

УДК 621.039.7; 628.47.047

## РАДИОАКТИВНЫЕ ОТХОДЫ И МЕТОДЫ ИХ УТИЛИЗАЦИИ RADIOACTIVE WASTE AND METHODS OF THEIR DISPOSAL

Я.А. Бруверис

Научный руководитель – О.А. Пекарчик, старший преподаватель  
Белорусский национальный технический университет

г. Минск, Республика Беларусь

[piakarchyk@bntu.by](mailto:piakarchyk@bntu.by)

Y. Bruveris

Supervisor - O. Pekarchik, Senior Lecturer  
Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus

**Аннотация:** В данной работе рассматриваются методы утилизации ядерных отходов, и, в отдельности – возможность их переработки в реакторах на ускорителях (ADS), работающих на тории. Также представлены принцип работы и график снижения активности долгоживущих ядерных отходов за счет их преобразования в иллюстрациях.

**Abstract:** This article discusses methods for disposing of nuclear waste and, separately, the possibility of recycling it in thorium-fueled Accelerator-Driven Reactors (ADS). The principle of operation and a schedule for reducing the activity of long-lived nuclear waste through its conversion are also presented in illustrations.

**Ключевые слова:** радиоактивные отходы, утилизация, торий, реактор на ускорителях, ядерное топливо.

**Keywords:** radioactive waste, disposal, thorium, Accelerator-Driven Reactors, nuclear fuel.

### Введение

Радиоактивные отходы - вещества, материалы, изделия, оборудование, объекты биологического происхождения, радиоизотопные источники, загрязненные объекты внешней среды, содержание радионуклидов в которых превышает уровни, установленные нормами радиационной безопасности [1].

### Основная часть

Главным критерием утилизации радиоактивных отходов всех категорий является правило, согласно которому отходы должны обрабатываться, перерабатываться, храниться, транспортироваться и захораниваться таким образом, чтобы на протяжении всего срока их потенциальной опасности негативное воздействие на человека и окружающую среду, как в настоящее время, так и в будущем не превышало пределов, установленных соответствующими нормативными документами, в независимости от того, где, когда и в какой форме радиоактивные отходы (РАО) образуются. Так как многие РАО представляют опасность настолько длительное время, что несут угрозу даже для будущих поколений, нужно также учитывать необходимость дополнительных мероприятий для обеспечения должных контроля и защиты. Поэтому в каждой стране на законодательном уровне определяются нормы и правила по защите населения и окружающей среды от вредного воздействия

РАО, по которым утилизация должна происходить в строго регламентированном порядке (рисунок 1) [1].

Классификация РАО начинается с их разделения согласно физическому состоянию: твердые, жидкие и газообразные. Форма РАО очень сильно влияет на методы их утилизации, например, жидкие отходы могут быть далее классифицированы как водные и органические, твердые подразделены на сухие и влажные и др. Отнесение отходов АЭС к радиоактивным отходам и их классификация осуществляются в соответствии с критериями, установленными в «Основных санитарных правилах обеспечения радиационной безопасности» (таблица 1) [1].



Рисунок 1 - Основные стадии обращения с радиоактивными отходами [1]

Таким образом, к настоящему времени сложился ряд основных, используемых на практике, технологических приемов, позволяющих оптимально проводить обработку радиоактивных отходов. Стандартные технологии, применяемые для обработки радиоактивных отходов, представлены в таблице 1.

Также существуют несколько теоретических идей утилизации радиоактивных отходов, таких как [2]:

- использование повторно — изотопы применяют для создания термоэлектрических радиоизотопных генераторов, облучения продуктов питания. Технология находится в стадии развития.
- трансмутация — переработка ядерных отходов трансурановыми реакторами. Технология требует исследований.
- удаление в космос — заманчивой способ избавиться от опасных для человека и окружающей среды отходов. Идея имеет важные

недостатки: риск поломки ракеты-носителя; высокие финансовые траты; отсутствие международных договорённостей.

Таблица 1 – Стандартные технологии, применяемые для утилизации РАО

Виды отходов		Методы переработки
Твердые	Сжигаемые	Сжигание в печах. Плазменное сжигание. Термохимическая переработка. Сжигание при остекловывании. Кислотное разложение
	Прессуемые Металлические Несжигаемые, непрессуемые	Компактирование и суперкомпактирование Компактирование. Плавление Контейнеризация
Жидкие	Органические сжигаемые	Сжигание, совместное сжигание с твердыми отходами
	Органические несжигаемые	Сорбция на порошках и включение в цементоподобную матрицу, термохимическая переработка
	Водные малосолевые	Очистка (концентрирование) выпаркой, химическим осаждением, сорбцией, селективной сорбцией, мембранным разделением. Цементирование
	Водные высокосолевые	Очистка селективной сорбцией. Цементирование. Битумирование. Остекловывание
Газообразные		Улавливание сорбцией и химическими реагентами

Еще один инновационный способ избавления от РАО был представлен лауреатом Нобелевской премии Карло Руббиа, который за этот способ также был удостоен премии Глобальная энергия 2020 г. Концепция заключается в реакторах на ускорителях (ADS), работающих на тории [3]. В комплексах с ускорителями высокоэнергетические нейтроны производятся за счет реакции расщепления ядер высокоэнергетическими протонами ускорителя (обычно >500 МэВ), соударяющимися с тяжелыми ядрами свинца, свинца-висмута или других элементов, и происходит скалывание нейтронов.

