

Кислицын А.А. Ядерная и термоядерная энергетика

Часть 1. Ядерная энергетика

Отношение к атомной энергетике неоднозначно, есть аргументы за и против. Мы рассмотрим различные аспекты проблемы:

Как устроены и как работают ядерные реакторы на медленных и на быстрых нейтронах; в чем заключаются их преимущества и недостатки, в том числе с точки зрения безопасности;

Какова роль атомной энергетики в развитых странах;

Каковы перспективы развития термоядерной энергетики.

Основные природные источники энергии

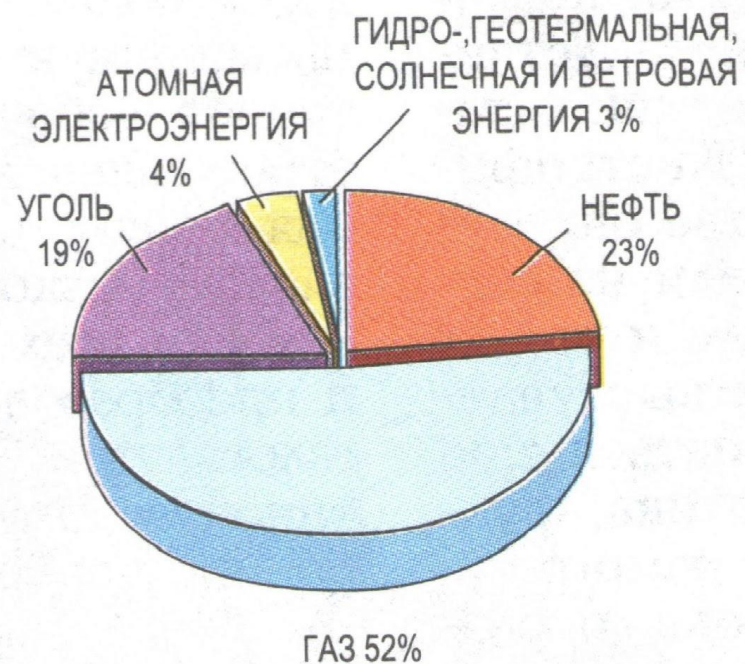


СТРУКТУРА ПОТРЕБЛЕНИЯ ЭНЕРГОРЕСУРСОВ

Мир

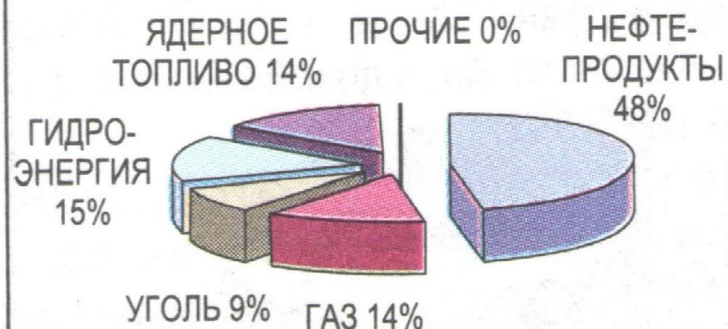


Россия

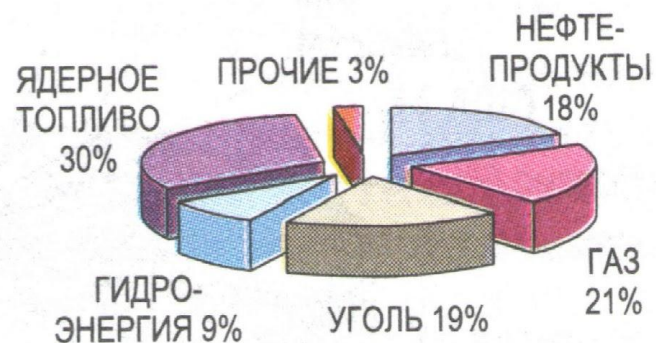


СТРУКТУРА ЭНЕРГОПОТРЕБЛЕНИЯ В ЯПОНИИ И ВО ФРАНЦИИ

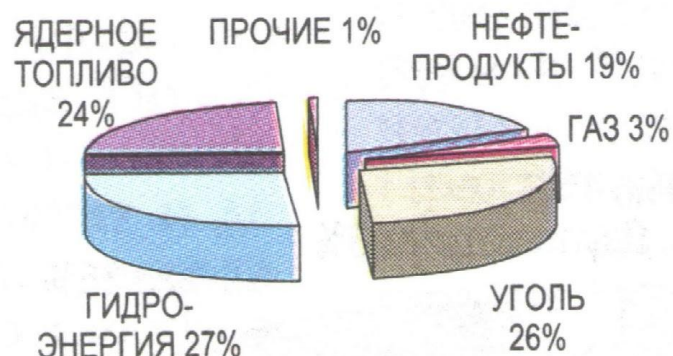
Япония, 1980 г.



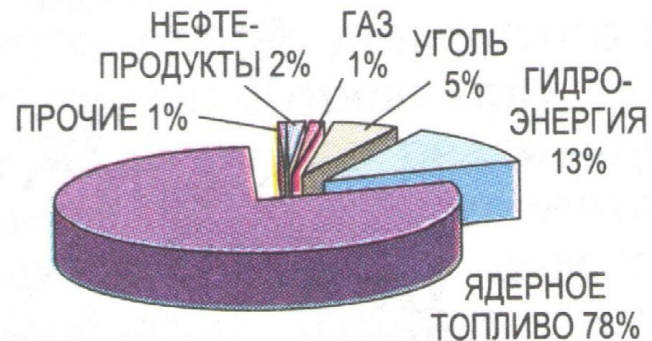
Япония, 2000 г.



Франция, 1980 г.

