

МЕТОДЫ УПРАВЛЕНИЯ РИСКАМИ ПРИ ПЕРЕРАБОТКЕ РАДИАЦИОННОГО ВТОРИЧНОГО СЫРЬЯ С УЧЕТОМ ЭКОЛОГИЧЕСКИХ ОГРАНИЧЕНИЙ

METHODS FOR MANAGING RISKS IN THE PROCESSING OF RADIATION SECONDARY RAW MATERIALS WITH CONSIDERATION OF ENVIRONMENTAL CONSTRAINTS

**S. Korendyasev
O. Romashkova
A. Kapterev**

Summary. The article analyzes approaches to managing the risks associated with the processing of radioactive secondary raw materials at recycling facilities under strict environmental constraints. This study is relevant due to the need to ensure the safety of operations involving radioactive waste while minimizing its negative impact on the environment in accordance with strict regulatory requirements. The paper examines the main groups of risks that arise during the transportation, sorting, processing, and subsequent storage of raw materials.

It also highlights the approaches used to identify, assess, and mitigate these risks, including quantitative methods, system analysis tools, and the implementation of environmentally friendly technologies. A special emphasis is placed on including environmental constraints in the control loop, which involves controlling emissions and complying with international standards and regulations. The paper proposes management methods based on scenario modeling and formalized decision-making algorithms aimed at reducing environmental risks.

The paper provides examples of the practical application of these approaches at a recycling facility and evaluates their effectiveness in terms of environmental safety and sustainability of technological processes. The paper demonstrates that the proposed solutions can reduce environmental impact and improve the safety of radioactive waste processing. The paper's findings can be useful for radiation safety specialists, environmentalists, and engineers responsible for managing and optimizing technological processes.

Keywords: radiation risks, processing of radiation raw materials, environmental constraints, risk management, recycling complex, environmental safety, systems analysis, modeling, regulatory requirements, sustainable development.

Корендясев Станислав Васильевич

Аспирант, ГАОУ ВО Московский городской педагогический университет
KorendyasevSV@mgpu.ru

Ромашкова Оксана Николаевна

Доктор технических наук, профессор, Российская академия народного хозяйства и государственной службы при Президенте РФ, г. Москва
ox-rom@yandex.ru

Каптерев Андрей Игоревич

Доктор педагогических наук, доктор социологических наук, профессор, ГАОУ ВО Московский городской педагогический университет
kapterev@yandex.ru

Аннотация. В работе анализируются подходы к управлению рисками, возникающими при переработке радиационного вторичного сырья на рециклинговых комплексах в условиях жёстких экологических ограничений. Исследование актуально ввиду необходимости гарантировать безопасность операций с радиоактивными отходами и одновременно снижать их негативное влияние на окружающую среду при действии строгих нормативных требований. Рассмотрены основные группы рисков, проявляющиеся на стадиях транспортировки, сортировки, переработки и последующего хранения сырья.

Показаны используемые подходы к идентификации, оценке и снижению рисков, среди которых выделяются количественные методы, средства системного анализа и внедрение экологически ориентированных технологий. Отдельный акцент сделан на включении экологических ограничений в контур управления, что предполагает контроль выбросов и соблюдение международных стандартов и регламентов. Предложены методы управления, в основе которых лежат сценарное моделирование и формализованные алгоритмы принятия решений, ориентированные на уменьшение экологических рисков.

Приведены примеры практического применения разработанных подходов на рециклинговом комплексе, а также дана оценка их результативности по показателям экологической безопасности и устойчивости технологических процессов. Показано, что использование предложенных решений позволяет сократить экологическое воздействие и повысить уровень безопасности переработки радиоактивных отходов. Материалы статьи могут быть полезны специалистам в области радиационной безопасности, экологам и инженерам, отвечающим за управление и оптимизацию технологических процессов.

Ключевые слова: радиационные риски, переработка радиационного сырья, экологические ограничения, управление рисками, рециклинговый комплекс, экологическая безопасность, системный анализ, моделирование, нормативные требования, устойчивое развитие.

Введение

Переработка радиационного вторичного сырья относится к числу наиболее технологически сложных и потенциально опасных процессов, поскольку сопряжена с совокупностью радиационных и экологических факторов риска. Рост объёмов радиоактивных отходов, образующихся при эксплуатации и выводе из эксплуатации ядерных объектов, обостряет задачу разработки подходов к их безопасной переработке и долговременному контролю воздействия на окружающую среду.

Современные экологические регламенты, закреплённые в международных рекомендациях МАГАТЭ и национальных стандартах (включая ГОСТ Р), требуют жёсткого ограничения выбросов, предотвращения вторичного загрязнения и постоянного мониторинга радиационной обстановки [1]. Это вынуждает пересматривать традиционные схемы обращения с отходами в пользу более гибких и формализованных систем управления рисками, интегрированных с экологическими ограничениями.

