

УДК 621.039.75

**УТИЛИЗАЦИЯ РАДИОАКТИВНЫХ ОТХОДОВ
DISPOSAL OF RADIOACTIVE WASTE**

И.С. Андреев, Е.Н. Дашкевич

Научный руководитель – В.В. Кравченко, к.э.н., доцент
Белорусский национальный технический университет,
г. Минск, Республика Беларусь
vladmir70@rambler.ru

I. Andreev, E. Dashkevich

Supervisor – V. Kravchenko, Candidate of Economic Sciences, Docent
Belarusian national technical university, Minsk, Belarus

Аннотация: статья рассматривает проблематику утилизации радиоактивных отходов, современные методы утилизации и международный опыт.

Abstract: the article examines the problems of radioactive waste disposal, modern disposal methods and international experience.

Ключевые слова: радиоактивные отходы, утилизация, отработанное ядерное топливо, МАГАТЭ.

Keywords: radioactive waste, disposal, spent nuclear fuel, IAEA.

Введение

Утилизация радиоактивных отходов (РАО) является одной из самых актуальных проблем современной энергетики, стоящих перед обществом, в свете роста атомной энергетики и все более активного применения радиоактивных материалов в различных отраслях. Они несут в себе серьезную опасность для окружающей среды и здоровья населения в будущем, если не контролировать их накопление. Чтобы не допускать таких ситуаций крайне необходимо применять инновационные и безопасные методы обращения с радиоактивными отходами. Для понимания данной проблемы необходимо изучить возможные современные подходы к утилизации РАО и международный опыт в данной сфере.

Основная часть

РАО классифицируются в зависимости от нескольких основных критериев: уровня радиоактивности (низкоактивные, среднеактивные и высокоактивные), периода полураспада (короткоживущие и долгоживущие), агрегатному состоянию (твердые, жидкие и газообразные). Основными источниками РАО являются атомные электрические станции (АЭС), предприятия, занимающиеся переработкой отработанного ядерного топлива (ОЯТ), научно-исследовательские центры, медицинские учреждения и промышленные объекты. Главными источниками отходов являются АЭС и предприятия по переработке ОЯТ, которые производят высокоактивные отходы в ходе эксплуатации и выделения урана и плутония из ОЯТ соответственно [1].

Четкое понимание источников и характеристик РАО необходимо для разработки эффективных стратегий их утилизации. Современные методы

утилизации радиоактивных отходов направлены на достижение трех основных целей: минимизацию объема отходов, надежную изоляцию радионуклидов от окружающей среды и снижение их потенциальной опасности. Основные подходы включают временное хранение, кондиционирование, захоронение, переработку отработавшего ядерного топлива (ОЯТ) и трансмутацию [2]:

- Временное хранение представляет собой начальный этап управления РАО, позволяющий снизить их активность за счет естественного распада короткоживущих радионуклидов. Хранение осуществляется в специально оборудованных хранилищах, находящихся на поверхности земли или под землей, обеспечивающих защиту от внешних воздействий и предотвращающих распространение радиоактивных веществ. Однако временное хранение является лишь промежуточным решением, требующим дальнейшей обработки и утилизации.

- Кондиционирование включает комплекс мер по подготовке РАО к безопасному долговременному хранению или захоронению. Основная цель кондиционирования – преобразовать РАО в более стабильную, нерастворимую и компактную форму, что снижает риск их утечки в окружающую среду. Наиболее распространенными методами кондиционирования РАО являются:

1. Цементирование: смешивание РАО с цементным раствором для образования прочного монолита, препятствующего вымыванию радионуклидов. Этот метод подходит для низко- и среднеактивных отходов.

2. Битумирование: инкапсуляция РАО в битумную матрицу, обеспечивающую водонепроницаемость и химическую стойкость. Метод используется для среднеактивных отходов и некоторых видов низкоактивных отходов.

3. Остекловывание: преобразование высокоактивных отходов в стеклообразную массу при высоких температурах (порядка 1200°C). Стекло обладает высокой химической стойкостью и способностью надежно удерживать радионуклиды в течение длительного времени. Этот метод широко применяется для утилизации высокоактивных отходов, образующихся при переработке ОЯТ.

4. Иммобилизация в керамические матрицы: альтернативный метод для высокоактивных отходов, обеспечивающий еще более высокую химическую стойкость и долговечность по сравнению с остекловыванием.

- Захоронение: наиболее перспективный и долгосрочный метод утилизации РАО, заключающийся в размещении кондиционированных отходов в глубоких геологических формациях, обеспечивающих надежную изоляцию от окружающей среды на протяжении тысяч и миллионов лет. Выбор геологической формации является критически важным для обеспечения безопасности захоронения. Основные требования к формации включают низкую проницаемость, отсутствие активной сейсмической деятельности, химическую стабильность и способность задерживать радионуклиды (сорбция). Рассматриваются различные типы геологических формаций, такие как соляные отложения, гранит и глинистые породы. Концепция глубокого

геологического захоронения подразумевает создание многобарьерной системы защиты, включающей инженерные и природные барьеры.

