

<https://doi.org/10.52676/1729-7885-2025-3-103-112>

УДК 621.039

АНАЛИЗ ТЕХНОЛОГИЙ ОБРАЩЕНИЯ С РАО И ОЯТ В КОНТЕКСТЕ РАЗВИТИЯ АТОМНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ

М. К. Сейсенбаева*, В. А. Поспелов, Д. И. Абулгазинова, Ю. Ю. Бакланова

Филиал «Институт атомной энергии» РГП НЯЦ РК, Курчатов, Казахстан

** E-mail для контактов: seysenbaeva@nnc.kz*

В статье проводится анализ проблемы обращения с радиоактивными отходами и отработавшим ядерным топливом в контексте строительства АЭС в Казахстане. Она подчеркивает отсутствие комплексной стратегии обращения с отходами в стране, несмотря на международные соглашения. В работе рассматриваются методы обращения с радиоактивными отходами и отработавшим ядерным топливом на действующих АЭС, включая очистку выбросов, переработку отходов и условия безопасного хранения топлива. Анализируются традиционные и инновационные технологии, такие как переработка отработавшего ядерного топлива и различные варианты его хранения.

Ключевые слова: радиоактивные отходы, отработавшее ядерное топливо, переработка, захоронение, геологические формации, атомная электростанция.

ВВЕДЕНИЕ

Промышленная деятельность, особенно в сфере ядерной энергетики, сопровождается образованием радиоактивных отходов (РАО) и отработавшего ядерного топлива (ОЯТ). Их безопасное обращение требует применения специализированных технологий. Накопление ОЯТ в странах с развитой ядерной промышленностью достигло значительных объемов, с ежегодным приростом около 7 тыс. тонн тяжелых металлов (тТМ), и общим объемом, превышающим 300 тыс. тонн [1]. Это создает неотложную потребность в разработке и реализации стратегий для долгосрочного безопасного хранения ОЯТ, включая строительство глубоких геологических хранилищ. Примером активных усилий в этом направлении является деятельность ряда стран: Франции, Испании, Швейцарии, Германии, Великобритании, Украины и Японии, которые проводят исследования и выполняют проектирование пунктов геологического захоронения РАО и ОЯТ.

Планируемое строительство атомной электростанции (АЭС) в Республике Казахстан (РК), делает вопрос обращения с РАО и ОЯТ особо актуальным. Несмотря на наличие нормативно-правовой базы [2–6] и участие в международных соглашениях [7–8], Казахстан пока не располагает ни инфраструктурой по переработке ОЯТ, ни пунктами окончательной изоляции отходов. Накопленные отходы, включая ОЯТ реактора БН-350, в настоящее время хранятся в долговременном режиме без принятого решения о конечной утилизации.

Целью настоящей работы является анализ возможных вариантов обращения с РАО и ОЯТ в Республике Казахстан с учётом международного опыта, технических и экономических возможностей, а также общественного восприятия, что обусловлено приоритетной задачей разработки комплексной стратегии

безопасного управления радиоактивными отходами в условиях развития ядерной энергетики.

АНАЛИЗ МЕТОДОВ ОБРАЩЕНИЯ С РАО

Основной задачей при обращении с РАО и ОЯТ, образующимися в результате эксплуатации АЭС, является исключение негативного воздействия на человека и возможности загрязнения окружающей среды радионуклидами, входящими в состав отходов, на весь период их потенциальной опасности. В связи с этим ОЯТ и РАО с момента их образования на АЭС претерпевают целый ряд процедур обращения. Основные стадии процесса обращения с РАО (рисунок 1), начиная с момента их образования и до захоронения представлены МАГАТЭ в серии учебных курсов [9–12].

Методы обращения с газообразными радиоактивными отходами (ГРО). Для минимизации локального радиоактивного загрязнения атмосферы на АЭС применяется метод рассеивания выбросов с помощью высоких труб. Этот процесс основан на разбавлении радиоактивных веществ атмосферным воздухом. Рассеивание достигается за счет первоначального разбавления кинетической энергией выброса и турбулентной диффузии, которая зависит от вертикальных потоков воздуха и внешних факторов, таких как ветер и температура. Для предотвращения «обратной тяги» необходимо, чтобы скорость выброса превышала критическое значение, зависящее от скорости ветра. Характер движения газов определяется температурными изменениями в слое воздуха, которые влияют на рассеивание. Максимальные концентрации загрязнений наблюдаются на расстоянии от 10 до 30 высот трубы по направлению ветра. Для защиты населения вокруг АЭС создаются санитарно-защитные зоны радиусом от 3 до 7 км, размеры которых определяются на основе метеорологических исследований и расчетов [10].

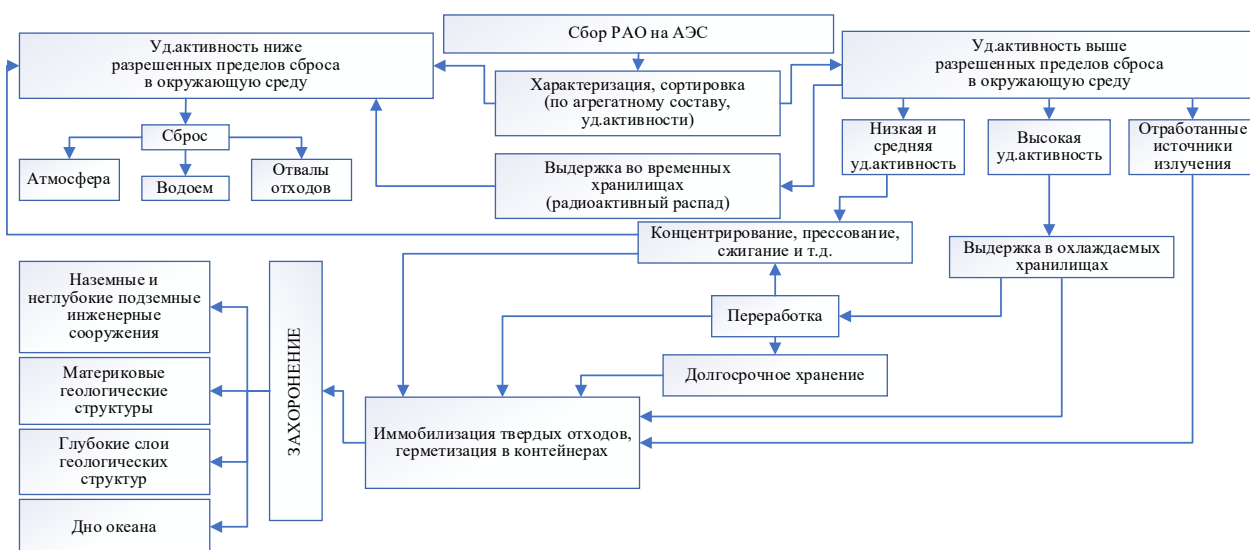


Рисунок 1. Обращение с РАО

Очистка вентиляционного воздуха на АЭС от аэрозолей обычно осуществляется методами осаждения или фильтрации. Наиболее распространенные методы осаждения частиц из газового потока включают:

- *Гравитационное осаждение*: происходит в пылеуловителях, представляющих собой камеры большого объема, где частицы оседают под действием силы тяжести (рисунок 2).

