DOI: 10.25283/2587-9707-2026-3-106-117 УДК 621.039:007.52

ПИЛОТНЫЕ РАБОТЫ КАК ОСНОВА ДЛЯ РАСЧЕТА ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКИХ ОЦЕНОК ПРИМЕНЕНИЯ ДЕМОНТАЖНЫХ РОБОТОТЕХНИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ ПРИ ВЫВОДЕ ИЗ ЭКСПЛУАТАЦИИ ЯДЕРНО И РАДИАЦИОННО ОПАСНЫХ ОБЪЕКТОВ

М. Ю. Каленова, Р. Р. Хасанов

Институт проблем безопасного развития атомной энергетики РАН, Москва

Статья поступила в редакцию 29 июля 2026 г.

Рассмотрена проблематика внедрения роботизированных и дистанционно управляемых систем (РиДУС) в проекты по выводу из эксплуатации (ВЭ). Одним из барьеров является отсутствие достоверных технико-экономических оценок (ТЭО) применения РиДУС и подходящей методологии их получения. В работе предложен подход к формированию ТЭО применения демонтажных робототехнических комплексов (РТК), исходя из опыта их пилотной эксплуатации на реальных объектах атомной отрасли. Методология включает отбор типовых операций ВЭ, РТК и объектов, проведение опытной эксплуатации РТК, сбор статистических данных и расчет технико-экономических показателей. В статье обозначены основные принципы отбора типовых операций ВЭ и объектов, проведена первичная ТЭО применения РТК. В качестве исходных данных использованы результаты опытной эксплуатации комплексов Brokk 100, Бетонолом 4500 на площадке АО «ОДЦ УГР» при выполнении типовых операций ВЭ: извлечение, сортировка и контейнеризация отходов, демонтаж и фрагментация строительных конструкций, технологического оборудования и инженерных коммуникаций. Получены фактические данные по производительности, энергопотреблению, проведены расчеты стоимости выполнения отобранных типовых операций ВЭ с использованием РТК в пересчете на единицу объема работ и сравнение с традиционными методами. Показано, что проведение пилотных работ позволяет подготовить основу для формирования единой базы данных и ТЭО применения демонтажных РТК.

Ключевые слова: *робототехнический комплекс, вывод из эксплуатации, демонтаж, технико-экономическая оценка, роботизация, атомная отрасль, опытная эксплуатация, эффективность, радиоактивные отходы.*

Актуальность исследования

Одним из перспективных направлений повышения эффективности и безопасности работ по выводу из эксплуатации (ВЭ) ядерно и радиационно опасных объектов (ЯРОО) является применение роботизированных и дистанционно-управляемых систем (РиДУС) [1]—[4].

Существующая практика показывает, что РиДУС успешно используются при ликвидации последствий тяжелых радиационных аварий, в деятельности по ВЭ ЯРОО и обращению с радиоактивными отходами (РАО) [5], [6]. Наиболее известными примерами являются проекты на объектах Sellafield (Великобритания), Fukushima Daiichi (Япония), Hanford Site (США), Marcoule (Франция), Чернобыль (Украина) [7].

В последнее время в мире наблюдается интенсивный рост и развитие роботизированных технологий [8]—[10]. В РФ коммерческие компании ведут активные разработки промышленных и сервисных роботов, специализированного

программного обеспечения, цифровых платформ и других технологических компонент [11]. В структурах крупных корпораций в целях повышения эффективности производственных процессов создаются специализированные подразделения и центры компетенций, ориентированные на автоматизацию, цифровизацию и роботизацию отдельных направлений деятельности [12], [13]. Данная тенденция свидетельствует о возрастающей роли робототехнических технологий как одного из ключевых факторов технологического развития предприятий отрасли.

Тем не менее, несмотря на успешный опыт использования РиДУС и значительный прогресс в роботизации атомной отрасли, сохраняются существенные барьеры их внедрения в деятельность по ВЭ ЯРОО. Ключевым из них является отсутствие достоверных технико-экономических оценок (ТЭО), позволяющих объективно подтвердить эффективность роботизации отдельных операций и процессов. Если решение о применении РиДУС не обеспечивает заметного повышения безопасности выполнения работ и / или не приводит к снижению затрат, их применение может оказаться неоправданным. В связи с этим проработка методологии оценки экономической эффективности применения РиДУС, а также создание базы данных, содержащей сведения об опыте их практического применения, рассматриваются как одно из приоритетных направлений исследований. Эти направления являются взаимодополняющими, поскольку накопление фактических данных об эксплуатации РиДУС служит основой для разработки, верификации и последующего совершенствования методических подходов к оценке эффективности их внедрения в проекты по ВЭ ЯРОО [14]—[16].

Современное состояние вопроса

Международное сообщество рассматривает оценку экономической эффективности применения РиДУС на основе анализа затрат и выгод, адаптированного под проекты ВЭ ЯРОО. В отличие от классического анализа затрат и выгод, за основу берется сопоставление нескольких вариантов технологических сценариев достижения требуемого конечного состояния объекта — традиционный (консервативный) метод и дистанционные / роботизированные технологии. При этом все варианты должны обеспечивать одинаковые минимальные требования, например: дозовые нагрузки; объем образующихся отходов; сроки выполнения и др. Такой подход позволяет исключить одинаковые для всех вариантов неопределенности и более объективно оценить преимущества применения РиДУС даже в условиях неполноты исходных данных [16].

