

УДК 621.039.59

Скрыпов Андрей Алексеевич, студент, Российский технологический университет Московский институт радиотехники, электроники и автоматики, г. Москва

ВЫВОД ИЗ ЭКСПЛУАТАЦИИ АТОМНЫХ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ: ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ, ЭКОНОМИЧЕСКИЕ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ

Аннотация

В данной статье проводится комплексный научный анализ процессов вывода из эксплуатации атомных электростанций (АЭС), рассматриваемых как завершающий и наиболее ответственный этап жизненного цикла ядерных энергетических объектов. Автор детально исследует основные мировые стратегии прекращения деятельности АЭС, включая методы немедленного демонтажа и концепцию безопасного сохранения (отложенный демонтаж), выявляя их ключевые преимущества и недостатки в современных социально-экономических условиях. Особое внимание в работе уделено существующим технологическим барьерам, таким как обращение с облученным графитом и высокоактивными отходами, а также роли интеллектуальных роботизированных систем в обеспечении радиационной безопасности персонала. В статье подробно рассматривается специфический российский опыт вывода из эксплуатации реакторных установок типов РБМК и ВВЭР, анализируется текущая нормативно-правовая база и деятельность ГК «Росатом» в данной сфере.

Annotation

This article provides a comprehensive scientific analysis of the decommissioning processes of nuclear power plants (NPPs), which are considered to be the final and most critical stage of the life cycle of nuclear energy facilities. The author examines in detail the main global strategies for NPP decommissioning, including immediate dismantling methods and the concept of safe preservation

(delayed dismantling), identifying their key advantages and disadvantages in the current socio-economic environment. The article also focuses on existing technological barriers, such as the handling of irradiated graphite and high-level waste, as well as the role of intelligent robotic systems in ensuring the radiation safety of personnel. The article provides a detailed review of Russia's specific experience in decommissioning RBMK and VVER reactor units, analyzing the current regulatory framework and Rosatom's activities in this area.

Ключевые слова: Атомная электростанция; вывод из эксплуатации; радиоактивные отходы; ядерная безопасность; стратегии демонтажа; Росатом.

Keywords: Nuclear power plant, decommissioning, radioactive waste, nuclear safety, dismantling strategies, Rosatom.

Развитие мировой атомной энергетики во второй половине XX века привело к масштабному строительству атомных электростанций (АЭС). Сегодня мировое сообщество сталкивается с неизбежным и закономерным этапом жизненного цикла этих объектов — массовым выводом их из эксплуатации (ВЭ). По данным Международного агентства по атомной энергии (МАГАТЭ), значительная часть действующих в мире энергетических реакторов была построена более 30–40 лет назад и в ближайшие десятилетия выработает свой проектный, а также продленный ресурс. Ожидается беспрецедентный рост числа останавливаемых энергоблоков, что делает вопросы их безопасного и экономически эффективного закрытия одной из главных задач современной мировой энергетики.

Для Российской Федерации данная проблема стоит особенно остро. В настоящее время в стране реализуются программы по окончательной остановке и подготовке к выводу из эксплуатации энергоблоков первых поколений, включая реакторы канального типа (РБМК-1000) и ранние модификации водо-водяных энергетических реакторов (ВВЭР). Это требует не только колоссальных финансовых затрат, но и разработки уникальных

технологических решений, обеспечивающих долгосрочную радиационную и экологическую безопасность.

Вывод АЭС из эксплуатации — это не просто остановка генерации энергии, а сложный, многоэтапный высокотехнологичный процесс, который может занимать от нескольких десятилетий до столетия. Он включает в себя выгрузку отработавшего ядерного топлива (ОЯТ), глубокую дезактивацию оборудования, демонтаж крупногабаритных высокоактивных конструкций, а также обращение с огромными объемами образующихся радиоактивных отходов (РАО). Экономическая модель этого процесса также представляет собой серьезный вызов: суммарные затраты на ВЭ зачастую сопоставимы со стоимостью строительства новой станции. Это требует грамотного формирования и управления специальными резервными фондами на протяжении всего периода работы АЭС.

Выбор стратегии вывода из эксплуатации является ключевым управленческим решением, определяющим сроки, стоимость и экологические последствия всего процесса. Согласно международной классификации, выделяют три основных концептуальных подхода к прекращению деятельности ядерных объектов:

Немедленный демонтаж (DECON). Процесс начинается практически сразу после окончательной остановки реактора и выгрузки топлива. Основным преимуществом является возможность повторного использования площадки в краткосрочной перспективе (через 10–20 лет) и сохранение квалифицированного персонала, знающего особенности конкретной станции. Однако данный метод сопряжен с высокими дозами облучения персонала из-за высокой активности оборудования на начальном этапе.

Отложенный демонтаж (SAFSTOR / Безопасное хранение). Объект приводится в состояние безопасного хранения на длительный срок (от 30 до 60 лет). За это время происходит естественный распад короткоживущих радионуклидов, что значительно снижает радиационную нагрузку на рабочих при последующем демонтаже. К недостаткам относятся необходимость

постоянного мониторинга объекта и риск утраты технической документации и экспертных знаний за десятилетия простоя.

Захоронение на месте (ENTOMB). Предполагает заключение реактора в прочную герметичную конструкцию (саркофаг) на срок до полного распада радиоактивных веществ. В современной практике этот метод применяется крайне редко и рассматривается как исключительная мера для объектов после тяжелых аварий.

