

Серия изданий МАГАТЭ по ядерной энергии

№. NW-T-1.27

Основные
принципы

Цели

Руководства

Технические
доклады

**Принципы и подходы,
применяемые при
проектировании
пунктов захоронения
радиоактивных
отходов**



IAEA

Международное агентство по атомной энергии

ПУБЛИКАЦИИ СЕРИИ ИЗДАНИЙ МАГАТЭ ПО ЯДЕРНОЙ ЭНЕРГИИ

СТРУКТУРА СЕРИИ ИЗДАНИЙ МАГАТЭ ПО ЯДЕРНОЙ ЭНЕРГИИ

В соответствии с положениями статей III.A.3 и VIII.C Устава МАГАТЭ уполномочено «способствовать обмену научными и техническими сведениями о применении атомной энергии в мирных целях». В публикациях **Серии изданий МАГАТЭ по ядерной энергии** представлены положительная практика и технологические достижения, практические примеры и опыт в сфере ядерных реакторов, ядерного топливного цикла, обращения с радиоактивными отходами и вывода из эксплуатации, а также общие вопросы, относящиеся к ядерной энергии. Структура **Серии изданий МАГАТЭ по ядерной энергии** подразделяется на четыре уровня.

- 1) Публикации, обозначенные в Серии изданий по ядерной энергии как **«Основные принципы»**, содержат изложение смысла и концепции использования ядерной энергии в мирных целях.
- 2) В публикациях, обозначенных в Серии изданий по ядерной энергии как **«Цели»**, описываются вопросы, которые следует учитывать, и конкретные цели, которые должны быть достигнуты в тематических областях на различных этапах осуществления.
- 3) В публикациях, обозначенных в Серии изданий по ядерной энергии как **«Руководства и методологии»**, предлагаются руководящие принципы высокого уровня или методические рекомендации о том, какими способами можно достичь целей, определенных в рамках различных тем и областей, касающихся использования ядерной энергии в мирных целях.
- 4) В публикациях, обозначенных в Серии изданий по ядерной энергии как **«Технические доклады»**, предоставляется более полная и подробная информация о деятельности, осуществляемой в областях, исследуемых в **Серии изданий МАГАТЭ по ядерной энергии**.

Каждая публикация проходит внутреннее рецензирование и предоставляется государствам-членам для комментариев перед опубликованием.

Для публикаций в серии изданий МАГАТЭ по ядерной энергии применяются следующие обозначения: **NG** — ядерная энергия, общие вопросы; **NR** — ядерные реакторы (ранее **NP** — ядерная энергетика); **NF** — ядерный топливный цикл; **NW** — обращение с радиоактивными отходами и вывод из эксплуатации. Публикации размещены также на сайте МАГАТЭ по адресу:

<https://www.iaea.org/ru/publikacii>

Для получения дополнительной информации просьба обращаться в МАГАТЭ по адресу: Vienna International Centre, PO Box 100, 1400 Vienna, Austria.

Предлагаем всем пользователям материалов, выходящих в Серии изданий МАГАТЭ по ядерной энергии, поделиться с МАГАТЭ своим опытом их использования, что поможет обеспечить соответствие этих материалов потребностям пользователей и в дальнейшем. Эта информация может быть направлена через сайт МАГАТЭ, по почте или по электронной почте на адрес Official.Mail@iaea.org.

ПРИНЦИПЫ И ПОДХОДЫ,
ПРИМЕНЯЕМЫЕ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ
ПУНКТОВ ЗАХОРОНЕНИЯ
РАДИОАКТИВНЫХ ОТХОДОВ

Членами Международного агентства по атомной энергии являются следующие государства:

АВСТРАЛИЯ	ЙЕМЕН	ПОЛЬША
АВСТРИЯ	КАБО-ВЕРДЕ	ПОРТУГАЛИЯ
АЗЕРБАЙДЖАН	КАЗАХСТАН	РЕСПУБЛИКА МОЛДОВА
АЛБАНИЯ	КАМБОДЖА	РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ
АЛЖИР	КАМЕРУН	РУАНДА
АНГОЛА	КАНАДА	РУМЫНИЯ
АНТИГУА И BARBUDA	КАТАР	САЛЬВАДОР
АРГЕНТИНА	КЕНИЯ	САМОА
АРМЕНИЯ	КИПР	САН-МАРИНО
АФГАНИСТАН	КИТАЙ	САУДОВСКАЯ АРАВИЯ
БАГАМСКИЕ ОСТРОВА	КОЛУМБИЯ	СВЯТОЙ ПРЕСТОЛ
БАНГЛАДЕШ	КОМОРСКИЕ ОСТРОВА	СЕВЕРНАЯ МАКЕДОНИЯ
БАРБАДОС	КОНГО	СЕЙШЕЛЬСКИЕ ОСТРОВА
БАХРЕЙН	КОРЕЯ, РЕСПУБЛИКА	СЕНЕГАЛ
БЕЛАРУСЬ	КОСТА-РИКА	СЕНТ-ВИНСЕНТ И ГРЕНАДИНЫ
БЕЛИЗ	КОТ-Д'ИВУАР	СЕНТ-КИТС И НЕВИС
БЕЛЬГИЯ	КУБА	СЕНТ-ЛЮСИЯ
БЕНИН	КУВЕЙТ	СЕРБИЯ
БОЛГАРИЯ	КЫРГЫЗСТАН	СИНГАПУР
БОЛИВИЯ, МНОГОНАЦИОНАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВО	ЛАОССКАЯ НАРОДНО- ДЕМОКРАТИЧЕСКАЯ РЕСПУБЛИКА	СИРИЙСКАЯ АРАБСКАЯ РЕСПУБЛИКА
БОСНИЯ И ГЕРЦЕГОВИНА	ЛАТВИЯ	СЛОВАКИЯ
БОТСВАНА	ЛЕСОТО	СЛОВЕНИЯ
БРАЗИЛИЯ	ЛИБЕРИЯ	СОЕДИНЕННОЕ КОРОЛЕВСТВО ВЕЛИКОБРИТАНИИ И СЕВЕРНОЙ ИРЛАНДИИ
БРУНЕЙ-ДАРУССАЛАМ	ЛИВАН	СОЕДИНЕННЫЕ ШТАТЫ АМЕРИКИ
БУРКИНА-ФАСО	ЛИВИЯ	СУДАН
БУРУНДИ	ЛИТВА	СЬЕРРА-ЛЕОНЕ
ВАНУАТУ	ЛИХТЕНШТЕЙН	ТАДЖИКИСТАН
ВЕНГРИЯ	ЛЮКСЕМБУРГ	ТАИЛАНД
ВЕНЕСУЭЛА, БОЛИВАРИАНСКАЯ РЕСПУБЛИКА	МАВРИКИЙ	ТОГО
ВЬЕТНАМ	МАВРИТАНИЯ	ТОНГА
ГАБОН	МАДАГАСКАР	ТРИНИДАД И ТОБАГО
ГАИТИ	МАЛАВИ	ТУНИС
ГАЙАНА	МАЛАЙЗИЯ	ТУРКМЕНИСТАН
ГАМБИЯ	МАЛИ	ТУРЦИЯ
ГАНА	МАЛЬТА	УГАНДА
ГВАТЕМАЛА	МАРОККО	УЗБЕКИСТАН
ГВИНЕЯ	МАРШАЛЛОВЫ ОСТРОВА	УКРАИНА
ГЕРМАНИЯ	МЕКСИКА	УРУГВАЙ
ГОНДУРАС	МОЗАМБИК	ФИДЖИ
ГРЕНАДА	МОНАКО	ФИЛИППИНЫ
ГРЕЦИЯ	МОНГОЛИЯ	ФИНЛЯНДИЯ
ГРУЗИЯ	МЬЯНМА	ФРАНЦИЯ
ДАНИЯ	НАМИБИЯ	ХОРВАТИЯ
ДЕМОКРАТИЧЕСКАЯ РЕСПУБЛИКА КОНГО	НЕПАЛ	ЦЕНТРАЛЬНОАФРИКАНСКАЯ РЕСПУБЛИКА
ДЖИБУТИ	НИГЕР	ЧАД
ДОМИНИКА	НИГЕРИЯ	ЧЕРНОГОРИЯ
ДОМИНИКАНСКАЯ РЕСПУБЛИКА	НИДЕРЛАНДОВ, КОРОЛЕВСТВО	ЧЕШСКАЯ РЕСПУБЛИКА
ЕГИПЕТ	НИКАРАГУА	ЧИЛИ
ЗАМБИЯ	НОВАЯ ЗЕЛАНДИЯ	ШВЕЙЦАРИЯ
ЗИМБАБВЕ	НОРВЕГИЯ	ШВЕЦИЯ
ИЗРАИЛЬ	ОБЪЕДИНЕННАЯ РЕСПУБЛИКА ТАНЗАНИЯ	ШРИ-ЛАНКА
ИНДИЯ	ОБЪЕДИНЕННЫЕ АРАБСКИЕ ЭМИРАТЫ	ЭКВАДОР
ИНДОНЕЗИЯ	ОМАН	ЭРИТРЕЯ
ИОРДАНИЯ	ПАКИСТАН	ЭСВАТИНИ
ИРАК	ПАЛАУ	ЭСТОНИЯ
ИРАН, ИСЛАМСКАЯ РЕСПУБЛИКА	ПАНАМА	ЭФИОПИЯ
ИРЛАНДИЯ	ПАПУА — НОВАЯ ГВИНЕЯ	ЮЖНАЯ АФРИКА
ИСЛАНДИЯ	ПАРАГВАЙ	ЯМАЙКА
ИСПАНИЯ	ПЕРУ	ЯПОНИЯ
ИТАЛИЯ		

Устав Агентства был утвержден 23 октября 1956 года на Конференции по выработке Устава МАГАТЭ, которая состоялась в Центральных учреждениях Организации Объединенных Наций в Нью-Йорке. Устав вступил в силу 29 июля 1957 года. Центральные учреждения Агентства находятся в Вене. Главной целью Агентства является достижение «более скорого и широкого использования атомной энергии для поддержания мира, здоровья и благосостояния во всем мире».

СЕРИЯ ИЗДАНИЙ МАГАТЭ ПО ЯДЕРНОЙ ЭНЕРГИИ, № NW-T-1.27

ПРИНЦИПЫ И ПОДХОДЫ,
ПРИМЕНЯЕМЫЕ
ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ
ПУНКТОВ ЗАХОРОНЕНИЯ
РАДИОАКТИВНЫХ ОТХОДОВ

МЕЖДУНАРОДНОЕ АГЕНТСТВО ПО АТОМНОЙ ЭНЕРГИИ
ВЕНА, 2024

УВЕДОМЛЕНИЕ ОБ АВТОРСКОМ ПРАВЕ

Все научные и технические публикации МАГАТЭ защищены положениями Всемирной конвенции об авторском праве, принятой в 1952 году (Женева) и пересмотренной в 1971 году (Париж). Впоследствии авторские права были распространены Всемирной организацией интеллектуальной собственности (Женева) также на интеллектуальную собственность в электронной и виртуальной форме. Для полного или частичного использования текстов, содержащихся в печатных или электронных публикациях МАГАТЭ, может потребоваться разрешение. Более подробная информация приводится на странице <https://www.iaea.org/ru/publikacii/prava-i-razresheniya>. Вопросы следует направлять по адресу:

Издательская секция (Publishing Section)
Международное агентство по атомной
энергии
Венский международный центр,
а/я 100,
A1400 Вена, Австрия
тел.: +43 1 2600 22529 или 22530
эл. почта: sales.publications@iaea.org
<https://www.iaea.org/ru/publikacii>

© МАГАТЭ, 2024

Отпечатано МАГАТЭ в Австрии

Сентябрь, 2024

STI/PUB/1908

ПРИНЦИПЫ И ПОДХОДЫ, ПРИМЕНЯЕМЫЕ
ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ ПУНКТОВ ЗАХОРОНЕНИЯ
РАДИОАКТИВНЫХ ОТХОДОВ
МАГАТЭ, ВЕНА, 2024 ГОД
STI/PUB/1908

ISBN 978-92-0-404024-1 (печатный формат) | 978-92-0-404124-8
(формат pdf) | 978-92-0-404224-5 формат epub
ISSN 2664-4886

ПРЕДИСЛОВИЕ

В соответствии со своим Уставом МАГАТЭ «стремится к достижению более скорого и широкого использования атомной энергии для поддержания мира, здоровья и благосостояния во всем мире». В частности, Агентство уполномочено «Способствовать обмену научными и техническими сведениями о применении атомной энергии в мирных целях». Одним из способов достижения этих целей является выпуск целого ряда технических публикаций, включая Серию изданий МАГАТЭ по ядерной энергии.

Публикации, входящие в Серию изданий МАГАТЭ по ядерной энергии, призваны способствовать использованию ядерных технологий для нужд устойчивого развития, внедрению достижений ядерной науки и техники, стимулированию инноваций и созданию потенциала для поддержки текущих и перспективных направлений ядерной энергетики и прикладных разработок ядерной науки. Эти публикации содержат информацию, которая охватывает все связанные с политикой, технологические и управленческие аспекты планирования и реализации видов деятельности, связанных с использованием ядерных технологий в мирных целях.

Нормы безопасности МАГАТЭ устанавливают основополагающие принципы, требования и рекомендации, касающиеся обеспечения ядерной безопасности, и служат глобальным источником справочной информации по вопросам защиты людей и окружающей среды от вредного воздействия ионизирующего излучения.

В публикациях Серии изданий МАГАТЭ по ядерной энергии, посвященных вопросам обеспечения безопасности, используются ссылки на нормы безопасности МАГАТЭ, которые действуют в качестве граничных условий в применении ядерных технологий.

В настоящей публикации государствам-членам предлагается обзор принципов и подходов, применяемых при проектировании пунктов захоронения (репозиториев), на основе которых могут решаться задачи по захоронению радиоактивных отходов. Кроме того, в ней представлен ряд хорошо изученных концепций захоронения отходов, которые уже были успешно реализованы, либо находятся на продвинутой стадии разработки. Приведены примеры возможных проектных решений как для пунктов приповерхностного захоронения, так и для пунктов геологического захоронения, размещаемых на разных глубинах. К приповерхностным пунктам, пригодным для захоронения очень низкоактивных отходов (ОНАО) и низкоактивных отходов (НАО), относятся траншеи, камеры захоронения (сводчатого типа), шахтные стволы и цилиндрические бункеры (типа силосной башни) с прямым доступом, а также подповерхностные естественные образования и инженерно-технические сооружения, такие как пещеры, горизонтальные выработки (штреки) и тоннели (штольни). Концепции пунктов геологического захоронения, пригодных для захоронения среднеактивных отходов (САО) и высокоактивных отходов (ВАО) (включая отработавшее ядерное топливо, заявленное как отходы), в основном представлены шахтными хранилищами, размещаемыми на разной глубине и в различных естественных формациях. Как правило, в конструкции этих объектов предусматриваются тоннели доступа, шахтные стволы или и то и другое, а также тоннели, камерные отсеки и камеры захоронения для размещения отходов. В них также могут предусматриваться неглубокие скважины и цилиндрические бункеры, создаваемые в таких инженерно-технических сооружениях. Рассматриваются также альтернативные варианты захоронения, предусматривающие решения по переоборудованию существующих объектов, таких как шахты или другие подземные полости. Изучается также возможность захоронения радиоактивных отходов в скважинах, включая использование очень глубоких скважин.

Настоящая публикация МАГАТЭ была специально подготовлена для оказания помощи государствам-членам в выполнении обязательств по захоронению радиоактивных отходов. Радиоактивные отходы, подлежащие захоронению, образуются в результате осуществления различных видов деятельности в государствах-членах, включая производство энергии, проведение научных исследований, здравоохранительную деятельность и различные виды промышленной деятельности.

Сотрудниками МАГАТЭ, ответственными за настоящую публикацию, являются Дж. Х. Нидер-Вестерманн и Я. Фальтейсек из Отдела ядерного топливного цикла и технологии обращения с отходами.

РЕДАКЦИОННОЕ ПРИМЕЧАНИЕ

Настоящая публикация была отредактирована редакционным персоналом МАГАТЭ в той степени, в какой это было сочтено необходимым для удобства читателей. В ней не затрагиваются вопросы ответственности — юридической или иного рода — за действия или бездействие со стороны какого-либо лица.

Для обеспечения точности информации, содержащейся в настоящей публикации, были приложены большие усилия, но вместе с тем ни МАГАТЭ, ни его государства-члены не несут ответственности за последствия, которые могут возникнуть в результате использования этой информации.

Приведенные здесь руководящие материалы с описанием надлежащей практики отражают мнение экспертов и не являются рекомендациями, сформулированными на основе консенсуса государств-членов.

Использование тех или иных названий стран или территорий не является выражением какого-либо суждения со стороны издателя, в роли которого выступает МАГАТЭ, относительно правового статуса таких стран или территорий, их органов и учреждений, либо относительно делимитации их границ.

Упоминание названий конкретных компаний или продуктов (независимо от того, указаны они как зарегистрированные или нет) не подразумевает какого-либо намерения нарушить права собственности и не должно толковаться как одобрение или рекомендация со стороны МАГАТЭ.

МАГАТЭ не несет ответственности за постоянство и точность приводимых в настоящей публикации URL-адресов внешних или принадлежащих третьим сторонам веб-сайтов и не гарантирует, что информационное наполнение таких веб-сайтов является или будет оставаться точным и релевантным.

СОДЕРЖАНИЕ

1.	ВВЕДЕНИЕ	1
1.1.	Общие сведения	1
1.2.	Область применения	2
1.3.	Цель	3
1.4.	Структура	4
2.	ПРОЦЕСС ПРОЕКТИРОВАНИЯ ПУНКТА ЗАХОРОНЕНИЯ	4
2.1.	Основные вопросы	4
2.2.	Цикл разработки и оценки пункта захоронения	5
2.3.	Составление инвентарного списка (реестра) отходов	6
2.3.1.	Классификация отходов	7
2.3.2.	Обработка и упаковка отходов перед захоронением	9
2.4.	Исходные данные и результаты проектирования пункта захоронения	10
2.5.	Функциональные системы и компоновка пункта захоронения	12
3.	ПРИНЦИПЫ И ЭТАПЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ	16
3.1.	Принципы проектирования	17
3.1.1.	Проектные основы, базирующиеся на требованиях	17
3.1.2.	Многобарьерная концепция безопасности	21
3.1.3.	Безопасные, надежные, доступные и ремонтпригодные технологические решения	23
3.1.4.	Итеративный подход к разработке и оптимизация проекта	25
3.1.5.	Сохранение целостности конструкции	28
3.1.6.	Прозрачное и прослеживаемое проектирование	30
3.1.7.	Комплексное проектирование с учетом требований ядерных гарантий и физической безопасности	31
3.2.	Этапы проектирования	32
3.2.1.	Общее проектирование	33
3.2.2.	Концептуальное проектирование — выбор площадки	34
3.2.3.	Техническое проектирование — лицензирование строительства	35
3.2.4.	Детальное проектирование — строительство и эксплуатация	36
3.2.5.	Продолжение детального проектирования — эксплуатация и расширение пункта захоронения	38
3.2.6.	Проектирование — закрытие объекта	38
4.	ПРИМЕРЫ ДЕЙСТВУЮЩИХ ИЛИ УСОВЕРШЕНСТВОВАННЫХ ПРОЕКТОВ ПУНКТОВ ЗАХОРОНЕНИЯ	39
4.1.	Земляные траншеи	39
4.1.1.	Общие вопросы	40
4.1.2.	Концепция захоронения	41
4.1.3.	Типичные примеры	43
4.2.	Приповерхностные инженерно-технические сооружения	47

4.2.1.	Общие вопросы	47
4.2.2.	Концепция захоронения.....	48
4.2.3.	Типичные примеры	50
4.3.	Подповерхностные системы захоронения на средних глубинах	58
4.3.1.	Общие вопросы	58
4.3.2.	Концепция захоронения.....	59
4.3.3.	Типичные примеры	60
4.4.	Захоронение в глубоких стабильных геологических формациях.....	64
4.4.1.	Общие вопросы	65
4.4.2.	Концепция захоронения.....	66
4.4.3.	Типичные примеры	67
4.5.	Другие решения по захоронению	82
4.5.1.	Адаптация существующих подземных объектов	82
4.5.2.	Скважинное захоронение.....	86
5.	ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	90
	СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ	90
	СОКРАЩЕНИЯ.....	95
	СОСТАВИТЕЛИ И РЕЦЕНЗЕНТЫ.....	97
	СТРУКТУРА СЕРИИ ДОКУМЕНТОВ МАГАТЭ ПО ЯДЕРНОЙ ЭНЕРГИИ	99

1. ВВЕДЕНИЕ

1.1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Во всем мире на промышленных, исследовательских и медицинских объектах образуются разнообразные по форме радиоактивные отходы. В странах с действующими ядерно-энергетическими программами эти отходы в основном накапливаются в результате производства энергии на атомных электростанциях. Практически во всех странах при осуществлении научно-исследовательской деятельности в ходе медицинского и промышленного применения производится меньший объем радиоактивных отходов. Таким образом, у каждого государства — члена МАГАТЭ имеются радиоактивные отходы различного типа в разном объеме, захоронение которых в конечном итоге необходимо производить в кондиционированной твердой форме в одном или нескольких специально спроектированных для этих целей пунктах захоронения.

Выбор способа захоронения данного типа отходов зависит от состава радионуклидов, их физической и химической формы, количества и других конкретных характеристик отходов. Количество отходов в национальном инвентарном списке (реестре) в зависимости от их категории может варьироваться в диапазоне от нескольких до сотен тысяч кубических метров. Радиологическая опасность также может быть разной, в зависимости от природы и количества радионуклидов, связанных с каждым типом отходов. Радиоактивные отходы могут оставаться опасными для здоровья человека и окружающей среды в течение периода времени от нескольких десятилетий до многих тысяч лет, в зависимости от содержания опасных радионуклидов и их концентраций. За исключением случаев, когда количество отходов не превышает установленных уровней освобождения от регулирующего контроля или когда национальное законодательство предусматривает их изъятие из-под регулирующего контроля в связи с очень низкими уровнями излучения, все радиоактивные отходы считаются опасными независимо от их фактического количества и поэтому подлежат контролю и регламентированному захоронению. Объединенная конвенция о безопасности обращения с отработавшим топливом и о безопасности обращения с радиоактивными отходами [1] требует, чтобы каждая договаривающаяся сторона Конвенции обеспечивала наличие средств защиты для того, чтобы защитить «общество в целом и окружающую среду от вредного воздействия ионизирующих излучений в настоящее время и в будущем...». Признанным средством достижения этого является безопасное обращение с радиоактивными отходами посредством их захоронения в специально построенном пункте захоронения. Государства-члены несут конечную ответственность за предоставление достаточных ресурсов и за обеспечение их эффективного использования для целей обращения с радиоактивными отходами на всех этапах от первоначального образования и до их окончательного захоронения.

В течение последних десятилетий накоплен значительный опыт в области захоронения радиоактивных отходов. Во многих государствах-членах построено и эксплуатируется множество пунктов захоронения, и имеются решения по захоронению отходов различных форм и классов. Государству-члену, приступающему к разработке проекта нового пункта захоронения, необходимо, используя этот и другой подобный опыт, пройти все стадии процесса проектирования и найти оптимальное решение применительно к инвентарному списку (реестру) отходов в данном конкретном случае. Настоящая публикация имеет целью предоставить таким государствам-членам информацию обзорного характера о возможных принципах и подходах, применяемых при проектировании пунктов захоронения (репозиториях), которые могут быть реализованы на практике. Кроме того, в настоящей публикации описаны концепции и существующие пункты захоронения с целью иллюстрации возможных решений по захоронению, которые могут быть рассмотрены при проектировании.

Число государств-членов, планирующих строительство пунктов захоронения (репозиториях) радиоактивных отходов, растет. Принятие решения о выборе соответствующего варианта пункта

захоронения для проектирования и практической реализации является важным вопросом в рамках всей национальной системы обращения с радиоактивными отходами. В частности, эти решения могут влиять с самого начала на рассмотрение вопроса о том, как будет осуществляться обращение с отходами с момента их возникновения. Каждый проект по строительству национального пункта захоронения имеет свои индивидуальные особенности, но при этом может быть обозначен ряд базовых проектных решений, применимых к захоронению всех классов радиоактивных отходов.

В настоящей публикации рассматривается захоронение отходов разного типа в различных пунктах захоронения, конструкция которых зависит от характеристик отходов. Например, в нескольких странах уже более 50 лет осуществляется приповерхностное захоронение низкоактивных отходов [2]. При сооружении ряда таких пунктов захоронения в различных странах мира был использован накопленный опыт и извлеченные уроки, связанные с ранее сооруженными объектами. Захоронение радиоактивных отходов высокого уровня активности осуществляется в геологических формациях, характеризующихся различными геологическими условиями. Государствам-членам рекомендуется использовать ранее достигнутые в международной практике результаты и развивать уже продемонстрировавшие свою эффективность проекты при осуществлении своей национальной политики. Примеры недавно созданных пунктов захоронения отходов иллюстрируют применение предыдущего накопленного опыта и извлеченных уроков, связанных с ранее построенными объектами. Такая практика обеспечивает расширение базы знаний о захоронении ядерных отходов и используется в качестве примера в настоящей публикации.

1.2. ОБЛАСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ

Настоящая публикация содержит обзор принципов и подходов, применяемых при проектировании, которые были полностью реализованы либо находятся на стадии реализации в нескольких государствах-членах. Приведены примеры существующих хорошо проработанных проектов, предназначенных для захоронения различных типов радиоактивных отходов в разных геологических условиях. Потенциальные решения по созданию пунктов захоронения зависят от характеристик отходов, таких как объем и радиотоксичность, а также от имеющихся концептуальных вариантов захоронения. Данный подход базируется на основополагающих принципах безопасности [3, 4], и в нем используется методология системного инжиниринга и базирующегося на требованиях проектирования, которую можно рассматривать в качестве базовой при разработке пунктов захоронения радиоактивных отходов.

Подход к проектированию разделяется на этапы. Каждый этап в процессе проектирования, начиная с самых ранних этапов концептуального проектирования и заканчивая фактически построенным объектом, расширяет технические основы и конкретизирует конфигурацию пункта захоронения и концепцию захоронения. Этапы могут быть итеративными, и результаты каждого этапа служат исходными данными для следующего за ним этапа. Все этапы проектирования представляют собой эволюционирующую программу. Применение руководящих принципов проектирования в процессе работы повышает вероятность успешной реализации проекта пункта захоронения.

В дополнение к руководящим материалам по надлежащей практике в области захоронения радиоактивных отходов, содержащимся в настоящей публикации, МАГАТЭ рассматривает возможность подготовки дополнительных руководящих документов с уделением особого внимания техническим, научным и программным вопросам, связанным с реализацией решений по захоронению радиоактивных отходов. В будущих публикациях с научно-технической направленностью предполагается: отразить международный опыт в области управления работами по исследованию площадок для пунктов захоронения; представить обзор экспериментальных работ, проведенных ранее в мире на подземных исследовательских объектах, в качестве научно-технической базы для использования при разработке систем геологического захоронения;

рассмотреть инженерно-технические характеристики концепции скважинного захоронения изъятых из употребления закрытых радиоактивных источников; проанализировать концепции захоронения, демонстрирующие потенциал безопасного и эффективного захоронения небольших инвентарных объемов отходов. В других будущих публикациях могут быть рассмотрены некоторые более широкие программные вопросы, которые необходимо решить в целях успешной реализации программы захоронения, а также может быть изложена информация о международном опыте в области применения методов оценки затрат на реализацию и схем финансирования программ по захоронению; коммуникации и вовлечения заинтересованных сторон в решение вопросов, связанных с захоронением радиоактивных отходов; участия местных заинтересованных сторон в реализации программ обращения с радиоактивными отходами; создания организации по обращению с отходами (ООО), отвечающей за осуществление программы по захоронению; разработки дорожной карты для реализации программы по геологическому захоронению.

Как и настоящая публикация, будущие руководящие материалы, будут основаны на примерах и практических методах, обеспечивших успешное осуществление программ захоронения в государствах-членах. Они будут преследовать цель распространения надлежащей практики и извлеченных уроков, а также стимулирования дальнейшего развития и реализации национальных программ. В целом ожидается, что распространение надлежащей практики будет использовано для информационного обеспечения национальных решений в области национальной нормативно-правовой базы, а также в рамках соответствующих международных конвенций.