В качестве одного из примеров ТЭО авторы [16] приводят расчеты по ликвидации двух баков системы аварийного сброса теплоносителя вместе с прилегающими трубопроводами суммарной массой 80 тонн, расположенных на АЭС Agesta (Швеция). Анализ затрат и выгод осуществляется для двух сценариев: при выполнении работ традиционным методом (ручной и инструментальный труд) и с использованием роботизированного комплекса Brokk 300. По результатам расчетов экономический эффект составил около 78,5 тыс. евро в пользу роботизированной технологии. В связи с отсутствием в публикации информации об исходных данных, принятых допущениях и порядке расчета можно заключить, что приведенные значения эксплуатационных затрат следует рассматривать как оценочные. В большинстве случаев подобные оценки базируются на экспертных мнениях и реже — на полученном практическом опыте, что ограничивает возможность объективного сравнения различных решений и снижает воспроизводимость результатов. Данный тезис также подтверждает необходимость создания единой базы данных по бенчмаркингу РиДУС, содержащей сведения о фактических затратах на приобретение, эксплуатацию, техническое обслуживание и ремонт, а также о результатах их практического применения, о чем было сказано выше [16], [17].

Вместе с тем возможны обратные ситуации, когда применение РиДУС не приводит к прямому сокращению затрат проекта. В этом случае использование может быть обосновано заметным снижением радиационных рисков для персонала и повышением общего уровня безопасности проекта ВЭ [16].

В Российской Федерации последние несколько лет активно реализуются пилотные проекты в рамках ФЦП ЯРБ-2, направленные на поиск и пилотирование РиДУС высокой технологической зрелости на промышленных площадках контура Госкорпорации «Росатом», а также работы по опытной эксплуатации демонтажных РТК для сбора и анализа статистических данных и последующей подготовки ТЭО [17]—[19].

В целом предлагаемый алгоритм внедрения РиДУС базируется на адаптации готовых разработок, успешно зарекомендовавших себя в смежных отраслях промышленности, или развитии решений высокой зрелости для работы в условиях наличия радиационного фактора. Данный подход обеспечивает эффективное управление жизненным циклом — от стадии выбора решения до его промышленного внедрения (рис. 1).

