

СТОИМОСТЬ ЗАХОРОНЕНИЯ РАО: ЗАРУБЕЖНЫЕ ОЦЕНКИ

В. Т. Сорокин¹, Д. И. Павлов²

¹АО «АТОМПРОЕКТ», Санкт-Петербург

²Санкт-Петербургский филиал АО «ФЦНИВТ «СНПО «ЭЛЕРОН» – «ВНИПИЭТ», Санкт-Петербург

Статья поступила в редакцию 5 декабря 2018 г.

Рассмотрены подходы к оценке стоимости и основные факторы, влияющие на стоимость захоронения радиоактивных отходов (РАО). Приведены данные по стоимости ряда существующих и проектируемых пунктов захоронения радиоактивных отходов (ПЗРО) и отработавшего ядерного топлива (ОЯТ) и выполнен сравнительный анализ стоимости различных типов ПЗРО (наземных, подземных, глубинных).

Ключевые слова: радиоактивные отходы, пункты захоронения радиоактивных отходов, жизненный цикл ПЗРО, стоимость ПЗРО, тарифы на захоронение.

Введение

В настоящее время в большинстве стран, имеющих развитую атомную промышленность, реализуется общепризнанная концепция обращения с РАО, предусматривающая их кондиционирование и захоронение.

Все страны, подписавшие Объединенную конвенцию о безопасности обращения с отработавшим топливом и о безопасности обращения с радиоактивными отходами, для снятия бремени с будущих поколений приняли на себя обязательства по созданию специальных фондов для выполнения обязательств по захоронению ядерных отходов [1]. В связи с этим, вопросы создания специальных фондов, определение стоимости и тарифов на захоронение играют важную роль для всех стран, принимающих решения по заключительной стадии обращения с РАО.

Состояние и принятые технологии захоронения РАО в европейских странах рассмотрены в ряде работ [2–6].

Задачами данной статьи являются:

- определение зарубежных подходов к оценке стоимости захоронения РАО;
- анализ факторов, влияющих на стоимость захоронения РАО;
- международные оценки и сравнение затрат на создание и эксплуатацию ПЗРО и тарифов на захоронение РАО;
- определение путей снижения затрат на захоронение РАО.

Жизненный цикл ПЗРО

Сложность решения задач, поставленных в настоящей статье, обусловлена национальными особенностями в подходах к оценке стоимости затрат, различиями в конструкциях, сроках проектирования и строительства ПЗРО, а также необходимостью принимать во внимание оценку затрат на весь жизненный цикл пункта захоронения РАО.

Жизненный цикл ПЗРО включает четыре этапа (табл. 1). Каждому этапу свойственен свой набор работ.

Таблица 1. Этапы жизненного цикла ПЗРО и перечень основных работ

Предэксплуатационный	Эксплуатационный	Закрытие	Мониторинг
Проведение НИОКР	Лицензирование	Лицензирование	Активный контроль
Выбор площадки	Размещение упаковок в отсеках ПЗРО	Создание защитных барьеров	Пассивный контроль
Лицензирование	Строительство последующих очередей ПЗРО		
Проектно-исследовательские работы, включая обоснование безопасности	Наблюдение		
Строительство первой очереди и объектов инфраструктуры			

Предэксплуатационный этап включает в себя весь объем работ, необходимых для строительства и ввода ПЗРО в эксплуатацию. Для существующих зарубежных пунктов захоронения данный этап отличается длительным поиском оптимальной площадки для размещения ПЗРО и проведением масштабных научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ, направленных на поиск безопасных технических решений по захоронению РАО. Для целей захоронения ВАО и долгоживущих САО в ряде стран, эксплуатирующих АЭС, данный этап продолжается уже несколько десятилетий с 70–80-х годов прошлого века.

На эксплуатационном этапе осуществляется загрузка сооружения захоронения упаковками с РАО. Длительность данного этапа зависит главным образом от вместимости ПЗРО, однако в ряде стран (например, в Бельгии) принята концепция долговременного наблюдения за состоянием ПЗРО до момента его закрытия, значительно увеличивающая эксплуатационный этап и фактически превращающая на данном этапе ПЗРО в пункт долговременного хранения РАО.

Этап закрытия ПЗРО предусматривает создание защитных барьеров, обеспечивающих локализацию радионуклидов в пределах ПЗРО и препятствующих возможным воздействиям на контейнеры с РАО извне. Технологии возведения защитных барьеров на этапах закрытия ПЗРО предусматривают бетонирование, засыпку пустот буферным материалом, возведение многослойных покрытий и другие способы.

После закрытия ПЗРО начинается этап мониторинга окружающей среды и хранилища, состоящий из двух этапов: активного контроля и пассивного контроля. На стадии активного контроля осуществляется отбор и анализ проб из наблюдательных скважин и колодцев,

инспекции состояния защитных барьеров, регулярное техническое обслуживание «шапок» (для приповерхностных ПЗРО), охрана площадки и другие работы. Стадия пассивного контроля предполагает ведомственный учет площадки захоронения и, в некоторых случаях, ее охрану. Следует отметить, что процесс мониторинга в том или ином виде выполняется на всех стадиях жизненного цикла ПЗРО [7].

Сроки проектирования, возведения и эксплуатации ПЗРО для различных категорий РАО варьируются от нескольких десятков до более чем 100 лет. В среднем длительность жизненного цикла ПЗРО (с начальной стадии до завершения стадии активного контроля) составляет:

- 100 лет для ОНАО;
 - 300–500 лет для НАО и короткоживущих САО;
- Для захоронения долгоживущих САО и ВАО/ОЯТ вопрос длительности стадии активного контроля остается дискуссионным [7].

Перечень затрат и их соотношение на этапах жизненного цикла ПЗРО для ВАО представлен на рис. 1 [8].

