

АЛГОРИТМЫ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО УПРАВЛЕНИЯ РИСКАМИ В ЦИКЛЕ ПЕРЕРАБОТКИ РАДИАЦИОННОГО ВТОРИЧНОГО СЫРЬЯ

AUTOMATED RISK MANAGEMENT ALGORITHMS IN THE RECYCLING CYCLE RADIATION SECONDARY RAW MATERIALS

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

Summary. The article discusses modern approaches to the construction of radiation risk management algorithms in the recycling cycle of secondary radiation raw materials at recycling complexes. The relevance of the study is due to the need to ensure the safety of technological processes and minimize the negative impact on the environment and human health in conditions of increasing volumes of radioactive waste.

The work analyzes radiation risks at key stages of raw material processing, including transportation, sorting, processing, and storage. Modern methods of their identification, assessment and minimization based on the use of quantitative methods of analysis, modeling and principles of a systematic approach are considered. Special attention is paid to the use of innovative technologies such as digital twins, artificial intelligence, and machine learning to improve the effectiveness of risk management.

Based on the analysis, approaches to the construction of algorithms integrated into the control systems of recycling complexes are proposed. These algorithms allow you to quickly assess the current radiation situation, predict potential emergencies and take preventive measures. An example of the implementation of the proposed solutions is given, including their testing in conditions close to real ones and an assessment of their effectiveness by several key indicators.

The results of the study demonstrate that the implementation of the proposed approaches to the development of algorithms significantly reduces the likelihood of accidents, increases the environmental sustainability of processes, and optimizes production operations. Conclusions are drawn about the prospects for further use of the proposed approaches in the field of radioactive waste processing and their adaptation to other industries.

The article may be useful to specialists in the field of radioactive materials processing, environmentalists, industrial safety engineers, as well as researchers involved in radiation protection and risk management.

Keywords: radiation risks, recycling of secondary radiation raw materials, recycling complex, risk management, management algorithms, radiation safety, digital technologies, modeling, environmental sustainability, emergency situations.

Корендяев Станислав Васильевич
Аспирант, ГАОУ ВО «Московский городской педагогический университет (МГПУ)»
KorendyasevSV@mgrpu.ru

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

Каптерев Андрей Игоревич
Доктор педагогических наук, доктор социологических наук, профессор, ГАОУ ВО «Московский городской педагогический университет (МГПУ)» г. Москва
kapterev@yandex.ru

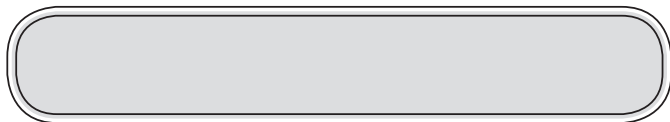
Аннотация. В статье рассматриваются современные подходы к построению алгоритмов управления радиационными рисками в цикле переработки вторичного радиационного сырья на рециклинговых комплексах. Актуальность исследования обусловлена необходимостью обеспечения безопасности технологических процессов и минимизации негативного воздействия на окружающую среду и здоровье человека в условиях роста объемов радиоактивных отходов.

В работе проведён анализ радиационных рисков на ключевых этапах переработки сырья, включая транспортировку, сортировку, переработку и хранение. Рассмотрены современные методы их идентификации, оценки и минимизации, основанные на использовании количественных методов анализа, моделирования и принципов системного подхода. Особое внимание уделено применению инновационных технологий, таких как цифровые двойники, искусственный интеллект и машинное обучение, для повышения эффективности управления рисками.

На основе проведённого анализа предложены подходы к построению алгоритмов, интегрированных в системы управления рециклинговых комплексов. Эти алгоритмы позволяют оперативно оценивать текущую радиационную обстановку, прогнозировать потенциальные аварийные ситуации и принимать превентивные меры. Приведён пример реализации предложенных решений, включая их тестирование в условиях, приближенных к реальным, и оценку их эффективности по ряду ключевых показателей.

Результаты исследования демонстрируют, что внедрение предложенных подходов к разработке алгоритмов способствует значительному снижению вероятности возникновения аварий, повышению экологической устойчивости процессов и оптимизации производственных операций. Сделаны выводы о перспективности дальнейшего использования предложенных подходов в области переработки радиоактивных отходов и их адаптации к другим отраслям промышленности.

Статья может быть полезна специалистам в области переработки радиоактивных материалов, экологам, инженерам по промышленной безопасности, а также научным сотрудникам, занимающимся вопросами радиационной защиты и управления рисками.