- **Переработка ОЯТ:** позволяет извлекать из ОЯТ ценные компоненты (уран и плутоний) для повторного использования в качестве ядерного топлива, тем самым снижая объем образующихся высокоактивных отходов и уменьшая зависимость от добычи природного урана. Тем не менее, процесс переработки также приводит к образованию РАО, которые требуют дальнейшей утилизации.

- **Трансмутация:** Этот метод, находящийся на стадии исследований и разработок, предполагает преобразование долгоживущих радионуклидов в короткоживущие или стабильные путем облучения нейтронами в специальных реакторах или ускорителях. Трансмутация может существенно сократить период времени, в течение которого РАО представляют опасность.

Утилизация РАО представляет собой сложную и многогранную задачу, сопровождаемую рядом серьезных вызовов:

- **Высокая стоимость:** разработка, строительство и эксплуатация объектов для утилизации РАО (геологических хранилищ, предприятий по переработке ОЯТ, установок для трансмутации) требуют значительных финансовых вложений, которые могут исчисляться миллиардами долларов.

- **Технологические сложности:** создание и внедрение эффективных и безопасных технологий трансмутации, остекловывания высокоактивных отходов и захоронения РАО в сложных геологических условиях требуют учета множества факторов, таких как коррозионная стойкость материалов, миграция радионуклидов в геологических формациях и долгосрочная стабильность хранилищ.

- **Общественное мнение:** негативное отношение населения к размещению объектов по утилизации РАО, вызванное страхом перед радиацией и недоверием к технологиям, создает значительные преграды для реализации проектов.

- **Трансграничные вопросы:** транспортировка РАО через международные границы вызывает обеспокоенность у соседних стран и требует соблюдения международных норм и правил.

- **Долгосрочная безопасность:** обеспечение безопасности хранилищ РАО на протяжении тысяч и миллионов лет представляет собой сложную задачу, требующую учета геологических изменений, климатических колебаний и возможных антропогенных воздействий.

- **Отсутствие общемирового консенсуса:** в мире отсутствует единый подход к утилизации высокоактивных отходов, что затрудняет международное сотрудничество и обмен опытом.

Несмотря на указанные трудности, утилизация отходов открывает значительные перспективы для разработки новых материалов, совершенствования технологий по переработке РАО, развития осведомленности общественности касательно РАО и международных стандартов в области управления РАО.

Международный опыт в утилизации РАО велик, в нем есть как примеры для подражания, так и извлеченные уроки. Разные страны применяют разные

подходы к утилизации РАО, учитывая свои специфические условия и приоритеты, связанные с окружающей средой.

- Финляндия: строит первое в мире геологическое хранилище для ОЯТ "Олкилуото", являющееся передовым примером глубокого геологического захоронения.

- Швеция: планирует строительство геологического хранилища "Форсмарк", аналогичного финскому проекту.

- Франция: активно перерабатывает ОЯТ, уменьшая объем высокоактивных отходов и извлекая уран и плутоний для повторного использования.

- Япония: стремится к созданию замкнутого ядерного топливного цикла, но сталкивается с трудностями в реализации этой концепции.

- США: хранят ОЯТ на территориях АЭС и разрабатывают концепцию геологического хранилища, хотя проект "Юкка-Маунтин" был закрыт.

- Россия: перерабатывает ОЯТ и разрабатывает технологии трансмутации [3].

- Беларусь: отправляет ОЯТ в Россию для переработки, после чего получает его в более выгодном виде – как экономически, так и экологически. После чего будет размещать его в захоронении.

Международное сотрудничество в рамках МАГАТЭ имеет ключевое значение для обмена опытом и разработки стандартов безопасности в области утилизации РАО.

Заключение

Утилизация РАО остается одной из наиболее сложных и актуальных проблем современности, требующей комплексного, междисциплинарного и ответственного подхода. Для обеспечения устойчивого развития атомной энергетики и защиты окружающей среды от потенциального радиоактивного загрязнения необходимы постоянные усилия по совершенствованию технологий утилизации РАО, укреплению нормативно-правовой базы и повышению уровня общественной информированности и доверия. Ключевыми направлениями дальнейших исследований и разработок должны стать создание новых материалов для контейнеров и барьерных систем, оптимизация процессов кондиционирования и трансмутации РАО, а также разработка надежных методов мониторинга и контроля состояния геологических хранилищ. Успешное решение проблемы утилизации РАО является залогом безопасного и устойчивого будущего для человечества. Только объединив наши знания, ресурсы и усилия, мы сможем обеспечить эффективное и безопасное обращение с радиоактивными отходами, минимизируя риски для будущих поколений и создавая условия для развития безопасной и устойчивой энергетики.

Литература

1. IAEA, Radioactive Waste Management Glossary: [сайт]. – Австрия, 2021. – URL: <https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/PUB2077/web.pdf> (дата обращения 11.04.2025).

2. World Nuclear Association. Radioactive Waste Management: [сайт]. – Англия, 2022. – URL: <https://world-nuclear.org/information-library/nuclear-fuel-cycle/nuclear-waste/radioactive-waste-management> (дата обращения 11.04.2025).
3. NEA/OECD, Radioactive Waste Management: [сайт]. Париж, 2020. – URL: [https://one.oecd.org/document/NEA/RWM/R\(2020\)1/en/pdf](https://one.oecd.org/document/NEA/RWM/R(2020)1/en/pdf) (дата обращения 11.04.2025).