

2. ЯДЕРНЫЕ ТОПЛИВНЫЕ ЦИКЛЫ

Все стадии функционирования ядерного топливно-энергетического комплекса, такие, как производство топлива для ядерных реакторов, подготовка его к использованию, сжигание топлива в реакторе, утилизация отработанного топлива, промежуточное хранение и т.п. вместе взятые составляют так называемый топливный цикл. Ядерный топливный цикл (ЯТЦ) - путь, по которому топливо попадает в ядерный реактор, и по которому его покидает.

Замечания. Помимо рассмотренного здесь пути урана, как топлива, есть и другой путь урана, как компонента ядерного оружия. Существует и третий путь урана, как источника оружейного плутония: уран → реактор → плутоний → ядерный заряд → взрыв на полигоне или над вражеским объектом (или демонтаж, если подходящей войны не случилось). Мы, естественно, ограничимся рассмотрением первого пути – энергетический ЯТЦ, хотя изредка будем вспоминать военные направления ЯТЦ, поскольку в развитых странах они – основные.

В зависимости от базового делящегося нуклида (или нуклидов), энергетика использует разные топливные циклы. Различают урановый, торий-урановый, уран-плутониевый и торий-плутониевый циклы. В настоящее время наибольшее распространение получил урановый цикл, который точнее называть уран-плутоний-нептуниевым ядерно-энергетическим топливным циклом, поскольку именно эти элементы (равно как некоторые другие важные трансплутониевые нуклиды и продукты деления) нарабатываются в реакторах на урановом топливе.

Энергетический ядерный топливно-энергетический цикл подразделяется на два вида: открытый (разомкнутый), нацеленный на захоронение отработанного топлива и радиоактивных отходов, и закрытый (замкнутый), предусматривающий достаточно полную переработку отработанного топлива и других отходов предприятий ядерной индустрии с целью выделения ценных элементов.

Для гражданских целей может быть использован как открытый, так и закрытый ЯТЦ, для военных целей ЯТЦ функционирует исключительно в замкнутом режиме.

Начальные этапы замкнутого и открытого ЯТЦ одинаковы, различия имеют место на заключительном этапе.

Завершающая часть ядерного топливного цикла - деятельность, включающая транспортировку, хранение, переработку отработавшего ядерного топлива, обращение с радиоактивными отходами и их захоронение.

В ходе ЯТЦ происходит трансформация ядерного материала (урана и плутония). В установках и системах для конверсии урана может осуществляться одно или несколько превращений из одного химического изотопа урана в другой, включая:

- конверсию концентратов урановой руды в UO_3 ;
- конверсию UO_3 в UO_2 ;
- конверсию оксидов урана в UF_4 или UF_6 ;
- конверсию UF_6 в UF_4 ;
- конверсию UF_4 в UF_6 ;
- конверсию UF_4 в металлический уран;
- конверсию фторидов урана в UO_2 ;
- конверсию оксидов урана в UCl_4 .

В установках и системах для конверсии плутония осуществляется одно или несколько превращений из одного химического изотопа плутония в другой, включая:

- конверсию нитрата плутония в PuO_2 ;
- конверсию PuO_2 в PuF_4 ;
- конверсию PuF_4 в металлический плутоний.

2.1 Замкнутый ЯТЦ

Замкнутый ядерный топливный цикл - ядерный топливный цикл, в котором отработавшее ядерное топливо, выгруженное из реактора, перерабатывается для извлечения урана и плутония для повторного изготовления ядерного топлива.

Этапы замкнутого ЯТЦ включают выдержку отработанного ядерного топлива на территории АЭС в течение 3–10 лет; временное контролируемое хранение ОЯТ в автономных хранилищах при радиохимическом заводе (сроком до 40 лет), переработку ОЯТ с выделением из него отдельных (или суммы) делящихся нуклидов и продуктов деления, представляющих коммерческий интерес, отверждение и захоронение отходов.

Переработка отработанного ядерного топлива даёт определённые экономические выгоды, восстанавливая неиспользованный уран и вовлекая в энергетику наработанный плутоний. При этом уменьшается объем высокорadioактивных и опасных отходов, которые необходимо надлежащим образом хранить, что также имеет определённую экономическую целесообразность. В отработанном ядерном топливе содержится примерно 1% плутония. Это очень хорошее ядерное топливо, которое не нуждается ни в каком процессе обогащения, оно может быть смешано с обедненным ураном и поставляться в виде свежих

топливных сборок для загрузки в реакторы. Его можно использовать для загрузки и в реакторы-размножители (коверторы и бридеры).

2.2 Разомкнутый ЯТЦ

В разомкнутом (открытом) ЯТЦ отработанное ядерное топливо считается высокоактивными радиоактивными отходами и вместе с остаточными делящимися изотопами исключается из дальнейшего использования – поступает на хранение или захоронение. Поэтому разомкнутый ЯТЦ характеризуется низкой эффективностью использования природного урана (до 1%).