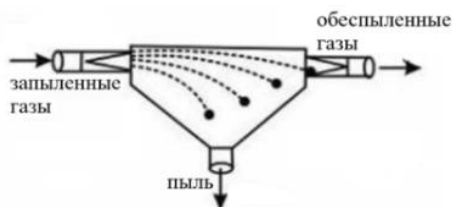


Рисунок 2. Гравитационное осаждение

- *Центробежное (рисунок 3а) и инерционное (рисунок 3б) отделение*: использует инерционные силы, возникающие при изменении направления потока воздуха или его спиральном движении в циклонах.

- *Промывка и влажная очистка*: включает различные способы контакта пыли с промывающей жидкостью, такие как впрыскивание, контакт с жидкостными поверхностями и барботаж.

- *Электростатическое осаждение*: основано на придании частицам пыли электрического заряда и их последующем сборе на заземленных пластинах.

- *Локализация и выдержка в газодержках*: применяется для удаления короткоживущих радионуклидов, таких как аргон, криптон, ксенон, йод, кислород и азот.

- *Адсорбция радиоактивных изотопов йода*: использует различные твердые вещества, такие как активированный уголь, молекулярные сита и силикагель, для улавливания йода из газовых потоков.

- *Адсорбционный метод очистки от радиоактивных газов*: применяется для очистки отходящих газов АЭС с водо-водяными реакторами, в частности, для удаления криптона и ксенона (рисунок 4).

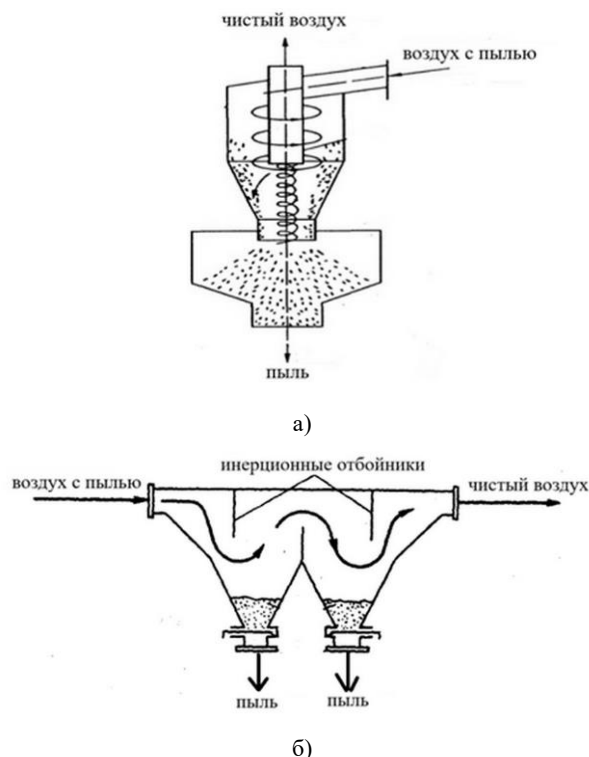
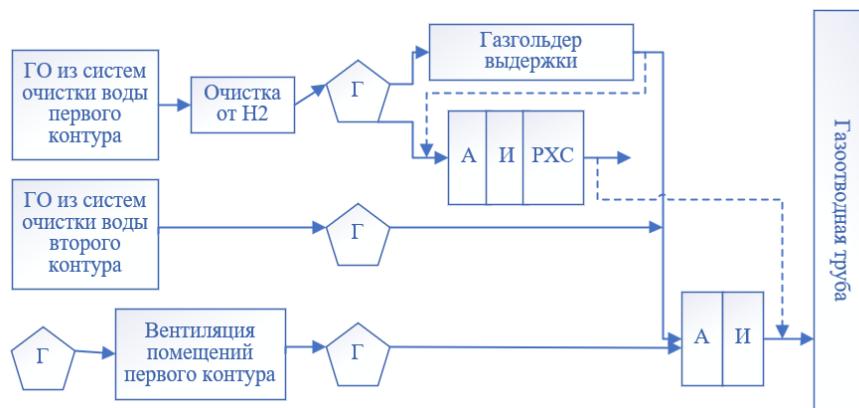


Рисунок 3. Сухое центробежное (а) и инерционное (б) осаждение



Г – фильтр грубой очистки; А (И) – аэрозольный (йодный) фильтр; РХС – радиохроматографическая система очистки газов

Рисунок 4. Схема обработки и удаления газообразных продуктов на АЭС с водо-водяным реактором

Примеры систем очистки на АЭС:

– На финской АЭС «Ловица» используется циркуляционный газовый контур с платиновым катализатором для дожигания радиолитического водорода и система газоочистки с тремя параллельными нитками.

– На Нововоронежской и Кольской АЭС применяются адсорберы большого объема для очистки от инертных газов.

Эти методы и системы обеспечивают эффективное снижение радиоактивного загрязнения воздуха на АЭС, поддерживая безопасность окружающей среды и населения.

Методы обращения с твердыми радиоактивными отходами (ТРО)

Основные методы обработки ТРО (сжигание, прессование, переплавка) существенно уменьшают объем отходов, которые затем заключаются в матрицы для безопасного хранения, транспортировки и захоронения. Сжигание наиболее эффективно для горючих ТРО, уменьшая их объем в 50-100 раз за счет высокотемпературного разрушения и окисления с последующей очисткой выбросов.