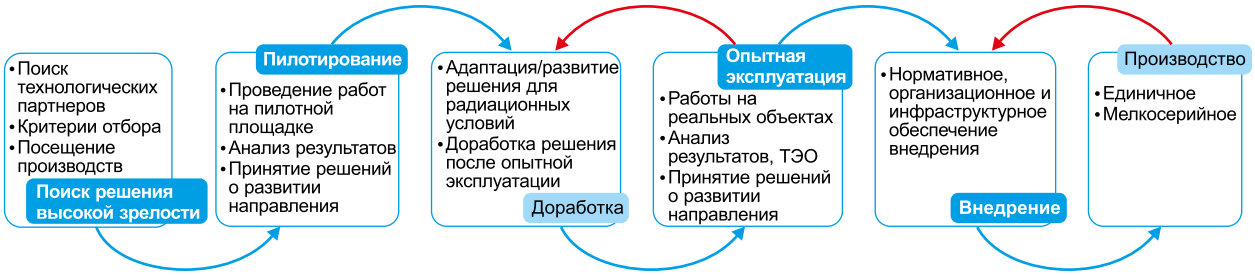

Рис. 1. Принципиальная схема отбора и внедрения перспективных решений

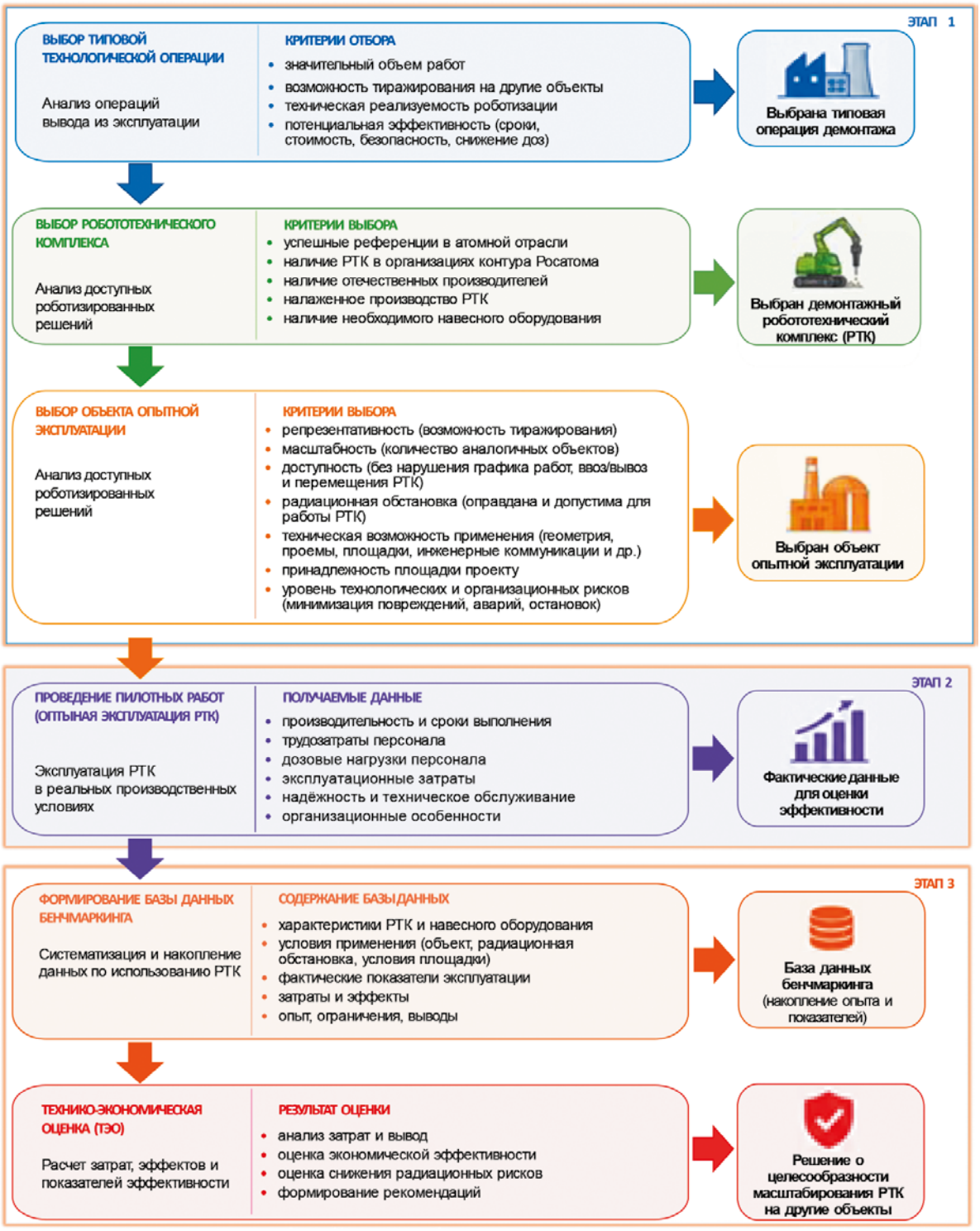

Рис. 2. Подход к проведению ТЭО на основе результатов пилотных испытаний

На каждом этапе осуществляется анализ результатов и принятие решений: доработать решение/технологию, внедрить его в работу или отказаться в пользу более эффективного варианта. Финальная стадия включает в себя интеграцию в деятельность по ВЭ ЯРОО, что открывает возможности для запуска собственного единичного или мелкосерийного производства. Таким образом может быть обеспечен системный и контролируемый процесс внедрения перспективных технологий, от поиска до реального промышленного применения.

Подход к технико-экономической оценке

На верхнем уровне при выборе технологии для практического применения рассматривается подход, аналогичный международной практике и основанный на сравнении РиДУС с традиционными способами выполнения работ. Вместе с тем для адекватной ТЭО применения РиДУС основное внимание предлагается уделять фактическим эксплуатационным параметрам. В настоящей работе рассмотрено определение эксплуатационных затрат как одного из показателей, характеризующихся наибольшей неопределенностью.

В работе рассмотрен подход к оценке эффективности применения демонтажных РТК, представляющих собой дистанционно управляемые машины с электрогидравлическим приводом. Выбор данного класса РиДУС обусловлен тем, что объем демонтажных работ вносит существенный вклад в суммарный объем работ проекта ВЭ ЯРОО, поэтому повышение их эффективности существенно повлияет на экономическую составляющую и/или уровень безопасности, обеспечивая максимальный совокупный эффект от внедрения роботизированных технологий.

Дополнительными предпосылками выбора демонтажных РТК являются:

- успешный опыт применения демонтажных РТК на объектах атомной отрасли;
- наличие комплексов на балансе организаций контура Госкорпорации «Росатом»;
- присутствие на рынке российских производителей, осуществляющих выпуск линейки РТК;
- наличие у демонтажных РТК подтвержденного опыта эксплуатации в строительстве, металлургии и других отраслях промышленности, что свидетельствует об их высоком уровне технологической зрелости.

Предлагаемый подход к выполнению ТЭО применения РТК включает три последовательных этапа (рис. 2).

Пилотные работы (опытная эксплуатация РТК)

Опытная эксплуатация РТК при выполнении типовых операций ВЭ для сбора данных, характеризующих фактические показатели их работы, проводилась на объектах АО «ОДЦ УГР». Для выполнения работ были выбраны два дистанционно управляемых демонтажных комплекса Brokk 100 и Бетонолом 4500, основные технические характеристики которых представлены в таблице 1.

В соответствии с предложенной методологией и критериями выбраны типовые операции ВЭ и объекты для проведения пилотных работ. В таблице 2 представлена сводная информация

Таблица 1. Технические характеристики РТК

Наименование характеристики	Значение	
	РТК легкого класса (модель Brokk 100)	РТК тяжелого класса (модель Бетонолом 4500)
Габаритные размеры В×Ш×Д, мм	1147×780×1847	1620×1500×4140
Масса, кг	980	4900
Номинальная мощность приводного электродвигателя, кВт	11	30
Максимальный вылет стрелы, м	3,6	6,84
Комплектное навесное оборудование	Гидромолот BHB 105, ковш, комби-ножницы HCS8SV 30C, циркулярная пила BCS 10	Гидромолот Epiroc SB 452, обратный ковш, дисковая пила, гидравлический захват

Таблица 2. Сводные данные по объектам, операциям ВЭ и РТК

Наименование группы объектов	Типовые операции ВЭ	РТК	Навесное оборудование
Хранилища ТРО	Снятие и восстановление верхнего изолирующего слоя; Извлечение; Сортировка; Контейнеризация	Бетонолом 4500	Грейферный ковш, обратный ковш, параллельный захват
		Brokk 100	Ковш, комби-ножницы (захват зажим)

Окончание табл. 2

Наименование группы объектов	Типовые операции ВЭ	РТК	Навесное оборудование
Строительные конструкции	Демонтаж ж/б конструкций; Сортировка; Контейнеризация	Бетонолом 4500	Дисковая пила, гидравлический молот, грейферный ковш, обратный ковш, параллельный захват
		Brokk 100	Гидравлический молот, комби-ножницы (захват зажим), ковш
	Удаление загрязненного слоя поверхностей скалывающим методом	Бетонолом 4500	Гидравлический молот, обратный ковш
		Brokk 100	Гидравлический молот, ковш
	Обкопка строительных конструкций	Бетонолом 4500	Обратный ковш
Крупногабаритное оборудование	Фрагментация металлических РАО; Контейнеризация металлических фрагментов	Brokk 100	Циркулярная пила, комби-ножницы (захват зажим)
Контейнеры с ТРО	Извлечение РАО из контейнера; Сортировка; Контейнеризация	Бетонолом 4500	Обратный ковш, параллельный захват
		Brokk 100	Комби-ножницы (захват зажим), ковш
Демонтаж и фрагментация инженерных коммуникаций	Фрагментация металлических фрагментов; Контейнеризация металлических фрагментов	Brokk 100	Циркулярная пила, комби-ножницы (захват зажим)

по операциям ВЭ и РТК с привязкой к объектам площадки. Объекты не конкретизированы, указана общая группа.