Одним из наиболее затратных этапов в жизненном цикле ПЗРО является строительство, так как для функционирования сооружения захоронения необходимо создание развернутой инфраструктуры. На этап строительства приходится пик расходов.

Расходы на эксплуатационный этап, в зависимости от вместимости ПЗРО, суммарно могут превышать расходы на строительство, однако значительно растянуты во времени. Например, для канадского проекта ПЗРО вместимостью 3,6 млн ОТВС (малогабаритные ОТВС длиной 50 см для реакторов типа CANDU) затраты на строительство (2033–2042 гг.) составляют 3,8 млрд \$ (в ценах 2016 г.), а затраты на эксплуатацию (2043–2072 гг.) – 9,4 млрд \$ [9].

На эксплуатационном этапе, для стран с большой территорией, значительная часть затрат необходима на транспортировку РАО. Данные по пункту захоронения Yucca Mountain в США [10] показывают, что суммарно на транспортировку РАО за весь период эксплуатации ПЗРО (2017–2073 гг.) будет потрачено 20,2 млрд \$ (в ценах 2007 г.), что составляет пятую часть от всех затрат на захоронение РАО в данном ПЗРО.

Длительность начальных стадий жизненного цикла ПЗРО (НИОКР, проектирование, выбор площадки, лицензирование) сильно варьируется для разных стран. Это обусловлено сложностью прогнозирования результатов НИОКР, социально-политическими и экономическими факторами, возможными изменениями законодательства за данный период. Например, разработка проектов ПЗРО для НАО/САО во Франции и Германии велась с 1980-х годов. При этом французский ПЗРО CSA (вместимость 1 млн м³) эксплуатируется с 1992 года, а запуск германского

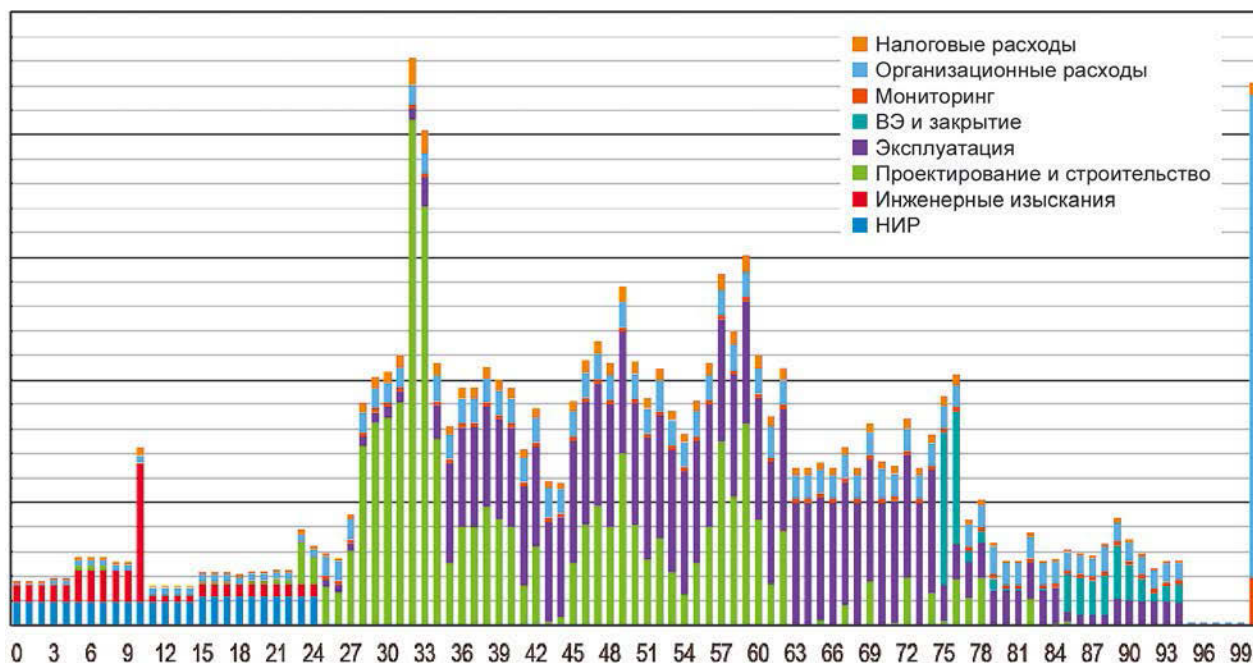


Рис. 1. Соотношение затрат жизненного цикла ПЗРО (10 лет – выбор потенциальных площадок размещения ПЗРО, 15 лет – определение конкретной площадки захоронения и разработка технологий захоронения, 10 лет – возведение ПЗРО, 40 лет – эксплуатация, 20 лет – ВЭ зданий и сооружений и закрытие ПЗРО, 300 лет – ведомственный контроль (стоимость данного этапа приведена суммарно в столбце «100 лет»))

ПЗРО Konrad (вместимость 0,65 млн м³) намечен только на 2021 год.

С учетом длительности жизненного цикла ПЗРО и неравномерного распределения затрат во времени механизмы финансирования задач окончательной изоляции РАО имеют свои особенности.

Принципы и механизмы финансирования захоронения РАО

Принцип «загрязняющий платит» широко распространен как главный принцип при учреждении механизмов финансирования обращения с радиоактивными отходами. Этот принцип отражается в законодательствах об охране окружающей среды многих государств и обеспечивает сокращение объемов нарабатываемых РАО за счет совершенствования технологий переработки и кондиционирования и повышения культуры производства.