Введение

Современное развитие технологий переработки отходов, в том числе радиоактивных, связано с необходимостью минимизации негативного воздействия на окружающую среду и обеспечения безопасности человека [1]. Радиоактивное вторичное сырьё, образующееся в процессе эксплуатации ядерных объектов и при утилизации радиоактивных материалов, представляет собой сложный объект управления. Наличие радиационных рисков на всех этапах переработки требует разработки и внедрения современных подходов и алгоритмов, позволяющих не только минимизировать вероятность инцидентов, но и эффективно реагировать на возможные аварийные ситуации [2].

Проблема управления радиационными рисками приобретает особую актуальность в условиях увеличения объёмов вторичного радиоактивного сырья и необходимости его рационального использования [3]. При этом переработка таких материалов на рециклинговых комплексах должна отвечать строгим экологическим и санитарным требованиям, что требует применения системного подхода к идентификации, оценке и снижению рисков. Важную роль здесь играют цифровые технологии, аналитические модели и алгоритмы, позволяющие оптимизировать процессы и повысить их безопасность [4].

Целью данной работы является разработка эффективных алгоритмов управления радиационными рисками в цикле переработки радиационного вторичного сырья [5]. В рамках исследования ставятся следующие задачи:

1. Провести анализ радиационных рисков на ключевых этапах переработки.
2. Определить основные подходы и принципы управления рисками с учётом нормативных требований и технологических возможностей.
3. Предложить алгоритмы, направленные на минимизацию рисков и оптимизацию технологических процессов.
4. Оценить эффективность предложенных решений на примере рециклингового комплекса.

Настоящая статья представляет собой обзорный и аналитический труд, направленный на систематизацию существующих методов управления радиационными рисками и внедрение инновационных подходов в области переработки радиоактивных материалов. Полученные результаты могут быть использованы как для совершенствования процессов на рециклинговых комплексах, так

Ключевые слова: радиационные риски, переработка вторичного радиационного сырья, рециклинговый комплекс, управление рисками, алгоритмы управления, радиационная безопасность, цифровые технологии, моделирование, экологическая устойчивость, аварийные ситуации.

и для дальнейшего развития нормативно-методической базы в области обращения с радиоактивными отходами.

Анализ радиационных рисков и подходы к управлению ими

Радиационное вторичное сырьё является сложным объектом для переработки ввиду его физико-химических характеристик и потенциальной опасности для человека и окружающей среды [3]. Основные риски, связанные с этим типом материалов, обусловлены наличием радиоактивных изотопов, которые могут представлять угрозу как при нормальной эксплуатации, так и в случае нарушений технологических процессов. Анализ этих рисков и разработка подходов к их управлению являются ключевыми элементами обеспечения безопасности на всех этапах цикла переработки.

Эффективное управление радиационными рисками начинается с их систематизации. Возможная схема классификации радиационных рисков представлена на рисунке 1. Наибольшую угрозу представляют процессы обращения с сырьём на этапах транспортировки, сортировки, переработки и хранения. На этих стадиях возможно не только прямое воздействие ионизирующего излучения на персонал, но и потенциальные выбросы радиоактивных веществ в окружающую среду. Учет всех возможных сценариев развития событий требует проведения комплексного анализа, включающего как количественные, так и качественные методы оценки.

Современные подходы к управлению радиационными рисками опираются на интеграцию научно-технических данных, информационных технологий и регуляторных требований. Одним из наиболее эффективных инструментов является методика оценки вероятностных рисков, которая позволяет рассмотреть различные сценарии развития аварийных ситуаций и разработать соответствующие меры реагирования.

Особое значение имеет моделирование технологических процессов с использованием «цифровых двойников», что позволяет прогнозировать последствия различных сценариев и оптимизировать рабочие параметры системы [6].