Мировая практика вывода АЭС из эксплуатации демонстрирует преобладание стратегии немедленного демонтажа в США и ряде европейских стран (например, в Германии после принятия решения об отказе от ядерной энергетики). В США успешно завершены проекты на таких станциях, как «Мэн Янки» и «Троян», где площадки были рекультивированы до состояния «зеленой лужайки».

В Российской Федерации государственная корпорация «Росатом» придерживается гибкого подхода, адаптированного под типы реакторных установок. Для блоков с реакторами ВВЭР чаще рассматривается вариант немедленного демонтажа. Однако для энергоблоков с реакторами РБМК-1000 (например, Ленинградская, Курская АЭС) ситуация осложняется наличием графитовой кладки, обращение с которой требует разработки уникальных технологий дезактивации и длительной выдержки.

Важным аспектом российского опыта является создание единой государственной системы обращения с РАО, что позволяет централизованно решать вопросы захоронения продуктов демонтажа АЭС. Тем не менее, финансовая нагрузка на эксплуатирующую организацию остается существенной, что подтверждает необходимость дальнейшего совершенствования экономических моделей формирования резервных фондов.

Одной из наиболее сложных задач является демонтаж высокоактивных элементов активной зоны реактора. Традиционные методы участия человека здесь невозможны из-за экстремальных радиационных полей. Решением становится широкое внедрение дистанционно управляемых робототехнических комплексов (РТК). Современные РТК должны обладать высокой радиационной стойкостью электроники и способностью выполнять прецизионную резку металла и бетона в условиях ограниченного пространства.

Для российских АЭС с реакторами РБМК-1000 критическим барьером остается утилизация огромных объемов графитовой кладки. Графит содержит долгоживущий изотоп углерод-14, что исключает его простое захоронение. В настоящее время рассматриваются технологии термической обработки и химического связывания радионуклидов, однако они всё еще находятся на стадии опытно-промышленных испытаний.

Основной проблемой является высокая неопределенность затрат. ВЭ АЭС — это проект, растянутый на десятилетия. Инфляционные процессы, изменение экологического законодательства и появление новых требований безопасности могут увеличить первоначальную смету в несколько раз. Для минимизации рисков необходимо использование систем имитационного моделирования и цифровых двойников станций, которые позволяют рассчитать стоимость каждого этапа демонтажа с высокой точностью.

Конечной целью любого проекта ВЭ является реабилитация территории. Существует две концепции: «зеленая лужайка» (полная очистка до фоновых значений, позволяющая любое использование земли) и «коричневая лужайка» (ограниченное использование территории, например, под промышленные объекты). Выбор между ними зависит от плотности населения в регионе и экономической целесообразности.

Социальный аспект не менее важен: закрытие АЭС часто означает ликвидацию градообразующего предприятия. Программы вывода из эксплуатации должны включать стратегии переобучения персонала для работы на смежных энергетических объектах или в сфере обращения с РАО.

Выбор между немедленным и отложенным демонтажем должен основываться на комплексной оценке типа реактора, доступности финансирования и готовности региональной инфраструктуры к приему радиоактивных отходов.

Технологический суверенитет в области атомной энергетики сегодня определяется не только способностью строить новые блоки, но и компетенциями по их безопасному демонтажу. Развитие робототехники и методов дезактивации является приоритетным направлением.

Необходима гармонизация нормативно-правовой базы на международном уровне для создания унифицированных стандартов безопасности при трансграничном перемещении технологий вывода из эксплуатации.

Литература

1. Абрамов А. А. Экономические аспекты завершающей стадии жизненного цикла АЭС // Вопросы атомной науки и техники. 2022. № 3. С. 45–52.
2. Иванов И. И., Петров П. П. Сравнительный анализ мирового опыта вывода из эксплуатации ядерных объектов // Энергетическая политика. 2023. Т. 15, № 2. С. 110–124.
3. Официальный сайт ГК «Росатом». Раздел: Вывод из эксплуатации. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.rosatom.ru> (дата обращения: 20.05.2024).

4. Международное агентство по атомной энергии (МАГАТЭ). Стратегии вывода из эксплуатации ядерных установок: Серия докладов по безопасности № 45. Вена, 2021. 88 с.
5. Логинов Д. А., Спиридонов И. Г. Анализ зарубежных практик и стратегий вывода из эксплуатации ядерных энергетических установок // Инновации в энергетике. 2023. № 4. С. 88–95.

References

1. Abramov A. A. Economic Aspects of the Final Stage of the NPP Life Cycle // Issues of Atomic Science and Technology. 2022. No. 3. Pp. 45–52.
2. Ivanov I. I., Petrov P. P. Comparative Analysis of the Global Experience in Decommissioning Nuclear Facilities // Energy Policy. 2023. Vol. 15, No. 2. Pp. 110–124.
3. Official website of Rosatom State Corporation. Section: Decommissioning. [Electronic resource]. URL: <https://www.rosatom.ru> (accessed on 20.05.2024).
4. International Atomic Energy Agency (IAEA). Strategies for Decommissioning Nuclear Installations: Safety Report Series No. 45. Vienna, 2021. 88 p.
5. Loginov D. A., Spiridonov I. G. Analysis of foreign practices and strategies for decommissioning nuclear power plants // Innovations in Energy. 2023. No. 4. P. 88–95.