На рис. 3, 4 проиллюстрировано выполнение отдельных типовых операций ВЭ с использованием демонтажных РТК с различным навесным оборудованием.

В ходе испытаний фиксировались следующие параметры:

- продолжительность выполнения единичных операций ВЭ (чистое время работы манипулятора, время на маневрирование и смену навесного оборудования), ч;
- объем переработанного материала или извлеченных ТРО, $м^3$;
- габаритные размеры переработанного материала, м;
- площадь дезактивации, $м^2$;

Извлечение РАО ковшом

Демонтаж фундаментов циркулярной пилой

Извлечение ТРО грейферным ковшом

Демонтаж кирпичной стены

Рис. 3. Работы, проведенные с применением Бетонолом 4500

Извлечение РАО комби ножницами

Снятие верхнего изоляционного слоя

Демонтаж кирпичной стены

Фрагментация металлических РАО

Рис. 4. Работы, проведенные с применением Brokk 100

- фактическое энергопотребление комплексов, кВт·ч.

Также качественно оценивалось удобство проведения работ, надежность работы оборудования и технические показатели РТК в процессе выполнения испытаний. Полученные результаты использованы для подготовки первичных ТЭО.

Технико-экономическая оценка применения РТК в типовых операциях ВЭ

ТЭО включала анализ работы РТК, оценку экономической эффективности их применения, сравнение с традиционными методами выполнения работ. Для проведения расчета стоимости применялись следующие данные: время выполнения операций, производительность РТК, удельный расход электроэнергии, заработная плата специалистов (операторов), амортизация основного средства, стоимость электроэнергии (в своих регионах) и другие расходные материалы.

$$OPEX\left(\frac{\text{руб.}}{\text{единица объема}}\right)=\left(\begin{matrix}\text{стоимость}\\ \text{затраченных}\\ \text{ресурсов}\end{matrix}\right)+\left(\text{заработная плата}\right)+\left(\begin{matrix}\text{стоимость}\\ \text{расходных}\\ \text{элементов}\end{matrix}\right)$$

$$\text{Прямые затраты}\left(\frac{\text{руб.}}{\text{единица объема}}\right)=OPEX+\left(\begin{matrix}\text{амортизация}\\ \text{основного средства}\end{matrix}\right)$$

В случае отсутствия необходимых для расчета данных принимались некоторые допущения:

- стоимость расходных материалов принята равной 15% от амортизационной стоимости основного оборудования;
- амортизационная стоимость, при отсутствии данных в карточке учета, рассчитана по следующей формуле: амортизационная стоимость (руб./ч) = начальная стоимость оборудования (транспортного средства) (руб.)/срок службы оборудования (транспортного средства) (лет)/время работы в год (ч);
- заработная плата работника, выполняющего операции с использованием ручного инструмента, принята на основании стоимости работ по расценке ГЭСНр 69-01-019-04, а заработная плата механизатора (водителя экскаватора, бульдозера) принята равной заработной плате оператора РТК.

В качестве объектов сравнения рассматривались следующие варианты реализации в зависимости от типовой операции ВЭ:

- ручной труд (УШМ, АПР, сабельная пила и др.);
- механизированный труд (экскаватор, бульдозер);
- Бетонолом-4500, Brokk-100.

Сводные данные по стоимости некоторых типовых операций объектов сравнения приведены в таблице 3.

Таблица 3. Результаты определения стоимости работы РТК и сравнения с традиционными вариантами реализации типовой операции

Наименование операции	Применяемая техника (оборудование, инструмент)	Итого: стоимость работы OPEX, руб./на единицу объема	Итого: прямые затраты, руб./на единицу объема
Демонтаж инженерных систем (трубы диаметром до 70 мм, толщиной стенки до 3 мм)	Brokk 100 (гидравлические ножницы)	20,01	34,77
	АПР CUT 160	30,69	31,42
Демонтаж инженерных систем (диаметром от 70 до 100 мм, толщиной стенки до 5 мм)	Brokk 100 (дисковая пила)	72,92	124,06
	АПР CUT 160	34,28	35,15
Демонтаж инженерных систем (диаметром от 100 до 135 мм, толщиной стенки до 5 мм)	Brokk 100 (дисковая пила)	82,23	137,02
	АПР CUT 160	38,31	39,34
Фрагментация крупногабаритного оборудования (сталь 3, толщина стенки 15 мм)	Brokk 100 (дисковая пила)	564,40	968,14
	Аппараты для газовой резки АТН 09-05-007-03	206,40	210,11
Демонтаж строительных конструкций (бетон, прочность 22 МПа, усиленный армированием)	Бетонолом 4500 (4,9 т) (гидравлический молот)	1 358,23	4 250,31
	Механизированный труд, экскаватор массой 14 т	1 704,68	4 012,37
Демонтаж строительных конструкций	Бетонолом 4500 (4,9 т) (гидравлический молот)	704,79	1 955,42
	Механизированный труд, экскаватор массой 14 т	574,11	1 351,32

Полученные результаты расчета прямых затрат на выполнение типовой операции ВЭ в расчете на единицу объема показали, что при рассмотрении исключительно финансовых показателей для большинства случаев традиционная технология выполнения работ оказывается менее затратной по сравнению с применением РТК. Тем не менее окончательные выводы об эффективности применения РТК исключительно по финансовой оценке делать нецелесообразно по нескольким причинам.

Во-первых, стоимость выполнения работ традиционными методами определялась на основе архивных данных и носит оценочный характер. Наиболее объективное сравнение возможно при сопоставлении фактических эксплуатационных затрат, полученных при выполнении идентичных технологических операций как традиционным способом, так и с применением РТК. Данная работа возможна (или планируется) на следующих этапах работ.

Во-вторых, выполненная оценка не включает ряд нефинансовых эффектов. К ним относятся снижение дозовых нагрузок, уменьшение рисков выполнения работ в условиях потенциально опасных конструкций, сокращение воздействия вредных производственных факторов и в целом повышение уровня безопасности. Адекватная оценка таких эффектов затруднена, поскольку многие из них не имеют прямого денежного выражения, однако именно они во многих случаях определяют целесообразность применения РТК. В связи с этим разработка подходов к количественной оценке нефинансовых эффектов и их отражение в ТЭО является одним из перспективных направлений дальнейших исследований.