Ключевую роль в управлении радиационными рисками играет принцип «многоуровневой защиты», предполагающий создание барьеров на всех этапах переработки. Эти барьеры обеспечивают физическую, техническую и организационную защиту от распространения радиа-

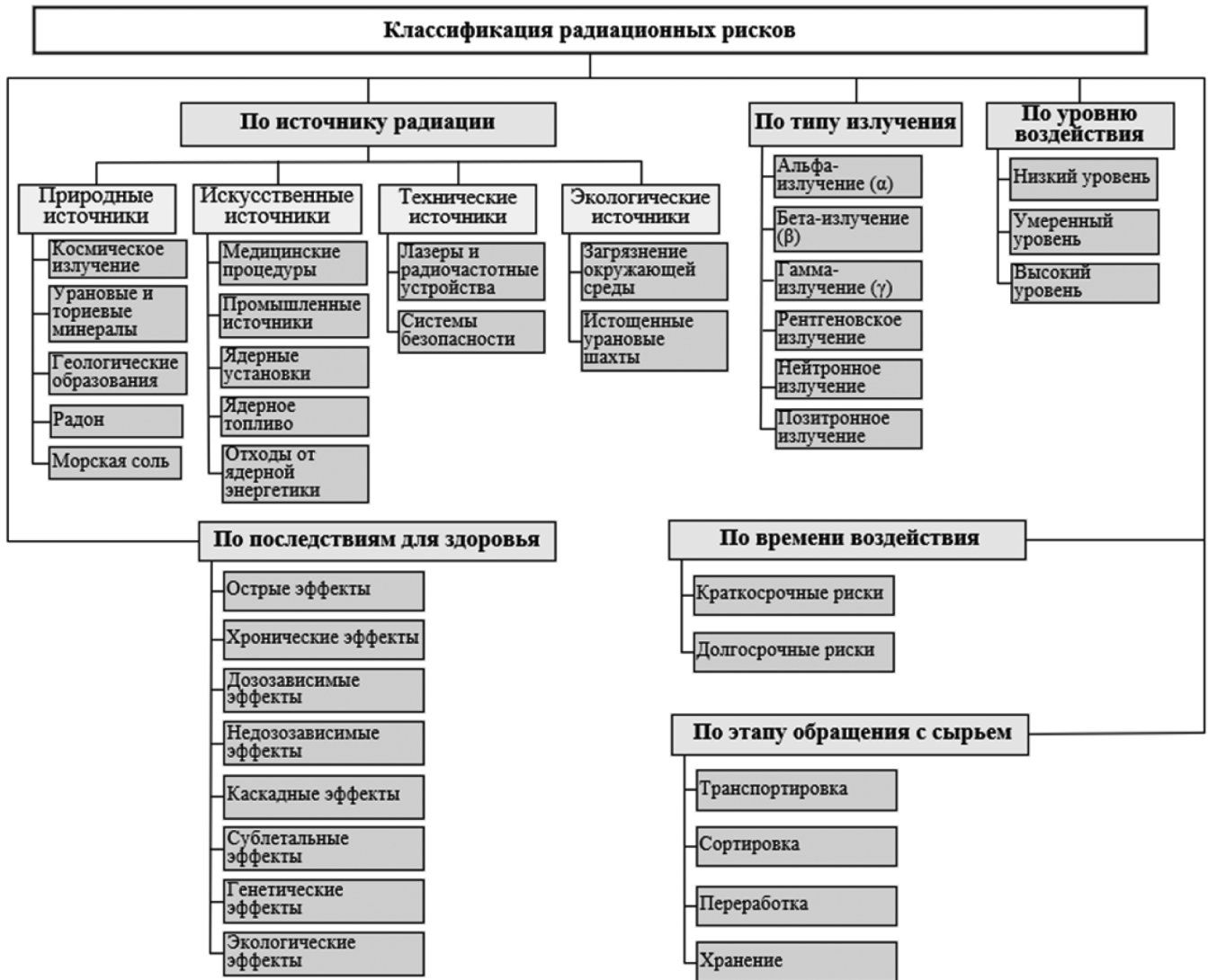


Рис. 1. Схема классификации радиационных рисков

ции и включают в себя системы автоматического контроля, защитные конструкции, а также обучение и подготовку персонала [7].

Неотъемлемой частью работы с радиационным сырьём является соблюдение нормативных и законодательных требований. Международные организации, такие как Международное агентство по атомной энергии (МАГАТЭ), а также национальные регуляторы предоставляют основы для разработки стандартов и инструкций, направленных на минимизацию рисков. Эти стандарты учитывают как технические параметры, так и аспекты безопасности для здоровья человека и экологии [8].

Развитие методов и систем управления радиационными рисками также требует применения инновационных технологий, включая использование искусственного интеллекта для автоматизации мониторинга, применения роботов в зонах с высоким уровнем радиации и внедрения аналитических систем для прогнози-

рования и предотвращения инцидентов. Такие подходы позволяют не только минимизировать человеческий фактор, но и значительно повысить эффективность процессов переработки.