Задачи захоронения отходов финансируются из фондов, формируемых отчислениями с каждого МВт-ч электроэнергии. В мировой практике распространено учреждение специализированных организаций, распоряжающихся данными фондами, а также национальных компаний, ответственных за захоронение РАО. Во Франции такой организацией является Andra, в Германии – DBE Technology (с 2018 года переименована в GBE Technology), в Швеции – SKB, в Бельгии – Ondraf/Niras и т.д.

Размер ежегодных отчислений в фонды может варьироваться в зависимости от приоритетов

национальных программ по обращению с РАО, показателей прибыли, уровней инфляции и других факторов. В Швеции, например, наблюдается тенденция сокращения отчислений в фонд обращения с РАО [8, с. 52].

С учетом того, что фонды формируются до строительства ПЗРО, а покрывать должны все потребности задач окончательной изоляции РАО, уполномоченными организациями предусматриваются различные финансовые инструменты, обеспечивающие долгосрочное финансирование проектов захоронения, например инвестиции денежных средств данных фондов. Прогнозы по использованию фондов разрабатываются на различные уровни инфляции и сценарии развития атомной промышленности (продление сроков эксплуатации АЭС, досрочное закрытие АЭС и другие сценарии).

Несмотря на то что подходы к финансированию задач окончательной изоляции РАО в целом выработаны и позволяют реализовывать долгосрочные дорогостоящие проекты, актуальной остается задача снижения затрат на захоронение РАО. В этой связи может быть полезен анализ основных факторов, оказывающих влияние на стоимость захоронения.

Факторы, влияющие на стоимость захоронения РАО

Существенное влияние на стоимость захоронения оказывают национальное законодательство и нормативно-техническая база в области

захоронения РАО (классификация РАО, технические требования, санитарные правила). Основные факторы, оказывающие влияние на стоимость захоронения РАО, условно можно разделить на две категории: технические и социально-политические. Учитывая важность общественного влияния, социально-политические факторы играют существенную роль в вопросах окончательной изоляции РАО. Эти вопросы выходят за рамки статьи и рассмотрены в работах [12, 13].

К техническим факторам, влияющим на стоимость захоронения РАО, относятся:

- объем ПЗРО;
- характеристика отходов (активность, состав, тепловыделение);
- тип контейнеров для захоронения РАО;
- тип сооружения: приповерхностный (наземный / подземный) или глубокий ПЗРО;
- место размещения ПЗРО (наличие инфраструктуры, удаленность от поставщиков РАО, геология площадки);
- обратимость захоронения;
- сроки мониторинга за состоянием ПЗРО и окружающей среды.

По результатам исследований [14–16], ключевым фактором, оказывающим влияние на удельную стоимость захоронения РАО, является вместимость ПЗРО (объем). Анализ зависимости стоимости захоронения кубометра РАО от объемов сооружений захоронения (рис. 2) [16] показывает многократное сокращение удельной стоимости захоронения РАО с увеличением вместимости ПЗРО. Это объясняет мировую практику возведения крупных централизованных объектов окончательной изоляции

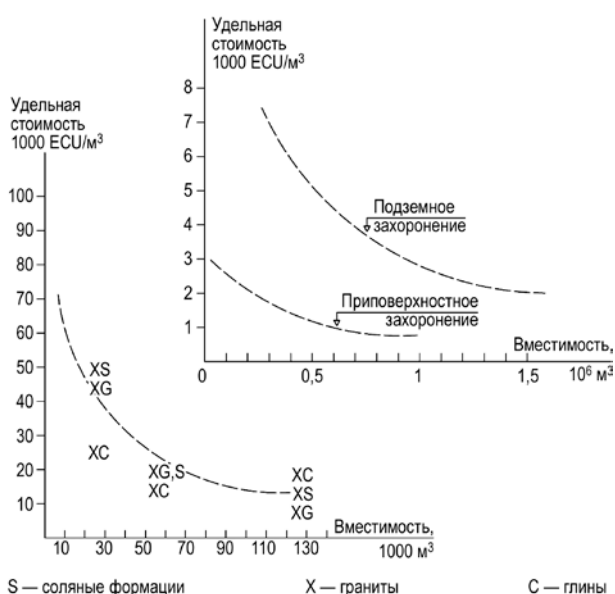


Рис. 2. Зависимость стоимости захоронения РАО от вместимости ПЗРО (слева внизу – для долгоживущих CAO и ВАО, справа сверху – для НАО и короткоживущих CAO) [16]

отходов. Страны, нарабатывающие большие количества РАО (Великобритания, Франция), эксплуатируют пункты окончательной изоляции, рассчитанные на захоронение около 1 млн м³ отходов.

С учетом зависимостей, представленных на рис. 2, для стран, нарабатывающих незначительные объемы РАО, экономически целесообразно может быть возведение многонациональных ПЗРО. Эти вопросы рассматривались МАГАТЭ и другими организациями [17–19], в том числе для стран восточной Европы, однако на данный момент вследствие противоречий по социально-политическим и юридическим факторам не нашли окончательного решения. В настоящее время вопросами создания многонационального европейского пункта захоронения занимается объединенная европейская организация ERDO (European Repository Development Organization).

Среди характеристик РАО за исключением активности и содержания долгоживущих радионуклидов одним из ключевых факторов, влияющих на стоимость окончательной изоляции, является величина тепловыделения (для ВАО/ОЯТ). Так как расстояние между упаковками с ВАО в сооружениях захоронения определяется исходя из условия не превышения температуры вмещающих пород, долговременное хранение ВАО/ОЯТ может обеспечить значительное сокращение тепловыделения от упаковок и, соответственно, более плотное их размещение в ПЗРО. Например, для французского проекта Cigeo увеличение времени хранения ВАО на 20 лет позволило сократить площадь подземной части ПЗРО приблизительно на 35 % [20] (рис. 3).