Ключевые аспекты сжигания:

– Коэффициент избытка воздуха (α): Определяет режим сжигания. При $\alpha > 1$ происходит полное сжигание, при $\alpha < 1$ – пиролиз (разложение без кислорода)

$$\alpha = M_{\text{возд.}} / M_{\text{стех.возд.}}$$

где $M_{\text{возд.}}$ – масса поставляемого воздуха в зону горения, $M_{\text{стех.возд.}}$ – расчетная стехиометрическая масса воздуха для полного окисления горючих компонентов отходов;

– Эффективность сжигания (E_c): Оценивается по содержанию углекислого газа (CO_2) и угарного газа (CO) в отходящих газах. Идеальное сжигание – полное отсутствие CO .

$$E_c = \frac{[\text{CO}_2] - [\text{CO}]}{[\text{CO}_2]} \cdot 100\%$$

– Ограничения по активности: Существуют ограничения на удельную активность отходов для сжигания (рекомендовано МАГАТЭ: до $3,7 \cdot 10^5$ Бк/кг по α -нуклидам и до $3,7 \cdot 10^6$ Бк/кг по β -излучающим нуклидам). Превышение этих значений усложняет газоочистку и делает процесс экономически невыгодным [9].

В настоящее время наиболее распространены камерные колосниковые (для сжигания на решетках) и вертикальные шахтные (для частично несортированных отходов с плазменной плавкой золы) печи. Термический метод плавления уменьшает объем ТРО и очищает металл от радиоактивных загрязнений, переводя их в шлак для возможного повторного использования металла.

Прессование ТРО является одним из наиболее продуктивных методов уменьшения объема отходов, позволяющий сократить расходы на транспортировку и затраты на строительство и эксплуатацию хранилищ РАО. Прессы низкого давления используются для сжатия мягких материалов (бумага, пластик). Суперпрессование, при давлении 10 МН или выше – сжимает более твердые материалы, включая металл и бетон. Для прессования обычно используют вертикальные и горизонтальные прессы. Широкое распространение получило прессование ТРО в кипы с постоянной площадью сечения и толщиной, определяемой количеством отходов. Такие установки используются в Нидерландах и Великобритании. В национальной лаборатории Айдахо и на заводе в Роки-Флетс ТРО прессуют в тюки. Наиболее распространено прессование ТРО, проводимое внутри стандартизованных бочек, как, например, в Сакле, Франция, и в Маундской лаборатории, США.

Однако, текущие тенденции в обращении с ТРО направлены на создание комплексных систем, интегрированных непосредственно в инфраструктуру АЭС. Современные комплексы по переработке ТРО, такие как на Ленинградской и Ново-Воронежской АЭС-2, включают в себя:

– Сортировку и разделение отходов.

- Сжигание горючих отходов.
- Прессование негорючих отходов.
- Иммобилизацию (заклучение в матрицу) обработанных отходов.

- Временное хранение.

Эти комплексы обеспечивают эффективное и безопасное обращение с ТРО, минимизируя их воздействие на окружающую среду [9, 11].

Методы обращения с жидкими радиоактивными отходами (ЖРО)

Два принципа обращения с ЖРО на АЭС: максимальный возврат очищенной воды и концентрирование радиоактивности для уменьшения объема, превосходящего объем ТРО.

Для очистки ЖРО используются различные методы: термические, сорбционные, мембранные (фильтрация, обратный осмос), ионный обмен, электролиз, упаривание. Из-за сложности эффективной очистки одним методом, они применяются комплексно, образуя последовательную систему [9, 13, 14].

На АЭС предусмотрена специальная канализация (СК) для сбора и транспортировки ЖРО на переработку или хранение, исключая их попадание во внешнюю среду. СК включает в себя, во-первых, баки-накопители и изолированные от всех других систем трубопроводы для транспортировки радиоактивных стоков в эти баки, и, во-вторых, оборудование и трубопроводы для передачи собранных ЖРО из баков-накопителей к системам спецводоочистки (СВО) или в хранилища жидких отходов. СВО делятся на:

- технологические (очистка теплоносителя реактора, бассейнов),
- для обработки ЖРО (трапные, обмывочные воды, воды спецрабочих).

Для дезактивации ЖРО применяются методы: осаждение, дистилляция, фильтрация (ионообменные смолы), мембранные технологии. Мембранная очистка включает традиционную (тупиковую) и перекрестно-поточную фильтрацию.

Ионоселективная очистка является альтернативным методом цементирования и битумирования кубовых остатков, являющихся продуктом выпарки различных ЖРО, образующихся на АЭС (рисунок 5).

Хранение ЖРО требует строгого контроля герметичности, водно-химического режима и вентиляции. Конструкция хранилищ исключает утечки в грунт и подземные воды, предусматривая системы контроля и дублирования. В связи с трудностями хранения ЖРО, их максимально переводят в ТРО следующими методами:

- глубокое упаривание (за счет интенсивной сушки получаемые ТРО пористы, гигроскопичны и легко растворяются под действием воды, поэтому их надо хранить в герметичных контейнерах);

- цементирование (жидкие солевые концентраты перемешиваются с цементом в аппаратах типа бетономешалок в течение 15–30 минут, а затем смесь выгружают в формы или металлическую тару). Требования к отвержденным отходам достаточно высоки. Основные показатели качества матричных материалов с включенными в них РАО установлены в [6];

- битумирование (ЖРО в разогретом состоянии при температуре 120–150 °С равномерно смешиваются с битумом. В результате образуются твердые, влагостойкие блоки, содержащие радиоактивные соли до 50% общей массы);

- остекловывание (для высокоактивных отходов). Отходы поступают в установку, где нагреваются, обезвоживаются и превращаются в порошок. Этот порошок на следующем шаге обработки смешивается со стеклообразующими добавками (фосфорной кислотой или боросиликатным флюсом). Затем смесь сплавляется и сиропообразный продукт выливается в контейнер из нержавеющей стали. После охлаждения и затвердевания остеклованных отходов контейнер с этой массой закрывается и дезактивируется снаружи;

- сжигание (органические ЖРО сжигаются в специальных установках с очисткой образующихся газов от радиоактивных и других вредных веществ. Горючие ЖРО (масла), распыляемые через форсунку, сжигают в камерной колосниковой печи с избытком воздуха при температуре 850–950 °С. Затем газы охлаждают до температуры 350–400 °С и подвергают очистке от радиоактивных аэрозолей, кислых газов, высокотоксичных веществ. Зольный остаток, летучая зола и сухие соли, уловленные аппаратами газоочистки, цементируются).