В целях обеспечения разработки безопасных решений и достижения согласованного на международном уровне высокого стандарта безопасности при проектировании и строительстве пунктов захоронения, в дополнение к использованию примеров и передового опыта других государств, следует руководствоваться соответствующими нормами безопасности. Особое внимание среди широкого круга соответствующих норм безопасности следует уделять публикациям Серии норм безопасности МАГАТЭ, № SSR-5, «Захоронение радиоактивных отходов» [5]; № SSG-1, «Borehole Disposal Facilities for Radioactive Waste» («Пункты скважинного захоронения радиоактивных отходов») [6]; № SSG-29, «Near Surface Disposal Facilities for Radioactive Waste» («Пункты приповерхностного захоронения радиоактивных отходов») [7]; № SSG-14, «Пункты геологического захоронения радиоактивных отходов» [8]; № SSG-23, «The Safety Case and Safety Assessment for the Disposal of Radioactive Waste» («Обоснование и оценка безопасности захоронения радиоактивных отходов») [9]; № GSG-1, «Классификация радиоактивных отходов» [10].

1.3. ЦЕЛЬ

Цель настоящей публикации сводится к изложению руководящих принципов проектирования пунктов захоронения (репозиториев) и к общему описанию поэтапного подхода к проектированию с использованием общепринятой терминологии. Представлена хронологическая цепочка, включающая этапы проектирования и взаимосвязанные действия и процессы, такие как выбор площадки размещения, лицензирование, строительство, эксплуатация и закрытие объекта. Приведены примеры концепций захоронения, которые были разработаны и во многих случаях реализованы применительно к широкому диапазону инвентарных объемов радиоактивных отходов. Представленные примеры показывают, как проекты реализуются в случае различных инвентарных объемов отходов, геологических условий и концепций эксплуатации. Изложенные здесь руководящие материалы, содержащие описание надлежащей практики, отражают мнение экспертов и не являются рекомендациями, сформулированными на основе консенсуса, достигнутого государствами-членами.

1.4. СТРУКТУРА

В разделе 2 настоящей публикации представлена справочная информация о процессе проектирования и о том, как этот процесс зависит от инвентарного списка (реестра) отходов и их характеристик, имеющихся вариантов и жизненного цикла программы пункта захоронения.

В разделе 3 изложены руководящие принципы и структура итеративного, базирующегося на требованиях системного процесса инженерного проектирования в цепочке от этапа концептуального проектирования до разработки основанного на изучении соответствующих вариантов окончательного проекта, в рамках которого осуществляются работы по выбору площадки, лицензированию, строительству и закрытию объекта на финальной стадии.

В разделе 4 приведены примеры проектов, которые были реализованы или детально оценены применительно к различным классам радиоактивных отходов (см. GSG-1 [10]) и всем выявленным условиям размещения площадки и вмещающим формациям. Эти примеры призваны служить надежным ориентиром при разработке новых программ по захоронению.

2. ПРОЦЕСС ПРОЕКТИРОВАНИЯ ПУНКТА ЗАХОРОНЕНИЯ

2.1. ОСНОВНЫЕ ВОПРОСЫ

Реализация программы по строительству пункта захоронения составляет неотъемлемую часть практики обращения с радиоактивными отходами, осуществляемой в соответствии с действующей национальной политикой в области обращения с отходами и в рамках национальной нормативно-правовой базы. МАГАТЭ опубликовало руководство «Политика и стратегии обращения с радиоактивными отходами» [11] с целью помочь государствам-членам в разработке соответствующей национальной программы по обращению с радиоактивными отходами.

Нормативная база регулирования устанавливает цели в области обеспечения безопасности и определяет требования, выполнение которых является подтверждением соблюдения нормативных положений. Поскольку сроки реализации могут варьироваться от нескольких десятилетий до сотен лет в зависимости от типа отходов и сложности решения по захоронению, нормативная система должна четко определять роли и обязанности, подлежащие исполнению применительно к реализации проекта и его нормативному регулированию [12]. Это включает установление конкретных требований для производителей отходов, составление инвентарного списка отходов, установление независимого регулирующего надзора и создание или назначение организации-исполнителя. Организацией-исполнителем является учреждение, на которое возлагается общая ответственность за осуществление программы строительства пункта захоронения (репозитория); в этой роли может выступать правительственное учреждение или другой уполномоченный орган. Организация-исполнитель осуществляет управление программой и обеспечивает ее реализацию в соответствии с регулирующими требованиями, установленными государственным органом, под независимым надзором регулирующего органа. Важную роль играет наличие адекватных механизмов финансирования на протяжении всего жизненного цикла программы. МАГАТЭ планирует разработку руководства по методам расчета затрат и схемам финансирования программ по захоронению радиоактивных отходов и опубликование методологии оценки затрат, связанных со строительством пункта захоронения.

Программа создания пункта захоронения включает несколько этапов. В начале осуществления программы составляется инвентарный список (реестр) отходов, подлежащих захоронению, определяются потенциальные общие (т.е. не привязанные к конкретной площадке) решения для

пункта захоронения и начинается разработка общего обоснования безопасности. Обоснование безопасности представляет собой «набор аргументов и доказательств в подтверждение безопасности установки или деятельности» [13]. Итеративный процесс, объем и содержание обоснования безопасности описаны в SSG-23 [9]. Следуя руководящим принципам, изложенным в национальных законах и регулирующих положениях, можно проводить рассмотрение одной или нескольких потенциальных площадок одновременно с определением и разработкой наиболее подходящей концепции или концепций пункта захоронения. Программа строительства пункта захоронения (репозитория) (см. раздел 3) включает проведение исследования площадок и определение их пригодности, разработку проекта в соответствии с выбранной концепцией пункта захоронения, лицензирование, строительство, эксплуатацию и финальную стадию вывода из эксплуатации и закрытия объекта, за которой в случае необходимости следует период ведомственного контроля или мониторинга.

Изоляция и локализация в течение всего времени, пока отходы представляют потенциальную опасность, являются основными функциями безопасности, обеспечиваемыми пунктом захоронения. Обеспечение изоляции и локализации подразумевает использование пассивных барьеров, которые функционируют как единый комплекс и вместе способны предотвратить или ограничить высвобождение радионуклидов (см. подраздел 3.1.2). К ним относятся как естественные барьеры, создаваемые на площадке пункта захоронения, так и специально спроектированные для данной цели инженерно-технические барьеры. В проекте пункта захоронения инженерно-технические барьеры и естественные барьеры интегрируются в общую концепцию безопасности.

Наличие естественных барьеров обеспечивается характеристиками окружающей среды и геологическими условиями, выбираемыми для данного пункта захоронения, а инженерно-технические барьеры представляют собой элементы системы пункта захоронения, специально спроектированной и построенной для обеспечения безопасного размещения отходов и эксплуатации пункта захоронения, включая его закрытие, а также для предотвращения миграции радионуклидов после закрытия объекта. Инженерно-технические барьеры могут включать упаковки отходов, материалы для закладки/заполнения пустот, многослойные покрывающие слои, облицовку или системы герметизации и другие элементы конструкции. Помимо изоляции отходов проект строительства пункта захоронения должен обеспечивать защиту работников, населения и окружающей среды во время эксплуатации. Подтверждением достижения установленных целей безопасности применительно к эксплуатации и функциональным характеристикам долгосрочной изоляции отходов после закрытия объекта служат результаты оценки безопасности, проводимой с использованием определенной методологии.

Оценка безопасности представляет собой многодисциплинарное аналитическое исследование, в рамках которого оцениваются функциональные характеристики пункта захоронения в ходе выполнения строительных работ и операций по захоронению и в период после закрытия объекта. Безопасность оценивается с использованием определенных критериев, в число которых, как правило, входят радиологические пределы дозы или риски для работников и населения. На каждой основной стадии создания пункта захоронения оценка безопасности повторяется с использованием более полной информационной базы, которая становится доступной на каждом этапе, включая выбор площадки, разработку проекта, лицензирование и финальную стадию закрытия объекта. Оценка безопасности играет важную роль в итеративном процессе оптимизации проекта.

2.2. ЦИКЛ РАЗРАБОТКИ И ОЦЕНКИ ПУНКТА ЗАХОРОНЕНИЯ

Как и при проектировании любого крупномасштабного строительного проекта, на первом этапе необходимо определить задачу и сформулировать функциональные и эксплуатационные требования. Конкретные решения по захоронению, выбранные для реализации государством-членом, будут зависеть от инвентарного списка (реестра) подлежащих захоронению отходов и

национальной политики, регулирующей захоронение отходов. Например, национальная политика может предписывать использование для захоронения отходов одной или нескольких площадок.

Международный опыт показывает, что осуществление успешных программ строительства пунктов захоронения включает ряд стадий. Каждая стадия начинается с принятия важного программного решения при участии широкого круга заинтересованных сторон, некоторые из которых могут принимать юридически закрепленное обязательное участие на определенных этапах (например, регулирующие и планирующие органы), а другие являются обязательными или назначаемыми для данной цели консультантами, включая утвержденных должностных лиц, производителей отходов и представителей общественности. Содержание и цель каждой стадии заключаются в дальнейшей разработке проекта, достижении рубежей регулирования или правового обеспечения и в постепенном совершенствовании и оптимизации проекта с учетом пользовательских потребностей. Поэтапность позволяет заинтересованным сторонам осуществлять контроль на каждом важном этапе принятия решения.

Как уже отмечалось ранее, стадии проектирования могут быть связаны с итеративной актуализацией обоснования безопасности. Точки принятия решений, разделяющие стадии проектирования, определяются на основе результатов оценки безопасности в соответствии с регулирующими требованиями. Уверенность в оценке безопасности достигается путем итеративных действий в сочетании со сбором подтверждающих данных. По мере получения новых данных проводится актуализация оценки проекта и безопасности. При достижении достаточной степени уверенности учреждение-исполнитель инициирует проведение экспертизы регулирующим органом (например, путем подачи заявки на получение лицензии). Результаты экспертизы и мнения заинтересованных сторон формируют основу для принятия основного решения о продолжении работ, для которого также может потребоваться одобрение со стороны правительства.

2.3. СОСТАВЛЕНИЕ ИНВЕНТАРНОГО СПИСКА (РЕЕСТРА) ОТХОДОВ

Данные инвентарного списка (реестра) необходимы для планирования мер по обращению с отходами и их захоронению. В соответствии с требованиями по представлению докладов в соответствии со статьей 32 Объединенной конвенции [1], в инвентарный список отходов включается описание политики и практики в области обращения с радиоактивными отходами и критериев, используемых для определения и категоризации отходов, включая отработавшее ядерное топливо (ОЯТ). В инвентарный список (реестр) также включается описание объекта, являющегося местом происхождения отходов, текущего состояния и актуального местонахождения объекта, а также информация о материале, включая объем или массу отходов, активность и содержание радионуклидов. Дополнительные данные, включаемые в инвентарный список, перечислены в публикации МАГАТЭ «Status and Trends in Spent Fuel and Radioactive Waste Management» («Состояние дел и тенденции в области обращения с отработавшим топливом и радиоактивными отходами») [14]; они охватывают также другие соответствующие вопросы, касающиеся материала, которые необходимо учитывать при планировании и проектировании пунктов захоронения, такие как форма отходов, тепловые и химические характеристики, практика обработки и кондиционирования отходов, а также прогнозы образования отходов в будущем.

Первой важной задачей учреждения-исполнителя (в данном случае предполагается, что это ОО) является составление национального инвентарного списка (реестра) отходов. Информация, подлежащая включению в инвентарный список отходов, определяется ОО и предоставляется производителями отходов. Используя оценку инвентарного списка, ОО действует в рамках национального нормативно-правового регулирования и определяет требования и формулирует надежные стратегии захоронения.

Инвентарный список (реестр) и характеристики отходов используются вместе с данными, собираемыми на национальном уровне или применительно к конкретному месту, о потенциальных экологических и геологических условиях для захоронения с целью определения

приемлемых концепций создания пунктов захоронения. Альтернативы могут варьироваться от приповерхностных систем, предназначенных для обеспечения изоляции и локализации на срок от нескольких десятилетий до сотен лет, до шахтных геологических систем, предназначенных для обеспечения пассивной изоляции и локализации на период в несколько сотен тысяч лет.

2.3.1. Классификация отходов

Разработка схем классификации, основанных на характеристиках отходов, является важным аспектом планирования деятельности по обращению с отходами. В государствах-членах используются различные схемы классификации отходов. Для решения этой проблемы в 2009 году была выпущена публикация GSG-1 [10], призванная помочь государствам-членам в планировании работ по обращению с отходами, выполняемых с целью реализации их захоронения. Классификация, представленная в GSG-1 [10], учитывает принципы, изложенные в публикации Серии норм безопасности МАГАТЭ, № SF-1, «Основополагающие принципы безопасности» [3], в частности принципы 1, 5 и 7. В этой публикации приведен полный перечень классов отходов и даны их общие определения в порядке повышения требований, предъявляемых к изоляции и локализации. Концептуальная взаимосвязь классов отходов показана на рис. 1. Класс отходов и его специфические характеристики помогают определить минимальные требования к безопасности, связанные с данной концепцией захоронения. В частности, соответствующие требования безопасности изложены в SSG-29 [7], SSG-14 [8], и SSG-1 [6]. Схема классификации отходов МАГАТЭ используется в настоящей публикации в качестве основы при описании концепций захоронения

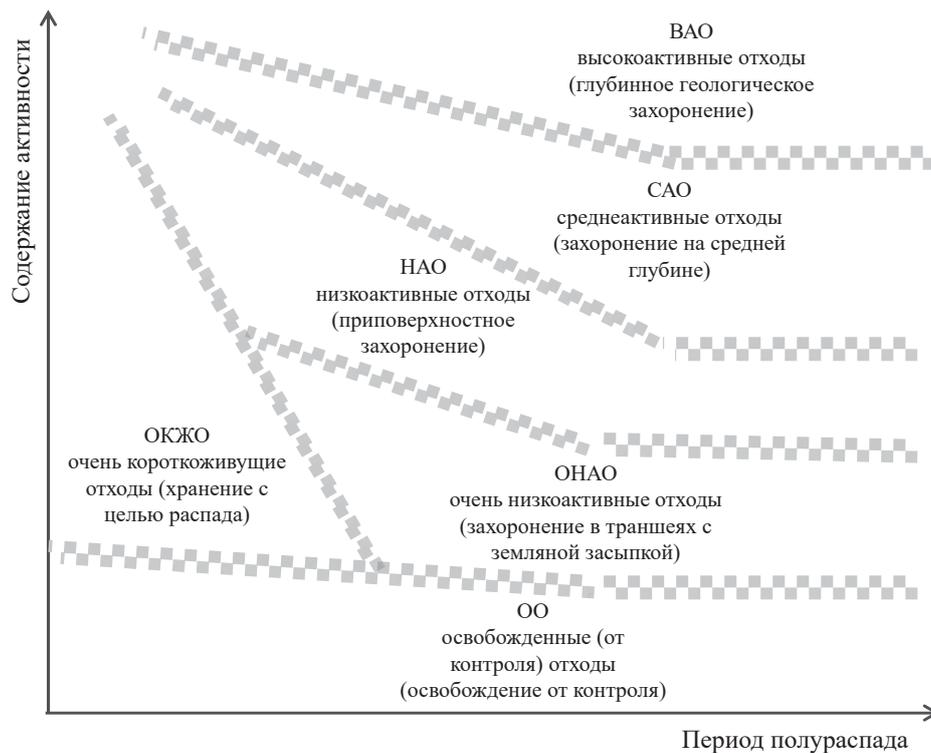


РИС. 1. Схема классификации отходов МАГАТЭ [10].

В системе МАГАТЭ отходы подразделяются на шесть отдельных классов в зависимости от повышения жесткости требований, предъявляемых к изоляции и локализации [10]. В случае двух наиболее низких классов особые требования в отношении захоронения не предъявляются, поскольку связанная с ними радиологическая опасность минимальна. Однако к остальным четырем классам применяются возрастающие по жесткости требования к захоронению. В пункте 2.2 в GSG-1 [10] определены шесть классов отходов:

- 1) освобожденные (изъяты из-под контроля) отходы (ОО). Отходы, которые соответствуют критериям освобождения от регулирующего контроля, изъяты из-под регулирующего контроля или исключения из сферы действия регулирующего контроля в целях обеспечения радиационной защиты;
- 2) очень короткоживущие отходы (ОКЖО). Отходы, которые могут находиться на хранении до распада в течение ограниченного периода времени — до нескольких лет, а затем освобождаются от регулирующего контроля в соответствии с порядком, утвержденным регулирующим органом для неконтролируемого захоронения, использования или сброса. Этот класс включает отходы, содержащие главным образом радионуклиды с очень коротким периодом полураспада, которые преимущественно используются для научных исследований и медицинских целей¹;
- 3) очень низкоактивные отходы (ОНАО). Отходы, которые необязательно соответствуют критериям ОО, но применительно к которым не требуется обеспечивать высокий уровень локализации и изоляции, вследствие чего они пригодны для размещения в пунктах приповерхностного захоронения с земляной засыпкой, для которых предусматривается ограниченный регулирующий контроль. Такие сооружения с земляной засыпкой могут содержать и другие опасные отходы. Типичные отходы, относимые к этому классу, включают грунты и щебень с низким уровнем концентрации активности. Концентрации более долгоживущих радионуклидов в ОНАО, как правило, очень ограничены;
- 4) низкоактивные отходы (НАО). Отходы, превышающие уровень освобождения от регулирующего контроля, но при этом содержащие ограниченное количество долгоживущих радионуклидов. В случае таких отходов необходимо обеспечивать их устойчивую изоляцию и локализацию в течение срока до нескольких сотен лет, и они могут размещаться в пунктах приповерхностного захоронения, оборудованных соответствующими инженерно-техническими средствами. Этот класс охватывает очень широкий спектр отходов. НАО могут включать короткоживущие радионуклиды с более высокими уровнями концентрации активности, а также долгоживущие радионуклиды, но только при относительно низких уровнях концентрации активности;
- 5) среднеактивные отходы (САО). Отходы, для которых с учетом их состава, в особенности из-за содержания долгоживущих радионуклидов, требуется обеспечивать более высокую степень локализации и изоляции, чем в случае приповерхностного захоронения. Вместе с тем во время хранения или захоронения САО отвод тепла не требуется, либо предусматривается лишь ограниченное обеспечение отвода тепла. САО могут содержать долгоживущие радионуклиды, в частности альфа-излучающие радионуклиды, которые не распадаются до уровня концентрации активности, приемлемой для приповерхностного захоронения в течение срока, во время которого могут надежно применяться меры ведомственного контроля. Соответственно, захоронение отходов этого класса необходимо производить на больших глубинах в диапазоне от нескольких десятков до сотен метров;
- 6) высокоактивные отходы (ВАО). Отходы с достаточно высокими уровнями концентрации активности, чтобы генерировать значительное количество тепла в процессе радиоактивного распада, или отходы с большим объемом долгоживущих радионуклидов, которые необходимо

¹ Классы отходов ОО и ОКЖО включены для полноты картины; однако, поскольку с учетом радиологических характеристик захоронение этих отходов не требуется, они не рассматриваются далее в настоящей публикации.

учитывать при проектировании пункта захоронения таких отходов. Общепризнанным вариантом захоронения ВАО является захоронение в глубоких стабильных геологических формациях, обычно на глубине в несколько сотен или более метров от земной поверхности.

Эта пересмотренная система классификации отходов ориентирована на захоронение и может быть использована для определения соответствующих концепций захоронения, включая предварительные критерии приемлемости отходов (КПО) и другие требования. Дополнительная информация о конкретных характеристиках отходов, включая физическую форму, уровень активности и содержание радионуклидов, химический или биологический состав, а также о происхождении отходов будет способствовать дальнейшему информационному наполнению предварительных КПО. Предварительные КПО применяются на начальном этапе для сужения круга отходов, подлежащих захоронению, и для разработки концепции захоронения.

2.3.2. Обработка и упаковка отходов перед захоронением

Предварительные КПО определяют порядок обращения с отходами перед их захоронением, и ООО разрабатывает эти КПО, с тем чтобы довести до производителя отходов требования, обеспечивающие приемлемость отходов для захоронения в пункте захоронения, который будет создан в будущем. В последующем производитель отходов может выбирать соответствующие стратегии по переработке отходов и переводе их в требуемую форму. В КПО по мере реализации программы строительства пункта захоронения могут вноситься изменения с учетом фактических условий на выбранной площадке и требований, связанных с данным проектом; важно, чтобы эти уточнения не приводили к радикальным изменениям, касающимся отходов, которые уже были обработаны и кондиционированы при подготовке к захоронению. Таким образом, предварительные КПО должны предусматривать достаточную широту и не исключать возможность внесения изменений в проект в рамках общей концепции захоронения. Не рекомендуется проводить иммобилизацию отходов в матрице любого типа до завершения разработки концепции захоронения и составления детальных КПО.

В случае некоторых ОНАО может осуществляться их прямое захоронение в сыпучей или кусковой форме. Напротив, для большинства других классов отходов должна предусматриваться обработка в той или иной степени после их первоначальной генерации. Варианты обработки отходов, например в целях сокращения объема, могут играть важную роль при разработке и выборе концепции проектирования пункта захоронения. Целью обработки является преобразование отходов в форму, пригодную для хранения и/или захоронения и отвечающую предварительным требованиям КПО для рассматриваемой концепции (или концепций) пункта захоронения.

Основная задача операций по обращению с отходами перед захоронением сводится к сортировке, характеризации, обработке, кондиционированию и окончательной упаковке обработанных материалов в контейнеры, пригодные для захоронения. После первоначальной сортировки, проводимой по физическим характеристикам, выполняется характеризация отходов с целью их распределения по контейнерам для последующей обработки и кондиционирования. Процессы обработки осуществляются с целью повышения безопасности и/или экономической эффективности проведения транспортно-технологических операций с отходами путем уменьшения их объема или иного изменения их характеристик и перевода в форму, совместимую с хранением, транспортировкой и захоронением. При необходимости обработанные отходы могут быть впоследствии кондиционированы с переводом в стабильную твердую форму с целью иммобилизации радионуклидов, часто с размещением непосредственно в контейнере для захоронения. Несколько контейнеров могут упаковываться вместе. Характеристики отходов и финальной упаковки играют важную роль при проектировании пункта захоронения.

В случае ОНАО, образующихся при выводе из эксплуатации ядерных установок, как правило, можно использовать упрощенные процедуры предварительной обработки. ОНАО часто состоят из бетона, металлолома, мусора и подвергнутого радиоактивному загрязнению грунта.

Предварительная обработка часто сводится к простому уменьшению размеров для облегчения проведения транспортно-технологических операций, а также для предотвращения рассеивания пыли и удерживания сыпучих материалов. ОНАО часто могут содержаться в больших мешках, стандартных транспортных бочках или других простых контейнерах.

Уровни излучения в случае НАО могут быть достаточно высокими, чтобы требовалось обеспечение минимального уровня защитного экранирования при проведении транспортно-технологических операций с отходами и их хранении перед захоронением. Самые большие объемы НАО обычно составляют загрязненные средства индивидуальной защиты, инструменты, ветошь, отработанные ионообменные смолы, строительный мусор, а также металлолом. Отходы могут подвергаться обработке путем сокращения объема (например, методом сжигания или компактирования), иммобилизации с использованием соответствующей матрицы (как правило, цемента, полимеров или материалов на основе битума) или их сочетания. НАО в обработанном или же необработанном виде, как правило, помещаются в бочки или другие подходящие для этой цели контейнеры. Контейнеризованные таким образом отходы могут быть помещены в наружную упаковку (так называемый транспортный пакет), вмещающую один или несколько контейнеров, с целью обеспечения защитного экранирования. Оставшееся пустым пространство внутри контейнера или транспортного пакета при необходимости может быть заполнено активным или неактивным раствором. Полученные в результате контейнеризованные НАО образуют упаковку отходов. При проектировании хранилищ и транспортно-технологического оборудования может предусматриваться дополнительное защитное экранирование.

САО характеризуются более высокой активностью, которая может быть обусловлена наличием короткоживущих и долгоживущих радиоизотопов. Уровни активности и концентрации долгоживущих радиоизотопов, связанных с САО, обуславливают необходимость захоронения в геологических формациях. САО атомных электростанций состоят из элементов активной зоны реактора, отработанных ионообменных смол и фильтров, используемых в реакторных системах для очистки охлаждающей воды. Как правило, требуется проведение обработки и кондиционирования отходов. Сокращение объема, приводящее к концентрации радиоактивности, необходимо контролировать во избежание увеличения мощности дозы на поверхности сверх безопасных пределов. Как правило, САО переводят в пассивно безопасную форму путем цементирования или остекловывания и помещают в соответствующие экранированные контейнеры. Один или несколько контейнеров могут быть сгруппированы вместе и помещены в наружную упаковку (транспортный пакет) с целью формирования упаковки отходов. В ожидании захоронения САО необходимо хранить в экранированных помещениях.

Для ВАО и ОЯТ в случае их классификации в рамках национальной политики в качестве отходов требуется обеспечивать самый высокий уровень изоляции и локализации в пункте геологического захоронения. Продукты деления в ОЯТ или в ВАО, образующихся при переработке ОЯТ, создают высокие уровни как тепла, так и радиоактивности. Наличие долгоживущих радионуклидов в ВАО, образующихся при переработке, требует иммобилизации и перевода в нерастворимую твердую форму отходов, которая может оставаться стабильной в течение очень длительных периодов времени, причем подходящими для хранения и захоронения считаются отходы в остеклованной или керамической форме. В случае большинства концепций геологического захоронения ВАО и ОЯТ необходима их упаковка в канистры (контейнеры) специальной конструкции, используемые для захоронения. Некоторые менее проработанные концепции предусматривают прямое захоронение контейнеров для хранения (например, бочек).

2.4. ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ И РЕЗУЛЬТАТЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ПУНКТА ЗАХОРОНЕНИЯ

В принципе при проектировании всех типов рассматриваемых пунктов захоронения применим примерно одинаковый общий подход. Концепции строительства, эксплуатации и

закрытия являются неотъемлемыми частями проекта. Строительство и ввод в эксплуатацию пункта захоронения необходимо осуществлять с соблюдением приемлемых сроков в условиях реалистичных технических и финансовых ограничений. Характеристики проекта пункта захоронения учитываются при разработке обоснования безопасности, что может налагать дополнительные ограничения. Общая компоновка пункта захоронения, масштаб сооружений для проведения транспортно-технологических операций с отходами и пропускная способность пункта захоронения могут зависеть как от существующих, так и от прогнозируемых объемов отходов.

В процессе реализации проекта необходимо проводить определенный объем научно-исследовательских, опытно-конструкторских и демонстрационных работ (НИОКДР) с целью выполнения инженерного анализа, который, в свою очередь, помогает принимать проектные решения. Применительно к элементам конструкции, обеспечивающим выполнение функции безопасности, должны проводиться дополнительные подтверждающие исследования, которые могут выполняться на протяжении всего жизненного цикла проекта вплоть до закрытия объекта. Исследования, подтверждающие работоспособность функций безопасности, как правило, проводятся с соблюдением регламентированных требований к качеству.

Использование доступных технологий и хорошо зарекомендовавших себя материалов, элементов и систем позволяет минимизировать связанные с проектом риски и уменьшить объем необходимых НИОКДР. Технологические системы или их элементы, предназначенные для систем захоронения радиоактивных отходов, в большинстве случаев уже существуют и прошли тщательную проверку, и одним из принципов проектирования пунктов захоронения является использование существующих технологий (см. подраздел 3.1). Для подтверждения технологической готовности элемента при необходимости может требоваться проведение экспертизы проекта или экспертизы эксплуатационной готовности. Вместе с тем, если в ходе реализации программы возникает очевидная потребность в новой технологии, необходимо обеспечить ее разработку до уровня готовности. Технологические инновации могут варьироваться от адаптации существующего оборудования для использования в радиологической среде до разработки нового оборудования, предназначенного для выполнения конкретных задач, характерных для той или иной концепции захоронения (например, для размещения упаковок отходов). В случае применения новых элементов конструкции, которые ранее не использовались в плановом порядке, необходимо проводить тщательное тестирование этих элементов с подтверждением их функциональных характеристик, предпочтительно путем проведения полномасштабных испытаний, особенно когда элемент выполняет функцию безопасности.

