

**ЗАМКНУТЫЙ ТОПЛИВНЫЙ  
ЦИКЛ  
И РЕАКТОРЫ НА БЫСТРЫХ  
НЕЙТРОНАХ**

# Дефект массы

$$\Delta M = M_{\text{исх}} - M_{\text{прод}},$$

$$E = mc^2$$

1 акт деления  $\rightarrow$  200 МэВ,  
1 акт сгорания угля  $\rightarrow$  4 эВ.  
Разница = 50 млн.

---

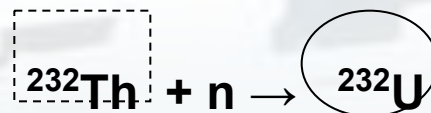
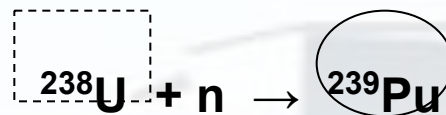
1 г U  $\approx$  600 кг угля.

# Ядерное топливо и сырьё воспроизводства

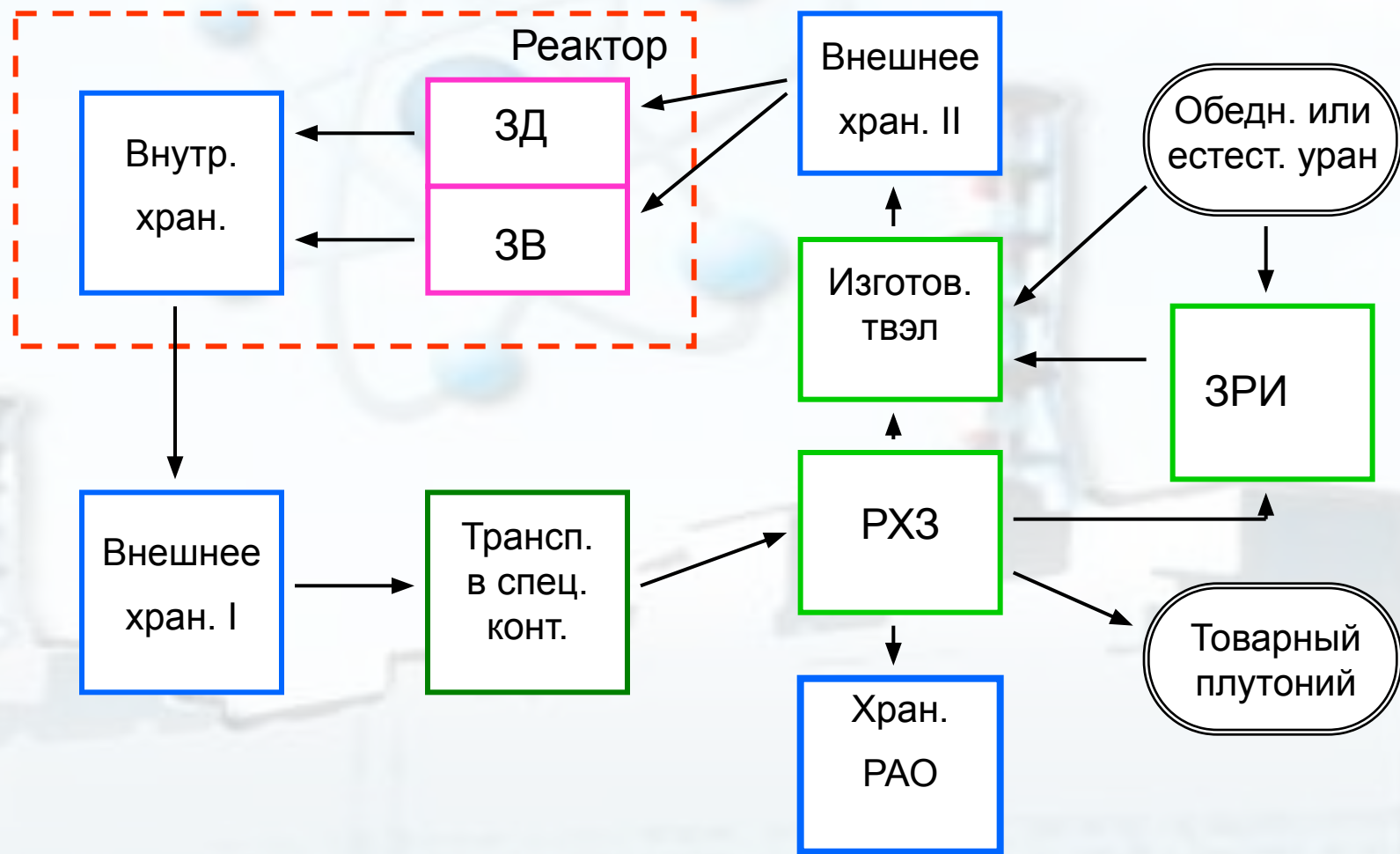
$^{238}\text{U}$  – 99,282 %, 

$^{235}\text{U}$  – 0,712 %, 

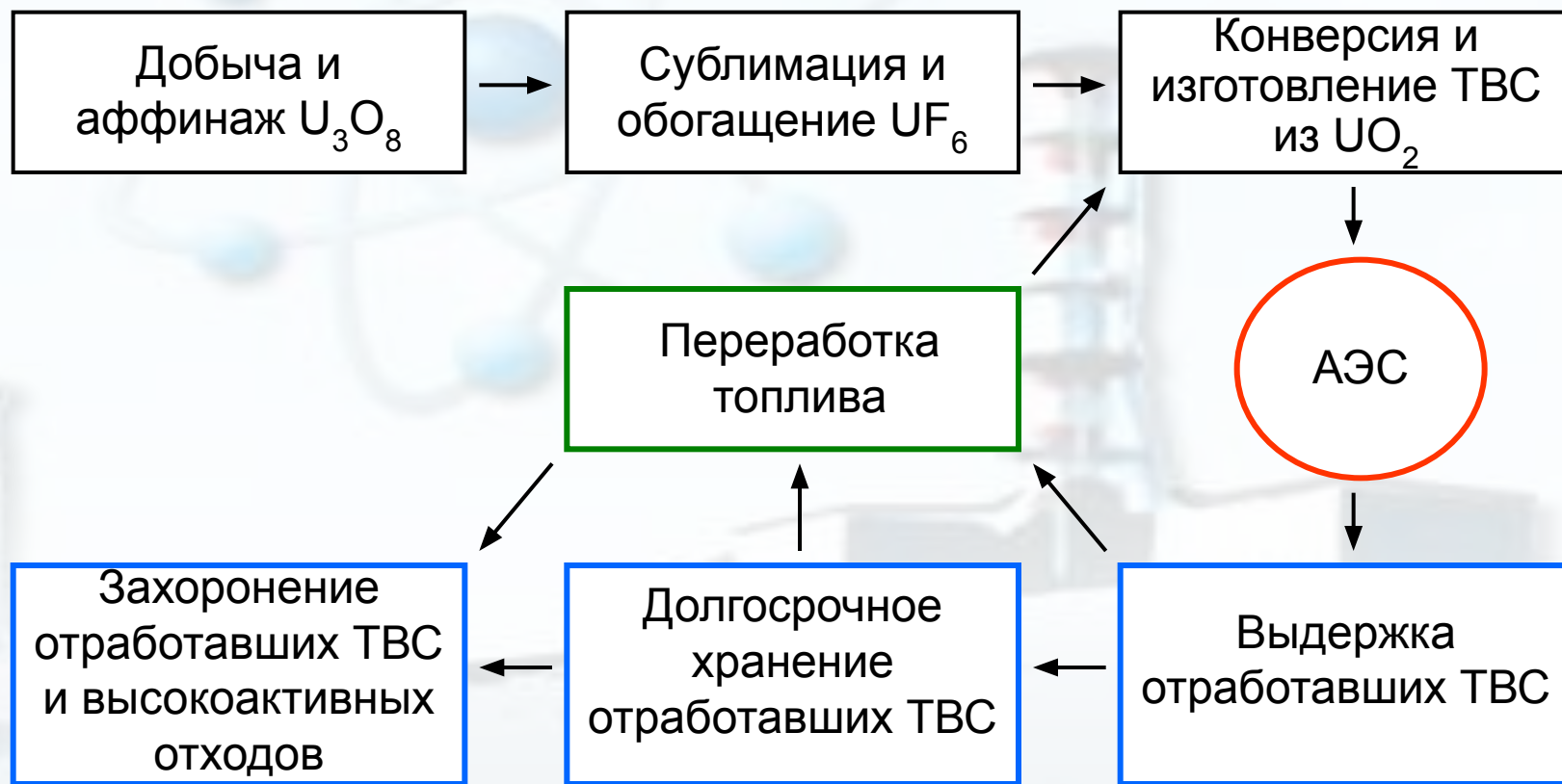
$^{234}\text{U}$  – 0,006 %.