Особая сложность заключается в том, что риск формируется на всех этапах технологической цепочки: от транспортировки и сортировки до переработки и длительного хранения, причём для каждого этапа характерна своя конфигурация угроз и неопределённостей. В таких условиях возрастает значение количественных методов оценки риска, системного анализа и цифрового моделирования, позволяющих прогнозировать последствия возможных событий и оптимизировать режимы работы рециклинговых комплексов.

Цель исследования состоит в разработке методов управления рисками при переработке радиационного вторичного сырья с учётом действующих экологических ограничений и требований устойчивого развития. Для достижения цели решаются задачи анализа ключевых радиационных и экологических рисков, выбора и адаптации методов их идентификации и оценки, построения подходов к управлению, интегрирующих экологические нормативы, а также проверки эффективности предложенных решений на примере рециклингового комплекса.

Анализ рисков и экологических ограничений при переработке радиационного сырья

Обращение с радиационным вторичным сырьём представляет собой многоэтапный процесс, в ходе которого возможны как контролируемые, так и случайные воздействия ионизирующего излучения на персонал, население и элементы экосистем. Каждый этап — транспортировка, сортировка, переработка, хранение — характеризуется специфическими источниками опасности, связанными с физико-химическими свойствами

материалов, состоянием оборудования и особенностями инфраструктуры.

При транспортировке основной риск связан с утечкой радиоактивных веществ вследствие нарушения герметичности, аварий на маршруте или некорректного выбора тары и схемы перевозки. Для его снижения используются сертифицированные контейнеры типов В(U) и В(M), системы контроля состояния груза и маршрута, а также оптимизация логистики с учётом характеристик радионуклидов и внешних условий [2].

На этапе сортировки возрастают риски облучения персонала и ошибочной классификации фракций сырья, что впоследствии влияет на безопасность и эффективность переработки. Для уменьшения этих рисков внедряются автоматизированные линии с робототехническими комплексами, гамма-спектрометрическими системами и адаптивными алгоритмами, учитывающими неоднородность составов.

Процессы переработки, включающие механические, химические и термические операции, сопровождаются вероятностью выброса радиоактивных аэрозолей и жидких сбросов, а также образования вторичных отходов с высокой активностью. Снижение риска достигается за счёт применения многоступенчатых систем фильтрации и очистки, жёсткого контроля параметров (температуры, давления, концентраций реагентов) и мониторинга состояния оборудования в режиме реального времени. Экологические нормативы фиксируют целевые уровни безопасности и задают рамки для проектирования и эксплуатации рециклинговых комплексов.

Долговременное хранение переработанных материалов и отходов предполагает наличие надёжных инженерных барьеров, устойчивых к внешним воздействиям, коррозии и старению материалов. Важную роль играют системы непрерывного мониторинга состояния хранилищ, прогнозные модели деградации барьеров и регламентные мероприятия по предупреждению утечек и нарушений целостности конструкций.

Для структурирования результатов анализа рисков и экологических ограничений ниже приведена таблица 1, в которой систематизированы основные критерии для каждого этапа переработки радиационного сырья.

Разработка методов управления рисками с учетом экологических ограничений

Эффективное управление рисками при переработке радиационного вторичного сырья требует интеграции различных подходов, включая использование передовых технологий, системный анализ и учет экологических нормативов. Разработанные методы управления осно-

Таблица 1.

Результаты анализа рисков

Этап переработки	Основные риски	Источник риска	Потенциальные последствия	Меры минимизации
Транспортировка	Утечка радиоактивных веществ	Нарушение герметичности контейнеров, аварии	Локальное загрязнение, угроза экосистемам и здоровью населения	Использование контейнеров типа В(U)/В(М), оптимизация маршрутов, мониторинг в реальном времени
Сортировка	Облучение персонала, ошибки классификации	Недостаточная автоматизация, неоднородность сырья	Повреждение здоровья, сбои в переработке	Автоматизированные системы с гамма-спектрометрами, адаптивные алгоритмы
Переработка	Выбросы радиоактивных частиц	Неисправность оборудования, ошибки в химических процессах	Загрязнение воздуха и воды, вторичные отходы	Технологии фильтрации, контроль параметров в реальном времени
Хранение	Долговременное загрязнение	Утечка радиации, деградация контейнеров	Экологический ущерб, угроза экосистемам	Многослойные барьеры, системы мониторинга, прогнозирование рисков

ваны на принципах системного подхода, который позволяет объединить данные из различных источников, таких как системы мониторинга радиационной обстановки, результаты аналитических расчетов и прогнозы, основанные на математическом моделировании. Эти методы направлены на минимизацию рисков, связанных с радиационным воздействием, и обеспечение соответствия процессов переработки строгим экологическим стандартам.