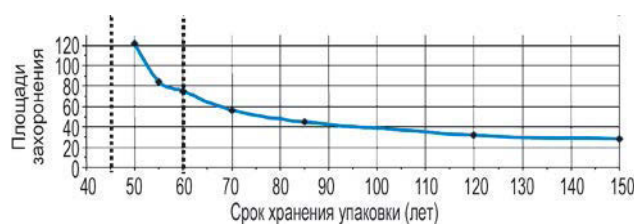


Рис. 3. Зависимость площади сооружения захоронения ВАО от времени охлаждения упаковок в пункте долговременного хранения (французский проект Cigeo по захоронению ВАО в глинах) [20]

Для шведско-финской концепции окончательной изоляции ОЯТ KBS-3 проводились исследования зависимости затрат на реализацию данной концепции от расположения скважин захоронения (вертикально/горизонтально). По данным [21] горизонтальное размещение скважин позволяет сэкономить около 300 млн € для шведского проекта ПЗРО (в том числе за счет того, что при горизонтальном расположении в

одной скважине может размещаться большее количество контейнеров).

Для захоронения НАО и короткоживущих САО в работе [14] проводились исследования по сравнению стоимости захоронения для разных конструкций ПЗРО (наземных/подземных). Исследования показали, что:

- стоимость сооружения наземных ПЗРО ниже, чем подземных (например, для Венгрии, где реализованы оба варианта приблизительно равной вместимости (30—40 тыс. м³), разница составила около 30 %);
- стоимость эксплуатации наземных и подземных ПЗРО сопоставима.

При этом в исследовании особо отмечалось, что, несмотря на более высокую стоимость возведения подземных ПЗРО, делать заключение о том, что конечная стоимость подземного захоронения РАО превышает стоимость наземного захоронения, преждевременно. Подземное захоронение может давать экономию за счет:

- сокращения сроков мониторинга;
- более рационального использования наземных площадей;
- исключения затрат на создание и обслуживание покрывающего экрана наземных ПЗРО;
- инфраструктурных решений (например, в Швеции размещение ПЗРО SFR под дном Балтийского моря в непосредственной близости к АЭС Forsmark позволило оптимально использовать существующую инфраструктуру АЭС для захоронения РАО).

Глубина размещения ПЗРО также оказывает влияние на стоимость сооружений захоронения. По данным [15], каждые 250 м глубины увеличивают стоимость ПЗРО¹ приблизительно на 10 %.

Влияние типа вмещающих пород (граниты/глины/соли) на стоимость захоронения на данный момент детально не исследовано. Однако в США проводился сравнительный анализ стоимости различных концепций захоронения ОЯТ/ВАО по потенциальным вмещающим породам (гранитам/глинам/солям) из расчета вместимости ПЗРО около 140 тыс. т. По данным [22], стоимость захоронения на 2012 год, приведенная к 1 кг ОЯТ, составила:

- 571 \$/кг — для концепции захоронения в глинах;
- 579 \$/кг — для концепции захоронения в кристаллических породах;
- 232 \$/кг — для концепции захоронения в солях.

При этом характерно, что стоимость работ по бурению и выемке породы для всех трёх вариантов была сопоставима.

Существенное влияние на стоимость окончательной изоляции РАО оказывает тип контейнеров захоронения. Стоимость наиболее дорогостоящих контейнеров для захоронения ВАО/

ОЯТ на сегодняшний день достигает примерно 100—250 тыс. \$ за штуку [22] и, в зависимости от проекта, относится к категории капитальных или эксплуатационных затрат. При этом снижение стоимости контейнеров не всегда дает пропорциональное снижение затрат на захоронение. В табл. 2 представлены данные [23] по удельной стоимости захоронения САО в Великобритании в зависимости от типа используемого контейнера.

Таблица 2. Удельная стоимость захоронения САО в Великобритании в зависимости от типа используемого контейнера (по данным [23]).

Тип контейнера	Стоимость контейнера	Стоимость захоронения
Металлический (нержавеющий) незащитный контейнер 3 м ³	45 тыс. £	10 тыс. £/м ³
Железобетонный защитный контейнер 6 м ³	30 тыс. £	3,9 тыс. £/м ³
Чугунный защитный контейнер DCIC 9 м ³	120 тыс. £	3,9 тыс. £/м ³

Резкое увеличение удельной стоимости захоронения для варианта с использованием незащитного контейнера связано с тем, что в данном случае значительно увеличиваются расходы на транспортировку, дополнительные меры по защите персонала и создание дополнительных барьеров в ПЗРО.

Стоимость контейнеров для НАО в меньшей степени влияет на стоимость захоронения, так как данные контейнеры, как правило, не выполняют функцию барьера в системе ПЗРО и не обеспечивают биологическую защиту. В Великобритании для захоронения НАО используются упаковки на базе стандартных контейнеров типа ISO, стоимость которых, как правило, не превышает 2—3 тыс. £ за штуку.

Исследования по оценке стоимости обратимого захоронения [24] показывают, что возможность извлечения упаковок РАО целесообразно предусматривать в течение не более 100 лет. По данным [25], для нидерландского проекта захоронения ВАО/ОЯТ поддержание наземной части ПЗРО в «открытом» состоянии для возможности извлечения упаковок требует дополнительных ежегодных затрат в размере около 1,8 млн €.

Стоимостные показатели зарубежных ПЗРО

Вариативность инженерных решений по захоронению РАО в разных странах, а также разнообразие национальных нормативных документов, исторических, социально-политических и других факторов приводит к существенным различиям в стоимости ПЗРО (табл. 3).

¹ Данные для глубинных ПЗРО для ВАО/ОЯТ.