После выбора первоначальной концепции захоронения применительно к данной потенциальной площадке проект корректируется с учетом конкретных условий площадки, определенных в рамках программы по характеризации площадки. В случае пунктов приповерхностного захоронения корректировки могут учитывать геологическую изменчивость и геоморфологические особенности, такие как топографические условия и дренажные пути. При проектировании глубинных пунктов захоронения может требоваться корректировка проекта с учетом тепловых, механических, гидрогеологических, химических и сейсмических условий. ООО по мере реализации проекта будет использовать итеративные оценки безопасности, оценки эксплуатационной безопасности и оценки безопасности после закрытия объекта для подтверждения функциональных характеристик пункта захоронения. Для целей оценки безопасности требуются следующие данные:

- характеристики (радиологические, физические и химические) и инвентарный список отходов;
- характеристики упаковочных комплектов отходов (свойства материалов и поведение в прогнозируемых условиях в пункте захоронения);
- характеристики геосферы (естественные процессы в грунтах, породах и подземных водах в окрестностях пункта захоронения, включая реакцию на изменения окружающей среды и природные явления, такие как изменение климата и сейсмичность);

- проектные характеристики пункта захоронения (компоновка и стратегия размещения, использование инженерно-технических барьеров, например, буферов, облицовки, верхнего укрытия, заглушек, средств герметизации скважин и шахтных стволов);
- характеристики биосферы (например, глубина укоренения растений, процессы поглощения радионуклидов, наличие землеройных животных, использование подземных вод);
- социально-экономические аспекты, связанные с потенциально затрагиваемым населением (землепользование, сельскохозяйственная деятельность, плотность населения и т.д.).

Обычно оценка безопасности проводится неоднократно с применением итеративного процесса, в ходе которого уровень детализации повышается в каждой очередной оценке, на протяжении всего жизненного цикла программы строительства пункта захоронения по мере получения дополнительной информации о площадке и уточнения проекта, как правило, в целях выполнения определенных требований нормативного регулирования. С каждым итеративным действием обеспечивается более полная интеграция проекта применительно к условиям природной среды, характерным для данной площадки. Применение такого подхода позволяет обеспечить баланс между использованием естественных и инженерно-технических барьеров, благодаря чему может быть достигнуто повышение эффективности глубокоэшелонированной защиты и сокращение затрат на строительство инженерно-технических барьеров. Общей целью этого итеративного процесса проектирования является разработка устойчивой (робустной) конструкции и полностью подтвержденного обоснования безопасности.

Благодаря оценкам безопасности концепция захоронения доводится до уровня проекта, приемлемого для лицензирования. В заявку на получение лицензии входят описание проекта, КПО и оценка безопасности. Регулирующие органы могут выдавать отдельные лицензии на строительство и эксплуатацию, для получения каждой из которых требуется подача заявки от ООО. По каждой заявке регулирующей орган проводит детальную экспертизу на соответствие требованиям. Для облегчения экспертизы решения, принимаемые в процессе разработки проекта, должны быть хорошо задокументированными и прослеживаемыми, и регистрационные записи должны вестись с использованием соответствующих систем менеджмента качества. Экспертиза на соответствие требованиям включает оценку технического качества, полноты и точности заявки и обеспечивает проверку соблюдения регулирующих требований. Также могут проводиться независимые экспертизы. Рассмотрение заявки на получение лицензии может включать возможность возбуждения судебного разбирательства с участием заинтересованных сторон, могущих иметь отношение к делу, что еще больше подтверждает необходимость обеспечения полной прозрачности процесса. Процесс экспертизы, проводимой регулирующим органом, может также привести к определению и утверждению окончательного варианта КПО, а также к определению любых условий, которые ООО должна выполнить до или во время строительства или эксплуатации.

2.5. ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ И КОМПОНОВКА ПУНКТА ЗАХОРОНЕНИЯ

Все пункты захоронения (репозитории) имеют некоторые общие элементы, такие как оборудование и сооружения для проведения транспортно-технологических операций с отходами, временное хранилище отходов, хранилище экскавированного грунта, цеха для обслуживания и хранения оборудования, административные помещения, инженерные сети, санитарные узлы, помещения аварийных служб, помещения для приема посетителей и так далее.

При планировке пункта захоронения эти общие элементы выбираются с учетом топографических и других условий площадки, путей доступа и потенциальных элементов окружающей среды (например, наличия естественных дренажных систем или заболоченных территорий). При компоновке также должны учитываться юридические требования, регулирующие положения, нормы и правила, а также любые программные ограничения. Некоторые виды

деятельности и объекты необходимо распределять по разным зонам в целях обеспечения соблюдения требований по физической безопасности, радиационной защите и, возможно, требований по ядерным гарантиям.

Для обеспечения физической безопасности, как правило, весь объект размещается за безопасным периметром, обычно состоящим из ограждения вдоль периметра, систем контроля доступа и мониторинга. Применимые рекомендации МАГАТЭ, касающиеся физической безопасности, изложены в публикации «Рекомендации по физической ядерной безопасности, касающиеся физической защиты ядерного материала и ядерных установок» (INFCIRC/225/Revision 5) [15]. В состав пункта захоронения входят обычные сооружения и зона радиационной защиты. Требования к радиационной защите, применяемые в отношении пункта захоронения, по существу аналогичны требованиям, действующим применительно к другим ядерным установкам или видам деятельности, связанным с аналогичными радиоактивными материалами. Конкретные требования безопасности, применяемые в отношении пунктов захоронения, изложены в SSR-5 [5], а общие требования безопасности — в публикации Серии норм безопасности МАГАТЭ, № GSR Part 3, «Радиационная защита и безопасность источников излучения: Международные основные нормы безопасности» [12].

Ключевой отличительной особенностью пункта захоронения является наличие собственно зоны захоронения. В зависимости от типа подлежащих захоронению отходов эта зона может варьироваться от приповерхностных траншей или бетонных камер захоронения, подповерхностных камер захоронения, камерных отсеков, цилиндрических бункеров (типа силосной башни) или скважин до систем глубинного геологического захоронения, включающих созданные экскавацией камерные отсеки или горизонтальные выработки. Кроме того, может рассматриваться возможность использования систем глубинного скважинного захоронения. На рис. 2 представлен схематический обзор различных вариантов захоронения, доступных для различных классов отходов. Схема, представленная на рис. 2, и использование параметра глубины для различных классов отходов соответствует системе классификации МАГАТЭ, описание которой приводится в подразделе 2.3. Иногда целесообразно иметь в пункте захоронения несколько зон захоронения различного типа

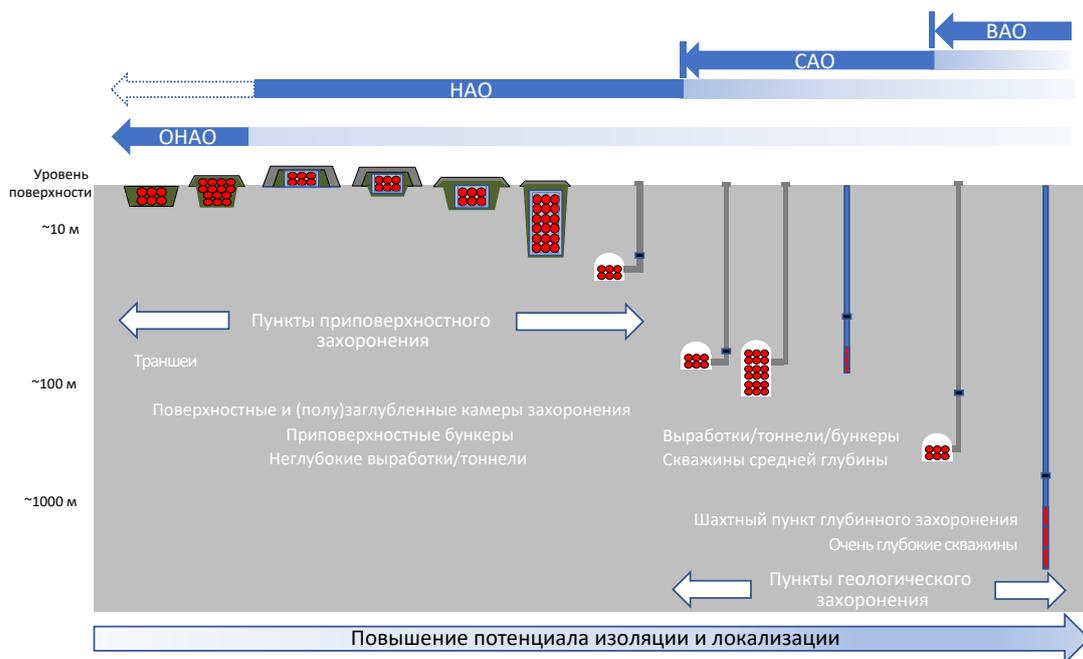


РИС. 2. Схематическая иллюстрация вариантов захоронения — от поверхностного до глубинного захоронения, которые в настоящее время рассматриваются или реализуются применительно к различным классам радиоактивных отходов.

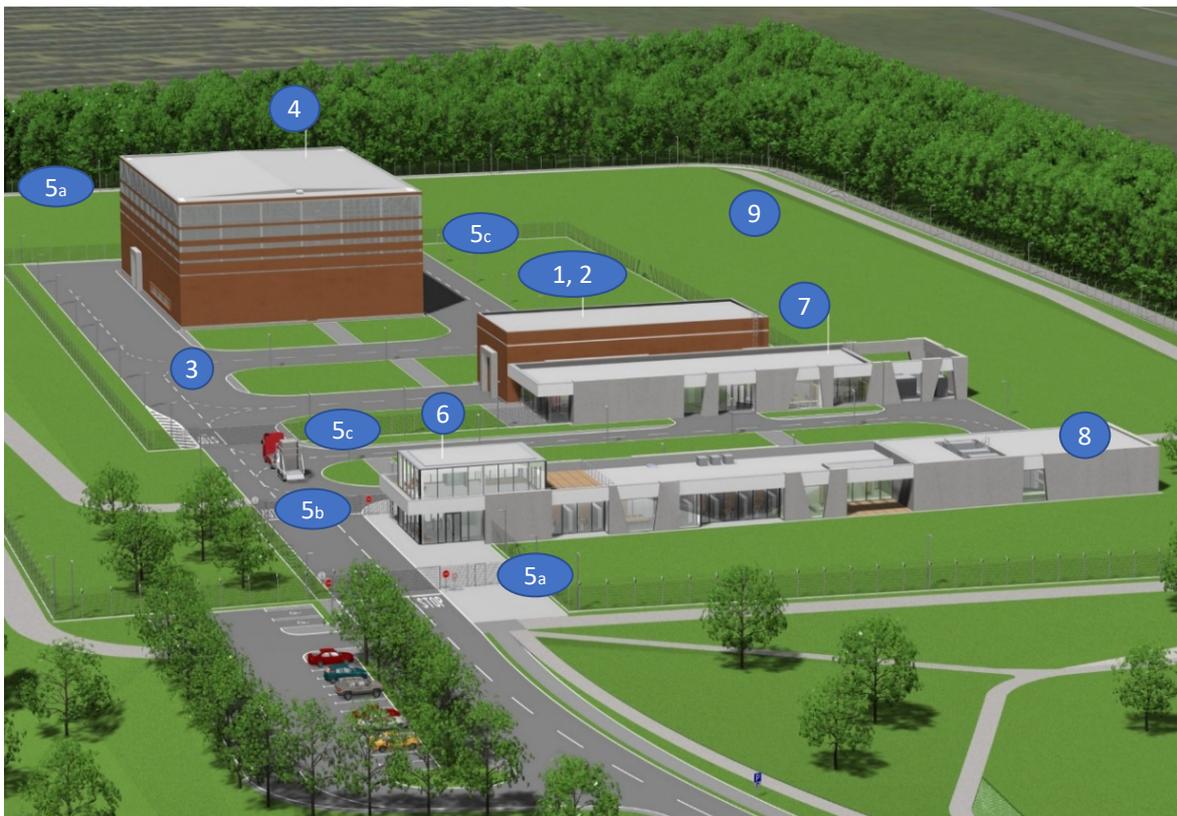


РИС. 3. Общая компоновка пункта захоронения (иллюстрация приводится с разрешения Агентства по радиоактивным отходам, Словения). Условные обозначения: 1 — контроль приемки отходов; 2 — буферное хранение; 3 — маршрут транспортировки отходов; 4 — зона захоронения; 5 (a)–(c) — службы обеспечения физической безопасности (охраны); 6 — службы административной поддержки; 7 — лаборатории; 8 — центр приема и обслуживания посетителей; 9 — территория, зарезервированная для будущего расширения.

для размещения в них разных потоков отходов с использованием модульного подхода при условии подтверждения физической безопасности и осуществимости проекта.

Разработка и эксплуатация пункта захоронения могут включать одновременное проведение строительных работ и операции по захоронению отходов на разных участках объекта, при этом в целях сведения к минимуму возможного взаимовлияния строительные работы должны быть ограничены четко определенными зонами. Наилучшая практика показывает, что весь комплекс работ по захоронению на любом объекте должен рассматриваться с самого начала планирования проекта во избежание необходимости повторного обращения к регулирующим органам за лицензированием, например, в связи с появлением нового или другого потока отходов.

Отходы доставляют в пункт захоронения с применением соответствующих систем локализации, как правило, упакованными для захоронения до начала транспортировки. В случае некоторых отходов упаковка в контейнеры для захоронения может осуществляться на площадке пункта захоронения или вблизи нее; например, это может быть инкапсуляция ОЯТ. Кроме того, может требоваться обработка и упаковка отходов, образующихся на площадке пункта захоронения, таких как загрязненная защитная одежда, инструменты, салфетки и оборудование. В зависимости от возможностей, предусмотренных в проекте, они транспортируются на другой объект для захоронения или обрабатываются на месте.

На рис. 3 показана компоновка гипотетического пункта захоронения (репозитория). Реальные пункты захоронения могут отличаться от представленных на рисунке. Функции

можно разделить на непосредственно связанные с захоронением отходов и на необходимые для операционной поддержки:

— захоронение отходов:

- контроль приемки отходов. Прибывающие на место партии отходов должны проходить контрольную процедуру приемки. Контрольная зона позволяет осуществлять проверку прибывающей партии с целью подтверждения содержимого и проведения визуального осмотра и радиологических обследований. Соблюдение КПО следует подтверждать для каждой партии отходов, предназначенной для захоронения (поз. 1 на рис. 3);
- буферное хранение. Включение буферного склада обеспечивает гибкость в темпах проведения приемки и захоронения упаковок с отходами. Эта функция может не требоваться, если производитель отходов находится неподалеку и может осуществлять управление отгрузкой отходов в соответствии с проведением операций по захоронению. Вместе с тем в других ситуациях специально выделенная зона буферного хранения может облегчать процесс доставки отходов к месту захоронения и повышать эффективность работы (поз. 2 на рис. 3);
- обработка и транспортировка отходов на площадке. После получения и приемки отходов может требоваться их дополнительная обработка перед перемещением к месту финального захоронения (поз. 3 на рис. 3). Как отмечалось ранее, предполагается, что в основном обработка осуществляется перед отправкой, но в некоторых случаях на площадке пункта захоронения или вблизи нее может находиться специализированное предприятие (например, завод по инкапсуляции ВАО и ОЯТ). Отходы, упакованные для захоронения, требуется грузить на специальный транспортер в пункте захоронения, доставлять в зону захоронения, разгружать и укладывать на месте финального захоронения. Для каждого из этих видов операций может использоваться специализированное оборудование. Выбор наиболее подходящего оборудования зависит, в частности, от таких факторов, как радиационная защита, характеристики отходов или упаковки отходов и предполагаемое место финального захоронения в пункте захоронения. Место финального захоронения и другие данные по каждой упаковке отходов регистрируются и вносятся в систему управления документацией;
- зона захоронения. Зона захоронения является единственным постоянным сооружением пункта захоронения. Строительство может вестись как одновременно, так и поэтапно по модульной схеме, которая позволяет добиться снижения затрат, так как в этом случае захоронение отходов может быть точнее приведено в соответствие со спросом. Кроме того, поэтапный подход позволяет реализовывать возможности в плане внесения улучшений, повышающих общую эффективность системы (поз. 4 на рис. 3);

— операционная поддержка:

- обеспечение физической безопасности (охраны). Инженерно-технические средства службы обеспечения физической безопасности (охраны) предназначены для контроля доступа на площадку, включая контроль доступа персонала, контроль доступа транспортных средств, контроль предметов снабжения и материалов и управление отгрузками отходов (поз. 5 (а)–(с) на рис. 3);
- радиационная защита и мониторинг. Для пунктов захоронения используются стандартные методы обеспечения радиологической защиты работников и населения, соответствующие типу радиологической опасности. Проектные решения включают разделение помещений на отсеки, использование систем вентиляции и другие меры, обеспечивающие защиту во время нормальной эксплуатации, при возникновении аварий и других нештатных событий (например, при пожаре, сейсмических колебаниях грунта). Операционные меры включают дозиметрию, сигнализацию и административный контроль. Также необходим мониторинг потенциальных выбросов радиации по периметру объекта или другой границы, установленной для защиты населения.

Радиационный мониторинг используется в пунктах входа и выхода, связанных с зонами радиационной защиты;

- службы административной поддержки. Как и в случае любой крупномасштабной промышленной деятельности, для пункта захоронения требуются службы административной поддержки. Для функционирования пункта захоронения необходимы отдел административного управления, отдел инженерно-технического персонала и отдел управления документацией (поз. 6 на рис. 3);
- лаборатории. При проектировании всех пунктов захоронения необходимо предусматривать ограниченную аналитическую службу на территории площадки (например, для анализа результатов исследований методом смывов). Размеры и возможности находящихся на площадке лабораторий зависят от КПО и требований, предъявляемых к системе захоронения. Оценку аналитических потребностей и потенциальных местных возможностей следует проводить на ранней стадии планирования. Аналитические возможности могут учитывать необходимость обеспечения целостности образцов и сохранения архивов образцов (поз. 7 на рис. 3);
- вспомогательные функции. Прочие вспомогательные функции могут включать:
 - службы ремонта и технического обслуживания оборудования;
 - гаражи и стояночные площадки для оборудования, автотранспорта и железнодорожных вагонов;
 - службы по уходу за территорией;
- инфраструктура и системы вспомогательного обслуживания. Включают внутренние дороги; электро-, водоснабжение и санитарно-техническое оборудование; отопление, вентиляцию и кондиционирование воздуха (отдельно от зон радиологического контроля); средства передачи данных и коммуникации; управление данными и компьютерные услуги;
- центр приема и обслуживания посетителей (поз. 8 на рис. 3). Эти службы являются эффективным средством проведения информационно-просветительских и образовательных мероприятий, в особенности для жителей близлежащих населенных пунктов.

Также могут быть зарезервированы участки для будущего расширения (поз. 9 на рис. 3) или временного складирования материалов (например, экскавированного грунта).

3. ПРИНЦИПЫ И ЭТАПЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ

Схема, показанная на рис. 4, иллюстрирует общий жизненный цикл программы по созданию пункта захоронения (репозитория) и используется в данном разделе в качестве базовой схемы, в которой особое внимание уделяется принципам проектирования. На этой иллюстрации показаны основные стадии и этапы программы по созданию пункта захоронения, а также типичные точки для лицензирования. Также указаны пять этапов процесса проектирования. Такие рубежи, как определение потенциальных площадок-кандидатов и получение лицензии на строительство, представляют собой ключевые точки принятия решений и подкрепляются конкретными этапами проектирования с соответствующими результатами проектирования, которые используются для обоснования этих решений.

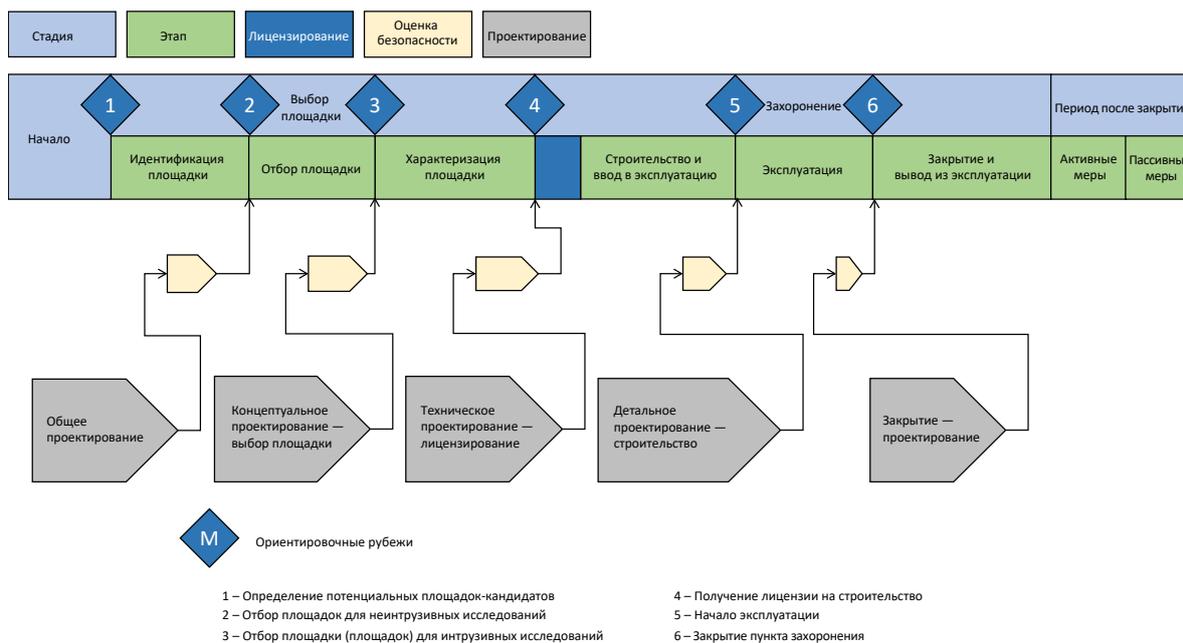


РИС. 4. Общий жизненный цикл программы по созданию пункта захоронения и этапы проектирования с соответствующими ориентировочными рубежами реализации проекта.

3.1. ПРИНЦИПЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ

В данном подразделе изложены принципы, которыми следует руководствоваться при разработке проекта пункта захоронения на протяжении всего жизненного цикла программы. Далее в подразделе 3.2 описываются действия, характерные для каждого этапа проектирования. Указанные руководящие принципы включают:

- использование проектных основ, базирующихся на требованиях;
- проектирование, основанное на многобарьерной концепции безопасности;
- применение безопасных, надежных, доступных и ремонтпригодных технологических решений;
- применение итеративного подхода к разработке и оптимизации проекта;
- сохранение целостности конструкции;
- прозрачное и аудируемое (прослеживаемое) проектирование;
- комплексное проектирование с учетом требований ядерных гарантий и физической безопасности.

Эти принципы подробно рассматриваются в подразделах 3.1.1–3.1.7.

3.1.1. Проектные основы, базирующиеся на требованиях

Основанная на принципах безопасности МАГАТЭ система управления (менеджмента) пункта захоронения (SF-1 [3], пункт 3.12):

«должна включать все элементы управления, чтобы требования безопасности устанавливались и применялись согласованно с другими требованиями, в том числе требованиями в отношении действий персонала, качества и физической безопасности и чтобы другие требования или задачи не выполнялись в ущерб безопасности».

Международный опыт показывает, что данный принцип лучше всего реализуется при разработке на раннем этапе проектных основ, базирующихся на требованиях.

Технические спецификации, формирующие проектные основы пункта захоронения, как правило, формулируются как набор требований, допущений и ограничений, и их разработка и управление ими осуществляются на протяжении всего процесса проектирования. Процесс «управления требованиями»² используется многими ООО с целью:

- четкого определения требований и допущений, относящихся к системе захоронения и ее отдельным элементам (например, инженерно-техническим барьерам);
- четкого обозначения связей и взаимозависимостей;
- выявления противоречащих друг другу требований и возможных компромиссов;
- официальной фиксации обоснованности решений в поддержку обоснования проекта;
- контроля за внесением изменений в проект посредством обеспечения возможности отслеживания и регистрации изменений в требованиях или в базе знаний с определением того, как эти изменения должны быть отражены в изменениях, вносимых в проект.

Такой подход позволяет сформулировать четкие проектные основы, которые могут быть использованы в процессе коммуникации и определения исходных данных и результатов в рамках различных дисциплин как в самой ООО, так и при работе с внешними заинтересованными сторонами, включая взаимодействие с регулирующими органами.

Применение подхода, базирующегося на требованиях, позволяет разрабатывать проектные основы, которые ООО устанавливает как основанные «на оценке безопасности для обеспечения того, чтобы установка для захоронения была разработана в соответствии с обоснованием безопасности. Это должно включать критерии приемлемости отходов ... и другие меры контроля и пределы для применения во время строительства, эксплуатации и закрытия» (SSR-5 [5], пункт 3.14). Требования самого высокого уровня, определенные заинтересованными сторонами, составляют рамки, в которых могут уточняться дальнейшие требования с возрастающей детализацией в соответствии с иерархией требований.

На рис. 5 показана типичная иерархическая структура, в которой проектные основы, реализуемые в рамках требований, заданных заинтересованными сторонами, уточняются с нарастающей конкретизацией по мере накопления знаний о конструктивной концепции. В соответствии с этим подходом детализация требований возрастает от уровня всей системы пункта захоронения к более детальным требованиям для подсистем, затем к требованиям для конкретных элементов и так далее. Обязательную верификацию проекта пункта захоронения следует предусматривать на каждом уровне с анализом соблюдения конкретных требований, т.е. с анализом того, как спроектированный или построенный элемент выполняет предъявляемые к нему требования. Такое последовательное определение как конструктивной концепции (проектного замысла), так и гарантий проектирования обеспечивает проведение всесторонней валидации пункта захоронения на предмет соответствия итеративно разработанному обоснованию безопасности. В таблице 1 указана область применения для каждого уровня иерархии проектирования.

² Управление требованиями часто называют основой системной инженерии, которая широко используется в сфере программного обеспечения, в авиационной промышленности и в гражданском промышленном производстве.

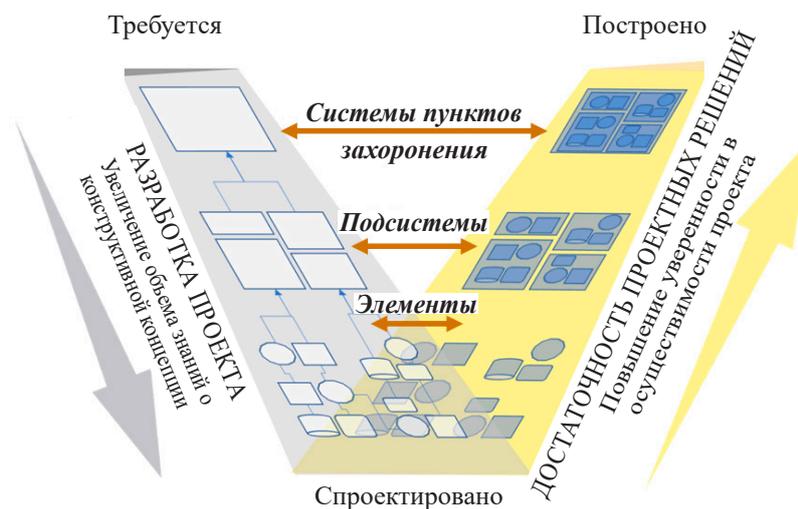


Рис. 5. Иерархия проектных основ применительно к формулированию и подтверждению производных требований.

ТАБЛИЦА 1. ИЕРАРХИЯ И ОБЛАСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ ПРОЕКТНЫХ ОСНОВ

Уровень (документ)	Описание	Область применения
Требования высокого уровня	Эти требования также можно назвать требованиями «заинтересованных сторон». Требования высокого уровня могут быть обязательными (например, определяемыми законодательством, регулирующими положениями и местными и национальными органами, ответственными за лицензирование пункта захоронения) или основанными на соглашениях (например, с местными и региональными органами самоуправления и с учреждениями, ответственными за финансирование пункта захоронения). Сюда входят также требования, применяемые в отношении производителей отходов, на которых возлагается ответственность за упаковку отходов. Эти органы могут различаться в зависимости от режима регулирования в стране и этапа осуществления проекта строительства пункта захоронения.	Общее и концептуальное проектирование; должны выполняться в случае любого предлагаемого проекта.
Требования ко всей системе пункта захоронения	Эти требования подразделяются на функциональные (т.е. действующие на уровне функций системы) и нефункциональные (например, требования безопасности) и предназначены для всей системы пункта захоронения и управление ею. Они могут включать ограничения и характеристики, относящиеся к конкретной площадке, инвентарному списку (реестру) объемов отходов, типам и количеству упаковок отходов, способу транспортировки отходов и конструкционным материалам пункта захоронения и т.п. Также часто в их число входят контролируемые допущения (верифицируемые или неверифицируемые).	

ТАБЛИЦА 1. ИЕРАРХИЯ И ОБЛАСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ ПРОЕКТНЫХ ОСНОВ (продолжение)

Уровень (документ)	Описание	Область применения
Требования к подсистемам	На этом уровне концепция безопасности (см. подраздел 3.1.2) специфицируется как требования, предъявляемые к каждому из основных элементов, инженерно-техническим (и геологическим) барьерам и операциям, выполняемым в пункте захоронения в соответствующих случаях, которые обозначаются как «функции безопасности».	
Спецификационные требования к элементам	Детальные требования, предъявляемые к каждому элементу, барьеру и связанной с ним функции безопасности, которые охватывают проектирование, сооружение и изготовление.	Спецификации элементов зависят от проекта.