Рекомендации по применению РТК

Разработаны рекомендации (табл. 4) о применении РТК для выполнения типовых операций ВЭ в рассматриваемых сценарных условиях. Рекомендации подготовлены на основе: проведенных ТЭО применения демонтажных РТК; сравнительного анализа традиционных и роботизированных технологий выполнения типовых операций ВЭ; оценок дозовых нагрузок на персонал (не приведены в статье); анализа рисков (не приведены в статье).

На основании анализа установлено, что применение РТК является целесообразным при выполнении следующих операций: работах в пунктах хранения РАО (ПХРО) различной конфигурации (при наличии на площадке собственного РТК); демонтаже инженерных сетей (коммуникаций); сортировке РАО; демонтаже строительных конструкций, в т. ч. при подготовке технологических проемов, ликвидации элементов технологического оборудования и иных малогабаритных элементов строительных конструкций. При этом эффективность применения РТК зависит от множества факторов, поэтому каждый объект следует рассматривать и оценивать индивидуально.

Таблица 4. Рекомендации о применении РТК для выполнения типовых операций ВЭ и сценариев

Факторы оценки	Рекомендация	Условия применения РТК
Демонтаж инженерных коммуникаций		
• стоимость; • производственные факторы; • доза; • объем работ; • расположение объектов; • конфигурация РТК; • риски	• ручной труд с высоким потенциалом перехода на РТК; • требуется проведение дополнительных подтверждающих исследований	• стесненные/опасные условия труда (нефинансовые риски, сложно оценить последствия после наступления); • высокие уровни доз для «выравнивания» стоимости; • навесное оборудование (альтернатива использованному)
Демонтаж и фрагментация крупногабаритного оборудования		
• стоимость; • производственные факторы; • доза; • объем работ;	• РТК/ручной труд; • требуется проведение дополнительных подтверждающих исследований	• при высоких уровнях доз применение РТК безальтернативно
Демонтаж строительных конструкций (внутри объекта)		
• стоимость; • доза; • объем работ; • характеристика объекта	• РТК/ручной труд	• РТК работает на объекте на нескольких задачах; • высокие производственные риски для персонала; • высокие уровни доз для «выравнивания» стоимости
Демонтаж строительных конструкций (отдельные сооружения)		
• стоимость; • объем работ; • характеристика объекта	• крупная строительная техника	• при наличии на площадке ЭО РТК тяжелого класса
Сортировка и контейнеризация РАО		
• доза; • объем работ; • характеристика объекта; • производственные факторы; • риски	• РТК	–
Извлечение РАО (из ПХРО)		
• стоимость; • доза; • объем работ; • характеристика объекта	• РТК/крупная строительная техника; • требуется разработка единого алгоритма ликвидации ПХ с использованием РТК	• при наличии на площадке ЭО РТК тяжелого класса; • определяется величиной дозы

Для ликвидации ПХРО с использованием РТК следует разработать пошаговый алгоритм (методологию работы) и тиражировать на все имеющиеся объекты, что существенно повысит производительность выполнения работ.

Несмотря на то, что при текущих ТЭО ручной демонтаж инженерных сетей демонстрирует большую финансовую эффективность, рекомендуется рассмотреть возможность роботизации данной операции из-за ее высокой повторяемости, дозовому преимуществу и сокращению времени проведения работ (потенциально). На последующих этапах целесообразно провести дополнительные испытания РТК с использованием альтернативного навесного оборудования, что позволит повысить производительность и уточнить технико-экономические показатели.

Для достоверной оценки применения РТК для демонтажа крупногабаритного технологического оборудования следует провести опытную эксплуатацию РТК среднего и тяжелого классов для отработки типовых операций ВЭ на следующих этапах проведения работ.

Важно отметить, что типовые операции ВЭ повторяются на различных объектах и в разных условиях, но они не всегда могут быть полностью тиражированы. Это связано с большим количеством факторов, которые существенно влияют на возможность прямого переноса технологии или сценария работ.

Поэтому при выборе подхода (РТК / традиционный метод) рекомендуется использовать гибридный подход:

1) формировать укрупненные типовые модели операций, применимые к большинству объектов (есть в рамках данной работы, но подлежат уточнению и расширению);

2) предусматривать корректирующие коэффициенты и вариативность (подлежат разработке);

3) интегрировать этап оценки фактических условий объекта перед началом работ;

4) включать возможность оперативного изменения алгоритма работы РТК.

Заключение

В работе предложена методология проведения ТЭО и представлены первичные ТЭО применения РТК, базирующиеся на результатах их пилотной эксплуатации. Данный этап следует рассматривать как основу для дальнейшего развития: последующие работы должны уточнять принятые допущения, детализировать операции с учетом специфики конкретных объектов, расширять перечень сценариев, РТК и объектов, а также адаптировать методологию на основе вновь получаемых данных и обратной связи от эксплуатирующих организаций. Полученные результаты подтверждают целесообразность использования пилотной эксплуатации в качестве обязательного этапа подготовки ТЭО.

Вместе с тем разработка полностью унифицированного подхода оценки эффективности применения РиДУС вряд ли реализуема, поскольку проекты ВЭ зачастую характеризуется уникальными техническими, радиационными и организационными особенностями. Оценка целесообразности применения РиДУС должна выполняться индивидуально на основе комплексного технико-экономического анализа, учитывающего не только стоимостные показатели, но и ожидаемый уровень безопасности, снижение дозовых нагрузок, особенности объекта и условия выполнения работ. При этом накопление результатов пилотной эксплуатации и развитие бенчмаркинга (базы данных) позволят постепенно сформировать единые подходы и повысить достоверность оценки эффективности применения РТК в проектах ВЭ ЯРОО.