Таблица 3. Стоимостные показатели некоторых зарубежных ПЗРО

Страна	Характеристика ПЗРО	Экономические показатели			Примечания
		Капитальные вложения	Эксплуатационные затраты	Суммарные затраты	
Приповерхностные ПЗРО (наземные или размещаемые на глубине до 100 м)					
Швеция SFR 1988 – по н.в.	Отходы: КНАО, КСАО Глубина – 60 м Вместимость – 63 000 м ³	0,74 млрд шв. крон (в ценах конца 80-х гг.)	0,03 млрд шв. крон/год (в ценах конца 80-х гг.)	1,5 млрд шв. крон (в ценах конца 80-х гг.)	[27] Планируется увеличение вместимости до 140 000 м ³
Швеция Oskarshamn 1986–2025	Отходы: ОНАО Наземный ПЗРО Вместимость – 10000 м ³	Нет данных	100–200 \$/м ³ (в ценах конца 80-х гг.)	Нет данных	[27]
Бельгия Dessel 2016	Отходы: КНАО, КСАО Наземный ПЗРО Вместимость – 69 900 м ³	Нет данных	Нет данных	0,8 млрд € (в ценах 2010 г.)	[3, с. 20]
Франция Aube 1992 – по н.в.	Отходы: КНАО, КСАО Наземный ПЗРО Вместимость – 1 млн м ³	Нет данных	0,035 млрд \$ (в ценах конца 90-х гг.)	0,25 млрд \$ (в ценах конца 90-х гг.)	Стоимость захоронения составляет примерно 8000 французских франков/м ³ (в ценах конца 90-х гг.) [3, с. 132]
Канада NSDF ChalkRiver 2020	Отходы: КНАО, КСАО Наземный ПЗРО Вместимость – 1 млн м ³	0,173 млрд \$ (в ценах 2017 г.)	Нет данных	0,6 млрд \$ (в ценах 2017 г.)	[28]
Глубинные ПЗРО					
Финляндия Onkalo 2022–2120	Отходы: 5500 т ОЯТ (2800 канистр) Глубина 400 м	0,802 млрд \$ (в ценах 2009 г., по данным [8])	0,918 млрд \$ (в ценах 2009 г., по данным [8])	1,72 млрд \$ (в ценах 2009 г., по данным [8]) 3,9 млрд € (в ценах 2017 г., по данным [31])	[8, с. 163] [31]
Швеция KBS 2030-е гг.	Отходы: 12 000 т ОЯТ Глубина 470 м	2,553 млрд \$ (в ценах 2009 г.)	1,665 млрд \$ (в ценах 2009 г.)	4,22 млрд \$ (в ценах 2009 г.)	[8, с. 163]
Германия Konrad 2022	Отходы: не тепловыделяющие НАО, САО Глубина 800–1200 м Вместимость 300 тыс. м ³	0,9 млрд € (реконструкция шахт) 0,93 млрд € (геологические изыскания) (в ценах 2009 г., по данным [3])	0,0185 млрд €/год (в ценах 2009 г., по данным [3])	3,4 млрд € (в ценах 2016 г., по данным [29])	[3, с. 54] [29]
Бельгия Boom clay 2035 – ДСАО, ДНАО 2080 – ВАО	Отходы: 11,1 тыс. м ³ ДНАО, ДСАО, 600 м ³ ВАО Глубина – 220 м	ВАО: 1,481 млрд \$ САО/НАО: 2,082 млрд \$ (в ценах 2009 г.)	ВАО: 0,335 млрд \$ САО/НАО: 0,529 млрд \$ (в ценах 2009 г.)	ВАО: 1,82 млрд \$ САО/НАО: 2,61 млрд \$ (в ценах 2009 г.)	[8, с. 163]
Чехия	Отходы: ОЯТ Глубина – 500 м Вместимость до 10000 т ОЯТ	0,917 млрд \$ (в ценах 2009 г.)	1,546 млрд \$ (в ценах 2009 г.)	2,46 млрд € (в ценах 2009 г.)	[8, с. 163]
Испания	Отходы: ОЯТ Глубина – нет данных Вместимость до 7000 тонн ОЯТ	1,192 млрд \$ (в ценах 2009 г.)	0,993 млрд \$ (в ценах 2009 г.)	2,18 млрд € (в ценах 2009 г.)	[8, с. 163]
Франция Cigeo 2025	Отходы: ВАО, ДСАО Глубина – 500 м Вместимость – 70–80 тыс. м ³	19,8 млрд € (в ценах 2012 г.)	8,8 млрд € (в ценах 2012 г.)	34,4 млрд € (в ценах 2012 г.)	[30]
Канада	Отходы: ОЯТ Глубина – 500 м Вместимость – 108000 т ОЯТ	3,801 млрд \$ (в ценах 2015 г.)	9,441 млрд \$ (в ценах 2015 г.)	18,33 млрд \$ (в ценах 2015 г.)	[9, с. 4]

В странах с более развитой рыночной составляющей экономики (США, Великобритания) операторы ПЗРО устанавливают тарифы на захоронение самостоятельно, по согласованию с государственными регуляторами. В ряде стран тарифы полностью определяются государственными уполномоченными организациями. Однако и в тех и других случаях тарифы определяются с учетом стоимостных показателей ПЗРО и особенностей национального законодательства.

Например, тарифы на захоронение НАО в Великобритании на 2016 год составляли 3038 £/м³, а в США — от 3 300 до 33 300 \$/м³ [26], в зависимости от класса отходов (А, В, С) в соответствии с классификацией, принятой в США.

Для пунктов захоронения долгоживущих САО и ВАО/ОЯТ наблюдается тенденция увеличения стоимости по мере реализации проектов. Так, например, французский ПЗРО Cigeo в 2005 году оценивался в 16,5 млрд €, а в 2014 — в 34,4 млрд € [30]. Финский ПЗРО Onkalo, по данным [8] (2013 год), оценивался в 1,72 млрд €. В настоящее время стоимость Onkalo составляет около 3,9 млрд € [31].