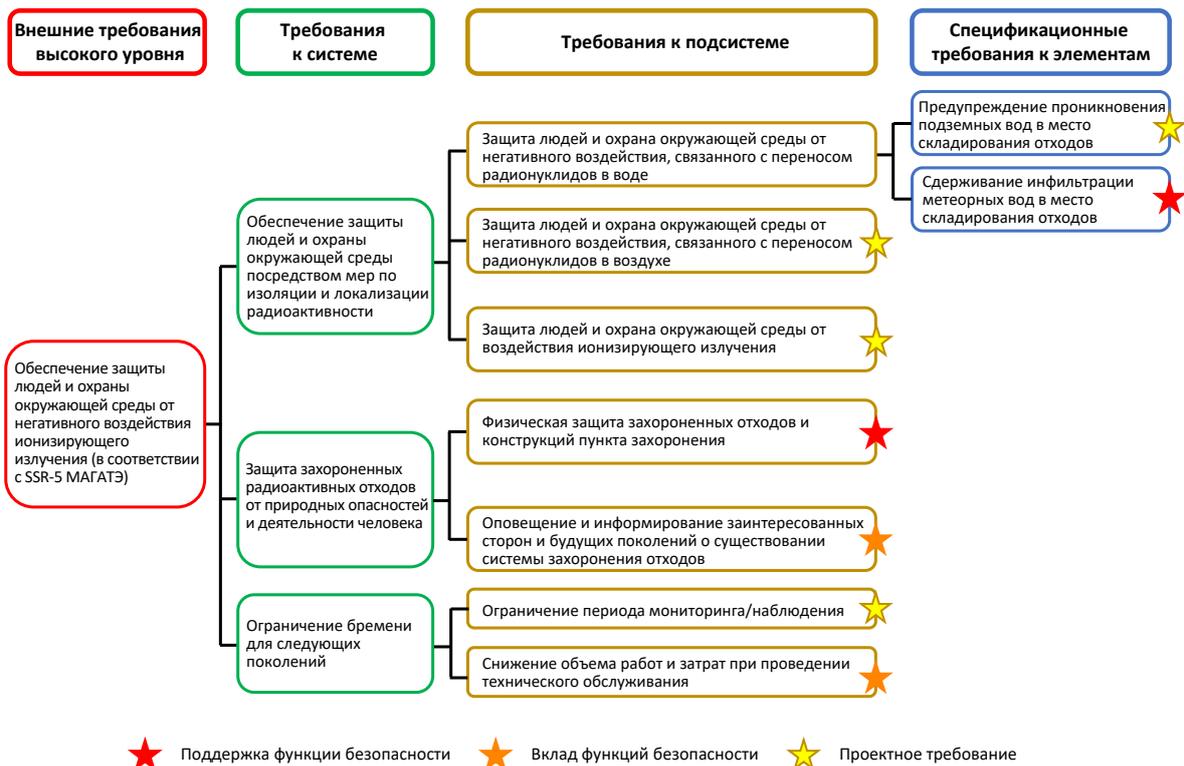


РИС. 6. Пример проектных основ пункта захоронения, применяемых к верхнему финальному перекрытию приповерхностного хранилища (схема адаптирована с разрешения Национального агентства по обращению с радиоактивными отходами («Андра»)).

Подход, базирующийся на требованиях, обеспечивает комплексную интеграцию требований, ограничений и допущений на относительно раннем этапе, что гарантирует интеграцию обязательных средств обеспечения безопасности, физической защиты, охраны окружающей среды и ядерных гарантий в проектные основы.

Управление требованиями обычно осуществляется с помощью программного обеспечения, облегчающего контроль изменений и конфигурации (см. подраздел 3.1.5), а также

прослеживаемости (т.е. аудитуемости) документации. На рис. 6 представлен пример иерархии, показанной на рис. 5, для части проектных основ пункта приповерхностного захоронения.

Функциональное описание пункта захоронения как целостной системы облегчает разработку требований, предъявляемых к системе. Это функциональное описание используется для разработки эксплуатационных требований и требований безопасности. Выполнение или достижение каждого требования может быть проверено с помощью предварительно предусмотренных верификационных мер. Например, достижение результатов может быть связано с программами контроля и мониторинга соблюдения требований, призванными обеспечить уверенность в том, что пункт захоронения строится и эксплуатируется в соответствии с предварительными условиями исходных проектных основ.

Проектные основы постепенно актуализируются, уточняются и дополняются (первоначально в виде функциональной спецификации, которая далее детализируется до уровня технических спецификаций и спецификаций конкретных элементов) по мере поступления информации о данной площадке и об инвентарном списке отходов. Они обеспечивают платформу для оптимизации проектирования после выбора конкретной площадки.

Более подробную информацию о применении процесса, базирующегося на требованиях, можно найти в докладе о результатах осуществления проекта МАГАТЭ по демонстрации эксплуатационной и долгосрочной безопасности пунктов геологического захоронения радиоактивных отходов (GEOSAF Part III) [16].

3.1.2. Многобарьерная концепция безопасности

Как уже говорилось ранее, наилучшей международной практикой является проектирование пунктов захоронения с многобарьерной защитой для предотвращения или контроля высвобождения и последующей миграции радионуклидов из отходов в биосферу с целью обеспечения: а) изоляции отходов от окружающей среды и б) локализации радионуклидов внутри системы захоронения [3, 5, 17]. Концепция безопасности пункта захоронения, как правило, базируется на многобарьерной системе (как показано на рис. 7) и соответствует принципу 8, изложенному в SF-1 [3]. Барьеры действуют по-разному, способствуя обеспечению безопасности в долгосрочной перспективе путем выполнения одной или нескольких из указанных ниже функций:

- физическая локализация (например, внутри контейнера для отходов);
- химическая локализация (например, на поверхности материалов формы отходов и буфера или внутри них);
- инженерно-техническая локализация (например, посредством основных инженерно-технических средств пункта захоронения, таких как облицовка, используемая в созданных траншеях или туннелях, сыпучий или кусковой материал для обратной закладки (засыпки) и высоконадежные системы герметизации);
- геологическая изоляция и локализация (геологическая среда обеспечивает физическую и химическую стабильность инженерно-технических конструкций, малые скорости движения подземных вод и удержание радионуклидов) [3, 5, 18].

Отдельные функции безопасности элементов многобарьерной системы действуют в разных временных диапазонах [5]. Требования к функциональным характеристикам барьеров связаны с этими конкретными функциями безопасности, иногда с количественными показателями, обеспечивающими выполнение функции безопасности. Типичные функции безопасности включают:

- физическую защиту упаковок отходов от воздействия внешних событий;
- контроль прохождения воды через отходы и вокруг них;
- контроль химической среды вокруг отходов;

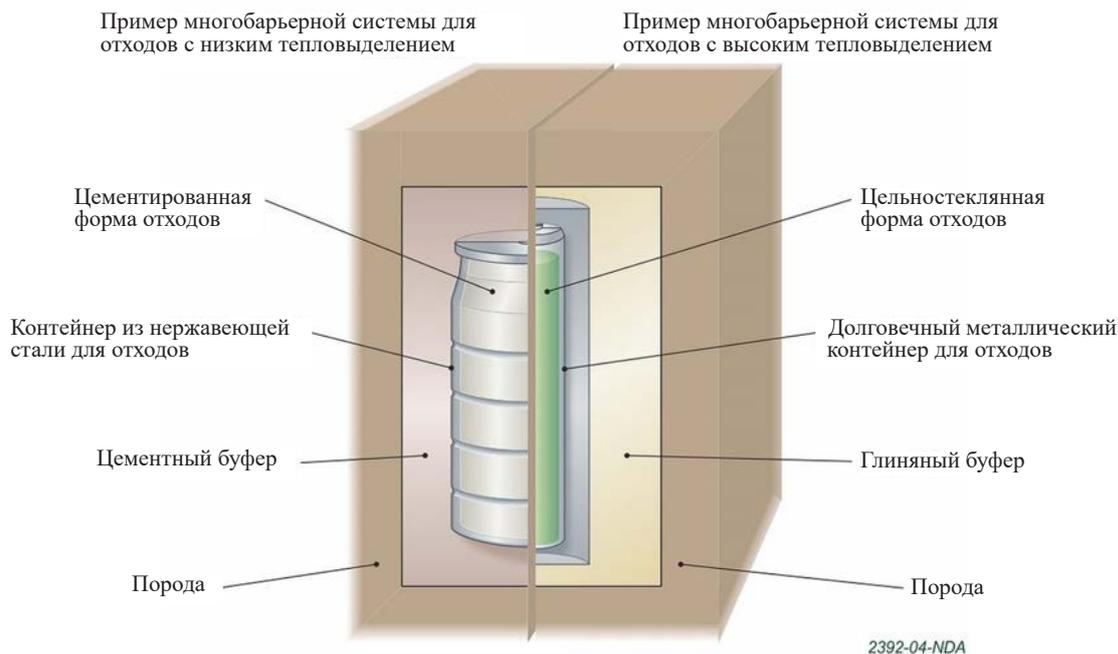


РИС. 7. Схематическое изображение многобарьерной концепции безопасности пункта захоронения (иллюстрация: Управление по выводу из эксплуатации ядерных объектов Соединенного Королевства, УВЭ).

- ограничение высвобождения радионуклидов посредством иммобилизации или физической локализации в контейнерах с отходами;
- замедление или удержание миграции радионуклидов через барьеры или по воздушным или грунтовым путям в биосферу;
- снижение вероятности непреднамеренного проникновения человека в систему захоронения отходов.

Таким образом, каждый элемент пункта захоронения вносит свой вклад в безопасность всей системы захоронения. Этот подход иллюстрируется с помощью блок-схемы на рис. 8, показывающей, как конкретное техническое решение для пункта захоронения — в иллюстрируемом случае герметизация шахтного ствола/рампы — может обеспечить выполнение требований в отношении функций безопасности и функциональных характеристик системы захоронения.

Инженерно-технические барьеры предназначаются для пассивного функционирования без вмешательства человека при их действии в непрерывной последовательности в сочетании с предсказуемыми и поддающимися количественному определению характеристиками на индивидуальном уровне так, чтобы обеспечивалось ограничение выброса радионуклидов в окружающую среду до приемлемо низкого уровня. При проведении оценки функциональных характеристик после закрытия объекта эти допущения используются для моделирования и валидации свойств барьерной локализации. Естественные, археологические и старые промышленные системы также могут быть использованы для получения информации о долгосрочных процессах, физическом и химическом поведении инженерно-технических или геологических барьеров в течение очень длительного периода времени, необходимого для обеспечения безопасности пункта захоронения после его закрытия [19].

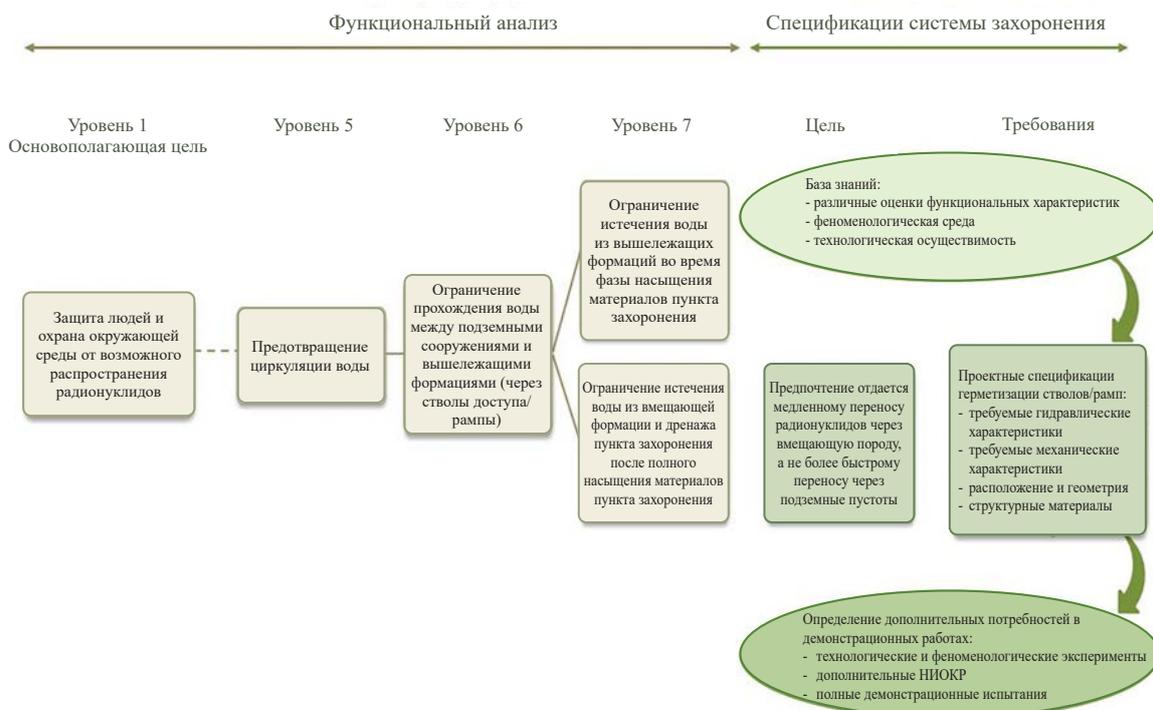


РИС. 8. Схема применения в Промышленном центре геологического захоронения («Сижео») проектных требований, предъявляемых к герметизации шахтного ствола/рампы (иллюстрация: Национальное агентство по обращению с радиоактивными отходами («Андра»)).

3.1.3. Безопасные, надежные, доступные и ремонтпригодные технологические решения

При сооружении пункта захоронения требуется большое количество инженерно-технических конструкций, систем и элементов:

- в процессе строительства — для выемки грунта или породы и транспортировки грунта из зоны строительства, а также для транспортировки материалов инженерно-технических барьеров в пункт захоронения и т.п.;
- в процессе эксплуатации — для транспортировки контейнеров с отходами и их размещения в отведенных для них местах захоронения;
- в процессе закрытия объекта — для обратной закладки (засыпки) или верхнего укрытия зон захоронения и для герметизации путей доступа в подземном пункте захоронения.

Используемая технология должна выдерживать относительно жесткие условия окружающей среды, такие как неблагоприятные климатические условия на поверхности или повышение температуры и влажности в подповерхностном пространстве, возможно, в течение длительных периодов времени. Обеспечение безопасности при строительстве, эксплуатации и закрытии пункта захоронения зависит от надежности и удобства проведения работ по техническому обслуживанию/ремонту и замене применительно к данному технологическому решению. С этим связано использование технологии, которая до применения в пункте захоронения была продемонстрирована как достаточно устойчивая (робустная) с точки зрения выполнения предусматриваемых требований.

Глубокоэшелонированная защита для пункта захоронения обеспечивается благодаря соответствующему сочетанию «высококачественных и высоконадежных конструкций, технологий и материалов», как указано в пункте 3.32 в SF-1 [3]. Понимание функциональных характеристик

пункта захоронения и их поведения с течением времени необходимо для демонстрационного подтверждения безотказности и надежности. Такое демонстрационное подтверждение облегчается в том случае, если проектные решения являются устойчивыми (т.е. они мало чувствительны к возможным событиям и процессам, вызывающим возмущения). До начала строительных работ необходимо получить достаточные доказательства их осуществимости и эффективности [5].

Использование легкодоступных технологий, апробированных при полномасштабной реализации и в условиях, сходных с условиями окружающей среды, характерными для данного пункта захоронения, обеспечивает уверенность в надежности проекта. Это позволяет снизить неопределенность и является основополагающим фактором в разработке надежного обоснования эксплуатационной безопасности, необходимого для получения лицензии на строительство и эксплуатацию. Несвоевременное установление практической нереализуемости или трудноосуществимости технических решений может привести к неэффективному использованию ресурсов, высоким затратам на внесение изменений и к увеличению сроков реализации проекта, а также может отрицательно сказаться на доверии заинтересованных сторон.

Например, в 1980-х и 1990-х годах при разработке концепций глубинного геологического захоронения первого поколения основная задача сводилась к демонстрации возможности обеспечения безопасности объекта после его закрытия на основе использования научных принципов и моделирования при проведении оценки функциональных характеристик. Позднее была разработана обоснованная базовая платформа для технической реализации проектов в условиях ограничений, действующих в отношении конкретных пунктов захоронения. В результате были предложены концепции пунктов захоронения с инженерно-техническими элементами, трудно реализуемыми в полном масштабе в условиях выполнения работ в дистанционном режиме с требуемыми гарантиями качества. На рис. 9 представлены примеры тестирования в подземных условиях различных методов укладки бентонита, иллюстрирующие трудности, которые могут возникнуть при практической реализации концепции. Рис. 9 (а) — пример из опыта проведения работ на испытательном полигоне «Гримзель» в Швейцарии. Рис. 9 (b) — полномасштабный макет тоннеля в Толедо, Испания, демонстрирующий нестабильность бентонитовых блоков в эксперименте FEBEX, когда операция по закладке была прервана из-за возникновения условий повышенной влажности [20]. На рис. 9 (с) показано разрушение опорных блоков в Монт-Терри, Швейцария, в эксперименте LUCOEX [21].

Проект «Инженерные исследования и демонстрация проектов пунктов захоронения» (ESDRED) (2004–2009 годы) [22] является примером дальнейших усилий по демонстрации технической осуществимости работ по строительству, эксплуатации и закрытию пункта глубинного геологического захоронения.

Как следствие, в большинстве существующих программ по созданию пунктов захоронения проектные решения на ранних этапах ориентированы в качестве основополагающего принципа на выбор и использование апробированных технологий, а не на применение новых технологических решений. При включении соответствующей технологии в проектные основы пункта захоронения следует учитывать:

- время и порядок принятия решений по выбору апробированных и доступных технологий с учетом длительных сроков реализации проекта;
- необходимость адаптирования или специальной разработки для данной цели определенных технологий в случае их отсутствия, включая, например, необходимость адаптирования оборудования для перемещения и укладки контейнеров с отходами к конкретным концепциям захоронения, принятым в данной стране;
- меры, направленные на обеспечение невозможности возникновения ситуации, когда представляющаяся практически осуществимой и подходящей технология могла бы привести к ухудшению способности инженерно-технических и естественных барьеров выполнять функции безопасности;



РИС. 9. Примеры, иллюстрирующие осложнения, возникающие при выполнении транспортно-технологических операций с сильно уплотненными бентонитовыми блоками и при их укладке в подземном пространстве.

- меры, направленные на разработку требований в отношении эксплуатационной готовности, надежности и ремонтпригодности, и их включение в систему управления требованиями;
- возможность моделирования функциональных характеристик и эффективности различных вариантов технологий;
- обеспечение сбалансированности бюджета затрат с другими требованиями, например в отношении безопасности и охраны окружающей среды, благодаря чему может быть выбрана относительно недорогая технология из множества вариантов, если будет показано, что выбранная технология является устойчивой, надежной и целесообразной.

3.1.4. Итеративный подход к разработке и оптимизация проекта

Крупномасштабные инженерно-технические проекты, в особенности строительные проекты, требующие больших капитальных затрат, как правило, осуществляются с использованием традиционных процессов, состоящих из заранее определенных этапов. На рис. 4 показана общая последовательность проектирования пункта захоронения (репозитария), включающая следующие этапы:

- общее проектирование;
- концептуальное проектирование — выбор площадки;
- техническое проектирование — лицензирование;
- детальное проектирование — строительство;
- продолжение детального проектирования — расширение пункта захоронения (представлено «Операциями» на рис. 4);
- проектирование — закрытие объекта.

Каждый этап проектирования (см. рис. 4) предполагает проведение итеративных оценок площадки пункта захоронения, выполнение повторного анализа безопасности и внесение итеративных изменений в варианты конструкции пункта захоронения (см. рис. 10 и таблицу 2).

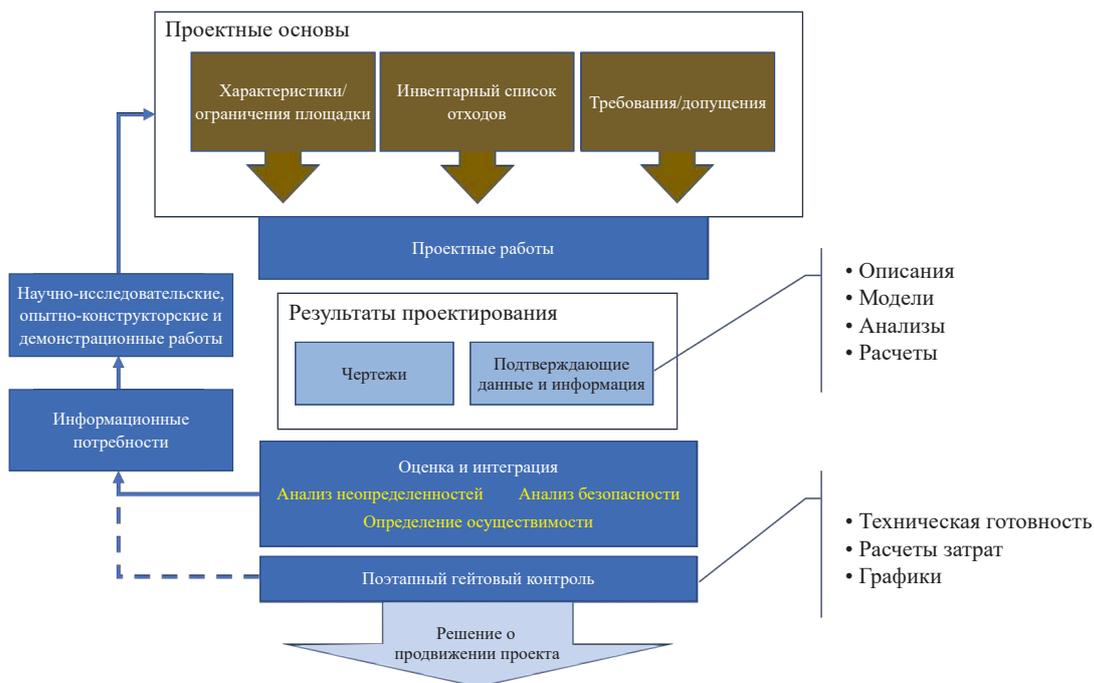


Рис. 10. Итеративный процесс разработки проекта, используемый на каждом этапе проектирования.

Здесь описывается традиционное поэтапное проектирование, поскольку оно обеспечивает снижение управленческого риска, соблюдение сложившейся практики, способствует повышению качества готовых продуктов, позволяет проектной группе развивать и приобретать необходимые компетенции, а также содействует развитию и совершенствованию процессов управления, связанных с проектированием. Вместе с тем следует учитывать, что итеративный метод может быть использован на любой ступени этапа в рамках менее структурированного подхода. Итеративная разработка и оптимизация проекта соответствуют принципу 5, изложенному в SF-1 [3], и определены в SSG-23 [9].

ТАБЛИЦА 2. ОПИСАНИЕ ИТЕРАТИВНЫХ ШАГОВ, ВЫПОЛНЯЕМЫХ В ХОДЕ РАЗРАБОТКИ ПРОЕКТА

Шаг процесса	Описание
Проектные основы	См. подраздел 3.1.1.
Проектные работы	<p>На конкретном этапе проектирования разрабатываются возможные варианты концептуального проекта в соответствии с проектными основами либо принимается решение о предпочтительном варианте проекта, который будет использован в качестве основы для технической спецификации. Разрабатывается проект, отражающий техническую спецификацию, включающую:</p> <ul style="list-style-type: none"> • описание операционного процесса; • чертежи и расчеты; • цифровые результаты проектирования (например, 3-D модели и анимация); • анализ затрат и сроков.

ТАБЛИЦА 2. ОПИСАНИЕ ИТЕРАТИВНЫХ ШАГОВ, ВЫПОЛНЯЕМЫХ В ХОДЕ РАЗРАБОТКИ ПРОЕКТА (продолжение)

Шаг процесса	Описание
Оценка и интеграция	<p>Сюда входят:</p> <ul style="list-style-type: none"> • анализ эксплуатационной безопасности и оценка безопасности после закрытия объекта с сопутствующим анализом неопределенностей; • сравнение результатов с регулируемыми требованиями; • оценка сопряжения между инженерным проектированием, анализом безопасности и экологическими исследованиями; • анализ изменений, касающихся площадки, инвентарного списка отходов, внешних требований.
Поэтапный гейтовый контроль	<p>В конце каждого этапа выполняется выверка результатов в ходе технического совещания, на котором проводится официальная, независимая, междисциплинарная, экспертная оценка проектных основ, результатов проектирования и соответствующего анализа безопасности для поддержки управленческого решения о переходе к следующему этапу (которое, вероятно, будет приниматься с учетом мнений заинтересованных сторон). Могут предусматриваться условия и положения, касающиеся реализации следующей стадии.</p> <p>В ходе рассмотрения этого этапа проводится оценка технической готовности, затрат и графика выполнения работ.</p>
Решение о продвижении проекта	<p>В зависимости от результатов гейтового контроля, проводимого на данном этапе, принимается решение о переходе к следующей стадии реализации (например, решение о выборе площадки для размещения объекта).</p>
Информационные потребности	<p>Определение необходимых дополнительных проектных работ (по усовершенствованию или доработке) и требующейся информации и/или анализа.</p>
Научно-исследовательские, опытно-конструкторские и демонстрационные работы (НИОКДР)	<p>Программа работ, направленных на обеспечение информационных потребностей. Она может включать, например, проведение дальнейших исследований площадки, характеризацию отходов и технологические разработки.</p>

Данный итеративный подход обеспечивает определенную гибкость в плане повышения безопасности и снижения неопределенностей в анализируемых функциональных характеристиках системы. Применение этого подхода позволяет постепенным и контролируемым образом расширять содержание анализа безопасности на каждом этапе проектирования, что является необходимым условием для обеспечения прозрачности. Благодаря периодическим повторным оценкам в проектные основы вводится новая информация (например, полученная в результате осуществления работ по характеризации площадки и других НИОКДР), а также проводится технологическая доработка проекта по мере выполнения проектных работ, что обуславливает пересмотр требований и актуализацию инвентарного списка отходов до начала следующего этапа.

Пошаговый подход к проектированию позволяет создавать новые или обновленные продукты проектирования в дискретных точках применительно ко всем типам проектных работ. Дискретные интервалы или этапы усложняются по мере продвижения проекта к стадии строительства. Агентство по ядерной энергии Организации экономического сотрудничества и развития указало в 2000 году [23], что эти

«шаги облегчают прослеживаемость решений, обеспечивают обратную связь с общественностью и/или ее представителями, содействуют укреплению общественно-политического доверия к безопасности объекта, а также повышению уверенности в компетентности регулирующих органов и исполнителей проектов по захоронению радиоактивных отходов».

Наконец, итеративный подход, применяемый на этапах процесса проектирования, может быть распространен на весь процесс в целом, как предлагается в работе Маккомби [24]. «Адаптивная поэтапность» — это гибкий процесс, характеризующийся этапами проектирования и принятия решений, на которых последовательно вносятся уточнения и которые могут быть более зависимыми от динамично изменяющейся информации, содержащейся в проектных основах, или от мнений заинтересованных сторон.

3.1.5. Сохранение целостности конструкции

Согласно принципу 1, изложенному в SF-1 [3], лицензиат пункта захоронения ядерных отходов несет ответственность за обеспечение безопасности, а также за «разработку процедур и мер поддержания безопасности при любых условиях» (пункт 3.6). Этот принцип напрямую связан с сохранением целостности конструкции в целях обеспечения безопасности спроектированных систем, конструкций и элементов на протяжении всего срока их службы. Будучи лицензиатом и «уполномоченным проектным органом» для пункта захоронения, ООО несет ответственность за сохранение целостности конструкции.

Дополнительная информация, касающаяся концепции уполномоченного проектного органа, и другие руководящие материалы изложены в INSAG-19 [25] «Сохранение целостности конструкции ядерных установок в течение всего срока эксплуатации».

3.1.5.1. Контроль проектирования

Проектные работы, выполняемые с учетом требований безопасности, осуществляются с применением инструментов и процессов, которые в совокупности называются «средствами контроля проектирования». В рамках контроля проектирования требуется, чтобы ООО принимала на себя ответственность за проектирование в качестве уполномоченного проектного органа и будущего лицензиата пункта захоронения [25]. Инструменты и процессы, используемые для контроля проектирования, включают проверку и экспертизу продуктов проектирования, а также осуществление системного управления требованиями (см. подраздел 3.1.1), управления конфигурацией проекта, контроля изменений, управления механизмами сопряжения, управления данными и контроля программного обеспечения.