Благодарности

Авторы выражают благодарность коллективам АО «ОДЦ УГР» и АО «МСЗ» за организацию проведения опытной эксплуатации демонтажных робототехнических комплексов, а также за предоставление исходных данных, использованных при подготовке настоящей работы.

Литература

1. IAEA BULLETIN. The IAEA's flagship publication. April 2023.
2. OECD/NEA. Status, Barriers and Cost-Benefits of Robotic and Remote Systems Applications in Nuclear Decommissioning and Radioactive Waste Management. NEA/RWM/R(2022)1, Paris, 2022.
3. *Каленова М. Ю., Кузнецов И. В., Иванов А. Ю., Перов А. В., Ильина О. А.* К вопросу практического применения демонтажных робототехнических комплексов отечественного производства для решения задач вывода из эксплуатации радиационно опасных объектов // Радиоактивные отходы. 2024. № 4 (29). С. 42—52. DOI: 10 .25283/2587-9707-2024-4-42-52.
4. РЭА. Ежемесячный журнал атомной энергетики России. Тема номера: Вывод блоков из эксплуатации. 2021. № 06.
5. *Арутюнян Р. В., Боровой А. А.* Извлечение ядерного топлива из аварийных реакторов (Чернобыль и Фукусима). Под общ. ред. акад. РАН Е. П. Велихова. — М. : НИЦ «Курчатовский институт», 2019. 186 с.
6. В Москве завершен вывод из эксплуатации объекта советского ядерного наследия. — URL: https://xn----btb4bfrm9d.xn--p1ai/society/news/v-moskve-zavershen-vyvod-iz-ekspluatatsii-obekta-sovetskogo-yadernogo-naslediya/ (дата обращения: 18.05.2026).
7. From Cherno-bots to Iron Man suits: the development of nuclear waste robotics. — URL: https://www.power-technology.com/features/cleaning-up-nuclear-waste-robotics/?cf-view&cf-closed (дата обращения: 21.04.2026).
8. *Tu C. Y. et al.* The planning strategy of robotics technology for nuclear decommissioning in Taiwan // Nuclear Engineering and Technology. 2024. Т. 56. № 1. С. 64—69. DOI: 10.1016/j.net.2023.09.007.
9. Компания Sellafield Ltd испытывает технологию роботизированного сбора проб. — URL: https://blog.secnrs.ru/2026/04/%D0%BA%D0%BE%D0%BC%D0%BF%D0%B0%D0%BD%D0%B8%D1%8F-sellafield-ltd-%D0%B8%D1%81%D0%BF%D1%8B%D1%82%D1%8B%D0%B2%D0%B0%D0%B5%D1%82-%D1%82%D0%B5%D1%85%D0%BD%D0%BE%D0%BB%D0%BE%D0%B3%D0%B8%D1%8E-%D1%80%D0%BE/ (дата обращения: 28.05.2026).
10. *Лысачев М. Н., Прохоров А. Н.* Робототехника. Анализ, тренды, мировой опыт. Науч. редакторы Д. Тетерюков, А. Федосеев. Корпоративное издание (Росатом, Консист-ОС, Атомдата Интеграция). — Москва, Белгород, КОНСТАНТА, 2024. 466 с.
11. Обзор достижений и возможностей российских робототехнических комплексов для задач вывода из эксплуатации ЯРОО. — URL: https://xn----btb4bfrm9d.xn--p1ai/society/news/obzor-dostizheniy-i-vozmozhnostey-rossiyskikh-robototekhnicheskikh-kompleksov-dlya-zadach-vyvoda-iz-/ (дата обращения: 05.06.2026).
12. «Росатом» создает отраслевой центр компетенций по роботизации на базе «Атоминтелмаш». — URL: https://www.elec.ru/news/2026/06/02/rosatom-sozdayot-otraslevoj-

tsentr-kompetentsij-po.html (дата обращения: 22.06.2026).
13. До 2030 года число роботов в «Росатоме» необходимо довести до 6000. — URL: https://atomvestnik.ru/2025/09/30/do-2030-goda-chislo-robotov-v-rosatome-neobhodimo-dovesti-do-6000/ (дата обращения: 21.04.2026).
14. *Smith R., Cucco E., Fairbairn C.* Robotic Development for the Nuclear Environment: Challenges and Strategy // Robotics. 2020. Vol. 9. No. 4. P. 94. DOI: 10.3390/robotics9040094.
15. OECD/NEA. Status, Barriers and Cost-Benefits of Robotic and Remote Systems Applications in Nuclear Decommissioning and Radioactive Waste Management. NEA/RWM/R(2022)1. Paris, 2022.
16. OECD/NEA. Supporting the Implementation of Robotics and Remote Systems in the Nuclear Back-End. NEA/RWM/R(2024)3. Paris, 2024.
17. *Тихонова А. А., Самойлов А. А., Ильина О. А., Иванов А. Ю., Белоусов С. В., Сергунин А. П., Ступин Р. С., Гребнева А. Д.* Особенности процесса поиска и внедрения новых технологических решений по выводу из эксплуатации объектов ядерного наследия и обращению с образующимися при этом радиоактивными отходами // Радиоактивные отходы. 2022. № 4 (21). С. 90—102. DOI: 10.25283/2587-9707-2022-4-90-102.
18. ИБРАЭ представил результаты испытаний новых российских технических решений по теме ВЭ. — URL: https://фцп-ярб.рф/society/news/ibrae-predstavil-rezultaty-ispytaniy-novykh-rossiyskikh-tekhnicheskikh-resheniy-po-teme-ve/?ysclid=ms3cj72l7n580827504 (дата обращения: 21.04.2026).
19. *Каленова М. Ю., Перов А. В.* Внедрение демонтажных роботов в деятельность по выводу из эксплуатации ядерно и радиационно опасных объектов: анализ рисков и возможностей для повышения безопасности и эффективности работ // Сборник тезисов XII Международной научной конференции «Радиационная защита и радиационная безопасность в ядерных технологиях», 29—31 октября 2025 г., Москва. Под общ. ред. акад. РАН Л. А. Большова; Ин-т проблем безопасного развития атомной энергетики Российской академии наук. — М. : ИБРАЭ РАН, 2025.