Таким образом, анализ радиационных рисков и выбор эффективных подходов к их управлению составляют основу обеспечения безопасности переработки радиационного вторичного сырья. Современные методы управления позволяют снизить вероятность инцидентов, минимизировать воздействие на окружающую среду и обеспечить соответствие технологических процессов нормативным требованиям.

Предложения по разработке и внедрению алгоритмов автоматизированного управления радиационными рисками

Разработка алгоритмов управления радиационными рисками в цикле переработки вторичного радиацион-

ного сырья основывается на интеграции научных подходов, современных технологий и практических знаний. Эти алгоритмы должны учитывать особенности перерабатываемых материалов, технологические характеристики комплекса и потенциальные риски на каждом этапе производственного цикла. Их главные задачи — это уменьшение вероятности возникновения аварийных ситуаций, снижение радиационного воздействия на персонал и окружающую среду, а также обеспечение устойчивой и эффективной работы комплекса переработки радиационного вторсырья.

Алгоритмы управления строятся на современном подходе, позволяющем объединить данные из разных источников, таких как мониторинг радиационной обстановки, анализ технологических процессов и математическое моделирование. Такие алгоритмы создаются с применением методов количественной оценки риска, анализа чувствительности измерительного оборудования и моделирования сценариев чрезвычайных ситуаций. Например, оценка изменений среднего значения радиационного фона в реальном времени используется для автоматической корректировки порогового уровня срабатывания системы контроля радиации.

Особое внимание в статье уделяется непосредственно разработке алгоритмов, позволяющих управлять аварийной ситуацией и контролировать её последствия [9]. Они включают в себя прогностические модели, которые основаны на полученных данных о поведении радиоактивных материалов в различных условиях. Помимо предиктивных моделей алгоритмы учитывают меры по локализации и минимизации последствий инцидентов. Такие алгоритмы должны быть обязательно интегрированы в систему управления любого комплекса, так как они позволяют обеспечивать автоматическое и/или полуавтоматическое принятие решений. Это особенно важно в тех случаях, когда требуется необходимое оперативное реагирование. Например, при утечке радиоактивных веществ с предприятия или при поломке оборудования в комплексе.

Примером реализации разработанных алгоритмов можно считать их внедрение и активное использование на рециклинговом предприятии. Для того, чтобы обеспечить эффективность управления радиационными рисками приходится интегрировать алгоритм в общую систему управления предприятием, а не в отдельную его часть. Это охватывает следующие моменты: использование датчиков и систем мониторинга, предоставляющие своевременную информацию о радиационной обстановке, программное обеспечение для анализа данных состояния отходов материалов на предприятии и формирования последующих рекомендаций. Такие технологии позволяют, в первую очередь, выявлять потенциальные риски, а во вторую — принимать превентивные

меры, направленные на их устранение, и не позволяющие им нанести серьёзный ущерб окружающей среде.

Одним из важнейших этапов внедрения алгоритмов, без которого просто невозможно обойтись, — это их тестирование в условиях, приближенных к реальным и/или в реальных условиях. На этом этапе удаётся выявить слабые стороны системы, требующие доработки, определить возможные узкие места и оптимизировать алгоритмы до их использования в производственной среде, доведя их до идеальной формулы. Для того, чтобы оценить эффективность разработанных решений, нужно применить ряд тестовых показателей, включая снижение уровня радиационного воздействия, сокращение времени реакции на инциденты и повышение общей производительности комплекса.

Современные цифровые технологии, названные сквозными, такие как искусственный интеллект, глубокое обучение, виртуальная и дополненная реальность, позволяющие создавать цифровых двойников, открывают новые возможности разработки алгоритмов управления радиационными рисками. В частности, алгоритмы машинного обучения за очень короткое время обрабатывают большие объёмы данных, выявляют скрытые закономерности и предлагают оптимальные сценарии управления рисками и их предотвращения. Использование цифровых двойников, в свою очередь, открывает возможности моделирования различных условий и тестирования сгенерированных алгоритмов, исключая потенциальные риски для персонала предприятия и окружающей среды в целом.

В целом можно смело утверждать, что использование описанных алгоритмов управления радиационными рисками в анализируемом цикле переработки радиационных отходов способно значительно повысить безопасность и экологическую устойчивость всего комплекса. В то же время, если в нашу задачу входит достижение максимальной эффективности всего цикла необходимо постоянно анализировать разработанные решения, адаптировать их к новым условиям и интегрировать в существующие системы управления. Такой подход обеспечивает не только минимизацию рисков, но и оптимизацию всех процессов переработки, что является ключевым фактором устойчивого развития отрасли.