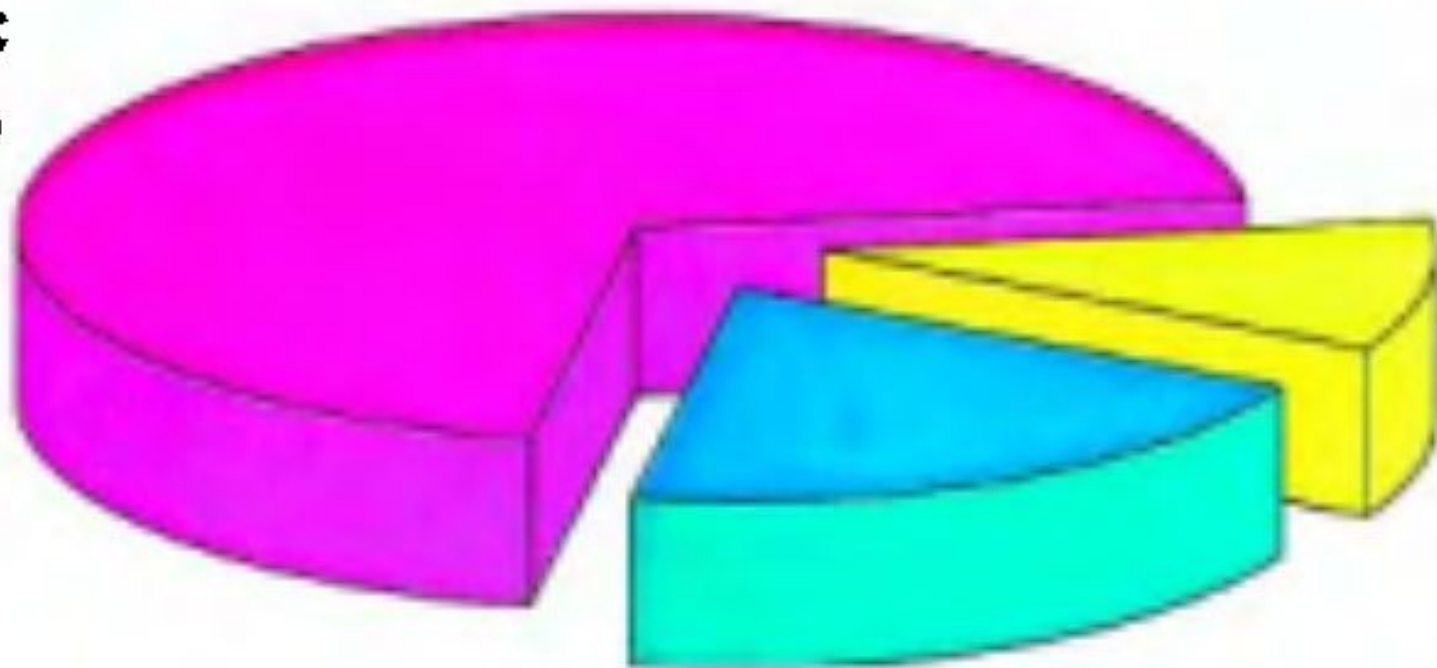


Франция, 2000 г.



Структура производства электроэнергии на электростанциях России

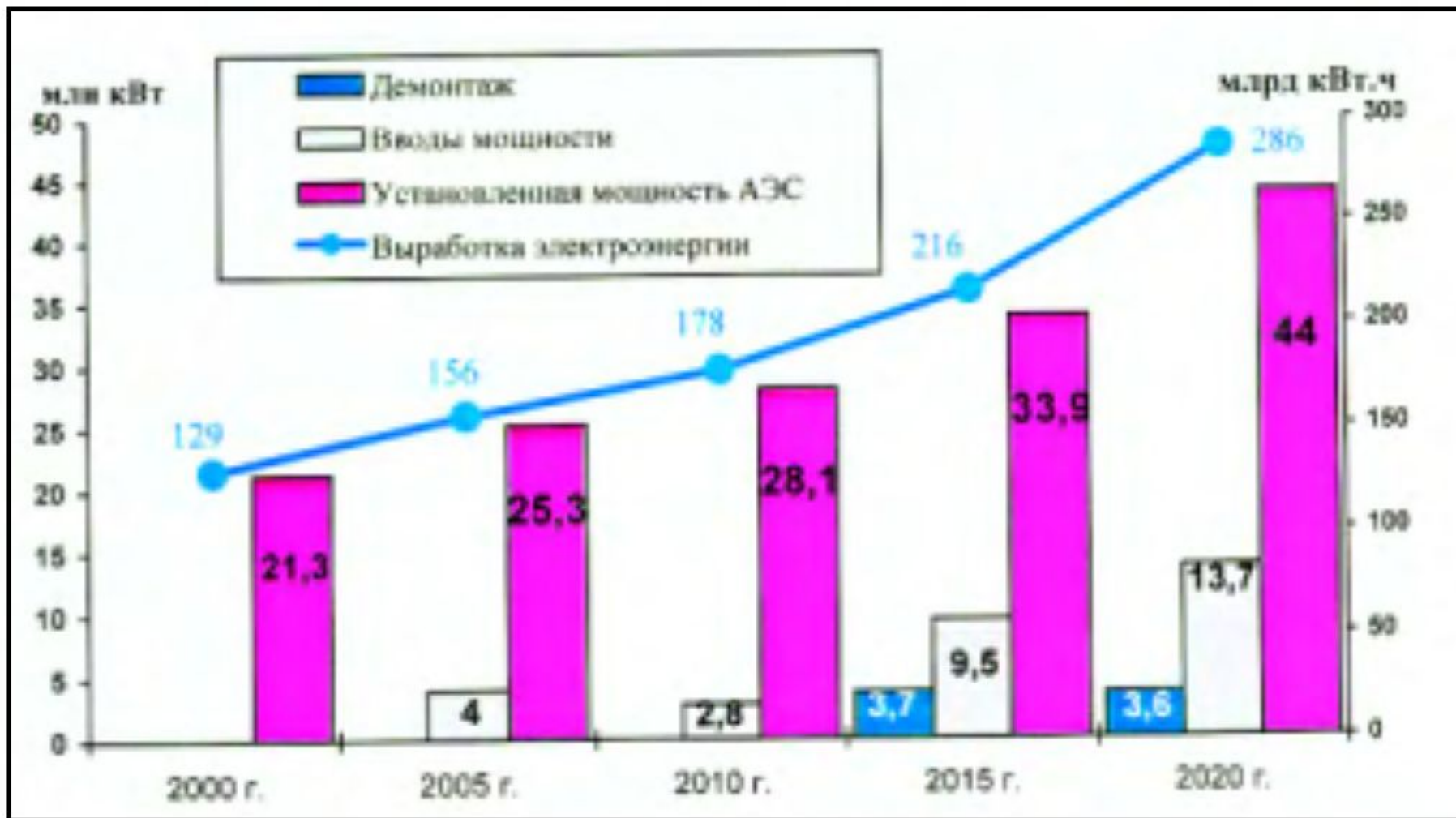
ТЭС
67%



АЭС
15%

ГЭС
19%

Развитие атомной энергетики в России



Деление тяжелых ядер нейтронами

Эта реакция состоит в том, что тяжелое ядро, поглотив нейтрон, делится на 2 (редко на 3 или 4) обычно неравных по массе осколка. При этом выделяется ок. 200 Мэв энергии и испускаются 2-3 нейтрона (в среднем 27 нейтронов на 10 ядер).

Для справки: электрон-вольт: $1 \text{ Эв} = 1.6 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}$

$1 \text{ Мэв} = 1\,000\,000 \text{ Эв} = 1.6 \cdot 10^{-13} \text{ Дж}$

Некоторые тяжелые ядра делятся нейтронами любых энергий, начиная с нулевых. Это изотопы:



Важнейшим свойством является образование 2-3 нейтронов при делении каждого ядра. Эти нейтроны могут вызвать деление новых ядер, при этом образуются новые нейтроны и т.д. Это **самоподдерживающаяся цепная реакция деления.**

Активная зона и ее характеристики

Среда, в которой идет самоподдерживающаяся цепная реакция деления, называется **активной зоной**. Важнейшей характеристикой активной зоны является коэффициент размножения нейтронов: отношение количества нейтронов в некотором "поколении" к их количеству в предыдущем "поколении":

$$k = N_i / N_{i-1}$$

Под "сменой поколения" понимается поглощение всех "старых" нейтронов и рождение новых нейтронов в результате деления ядер.