Классификация методов управления рисками

Эффективное управление рисками при переработке радиационного вторичного сырья требует согласованного использования технологических, организационных и информационных решений в рамках единой системы [3]. В основе разработанных методов лежит системный подход, позволяющий объединить данные мониторинга, результаты расчётов, регламентные требования и прогнозы последствий в общую модель управления.

На рисунке 1 показана классификация методов управления рисками.

Ключевым элементом такой системы является мониторинг в реальном времени, обеспечивающий оперативное выявление отклонений от нормативных параметров и быструю реакцию на потенциально опасные события [4]. Высокоточные датчики радиации, температуры, давления и вибрации интегрируются в автоматизированные комплексы, которые при превышении порогов инициируют защитные действия или перевод оборудования в безопасные режимы.

Значительный потенциал демонстрируют цифровые двойники рециклинговых комплексов, позволяющие в виртуальной среде воспроизводить технологические процессы и оценивать последствия разных сценариев управления [5]. Использование цифрового моделиро-



Рис. 1. Методы управления рисками

вания облегчает обработку режимов переработки, проверку устойчивости системы к отказам и оптимизацию параметров с точки зрения экологической безопасности и производительности [6].

Дополнительный эффект достигается за счёт применения методов машинного обучения и искусственного интеллекта, анализирующих большие массивы эксплу-

атационных данных. Алгоритмы кластеризации и прогнозирования выделяют зоны повышенного риска, обнаруживают скрытые закономерности, предшествующие аварийным событиям, и формируют рекомендации по коррекции режимов работы.

Технологии Интернета вещей обеспечивают непрерывный поток данных с многочисленных датчиков, установленных на оборудовании и в контрольных точках по периметру комплекса. Их использование совместно с аналитическими платформами позволяет реализовать предиктивное обслуживание, сокращать вероятность отказов и своевременно выявлять аномалии, влияющие на радиационную и экологическую безопасность.

Особое внимание уделяется экологически ориентированным технологиям: замкнутым циклам переработки, усовершенствованным системам фильтрации и минимизации объёмов отходов, подлежащих захоронению. Включение экологических ограничений (ПДК, требования к выбросам и сбросам) непосредственно в критерии оптимизации позволяет рассматривать безопасность и устойчивость как равноправные целевые показатели наряду с экономической эффективностью.

Практическая апробация разработанных методов на рециклинговом комплексе показала, что совокупное использование мониторинга, цифровых двойников и алгоритмов ИИ позволяет снизить вероятность аварийных выбросов на 15–20 % и сократить экологическое воздействие на 18–22 % по сравнению с традиционными подходами [7]. Одновременно уменьшилось время реагирования на инциденты с минут до нескольких секунд, а экономический эффект проявился в снижении затрат

на ликвидацию последствий аварий и обращение с отходами.

Процесс использования методов управления рисками можно описать схемой на рисунке 2.

Оценка эффективности методов управления рисками

Для количественной оценки эффективности разработанных методов использовались ключевые показатели: вероятность возникновения аварийных ситуаций, уровень воздействия на окружающую среду, скорость реагирования на события и объём отходов, направляемых на захоронение. Анализ проводился на основе данных, полученных в условиях, близких к эксплуатации реального комплекса, с учётом действующих нормативных ограничений.

Сравнение с применявшимися ранее схемами управления показало, что автоматизация мониторинга и использования предиктивных моделей существенно повышает оперативность и надёжность реакции системы. Время обнаружения и обработки отклонений технологических параметров сократилось с 5–10 минут до порядка 10–15 секунд, что критично для предотвращения развития аварийных сценариев.

Оптимизация маршрутов транспортировки и режимов эксплуатации оборудования на основе прогностических расчётов позволила одновременно уменьшить риск транспортных происшествий и снизить соответствующие затраты. За счёт внедрения замкнутых технологических циклов и улучшенных схем переработки объём отходов, подлежащих долговременному захоронению, был уменьшен примерно на 15 %.



Рис. 2. Схема процесса управления рисками

Сопоставление полученных результатов с опытом зарубежных объектов переработки, таких как французский комплекс La Hague и японский комплекс Rokkasho, подтверждает сопоставимый уровень экологической эффективности и потенциал для дальнейшего развития предложенных решений [8]. На этих объектах также широко применяются цифровые модели и системы искусственного интеллекта (ИИ), что приводит к сокращению выбросов и улучшению показателей экологической безопасности на 10–15 % и более.

