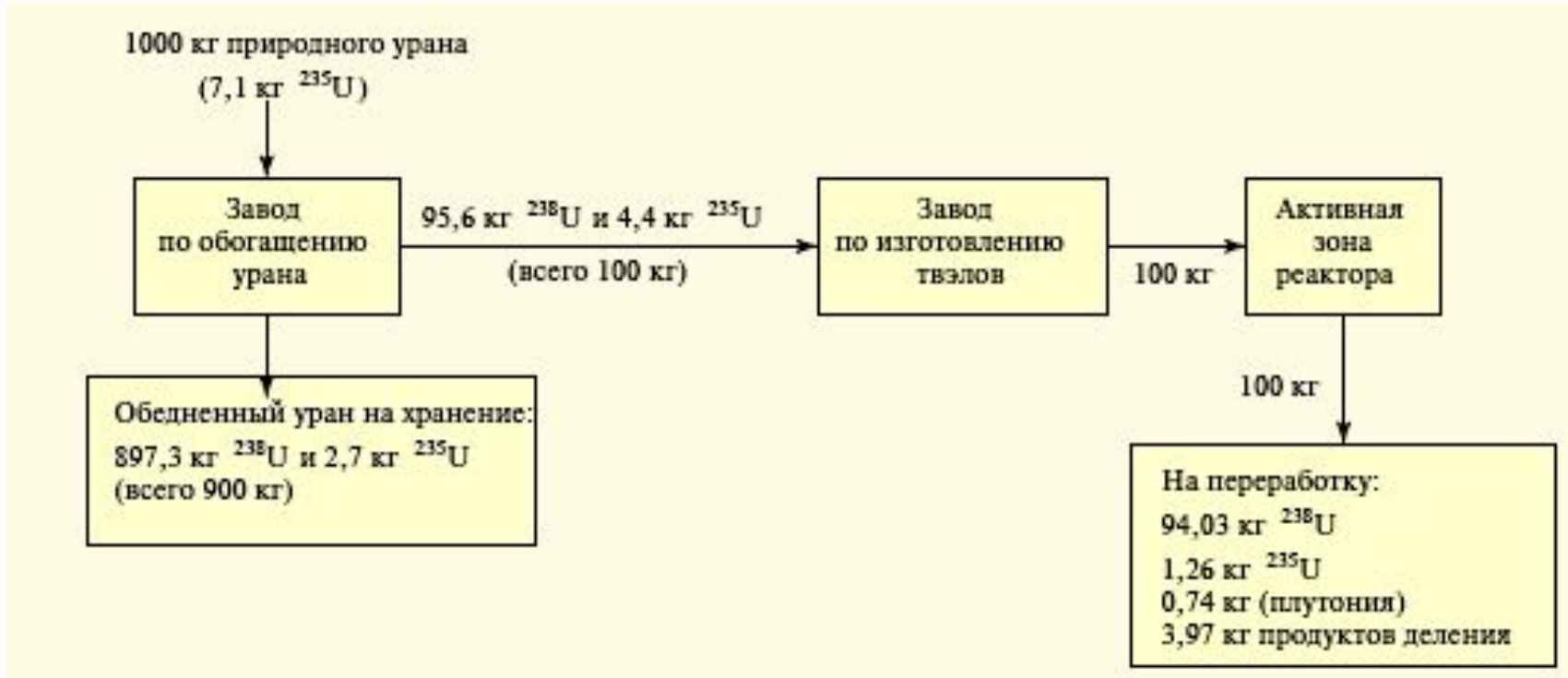


## Открытый и замкнутый топливный цикл



## Открытый и замкнутый топливный цикл

- По мере работы реактора происходит выгорание топлива (урана-235), а также изменение состава топлива. Образуются осколки деления, а также нарабатывается плутоний-239 из урана -238. Кстати, плутоний тоже частично сгорает.
- Отработавшие кампанию топливные сборки выгружаются из реактора и помещаются в бассейн выдержки (для охлаждения топлива и значительного уменьшения уровня радиоактивности). Срок хранения в БВ - примерно от 3 до 5 лет. Радиоактивность за время хранения снижается примерно в 100 раз.
- Затем сборки направляются на переработку ОЯТ. В ОЯТ содержится всего 4% радиоактивных отходов, которые действительно необходимо извлечь, переработать и безопасно удалить.
- Только Франция, Россия и Англия используют переработку ОЯТ. Остальные страны отправляют отработанное топливо на длительное хранение (захоронение)

## Открытый и замкнутый топливный цикл

- Если из отработанных топливных сборок извлекать и удалять отходы, а полезные делящиеся материалы отправлять вновь на создание новых топливных элементов, то получится замкнутый топливный цикл.
- Для замыкания ядерного топливного цикла предполагается использовать реакторы на быстрых нейтронах, которые позволяют перерабатывать топливо, являющееся отходами работы реакторов на тепловых нейтронах.
- Коэффициент воспроизводства (отношение массы образовавшегося вторичного топлива к массе первичного топлива) в реакторах на быстрых нейтронах может быть больше 1. В реакторах на тепловых нейтронах  $K_B < 1$ .
- Именно поэтому целесообразно использовать реакторы типа БН для наработки вторичного топлива. (1 реактор БН способен питать топливом 5 реакторов на тепловых нейтронах).