Таким образом, если в некотором поколении было N нейтронов, то в n -ом поколении их будет Nk^n . При $k < 1$ реакция гаснет, а при $k > 1$ нарастает. Время жизни одного поколения нейтронов составляет от 10^{-5} до 10^{-7} секунды. Поэтому, например, при $k = 1.01$ число нейтронов и интенсивность реакции уже через 1 миллисекунду возрастет в 1000 раз, т.е. почти мгновенно произойдет взрыв. Для стационарной реакции необходимо поддерживать $k = 1$ с очень высокой точностью, такой режим наз. критическим.

Коэффициент размножения активной зоны можно представить в виде:

$$k = k_0 \cdot P,$$

где k_0 - коэффициент размножения бесконечной среды (т.е. если бы активная зона имела бесконечно большие размеры), P - вероятность того, что нейтрон не вылетит за пределы активной зоны, не произведя реакции деления. Очевидно, P всегда меньше 1. Поэтому цепная реакция деления может идти только при $k_0 > 1$. Например, для смеси естественного урана и графита, которая применялась в первых ядерных реакторах, $k_0 = 1.08$.

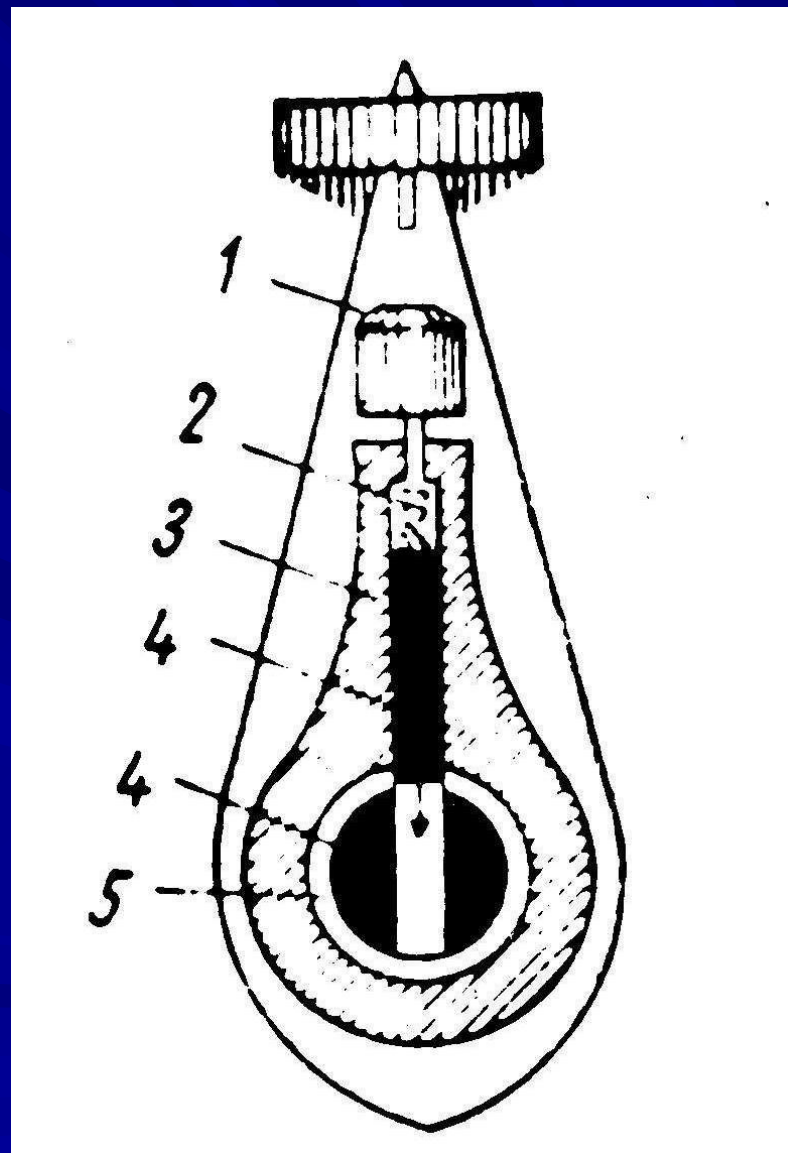
Критическая масса

Множитель P увеличивается при увеличении размеров активной зоны. Размер, при котором коэффициент размножения равен 1, наз. критическим размером, а масса активной зоны критических размеров наз. **критической массой**.

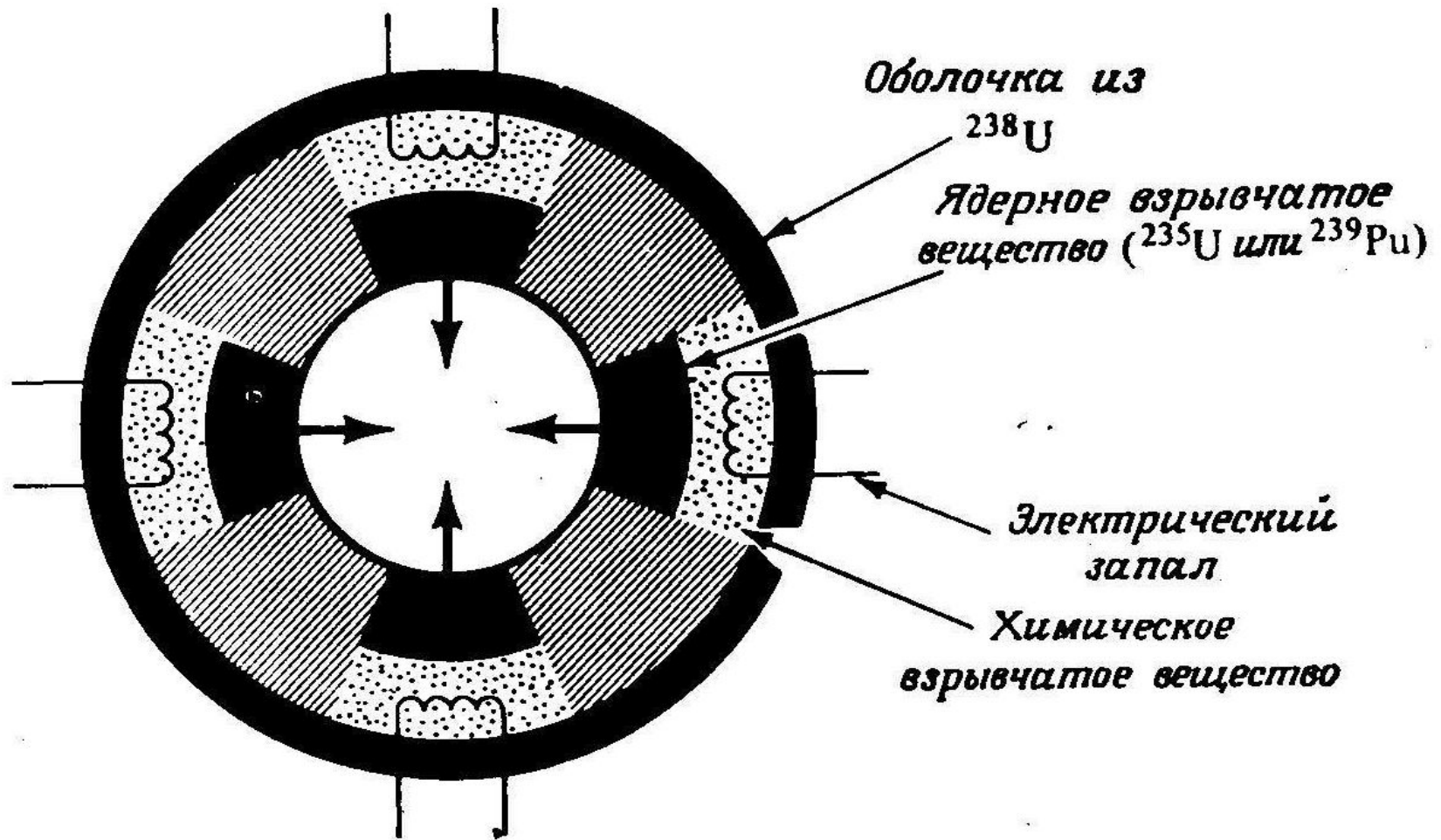
Критическая масса меняется в очень широких пределах в зависимости от формы и конструкции активной зоны. Например, для $^{235}\text{U}_{92}$ она может иметь значения от 240г до 47 кг (шар диаметром от 3 до 17 см).

