

Как можно снизить стоимость переработки облученного топлива и обеспечить надежную изоляцию всех отходов?

© Ю. А. Похитонов

Радиевый институт им. В. Г. Хлопина, 194021, Санкт-Петербург, 2-й Мурунский пр., д. 28;
e-mail: ypokh@khlopin.ru

Получено 20.03.2017

УДК 621.039.59

Имеющиеся в мире мощности заводов неспособны справиться с задачей переработки как уже накопленного, так и ежегодно выгружаемого из реакторов отработавшего топлива АЭС. В связи с этим переработка ОЯТ перестала быть единственной альтернативой ядерного топливного цикла. В статье принята попытка проанализировать меры, направленные на снижение издержек при переработке топлива АЭС. По мнению автора, следует пересмотреть существующий подход к технологии переработки ОЯТ с учетом перспективы использования топлива РЕМИКС и с возможным расширением спектра продуктов деления, пригодных для дальнейшего использования.

Ключевые слова: переработка отработавшего ядерного топлива, изоляция отходов.

Введение

Стоимость ядерной электроэнергетики принципиально важна для общества при обсуждении перспектив развития атомной отрасли и связанных с этим рисков. Дешевая электроэнергия, генерируемая на АЭС, – важнейший и фактически единственный аргумент в пользу существования и развития этого вида энергетики, хотя именно этот аргумент и оспаривается экспертами, критически настроенными по отношению к ядерной отрасли.

Есть много подходов к оценке себестоимости. И зачастую в них приводятся некорректные доводы, например, когда сравнивают только капитальные затраты на строительство АЭС, которые во много раз превышают затраты в газовой отрасли.

Но главным аргументом противников ядерной энергетики была и остается экология. Безусловно, последствия аварии на АЭС могут быть катастрофическими. Но ведь и использование традиционных источников также не является безопасным с экологической точки зрения.

Весь ядерный топливный цикл, начиная с добычи урановых руд и заканчивая захоронением (или, что правильнее, безопасной изоляцией) отходов, в конечном счете определяет стоимость электроэнергии, вырабатываемой на АЭС.

Но если расходы на строительство и прямые расходы АЭС определены достаточно достоверно, то оценка затрат на переработку отходов и вывод станций из эксплуатации (ВЭ) не настолько очевидны и обоснованны, особенно в части «вечного контролируемого хранения». И откладывая сейчас решение вопросов изоляции РАО, мы перекладываем возмещение этих затрат на будущие поколения.

С точки зрения экономики переработка ОЯТ в России представляет собой не угрозу, а возможность

занять достойное место на перспективном высокотехнологичном рынке. Преодоление сложившихся предубеждений, обусловленных попытками представить отработавшее ядерное топливо как исключительно радиоактивные отходы, является одной из важнейших задач и условием дальнейшего развития концепции замкнутого ядерного топливного цикла.

Ежегодно появляются новые публикации на эту тему, но очень редко поднимается вопрос, насколько те или иные предложения могут привести к реальной ощутимой выгоде. Поэтому настало время рассмотреть данную проблему в более широком аспекте, включая экономику рециклирования делящихся материалов и затраты на переработку отходов.

В статье предпринята попытка проанализировать меры, направленные на снижение издержек на заключительной стадии ядерного топливного цикла. Предлагается пересмотреть существующий подход к технологии переработки ОЯТ с учетом перспективы внедрения топлива РЕМИКС и возможности расширения спектра продуктов деления, пригодных для дальнейшего использования сейчас и в будущем.

Перспективы накопления облученного топлива и ситуация с заводами по его переработке

Во всем мире уже накоплено свыше 300 тыс. т ОЯТ и ежегодно из реакторов выгружается более 10 тыс. т. При этом во всех странах на переработку поступает менее 2000 т ОЯТ/год, что составляет менее 1% от уже накопленного и размещенного в хранилищах топлива.

В 1950–1960-х гг. вопрос о необходимости переработки облученного топлива решался однозначно, и данная концепция поддерживалась всеми странами, приступившими к развитию своих ядерных программ. Но постепенно ситуация менялась, и сегодня утверждение о необходимости переработки ОЯТ не

выглядит как единственная альтернатива замкнутого ядерного топливного цикла (ЗЯТЦ).