# Схема движения топлива в замкнутом топливном цикле с быстрыми реакторами



# Ядерный топливный цикл



# Национальные ядерные топливные циклы

| Страна         | Добыча | Конверсия | Обогащение | Изготовление ТВС | Переработка отработавшего топлива |
|----------------|--------|-----------|------------|------------------|-----------------------------------|
| Россия         | 1, 2   | 1         | 1          | 1                | 1                                 |
| США            | 1, 3   | 1, 3      | 1, 3       | 1, 2, 3          | –                                 |
| Франция        | 2, 3   | 1, 3      | 1          | 1, 2, 3          | 1                                 |
| Канада         | 1      | 1         | –          | 1                | –                                 |
| Великобритания | 2, 3   | 1         | 1, 2       | 1, 3             | 1                                 |
| Германия       | –      | –         | 1, 2       | 1, 2, 3          | 3                                 |
| Япония         | 3      | –         | 1, 3       | 1, 3             | 1, 2, 3                           |
| Южная Корея    | 3      | 1         | 3          | 1, 3             | –                                 |
| Украина        | 1      | –         | –          | 3                | 3                                 |
| Индия          | 1      | 1         | –          | 1                | 1                                 |

*Примечание:* 1 – собственное производство; 2 – предприятия на иностранной территории с полным или частичным владением; 3 – доставка из-за рубежа.

# Обогащение урана

| Страна                                     | Фирма, организация | Метод            | Производительность, млн е.р.р./год |
|--|--------------------|------------------|------------------------------------|
| США  | USEC Inc.          | Газодиффузионный | 11,3                               |
| Франция                                    | Евродиф            | Газодиффузионный | 10,8                               |
| Великобритания,<br>Германия,<br>Нидерланды | Urenco             | Центробежный     | 5,85                               |
| Япония                                     | JNFL               | Центробежный     | 1,05                               |
| КНР  | CNEIC              | Газодиффузионный | 0,6                                |
|  |                    | Центробежный     | 1,0                                |
| Бразилия                                   | INB                | Центробежный     | 0,1                                |

# Планы стран по развитию центрифужной технологии оборачивания урана

| Страна                                     | Фирма,<br>организация | Год        | Производительность,<br>млн е.р.р./год |
|--|-----------------------|------------|---------------------------------------|
| Россия                                     | «Росатом»             | 2010       | Увеличение на 30%                     |
| США  | USEC Inc.<br>LES      | 2010       | 3,5                                   |
|  |                       | 2008       | 1                                     |
|  |                       | 2012       | 3                                     |
| Франция                                    | «Кожема»              | 2007       | 3                                     |
| Великобритания,<br>Германия,<br>Нидерланды | Urenko                | 2006       | Увеличение на 1,15                    |
| Япония                                     | JNFL                  | после 2005 | То же на 0,45                         |
| КНР  | CNEIC                 | 2005-2010  | То же на 1                            |
| Бразилия                                   | INB                   | 2005-2010  | то же на 1                            |



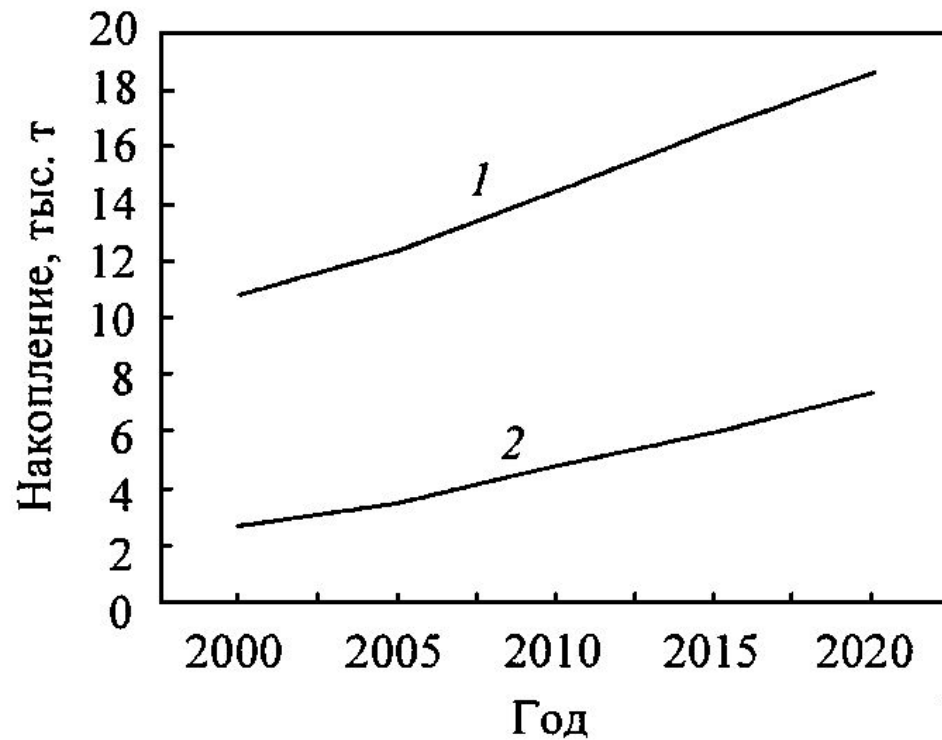
# Лучшие мировые и российские показатели топливоиспользования