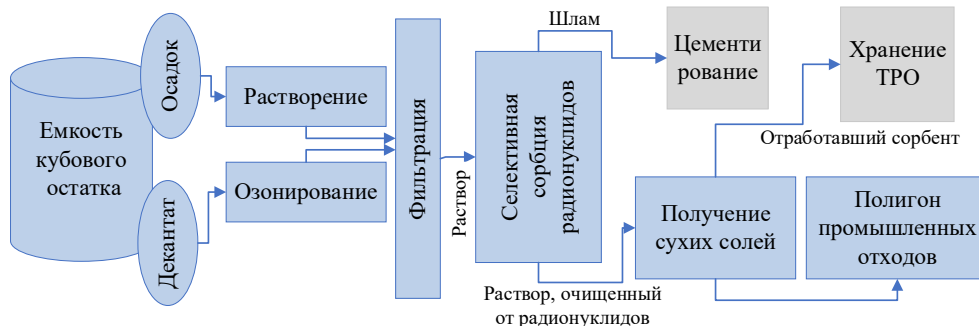


Рисунок 5. Принципиальная схема технологии ионоселективной очистки кубовых остатков

Анализ методов обращения с ОЯТ

ОЯТ представляет собой материал, содержащий высокую концентрацию радиоактивных изотопов, что требует применения специализированных технологий обращения. Основные этапы обращения с ОЯТ приведены на рисунке 6 [15].

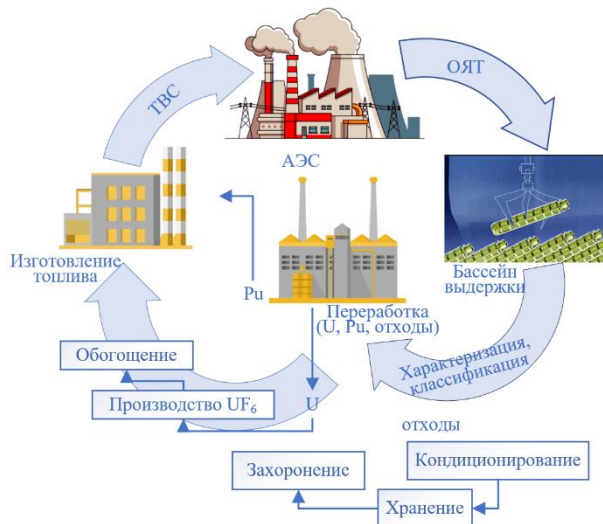


Рисунок 6. Обращение с ОЯТ

Особенности обращения с ОЯТ заключаются в высоком уровне радиоактивности и тепловыделения, что требует обеспечения долгосрочной безопасности на протяжении тысяч лет. Сложность и высокая стоимость технологий обращения, а также международный контроль, обусловленный возможностью использования ОЯТ для создания ядерного оружия, делают этот процесс особенно ответственным.

Сегодня существует два основных варианта обращения с ОЯТ, каждый из которых имеет свои преимущества и недостатки:

- переработка и регенерация с выделением урана и плутония для использования в составе свежего топлива;
- «прямое» захоронение после промежуточного хранения в течение нескольких десятилетий.

Ряд стран (например, Франция, Индия, Япония и Россия) выбрали вариант переработки и регенерации, другие (например, Финляндия, Швеция и, до не давнего времени США) решили рассматривать ОЯТ в качестве отходов и выбрали вариант «прямого» захоронения. Большинство стран, однако, еще не определились и продолжают хранить ОЯТ до выбора окончательного варианта. В таблице 1 приведены основные перерабатывающие предприятия с указанием мощности переработки и типа перерабатываемого ОЯТ [16].

Следует отметить, что более 95% перерабатываемого топлива в мире относится к ОЯТ легководных реакторов (ЛВР) и газографитных реакторов (ГТР) с остаточным обогащением по ^{235}U не превышающим 1%. Остальная доля ОЯТ нарабатывается на таких

установках как: реактор большой мощности канальный (РБМК), тяжеловодный (ТВР), реактор на быстрых нейтронах (БН).

Таблица 1. Основные перерабатывающие мощности ОЯТ

Тип реактора	Страна	Установка по переработке	Мощность, тонн т.м./год	Примечание
ЛВР	Великобритания	Thorp	600	прекратил работу в 2018 г.
ГТР		Magnox	1500	прекратил работу в 2022 г.
ТВР	Индия	Plutonium Plant	–	выведен из эксплуатации
ТВР		PREFRE-I	100	выведен из эксплуатации
ТВР		PREFRE-II	100	
ТВР		KARP	100	
ТВР		KARP-II	100	
ТВР		INRP	600	на стадии строительства
ЛВР	Китай	Jiuquan	50	
ЛВР		Jinta	200/4×200	ожидается ввод в эксплуатацию в 2025 г. 1-ой очереди мощностью 200 тТМ с возможным расширением до 800 тТМ
ЛВР	Франция	UP-1	600	прекратил работу в 1997 г.
ГТР		UP2-400	400	выведен из эксплуатации
ЛВР		UP-2	800	
ЛВР		UP-3	800	
ЛВР		Токаймура	90	
ЛВР	Япония	Роккашо	800	ожидается ввод в эксплуатацию в 2025 г.
ЛВР, РБМК, БН	Россия	РТ-1	400	
ЛВР		Опытно-демонстрационный центр (ОДЦ), 1-ый пусковой комплекс	5	
ЛВР		ОДЦ, 2-ой пусковой комплекс	250	ожидается ввод в эксплуатацию в 2025 г.

Опыт промышленной переработки ОЯТ реакторов БН имеется только у Российской Федерации (на регулярной основе осуществляется переработка ОЯТ БН-600, ранее – БН-350) и Франции – ОЯТ реактора Феникс, остановленного в 2010 году.

Независимо от выбранной стратегии, обращение с ОЯТ всегда будет начинаться с выдержки в приреакторных бассейнах в течение как минимум 9–12 месяцев после извлечения из активной зоны, и в большинстве случаев, включать в себя хранение от нескольких лет до нескольких десятков лет до вывоза с площадки АЭС.