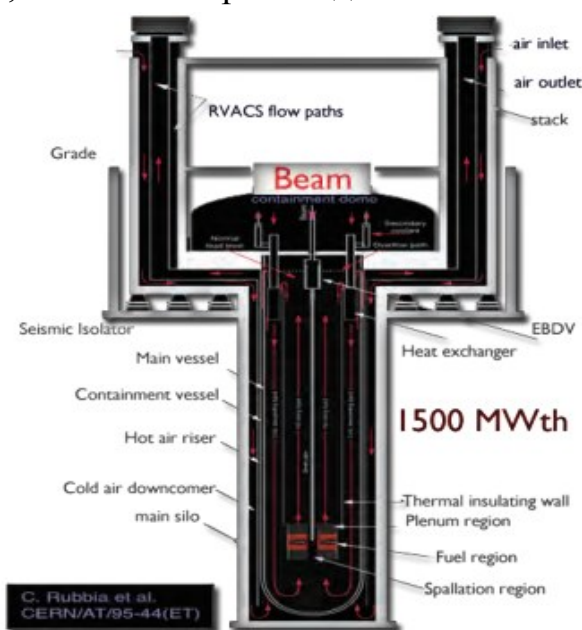


Рисунок 2 - Концепт усилителя энергии Карло Руббиа [3]

При этом до одного нейтрона может быть произведено на 25 МэВ направленного протонного пучка. Эти нейтроны можно направить в реактор, содержащий торий, где нейтроны производят уран-233 и обеспечивают его деление. Если расщепляющийся источник нейтронов окружен топливной сборкой из бланкетов, состоящей из делящихся изотопов урана или плутония (илитория-232, который может конвертироваться в уран-233), то существует возможность поддержания реакции деления. Самоподдерживающуюся реакцию деления можно направить либо на производство энергии, либо на трансмутацию актинидов, образующихся в результате уран-плутониевого топливного цикла [4] (рисунок 2, 3).

Выгоды от такого предложения можно обобщить следующим образом [3, 4]:

- продемонстрировать в промышленных масштабах, что большая часть объема и срока службы существующих ядерных отходов может быть ликвидирована, тем самым снижая риск их глубокого захоронения, наряду с затратами и опасениями, которые они производят;

- продемонстрировать, что можно разработать новую глобальную энергетическую концепцию, достаточную для того, чтобы внести вклад в гармоничное развитие планеты без ущерба для ее хрупкого экологического равновесия;

- минимальная вероятность самопроизвольной реакции деления, т. е. ADS гораздо безопаснее традиционных тепловых реакторов. Он может работать только при прохождении нейтронов, потому что он сжигает материалы, в которых отношение делящихся и захватываемых нейтронов недостаточно высоко для поддержания цепной реакции деления. Также ядерный реактор отключается остановкой протонного пучка, т. е. просто отключением электричества;

- производит гораздо меньше долгоживущих актинидов и эффективно сжигает младшие актиниды;

- основным преимуществом этих реакторов является способность не только производить электроэнергию на порядок дешевле, но также и удешевлять и ускорять процесс утилизации ядерных отходов.

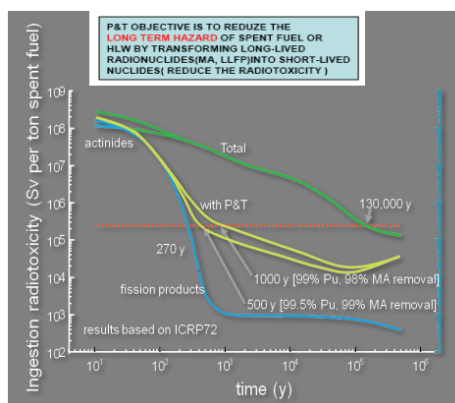


Рисунок 3 - Снижение активности за счет преобразования долгоживущих ядерных отходов [3]

### Заключение

Идея ядерной энергетики, основанной на тории, пока вполне спекулятивна. Сейчас можно лишь приблизительно оценить возможную стоимость энергии, произведенной с использованием тория, в сравнении с энергией, основанной на уране. Явным преимуществом является возможность повторного использования ядерных отходов, что является значительным экономическим и экологическим показателем, но пока сложно с точностью утверждать, будет ли эта система безопасной, ведь она имеет более сложную конструкцию из-за использования ускорителя. Также, хоть система и не оставляет долгоживущих отходов, отработавшее топливо все равно очень радиоактивно. То есть, мы избавляемся от длительно распадающихся соединений, но процесс утилизации-захоронения все равно остается необходимым.

Важная область потенциального применения ADS (расщепление и трансмутация ядерных отходов, особенно актинидов) пока неактуальна, поскольку не существует надежного способа разделения, необходимого для того, чтобы стабильные изотопы не трансмутировали бы в радиоактивные.

### Литература

1. Брылева, В.А. Радиоактивные отходы АЭС. / В.А. Брылева, Н.Д. Кузьмина, Нарейко Л.М. – Серия: атомная энергетика, 2010. 8 с.
2. Утилизация отходов атомной промышленности [Электронный ресурс] / Режим доступа: <https://promvest.info/ru/catalog/utilizatsiya-othodov-atomnoy-promyshlennosti/>. - Дата доступа: 20.04.2021.
3. Y. Kadi. Role of the ADS from the perspective of the International Thorium Energy Committee iThEC [Электронный ресурс] / Режим доступа: [https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/\\_Public/46/098/46098268.pdf](https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/_Public/46/098/46098268.pdf) [Дата доступа 20,04,2021]/. - Дата доступа: 20.04.2021.
4. Андреев, Л. Некоторые вопросы экономических перспектив ториевой ядерной энергетики. / Л. Андреев – Экологическое объединение «Беллона», 2013. С. 17-21.