| Параметр                              | Зарубежные АЭС    |                    | Российские АЭС с ВВЭР-1000 |                     |
|---------------------------------------|-------------------|--------------------|----------------------------|---------------------|
|                                       | CANDU<br>(Канада) | PWR-4<br>(Франция) | Кампания<br>4 года*        | Кампания<br>5 лет** |
| Расход природного урана, кг/(МВт·сут) | 0,179             | 0,195              | 0,198                      | 0,193               |
| Среднее выгорание, МВт·сут/кг         | 8,3               | 52                 | 49                         | 56                  |

\* Начато промышленное внедрение.

\*\* Технический проект.

# Накопление отработавшего ядерного топлива РБМК (1) и ВВЭР-1000 (2)



# Состояние и перспективы переработки отработавшего ядерного топлива

| Страна         | Реактор   | Мощность,<br>т тяж. мет. в год | Перспективы  |
|----------------|---|--------------------------------|--|
| Великобритания | Магноксовый   | 1500                           | Заккрытие в 2010-2015 гг. после остановки последнего реактора  |
| Франция        | LWR, ACR<br>LWR   | 1200<br>1600                   | Обсуждается закрытие в 2010 г. Повышение производительности до 1700 т без дальнейшего наращивания мощности |
| Россия         | ВВЭР, БН-600,<br>транспортные,<br>исследовательские<br>реакторы | 400                            | Снижение объёмов переработки в последние годы  |
| Япония         | LWR   | 90                             | Строительство завода к 2010 г. мощностью 800 т   |
| Индия          | PHWR,<br>исследовательские<br>реакторы                          | 260                            | Планы по расширению мощностей отсутствуют  |

# Образование отходов на стадиях ЯТЦ

| Стадия ЯТЦ   | Образующиеся отходы                           |   |
|--|---|---|
|  | Категории                                     | Объём, м <sup>3</sup> /год на 1 ГВт                         |
| Добыча и обработка руды  | Урановые хвосты<br>и низкоактивные отходы     | 254-300 м <sup>3</sup> на 1 т U <sub>3</sub> O <sub>8</sub> |
| Конверсия  | Низкоактивные отходы                          | 33-112  |
| Обогащение   | Низкоактивные отходы                          | 39  |
| Изготовление топлива   | Низкоактивные отходы                          | 3-9   |
| Эксплуатация реактора  | Низкоактивные отходы                          | 86-130  |
|  | Среднеактивные отходы                         | 22-33   |
| Промежуточное хранение топлива и перевод на сухое хранение     | Низкоактивные отходы                          | 2   |
|  | Среднеактивные отходы                         | 0,2   |
| Переработка топлива с удалением отходов (замкнутый ЯТЦ)        | Низкоактивные отходы                          | 70-95   |
|  | Среднеактивные отходы                         | 20-32   |
|  | Высокоактивные отходы                         | 3-4   |
| Капсулирование и окончательное удаление топлива (открытый ЯТЦ) | Низкоактивные отходы                          | 0,01 м <sup>3</sup> /т                                      |
|  | Среднеактивные отходы                         | 0,2 м <sup>3</sup> /т                                       |
|  | Высокоактивные отходы                         | 1,5 м <sup>3</sup> /т                                       |
| Вывод из эксплуатации:   |   |   |
| установок по конверсии   | Низкоактивные отходы                          | 92  |
| установок по обогащению  | Низкоактивные отходы                          | 5   |
| линий по производству ТВС реактора                             | Низкоактивные отходы                          | 6   |
|  | Низкоактивные отходы<br>Среднеактивные отходы | 175-230<br>9  |
| установок по переработке топлива и остекловыванию отходов      | Низкоактивные отходы                          | 5   |
|  | Среднеактивные отходы                         | 0,8   |



**Спасибо за внимание!**