Информация об авторах

Каленова Майя Юрьевна, кандидат технических наук, руководитель проекта, Институт проблем безопасного развития атомной энергетики РАН (115191, Москва, Большая Тульская ул., д. 52), e-mail: MYKalenova@ibrae.ac.ru.

Хасанов Руслан Рафизович, специалист, Институт проблем безопасного развития атомной энергетики РАН (115191, Москва, Большая Тульская ул., д. 52), e-mail: hasanov@ibrae.ac.ru.

Библиографическое описание статьи

Каленова М. Ю., Хасанов Р. Р. Пилотные работы как основа для расчета технико-экономических оценок применения демонтажных робототехнических комплексов при выводе из эксплуатации ядерно и радиационно опасных объектов // Радиоактивные отходы. 2026. № 3 (36). С. 106—117. DOI: 10.25283/2587-9707-2026-3-106-117.

PILOT STUDIES AS A BASIS FOR THE TECHNO-ECONOMIC ASSESSMENT OF ROBOTIC DISMANTLING SYSTEMS AND THEIR APPLICATION IN THE DECOMMISSIONING OF NUCLEAR AND RADIATION-HAZARDOUS FACILITIES

Kalenova M. Yu., Khasanov R. R.

Nuclear Safety Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

Article received on July 29, 2026

The paper addresses the deployment of robotic and remote systems (RRS) in nuclear decommissioning, which is limited due to the lack of reliable techno-economic assessments (TEAs) of RRS and of an appropriate assessment

methodology. It proposes a TEA approach to robotic dismantling systems (RDS) based on pilot operations conducted at actual nuclear facilities. The proposed approach includes the selection of basic decommissioning tasks, RDSs and facilities followed by pilot RDS operation, collection of operational statistics and calculation of key techno-economic performance indicators. The paper outlines the main principles based on which basic decommissioning operations and facilities were selected and presents a preliminary techno-economic and dose assessment of RDS application. The research was based on the initial data from pilot operation of Brokk 100 and Betonolom 4500 robotic systems engaged in basic decommissioning operations at the PDC UGR site, i.e., waste retrieval, segregation and packaging, dismantling and fragmentation of building structures, process equipment and engineering utilities. The paper presents actual data on system performance and energy consumption, as well as the costs calculated on a unit-work basis for the selected basic decommissioning operations involving the use of RDS that were compared with those of conventional methods. The findings demonstrate that pilot studies provide a sound basis for a unified database and reliable techno-economic RDS assessments. Moreover, they also promote further identification of potential areas in which RDS application may offer some economic benefits and priorities for further research.

Keywords: *robotic dismantling system, decommissioning, dismantlement, techno-economic assessment, robotics, nuclear industry, pilot operation, efficiency, radioactive waste.*

Acknowledgment

The authors express their gratitude to the staff of PDC UGR JSC for organizing the pilot operation of dismantling robotic complexes, as well as for providing the initial data used in the development of this work.

References

1. IAEA BULLETIN. The IAEA's flagship publication. April 2023.

2. OECD/NEA. Status, Barriers and Cost-Benefits of Robotic and Remote Systems Applications in Nuclear Decommissioning and Radioactive Waste Management. NEA/RWM/R(2022)1, Paris, 2022.

3. Kalenova M . Yu., Kuznetsov I . V., Ivanov A . Yu., Perov A . V., Ilyina O . A. K voprosu prakticheskogo primeneniya demontazhnykh robototekhnicheskikh kompleksov otechestvennogo proizvodstva dlya resheniya zadach vyvoda iz ekspluatatsii radiatsionno opasnykh ob"yektov [On the practical application of Russian-made dismantling robotic complexes addressing the challenges in the decommissioning of radiation hazardous facilities]. *Radioaktivnyye otkhody — Radioactive Waste,* 2024, no. 4 (29), pp. 42—52. DOI: 10.25283/2587-9707 2024-4-42-52.

4. *REA. Yezhemesyachnyy zhurnal atomnoy energetiki Rossii. Tema nomera: Vyvod blokov iz ekspluatatsii* [Monthly Magazine Nuclear Power in Russia. Feature Topic: Decommissioning of Power Units], 2021, no. 06.

5. Arutyunyan R. V., Borovoy A. A. *Izvlecheniye yadernogo topliva iz avariynykh reaktorov (Chernobyl' i Fukusima)* [Removal of nuclear fuel from damaged reactors (Chernobyl and Fukushima)]. Under the general editorship of RAS Member E. P. Velikhov. Moscow, NITS "Kurchatovskiy institute" Publ., 2019. 186 p.

6. *V Moskve zavershen vyvod iz ekspluatatsii ob"yekta sovetskogo yadernogo naslediya* [Decommissioning of a Soviet nuclear legacy facility has been completed in Moscow]. — URL: https://xn----btb4bfrm9d.xn--p1ai/society/news/v-moskve-zavershen-vyvod-iz-ekspluatatsii-obekta-sovetskogo-yadernogo-naslediya/ (accessed on: 18.05.2026).

7. From Cherno-bots to Iron Man suits: the development of nuclear waste robotics. — URL: https://www.power-technology.com/features/cleaning-up-nuclear-waste-robotics/?cf-view&cf-closed (accessed on: 21.04.2026).

8. Tu C. Y. et al. The planning strategy of robotics technology for nuclear decommissioning in Taiwan. *Nuclear Engineering and Technology,* 2024, vol. 56, no. 1, pp. 64—69. DOI: 10.1016/j.net.2023.09.007.