Управление конфигурацией (например, контроль документации) позволяет контролировать продукты проектирования, допуская внесение в них изменений только в рамках процесса «контроля изменений». Уполномоченный проектный орган, занимающийся разработкой пункта захоронения, осуществляет руководство процессом контроля изменений и несет за него конечную ответственность. Сопряжения возникают между подсистемами или различными объектами, а также между проектными и другими техническими работами, такими как анализ безопасности эксплуатации и безопасности объекта после его закрытия. Точное отражение проектных решений является необходимым элементом исходных данных при проведении анализа безопасности. Для определения и уточнения механизмов сопряжения, как правило, используется подход к составлению проектных основ, базирующихся на требованиях (см. подраздел 3.1.1), часто задолго до начала соответствующих проектных работ.

Для контроля проектирования обычно требуется система управления информацией, обеспечивающая хранение и контроль данных о площадке, инженерно-технических данных, спецификаций и другой информации, например, сводов положений, норм и правил. Современные

продукты проектирования являются преимущественно цифровыми — они разрабатываются и интегрируются с применением компьютерного программного обеспечения. Программное обеспечение, используемое для разработки продуктов проектирования и управления ими, подлежит верификационному контролю (для проверки правильности функционирования) и валидационному контролю (для проверки правильности применения) в соответствии с документально зафиксированными процедурами.

Процессы контроля проектирования обеспечивают сохранение целостности конструкции и общих основ обеспечения безопасности пункта захоронения в течение всего срока эксплуатации, включая любые периоды ведомственного контроля, которые могут длиться от нескольких десятков до сотен лет. Контролируемая информация и соответствующие инструменты необходимы для понимания всей совокупности проектных решений и обеспечения ядерной безопасности в долгосрочной перспективе на каждом этапе жизненного цикла системы захоронения. Долгосрочные программы захоронения отходов носят межпоколенческий характер, и поэтому необходимо уделять повышенное внимание надлежащему управлению проектными основами и продуктами проектирования.

3.1.5.2. Культура безопасности

Следует обеспечивать, чтобы программы по обращению с отходами развивали и поддерживали культуру ядерной безопасности, эквивалентную культуре эксплуатации ядерно-энергетических систем [26]. Культура безопасности базируется на принципах эффективного менеджмента и применима к любому проекту. Проекты, являющиеся объектом пристального внимания заинтересованных сторон, особенно выигрывают в части достижения эффективности и прозрачности в реализации проекта. Развитие культуры безопасности требует вложения ресурсов в управленческие процессы и обучение персонала, и на ее формирование могут уйти годы.

Эффективная команда разработчиков проекта наделяется четко определенными функциями, обязанностями, а также несет ответственность за качество продуктов. Хорошо функционирующая проектная организация пользуется поддержкой руководства, и в ней предусматривается система сообщения о несоответствиях, которую сотрудники могут использовать для информирования руководства о проблемах, касающихся качества или безопасности, не подвергаясь угрозе наказания. Таким образом можно достоверно определить пределы или любое ухудшение эксплуатационных условий (в том числе применительно к проектным работам) и обеспечить ответственность и подотчетность за внесение изменений в систему или за приостановление работ.

Управленческие процессы, необходимые для эффективного управления проектом по захоронению отходов, включают управление проблемами и управление обязательствами. Для отслеживания проблем или обязательств, в отношении которых требуется вмешательство, а также действий, необходимых для достижения соответствующего решения, используется специальная база данных. Длительный период и наличие множества заинтересованных сторон, вовлеченных в процесс обращения с радиоактивными отходами и их захоронения, обуславливают необходимость применения официально утвержденного подхода.

3.1.5.3. Управление знаниями

Необходимая функция, которая заключается в сохранении ключевой документации и данных, а также обоснований важнейших решений для их дальнейшего использования, возможно, на протяжении десятилетий в будущем, называется «управлением знаниями». Управление знаниями также позволяет выявлять и использовать передовые методы и уроки, извлеченные из международного опыта. Такие методы управления включают управление информацией и данными, а также управление ключевыми ресурсами.

3.1.5.4. Управление компетенциями

Другая ключевая функция управления, которая в целом называется «управлением компетенциями», включает обучение, повышение квалификации персонала, оценку эффективности персонала и планирование преемственности персонала для обеспечения долгосрочных потребностей в связи с проектом. В рамках эффективного управления предусматриваются процессы и средства контроля для принятия мер по исправлению ситуации в случае обнаружения недостатка специализированных знаний. Что касается коммерческой стороны дела, то для эффективного управления необходимы соответствующие стратегии в области закупок, особенно в случае высокозатратных работ на стадии реализации проекта. Для выявления элементов или процессов, важных для безопасности, используется проектный анализ, и особый контроль предусматривается применительно к управлению цепочками поставок и работе подрядчиков. Кроме того, методы управления рисками и возможностями часто используются для обоснования управленческих решений, особенно в тех случаях, когда длительность проекта и основные факторы неопределенности (например, условия на площадке, финансирование, лицензирование) могут влиять на эффективность проекта.

3.1.6. Прозрачное и прослеживаемое проектирование

Обеспечение прозрачности и прослеживаемости (аудируемости) в проектировании облегчает процесс разработки и обоснования проекта и решений, принимаемых в рамках конкретной проектной задачи. Ввиду важности вопросов, стоящих перед заинтересованными сторонами, необходимо прилагать согласованные усилия, направленные на то, чтобы сделать проектные решения прозрачными, прослеживаемыми и основанными на достоверной информации. Например, важным компонентом стратегии лицензирования проекта строительства пункта захоронения «Юкка-Маунтин» в Соединенных Штатах Америки стало создание обширной базы данных (получившей название «Сеть поддержки лицензирования»), предназначенной для реализации данного базового принципа. Основная цель заключалась в демонстрации того, что все аспекты и все решения, принимаемые в ходе разработки проекта и при подаче заявки на получение лицензии, являются прослеживаемыми и прозрачными.

Прозрачность помогает развивать и поддерживать взаимопонимание и доверие между всеми заинтересованными сторонами, включая местные общины, регулирующие органы, общественность и государственные учреждения. Коммуникация с заинтересованными сторонами, как показывает практика, имеет решающее значение для общественного признания. Это предполагает проведение хорошо организованных информационно-просветительских и образовательных мероприятий, а также мероприятий по распространению информации. Любая стратегия в области связей с общественностью должна предусматривать обеспечение добросовестности и независимости экспертов, которые представляют проектную организацию и могут быть привлечены для составления отзывов о качестве продуктов проектирования. МАГАТЭ рассматривает вопрос о разработке дополнительных руководящих материалов по коммуникации и вовлечению заинтересованных сторон в решение вопросов, связанных с захоронением радиоактивных отходов.

Для верификации качества продуктов, таких как проектный анализ (расчеты), чертежи и спецификации, могут проводиться аудиты. Они также могут использоваться для верификации обоснованности важнейших программных решений и соблюдения требований, например, связанных с обеспечением качества и эффективным использованием систем управления (менеджмента). Обеспечение прозрачного и прослеживаемого проектирования отвечает принципу 2 Основных принципов использования атомной энергии [4].

3.1.7. Комплексное проектирование с учетом требований ядерных гарантий и физической безопасности

При проектировании пункта захоронения с самого начала необходимо предусматривать меры по применению ядерных гарантий (т.е. меры и оборудование, используемые для верификации непереключения ядерных материалов на военные цели) и по обеспечению физической безопасности (физической защиты, безопасности персонала и безопасности информационных технологий).

Опыт показывает, что соответствующие требования и ограничения в обоих случаях могут быть эффективно интегрированы в проектные основы пункта захоронения (см. подраздел 3.1.1) с целью обеспечения соблюдения международного и национального законодательства, соответствующих норм и надлежащей практики.

Учет технических аспектов гарантий и обеспечения физической безопасности на ранних этапах позволяет выявлять и согласовывать потенциально противоречащие друг другу требования: например, в случаях, когда системы для применения гарантий или барьеры для обеспечения физической безопасности будут создавать препятствия для аварийного реагирования или проведения планового технического обслуживания. Использование пассивных систем, предназначенных для предотвращения ошибок человека, также может затруднять потенциальным злоумышленникам реализацию попыток вмешательства в системы защиты и физической безопасности [27].

3.1.7.1. Ядерные гарантии

Цель ядерных гарантий сводится к обнаружению и предотвращению переключения ядерных материалов (например, плутония, урана и тория) с мирного применения на производство ядерного оружия. Верификация непереключения материалов с ядерной деятельности, осуществляемой в мирных, гражданских целях, на военное использование является инструментом, с помощью которого международное сообщество ограничивает распространение ядерного оружия. Это основополагающий аспект Договора о нераспространении ядерного оружия [28]. Нераспространение является принципом 5, закрепленным в Основных принципах использования ядерной энергии [4]. Средства реализации принципа 5, в частности применительно к проектированию, рассматриваются в документе «Nuclear Power Objectives: Achieving the Nuclear Energy Basic Principles» («Цели ядерной энергетики: реализация основных принципов использования ядерной энергии» [29].

Возможные технологические последствия применения гарантий МАГАТЭ для различных стадий жизненного цикла пункта захоронения, содержащего ОЯТ и другой ядерный материал, подпадающий под гарантии МАГАТЭ, рассматриваются в публикации Серии изданий МАГАТЭ по ядерной энергии, № NW-T-1.21, «Technological Implications of International Safeguards for Geological Disposal of Spent Fuel and Radioactive Waste» («Технологические последствия международных гарантий для геологического захоронения отработавшего топлива и радиоактивных отходов») [30]. Например, требования режима гарантий на этапе выбора площадки для пункта захоронения предусматривают представление в МАГАТЭ заполненного вопросника по информации о конструкции. Вопросник по информации о конструкции включает информацию о характеристиках и эксплуатационных процедурах рассматриваемого пункта захоронения, что облегчает деятельность МАГАТЭ по проверке (верификации).

Деятельность по проверке (верификации) базируется на принципе «непрерывности знаний» о природе, количестве и местонахождении ядерного материала. Для этого государства-члены должны создавать систему учета ядерных материалов, охватывающую всю национальную деятельность, связанную с ядерной областью, включая вывод объектов из эксплуатации, хранение, транспортировку и захоронение радиоактивных отходов.

3.1.7.2. Физическая ядерная безопасность

Меры по обеспечению физической ядерной безопасности преследуют цель предотвращения или обнаружения хищения, саботажа (диверсии), несанкционированного доступа, незаконной передачи или совершения других злоумышленных действий с ядерными материалами и иными радиоактивными веществами. Управление по ядерному регулированию Соединенного Королевства [31] отмечает, что пункт захоронения должен интегрировано обеспечивать «устойчивую защиту от современной среды угроз» во всех аспектах обеспечения физической безопасности, включая собственно физическую безопасность, безопасность персонала, транспортную безопасность, кибербезопасность и информационную безопасность.

3.2. ЭТАПЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ

Принципы, описанные в подразделе 3.1, как правило, применяются в процессе разделенного на этапы жизненного цикла пункта захоронения (репозитория), который представлен в подразделе 3.1.4 и показан на рис. 4. На рис. 4 представлены основные стадии и рубежи, являющиеся характерными для программ создания пункта захоронения. На нем также указаны пять этапов проектирования, о которых говорилось в начале раздела 3 и которые более подробно рассматриваются в данном подразделе:

- общее проектирование (подраздел 3.2.1);
- концептуальное проектирование — выбор площадки (подраздел 3.2.2);
- техническое проектирование — лицензирование строительства (подраздел 3.2.3);
- детальное проектирование — строительство и эксплуатация (подраздел 3.2.4);
- продолжение детального проектирования — эксплуатация и расширение пункта захоронения (подраздел 3.2.5);
- проектирование — закрытие объекта (подраздел 3.2.6).

Показанные на рис. 4 стадии отражают ожидаемую эволюцию целенаправленности программы и не обязательно означают завершение конкретных действий в рамках данной стадии. Рубежи представляют собой результаты таких видов деятельности, как выбор площадки, лицензирование, получение официального разрешения на строительство и эксплуатацию, а также точки принятия решений в рамках основных стадий реализации программы и связанных с ними действий. В эту последовательность проектирования государства-члены при необходимости могут вносить изменения для ее адаптации в соответствии с конкретными условиями, такими как геологические, финансовые и социальные факторы.

Деятельность в рамках каждой стадии может потребовать нескольких итеративных действий (см. подраздел 3.1.4) для получения информации, необходимой для поддержки принятия решения; например, при разработке первоначальной концепции и ее адаптации к потенциальному месту расположения площадки. Некоторые действия в рамках одной стадии могут частично совпадать с действиями, выполняемыми в ходе реализации другой стадии. Например, в случае модульной системы захоронения работы по сооружению могут выполняться в одном районе, а работы по размещению — в другом месте. Аналогичным образом, работы по закрытию объекта в одном районе могут совпадать со строительными и эксплуатационными работами на другом объекте. Некоторые виды работ будут выполняться с разной степенью интенсивности на протяжении всего жизненного цикла пункта захоронения. Это охватывает мониторинг и НИОКДР, которые могут продолжаться и после закрытия пункта захоронения.

В следующих ниже подразделах приводится конкретная детальная информация о работах, выполняемых на каждом этапе проектирования, с пояснениями в отношении исходных данных и

результатов, характерных для процесса реализации проекта строительства пункта захоронения с учетом международного опыта.

3.2.1. Общее проектирование

Первый этап проектирования осуществляется на стадии начала (рис. 4) осуществления программы, когда выполнено общее проектирование в рамках процесса выбора площадки для пункта захоронения. На этом этапе проекты, как правило, носят концептуальный характер, поскольку известна лишь общая характеристика потенциальных вариантов площадок размещения пункта захоронения. На рис. 11 показан поток информации на входе и выходе процесса общего проектирования. Концепции общего проектирования в целом соответствуют требованиям, допущениям и ограничениям, указанным в первоначальной функциональной спецификации (см. таблицу 1). Выполняется работа по составлению инвентарных списков (реестров) и свойств отходов, а также по поиску потенциальных решений по их захоронению. Они формируют основу первоначальных исследований по общему проектированию, например, в рамках целого ряда концепций и вариантов захоронения отходов различных категорий. Основной задачей является разработка безопасной и технологически осуществимой системы в рамках существующих ограничений, в частности требований, уже установленных регулируемыми органами. Обычно на этом раннем этапе также разрабатывается дорожная карта НИОКР.

Работы по общему проектированию позволяют разрабатывать соответствующее общее обоснование безопасности для рассматриваемых концепций (т.е. как исследуемые концепции будут обеспечивать безопасное захоронение отходов, включенных в инвентарный список) и служат отправной точкой для планирования программы и оценки сроков, затрат и рисков.



РИС. 11. Общее проектирование: цели, исходные данные, ограничения, требования и результаты.

3.2.2. Концептуальное проектирование — выбор площадки

Процесс выбора площадки охватывает как технические, так и социальные вопросы. К техническим вопросам относится рассмотрение геологических и экологических условий, связанных с потенциальными площадками, и анализ взаимодействия этих условий с потенциальными вариантами проекта, оказывающих непосредственное влияние на концепцию захоронения и, следовательно, на конструкцию элементов. В число социальных вопросов входит широкий круг учитываемых интересов и проблем заинтересованных сторон, и они в конечном итоге имеют решающее значение для принятия пункта захоронения общественностью. При проектировании необходимо должным образом учитывать мнения заинтересованных сторон. Как показывает международный опыт, для успешного выбора площадки необходим баланс между этими двумя составляющими.

Общепринятый подход к выбору площадки может включать первоначальную скрининговую оценку площадок, за которой следует более тщательная характеристика одной или нескольких площадок-кандидатов. Скрининговая оценка площадок может включать анализ имеющейся геологической, географической и экологической информации, а также социально-экономических факторов и первоначально может строиться на критериях исключения из сферы действия регулирующего контроля. По мере проведения скрининговой оценки потенциальные площадки могут подвергаться более детальному исследованию и оценке на предмет определения благоприятных условий для пункта захоронения. В конечном итоге цель скрининговой оценки заключается в определении предпочтительной площадки, отвечающей ряду требований, что дает основания для проведения углубленной характеристики площадки. Характеристика площадки подразумевает проведение научно-технических исследований, направленных на выработку углубленного понимания геологических и физических характеристик площадки, а также на определение путей эффективного интегрирования системы захоронения.



РИС. 12. Концептуальное проектирование — выбор площадки: цели, исходные данные, ограничения, требования и результаты.

На протяжении всего процесса выбора площадки ООО рассматривает и разрабатывает концепции проектирования с учетом инвентарного списка отходов и имеющихся вариантов размещения площадки, подкрепляя их предварительным обоснованием безопасности для концепций проектирования, которые могут быть использованы для данных площадок (см. рис. 12). Также могут быть изучены существующие решения по захоронению аналогичных отходов в других странах; обобщение материалов по таким решениям является целью настоящей публикации. В случаях, когда варианты размещения площадки характеризуются схожими условиями, для всех вариантов может быть использован единый концептуальный проект. Этап концептуального проектирования включает предварительное рассмотрение базовой компоновки, обеспечивающей размещение отходов, включенных в инвентарный список (реестр), на рассматриваемых площадках.

ООО должна провести сравнительный анализ сочетаний концепций, конструкций и вариантов пункта захоронения с целью принятия заключения о том, какое решение является оптимальным с точки зрения соблюдения программных требований более высокого уровня. Даже при наличии только одного варианта для размещения площадки возможны различные решения по созданию пункта захоронения. Альтернативные решения могут в различной степени соответствовать разным требованиям, однако любой рассматриваемый вариант должен адекватно отвечать всем критически важным требованиям (например, регулирующим или юридическим требованиям). Процесс рассмотрения и анализа степени удовлетворения других требований часто называют «изучением вариантов», и ООО может применять при этом гибкий подход, привлекая при необходимости к этой работе другие заинтересованные стороны. Существует ряд формальных и менее формальных методов анализа и ранжирования вариантов с целью принятия прозрачного решения в отношении предпочтительного сочетания концептуального проекта и площадки. К ним относятся многоатрибутный анализ и методы сравнения преимуществ и ограничений.

На стадии выбора площадки выполняется работа по подготовке научной документации, такой как отчеты о геотехнических исследованиях и предварительная оценка воздействия на окружающую среду, а также, как правило, предварительный отчет по обоснованию безопасности. Эта документация обеспечивает основу для выбора предпочтительной площадки (и соответствующей предпочтительной концепции пункта захоронения), что, как правило, требует одобрения со стороны регулирующих органов и/или государственных органов. На этом этапе осуществляется детальная координация с местными и региональными заинтересованными сторонами, и более точно определяются планируемые сроки и уровень качества. Программа проектирования должна предусматривать процесс и график консультаций и открытого обсуждения со всеми группами заинтересованных сторон.

3.2.3. Техническое проектирование — лицензирование строительства

Техническое проектирование применительно к первоначальному лицензированию строительства на выбранной площадке (см. рис. 13) вытекает из концептуального проектирования. На этом этапе на основе конкретных характеристик отобранной площадки разрабатывается выбранный проект в степени, достаточной для подачи заявки на лицензирование строительства; т.е. проект должен быть достаточно детализирован, для того чтобы можно было в полной мере продемонстрировать, что система может быть построена на данной площадке и будет соответствовать всем лицензионным требованиям, установленным регулирующими органами.

На этой стадии разрабатываются модели и выполняются анализы, а также составляются чертежи и технические отчеты, при этом применяются протоколы контроля проектирования и менеджмента качества. Подтверждаются технические основы. Определяются сроки, графики, необходимые ресурсы, а также организации внешнего взаимодействия. Техническое проектирование представляет собой дальнейшее развитие концептуального проектирования и включает использование дополнительной информации о конкретной площадке, полученной в ходе ее характеристики. Результаты технического проектирования также используются при проведении



РИС. 13. Техническое проектирование для первоначального лицензирования строительства: цели, исходные данные, ограничения, требования и результаты.

консультаций с ключевыми заинтересованными сторонами перед переходом к детальному или окончательному проектированию.

На этом этапе проектирования определяются меры, принятие которых необходимо для выполнения требований по закрытию объекта. Обеспечивается получение данных для проведения оценки безопасности и осуществляется взаимодействие с регулирующими органами. Может потребоваться описание активных и пассивных мер ведомственного контроля. При проектировании также могут быть подготовлены предварительные предложения по будущему расширению площадки (как поверхностной, так и подповерхностной) с целью возможного сооружения новых конструкций и создания мощностей для захоронения отходов. Разрабатываются меры по мониторингу, необходимому для подтверждения функциональных характеристик, и определяются методы оценки будущих данных в сравнении с действующими техническими основами. При завершении этой стадии может быть подготовлен промежуточный отчет по обоснованию безопасности.

3.2.4. Детальное проектирование — строительство и эксплуатация

Детальное проектирование применительно к строительству и эксплуатации (рис. 14) включает подготовку полных чертежей и отчетов, содержащих результаты окончательного технического проектирования с учетом детальной информации о требованиях, относящихся к площадке, окружающей среде, а также к пропускной способности объекта и вместимости упаковок отходов. Рабочие чертежи, спецификации оборудования и детальные инструкции должны соответствовать требованиям по закупке оборудования, вводу объекта в эксплуатацию и строительству. Обеспечивается эксплуатационная готовность систем информационной коммуникации, системной интеграции, систем составления рабочих графиков и управления.

Основной целью этапа детального проектирования является подготовка к стадиям строительства и эксплуатации, а также получение информации для оценки безопасности, проводимой для целей лицензирования. Обоснование безопасности и детальное проектирование проводятся для подтверждения возможности безопасной и эффективной эксплуатации и закрытия пункта захоронения. Успешное взаимодействие с регулирующим органом является базовым



РИС. 14. Детальное проектирование — строительство и эксплуатация: цели, исходные данные, ограничения, требования и результаты.

условием для начала строительства и последующей эксплуатации объекта. Регулирующие органы могут устанавливать условия сертификации.

На этом этапе составляется детальная смета затрат на строительство, эксплуатацию и закрытие объекта. Определяются программы контроля за состоянием окружающей среды и радиологического мониторинга, которые будут осуществляться во время эксплуатации и после закрытия пункта захоронения, и заинтересованные стороны информируются о требованиях, действующих при финальном закрытии объекта. Для облегчения подачи заявок на участие в торгах, в особенности в том, что касается управления изменениями в проекте и составления документации «как построено», выполняется окончательная разработка конкретных требований к информации, касающейся строительных работ и планируемых механизмов сопряжения со строительством и эксплуатацией и графиками проведения работ.

По завершении строительства достаточной инфраструктуры и сооружения первоначальных зон захоронения в пункте захоронения, а также после проведения инспекций, подтверждающих выполнение требований регулирующих органов, может быть выдана лицензия на эксплуатацию. Строительная документация для обеспечения этого процесса делится на две группы. Первая группа подтверждает, что технические требования, включенные в систему управления требованиями, и проектные основы были соблюдены при окончательном проектировании построенной системы. Ко второй группе относятся чертежи фактически построенного объекта (чертежи «как фактически построено»), сертификаты на материалы, оборудование, декларации о соответствии, документация по внесению изменений, протоколы, документация по отступлениям от сертифицированной лицензии и детального проекта. При завершении этой стадии может быть подготовлен окончательный отчет об обосновании безопасности, выдана лицензия на строительство, а также могут быть заключены контракты на выполнение работ.

3.2.5. Продолжение детального проектирования — эксплуатация и расширение пункта захоронения

Стадия захоронения (см. рис. 4) включает строительство, эксплуатацию и закрытие объекта. Эта стадия начинается с получения разрешения на строительство и, как правило, характеризуется максимальным объемом работ и с учетом ее продолжительности связана с наиболее значительными совокупными затратами на захоронение. В ходе строительства может быть получена дополнительная информация о геологической среде, особенно в случае пунктов глубинного геологического захоронения. Эти дополнительные данные учитываются при проектировании и включаются в обоснование безопасности в целях смягчения потенциального негативного воздействия на функциональные характеристики. В ходе размещения отходов для захоронения участки пункта захоронения заполняются и соответственно частично закрываются. По мере продвижения работ и использования новых зон захоронения в пункте захоронения регулирующие органы требуют подтверждения соблюдения установленных ими требований.

В зависимости от объема отходов и темпов их размещения в пункте захоронения эффективным способом управления захоронением может быть поэтапный модульный подход. Он позволяет корректировать проекты применительно к последующим стадиям захоронения с учетом непрерывного накопления знаний и совершенствования технологий. Такой подход может обеспечить получение более точных данных об условиях на этапе закрытия объекта, что важно с точки зрения обеспечения долгосрочной безопасности, и в то же время позволяет повысить эффективность контроля капитальных инвестиций и текущих расходов.

Как отмечается в подразделе 3.2.4, для начала операций по захоронению после того, как в ходе проведения работ по вводу в эксплуатацию была подтверждена эксплуатационная готовность, часто требуется отдельное официальное разрешение. В зависимости от действующей системы регулирования может требоваться получение лицензии на эксплуатацию. Даже после начала эксплуатации процесс проектирования, как правило, продолжается по мере выявления и решения задач оптимизации. В связи с тем, что срок эксплуатации многих пунктов захоронения исчисляется десятилетиями, регулирующие органы скорее всего будут требовать проведения периодической актуализации обоснования безопасности, возможно каждые пять или десять лет, с целью учета новой информации, полученной на основе опыта эксплуатации, общих технических достижений и изменений в процедурах захоронения или конструкции инженерно-технических систем. По истечении этого срока ООО подает заявку на получение лицензии на закрытие пункта захоронения, к которой прилагается доклад по безопасности закрытия объекта.

3.2.6. Проектирование — закрытие объекта

Отдельные участки пункта захоронения могут закрываться и герметизироваться в течение срока его эксплуатации по мере перехода к использованию новых зон захоронения. Финальное закрытие объекта производится после размещения всего объема отходов. До начала размещения отходов подтверждаются первичные проектные основы, обеспечивающие безопасное закрытие объекта, по возможности с проведением полномасштабных испытаний. Доработка и испытания применительно к окончательному проектированию закрытия пункта захоронения (рис. 15) могут продолжаться на протяжении всей стадии захоронения, поскольку в будущем для ее реализации могут потребоваться многие десятилетия. Стадия захоронения считается завершившейся после утверждения соответствующими органами доклада по безопасности закрытия объекта, в котором подтверждается, что поведение пункта захоронения в долгосрочной перспективе после закрытия будет и далее соответствовать регулирующим требованиям. Наряду с этим предусматриваются согласованные меры на период после закрытия объекта, включающие ведомственный контроль и мониторинг, а также распределение долгосрочных обязанностей в отношении площадки вплоть до окончания срока действия ведомственного контроля и на период после него.



РИС. 15. Окончательное проектирование закрытия пункта захоронения: цели, исходные данные, ограничения, требования и результаты.

4. ПРИМЕРЫ ДЕЙСТВУЮЩИХ ИЛИ УСОВЕРШЕНСТВОВАННЫХ ПРОЕКТОВ ПУНКТОВ ЗАХОРОНЕНИЯ

В данном разделе приводится ряд примеров проектов пунктов захоронения, которые уже лицензированы и эксплуатируются либо находятся на продвинутой стадии разработки и готовы к лицензированию эксплуатации. Примеры охватывают все основные типы концепций проектирования пунктов захоронения, представленных на рис. 2.

4.1. ЗЕМЛЯНЫЕ ТРАНШЕИ

За последние несколько десятилетий накоплен значительный международный опыт в проектировании, строительстве и эксплуатации систем захоронения радиоактивных отходов в земляных траншеях. По многим параметрам эти системы похожи на обычные городские или промышленные объекты по захоронению отходов. Следует отметить, что, хотя эти сооружения и называются «земляными траншеями», они также могут быть построены на поверхности в виде курганной конструкции. Траншейные и курганные системы считаются целесообразным решением для захоронения отходов в условиях ограниченных требований к изоляции, как правило, на срок в несколько десятилетий. Вместе с тем при дополнительной доработке проекта срок обеспечения изоляции может быть увеличен. Такие сооружения лучше всего подходят для захоронения ОНАО, а при благоприятных характеристиках площадки и при использовании адекватных систем облицовки и верхнего укрытия они могут быть пригодны и для захоронения НАО. Примеры простых траншейных или курганных систем захоронения показаны на рис. 16.



РИС. 16. Захоронение ОНАО: захоронение траншейного типа в пункте захоронения «Эль-Кабриль», Испания (фото: «Энреса») (слева) и курганное захоронение на АЭС «Оскарсхамн», Швеция (фото: «Svensk Kärnbränslehantering») (справа).

