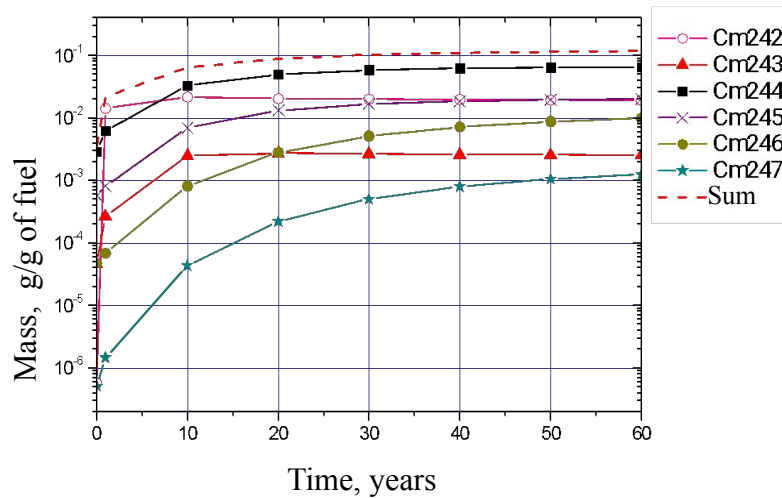
Dynamics of *Pu* isotopes accumulation

### 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

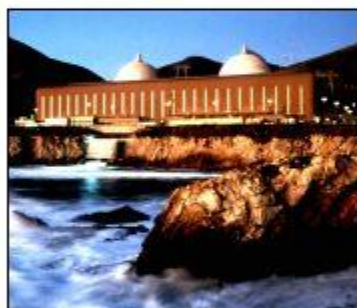
Early Prototype Reactors



- 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

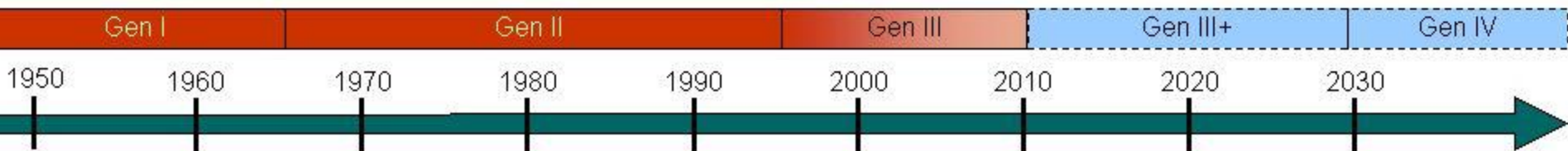
Near-Term Deployment

Generation III+ Evolutionary Designs Offering Improved Economics

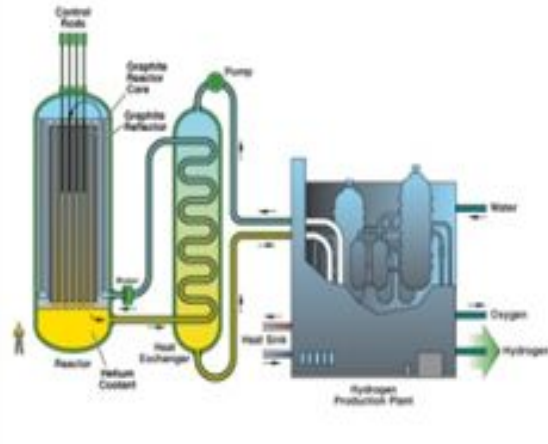
.....

## Generation IV

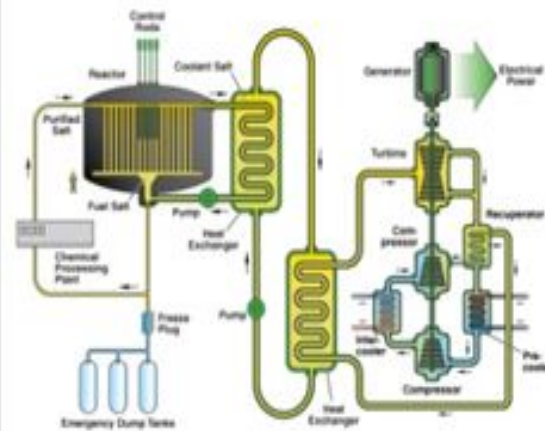
- Highly Economical
- Enhanced Safety
- Minimal Waste
- Proliferation Resistant