«Мокрые» хранилища относятся к обоим типам хранилищ: приреакторным и внереакторным хранилищам. К основным технологическим операциям в «мокром» внереакторном хранилище относятся:

- получение контейнеров, выгрузка и размещение ОЯТ;
- хранение ОЯТ под водой (бассейн);
- эксплуатационные действия (радиационный мониторинг, охлаждение и очистка воды, обращение с твердыми РАО, вентиляция, энергообеспечение).

ОЯТ поступает в хранилище в транспортировочных контейнерах, которые могут содержать как отдельные тепловыделяющие сборки (ТВС), так и многоэлементные системы ТВС. Для выгрузки используются «мокрая» и «сухая» технологии. Бассейн-хранилище представляет собой укрепленную бетонную конструкцию, обычно расположенную на уровне поверхности грунта. Большинство бассейнов имеют внутреннее покрытие из нержавеющей стали или эпоксидной резины. Топливо в них хранится либо на дне бассейна (в чехлах или стеллажах), или подвешено на металлическом перекрытии. Вода в бассейне подвергается постоянному контролю и очистке. Для изоляции топлива применяются чехлы или контейнеры. При плотном заполнении хранилища используются нейтронные поглотители. Время хранения топлива в бассейне зависит от особенностей бассейна и требований к системе обращения, составляя около 40 лет для топлива в циркониевых оболочках [17].

В отличие от «мокрого» хранения, хранить ОЯТ «сухим» способом безопаснее и дешевле. Существуют различные типы сухого хранения:

- *Вертикальные ячейки*: невентилируемые (с 1977 г. – простые, но менее эффективные), вентилируемые (с 1993 г. – контейнеры с ОЯТ в бетонных ячейках с естественной вентиляцией).
- *Металлические контейнеры* (с 1986 г.): герметичные модули, обеспечивающие радиационную защиту и теплоотвод. Используются для хранения и транспортировки. Размещаются вертикально или горизонтально.
- *Железобетонные контейнеры* (с 1996 г.): массивные контейнеры с бетонным заполнением, обеспечивающие радиационную защиту и теплоотвод. Используются для хранения и транспортировки.
- *Вертикальные шахтные хранилища* (с начала 1980-х годов): ОЯТ размещается в шахтах, заглубленных в землю. Грунт обеспечивает радиационную защиту и теплоотвод.

– *Горизонтальные ячейки* (с начала 1990-х годов): ОЯТ упаковывается в герметичные чехлы и пены, затем размещается в бетонных модулях на поверхности. Бетон обеспечивает радиационную защиту, а естественная конвекция воздуха — пассивный теплоотвод.

Глобальное распределение технологий «сухого» хранения ОЯТ показана на рисунке 7. В настоящее время наибольшее распространение получили технологии хранения ОЯТ в вертикальных хранилищах, а также в железобетонных контейнерах, пригодных не только для хранения, но и для транспортировки ОЯТ [1].



Рисунок 7. Технологии «сухого» хранения

Параллельно совершенствованию технологий хранения ОЯТ развивается и его переработка для уменьшения объема РАО, снижения долгосрочной опасности (преобразование радионуклидов) и извлечения ценных урана и плутония для повторного использования.

В мире существует две крупных перерабатывающих установки, каждая мощностью 800 тТМ ОЯТ, которые находятся на заводе Ла Аг во Франции. Еще одна аналогичная установка находится на этапе пуска наладки в Роккашю (Япония); меньшие мощности есть в Китае, Индии, Японии, и России. Извлеченные уран и плутоний используются в МОКС-топливе (особенно во Франции – около 15% электроэнергии). США планируют строительство промышленного завода по переработке (компания «Окло»). Россия модернизирует комплексы РТ-1 и ОДЦ на производственном объединении «Маяк» [1].

Методы переработки облученного топлива можно классифицировать как водные (висмут-фосфатный, в основе которого лежит окислительно-восстановительный процесс ацетатного осаждения уранил-триацетата урана, экстракция аминами, аква-фтор-процесс и др.) и неводные (возгонка фторидов, плавка-рафинирование с селективным окислением, электролиз в солевых расплавах). В промышленном масштабе реализована только гидрометаллургическая технология переработки ОЯТ тепловых реакторов – так называемый Пьюрекс-процесс (рисунок 8), в основе которого лежит жидкостная экстракция с использованием экстрагента – раствора трибутилфосфата (ТБФ).

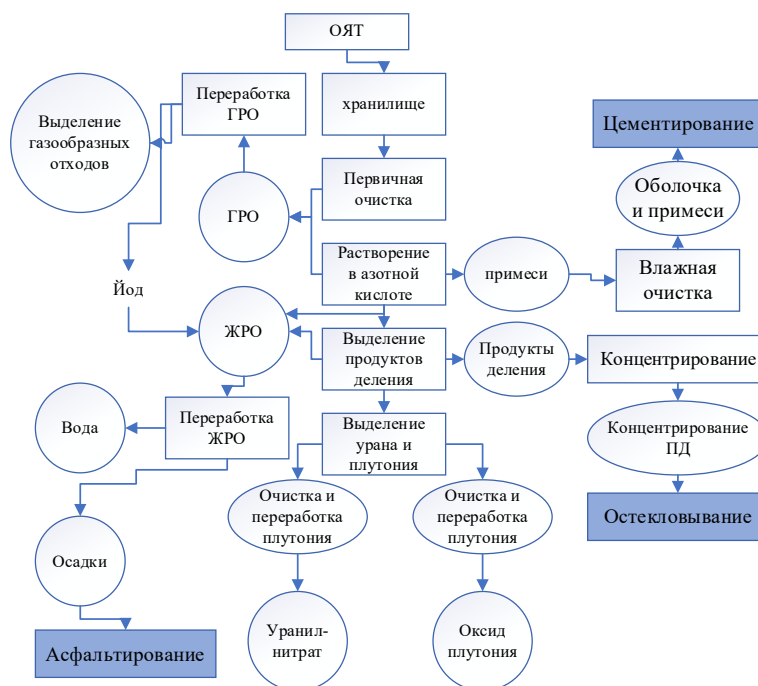


Рисунок 8. Схема Пьюрекс-процесса

Основные стадии Пьюрекс-метода: разборка отработанных тепловыделяющих сборок и резка тепловыделяющих элементов (в основном механическим методом); предварительное окисление ОЯТ (волоксидация, переход UO_2 в U_3O_8); растворение оксидного ОЯТ в азотной кислоте; экстракционная переработка (циклы «экстракция – реэкстракция»).