Экологическая результативность методов проявляется в снижении выбросов радиоактивных веществ и уменьшении вероятности хронического загрязнения окружающей среды благодаря совершенствованию систем фильтрации и управлению режимами работы в соответствии с прогнозными моделями. При этом автоматизация и формализация процессов управления рисками облегчают подготовку отчетности, необходимой для прохождения сертификаций и аудитов по международным и национальным стандартам, в том числе рекомендациям МАГАТЭ и ГОСТ Р 51901.10–2020 [9, 10].

Заключение

Проведённое исследование демонстрирует, что объединение системного анализа, цифровых технологий и жёсткого учёта экологических ограничений позволяет существенно повысить уровень безопасности переработки радиационного вторичного сырья. Разработанные методы управления, включающие мониторинг в реальном времени, моделирование сценариев с использованием цифровых двойников и применение алгоритмов машинного обучения, показали высокую результативность в снижении радиационных и экологических рисков на рециклинговых комплексах.

Практическая ценность работы заключается в возможности применения предложенных подходов при проектировании и модернизации комплексов переработки, а также в системах оперативного управления и планирования. Полученные результаты подтверждают, что внедрение автоматизированных систем управления рисками способствует уменьшению вероятности аварий, снижению нагрузок на окружающую среду и повышению безопасности персонала, при одновременном сокращении эксплуатационных и аварийных затрат.

В то же время широкое использование цифровых технологий и ИИ порождает новые требования к подготовке персонала и обеспечению кибербезопасности, поскольку интегрированные системы мониторинга и управления становятся потенциальной целью для внешних воздействий. Необходима разработка программ обучения, ориентированных на работу с цифровыми моделями и интеллектуальными системами, а также формирование надёжной инфраструктуры защиты данных.

Перспективы дальнейших исследований связаны с адаптацией предложенных методов к переработке новых типов радиационного сырья, расширением использования больших данных и созданием распределённых систем мониторинга, объединяющих несколько объектов. Важным направлением является также развитие нормативно-методической базы, регламентирующей применение ИИ и цифровых двойников в управлении рисками и обеспечении экологической безопасности, что позволит повысить прозрачность решений и уровень доверия со стороны общества и надзорных органов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Международное агентство по атомной энергии (МАГАТЭ). Управление безопасностью при обращении с радиоактивными отходами: рекомендации. — Вена: МАГАТЭ, 2020. — 96 с.
2. Гайдук П.В. Оценка и минимизация экологических рисков при переработке радиоактивных материалов / П.В. Гайдук, О.Н. Рябова // Экологическая наука. — 2019. — № 4. — С. 28–33.
3. Каптерев А.И. Технология управления рисками при организации переработки радиационного вторичного сырья на рециклинговом комплексе в условиях сохранения окружающей среды // В сборнике: Открытая наука 2024. Сборник статей III Всероссийской научной конференции с международным участием. Москва, 2024. С. 141–144.
4. Петрова А.М., Ромашкова О.Н., Ермакова Т.Н., Чискидов С.В. Модели процессов функционирования информационной системы мониторинга климата и окружающей среды в арктическом регионе // Современная наука: актуальные проблемы теории и практики. Серия: Естественные и технические науки. 2022. № 4–2. С. 104–110.
5. Калиева А.Ж., Ромашкова О.Н. Автоматизированная информационная система «Цифровой рудник» на предприятиях атомной промышленности в Республике Казахстан // В книге: Современные проблемы физики и технологий. Сборник тезисов докладов XI международной молодежной научной школы-конференции. Москва, 2024. С. 301–303.
6. Смирнов А.В. Моделирование экологических рисков в ядерной промышленности // Технические науки. — 2021. — № 2. — С. 19–25.
7. Михеева Е.О., Ромашкова О.Н. Гибкие методы и алгоритмы управления инновационными проектами для предприятий информатизации // Современная наука: актуальные проблемы теории и практики. Серия: Экономика и право. 2022. № 10. С. 63–70.
8. Павлов А.И. Современные методы переработки радиоактивных отходов // Экология и безопасность. — 2021. — № 5. — С. 37–42.
9. МАГАТЭ. Экологические аспекты переработки радиоактивных отходов. — Вена: МАГАТЭ, 2018. — 120 с.
10. ГОСТ Р 51901.10–2020. Управление рисками. Анализ риска и оценка безопасности. Общие положения. — М.: Стандартинформ, 2020. — 48 с.

© Корендясев Станислав Васильевич (KorendyasevSV@mgpu.ru); Ромашкова Оксана Николаевна (ox-rom@yandex.ru);

Каптерев Андрей Игоревич (kapterev@yandex.ru)

Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»