Устройство атомной бомбы

- 1 - взрывное устройство,
- 2 - взрывчатое вещество (обычное) для быстрого сближения частей ядерного заряда),
- 3 - оболочка,
- 4 - части ядерного заряда, образующие при соединении критическую массу,
- 5 - отражатель нейтронов.



Другой вариант конструкции атомной бомбы



Устройство атомной бомбы.

Классификация нейтронов по энергиям

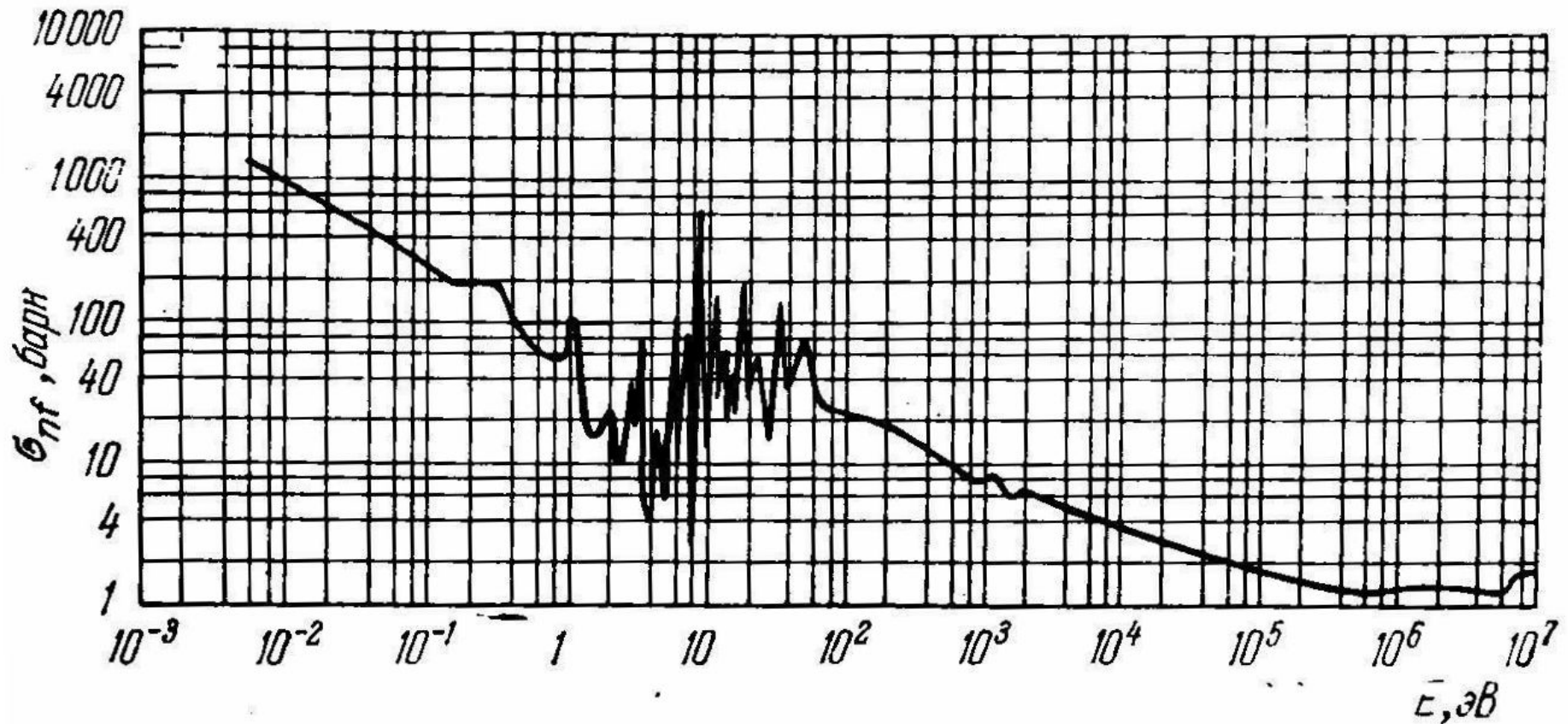
- Быстрые нейтроны: $T > 100$ кэВ,
- Промежуточные нейтроны: $1 \text{ кэВ} < T < 100 \text{ кэВ}$,
- Медленные нейтроны: $T < 1$ кэВ.

Медленные нейтроны подразделяются на:

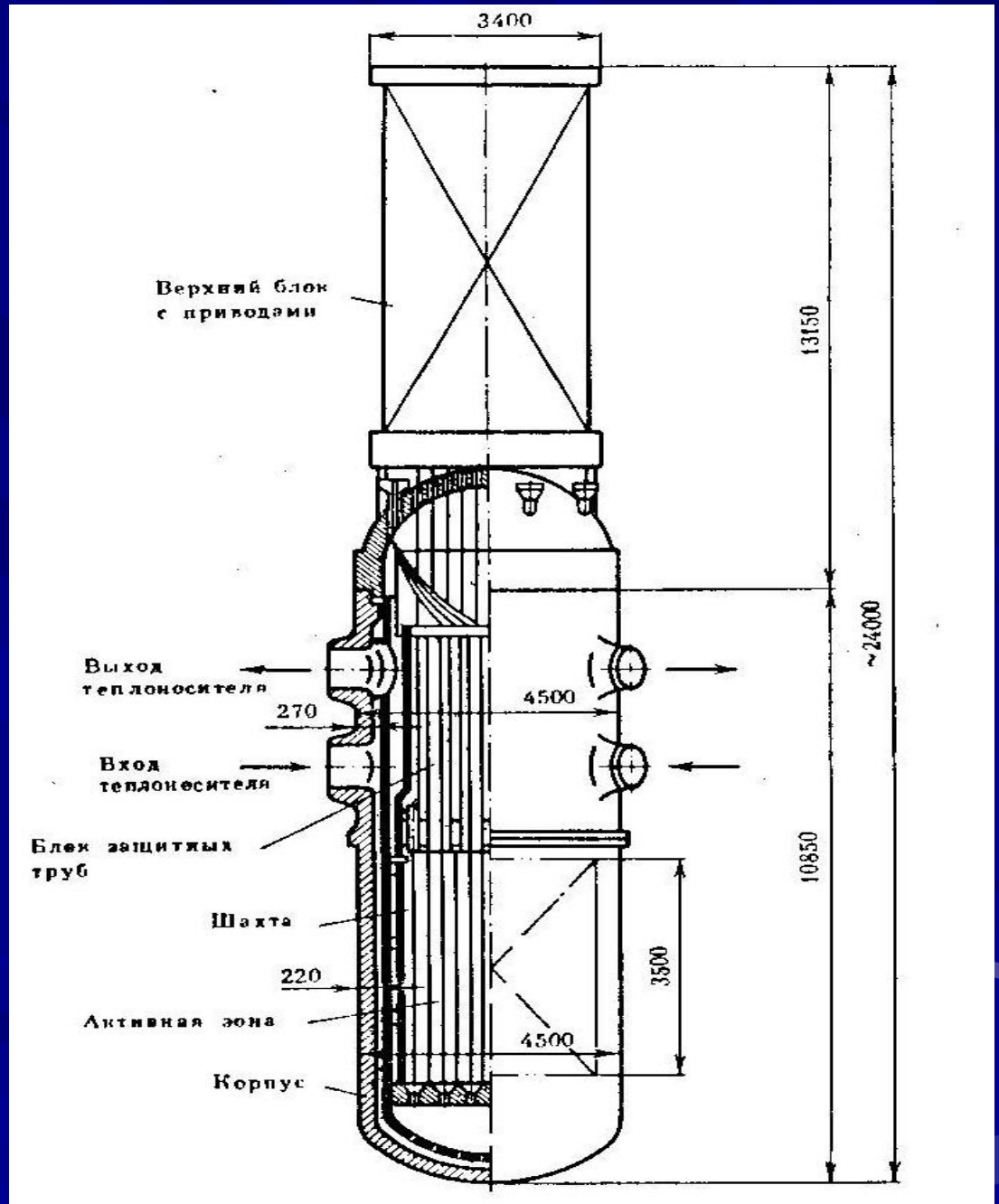
- резонансные: $0.5 \text{ эВ} < T < 1 \text{ кэВ}$,
- тепловые: $0.025 \text{ эВ} < T < 0.5 \text{ эВ}$,
- холодные: $3 \cdot 10^{-7} \text{ эВ} < T < 0.025 \text{ эВ}$,
- ультрахолодные: $T < 3 \cdot 10^{-7} \text{ эВ}$.

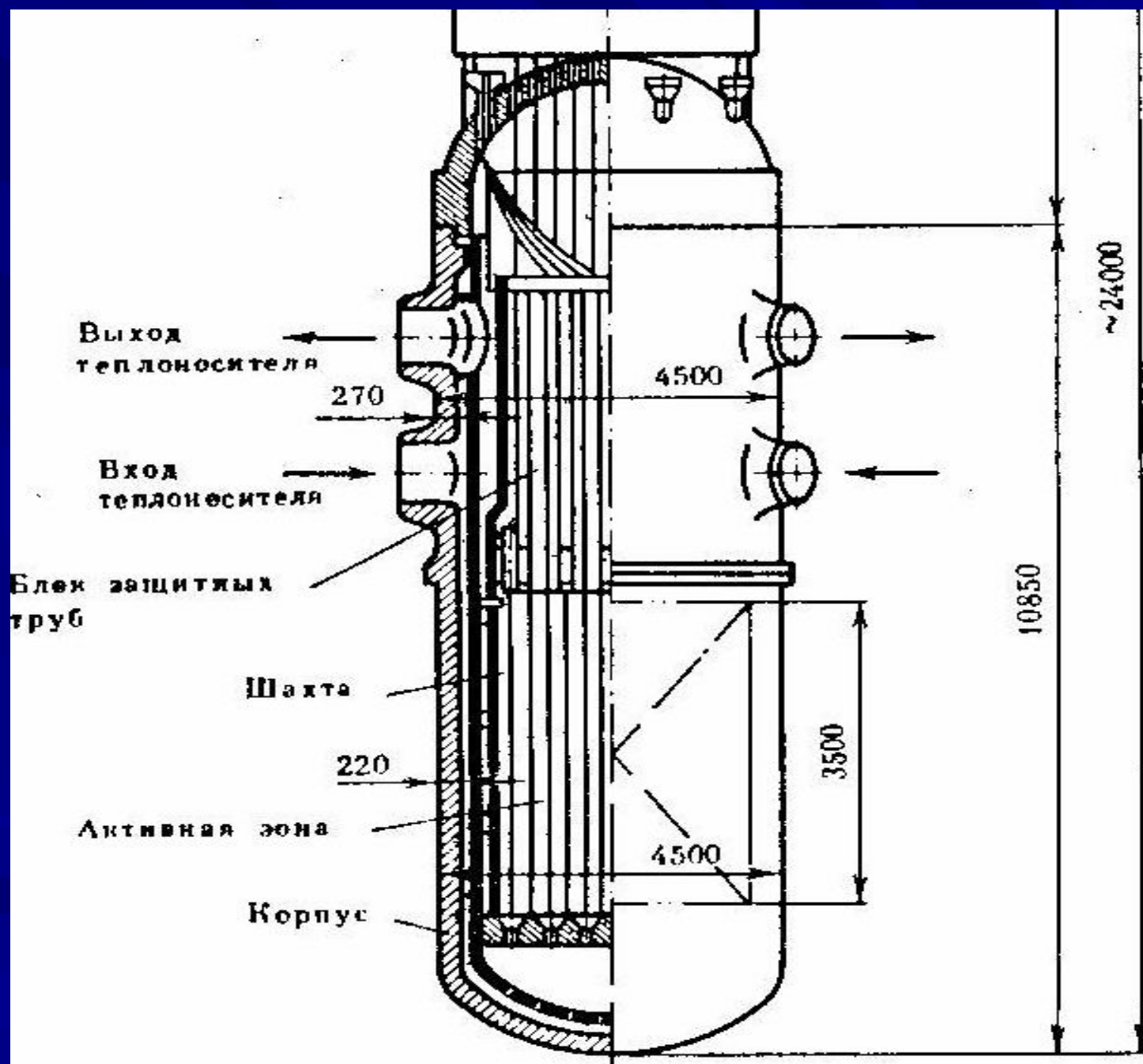
Название "тепловые нейтроны" связано с тем, что энергия 0.025 эВ соответствует комнатной температуре 300 К .

