

2. IAEA. Thorium fuel cycle – Potential benefits and challenges. Vienna: IAEA-TECDOC-1450. – 2005.

3. Касьян А. И. Перспективы ториевого цикла / Касьян А. И., Хамидуллин Р. Я. // Журнал «Двигатель» № 2(80). – Москва: МФПУ «Синергия». – 2012.

4. Субботин С. А. Ториевый цикл. Выбираем реактор / С.А. Субботин. – Москва: РНЦ «Курчатовский институт». – 2007.

УДК 539.125.5

## **СОВРЕМЕННЫЕ ПОДХОДЫ К ТРАНСМУТАЦИИ ОТРАБОТАВШЕГО ЯДЕРНОГО ТОПЛИВА АЭС**

Бычкова Д.Н.

Научный руководитель Качан С.М., к.ф.-м.н., доцент

Применение ядерных технологий в энергетической отрасли неизбежно сопровождается наработкой радиоактивных отходов (РАО). Радиоактивные отходы образуются на всех этапах ядерно-топливного цикла (ЯТЦ), но наибольшую опасность в долгосрочной перспективе представляют высокоактивные долгоживущие радионуклиды, образующиеся в отработавшем ядерном топливе (ОЯТ).

На этапе долговременного хранения ОЯТ большие периоды полураспада отдельных продуктов деления и малых актинидов, а также токсичность и способность малых актинидов к спонтанному делению, накладывает существенные ограничения на технологии обращения с ОЯТ, и ставит под вопрос безопасность ядерной энергетики в целом. В настоящее время ни одна из стран не перешла к использованию технологий, позволяющих решить проблему ОЯТ и РАО.

Трансмутация, как процесс превращения долгоживущих ядер ОЯТ в стабильные или короткоживущие в результате ядерной реакции под действием внешних ядерных излучений, является действенным механизмом снижения долгосрочной радиотоксичности [1,2]. Такой подход может стать важнейшим этапом замыкания ядерно-топливного цикла (ЯТЦ), гарантом его безопасности и устойчивости.

Долгоживущие РАО можно подразделить на продукты деления (ПД), малые актиноиды (МА) и продукты активации конструкционных материалов. Среди долгоживущих продуктов деления главную опасность с точки зрения безопасного долговременного хранения представляют  $^{99}\text{Tc}$ ,  $^{129}\text{I}$  и  $^{135}\text{Cs}$ . К числу проблемных малых актиноидов относятся изотопы америция, кюрия, нептуния, имеющие небольшую долю запаздывающих нейтронов в спектре деления.

Процесс трансмутации может быть однократным (одноцикловым), либо многократным (многоцикловым) [2]. В однократном цикле облученный

материал с «выжженным» долгоживущим радионуклидом после выгрузки отправляется на захоронение. При реализации многократной трансмутации облученная мишень подвергается очистке от образовавшихся стабильных и короткоживущих дочерних продуктов трансмутации, пополняется новой порцией долгоживущего нуклида, экстрагированного из свежего ОЯТ, и затем подвергается следующему циклу облучения. На рисунке 1 представлена схема двухуровневого ЯТЦ с многократной трансмутацией долгоживущих продуктов деления и малых актиноидов.