Заключение

Проведенное исследование подтверждает, что разработка эффективных алгоритмов управления радиационными рисками в цикле переработки вторичного радиационного сырья является одновременно важной и многоаспектной задачей, требующей комплексного подхода. Именно для успешного решения этой задачи и необходима систематизация рисков, глубокий анализ

их природы и характеристик, а также применение инновационных технологий и современных научных методов.

В рамках проведенного исследования были выделены основные этапы переработки, где сконцентрированы ключевые риски, и предложены подходы к их минимизации. Использование методов количественного анализа рисков и моделирования позволило сформировать научно обоснованные рекомендации для управления радиационными рисками. Интеграция алгоритмов управления в производственные системы рециклингового комплекса обеспечивает не только высокий уровень безопасности, но и оптимизацию технологических операций.

Практическая значимость предлагаемых подходов и разработанных алгоритмов подтверждается их способностью значительно снижать вероятность возникновения аварийных ситуаций, оперативно реагировать на инциденты и минимизировать негативные последствия для персонала и окружающей среды. Отметим, что применение описанных алгоритмов способствует повышению производительности перерабатывающих комплексов за счёт автоматизации процессов и улучшения контроля над всеми стадиями работы с радиационным сырьём.

Одним из ключевых аспектов исследования стало рассмотрение перспектив применения сквозных цифро-

вых технологий, таких как искусственный интеллект, машинное обучение, нейронные сети и цифровые двойники [10]. Эти инструменты открывают новые возможности для создания адаптивных систем управления, которые с помощью интеллектуального анализа больших данных учитывают динамически изменяющиеся условия и повышают надёжность принимаемых решений.

Однако необходимо отметить, что внедрение предложенных решений требует не только технической адаптации, но и значительных организационных усилий, включая подготовку персонала, развитие нормативно-методической базы и обеспечение финансирования. Перспективным направлением дальнейших исследований является разработка универсальных подходов, которые могут быть адаптированы для различных типов перерабатывающих комплексов и условий эксплуатации.

Таким образом, проведённое исследование подтверждает важность и актуальность управления радиационными рисками в современных условиях. Предложенные подходы и алгоритмы могут служить основой для создания безопасных и экологически устойчивых систем переработки радиоактивных материалов, что способствует не только решению текущих задач отрасли, но и её долгосрочному развитию.

ЛИТЕРАТУРА

1. Шилкина С.В. Мировые тенденции управления отходами и анализ ситуации в России // Отходы и ресурсы. 2020. Т. 7. № 1. С. 5.
2. Росновский С.В., Поваров В.П. Обеспечение радиационной защиты при временном хранении отверждённых радиоактивных отходов в хранилищах ангарного типа // Известия высших учебных заведений. Ядерная энергетика. 2021. № 2. С. 96–105.
3. 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.
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. Корендясев С.В. К вопросу автоматизации оценки рисков чрезвычайных ситуаций при переработке радиационного вторичного сырья // В книге: #ScienceJuice2021. Сборник тезисов студенческой открытой конференции. Составители: Н.В. Вознесенская. Москва, 2021. С. 453–455.
6. Гришин Д.А., Ромашкова О.Н. «Цифровые двойники» — лидирующая концепция индустрии 4.0 // В сборнике: Актуальные проблемы общества, экономики и права в контексте глобальных вызовов. Сборник научных статей по материалам Межрегиональной научно-практической конференции студентов, аспирантов, преподавателей и учёных. Сергиев Посад, 2023. С. 274–282.
7. 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.
8. ГОСТ Р 57216–2016 Радиационный контроль. Представление результатов измерений. — М.: Стандартинформ. 2016. — 24 с.
9. Корендясев С.В., Чискидов С.В. Об одном алгоритме решения задачи управления рисками при организации переработки радиационного вторичного сырья на рециклинговом комплексе в условиях сохранения окружающей среды // В сборнике: Актуальные вопросы проектирования и разработки программного обеспечения вычислительной техники и автоматизированных систем в сфере РСЧС и ГО. Сборник трудов секции №13 XXXIV Международной научно-практической конференции. Химки, 2024. С. 72–76.
10. Михеева Е.О., Ромашкова О.Н. Цифровой двойник компьютерной лаборатории // В сборнике: Междисциплинарные проблемы человеко-машинного взаимодействия. Сборник научных статей. Москва, 2023. С. 107–110.

© 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»