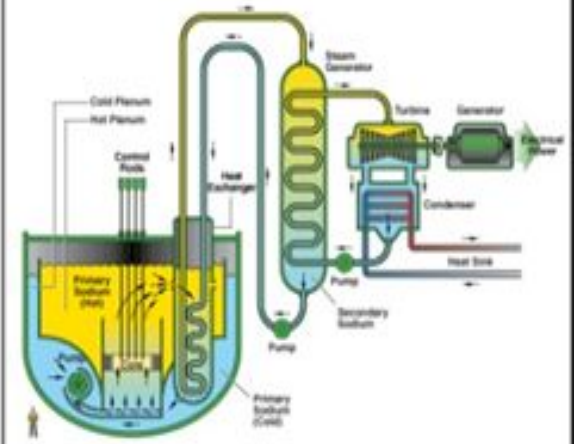
## Very-High-Temperature Reactor



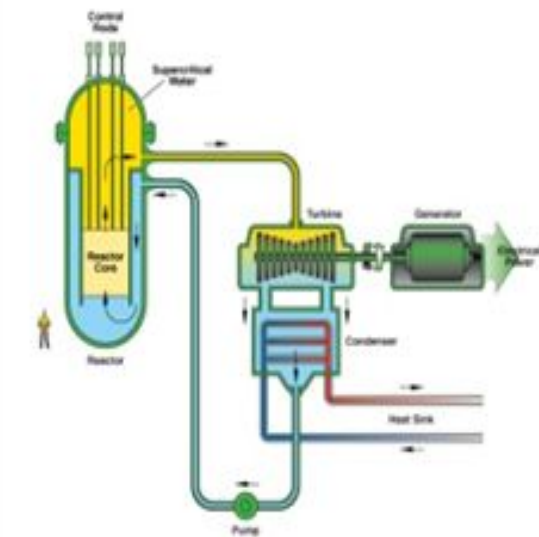
## Molten Salt Reactor



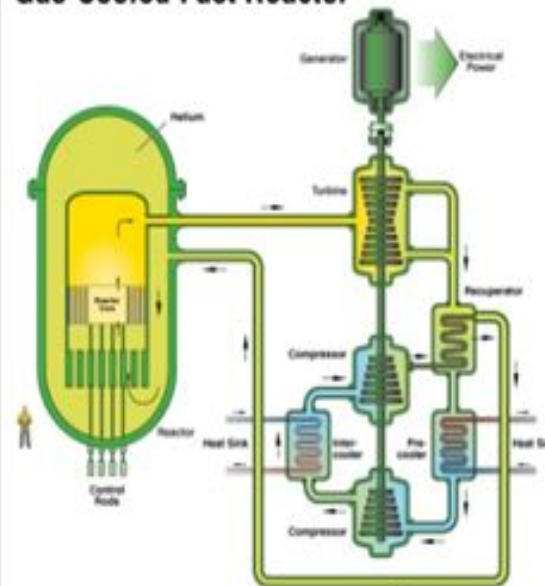
## Sodium-Cooled-Fast Reactor



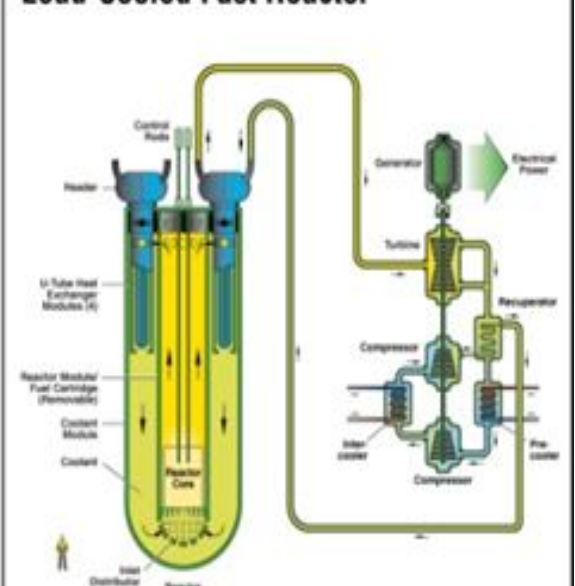
## Supercritical-Water-Cooled Reactor



## 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
<b>INHERENT SAFETY</b>							
<b>AMBIENT PRESSURE</b>	NO	NO	YES	NO	YES	YES	NO
<b>MELTDOWN RESISTANT FUELS</b>	NO	YES	YES	YES	YES	YES	YES
<b>SAFE COOLANT*</b>	YES	YES	YES	NO	NO	NO	YES