Первый в мире радиохимический завод по переработке топлива АЭС с производительностью 300 т/год был запущен в США 1966 г. в Вест-Валли (West Valley) и эксплуатировался около 7 лет. Параллельно в США велось проектирование и строительство другого завода в Барнуэлле (Barnwell) производительностью уже 1500 т/год. Еще один завод строился в Мидвесте (Midwest Fuel Recovery Plant) по аквафтор-технологии с производительностью 300 т/год. Но возникшие проблемы при эксплуатации завода в Вест-Валли, неудачный пуск завода в Мидвесте, а также пересмотр требований на сбросы радиоактивных веществ привели к отказу от реконструкции и пуска заводов в Барнуэлле и Мидвесте.

В нашей стране первый завод по переработке ОЯТ (РТ-1) был введен в эксплуатацию в 1977 г. и был предназначен для переработки топлива российских и зарубежных АЭС с реакторами ВВЭР-440, топлива исследовательских реакторов и сборок реакторов транспортных установок.

В эти же годы были начаты широкомасштабные работы по проектированию второго завода – РТ-2 – в Железногорске с производительностью от 900 до 3000 т/год по урану (в зависимости от конъюнктуры рынка). В основу технологии завода были заложены традиционные для гидрометаллургической переработки операции: растворение топлива и последующая экстракционная переработка растворов. В схеме завода впервые в мире была предусмотрена локализация ^{129}I , ^{14}C , Кг, а также ^3H . Важной особенностью предложенной технологии был поиск технических решений по выделению и дальнейшему использованию отдельных продуктов деления (платиноиды, Хе, ^3H). К 1996 г. предложенная технология была проверена на реальных растворах ОЯТ АЭС.

Однако в конце 1990-х гг. по известным причинам эти разработки, как и развитие других важных направлений в радиохимии, были практически прекращены. В результате лидерами в переработке топлива стали Франция (компания COGEMA – с 1966 г.) и Великобритания (компания BNFL – с 1964 г.). В Японии построен завод по переработке ОЯТ производительностью 1200 т в год, но его пуск постоянно переносился.

Таким образом, на сегодняшний день мировое сообщество обладает весьма ограниченными возможностями по переработке топлива по сравнению с объемом уже накопленного топлива и топлива, ежегодно выгружаемого из энергоблоков.

Хранить или перерабатывать?

Можно ли найти правильный баланс между использованием стратегии переработки топлива и его длительным хранением с последующим захоронением

и, самое главное, надо ли противопоставлять эти подходы?

На самом деле это две неразрывно связанные концепции, имеющие общую цель, – надежной изоляции всех РАО, и проблема состоит только в том, чтобы определить их нужное сочетание во времени. При этом надо учитывать следующее. Во-первых, востребованное использование рецикла U и Pu для получения смешанного топлива будет расти по мере наращивания мощностей АЭС и роста цен на природный уран. Во-вторых, длительное хранение (выдержка) топлива перед переработкой во многом упрощает (и удешевляет) решение задачи дальнейшей изоляции отходов, которые уже в меньшем объеме можно хранить на тех же площадях, где хранилось топливо до его переработки.

Дискуссия о преимуществах различных подходов ведется на протяжении более 40 лет. И основным доводом в пользу отказа от замкнутого цикла в конце 1970-х гг. была не стоимость переработки или гарантий безопасной изоляции всех отходов, а в первую очередь опасение распространения делящихся материалов. Действительно, радиохимическая технология началась с производства оружейного плутония и минимизации опасности распространения, связанной с циклом переработки ядерного топлива. Эти проблемы остаются актуальными и на сегодняшний день при обсуждении целесообразности открытого и замкнутого цикла.

В течение ряда лет под эгидой МАГАТЭ экспертами из многих стран проводились работы по оценке рисков и возможности использования делящихся материалов, получаемых в результате переработки топлива [1]. Для США итогом этой многолетней дискуссии стал мораторий на переработку топлива, введенный президентом Картером в апреле 1977 г. [2].

В центре внимания остается топливный цикл PUREX/MOX, практикуемый в ряде стран, поскольку он продуцирует ядерные материалы, которые легко сделать пригодными для изготовления оружия. И риск распространения усиливается при развитии технологии в странах, где отсутствует инфраструктура для гарантии жесткого контроля и учета [3, 4].

Открытый цикл предполагает захоронение топлива (и соответственно Pu и всех отходов) в геологических формациях после предварительной выдержки. И здесь вопросы распространения делящихся материалов вносят значительный вклад в пользу открытого, однократного цикла (но при этом нельзя забывать, что открытые циклы, как правило, требуют обогащенного уранового топлива, и вопрос нераспространения остается открытым).

Концепция захоронения отходов в глубоких геологических формациях широко обсуждалась в рамках национальных и международных исследователь-

ских программ в течение нескольких десятилетий. С научной и технической точек зрения можно уверенно говорить о возможности надежной изоляции РАО на весь период эксплуатации хранилищ [5–8].