Пути снижения затрат на захоронение РАО

Ключевым направлением при разработке технических решений по окончательной изоляции РАО является поиск оптимального

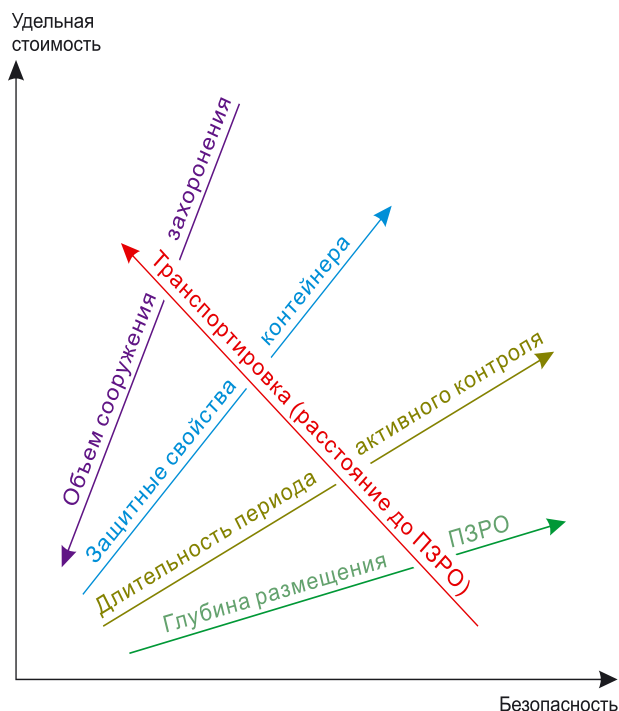


Рис. 4. Основные факторы, влияющие на удельную стоимость и безопасность захоронения РАО (принципиальная зависимость)

соотношения стоимости и показателей безопасности ПЗРО. Принципиальная зависимость стоимости ПЗРО и критериев его безопасности от основных технических факторов приведена на рис. 4.

Разработке национальных стратегий по вопросам окончательной изоляции РАО часто предшествуют технико-экономические исследования, направленные на поиск оптимального соотношения стоимости и показателей безопасности ПЗРО. Для целей захоронения НАО и САО такие исследования в настоящее время проводятся в ряде стран восточной Европы (Белоруссия, Литва, Словения [32]).

Основными направлениями снижения затрат на захоронение РАО могут являться:

- снижение объема образующихся и кондиционированных РАО;
- выбор оптимальной продолжительности хранения тепловыделяющих ВАО;
- увеличение вместимости ПЗРО;
- выбор оптимальных инфраструктурных решений по размещению ПЗРО;
- использование референтных технологий захоронения (позволяет сократить затраты на НИОКР и проектирование).

Заключение

Оценка стоимости затрат на захоронение РАО на стадии принятия решения о создании ПЗРО имеет важное значение при формировании специальных фондов и определении тарифов на захоронение, а также влияет на выбор проектных решений.

Стоимость захоронения РАО зависит от радиационных и теплофизических характеристик отходов, типа, конструкции и вместимости ПЗРО, продолжительности и объема научно-исследовательских, опытно-конструкторских и проектно-изыскательских работ, нормативно-правовых актов, социально-экономических и национальных особенностей страны.

Представленные стоимостные показатели действующих и проектируемых ПЗРО относятся к различным типам сооружений, отличающихся конструкцией, вместимостью и условиями эксплуатации, что не позволяет провести квалифицированное сравнение и выявить устойчивые зависимости от тех или иных факторов.

Отсутствие таких зависимостей, наличие и многообразие факторов, влияющих на стоимость ПЗРО, говорит о возможности и необходимости выполнения предварительных комплексных технико-экономических исследований, связанных с оптимизацией решений по выбору площадки для строительства и типа ПЗРО, условий и сроков эксплуатации, закрытия и мониторинга пункта захоронения.