Сечение реакции деления ядер урана-235 в зависимости от энергии нейтронов

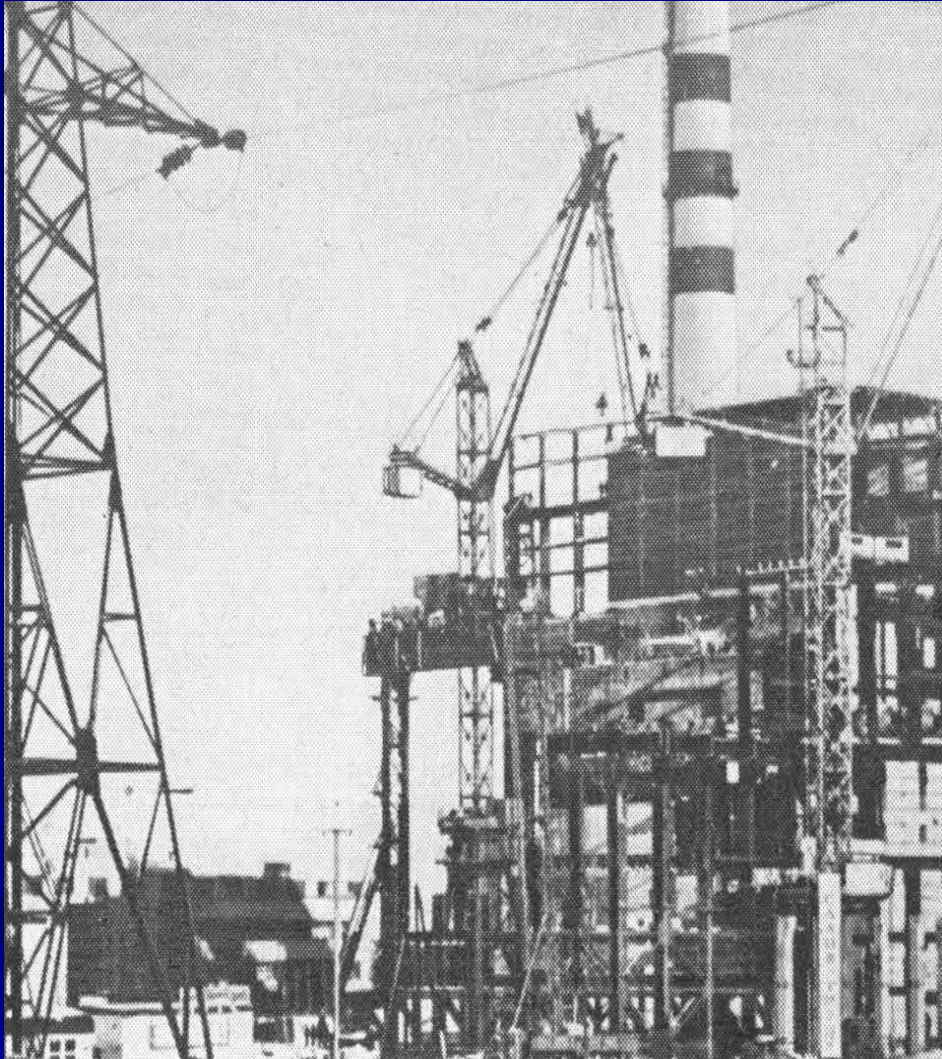


Реактор
ВВЭР-1000
Зарубежные
аналоги:
PWR
и
BWR

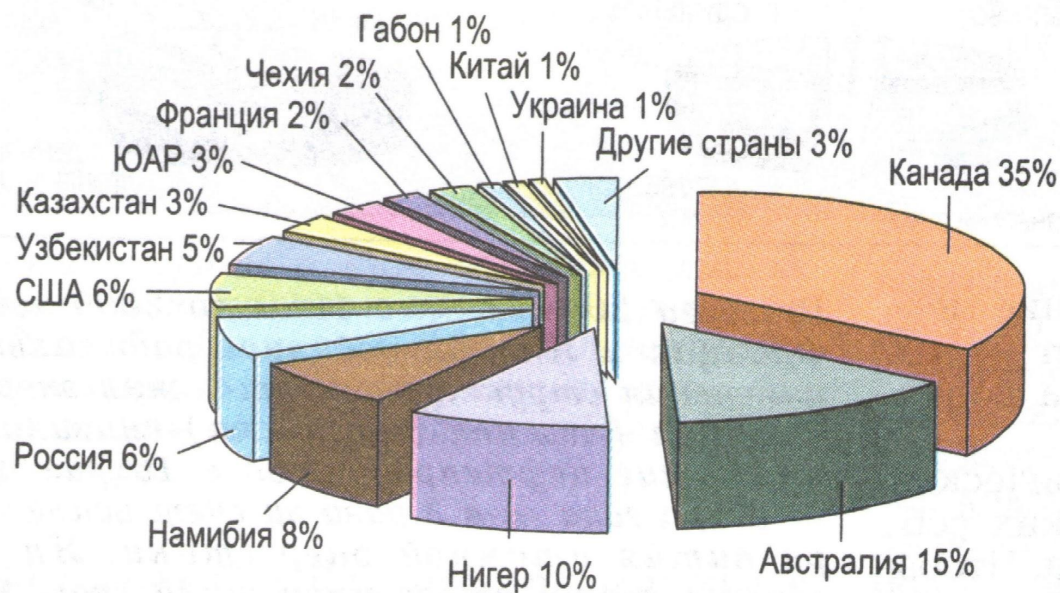
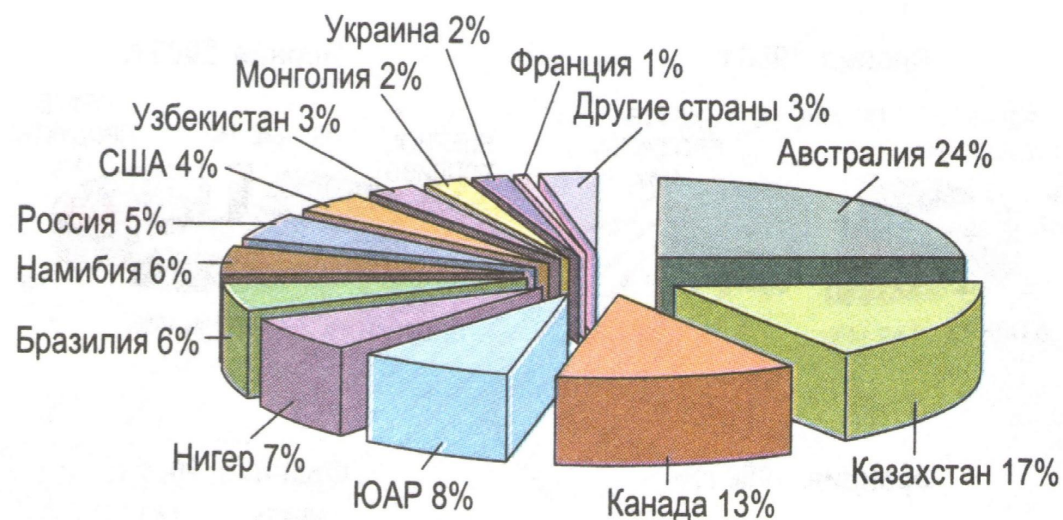