После растворения тепловыделяющих элементов в азотной кислоте образуется жидкость, содержащая U^{VI} , Pu^{IV} , продукты деления, которую затем экстрагируют смесью ТБФ в керосине (рисунок 9). При этом $\text{U}(\text{VI})$, $\text{Pu}(\text{IV})$, и частично продукты деления переходят в органическую фазу, а основная часть продуктов деления остается в водной фазе. Затем плутоний восстанавливают гидразином (NH_2OH) до Pu^{3+} , а уран – до U^{4+} . Вновь проводят экстракцию ТБФ в керосине. Уран и четырехвалентные продукты деления переходят в органическую фазу, трехвалентный плутоний экстрагируется плохо и остается в водном растворе. U^{4+} реэкстрагируют водой. Дальнейшая очистка плутония и урана проводится экстракцией ТБФ и реэкстракцией водой и, наконец, хроматографически.

Заключительным этапом обращения с ОЯТ и РАО является его захоронение. В настоящее время в мировой практике в основном рассматривается концепция захоронения в глубоких геологических формациях в пунктах захоронения (ПЗРО) с применением многочисленных взаимодополняющих инженерных барьеров [19]. В зависимости от конструкции ПЗРО делятся на два типа – шахтные и скважинные. Как правило, в шахтных хранилищах отходы размещают на глубине от 500 до 1000 м. В скважинных хранилищах интервал глубин для размещения РАО составляет 2000–4000 м.

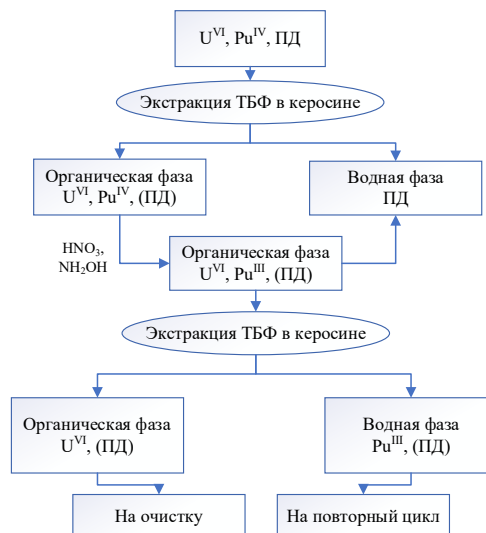


Рисунок 9. Упрощенная схема Пьюрекс-процесса

Надежная защита окружающей среды от отрицательного воздействия ОЯТ обеспечивается системой искусственных и естественных барьеров. Под искусственными (инженерными) барьерами понимают: 1) иммобилизирующую матрицу, в которую заключено радиоактивное вещество; 2) металлический контейнер и 3) искусственное заполнение пространства между контейнерами и геологической (поверхностной или подземной) средой. Для материала матрицы используют цемент, битумы, фосфатные и боросиликатные стекла. Заполнитель между контейнером и хранилищем выполняет многоцелевые задачи: снижает тепловое воздействие, затрудняет доступ воды

и водообмен, буферизует химический состав, перераспределяет напряжения и, главное, сорбирует щелочные радионуклиды, обеспечивая их удержание при коррозии. Для урана и трансурановых элементов хорошим поглотителем является бентонитовая глина и горные породы, содержащие в повышенных количествах углистые вещества.

Последним и главным барьером, обеспечивающим экологическую безопасность подземных (и приповерхностных) хранилищ для РАО, служит толща горных пород, отделяющих их от биосферы (геологический барьер).

Проекты создания хранилищ в глубоких геологических формациях в разных странах находятся на различных стадиях реализации – от выбора площадки для строительства до рассмотрения заявки на сооружение и эксплуатации установки регулирующим органом.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

В аналитическом обзоре сформированы данные по возможным вариантам обращения с РАО и ОЯТ для кандидатных ядерных реакторов АЭС Республики Казахстан. Методы обращения с ОЯТ и РАО были изучены применительно к водо-водяным энергетическим реакторам поколения III и III+.

В случае наиболее распространенного на сегодняшний день открытого ядерного цикла ОЯТ не перерабатывается и после промежуточной выдержки в пристанционных бассейнах направляется на «сухое» хранение в специальные хранилища или хранилища, расположенные при АЭС, которое может длиться десятилетиями. После длительного хранения ОЯТ предполагается направлять на окончательное захоронение. Данный подход осуществляется в настоящее время в Республике Казахстан в отношении ОЯТ реакторной установки БН-350, которое после выдержки в пристанционном бассейне было упаковано в ТУК и размещено на открытой площадке длительного хранения до принятия решения о его окончательной утилизации. В связи с отсутствием в Казахстане возможностей по переработке ОЯТ, а также действующих ПЗРО для высокоактивных отходов, строительство которых является технически сложным, дорогостоящим и требующим проведения многолетних лабораторных исследований, на текущий момент длительное хранение является наиболее предпочтительной стратегией в отношении ОЯТ.

Согласно последним мировым тенденциям при проектировании и строительстве АЭС оснащаются комплексами установок по переработке образующихся РАО с хранилищами, обеспечивающие экологическую безопасность АЭС в течение всего периода эксплуатации. В состав комплекса обычно входят участок сортировки, установки измельчения и прессования, установка ионоселективной очистки ЖРО, установка сжигания, установка цементирования и другое оборудование для перевода всех образующихся РАО в кондиционированное состояние,

отвечающие требованиям для длительного хранения или захоронения. Хранилища кондиционированных РАО на АЭС обеспечивают размещения всего объема РАО за весь период эксплуатации с соблюдением безопасных условий хранения до их передачи в пункты окончательной изоляции.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Эффективное управление отработавшим топливом и отходами атомных станций представляет собой ключевой аспект развития атомной энергетики. В отношении ОЯТ существуют два основных подхода: замкнутый цикл, предполагающий переработку топлива для повторного использования урана и плутония, и открытый цикл, предусматривающий длительное «сухое» хранение с последующим захоронением. Переработка ОЯТ, осуществляемая ограниченным числом стран, сопряжена с риском распространения ядерных материалов, что требует усиления мер по нераспространению. Открытый цикл, более распространенный, предполагает длительное «сухое» хранение ОЯТ с последующим захоронением, что является предпочтительным вариантом для стран, не имеющих собственных мощностей по переработке. «Сухое» хранение не только отвечает специфическим требованиям различных видов топлива, но и оптимизирует процессы транспортировки и захоронения. Создание контейнеров двойного назначения, способных выполнять функции хранения и транспортировки без перегрузки тепловыделяющих сборок, значительно повышает эффективность и экономичность обращения с ОЯТ. В отношении РАО, помимо комплексов на АЭС, активно разрабатываются и внедряются технологии глубокого геологического захоронения, обеспечивающие надежную изоляцию отходов на длительные сроки. Также ведется работа по минимизации объемов РАО за счет переработки и повторного использования некоторых видов отходов.