Литература

1. Объединенная конвенция о безопасности обращения с отработавшим топливом и о безопасности обращения с радиоактивными отходами. — МАГАТЭ, Вена, 1997.
2. Сорокин В. Т., Павлов Д. И. Технологии окончательной изоляции радиоактивных отходов: европейский опыт и тенденции // Радиоактивные отходы. 2018. № 4. С. 24—32.
3. Обзор зарубежных практик захоронения ОЯТ и РАО / Н. С. Цебаковская, С. С. Уткин, И. В. Капырин. — М.: Комтехпринт, 2015. — 208 с.
4. The management of radioactive waste. A description of ten countries / R. Lidskog, A. Andersson. — SKB Report, 2002.
5. International low level waste disposal. Practices and facilities. — Report of U.S. Department of Energy, 2011
6. International perspective on repositories for low level waste / U. Bergstrom, K. Pers, Y. Almen // SKB Report R-11-16, 2011.
7. Monitoring of geological disposal facilities — Technical and societal Aspects. — NEA Report / NEA/RWM/R(2014)2, 2014.
8. The Economics of the Back End of the Nuclear Fuel Cycle.— Nuclear Energy Agency, OECD, 2013.
9. APM 2016. Lifecycle cost estimate. Update Summary Report. — Report of Nuclear Waste management organization, APM-REP-00440-0202, Canada, 2016.
10. Analysis of the total system life cycle cost of the civilian radioactive waste management program, fiscal year 2007. — Report of U.S. Department of Energy, DOE/RW-0591, 2008.
11. Cost considerations and financing mechanisms for the Disposal of Low and Intermediate Level Radioactive Waste. — IAEA Report, IAEA-TEC-DOC-1552, 2007.
12. Socio-economic and other non-radiological impacts of the near surface disposal of radioactive waste. — IAEA Report, IAEA-TECDOC-1308, 2002.
13. Geological disposal. Generic socio-economic assessment. — Nuclear Decommissioning Authority Report, DSSC/332/01, 2016.
14. Low-Level Radioactive Waste Repositories: An Analysis of Costs. — Nuclear Energy Agency, OECD, 1999.
15. The cost of high-level waste disposal in geological repositories. An analysis of factors affecting cost estimates. — Nuclear Energy Agency, OECD, 1993.
16. Zaccai H., Kunsch P. Radwaste storage and disposal cost assessment in various European countries // Assessment and comparison of waste management system costs for nuclear and other energy sources. — IAEA Technical Report, Se 1994.
17. Developing multinational radioactive waste repositories: infrastructural framework and scenarios of cooperation. — IAEA Report, IAEA-TECDOC-1413, 2004.
18. Technical, institutional and economic factors important for developing a multinational radioactive waste repository. — IAEA Report, IAEA-TEC-DOC-1021, 1998.
19. Sapierr II. Strategic Action Plan for Implementation of European Regional Repositories: Stage 2. Economic Aspects of Regional Repositories / N. Chapman, Ch. McCombie, Ph. Richardson. — Report of European Commission, 2008.
20. Doan P.H.L., Duquesnoy T., Devezeaux de Lavergne J-G. Economic appraisal of deployment schedules for high-level radioactive waste repositories. // EPJ Nuclear Sci. Technol. 3, 12, 2017.
21. Horizontal Deposition of Canisters for Spent Nuclear Fuel. Summary of the KBS-3H Project 2004—2007. — Posiva report, 2008.
22. Hardin E., Howard R., Greenberg H. and others. Repository Reference Disposal Concepts and Thermal Load Management Analysis. — Report of Sandia National Laboratories for U.S. Department of Energy, 2012.
23. Johnson M., Janicki M., Beattie C. Life Cycle Costing in Radioactive Waste Packaging: Reducing Costs Whilst Accelerating Clean-Up / WM2016 Conference, Phoenix, Arizona, USA, 2016.
24. Broek van den W. Advantages and drawbacks of waste retrievability // WM2000 Conference, Tucson, 2000.
25. Retrieval disposal of radioactive waste in The Netherlands. — Report of Commission on Radioactive Waste Disposal, 2001.
26. Сравнение стоимости и методики расчета платы за захоронение РАО в России и других странах / К. Вахрушева. — Рабочий документ ООО «Беллона», 2016.
27. Шведская система обращения с РАО и ОЯТ: обзор / Рыбальченко И. Л. — 2-е изд., испр. и доп. — Санкт-Петербург. — 2008. — 85 с.
28. World nuclear news.org: CNSC completes review of disposal facility draft EIS — URL: <http://www.world-nuclear-news.org/WR-CNSC-completes-review-of-disposal-facility-draft-EIS-0409177.html>.
29. www.bfs.de: cos Costs and cost distribution of the Konrad repository project — URL: http://www.bfs.de/Konrad/EN/themen/umbau/costen/kosten_node.html;sessionId=A4600F7D300BF663824F2A700BDC9AC3.1_cid365.
30. World nuclear news.org: Minister sets benchmark cost for French repository — URL: <http://www.world-nuclear-news.org/WR-Minister-sets-benchmark-cost-for-French-repository-1801165>.
31. On nuclear waste, Finland shows U.S. how it can be done — URL: <https://www.nytimes.com/2017/06/09/science/nuclear-reactor-waste-finland.html>.
32. Zeleznik N., Lokner V., Levenat I. Comparison of costs for LILW Repository Development // 22 International Conference Nuclear Energy for New Europe, 2013.

Информация об авторах

Сорокин Валерий Трофимович, доктор технических наук, главный технолог АО «АТОМПРОЕКТ», (197183, Санкт-Петербург, ул. Савушкина, д. 82 лит. А), e-mail: vsorokin@atomproekt.com.

Павлов Дмитрий Игоревич, руководитель направления отдела по обращению с РАО и ООС Санкт-Петербургского филиала АО «ФЦНИВТ «СНПО «ЭЛЕРОН» — «ВНИПИЭТ», (197183, Санкт-Петербург, ул. Дибуновская, 55), e-mail: dipavlov@eleron.ru.

Библиографическое описание данной статьи

Сорокин В. Т., Павлов Д. И. Стоимость захоронения РАО: зарубежные оценки // Радиоактивные отходы. 2019. № 1 (6). С. 46—55.

THE COST OF RADWASTE DISPOSAL: A FOREIGN ASSESSMENT

Sorokin V. T.¹, Pavlov D. I.²

¹АО «АТОМПРОЕКТ», Saint-Petersburg, Russia

²Saint-Petersburg branch of JSC «FCNIVT «SNPO «ELERON» — «VNIPIET», Saint-Petersburg, Russia

Article received 5 December 2018

In the article considered an approaches to cost estimation and the main factors, influencing the cost of radioactive waste disposal. Presented the data of the cost of disposal facilities for radioactive waste and spent fuel. Comparative analysis of the different types of disposal facilities (surface, underground, deep underground) has be done.

Key words: radioactive waste, disposal facilities, life cycle of disposal facilities, the cost of disposal facilities, fees for disposal radioactive waste.