Незамкнутый ядерный топливный цикл - ядерный топливный цикл, в котором отработавшее ядерное топливо, выгруженное из реактора, не перерабатывается и рассматривается как радиоактивные отходы.



Рис.2. Схема этапов в замкнутом ЯТЦ.

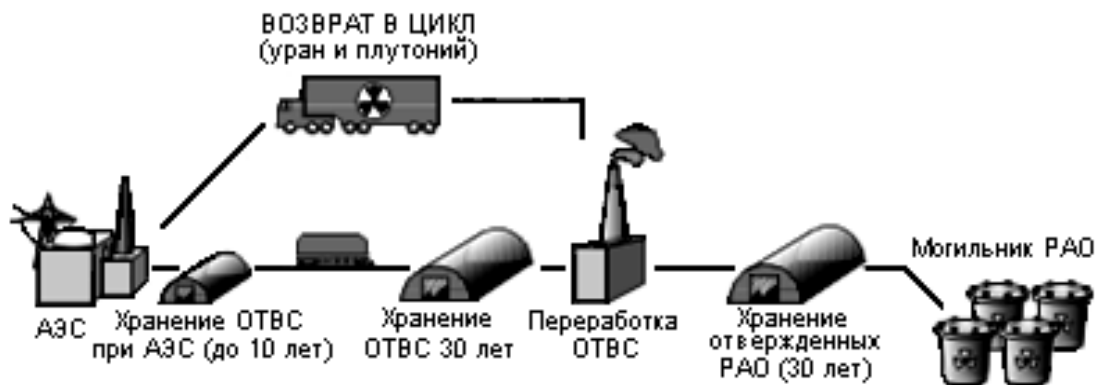


Рис. 3. Закрытый ядерный топливный цикл в атомной энергетике. (ОТВС – отработанные тепловыделяющие сборки, РАО – радиоактивные отходы)



Рис.3. Разомкнутый (открытый) ядерный топливный цикл

2.3 Преимущества и недостатки различных вариантов ЯТЦ

К преимуществам замкнутого ЯТЦ относят возврат в энергетику дорогостоящих делящихся материалов — урана и плутония, что обеспечит атомную энергетику топливом на тысячелетие при любом росте потребностей. Кроме того, объёмы высоко радиоактивных отходов, предназначенных для вечного захоронения, гораздо меньше после переработки ОЯТ, чем объёмы отработавших тепловыделяющих сборок (ОТВС) без их переработки.

Основные недостатки замкнутого ЯТЦ — наличие экологически опасного радиохимического производства и возможность неконтролируемого распространения плутония- 239 и других делящихся компонентов ядерного оружия.

Схема открытого варианта ЯТЦ значительно короче и проще, чем это имеет место в замкнутом варианте. Отсутствует основной источник загрязнения окружающей среды радионуклидами - радиохимический завод, т. е. отсутствует наиболее радиационно опасное производство. Радиоактивные вещества постоянно находятся в твёрдом состоянии в герметичной упаковке, не происходит их «размазывание» по огромным площадям в виде растворов, газов при «штатных» и нештатных выбросах и т.д. Исчезают все проблемы, связанные со строительством и будущим выводом из эксплуатации радиохимического завода: финансовые и материальные затраты на строительство и эксплуатацию завода, в том числе на зарплату, электро-, тепло-, водоснабжение, на огромное количество защитного оборудования и техники, химических реагентов, агрессивных, ядовитых, горючих и взрывоопасных веществ (кислот, щелочей, органических жидкостей) и т.д. Исчезает необходимость закачивания под землю трития, устраняются проблемы с утилизацией йода, жидких и газообразных отходов, выбросов и т.д. и т.п. И, наконец, «вечное» захоронение ОТВС не означает полное и вечное исключение из оборота ядерных материалов. Ибо «могильник» для отработанного топлива — это искусственное компактное месторождение урана и плутония, к «разработке» которого всегда можно вернуться в случае крайней необходимости — когда появятся новые принципы подхода к использованию ядерных материалов, новые технологии по переработке ОЯТ, снизится активность осколочных радионуклидов и т.д.

К недостаткам открытого цикла следует отнести большую стоимость долговременных хранилищ и полигонов для захоронения, трудности обеспечения долговременной изоляции ТВС от биосферы (существует реальная опасность освобождения радионуклидов в случае разрушения ТВЭЛов при их длительном хранении), необходимость постоянной вооруженной охраны захоронений (возможность хищения делящихся нуклидов из захоронений террористами также представляется реальной), а также постоянного контроля за состоянием хранимых материалов.