4.1.1. Общие вопросы

Основным фактором, обуславливающим пригодность пунктов захоронения этого простого типа для захоронения данных отходов, является ограниченная радиологическая опасность, которую они представляют. Безопасность обеспечивается благодаря благоприятным характеристикам площадки и за счет использования инженерно-технических барьеров, надлежащего управления и эксплуатации, а также осуществления ведомственного контроля. При выборе площадки предпочтение может быть отдано площадкам с характеристиками, обеспечивающими существенное ограничение проникновения воды в место размещения отходов. В идеальном случае характеристики площадки обеспечивают ограничение потенциальных выбросов радионуклидов до тех пор, пока в отходах не произойдет распад радиоактивности до безопасного уровня. Пункты захоронения траншейного и курганного типа хорошо подходят для условий засушливого климата, особенно если эти пункты располагаются на площадках с глубоким залеганием грунтовых вод.

Если условия площадки в целом не обеспечивают достаточной изоляции (например, в случае площадок, расположенных в более влажном климате, в районах с неглубоким залеганием подземных вод или в районах, подверженных воздействию событий, способных привести к значительным радиоактивным выбросам), в проекте пункта захоронения могут быть предусмотрены дополнительные инженерно-технические меры, позволяющие улучшить функциональные характеристики площадки. В районах с неглубоким залеганием подземных вод для стен и основания траншей могут быть использованы такие барьеры, как полиэтиленовая пленка высокой плотности, глина, бентонит или другие подходящие материалы. Применение систем облицовки позволяет ограничить выход вод из пункта захоронения и, соответственно, препятствовать выбросам радионуклидов в окружающую среду. В более влажном климате и на площадках, подверженных разрушению в результате воздействия редких явлений (например, наводнений с тысячелетним циклом), могут требоваться дополнительные защитные меры для обеспечения сохранения функций локализации и изоляции отходов.

Во время укладки отходов может быть предусмотрена дополнительная защита от воздействия осадков и других неблагоприятных условий, чтобы в еще большей степени минимизировать попадание воды в систему. Надлежащую защиту могут обеспечить временные средства укрытия, включая мобильные крыши или съемные конструкции, установленные над площадкой, на которой размещаются отходы. В засушливых районах применение таких мер может не требоваться, но актуальными становятся меры борьбы с пылью.

По завершении операций по захоронению отходов производится укрытие стабильными долговечными средствами (средствами верхнего укрытия), обеспечивающими достаточную непроницаемость (герметичность) для защиты отходов. Финальное покрытие предназначается для предотвращения неблагоприятных климатических воздействий за счет уменьшения инфильтрации воды и ограничения влияния температурных колебаний. Для дополнительной изоляции и локализации могут проектироваться более сложные системы облицовки или верхнего укрытия. Например, при захоронении НАО или в случае строительства пунктов захоронения в районах с менее благоприятными климатическими условиями могут разрабатываться многослойные инженерные системы верхнего укрытия, обеспечивающие отвод атмосферных осадков и предотвращающие их инфильтрацию в объем захороненных отходов. Системы мониторинга могут обнаруживать повреждения в изоляции во время эксплуатационного и так называемого активного контроля (надзора), благодаря чему при необходимости принимаются восстановительные или корректирующие меры. В частности, для задержания потенциально загрязненной воды до ее попадания в окружающую среду используются отстойники в сочетании с шахтными колодцами или другими дренажными системами для сбора воды.

Инженерно-технические опорные системы для таких сооружений обычно не требуются, поскольку отходы сами по себе являются структурно прочными. Требования к упаковке ОНАО являются ограниченными; захоронение отходов может производиться в сыпучей/кусовой форме или в простых контейнерах для отходов, которые используются для транспортировки. Как правило, в случае НАО требуются более сложные контейнеры для отходов, которые также частично выполняют функцию безопасности в пункте захоронения. Пустоты в пункте захоронения заполняются допущенными к применению материалами обратной закладки (засыпки). Захоронение ОНАО и НАО, как правило, можно проводить с использованием обычного транспортно-технологического оборудования, предназначенного для работы с упаковками и контейнерами без применения радиационной защиты. Доставка отходов может осуществляться непосредственно в траншею или на курганный площадку с помощью грузовика, вилочного погрузчика или других стандартных транспортировочных средств. Во избежание обвалов откосов, которые могут привести к аварийным ситуациям, необходимо уделять особое внимание устойчивости границ и боковых стенок траншеи.

После финального закрытия таких систем захоронения необходим период активного надзора и ведомственного контроля. В период ведомственного контроля при необходимости могут проводиться ремонтные работы с целью обеспечения изоляции отходов. Продолжительность ведомственного контроля зависит от радионуклидного состава отходов, а также от условий площадки. Сроки могут варьироваться от нескольких десятилетий до более чем ста лет в случае ОНАО или до нескольких сотен лет применительно к НАО (часто устанавливается срок в 300 лет).

В международной практике применяются два основных подхода к использованию объектов такого типа: отходы размещаются в одном или нескольких централизованных пунктах захоронения либо в децентрализованных пунктах захоронения, предназначенных для конкретных отходов. Например, французский пункт захоронения ОНАО — Промышленный центр сбора, сортировки и захоронения отходов («CIREС»), расположенный в департаменте Об, является централизованным пунктом захоронения, который обеспечивает удовлетворение всех национальных потребностей в захоронении ОНАО. В Швеции, напротив, используются децентрализованные объекты, расположенные рядом с каждой атомной электростанцией.

4.1.2. Концепция захоронения

На рис. 17 показан поперечный разрез типичного пункта захоронения траншейного типа, а именно траншея для захоронения ОНАО, построенная в центре «CIREС» во Франции; более детальное описание этого сооружения приводится в данном подразделе 4.1.2. Рис. 17 иллюстрирует некоторые элементы этого типа пунктов захоронения и не может служить примером конкретного предпочтительного проекта.

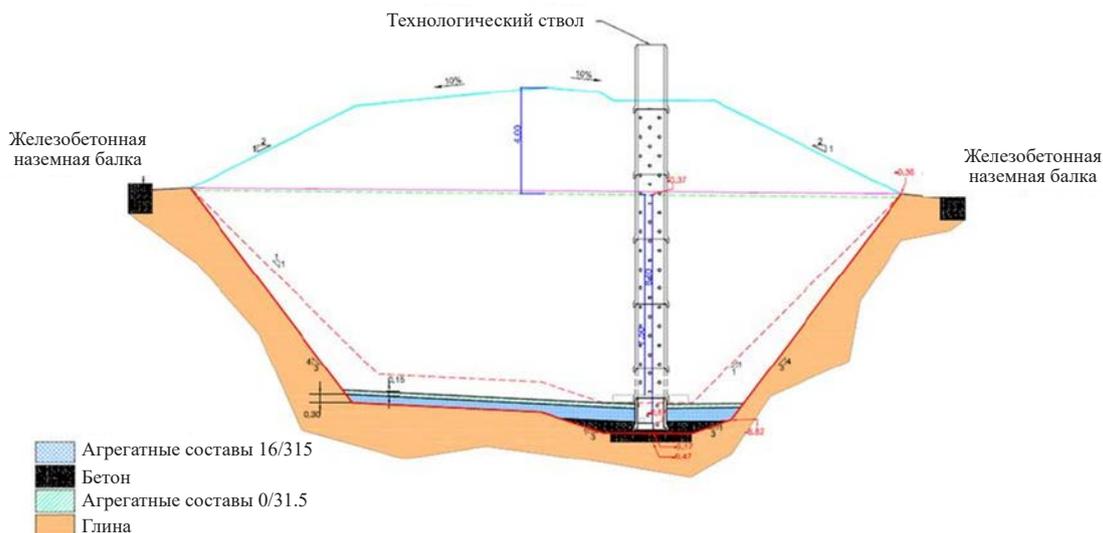


РИС. 17. Поперечный разрез типичной траншейной конструкции для захоронения ОНАО (фото: Национальное агентство по обращению с радиоактивными отходами («Андрa»)).

Траншейные конструкции на площадке в Морвилье размещены в мощном слое аллювиальных отложений с низкой проницаемостью, состоящем преимущественно из глины. Боковые стенки и основание траншей покрыты непроницаемой геомембраной в качестве дополнительного инженерно-технического барьера с целью предотвращения просачивания воды из траншеи. Поверх мембраны можно уложить геотекстиль для защиты от повреждений при размещении отходов и обратной засыпке. Современные технологии не позволяют гарантировать функциональные характеристики геомембран в течение более чем нескольких десятилетий или максимум ста лет. Поэтому, если к облицовке предъявляются требования по обеспечению более долгосрочных функций безопасности, в целях повышения функциональной эффективности можно рассмотреть применение альтернативных барьерных систем, таких как бентонитовые или другие глинистые слои.

Траншейная конструкция проектируется и строится с общим откосом, обеспечивающим дренаж в одну точку сбора, т.е. в отстойник. На дно траншеи укладывается слой водопроницаемого заполнителя, обеспечивающий дренаж воды в отстойник. Материал заполнителя специально подбирается таким образом, чтобы он минимизировал закупорку пор, тем самым сохраняя проницаемость дренажного слоя. Доступ к отстойнику обеспечивается через технологический ствол. Отстойник вмонтирован в бетонное основание, обеспечивающее достаточную устойчивость и опору для ствола доступа. Вода в отстойнике не появляется при надлежащем функционировании системы захоронения. Вместе с тем при обнаружении воды проводится отбор проб и их анализ на наличие радионуклидов. В зависимости от результатов анализа могут потребоваться корректирующие меры.

Траншея во время проведения работ по размещению отходов защищается от осадков посредством временной крыши. Основанием для опоры конструкции служат бетонные балки. После укладки всех отходов производится финальное покрытие водонепроницаемым слоем глины или другого низкопроницаемого глинистого материала с целью ограничения инфильтрации воды. Для ограничения укоренения растений или защиты от повреждения землеройными грызунами, например, может потребоваться применение более сложных систем верхнего укрытия с чередованием дренажных и низкопроницаемых слоев, а также дополнительных защитных слоев. Долговечный стабилизирующий слой, которым может служить растительный покров, представляет собой финальное средство укрытия.

4.1.3. Типичные примеры

Типичными примерами пунктов захоронения в виде земляных траншейных конструкций являются пункт захоронения ОНАО в Морвилье (Франция) и пункт захоронения НАО в Ваалпутсе (Южная Африка). Более подробное описание этих примеров приводится в следующих ниже подразделах.

4.1.3.1. Центр «CIREС» для захоронения ОНАО, Морвилье (Франция)

Национальное агентство по обращению с радиоактивными отходами Франции (Agence nationale pour la gestion des déchets radioactifs («Андра»)) осуществляет эксплуатацию пунктов захоронения «CIREС» в департаменте Об (Франция) недалеко от коммуны Морвилье. Пункт захоронения «CIREС» начал принимать ОНАО в 2003 году и имеет проектную вместимость 650 000 м³. Он размещается на территории площадью 45 га, из которых 28,5 га предназначены исключительно для целей захоронения. Средний годовой объем отходов, принимаемых на захоронение, составляет 24 000 м³. Отходы поступают с французских ядерных установок, находящихся в эксплуатации или в процессе вывода из эксплуатации.

Около 30% отходов, поступающих в центр «CIREС», проходят предварительную обработку перед захоронением. Твердые формы, такие как отходы низкой плотности и металлолом, компактируются с целью сокращения общего объема. Жидкие отходы в виде радиоактивно загрязненных вод и шлама обрабатываются на установке для отверждения и стабилизации.

Временное тентовое укрытие «Premorail» представляет собой модульную конструкцию, состоящую из металлического каркаса и тентового материала тарпаулин (рис. 18), которая монтируется над траншеей и обеспечивает защиту от неблагоприятных погодных условий во время укладки отходов. Тентовые укрытия рассчитаны на повторное использование и могут быть демонтированы после укладки отходов перед финальным закрытием траншеи.



РИС. 18. Система тентового укрытия «Premorail» над заполненной траншеей в центре «CIREС» (фото: «Андра»).



Рис. 19. Поперечный разрез ячеек для захоронения траншейного типа в центре «CIRES» (иллюстрация: «Андра»).

Вмещающая формация пункта захоронения «CIRES» представляет собой однородную глину, толщина пласта которой варьируется от 15 до 25 м. На рис. 19 показан поперечный разрез ячеек для захоронения траншейного типа, используемых в центре «CIRES». Концепция безопасности пункта захоронения — это многобарьерная конструкция, сочетающая естественные и инженерно-технические барьерные системы. Для изоляции и локализации отходов используется несколько барьеров:

- по дну и боковым стенкам траншеи уложена геомембрана из полиэтилена высокой плотности толщиной 2 мм, образующая сплошной водонепроницаемый барьер, блокирующий миграцию радионуклидов на срок в несколько десятилетий. Такая же мембрана используется для укрытия размещенных отходов после заполнения траншеи. Мембраны соединяются друг с другом термосвариванием, что обеспечивает полную инкапсуляцию отходов. После завершения работ по инкапсуляции временное тентовое укрытие перемещается и устанавливается над следующей траншеей;
- локализирующая оболочка формируется из природной глины, окружающей выемку, а поверх заполненных траншей укладывается слой уплотненной глины толщиной не менее 1 м, которая представляет собой ранее экскавированный грунт. Глиняное верхнее укрытие уплотняется с целью достижения уровня проницаемости, аналогичного проницаемости глины в данных естественных условиях;
- глиняная обратная закладка (засыпка) толщиной не менее 2,5 м защищает герметизированные траншеи от возможных внешних повреждений в результате атмосферных воздействий, жизнедеятельности землеройных животных или прорастания корней растений, а также от эрозии. В качестве всех материалов обратной закладки (засыпки) служит грунт, образовавшийся в результате выполнения экскавационных работ на площадке;
- в завершение над закрытым объектом создается растительный покров толщиной 30 см, который служит стабилизирующим слоем и минимизирует потенциальное негативное воздействие эрозии.

Мониторинг качества воздуха и подземных вод, включая мониторинг возможных выбросов радионуклидов, осуществляется в течение всего срока эксплуатации центра «CIREС». После планируемого 30-летнего периода эксплуатации для центра CIREС предусматривается следующий 30-летний этап мониторинга после закрытия объекта, по окончании которого будет проведена оценка его дальнейшего статуса.

4.1.3.2. Пункт захоронения «Ваалпутс», Южная Африка

«Ваалпутс» — это единственный лицензированный пункт захоронения в Южной Африке и на всем африканском континенте, предназначенный для захоронения НАО. Захоронение НАО, согласно классификационной схеме МАГАТЭ, описанной в подразделе 2.3.1, осуществляется в пункте приповерхностного захоронения, расположенном в провинции Северный Кейп. Территория объекта «Ваалпутс» занимает площадь около 100 км². В настоящее время операции по захоронению отходов осуществляются на участке площадью около 1 км², находящемся в западной части площадки. К настоящему времени использовано только 11% площади, отведенной под захоронение. Согласно проекту пункта захоронения, эта территория рассчитана для захоронения 142 390 м³ отходов. Таким образом, общая вместимость пункта захоронения «Ваалпутс» на общей территории площадью 10 км² равна 1 423 900 м³. Площадка показана на рис. 20.

Пункт захоронения «Ваалпутс» находится в собственности и под управлением Национального института по захоронению радиоактивных отходов и используется в основном для захоронения НАО, образующихся на АЭС «Куберг» и в Южно-Африканской ядерно-энергетической корпорации. Отходы АЭС «Куберг» в основном включают компактируемые и некомпактируемые отходы, такие как неиспользуемые элементы оборудования, фильтры, отработанные ионообменные смолы, концентрат испарителя и радиоактивно загрязненные перчатки, пластмассовые материалы и комбинезоны. Отходы Южно-Африканской ядерно-энергетической корпорации, которые размещаются в пункте захоронения «Ваалпутс», состоят из отвержденных среднеактивных концентратов, но в будущем может быть рассмотрена возможность захоронения и других видов отходов.

В соответствии с современной концепцией захоронения отходов на полигоне «Ваалпутс» используются траншеи глубиной несколько метров, расположенные выше уровня подземных вод. Концепция безопасности данного пункта захоронения — это многобарьерная конструкция, сочетающая естественные и инженерно-технические барьерные системы. Естественная барьерная

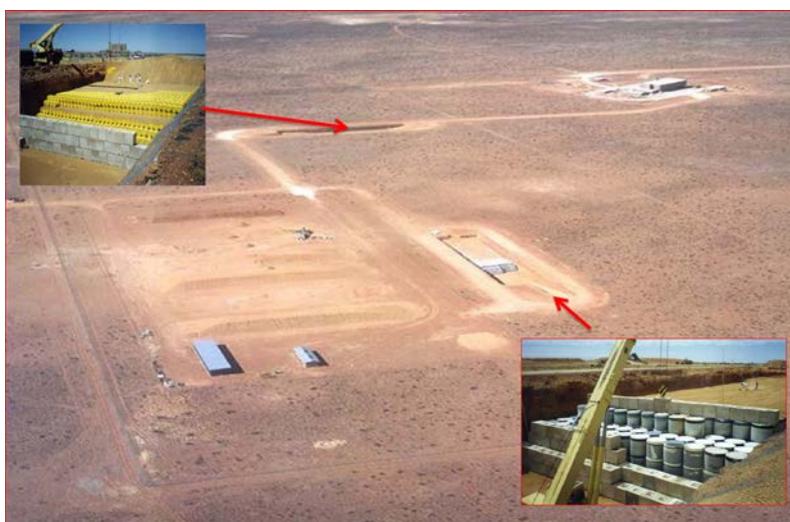


РИС. 20. Аэрофотоснимок пункта захоронения «Ваалпутс» [32] (фото: Национальный институт по захоронению радиоактивных отходов, Южная Африка).

система обеспечивается низкопроницаемыми глинистыми грунтами в сочетании с глубоким залеганием подземных вод. Оценка безопасности показывает, что эта концепция обеспечивает эффективную изоляцию отходов от окружающей среды. Эффективность повышается благодаря локализирующим свойствам инженерно-технической барьерной системы, образуемой упаковкой отходов, которые представляют собой иммобилизованные отходы после кондиционирования, заключенные в контейнер для отходов.

Отходы размещаются в траншеях специальной конструкции общей глубиной около 8 м, вырытых в ненасыщенном глинистом грунте. Грунтовые отложения состоят из верхнего слоя красной глины с большим содержанием каолинита и монтмориллонита и толщиной от 10 до 15 м и нижнего слоя белой глины толщиной от 15 до 20 м, состоящего в основном из флювиальных отложений с глиной. Под грунтовыми отложениями залегает гранитная порода. Толщина ненасыщенной зоны варьируется от 50 до 55 м. Основными факторами, определившими выбор проекта данного пункта захоронения, являются сухой климат (среднегодовое количество осадков составляет около 125 мм), глубина залегания подземных вод и состав глинистых грунтов. Даже после проливных дождей вода проникает не более чем на несколько метров под поверхность. Большая часть проникающей воды возвращается в атмосферу за счет испарения, в результате чего образовался приповерхностный пласт кальцита, покрытый красноватым поверхностным песчаным слоем.

Упаковки отходов штабелируются в траншеях таким образом, чтобы наиболее экономично использовать свободное пространство в каждой траншее и снизить вероятность процессов просадки, осадки или обрушения внутри траншеи. Положение каждой упаковки точно фиксируется и вносится в базу данных по отслеживанию отходов. По возможности пустоты между упаковками заполняются сухим, просеянным природным материалом, ранее извлеченным из той же траншеи. Закрытые материалом обратной закладки (засыпки) траншеи покрываются слоем твердого галечника или булыжника для отпугивания землеройных животных, после чего укладывается верхнее укрытие с использованием увлажненного и уплотненного, просеянного природного материала, ранее экскавированного при строительстве траншеи. Для контроля активности термитов в верхнее укрытие вносится тонкий слой трассировочного материала (мелкого медного шлака), а для ускорения роста растений на верхнее укрытие укладывается финальный слой почвы. Дальнейшее сооружение траншей осуществляется по мере необходимости.

Пункт захоронения состоит из траншейных полигонов двух типов для захоронения отходов, причем в эксплуатации находится по одной траншее каждого типа: траншеи типа А используются для захоронения упаковок с металлическими отходами и траншеи типа В — для бетонных упаковок. Поперечный разрез стандартной траншеи типа А показан на рис. 21. Траншеи располагаются на

ТРАНШЕЯ А01

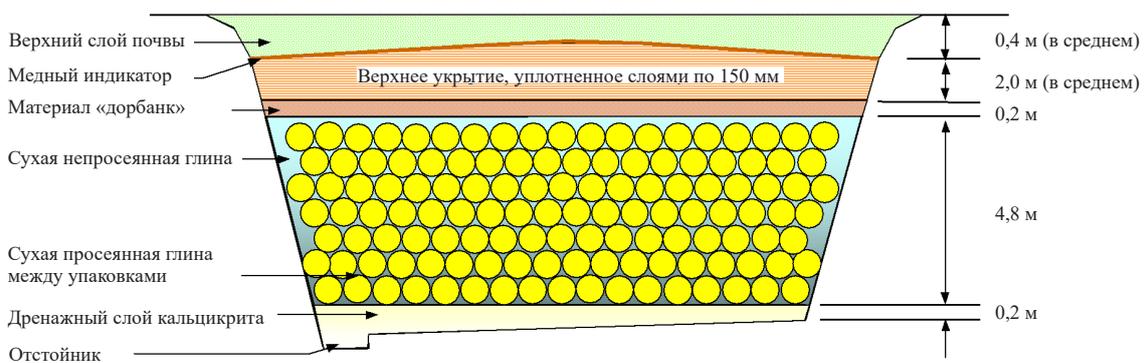


РИС. 21. Поперечный разрез типичной траншеи для захоронения на полигоне «Ваалпутс» (фото: Национальный институт по захоронению радиоактивных отходов, Южная Африка).

расстоянии около 400 м друг от друга. Каждая траншея имеет длину около 100 м, глубину 7,7 м и ширину 20 м у основания, при этом ее боковые стенки представляют собой расширяющиеся кверху откосы. Захоронение отходов оптимизировано с использованием поэтапного подхода, согласно которому каждый отсек заполняется и укрывается в течение 18 месяцев после первой операции по закладке отходов.

После захоронения всех имеющихся отходов полигон «Ваалпутс» будет закрыт. Территория траншеи будет восстановлена в соответствии с первоначальным рельефом местности и будет воссоздана местная растительность. После закрытия объекта будет проводиться мониторинг. Предполагается, что неограниченный доступ к месту нахождения полигона «Ваалпутс» будет возможен по истечении 300-летнего срока ведомственного контроля.

4.2. ПРИПОВЕРХНОСТНЫЕ ИНЖЕНЕРНО-ТЕХНИЧЕСКИЕ СООРУЖЕНИЯ

При строительстве приповерхностных инженерно-технических сооружений используется большее количество инженерно-технических барьеров, чем в случае обустройства земляных траншей, и, таким образом, обеспечивается более высокий уровень локализации и изоляции отходов. Эти сооружения представляют собой устойчивое решение с более широким спектром применения, чем простые земляные траншеи. Типичным решением, реализованным в ряде государств-членов, является строительство бетонной камеры для захоронения отходов. Как правило, такие системы сооружаются на поверхности и впоследствии покрываются инженерно-техническим верхним укрытием. В ряде государств-членов удалось успешно выполнить лицензирование, строительство и эксплуатацию приповерхностных бетонных объектов для захоронения НАО.

4.2.1. Общие вопросы

Решение о выборе между пунктом захоронения траншейного типа или более сложной бетонной конструкцией для захоронения отходов зависит от многих факторов, в том числе от климата, условий местности, степени опасности, которую представляют отходы, общественного согласия и национальной политики, а также от соображений финансового порядка. Каждый из этих факторов должен быть оценен с учетом его значимости с точки зрения потребностей в захоронении и применимости в каждом государстве-члене.

Было лицензировано, построено, сдано и введено в эксплуатацию несколько пунктов захоронения НАО, которые продемонстрировали эффективность приповерхностных инженерно-технических сооружений. Эти системы оказались особенно пригодными для использования в странах с засушливым климатом или в районах, в которых функциональные характеристики естественной системы или соображения национальной политики обуславливают необходимость применения дополнительных барьеров.

Общий подход заключается в сочетании инженерно-технических барьеров, таких как железобетонные конструкции, со специально спроектированными системами регулирования стока и дренирования. Данная концепция базируется на минимизации доступа воды к отходам путем принятия комплекса мер, направленных в первую очередь на отвод воды от отходов, а затем на предотвращение или значительное ограничение прямого попадания воды в них. Для подтверждения функциональных характеристик барьеров были разработаны различные концепции организации мониторинга. Эти концепции мониторинга являются важным элементом подтверждения правильности обоснования безопасности и повышения доверия регулирующих органов и общественности в отношении сооружаемого пункта захоронения.

Захоронение сыпучих и кусковых отходов может производиться в соответствующим образом спроектированных и построенных сооружениях, если это допускается КПО, однако большинство отходов, как правило, подвергаются кондиционированию и упаковываются перед захоронением. Используются самые разнообразные упаковки — от простых стальных бочек до больших,

специально спроектированных для данной цели железобетонных контейнеров. Контейнеры Международной организации по стандартизации (ИСО) также используются на некоторых объектах для захоронения НАО. Упаковки отходов обеспечивают локализацию и защиту отходов при проведении транспортно-технологических операций. Функциональные характеристики упаковки в части долгосрочной безопасности в период после размещения отходов могут изменяться в зависимости от результатов обоснования безопасности данного пункта захоронения.

4.2.2. Концепция захоронения

Концепцию захоронения можно проиллюстрировать на примере национального пункта захоронения, сооружаемого болгарским государственным предприятием «Радиоактивные отходы» вблизи АЭС «Козлодуй» (рис. 22), строительство которого было начато в августе 2017 года. Концепция базируется на проекте пункта захоронения «Эль-Кабриль» (Испания), построенного на основе французского проекта, разработанного в Центре захоронения отходов в провинции Об. Концепция бетонных камер оказалась гибким проектным решением, и для ее реализации было использовано несколько вариантов. Объекты, реализующие подобную концепцию, уже построены или находятся в стадии разработки в ряде государств-членов, включая Бельгию, Индию, Китай, Польшу, Словакию, Соединенное Королевство, Чешскую Республику и Японию. Пример, представленный на рис. 22, иллюстрирует некоторые из основных вопросов, решаемых при проектировании подобных объектов, и не претендует на то, чтобы указывать конкретные предпочтительные проектные решения. Альтернативные проекты, обеспечивающие аналогичные возможности, включают концепцию цилиндрического бункера (типа силосной башни) с выходом на поверхность, разрабатываемую в Словении и описанную в подразделе 4.2.3.3.

Рассматриваемые инженерно-технические сооружения изготавливаются с применением железобетона для создания камерных отсеков, предназначенных для размещения отходов. После укладки отходов монтируется бетонная крыша для герметизации камерных отсеков и предотвращения попадания воды в отходы. Бетонные камеры захоронения, сооруженные на поверхности, которые показаны на рис. 22, как правило, снабжаются гидроизоляцией для дополнительной защиты отходов и минимизации возможности попадания воды в систему. После заполнения объекта и получения разрешения на его закрытие устанавливается финальное инженерно-техническое укрытие, которое будет обеспечивать отвод воды от отходов и служить барьером для ее просачивания, значительно снижая вероятность попадания просачивающихся вод в отходы. В некоторых проектах упаковкам отходов также придается барьерная функция, но обычно эта функция безопасности ограничивается эксплуатационным периодом.

В целях надежности и подтверждения функциональных характеристик системы захоронения в проект обычно включается система мониторинга, предназначенная для обеспечения сбора любой потенциально загрязненной воды. Такие системы могут включать напольный дренаж в сочетании со смотровыми галереями, расположенными под системой захоронения отходов, например, как показано на рис. 22, или другие конфигурации, предназначенные для сбора любых вод, которые потенциально могут попасть в отходы. В надлежащим образом функционирующей системе захоронения вода не должна обнаруживаться.

В показанном примере на полу камеры захоронения предусматривается отвод воды в центральную дренажную систему внутри каждого камерного отсека. В каждой дренажной системе предусматривается ловушка для проб, установленная в смотровой галерее, расположенной под камерой захоронения. Галерея позволяет получить доступ к ловушкам для проб в течение всего периода ведомственного контроля. Таким образом, любая потенциально загрязненная вода будет улавливаться дренажной системой, позволяя проводить анализ на содержание радионуклидов.