9. *Kompaniya Sellafield Ltd ispytyvayet tekhnologiyu robotizirovannogo sbora prob* [Sellafield Ltd is testing a robotic sample collection system]. — URL: https://blog.secnrs.ru/2026/04/%D0%BA%D0%BE%D0%BC%D0%BF%D0%B0%D0%BD%D0%B8%D1%8F-sellafield-ltd-%D0%B8%D1%81%D0%BF%D1%8B%D1%82%D1%8B%D0%B2%D0%B0%D0%B5%D1%82-%D1%82%D0%B5%D1%85%D0%BD%D0%BE%D0%BB%D0%BE%D0%B3%D0%B8%D1%8E-%D1%80%D0%BE/ (accessed on: 28.05.2026).

10. Lysachev M. N., Prokhorov A. N. *Robototekhnika. Analiz, trendy, mirovoy opyt* [Robotics. Analysis, Trends and Global Experience]. Scientific editors D. Teterukov, A. Fedoseyev. Corporate publication (Rosatom, Konsist-OS, Atomdata Integratsiya). Moscow, Belgorod, KONSTANTA Publ., 2024. 466 p.

11. *Obzor dostizheniy i vozmozhnostey rossiyskikh robototekhnicheskikh kompleksov dlya zadach vyvoda iz ekspluatatsii YAROO* [Achievements and capabilities of Russian robotic systems for the nuclear decommissioning: overview]. — URL: https://xn----btb4bfrm9d.xn--p1ai/society/news/obzor-dostizheniy-i-vozmozhnostey-rossiyskikh-robototekhnicheskikh-kompleksov-dlya-zadach-vyvoda-iz-/ (accessed on: 05.06.2026).

12. *"Rosatom" sozdayot otraslevoy tsentr kompetentsiy po robotizatsii na baze "Atomintelmash"* [Rosatom is

establishing an industry-specific competence center for robotics at Atomintelmash] — URL: https://www.elec.ru/news/2026/06/02/rosatom-sozdayot-otraslevoj-tsentr-kompetentsij-po.html (accessed on: 22.06.2026).
13. *Do 2030 goda chislo robotov v "Rosatome" neobkhodimo dovesti do 6000* [Rosatom must increase the number of robots to 6,000 by 2030]. — URL: https://atomvestnik.ru/2025/09/30/do-2030-goda-chislo-robotov-v-rosatome-neobhodimo-dovesti-do-6000/ (accessed on: 21.04.2026).
14. Smith R., Cucco E., Fairbairn C. Robotic Development for the Nuclear Environment: Challenges and Strategy. *Robotics,* 2020, vol. 9, no. 4, p. 94. DOI: 10.3390/robotics9040094.
15. OECD/NEA. Status, Barriers and Cost-Benefits of Robotic and Remote Systems Applications in Nuclear Decommissioning and Radioactive Waste Management. NEA/RWM/R(2022)1. Paris, 2022.
16. OECD/NEA. Supporting the Implementation of Robotics and Remote Systems in the Nuclear Back-End. NEA/RWM/R(2024)3. Paris, 2024.
17. Tikhonova A. A., Samoilov A. A., Ilina O. A., Ivanov A. Yu., Belousov S. V., Sergunin A. P., Stupin R. S., Grebneva A. D. Osobennosti protsessa poiska i vnedreniya novykh tekhnologicheskikh resheniy po vyvodu iz ekspluatatsii ob"yektov yadernogo naslediya i obrashcheniyu s obrazuyushchimisya pri etom radioaktivnymi otkhodami [Specific aspects of searching for and implementing new engineering solutions for the decommissioning of nuclear legacy facilities and the management of radioactive waste generated during this process]. *Radioaktivnyye otkhody — Radioactive Waste,* 2022, no. 4 (21), pp. 90—102. DOI: 10.25283/2587-9707-2022-4-90-102.
18. *IBRAE predstavil rezul'taty ispytaniy novykh rossiyskikh tekhnicheskikh resheniy po teme VE* [IBRAE presented testing data on new Russian engineering designs for nuclear decommissioning]. — URL: https://фцп-ярб.рф/society/news/ibrae-predstavil-rezultaty-ispytaniy-novykh-rossiyskikh-tekhnicheskikh-resheniy-po-teme-ve/?ysclid=ms3cj72l7n580827504 (accessed on: 21.04.2026).
19. Kalenova M. Yu., Perov A. V. *Vnedreniye demontazhnykh robotov v deyatel'nost' po vyvodu iz ekspluatatsii yaderno i radiatsionno opasnykh ob"yektov: analiz riskov i vozmozhnostey dlya povysheniya bezopasnosti i effektivnosti rabot* [Deployment of Dismantling Robots in the Decommissioning of Nuclear and Radiation Hazardous Facilities: Analysis of Risks and Opportunities Boosting Safety and Efficiency]. *Sbornik tezisov XII Mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii "Radiatsionnaya zashchita i radiatsionnaya bezopasnost' v yadernykh tekhnologiyakh"* [Proceedings of the XII International Scientific Conference Radiation Protection and Radiation Safety in Nuclear Technologies], October 29—31, 2025, Moscow. Ed. by Member of the Russian Academy of Sciences L. A. Bolshov. Moscow, IBRAE RAS Publ., 2025. 230 p.

Information about the authors

Kalenova Maiia Yurievna, PhD, Project manager, Nuclear Safety Institute of the Russian Academy of Sciences (52, Bolshaya Tulskaya st., Moscow, 115191, Russia), e-mail: MYKalenova@ibrae.ac.ru.

Khasanov Ruslan Rafizovich, Specialist, Nuclear Safety Institute of the Russian Academy of Sciences (52, Bolshaya Tulskaya st., Moscow, 115191, Russia), e-mail: hasanov@ibrae.ac.ru.

Bibliographic description

Kalenova M. Yu., Khasanov R. R. Pilot Studies as a Basis for the Techno-Economic Assessment of Robotic Dismantling Systems and their Application in the Decommissioning of Nuclear and Radiation-Hazardous Facilities. *Radioactive Waste,* 2026, no. 3 (36), pp. 106—117. DOI: 10.25283/2587-9707-2026-3-106-117. (In Russian).