## Открытый и замкнутый топливный цикл

- В легководном реакторе электрической мощностью 1000 МВт ежегодно образуется около 200 кг изотопов плутония (из них примерно 60% - плутоний – 239).
- Хранение энергетического плутония свыше 2 лет сопровождается ухудшением качества из-за распада плутония-241 в еще более экологически опасный америций-241, который является сильнейшим  $\gamma$ -излучателем, легко распространяющимся с водой и накапливающимся в растениях. Это приводит к необходимости химического отделения америция от плутония, если предполагается повторное использование плутония.
- На современном этапе утилизация как энергетического, так и оружейного плутония-239 осуществляется в составе смешанного уран-плутониевого топлива на базе диоксидов  $UO_2$  и  $PuO_2$ , так называемого MOX-топлива, в активных зонах энергетических реакторов. В качестве урановой компоненты используется природный или обедненный уран, в качестве плутониевой -  оружейный или энергетический плутоний.

## Открытый и замкнутый топливный цикл

- Содержание плутония в МОХ-топливе, загружаемом в легководные реакторы, составляет 3-5%, в быстрые -  $\square$ 10% и выше. Для изготовления уран-плутониевого топлива используются разные технологии; одним из способов является, например, простое перемешивание порошков диоксидов урана и плутония.
- Фабрикация МОХ-топлива для легководных реакторов на основе энергетического плутония была поставлена на промышленную основу ещё в 70 годах. Впервые МОХ-кассета была загружена в энергетический легководный реактор в Бельгии в 1963 году. В настоящее время в мире несколько десятков реакторов на тепловых нейтронах имеют лицензии на эксплуатацию МОХ-топлива.
- Во Франции, являющейся монополистом по поставкам МОХ-топлива и лидером по его использованию, смешанным топливом загружены около 20 французских реакторов и планируется увеличение их числа. При этом Франция в ближайшее время не планирует переработку облученных МОХ-кассет.
- Частично загружены МОХ-топливом, произведенным во Франции, и несколько энергоблоков в Японии.

## Открытый и замкнутый топливный цикл

- Однако эксплуатация МОХ-топлива в тепловых реакторах сопровождается рядом серьезных проблем:
  - высокая активность еще необлученного МОХ-топлива и связанная с этим необходимость дополнительного исследования безопасности при использовании существующего оборудования для обращения со свежим топливом;
  - в связи с высокой удельной активностью плутония-239, которая на несколько порядков превышает активность урана-235, для сохранения приемлемой активности воды в реакторе при работе АЭС потребуется на порядки уменьшить количество негерметичных тепловыделяющих элементов как по газовой плотности, так и по прямому контакту топлива с водой;
  - загрузка даже части активной зоны МОХ-топливом снижает эффективность органов регулирования (из-за высокого поглощения в плутонии, что смещает баланс поглощений в реакторе в его пользу);
  - доля запаздывающих нейтронов в плутонии втрое меньше, чем в уране (у плутония  $\beta_{\text{эф}} < 0,2\%$ ), это меняет свойства реактора при маневрах мощности в более опасную сторону и др.

## Открытый и замкнутый топливный цикл

- Поэтому, по соображениям безопасности наиболее целесообразна загрузка в реактор не более  $1/3$  топлива MOX с сохранением  $2/3$  обычного уранового. В этом случае используются смешанные зоны.
- Блок Фламанвилль-3, сооружаемый во Франции, начнет работу со стандартной зоной, содержащей 30% MOX-сборок. Для своих проектов в Великобритании группа AREVA надеется довести содержание смешанных сборок в зоне до 50%.
- Кроме этого, серьезной проблемой является обращение с облученным MOX-топливом. Облученное в легководных реакторах, это топливо отличается от уранового сложным изотопным составом продуктов деления и актинидов. Переработка такого топлива технологически сложнее, чем переработка уранового.
- MOX-сборки начнут загружаться в активные зоны американских реакторов в 2018 году. При их изготовлении будет использоваться оружейный плутоний, признанный избыточным для нужд национальной безопасности страны.

## Открытый и замкнутый топливный цикл

- Россия избрала схему утилизации, отличающуюся типом реактора: топливо из избыточного оружейного плутония будет загружаться в реакторы на быстрых нейтронах БН-800 и, возможно, БН-600.
- В России ни один из работающих тепловых реакторов не проектировался с учетом возможности использования МОХ-кассет, и нет действующих мощностей по производству такого топлива для легководных реакторов.
- В новых проектах АЭС-2006 и ВЭР-ТОИ предусматривается использование МОХ-топлива.
- Использование МОХ-топлива в легководных установках - один из вариантов замыкания ядерного топливного цикла, позволяющий обеспечить однократное возвращение в активные зоны реакторов плутония, получаемого из облучённых урановых топливных сборок.
- Но только в рамках замкнутого ядерного цикла будущего при создании парка быстрых реакторов станет возможным решение проблемы утилизации плутония и в полной мере использования энергетического потенциала ОЯТ, наработанного в предшествующий период.