Технические характеристики бетона, используемого при строительстве камер захоронения, строго контролируются в целях обеспечения требуемой функциональной эффективности. Бетон также может обеспечивать защитное экранирование от излучения в течение всего срока эксплуатации системы захоронения до момента герметизации камер захоронения и монтажа

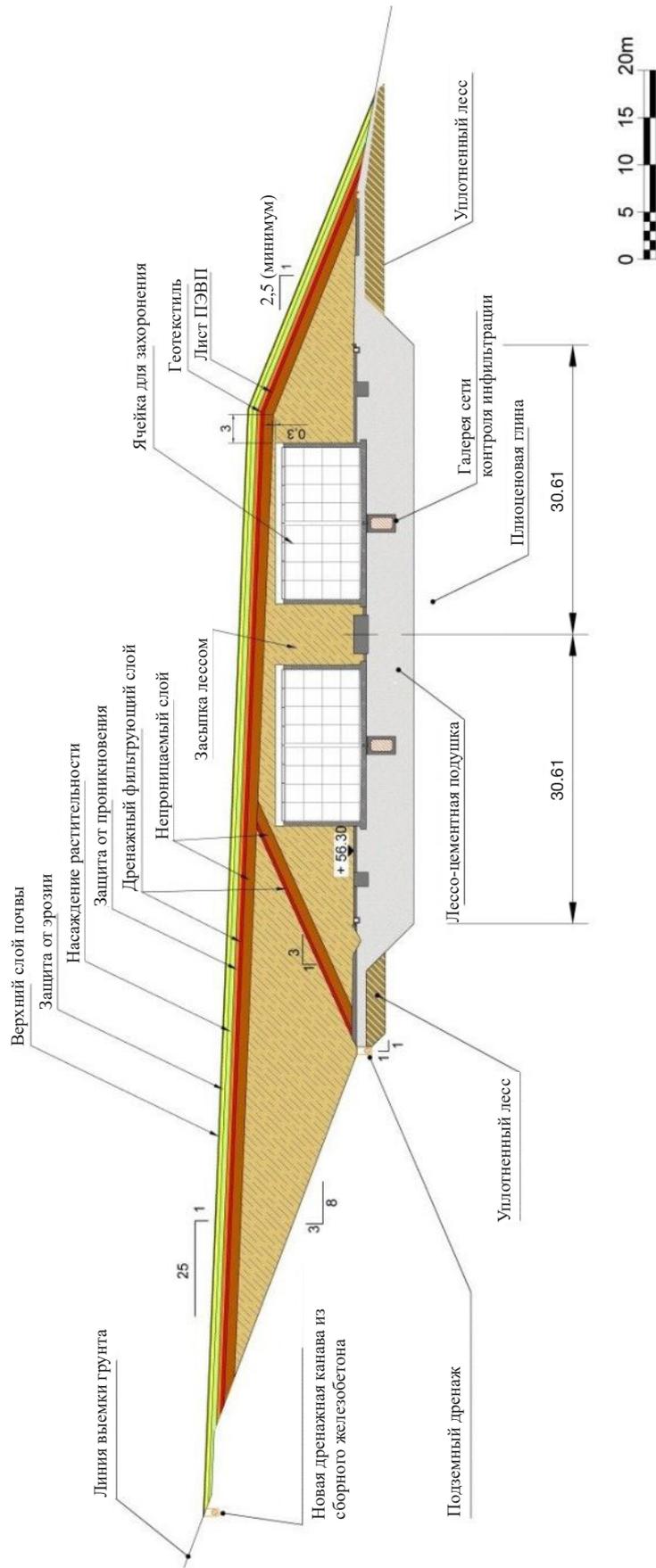


Рис. 22. Концепция проектирования, разработанная для болгарского национального пункта захоронения отходов. На рисунке представлен поперечный разрез покрытия, показывающий ишедовое покрытие и одностороннюю насыпь с многослойным инженерно-техническим барьером и дополнительным глинистым барьером внутри материала обратной засыпки (засыпки). Все размеры указаны в метрах. (Иллюстрация: Болгарское государственное предприятие «Радиоактивные отходы».)

финального инженерно-технического укрытия. Функции радиационной защиты, которые выполняет бетон в течение эксплуатационного периода, оптимизируются путем выбора состава и толщины бетона. Кроме того, при выборе бетона необходимо учитывать требования, предъявляемые к системе захоронения в долгосрочной перспективе, которые были определены при проведении оценки безопасности. Ключевой функцией является обеспечение целостности камеры захоронения с применением определенных критериев в отношении размера образующихся трещин при существующих и ожидаемых условиях окружающей среды, включая ожидаемую химическую среду.

Как правило, требования в отношении долгосрочных функциональных характеристик этих типов систем захоронения обуславливаются периодом ведомственного контроля после закрытия объекта. Требования, предъявляемые к функции изоляции и локализации системы захоронения, зависят от состава радионуклидов в отходах, включенных в инвентарный список (реестр). Как и в случае с земляными траншеями для НАО, для периода ведомственного контроля часто устанавливается срок порядка 300 лет (эквивалентный примерно десяти периодам полураспада ^{90}Sr и ^{137}Cs).

Первичная барьерная функция в этой многобарьерной системе, а именно предотвращение контакта воды с отходами, отводится инженерно-техническим элементам. Функциональные характеристики естественной системы также важны для обеспечения безопасности в целом, и поэтому геологические условия площадки играют важную роль в процессе выбора района размещения площадки. Как правило, предпочтение отдается площадкам, находящимся выше местных пойменных территорий, с сейсмически приемлемым профилем и низкими скоростями движения подземных вод.

4.2.3. Типичные примеры

Типичные примеры приповерхностных пунктов захоронения с инженерно-техническими средствами можно разделить на две основные концепции проектирования: бетонные камеры захоронения, примеров разработки которых имеется значительное множество, и приповерхностные бетонные цилиндрические бункеры с прямым доступом, подобные концепции, которая недавно была принята в Словении. В следующих подразделах описаны два различных примера проектных решений для бетонных камер захоронения, которые базируются на решении, реализованном в проекте пункта захоронения «Эль-Кабриль» (Испания), и на решении, реализованном в проекте пункта захоронения «Моховце» (Словакия). Словацкий проект является дальнейшим развитием проекта пункта захоронения «Дуковань», эксплуатируемого в Чешской Республике, и представлен в качестве примера в данном контексте. Кроме того, описывается концепция словенского цилиндрического бункера, который проходит процедуру получения лицензии на строительство. Как отмечалось ранее, примеры приводятся исключительно как референтные для справочных целей, и подходящими также могут быть и другие проектные решения.

4.2.3.1. Пункт захоронения «Эль-Кабриль», Кордова, Испания

Испанская национальная компания по обращению с радиоактивными отходами «Энреса» (Empresa Nacional de Residuos Radiactivos), являющаяся организацией по обращению с отходами (ООО), управляет пунктом захоронения «Эль-Кабриль», расположенным недалеко от Кордовы на площадке, ранее использовавшейся для добычи урана. Пункт захоронения занимает около 20 га на территории площадью около 1100 га [33] и включает репозиторий траншейного типа для ОНАО и репозиторий в виде бетонной камеры захоронения для НАО.

Безопасный подход предусматривает сочетание инженерно-технических барьеров в форме железобетонных конструкций со специально спроектированными для данной цели системами регулирования стока и дренирования. Концепция основана на первоначальном отводе воды от

отходов в период эксплуатационного контроля и последующем предупреждении или значительном ограничении прямого поступления воды к отходам.

Площадка располагается на метаморфических породах докембрия, состоящих в основном из мигматизированных биотитовых гнейсов и слюдистых сланцев. По территории площадки протекает ручей Арройо-де-ла-Монтесина, который впадает в реку Бембесар. Климат данного района характеризуется мягкой дождливой зимой и жарким летом. Среднегодовое количество осадков в бассейне реки Бембесар может варьироваться от 400–450 мм в сухие годы, до 600–700 мм в средние годы и до 850–950 мм во влажные годы.

Камерная система захоронения НАО включает две платформы захоронения: северную платформу, состоящую из 16 камер захоронения, и южную платформу с 12 камерами захоронения. Северная платформа была заполнена, и операции по захоронению отходов были перенесены на южную платформу. Мощность объекта по захоронению НАО составляет 100 000 м³, что соответствует примерно 35 000–50 000 м³ первичных упаковок отходов, поступающих от производителей отходов, в зависимости от их типа.

Пункт захоронения «Эль-Кабриль» принимает отходы из любого места на территории Испании. Большая часть поступающих на объект отходов связана с выработкой электроэнергии на атомных электростанциях и доставляется в кондиционированной форме. Обработка некоторых отходов, образующихся при медицинском или промышленном использовании, производится на установке кондиционирования на площадке. Кондиционированные отходы, обычно находящиеся в стальных бочках, помещаются в большие бетонные упаковки, предназначенные для захоронения. Эти упаковки отходов имеют внешние размеры 2,25 м × 2,25 м × 2,20 м и вмещают до 18 бочек емкостью 220 л. После укладки бочек в упаковки отходов в них заливается цементный раствор для заполнения пустот, и упаковки герметизируются бетонными крышками. Зацементированные и загерметизированные упаковки отходов весом до 24 т помещаются в бетонные камеры захоронения (рис. 23), каждая из которых вмещает 320 упаковок отходов. Упаковки отходов размещаются в непосредственной близости друг от друга таким образом, чтобы оставалось центральное крестообразное пространство, которое допускает незначительный разброс в точности размещения упаковок или их изготовления. Внешние размеры камер захоронения составляют 24 м × 19 м по горизонтали и 10 м по высоте. Толщина стен равна 0,5 м. Основание камер захоронения имеет



РИС. 23. Заполнение камеры захоронения в пункте захоронения НАО «Эль-Кабриль» (фото: «Энреса»).

небольшой откос для обеспечения отвода воды в централизованную дренажную систему. Толщина плиты основания составляет от 0,5–0,6 м. Для обеспечения ровной поверхности для размещения упаковок отходов на нее укладывается слой проницаемого бетона. После заполнения камеры захоронения закрываются железобетонной плитой укрытия.

На южной и северной платформах камеры захоронения располагаются параллельно друг другу двумя рядами. Южная платформа имеет два ряда по шесть камер захоронения, а на северной платформе располагаются два ряда по восемь камер. В каждой из 28 камер захоронения предусматривается напольный дренаж, соединенный с сетью контроля и мониторинга просачивания, смонтированной в галереях, которые находятся под каждым рядом камер захоронения. Система контроля просачивания позволяет заблаговременно обнаруживать протечку потенциально загрязненной воды из камер захоронения. Обнаружение протечки воды, которая является маловероятной, будет свидетельствовать о потенциальной неисправности в системе захоронения и может привести к проведению корректирующих мероприятий, направленных на устранение неисправности в случае, если это будет признано необходимым.

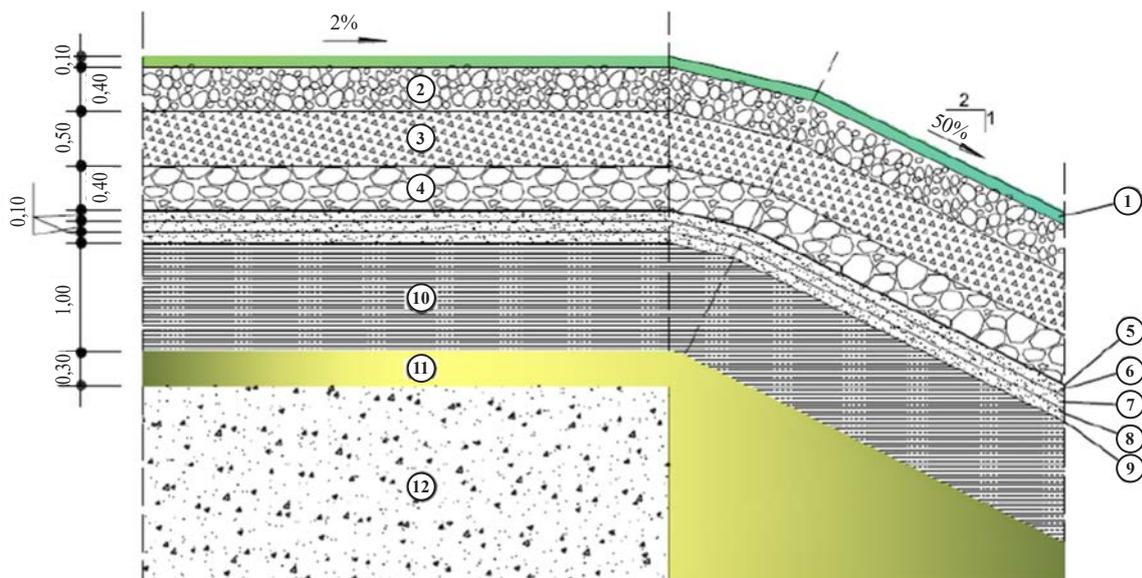
При укладке отходов на операционные платформы используются две передвижные крыши, представляющие собой конструкции, оснащенные специальными кранами, применяемыми на объектах использования атомной энергии. Передвижная крыша устанавливается над камерой захоронения и находится в этом положении на протяжении выполнения всех операций по укладке, обеспечивая защиту от неблагоприятных погодных условий. Крыша остается на месте над камерой захоронения до тех пор, пока камера не будет заполнена и не будет установлена бетонная плита укрытия. Использование двух передвижных крыш обеспечивает непрерывное захоронение отходов; пока одна из камер герметизируется, операции по захоронению отходов могут продолжаться во второй камере. Аналогичная стратегия была принята при создании Болгарского национального пункта захоронения отходов, в случае которого используется концепция пункта захоронения «Эль-Кабриль» в качестве референтной модели. Общая вместимость пункта захоронения НАО составляет 50 000 м³.

Упаковки отходов и камеры захоронения проектируются с таким расчетом, чтобы они выдерживали сейсмические воздействия с ускорением грунта 0,24g. Бетон, используемый в ячейках для захоронения и контейнерах, был специально разработан в рамках осуществления программы НИОКДР Институтом Эдуардо Торроха, и его состав был подобран так, чтобы оптимизировать долговечность бетонных барьеров. Он обладает высокой прочностью на сжатие и уплотненностью, а также устойчивостью к воздействию сульфатов и хлоридов. Подземные воды на территории площадки имеют низкое содержание сульфатов и хлоридов, что благоприятно сказывается на долговечности бетона.

После заполнения всех камер захоронения сверху каждой платформы укладывается многослойная инженерно-техническая конструкция в качестве финальной системы верхнего укрытия (см. рис. 24). Многослойное покрытие предотвращает контакт атмосферных осадков с заглубленными и герметизированными камерами захоронения и с содержащимися в них отходами. С этой целью укладывается ряд дренажных и герметизирующих слоев, а также предусматриваются предотвращающие интрузию слои и растительный покров для повышения долговременной стабильности. После завершения работ по верхнему укрытию начинается 300-летний период наблюдения и ведомственного контроля.

4.2.3.2. Пункты захоронения «Моховце» (Словакия) и «Дукованы» (Чехия)

Пункт захоронения «Моховце» в Словакии представляет собой дальнейшее развитие объекта «Дукованы» в Чехии. Сравнение двух пунктов захоронения показывает, как различающиеся геологические условия и требования при лицензировании и строительстве объекта «Дукованы» и последующем (более чем через 10 лет) лицензировании и строительстве объекта «Моховце» могут влиять на проектирование и эксплуатацию пункта захоронения.



- ① Верхний слой почвы и растительность — 0,10 м
 - ② Противозерозионный слой: гравелистая глина — 0,40 м
 - ③ Насаждение растительности; ил и глина (лесс) — 0,50 м
 - ④ Защита от проникновения: гравий и валуны — 0,40 м
 - ⑤ Геотекстиль — 0,01 м
 - ⑥ Песок — 0,10 м
 - ⑦ Крупный песок / мелкий гравий — 0,10 м
 - ⑧ Мелкий гравий — 0,10 м
 - ⑨ Лист ПЭВП — >0,002 м
 - ⑩ Барьер: глина ($K=10^{-9}$ м/с)
 - ⑪ Опорное основание: гранулированный грунт (низкой пластичности, неорганический) — 0,30 м
 - ⑫ Бетонные ячейки
- } Слой дренажного фильтра

РИС. 24. Концептуальный проект финальной многослойной инженерно-технической конструкции верхнего укрытия (иллюстрация: «Энреса»). HDPE — ПЭВП (полиэтилен высокой плотности).

В июне 1997 года Министерство промышленности и торговли Чешской Республики учредило Управление по захоронению радиоактивных отходов (Správa úložišť radioaktivních odpadů (SÚRAO)), которое отвечает за проектирование, разработку и строительство пунктов захоронения радиоактивных отходов на территории страны. Строительство пункта захоронения «Дукованы» (сейчас оно находится в ведении SÚRAO) было начато при правительстве бывшей Чехословакии в 1978 году. Объект был введен в эксплуатацию в 1994 году по решению правительства Чешской Республики.

Пункт захоронения «Дукованы» расположен на четвертичных отложениях, покрывающих подстилающую толщу, состоящую из гнейсов и мигматитов. Безопасный подход предусматривает сочетание инженерно-технических барьеров в форме железобетонных конструкций со специально спроектированными для данной цели системами регулирования стока и дренажа. Концепция основана на первоначальном отводе воды от отходов в период эксплуатационного контроля и на последующем предупреждении или значительном ограничении прямого поступления воды к отходам.

Пункт захоронения состоит из двух блоков захоронения, построенных рядом друг с другом. Каждый блок представляет собой двойной ряд из семи камер захоронения, каждая из которых разделена на четыре камерных отсека для захоронения (размеры 17,3 м × 5,3 м × 5,4 м). Камеры захоронения разделены строительными швами для обеспечения дифференцированного перемещения, связанного с оседанием, с тем чтобы свести к минимуму возможность образования



РИС. 25. Пункт захоронения «Дукованы» (Чешская Республика). Временно укрытые камерные отсеки захоронения: а) до размещения отходов; б) во время проведения работ по укладке отходов (фото: SÚRAO).

трещин. Камерные отсеки не оборудованы дренажной системой, но пол каждой камеры имеет уклон, ведущий к угловому отстойнику, из которого при необходимости вода может быть удалена перед размещением отходов. Перед вводом в эксплуатацию и выполнением операций по захоронению камерные отсеки закрываются съемными бетонными панелями с целью защиты их внутреннего пространства (см. рис. 25(а)). Во время укладки бочек с отходами (рис. 25(б)) используемый камерный отсек открывается. Для защиты открытой камеры в то время, когда укладка бочек с отходами не производится, используется передвижная крыша.

Стены камер захоронения выполнены из армированного бетона и имеют толщину 60 см. Каждый блок захоронения покрыт снаружи гидроизоляционным слоем из асфальтопропиленового бетона толщиной 10 см. На открытых участках блока захоронения слой асфальтопропиленового бетона удерживается на месте опорной стеной. Предусмотрен отвод дождевых вод от блоков захоронения. Под основанием и по обе стороны от блока захоронения обустраивается специальная дренажная система для сбора воды. Функция дренажа заключается в сборе воды, в которую могут попасть отходы из расположенных выше блоков захоронения. Дренаж обеспечивает подачу собираемой воды в одну точку отбора проб в конце каждого ряда. В случае маловероятного обнаружения выхода радиоактивности можно провести целенаправленное исследование с целью локализации источника в конкретном камерном отсеке, что облегчит принятие корректирующих мер, если они окажутся необходимыми.

На данном объекте производится захоронение различных видов отходов, включая концентраты испарителей, различный мусор, радиоактивно загрязненные твердые отходы, крупные кусковые отходы, образующиеся при техническом обслуживании и модернизации атомных электростанций, а также отработанные ионообменные смолы. Отходы, за исключением кусковых материалов, помещаются в стальные бочки емкостью 200 л, которые укладываются в шесть ярусов в каждом камерном отсеке захоронения. Оставшееся незаполненное пространство между бочками с отходами заливается бетоном. После заполнения каждого камерного отсека бетонные панели снова устанавливаются сверху камерных отсеков и покрываются гидроизоляционным слоем и временным верхним укрытием с целью предотвращения попадания дождевой воды в камерный отсек до закрытия объекта.

В 2005 году была основана словацкая ООО — Компания по атомной энергии и выводу из эксплуатации ядерных установок (Jadrová a vyjadrovacia spoločnosť, a.s. (JAVYS)). Строительство Словацкого национального пункта захоронения радиоактивных отходов в Моховце было начато в 1986 году при правительстве бывшей Чехословакии.

Концепция безопасности (рис. 26) основана на сочетании естественных и инженерно-технических барьеров (имеющаяся глинистая формация на площадке и железобетонные

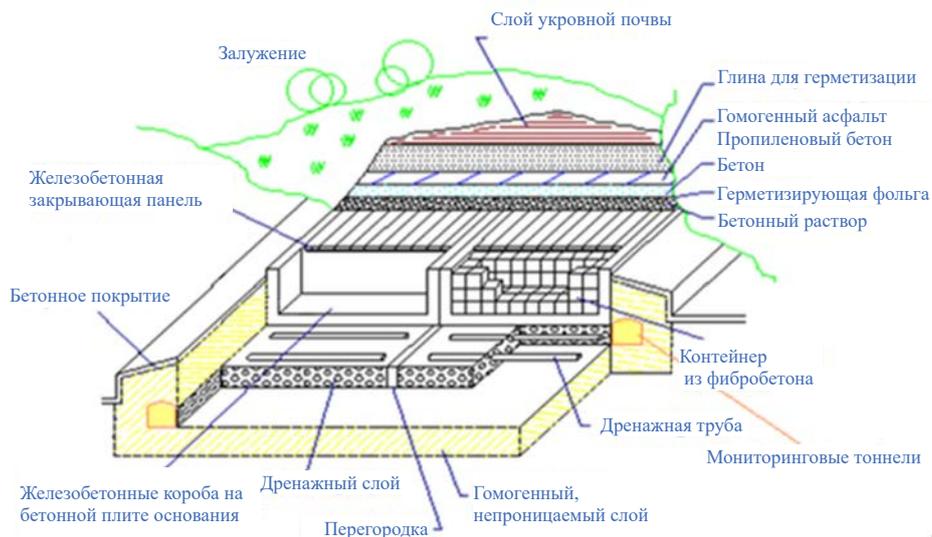


РИС. 26. Концепция проектирования пункта захоронения «Моховце» (иллюстрация: «JAVYS», Словакия).

конструкции со специально спроектированными для данной цели системами регулирования стока и дренажа). Концепция основана на первоначальном отводе воды от отходов в период эксплуатационного контроля и последующем предупреждении или значительном ограничении прямого поступления воды к отходам. Глинистая формация под объектом служит важным барьером между отходами и доступной средой, и первый шаг в строительстве объекта заключался в преобразовании естественной глины в подходящее для строительства основание. Инженерно-технические сооружения пунктов захоронения «Моховце» и «Дукованы» первоначально разрабатывались по практически идентичным проектам. Однако на работу по созданию пункта захоронения «Моховце» повлияли политические перемены, произошедшие в начале 1990-х годов, которые обусловили изменение сроков начала строительства объекта. Эти перемены включали создание новой структуры регулирования в Словакии, в результате чего произошла отсрочка во вводе объекта в эксплуатацию. Кроме того, было внесено несколько изменений в проект на основе рекомендаций МАГАТЭ, которые были подготовлены по просьбе нового правительства Словакии. В отношении строительства пункта захоронения также были установлены более строгие меры контроля, отражающие его классификацию как ядерного объекта. В связи с усилением контроля за строительством и решением учесть рекомендации МАГАТЭ по проектированию окончательный ввод объекта в эксплуатацию был перенесен на более поздний срок. Операции по захоронению были начаты в 2000 году.

Общая конструкция блоков захоронения осталась такой же, как и в случае пункта захоронения «Дукованы», за исключением того, что в пункте захоронения «Моховце» каждый блок захоронения состоит из двойного ряда по пяти (а не семи) камер захоронения, каждая из которых разделена на четыре камерных отсека одинаковых размеров. Вместе с тем в проекте пункта захоронения «Моховце» были реализованы два существенных конструктивных изменения. Во-первых, вместо передвижной крыши весь используемый блок захоронения накрывается временным навесом для защиты операций по укладке отходов от неблагоприятных погодных условий. Это решение позволяет оставлять камеры захоронения открытыми с защитой съемными бетонными панелями (рис. 27 (а)) до окончания работ по укладке отходов и герметизации камерных отсеков. Кроме того, данная стратегия укладки отходов позволяет снизить потенциальную дифференциальную осадку, обусловленную пластичной природой глины, на которой сооружается пункт захоронения. Во-вторых, вместо единой точки мониторинга воды, которая потенциально может просачиваться

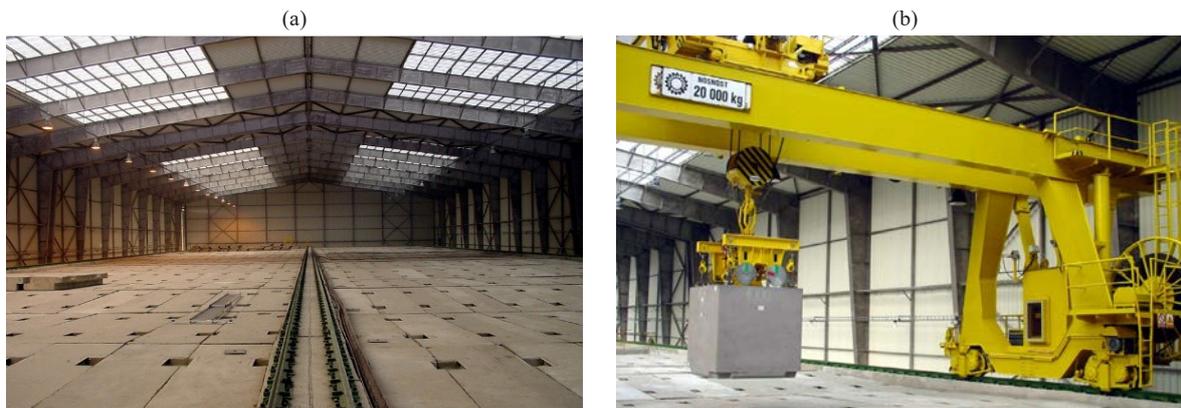


РИС. 27. Пункт захоронения «Моховце», Словакия: а) закрытая система захоронения с камерными отсеками, защищенными бетонными панелями; б) упаковка отходов, перемещаемая к месту захоронения (фото: JAVYS, Словакия).

из пункта захоронения, в конце каждого ряда была предусмотрена система подземных галерей для непосредственного мониторинга каждого камерного отсека.

Наконец, были внесены изменения в конструкцию упаковок отходов. Вместо бочек для захоронения отходов в пункте захоронения «Моховце» используется специально разработанный контейнер из армированного фибробетона, который производится по лицензии французской компании «SGN/Sogefibre». Контейнеры имеют длину ребра, равную 1,7 м, и внутренний объем для захоронения составляет примерно 3 м³. Отходы после обработки помещаются непосредственно в кубические упаковки для отходов и иммобилизируются цементом в центре обработки отходов в Богунице и на предприятии по окончательной переработке жидких радиоактивных отходов в Моховце. Контейнеры после подтверждения соблюдения КПО и проверки целостности упаковок выгружаются непосредственно из транспортного средства в камеру захоронения в заранее отведенном месте (рис. 27 (б)).

4.2.3.3. Пункт захоронения «Врбина», Словения

Пункт захоронения «Врбина» предназначен для захоронения короткоживущих низко- и среднеактивных отходов (НСАО), которые относятся к этой категории согласно словенской классификации отходов, но соответствуют НАО, как это предусмотрено в [10, 34]. В 1991 году было создано Агентство по радиоактивным отходам для управления обращением с радиоактивными отходами в Словении. Данный пункт захоронения предназначен в первую очередь для обеспечения захоронения эксплуатационных отходов и отходов, связанных с выводом из эксплуатации атомной электростанции «Кршко», а также различных отходов специализированных учреждений. Он проектируется и лицензируется в соответствии с требованиями Словенской национальной программы по обращению с радиоактивными отходами и отработавшим топливом [35].

Атомная электростанция «Кршко» находится в совместной собственности и эксплуатируется совместно с Хорватией. На первой стадии пункт захоронения будет использоваться для захоронения половины словенских отходов АЭС и других радиоактивных отходов, образующихся в Словении. Прогнозируемый объем отходов учитывает возможное продление срока эксплуатации атомной электростанции в будущем. Концепция проектирования предусматривает возможность расширения объекта, если в будущем будет достигнуто соглашение с правительством Хорватии о захоронении всех отходов станции.