Растущий интерес к ядерной энергетике в мире стимулирует развитие отрасли, но также создает серьезные проблемы, связанные с РАО и ОЯТ. По мере расширения использования ядерных технологий необходимо адаптировать соответствующие стратегии управления радиоактивными отходами. Это потребует значительных инвестиций в создание объектов по переработке, хранению и захоронению отходов, а также в подготовку квалифицированных специалистов. Финансовая поддержка, особенно для строительства пунктов захоронения, играет решающую роль в решении этих задач и обеспечении устойчивого будущего ядерной энергетики.

Работа проводилась при финансовой поддержке Комитета науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан в рамках программы BR24993104 «Проведение исследований в обоснование выбора эффективных и оптимальных способов и технологий обращения с ОЯТ реакторной установки БН-350».

ЛИТЕРАТУРА

1. Обзор ядерных технологий - 2024. Доклад генерального директора МАГАТЭ / Австрия: сентябрь 2024. – 112 с. / GC(68)/INF/4.
2. Закон РК «Об использовании атомной энергии» от 12.01.2016 года № 442-V ЗРК.
3. Технический регламент «Ядерная и радиационная безопасность атомных станций»: утв. приказом Министра энергетики РК от 20 февраля 2017 года № 60.
4. Правила организации сбора, хранения и захоронения радиоактивных отходов и отработавшего ядерного топлива: утв. приказом Министра энергетики РК от 8 февраля 2016 года № 39.
5. Правила государственного учета ядерных материалов: утв. приказом Министра энергетики РК от 9 февраля 2016 года № 44.
6. Нормативы на радиоактивные отходы: утв. приказом Министра энергетики РК от 16 июня 2021 года № 200.
7. Закон РК «О ратификации Конвенции о ядерной безопасности» от 03 февраля 2010 года № 245-IV.
8. Закон «О ратификации Объединенной конвенции о безопасности обращения с отработавшим топливом и о безопасности обращения с радиоактивными отходами» от 3 февраля 2010 года № 246-IV.
9. Технологические и организационные аспекты обращения с радиоактивными отходами / МАГАТЭ, Вена, 2005/ IAEA-TCS-27.
10. International Atomic Energy Agency, Design and Operation of Off-gas Cleaning and Ventilation Systems in Facilities Handling Low and Intermediate Level Radioactive Material, Technical Reports Series No. 292, IAEA, Vienna (1988).
11. Хвостова М.С. Обращение с радиоактивными отходами на предприятиях атомной отрасли // Вестник РУДН. Серия «Экология и безопасность жизнедеятельности». – 2013. – № 1.
12. Бекман И.Н. Ядерная индустрия. Предотвращение загрязнения окружающей среды выбросами АЭС // Курс лекций. – 25 с. <https://profbeckman.narod.ru/NIL17.pdf>
13. Герлига В.А. Очистка водных растворов от солей и радионуклидов / В.А. Герлига, В.П. Кравченко, И.А. Притыка, Ганем Хуссам // Ядерная радиационная безопасность. – 2018. – № 1(77). – ISSN 2073-6231
14. Эксплуатация АЭС. Ч. 1 Работа АЭС в энергосистемах. Ч. II. Обращение с радиоактивными отходами: // Учебное пособие. – М.: НИЯУ МИФИ. – 2011. – <http://engineeringssystems.ru/exploataciya-aes/>
15. Нормы безопасности МАГАТЭ / Проектирование систем обращения с топливом и его хранения на АЭС / № SSG-63.
16. Обзор зарубежных практик обращения с ОЯТ и РАО. – М.: Изд-во ФГУП «Национальный оператор по обращению с радиоактивными отходами». – 2022. https://www.norao.ru/upload/Свод%20обзора%20практик%20ОЯТ%20и%20РАО_2022.pdf
17. Обращение с РАО и ОЯТ на предприятиях ЯТЦ // Ядерная опасность. – М.: Эпицентр. – 2003
18. Андреев Г.Г. / Введение в химическую технологию ядерного топлива: учебное пособие / Г.Г. Андреев, А.Н. Дьяченко; Томский политехнический университет. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета. – 2010. – 165 с.
19. Цебаковская Н. С. Зарубежные проекты захоронения ОЯТ и РАО. Часть II. Актуальное состояние проектов создания пунктов глубинного геологического захоронения в США, Канаде и странах азиатского региона / Н.С. Цебаковская, Уткин С. С., Коновалов В. Ю.; – Препринт ИБРАЭ № IBRAE-2017-04 – М.: ИБРАЭ РАН. – 2017. – 41 с.