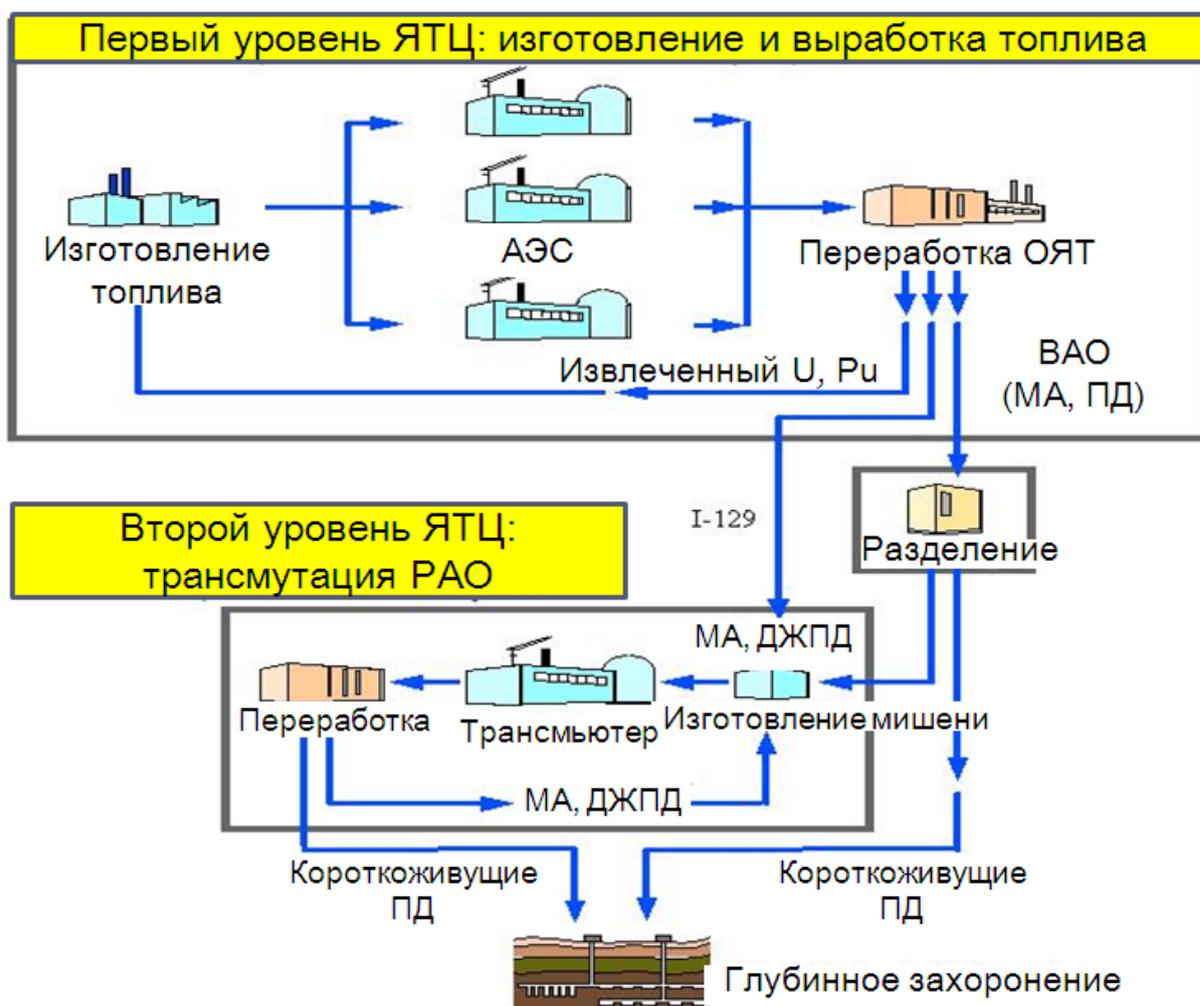


Рисунок 1. Схема ядерно-топливного цикла с трансмутацией РАО.

Для характеристики процесса трансмутации используются следующие основные критерии: среднее время жизни трансмутируемого радионуклида в нейтронном поле, генерация избыточных нейтронов для трансмутации, неизбежные потери (утечка) радионуклидов в технологическом цикле, безопасность трансмутационного цикла для окружающей среды.

Разнообразие заряженных и нейтральных частиц определяет различные способы воздействия на радионуклиды. Имеется принципиальная

возможность взаимодействия трансмутируемых радионуклидов с электронами, протонами, дейтронами и другими заряженными ионами, нейтронами,  $\gamma$ -квантами. Наконец, существует возможность мюонного катализа. Наибольшую эффективность благодаря отсутствию кулоновского барьера и большим сечениям взаимодействия дают нейтроны. Взаимодействие их с ядрами долгоживущих РАО является единственным экономически целесообразным методом трансмутации.

В качестве источников нейтронов для целей трансмутации рассматриваются не только установки, основанные на реакциях деления, но и подкритические сборки, управляемые ускорителями - электроядерные установки (ЭЛЯУ), а также источники, основанные на реакции термоядерного синтеза.