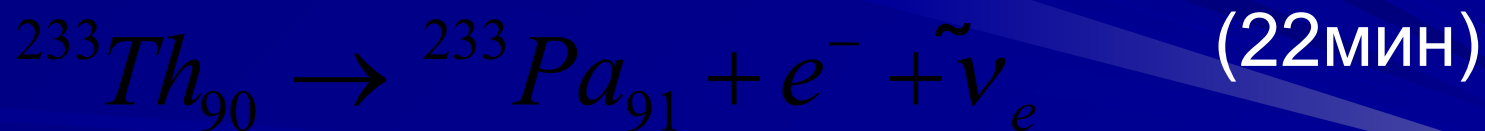
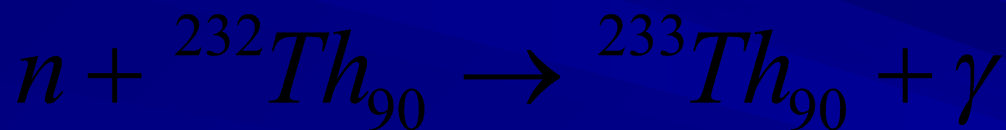
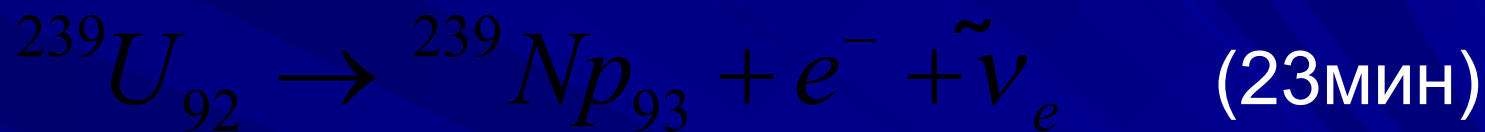
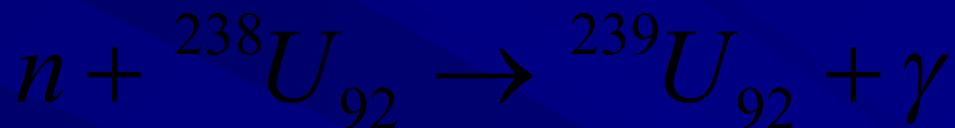
Реактор водо-графитовый кипящий канальный типа РБМК-1000



МИРОВЫЕ ЗАПАСЫ И ПРОИЗВОДСТВО УРАНА



Наиболее важные нейтроноядерные реакции



Реактор на быстрых нейтронах

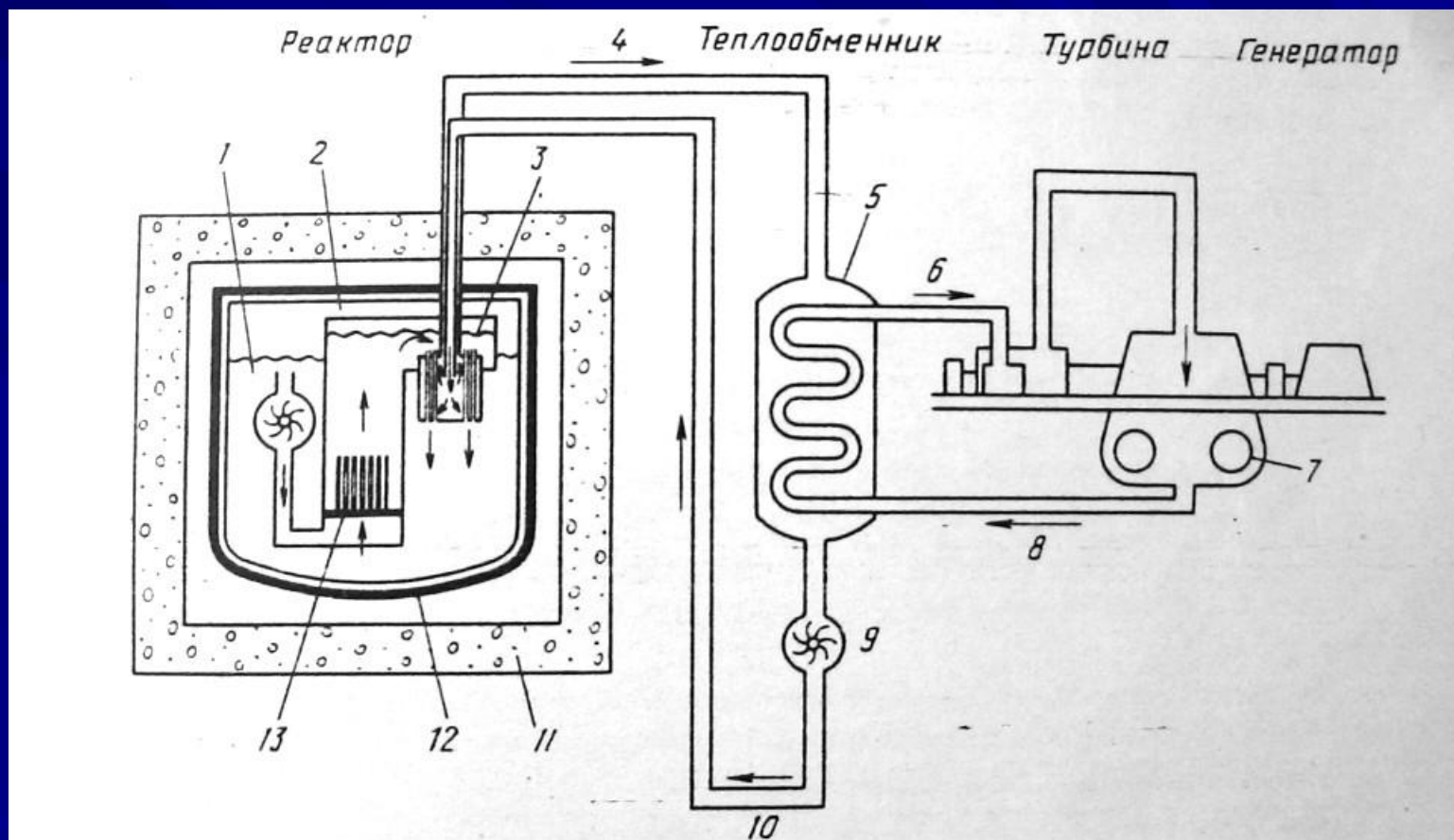
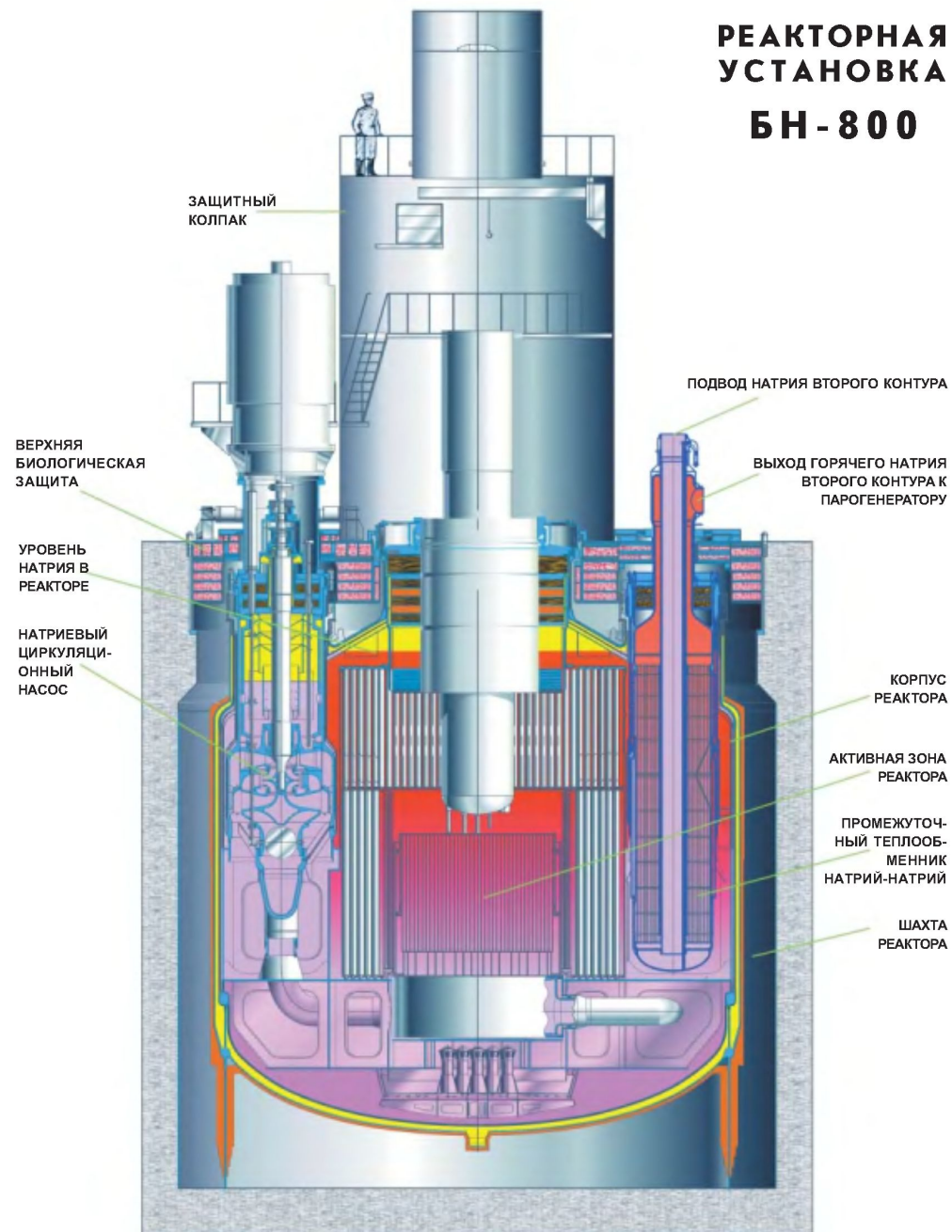