Очевидно, что любой ядерный топливный цикл — дорогостоящее и опасное производство. Выбор оптимального варианта ЯТЦ — серьезная проблема для страны и мира в целом.

Анализу экономических аспектов различных вариантов ЯТЦ уделяют большое внимание во всех заинтересованных странах. Было показано, что на данном этапе с экономической точки зрения оба варианта обращения с ОЯТ — переработка с последующим вечным хранением радиоактивных отходов или вечное хранение ОЯТ без переработки — примерно равноценны. Поэтому при выборе варианта ЯТЦ на первый план выходят вопросы экологической, энергетической, социальной, медицинской целесообразности осуществления замкнутого или открытого ЯТЦ.

Какому топливному циклу будет отдано предпочтение в конкретной стране, зависит от критериев, которые будут использоваться при оценке вариантов решения проблемы локализации уже накопленных и будущих отходов (включая ОЯТ). Этих критериев пять: степень риска для здоровья людей и окружающей среды; стоимость переработки ОЯТ, строительства хранилищ и т. п.; соответствие законодательству страны по ввозу ОЯТ из-за рубежа; соответствие целям нераспространения ядерного оружия и ядерных материалов; информированность населения.

Химическая переработка ОЯТ проектируется исходя из условий безопасности. Сопоставляя степени риска при внутренней аварии и внешнем воздействии на предприятиях ЯТЦ, специалисты оценивают химическую регенерацию ОЯТ как сопряженную с наибольшим риском из всех стадий цикла. Поэтому многие эксперты считают, что современный уровень химической технологии регенерации ОЯТ не отвечает требованиям экологической безопасности и отработанные тепловыделяющие элементы целесообразно целиком закладывать на длительное хранение. Кроме того, переработка ОЯТ связана с образованием значительного количества радиоактивных отходов (при переработке количество отходов увеличивается, но их удельная активность падает).

2.4 ЯТЦ в разных странах

Сравнительному анализу перспектив открытого и закрытого вариантов ЯТЦ уделяли и уделяют большое внимание. Варианты сравнивают по экономическим и экологическим критериям, а также по критерию нераспространения ядерного оружия. При этом если по начальному этапу ЯТЦ особых разногласий нет, а по заключительному имеется большой разброс мнений.

Разные страны придерживаются разных национальных программ, предусматривающих либо переработку ОЯТ, либо захоронение, либо «отложенное решение», то есть длительное хранение отработанных твэлов.

Из 34 стран в настоящее время лишь 5 государств (Индия, Япония, Англия, Россия, Франция) перерабатывают отработанное ядерное топливо на своих предприятиях. Большинство стран, включая Канаду, Финляндию, ФРГ, Италию, Нидерланды, Швецию, Швейцарию, Испанию, США и КНР, либо хранят ОЯТ, либо передают ОЯТ на переработку другим странам.

В России на радиохимическом заводе РТ-1 (комбинат «Маяк») перерабатываются следующие виды отработанного ядерного топлива:

- ТВС, отработавшие свой ресурс в энергетических реакторах типа ВВЭР-440, БН-350, БН-600 или в транспортных ядерных установках;
- ТВЭЛы промышленных реакторов, содержащие уран, обогащенный на 90% изотопом ^{235}U ;
- ядерное топливо промышленных реакторов в виде ТВЭЛов (блоков) на основе металлического урана природного обогащения, предназначенное для наработки плутония.

ОЯТ реакторов ВВЭР-1000 и РБМК любого типа (т.е. основных реакторов энергетики России) не перерабатываются (технические это возможно, но экономически не целесообразно) и хранятся на территории завода РТ-1, а также в новом хранилище на строящемся заводе РТ-2 (Железногорск).

Единственный в России завод по переработке отработанного ядерного топлива РТ-1 действует на территории комплекса, ранее производившего оружейный плутоний (Челябинск-65, Озёрск). Завод РТ-1 перерабатывает в год 200 т ТВС (проектная мощностью 400 т тяжелого металла в год). Он является компонентом замкнутого ЯТЦ. Хотя в целом для российской ядерной энергетики характерно наличие открытого ЯТЦ.

Замечание. ТВЭЛы промышленных реакторов (наработка оружейного плутония) перерабатываются на радиохимических производствах трех предприятий: — ГХК (горно-химический завод, Красноярск); - ПО «Маяк» (радиохимический завод, Челябинск). На этих же предприятиях осуществляется долговременное хранение радиоактивных продуктов производства.

Сейчас проводятся предварительные исследования по переводу реакторов АЭС на уран-плутониевое топливо. Продолжается разработка реактора-наработчика топлива на быстрых нейтронах на базе реактора типа БН (быстрый натриевый) в целях замыкания ядерного топливного цикла (включая эффективное сжигание оружейного плутония). Только после успешного завершения подготовительного периода Россия сможет полностью перейти на замкнутый ЯТЦ.