Быстрые реакторы уже сейчас можно использовать для трансмутации РАО [1,2]. Однако качество нейтронных полей (спектр/поток) недостаточно для эффективной трансмутации приоритетных долгоживущих ПД.

Электроядерные системы [3] позволяют увеличить количество сжигаемых актиноидов и кроме того эффективно трансмутировать ПД, если разместить их в специальные камеры вокруг электроядерной системы. Такие ЭЛЯУ сейчас активно разрабатываются и в ближайшее время будут введены в эксплуатацию.

Наиболее перспективными для трансмутации считаются установки на дейтерий-дейтериевом (D-D) и дейтерий-тритиевом (D-T) термоядерном синтезе [4]. Пространственное разделение области генерации нейтронов (плазма) и области их утилизации (бланкет) позволяет регулировать нейтронный спектр, настраивая его на целевые радионуклиды.

Интенсивные исследования, ведущиеся в настоящее время в области разделения и трансмутации долгоживущих радионуклидов [5] позволят в конечном счете разработать наиболее эффективную, экономичную и безопасную технологию переработки РАО в замкнутом ЯТЦ, что не исключает принципиально новых подходов к трансмутации.

### Литература

1. Шмелев А.Н., Апсэ В.А., Куликов Г.Г. Физические основы обезвреживания долгоживущих радиоактивных отходов. Потенциал инновационных технологий: Учебное пособие. М.: МИФИ, 2008. - 120 с.
2. Gudowski W. Nuclear waste management. Status, prospects and hopes // Nuclear Physics A. – 2005. – Vol.752. – P.623-632.
3. Бзнуни С. А., Барашенков В. С., Жамкочян В. М., Соснин А. Н., Полянски А., Худавердян А. Г. Перспективные электроядерные системы// Физика элементарных частиц и атомного ядра. 2003. Т. 34, вып. 4. С. 977-1032.

4. Takibayev A., Saito M., Artisyuk V., Sagara Fusion-driven transmutation of selected long-lived fission products//Progress in Nuclear Energy V.47, -2005, p.354.

5. Proceedings of the Twelfth Information Exchange Meeting on Actinide and Fission Product Partitioning and Transmutation, Prague (Czech Republic); 24-27 September 2012; pp.1-326.

УДК 539.125.5

## МАГНИТНОГИДРОДИНАМИЧЕСКИЙ ЭФФЕКТ

Рябыкин К.В., Ролейно Т.Г., Самойленко Е.В.

Научный руководитель – Шеденков С.И., ст. преподаватель

Магнитная гидродинамика — физическая дисциплина, возникшая на пересечении гидродинамики и электродинамики сплошной среды. Предметом её изучения является динамика проводящей жидкости (газа) в магнитном поле. Примерами таких сред являются: различного рода плазма, жидкие металлы, солёная вода.

Пионером исследований в области теории магнитогидродинамики признан Ханнес Альфвен, удостоившийся за эти работы Нобелевской премии в 1970 году. Первой экспериментальной работой в этой области стало исследование Гартманом в 1937 году сопротивления течения ртути в трубке при воздействии поперечного магнитного поля.

Магнитогидродинамический эффект — возникновение электрического поля и электрического тока при движении электропроводной жидкости или ионизированного газа в магнитном поле. Магнитогидродинамический эффект основан на явлении электромагнитной индукции, то есть на возникновении тока в проводнике, пересекающем силовые линии магнитного поля. В данном случае, проводниками являются электролиты, жидкие металлы и ионизированные газы (плазма). При движении поперек магнитного поля в них возникают противоположно направленные потоки носителей зарядов противоположных знаков.

К одной из центральных физико-технических задач энергетики относится создание магнитогидродинамических генераторов (МГД-генераторов), непосредственно преобразующих тепловую энергию в электрическую. Возможности практической реализации такого рода преобразования энергии в широких промышленных масштабах появляются в связи с успехами в атомной физике, физике плазмы, металлургии и ряде других областей. Непосредственное преобразование тепловой энергии в электрическую позволяет существенно повысить эффективность использования топливных ресурсов.