REFERENCES

1. Obzor yadernykh tekhnologiy - 2024. Doklad general'nogo direktora MAGATE / Avstriya: sentyabr' 2024. – 112 p. / GC(68)/INF/4.
2. Zakon RK "Ob ispol'zovanii atomnoy energii" ot 12.01.2016 goda No. 442-V ZRK.
3. Tekhnicheskii reglament "Yadernaya i radiatsionnaya bezopasnost' atomnykh stantsiy": utv. prikazom Ministra energetiki RK ot 20 fevralya 2017 goda No. 60.
4. Pravila organizatsii sbora, khraneniya i zakhoroneniya radioaktivnykh otkhodov i otrabotavshogo yadernogo topliva: utv. prikazom Ministra energetiki RK ot 8 fevralya 2016 goda No. 39.
5. Pravila gosudarstvennogo ucheta yadernykh materialov: utv. prikazom Ministra energetiki RK ot 9 fevralya 2016 goda No. 44.
6. Normativy na radioaktivnye otkhody: utv. prikazom Ministra energetiki RK ot 16 iyunya 2021 goda No. 200.
7. Zakon RK "O ratifikatsii Konventsii o yadernoy bezopasnosti" ot 03 fevralya 2010 goda No. 245-IV.
8. Zakon "O ratifikatsii Ob"edinennoy konventsii o bezopasnosti obrashcheniya s otrabotavshim toplivom i o bezopasnosti obrashcheniya s radioaktivnymi otkhodami" ot 3 fevralya 2010 goda No. 246-IV.
9. Tekhnologicheskie i organizatsionnye aspekty obrashcheniya s radioaktivnymi otkhodami / MAGATE, Vienna, 2005/ IAEA-TCS-27.
10. International Atomic Energy Agency, Design and Operation of Off-gas Cleaning and Ventilation Systems in Facilities Handling Low and Intermediate Level Radioactive Material // Technical Reports Series. No. 292, IAEA, Vienna (1988).
11. Khvostova M.S. Obrashchenie s radioaktivnymi otkhodami na predpriyatiyakh atomnoy otrasli // Vestnik RUDN. Seriya "Ekologiya i bezopasnost' zhiznedeyatel'nosti". – 2013. – No. 1.
12. Bekman I.N. Yadernaya industriya. Predotvrashchenie zagryazneniya okruzhayushchey sredy vybrosami AES // Kurs lektsiy. – 25 p. <https://profbeckman.narod.ru/NIL17.pdf>
13. Gerliga V.A. Ochistka vodnykh rastvorov ot soley i radionuklidov / V.A. Gerliga, V.P. Kravchenko, I.A. Prityka, Ganem Khussam // Yaderna ta radiatsiyna bezpeka. – 2018. – No. 1(77). – ISSN 2073-6231
14. Ekspluatatsiya AES. Ch. 1 Rabota AES v energosistemakh. Ch. II. Obrashchenie s radioaktivnymi otkhodami: // Uchebnoe posobie. – Moscow: NIYaU MIFI. – 2011. <http://engineeringssystems.ru/exploataciya-aes/>
15. Normy bezopasnosti MAGATE / Proektirovanie sistem obrashcheniya s toplivom i ego khraneniya na AES / No. SSG-63.
16. Obzor zarubezhnykh praktik obrashcheniya s OYaT i RAO. – Moscow: Izd-vo FGUP "Natsional'nyy operator po obrashcheniyu s radioaktivnymi otkhodami". – 2022. https://www.norao.ru/upload/Свод%20обзора%20практик%20ОЯТ%20и%20РАО_2022.pdf

17. Obrashchenie s RAO i OYaT na predpriyatiyakh YaTTs // Yadernaya opasnost'. – Moscow: Epitsentr. – 2003.
18. Andreev G.G. / Vvedenie v khimicheskuyu tekhnologiyu yadernogo topliva: uchebnoe posobie / G.G. Andreev, A.N. D'yachenko; Tomskiy politekhnicheskii universitet. – Tomsk: Izd-vo Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. – 2010. – 165 p.
19. Tsebakovskaya N. S. Zarubezhnye proekty zakhoroneniya OYaT i RAO. Chast' II. Aktual'noe sostoyanie proektov sozdaniya punktov glubinnogo geologicheskogo zakhoroneniya v SShA, Kanade i stranakh aziatskogo regiona / N.S. Tsebakovskaya, Utkin S. S., Kononov V. Yu.; – Preprint IBRAE No. IBRAE-2017-04 – Moscow: IBRAE RAN. – 2017. – 41 p.

АТОМ ЭНЕРГИЯНЫ ДАМУ ЖАҒДАЙЫНДАҒЫ РАДИОАКТИВТІ ҚАЛДЫҚТАРМЕН ЖӘНЕ ПАЙДАЛАНЫЛҒАН ЯДРОЛЫҚ ОТЫНМЕН ЖҰМЫС ЖАСАУ ТЕХНОЛОГИЯЛАРЫН ТАЛДАУ

М. К. Сейсенбаева*, В. А. Поспелов, Д. И. Абулгазиева, Ю. Ю. Бакланова

ҚР ҰАО РМК «Атом энергиясы институты» филиалы, Курчатов, Қазақстан

** Байланыс үшін E-mail: seysenbaeva@nnc.kz*

Мақалада Қазақстанда АЭС салу контексінде радиоактивті қалдықтармен және пайдаланылған ядролық отынмен жұмыс істеу мәселесі талданады. Ол халықаралық келісімдерге қарамастан, елде қалдықтармен жұмыс істеудің кешенді стратегиясының жоқтығын атап көрсетеді. Мақалада шығарындыларды тазартуды, қалдықтарды өңдеуді және отынды сақтауды қоса алғанда, қолданыстағы АЭС-те радиоактивті қалдықтармен және пайдаланылған ядролық отынмен жұмыс істеу әдістері қаралады. Пайдаланылған ядролық отынды қайта өңдеу және оны сақтаудың әртүрлі нұсқалары сияқты дәстүрлі және инновациялық технологиялар талданады.

Түйін сөздер: радиоактивті қалдықтар, пайдаланылған ядролық отын, ПЯО қайта өңдеу, РАҚ көму, геологиялық түзілімдер, атом электр станциясы.

ANALYSIS OF RADIOACTIVE WASTE AND SPENT NUCLEAR FUEL MANAGEMENT TECHNOLOGIES IN THE CONTEXT OF NUCLEAR POWER DEVELOPMENT

M. K. Seisenbaeva*, V. A. Pospelov, D. I. Abulgazina, Yu. Yu. Baclanova

Institute of Atomic Energy Branch of the RSE NNC RK, Kurchatov, Kazakhstan

** E-mail for contacts: seysenbaeva@nnc.kz*

The article analyzes the problem of radioactive waste and spent nuclear fuel management in the context of NPP construction in Kazakhstan. It emphasizes the absence of a comprehensive waste management strategy in the country, despite international agreements. The article reviews the methods of radioactive waste and spent nuclear fuel management at operating NPPs, including emission cleanup, waste treatment and fuel storage. Traditional and innovative technologies, such as spent nuclear fuel reprocessing and various storage options, are analyzed.

Keywords: radioactive waste, spent nuclear fuel, SNF reprocessing, RW disposal, geological formations, nuclear power plant.