Рис. 7.2. Принципиальная схема реактора на быстрых нейтронах с жидкометаллическим теплоносителем:

1 – насос первого контура; 2 – кожух реактора; 3 – промежуточный теплообменник; 4 – канал с горячим натрием; 5 – теплообменник "натрий-вода"; 6 – пар; 7 – конденсатор; 8 – вода; 9 – насос; 10 – канал с холодным натрием; 11 – бетонная защита; 12 – корпус реактора; 13 – активная зона

Реактор на
быстрых
нейтронах
БН-800 имеет
электри-
ческую
мощность
880 МВт,
тепловую
мощность
1.47 ГВт.



Белоярская АЭС



10 декабря 2015 года энергоблок Белоярской АЭС с реактором на быстрых нейтронах БН-800 включен в сеть и выработал первую электроэнергию в энергосистему Урала.

Физико-технические параметры безопасности

Параметр	ВВЭР, PWR, BWR	РБМК	БН
Пустотный коэфф. ре- активности	Отрица- тельный	Положи- тельный	Положи- тельный
Используй- вание горючих веществ	нет	1700 т графита	1800 т жидкого натрия
Давление в теплообмен- ном контуре	До 160 атм	65 атм	10 атм

Физико-технические параметры безопасности

Параметр	ВВЭР, PWR, BWR	РБМК	БН
Степень обогащения топлива	2 - 5%	2 - 3%	20 - 30%
Плотность энерговыде- ления в ак- тивной зоне	40 – 100 кВт/л	15 - 20 кВт/л	500 – 1000 кВт/л
Опыт экс- плуатации (реакторо- лет)	Более 10000	Ок. 100	Ок. 60



ОТХОДЫ ИСПОЛЬЗОВАННОГО ТОПЛИВА

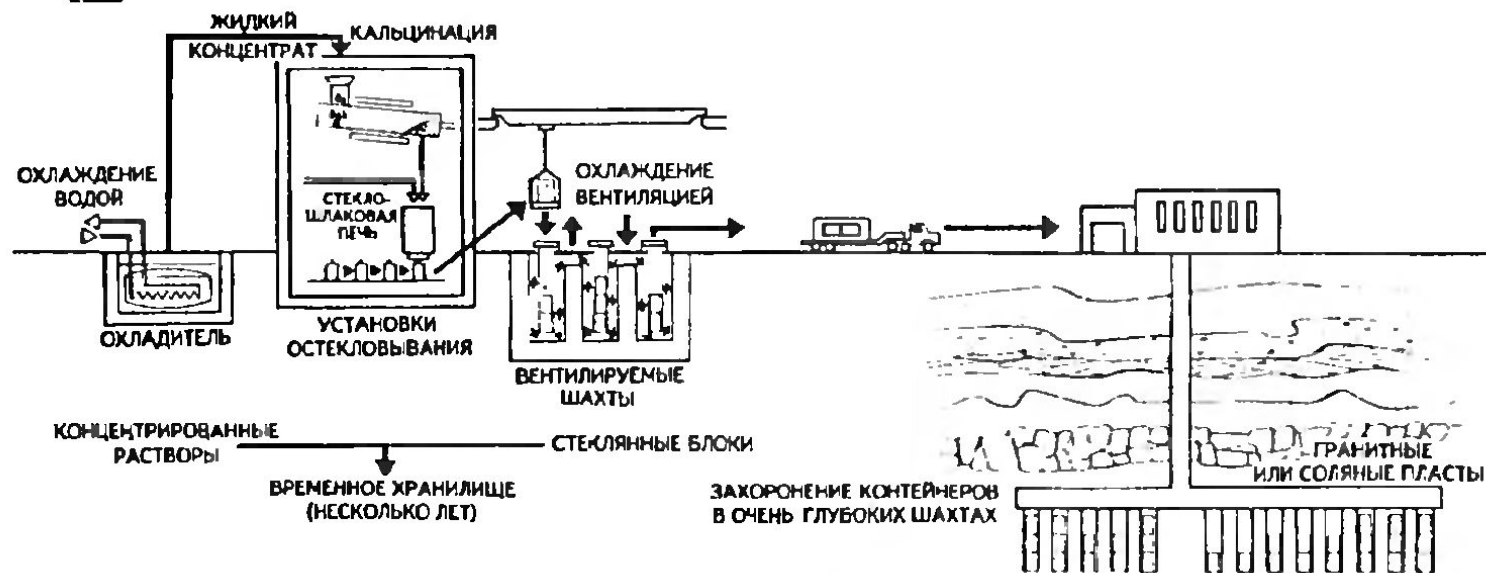


Схема утилизации использованного топлива. Радиоактивные отходы остекловывают (жидкие отходы предварительно кальцинируют, т.е. удаляют воду). Остеклованные отходы не крошатся, не размываются, имеют малый объем. Их заключают в стальные контейнеры и помещают в глубокие шахты в геологически стабильных районах.

Конец 1-й части