References

1. Joint Convention on Radioactive Waste on the Safety of Spent Fuel Management and the Safety of Radioactive Waste Management. — IAEA, Vienna, 1997.
2. Sorokin V. T., Pavlov D. I. Radioactive Waste disposal technology: European experience and trends. *Radioactive Waste*, 2018, no. 4, p. 24—32. (in Russian).
3. Overview of foreign practices of SNF and RW disposal / Tsebakovskaya N. S., Utkin S. S., Kapyrin I. V. Komtelhprint, 2015. 208 p. (in Russian)
4. Lidskog R., Andersson A. The management of radioactive waste. A description of ten countries. SKB Report, 2002.
5. International low level waste disposal. Practices and facilities. Report of U.S. Department of Energy, 2011.
6. Bergstrom U., Pers K., Almen Y. International perspective on repositories for low level waste. SKB Report R-11-16, 2011.
7. Monitoring of geological disposal facilities – Technical and societal Aspects. NEA Report / NEA/RWM/R(2014)2, 2014.
8. The Economics of the Back End of the Nuclear Fuel Cycle. Nuclear Energy Agency, OECD, 2013
9. APM 2016. Lifecycle cost estimate. Update Summary Report. Report of Nuclear Waste management organization, APM-REP-00440-0202, Canada, 2016.

10. Analysis of the total system life cycle cost of the civilian radioactive waste management program, fiscal year 2007. Report of U.S. Department of Energy, DOE/RW-0591, 2008.
11. Cost considerations and financing mechanisms for the Disposal of Low and Intermediate Level Radioactive Waste. IAEA Report, IAEA-TECDOC-1552, 2007.
12. Socio-economic and other non-radiological impacts of the near surface disposal of radioactive waste. IAEA Report, IAEA-TECDOC-1308, 2002.
13. Geological disposal. Generic socio-economic assessment. Nuclear Decommissioning Authority Report, DSSC/332/01, 2016
14. Low-Level Radioactive Waste Repositories: An Analysis of Costs. Nuclear Energy Agency, OECD, 1999.
15. The cost of high-level waste disposal in geological repositories. An analysis of factors affecting cost estimates. Nuclear Energy Agency, OECD, 1993.
16. Zaccai H., Kunsch P. Radwaste storage and disposal cost assessment in various European countries Assessment and comparison of waste management system costs for nuclear and other energy sources. IAEA Technical Report, Se 1994.
17. Developing multinational radioactive waste repositories: infrastructural framework and scenarios of cooperation. IAEA Report, IAEA-TECDOC-1413, 2004.
18. Technical, institutional and economic factors important for developing a multinational radioactive waste repository. IAEA Report, IAEA-TECDOC-1021, 1998.
19. Chapman N., McCombie Ch., Richardson Ph. Sa-pierr II. Strategic Action Plan for Implementation of European Regional Repositories: Stage 2. Economic Aspects of Regional Repositories. Report of European Commission, 2008.
20. Doan P. H. L., Duquesnoy T., Devezeaux de Lavergne J-G. Economic appraisal of deployment schedules for high-level radioactive waste repositories. *EPJ Nuclear Sci. Technol.* 2017, 3, 12.
21. Horizontal Deposition of Canisters for Spent Nuclear Fuel. Summary of the KBS-3H Project 2004–2007. Posiva report, 2008.
22. Hardin E., Howard R., Greenberg H. et al. Repository Reference Disposal Concepts and Thermal Load Management Analysis. Report of Sandia National Laboratories for U.S. Department of Energy, 2012.
23. Johnson M., Janicki M., Beattie C. Life Cycle Costing in Radioactive Waste Packaging: Reducing Costs Whilst Accelerating Clean-Up. *WM2016 Conference*, Phoenix, Arizona, USA, 2016.
24. Van den Broek W. Advantages and drawbacks of waste retrievability. *WM2000 Conference*, Tucson, 2000.
25. Retrieval disposal of radioactive waste in The Netherlands. — Report of Commission on Radioactive Waste Disposal, 2001.
26. Vakhrusheva K. *Comparison of costs and methods of RW disposal fees in Russia and in other countries*. LLC “Bellona”, 2016 (in Russian).
27. Rybalchenko I. L. Swedish system of SNF and RW management: an overview. 2nd edition, updated and revised. Sankt-Petersburg, 2008. 85 p. (in Russian).
28. World nuclear news.org: CNSC completes review of disposal facility draft EIS. URL: <http://www.world-nuclear-news.org/WR-CNSC-completes-review-of-disposal-facility-draft-EIS-0409177.html>.
29. www.bfs.de: cos Costs and cost distribution of the Konrad repository project. URL: http://www.bfs.de/Konrad/EN/themen/umbau/costen/kosten_node.html;jsessionid=A4600F7D300BF663824F2A700BD C9AC3.1_cid365.
30. World nuclear news.org: Minister sets benchmark cost for French repository. URL: <http://www.world-nuclear-news.org/WR-Minister-sets-benchmark-cost-for-French-repository-1801165>.
31. On nuclear waste, Finland shows U.S. how it can be done. URL: <https://www.nytimes.com/2017/06/09/science/nuclear-reactor-waste-finland.html>.
32. Zeleznik N., Lokner V., Levenat I. Comparison of costs for LILW Repository Development. *22 International Conference Nuclear Energy for New Europe*, 2013.

Information about the authors:

Sorokin Valery Trofimovich, Ph.D, Chief Technology JSC ATOMPROEKT, (82-A Savushkina str., St.-Petersburg, Russia), e-mail: vsorokin@atomproekt.com.

Pavlov Dmitriy Igorevich, Team Leader of Saint-Petersburg branch of JSC «FCNIVT «SNPO «ELERON» - «VNIPIET», (55, Dibunovskaiy str., St.-Petersburg, Russia) e-mail: dipavlov@eleron.ru.

Bibliographic description

Sorokin V. T., Pavlov D. I. The cost of Radwaste Disposal: a Foreign Assessment. *Radioactive Waste*, 2019, no. 1 (6), pp. 46–55. (In Russian)