По существующим планам в России до 2020 ядерная энергетика будет развиваться в основном в разомкнутом (открытом) топливном цикле, поскольку, учитывая значительные запасы уранового сырья, нецелесообразно с экономической точки зрения расширять переработку отработанного топлива. Сейчас идет

подготовка технической и производственной базы для перехода к замкнутому ядерному топливному циклу (под Красноярском строится завод РТ-2 по переработке ОЯТ, приспособляются медленные реакторы АЭС к МОКС-топливу, расширяется использование быстрых реакторов в атомной энергетике и др.). Постепенный переход на закрытый вариант ЯТЦ диктуется не только внутренней потребностью России, но и необходимостью переработки ОЯТ зарубежных АЭС.

Наиболее последовательно замкнутый ЯТЦ осуществляет Франция. Согласно французской точки зрения, переработка ОЯТ в сочетании с возвратом в топливный цикл плутония и вводом реакторов на быстрых нейтронах помогут обеспечить в долгосрочной перспективе сохранение запасов природного урана. Ядерная энергетика Франции ежегодно нарабатывает около 1100 тонн ОЯТ. Большая его часть перерабатывается. Регенерированный уран и плутоний используется в энергетических реакторах.

Поскольку в результате радиохимической переработки отработанного ядерного топлива образуется большой объем РАО, то большинство стран ориентируются на долговременное (до 50 лет) хранение ОЯТ, что дает возможность подготовиться к окончательному захоронению, но не исключает возможности его химической переработки в дальнейшем. Ядерная энергетика Швеции ежегодно нарабатывает около 250 тонн ОЯТ и ориентирована исключительно на открытый цикл – отработанные твэлы накапливаются в бетонном бассейне на глубине 30 м в центральном хранилище для всех АЭС. В Швеции проводится обширный комплекс работ по подготовке к геологическому захоронению всего ОЯТ и других видов радиоактивных отходов АЭС. В Германии реализуется вариант замкнутого ЯТЦ, причём ОЯТ немецких АЭС перерабатывается на мощностях COGEMA (Франция) и BNFL (Великобритания) в соотношении примерно 50% на 50%. Выделенный при переработке плутоний в виде уран-плутониевого МОКС-топлива загружается в немецкие энергетические реакторы.

Франция, Германия, Великобритания, Россия и Япония продолжают развитие технологий закрытого топливного цикла для оксидных топлив. Сейчас Европе 35 реакторов способны частично использовать МОКС-топливо (от 20 до 50 %), содержащего до 7 % пригодного для реакторов плутония. В настоящее время лишь Великобритания, Франция и Россия перерабатывают ОЯТ других государств.

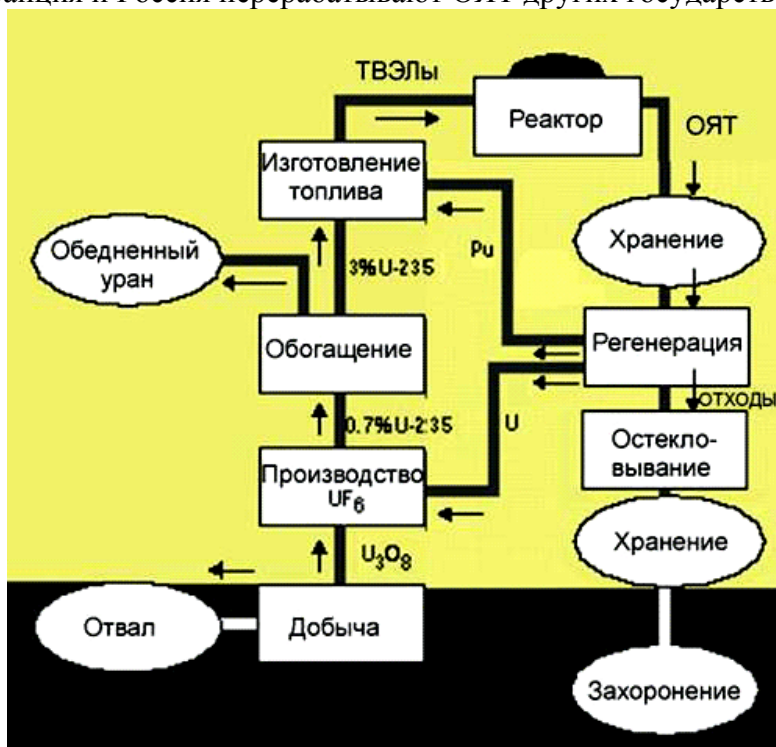


Рис. 4. Замкнутый урановый топливный цикл для реакторов на тепловых нейтронах.