Практический опыт строительства и эксплуатации хранилищ высокоактивных отходов в геологических формациях сегодня ограничивается только несколькими примерами. Программы создания хранилищ в Финляндии, Франции и Швеции разработаны достаточно полно. Тем не менее ни в одной из этих стран хранилища не начнут функционировать до 2020 г. и, возможно, до 2030 г. Оценки стоимости реализации открытого цикла сильно разнятся и составляют по разным оценкам 500–700 долларов в пересчете на килограмм тяжелых металлов.

Помимо проблем, связанных с нераспространением делящихся материалов, не менее важную роль при оценке того или иного подхода играют затраты на обращение с ОЯТ и дальнейшая судьба всех высвобождаемых при этом РАО [9–19].

При сравнении цен на переработку топлива не удается привести однозначные значения, которые учитывают все факторы приводимых в литературе методик. Достаточно сослаться на доклад, подготовленный экспертами и представленный конгрессу США в 2007 г. Приведенные в докладе значения отличаются более чем в 2 раза и составляют от 585 до 1300 долларов [14, 19, 20].

Стоимость переработки во многом зависит и от степени развития той или иной технологии и от производительности завода. По мнению авторов работы [20], оптимальной производительностью считается величина от 2000 до 8000 т/год при себестоимости переработки 1040 долларов/кг (в ценах 2002 г.). Таким образом, любой завод с низкой производительностью всегда будет менее рентабельным по сравнению с крупными предприятиями.

Отметим, что затраты на переработку могут быть и высокими, но если продукция завода находит спрос и продажа продукции способна компенсировать большую часть затрат на переработку, завод может стать рентабельным.

Примем как аксиому, что главной целью переработки облученного топлива является выделение U, Pu (их рециклирование) и подготовка всех отходов к захоронению. Такая концепция позволяет использовать накапливающийся в реакторах Pu и невыгоревший ^{235}U , что примерно на 15–20% сокращает потребность в природном уране. И при этом переработка топлива должна максимально отвечать условиям нераспространения делящихся материалов, как это было сказано выше. Сегодня эта концепция наиболее широко развивается во Франции, Великобритании, России, Японии, Китае и Индии.

Что же мешает широкому внедрению, на первый взгляд, столь очевидного подхода к использованию рециклированных делящихся материалов и экономии сырьевых ресурсов?

Прежде всего проблема повторного использования регенерированного U связана с увеличением работы разделения по сравнению с обогащением природного U. По сравнению с природным ураном регенерированный уран надо обогащать по ^{235}U на 30% больше для компенсации снижения реактивности, вызванной накоплением в ОЯТ ^{236}U . Другая проблема связана с присутствием ^{232}U и его дочерних изотопов, которые имеют жесткое γ -излучение и увеличивают радиационный фон. Поэтому обогащать регенерированный уран из отработанного топлива становится невыгодно и, казалось бы, нет смысла его перерабатывать.

Другой значительной политической проблемой в настоящее время стало накопление в ОЯТ Pu. Таким образом, концепция переработки топлива вступает в противоречие с принципом нераспространения, и проблема обращения с Pu становится частью процесса ядерного разоружения.

На начальном периоде развития атомной энергетики считалось очевидным использовать регенерированные делящиеся материалы (U и Pu) для изготовления MOX-топлива.

И наряду с, казалось бы, бесспорным обоснованием самой концепции рецикла U и Pu остается целый ряд проблем, ставящих под сомнение использование MOX-топлива в тепловых реакторах. Во-первых, затраты на изготовление MOX-топлива выше стоимости изготовления топлива из UO_2 . Во-вторых, снижение доли делящихся изотопов Pu и U при повторном использовании MOX-топлива исключает целесообразность последующего рецикла. В-третьих, при использовании MOX-топлива резко возрастают требования к управлению реактором из-за снижения реактивности активной зоны.

В результате проведенных работ по поиску вариантов рециклирования Pu в тепловых реакторах было предложено несколько технических решений, которые позволяют использовать Pu многократно [21–23]. Так, например, концепция использования MIX-топлива [22] позволяет избежать накопления Pu в отличие от MOX-топлива.

Новым шагом стало появление концепции RE-МИКС (REgenerated MIXture of U, Pu oxides) [23–32]. Схема многократного рециклирования U и Pu представлена на рисунке.

Энергетический потенциал РЕМИКС-топлива при рециклировании остается практически неизменным, и при его использовании повторно используются Pu и оставшийся в топливе ^{235}U . Проведенные