Безопасный подход предусматривает сочетание естественных и инженерно-технических барьеров (имеющихся геологических формаций и железобетонных конструкций со специально спроектированными для данной цели системами регулирования стока и дренажа). Концепция

захоронения базируется на минимизации доступа воды к отходам посредством сочетания принимаемых мер. С этой целью в проекте объединены существующие концепции поверхностного захоронения, реализованные в Испании, Франции и других странах, и концепция подземного захоронения в цилиндрическом бункере (типа силосной башни), используемая в Республике Корея, Финляндии и Швеции. В обосновании безопасности и при разработке стратегии лицензирования рассматриваются два варианта цилиндрических бункеров.

Цилиндрические бункеры в словенской концепции представляют собой очень большие камеры захоронения с прямым доступом на поверхности на стадии эксплуатации. Внутренний диаметр цилиндрических бункеров будет равен 27,3 м, высота — 51,5 м. Они будут построены полностью под землей. Во время строительства будут использоваться стандартные методы предотвращения попадания подземных вод в котлован, например, посредством установки водонепроницаемой ограждающей стены. После завершения экскавационных работ для обеспечения стабильности будет установлена начальная первая обделка. Обделка будет состоять из ограждающей стены толщиной 1,2 м и дополнительной железобетонной облицовки толщиной 1 м. Вторая облицовка выполняет функции изоляции и локализации отходов. Рис. 28 иллюстрирует концепцию цилиндрического бункера в поперечном разрезе.

Первоначально будет построен один цилиндрический бункер, который обеспечит достаточный объем для захоронения всех существующих и прогнозируемых отходов и удовлетворит потребности Словении в захоронении отходов. Дополнительно могут быть построены новые цилиндрические бункеры в случае будущего расширения эксплуатации и увеличения объема образования отходов в результате проведения работ по выводу из эксплуатации, а также поступления отходов из других потенциальных источников. Планируемый цилиндрический бункер, включая любые будущие расширения объекта, будет расположен ниже уровня грунтовых вод и в формациях, залегающих под тонким верхним водоносным горизонтом. Предполагается, что такое решение позволит значительно снизить вероятность проникновения человека в систему захоронения отходов: на этой глубине непреднамеренный проход бурового инструмента во внутреннее пространство объекта представляется весьма маловероятным. Перед захоронением отходы будут упаковываться в специально спроектированные для данной цели бетонные контейнеры, как показано справа на рис. 28, с размерами 1,95 м × 1,95 м × 3,25 м и максимальным весом 40 т. Затем эти упаковки будут помещены непосредственно в цилиндрический бункер. Пространство между упаковками отходов будет заполнено герметизирующими материалами. Контейнеры будут размещены на 10 уровнях по 99 контейнеров на каждом уровне. В качестве альтернативы резке и упаковке будет рассмотрена возможность захоронения некоторых демонтированных элементов в виде кусковых отходов.

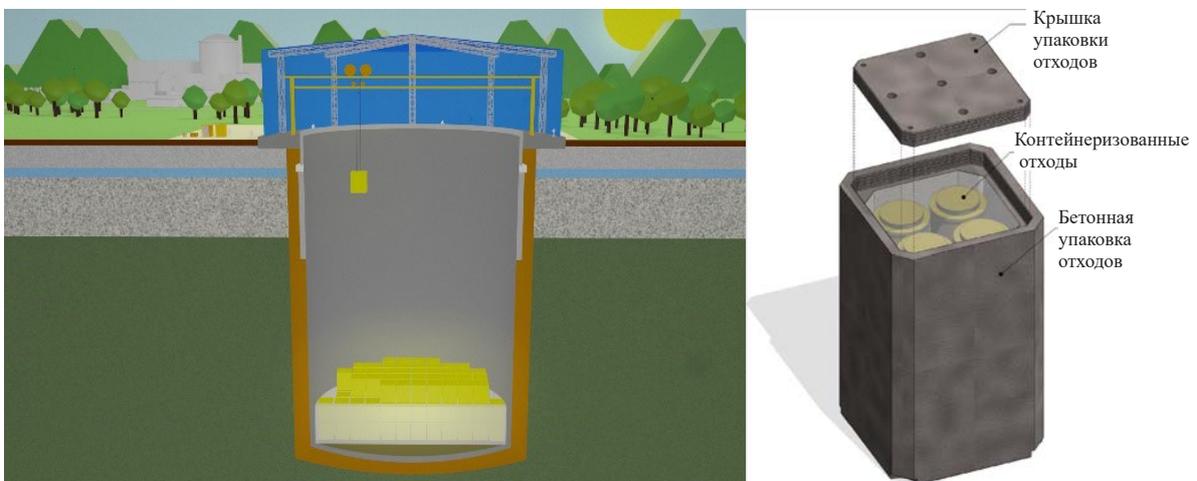


РИС. 28. Пункт захоронения «Врбина», Словения: вертикальный разрез цилиндрического бункера в период эксплуатации и контейнер для отходов (иллюстрация: Агентство по радиоактивным отходам, Словения).

Цилиндрические бункеры планируется построить в слое миоценовых илов с проницаемостью от 10^{-9} до 10^{-7} м/с. Иловый слой находится под песчано-карбонатно-гравийным отложением реки Сава толщиной 3–15 м. Подземные воды залегают на глубине около 4 м под площадкой. В условиях затопления вода может подняться до уровня площадки, и поэтому в проекте предусматриваются соответствующие меры защиты.

С учетом возможных изменений в объеме образующихся отходов в концепции строительства пункта захоронения предусматривается модульный подход, согласно которому каждый цилиндрический бункер представляет собой отдельный модуль. В стратегии лицензирования заложен последовательный подход к строительству. Эту последовательную стратегию можно условно разделить на два этапа строительства: на первом этапе будут построены платформы и проведены необходимые земляные работы для одного цилиндрического бункера, а также выполнены подсоединения к коммерческой инфраструктуре общего пользования. На этом этапе строительства будут построены все вспомогательные объекты и первый цилиндрический бункер. Возможное расширение объекта за счет сооружения второго цилиндрического бункера будет выполнено на втором этапе строительства.

Сооружения для эксплуатационно-технического обслуживания будут построены на приподнятой платформе с целью их защиты от возможных максимальных наводнений. К сооружениям, классифицируемым в качестве важных для ядерной безопасности и имеющим потенциальный срок эксплуатации 100 лет, предъявляются требования по сейсмостойкому проектированию, предусматривающие учет землетрясений с периодом повторяемости 1000 лет. В случае закрытого цилиндрического бункера, для которого период ведомственного контроля составляет 300 лет, выполняется оценка проектного землетрясения с периодом повторяемости 15 000 лет. Все остальные конструкции проектируются в соответствии с Еврокодами с расчетным сроком эксплуатации 50 лет.

4.3. ПОДПОВЕРХНОСТНЫЕ СИСТЕМЫ ЗАХОРОНЕНИЯ НА СРЕДНИХ ГЛУБИНАХ

Долгоживучесть САО, если их сравнивать с НАО, подразумевает, что в случае системы для захоронения САО требуется обеспечивать значительно более длительный период локализации и изоляции, достигающий нескольких тысяч лет. В отличие от поверхностного захоронения ОНАО и НАО, о котором говорилось в предыдущих разделах, применение ведомственного контроля в течение таких длительных периодов времени не представляется возможным, и безопасность можно гарантировать только посредством использования пассивных мер. Подповерхностное захоронение в соответствующим образом сконструированных сооружениях является признанным на международном уровне вариантом захоронения, который считается пригодным для отходов, классифицируемых МАГАТЭ как САО [10]. В данном подразделе рассматривается этот тип объектов, сооружаемых на средней глубине (как правило, порядка нескольких десятков метров) под поверхность.

4.3.1. Общие вопросы

Отходы, классифицируемые как САО, имеют более высокий уровень радиоактивности, чем НАО, и требуется применение защитного экранирования при выполнении транспортно-технологических операций с ними. Самые распространенные виды САО, образующихся в атомной энергетике, являются результатом эксплуатации атомных электростанций и представляют собой отработанные ионообменные смолы, используемые для очистки охлаждающей воды, циркулирующей через реактор, а также некоторые радиоактивно загрязненные отходы и элементы металлолома. При выполнении работ по выводу из эксплуатации некоторые элементы реактора также классифицируются как САО. Кроме того, САО образуются при переработке ОЯТ. В большинстве стран в ходе научных исследований, медицинского и промышленного

использования образуются относительно небольшие объемы САО, включая некоторые более долгоживущие изъятые из употребления закрытые радиоактивные источники (ИЗРИ).

Эксплуатационные САО, образующиеся на атомных электростанциях, обычно обрабатываются и кондиционируются путем отверждения в цементе или битуме и затем помещаются в экранированные контейнеры. Как правило, уменьшение объема не практикуется в отношении САО во избежание возможного выделения тепла при концентрировании радионуклидов. Опыт показывает, что при эксплуатации реактора мощностью 1000 Мвт (эл.) ежегодно образуется около 20 м³ САО. Ввиду разнообразия материалов в потоках САО может требоваться учет скорости коррозии, газообразования, воспламеняемости и прочих факторов в долгосрочной перспективе.

Некоторые страны выбрали варианты глубинного геологического захоронения САО в специально созданных шахтных пунктах захоронения, переоборудованных подземных сооружениях или в объектах, совмещенных с пунктами захоронения ВАО. Пилотный комплекс по изоляции отходов (WIPP) представляет собой пример захоронения САО в специально созданном пункте глубинного геологического захоронения (см. подраздел 4.4). Канада также рассматривает возможность создания шахтного пункта глубинного геологического захоронения значительной части своих НСАО.

4.3.2. Концепция захоронения

Помимо обеспечения изоляции и локализации на протяжении тысяч лет при проектировании пункта захоронения САО, расположенного на средней глубине, необходимо учитывать и по возможности минимизировать вероятность непреднамеренного проникновения человека в систему захоронения в результате деятельности, затрагивающей подповерхностное пространство (например, при возведении фундаментов зданий, прокладке коммуникаций и транспортных систем). Типичная глубина для такого типа объектов составляет несколько десятков метров.

Время, необходимое для распада САО до безопасных уровней, обуславливает важность учета свойств естественного барьера, обеспечиваемого вмещающей формацией, с точки зрения ограничения потенциального высвобождения радиоактивности в доступную среду. Барьерные характеристики естественной системы включают способность вмещающей формации ограничивать движение грунтовых вод вокруг объекта и удерживать радионуклиды или значительно задерживать их высвобождение в доступную среду. Инженерно-технические барьеры выбираются и проектируются таким образом, чтобы они действовали совместно с естественной системой в течение длительного времени, необходимого для того, чтобы САО распались до безопасных уровней. К инженерно-техническим барьерам можно отнести форму и упаковку отходов, локализирующие конструкции (например, бетонный корпус) и системы герметизации. Кроме того, в концепции проектирования необходимо учитывать более высокий потенциальный уровень мощности эксплуатационной дозы, связанный с САО.

Были разработаны два типа подповерхностных пунктов захоронения САО на средних глубинах: подземные цилиндрические бункеры и горизонтальные выработки. На объекте «Вольсон» (Республика Корея) цилиндрические бункеры (типа силосной башни) используются исключительно для захоронения САО, а в Венгрии в пункте «Батапаати» для захоронения всех образующихся при эксплуатации АЭС отходов используются подземные горизонтальные выработки. В Финляндии и Швеции используются обе системы. В Финляндии за обращение с эксплуатационными отходами и их захоронение отвечают атомные электростанции: на АЭС «Олкилуото» для захоронения НАО и САО используется концепция цилиндрического бункера, а на АЭС «Ловииса» для отходов обоих классов используется захоронение в горизонтальных выработках. Рис. 29 иллюстрирует две соответствующие концепции проектирования.

При выборе между этими двумя концепциями захоронения необходимо учитывать различные факторы. Опыт показывает, что проект строительства подземных цилиндрических бункеров может быть более сложным и дорогостоящим по сравнению с обустройством горизонтальных выработок, но цилиндрические бункеры позволяют обеспечить больший объем для захоронения отходов



РИС. 29. Концепции проектирования подповерхностного захоронения САО на средней глубине на площадках в Финляндии: концепция захоронения в цилиндрических бункерах (слева) (иллюстрация: «Теоллисууден войма ой») и концепция захоронения в горизонтальных выработках (справа) (иллюстрация: АЭС «Ловиуса»).

при равных экскавируемых объемах. Цилиндрические бункеры могут иметь преимущества с точки зрения снижения радиологического облучения работников от размещенных отходов, при этом размещение в горизонтальной выработке может потребовать принятия дополнительных мер по защитному экранированию для достижения аналогичного уровня безопасности для персонала. Окончательный выбор зависит от конкретных условий и характеристик отходов, которые планируется размещать в пункте захоронения, а также от связанных с этим пунктом эксплуатационных требований. Примеры обеих концепций приведены в следующих ниже подразделах.

4.3.3. Типичные примеры

4.3.3.1. Центр по захоронению жидких отходов «Вольсон», Республика Корея

Корейское агентство по радиоактивным отходам (КОРАД) было создано в 2009 году и отвечает за обращение с радиоактивными отходами всех типов, включая НАО, САО, ВАО и ИЗРИ. В 2007 году агентство КОРАД начало строительство первого в Корее пункта захоронения НАО и САО — Центра по захоронению радиоактивных отходов низкого и среднего уровня активности «Вольсон» (ЦЗНСВ). После завершения строительства комплекс пункта захоронения «Вольсон» будет обеспечивать захоронение САО в подземных цилиндрических бункерах, которые в настоящее время находятся в эксплуатации, и САО в системе приповерхностных бетонных камер захоронения, оборудованных инженерно-техническими средствами. ЦЗНСВ — это первый объект для захоронения радиоактивных отходов, который был специально разработан для размещения в нем двух пунктов захоронения различного типа. Поскольку в цилиндрических бункерах вместе с САО может производиться захоронение некоторого количества НАО, в агентстве KORAD отходы, размещаемые в этих бункерах, называют НСАО.

В ЦЗНСВ будет осуществляться захоронение НАО и САО, образующихся при эксплуатации и выводе из эксплуатации атомных электростанций, исследовательских центров, предприятий по переработке ядерного топлива и других объектов, на которых образуются отходы. Радиоактивные отходы упаковываются в бочки емкостью 200 или 320 л. Конечная планируемая емкость захоронения в ЦЗНСВ составляет 800 000 упаковок отходов из расчета использования бочек емкостью 200 л. Бочки с отходами, предназначенные для захоронения в цилиндрических бункерах, помещаются в бетонные контейнеры для захоронения по 16 (4 × 4) или 9 (3 × 3) бочек. Максимальный вес контейнеров для захоронения в комплексе по 16 и 9 бочек составляет 18,34 т

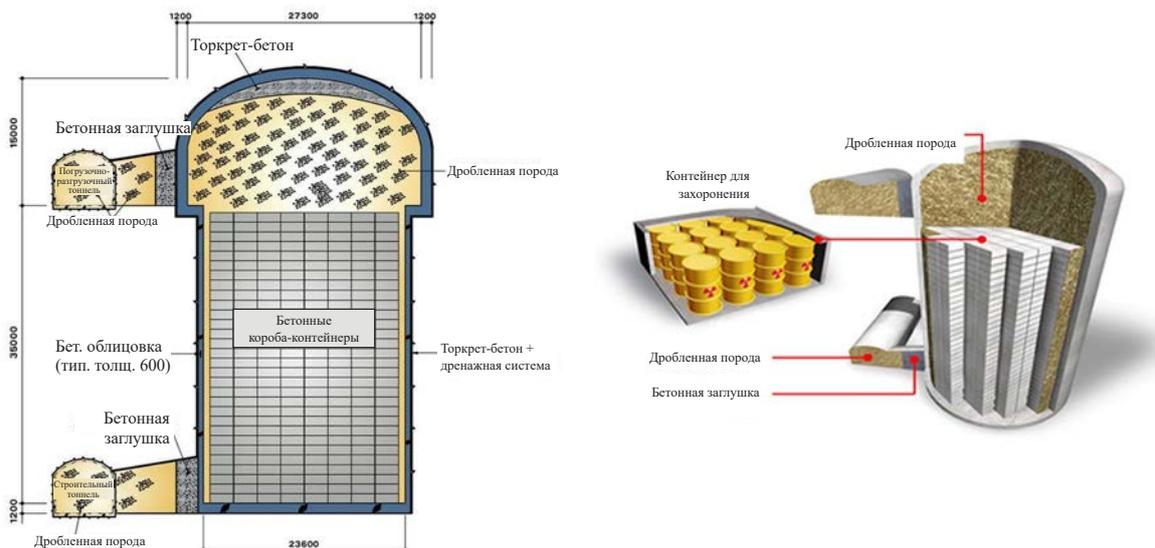


РИС. 30. Концепция размещения отходов в цилиндрических бункерах в Центре по захоронению радиоактивных отходов низкого и среднего уровня активности «Вольсон», Республика Корея (иллюстрация: КОРАД).

и 10,81 т, соответственно. В общей сложности в 6 цилиндрических бункерах будет размещено для захоронения 100 000 упаковок (при использовании бочек меньшего размера). Каждый цилиндрический бункер вмещает около 1000 бетонных контейнеров. Рис. 30 иллюстрирует концепцию проектирования цилиндрических бункеров.

Работы первой очереди строительства в ЦЗНСВ были начаты в 2007 году и включали сооружение 6 подземных цилиндрических бункеров; строительство этих бункеров было завершено в 2014 году, и впоследствии они получили лицензию на прием отходов. Комплекс находится в эксплуатации, и его заполнение продолжается. Вторая очередь комплекса — приповерхностный пункт захоронения проходит процедуру получения лицензии на строительство.

Шесть цилиндрических бункеров для захоронения САО расположены на глубине 80–130 м, их общая высота составляет около 50 м, а диаметр равен 25 м. Эти цилиндрические бункеры размещены в выемках в гранитной вмещающей формации. Они соединены с поверхностью системой параллельных тоннелей, используемых для строительства и при эксплуатации. Строительный тоннель обеспечивает доступ к основанию каждого цилиндрического бункера, а верхний эксплуатационный тоннель используется для укладки отходов. Для доступа персонала и посетителей, а также для вентиляции предусмотрен вертикальный ствол. Вспомогательные сооружения расположены на поверхности и включают: корпус для приемки, проверки и хранения отходов; корпус для обработки радиоактивных отходов; главный центр управления; цех технического обслуживания оборудования; центр приема посетителей.

Радиоактивные отходы транспортируются в контейнерах для захоронения по верхнему тоннелю и опускаются краном в заранее определенное место для финального захоронения. Точное местоположение и содержимое каждого контейнера документально фиксируется. После размещения всех отходов оставшееся пустое пространство в каждом цилиндрическом бункере будет заполнено дробленой породой в качестве материала обратной закладки. В местах доступа к цилиндрическим бункерам будут установлены бетонные заглушки. На рис. 31 показана загрузка отходов в цилиндрический бункер.

Основными барьерами на пути высвобождения радионуклидов являются инженерно-технические системы, специально спроектированные для использования в естественной среде на площадке, что подтверждается результатами оценки безопасности. Инженерно-технические



РИС. 31. Размещение отходов в цилиндрическом бункере в Центре по захоронению радиоактивных отходов низкого и среднего уровня активности «Вольсон», Республика Корея (фото: КОРАД).

барьеры включают упаковку отходов, контейнер для захоронения, материал обратной закладки (засыпки) и бетонный цилиндрический бункер. Бетонные стены каждого цилиндрического бункера имеют проектную толщину не менее 1,2 м и играют важную роль в ограничении инфильтрации подземных вод в бункер и в значительном снижении миграции радионуклидов из захороненных отходов в окружающую среду. Проницаемость бетонного цилиндрического бункера будет со временем постепенно расти вследствие естественных процессов деградации, и в конечном итоге бетонные цилиндрические бункеры потеряют свою эффективность в качестве барьера, препятствующего инфильтрации подземных вод и обеспечивающего удержание радионуклидов. В этот период свойства естественных барьеров на площадке будут играть первичную роль в изоляции и локализации отходов. Минералогический состав гранита обеспечивает сорбцию радионуклидов, и при малых зарегистрированных скоростях движения подземных вод значительно снижаются концентрации радионуклидов, могущих попасть в окружающую среду.

4.3.3.2. Пункт финального захоронения короткоживущих радиоактивных отходов, Швеция

Пункт финального захоронения короткоживущих радиоактивных отходов («SFR») размещен рядом с площадкой АЭС «Форсмарк». Он находится в собственности «Svensk Kärnbränslehantering» («СКБ») — Шведской компании по обращению с ядерным топливом и отходами и эксплуатируется этой компанией. Как показано на рис. 32, пункт захоронения «SFR» расположен на глубине около 50 м под Балтийским морем. Вмещающая формация состоит из кристаллической породы, содержащей гнейс и гранит. В настоящее время на объект поступают НАО и САО, большая часть которых образуется в результате работы шведских атомных электростанций, хотя он также принимает отходы, возникающие в результате деятельности медицинских, ветеринарных, научно-исследовательских учреждений и промышленных предприятий.

Эксплуатация пункта захоронения «SFR» была начата в 1988 году. Пропускная способность объекта составляет около 600 м³ отходов в год, а общая вместимость равна 63 000 м³. В зависимости от действующих требований захоронение отходов осуществляется в одной из

четырёх прорубленных в скальной породе камер захоронения либо в цилиндрическом бункере. Эти сооружения показаны на рис. 32 белым цветом и включают подземный пункт управления. Предусматривается также расширение мощностей по захоронению для принятия отходов от будущих работ по выводу из эксплуатации шведских атомных электростанций. Планируемое расширение будет включать пять располагающихся в окружающей породе камер захоронения длиной 275 м каждая и шестую камеру длиной 240 м. Также планируется построить новый тоннель для транспортировки целых корпусов реакторов. На рис. 32 показаны существующий объект и планируемое расширение также, выделенное синим цветом.

В настоящее время на объекте «SFR» имеется три камеры захоронения, построенные в скальном массиве в двух разных конфигурациях, которые предназначены для захоронения НАО, а также камера захоронения и цилиндрический бункер в скальной породе для захоронения САО. Отходы с самым высоким уровнем радиоактивности подлежат захоронению в цилиндрическом бункере [36].

НАО размещаются в камере захоронения 1BLA и состоят в основном из радиоактивно загрязненного мусора и металлолома, хранящегося в ISO-контейнерах. Длина камеры захоронения составляет 160 м, и она имеет бетонный пол. Некоторые отходы в контейнерах дополнительно помещаются в бочки или в другие контейнеры. ISO-контейнеры укладываются штабелями бок о бок в два ряда с тремя полными по высоте контейнерами либо с шестью полуконтейнерами, укладываемыми друг на друга. Временная крыша из гофрированной стали помогает ограничить поступление влаги к отходам (см. рис. 33). Камеры захоронения 1BTF и 2BTF предназначены для захоронения НАО с более высокой активностью, состоящих в основном из обезвоженных отработавших ионообменных смол в бетонных контейнерах емкостью 10 м³ (называемых компанией «СКБ» танками), а также золы в стальных бочках и бетонных коробах (называемых компанией «СКБ» формами) с отработанными ионообменными смолами в цементной матрице. Камера 2BTF предназначена для размещения бетонных контейнеров с отходами объемом 10 м³. Камера 1BMA используется для размещения НАО с более высокими уровнями короткоживущей

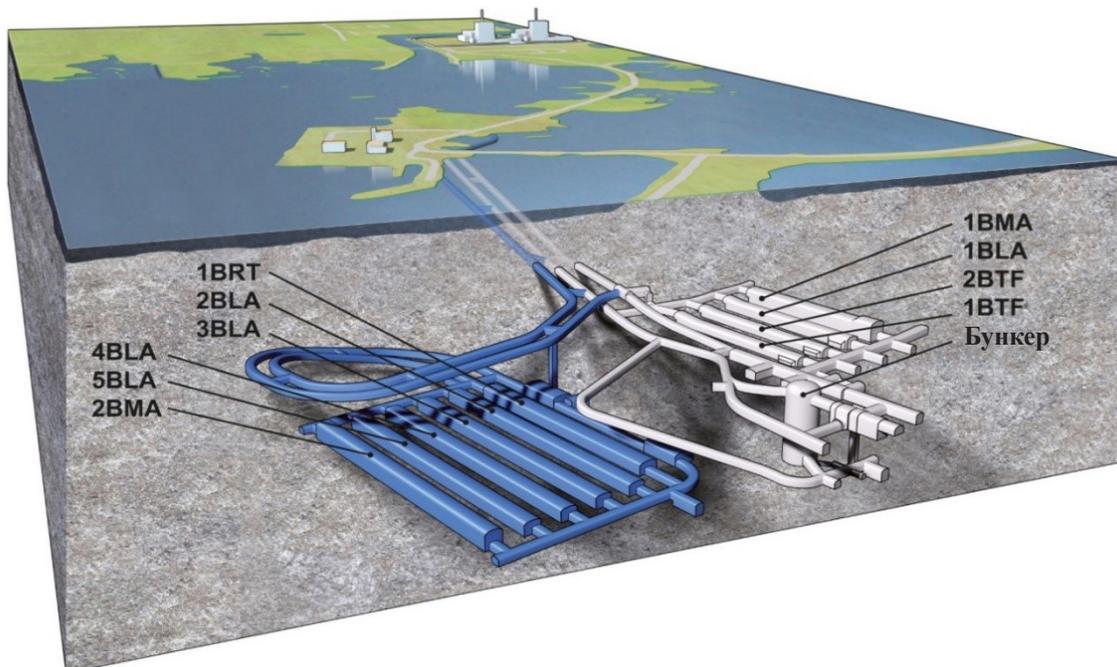


РИС. 32. Схема существующего захоронения (выделено белым цветом) и планируемого расширения (выделено синим цветом) на объекте «SFR», АЭС «Форсмарк», Швеция (иллюстрация: «СКБ»). Примечание: BMA, BLA, BTF, BRT — это обозначения, используемые «СКБ» для различных конструкций камер захоронения, предназначенных для разных типов отходов.



РИС. 33. Камеры захоронения НАО в пункте захоронения «SFR», Швеция (фото: «СКБ»).

активности. Длина камеры захоронения 1ВМА также составляет 160 м. При закрытии объекта камеры захоронения будут заполнены бетоном в качестве материала обратной закладки.

САО загружаются в бетонный цилиндрический бункер, который размещается в выемке в кристаллической вмещающей породе. Высота цилиндрического бункера составляет 70 м, при этом 50 м отводится для захоронения. Его диаметр составляет около 30 м. Внешняя стенка цилиндрического бункера изготовлена из железобетона. Свободное пространство заполняется бентонитом. Основание цилиндрического бункера выполнено из железобетона толщиной 1 м и покоится на песчанобentonитовой подушке, отделяющей бункер от вмещающей породы. Сам цилиндрический бункер разделен на несколько прямоугольных отсеков шахтного типа, в которые помещаются отходы. Отходы в основном состоят из отработанных ионообменных смол, отвержденных в цементе или битуме, с некоторым количеством цементированного мусора и металлолома. Они заключены в бетонные или стальные коробки для отходов (формы) или стальные бочки, размещаемые группами на поддонах для захоронения. После укладки в шахты на определенном расстоянии друг от друга производится заливка бетоном для заполнения пустот, что позволяет продолжать проведение дальнейших работ по захоронению. При закрытии цилиндрического бункера оставшееся свободное пространство будет заполнено бетоном.

Около 90 процентов всей радиоактивности, содержащейся в настоящее время на объекте «SFR», сосредоточено в цилиндрическом бункере. В обосновании безопасности особое внимание было уделено инженерно-техническим барьерам, задерживающим потенциальное высвобождение радионуклидов после закрытия объекта; бентонитовый буфер и бетонные стены цилиндрического бункера считаются значительными барьерами, препятствующими миграции радионуклидов. Оценка безопасности данного пункта захоронения рассчитана на 10 000 лет, но при этом большая часть радиоактивности распадется до фоновых уровней уже через 500 лет [37].

Расширение пункта захоронения «SFR» позволит увеличить мощности, используемые для захоронения НАО и САО с более низким уровнем активности, за счет дополнительных камер захоронения, построенных по проектам камер ВЛА и ВМА.

4.4. ЗАХОРОНЕНИЕ В ГЛУБОКИХ СТАБИЛЬНЫХ ГЕОЛОГИЧЕСКИХ ФОРМАЦИЯХ

ВАО и ОЯТ, если оно признается отходами, остаются опасными в пределах геологических шкал времени. Отходы создают высокие уровни радиоактивности и тепла, которые должны учитываться в концепции захоронения. Значительное выделение тепла может продолжаться в течение периода от сотен до нескольких тысяч лет, и уровень радиоактивности может оставаться опасным для здоровья человека и окружающей среды в течение сотен тысяч лет, что во много десятков раз превышает продолжительность зарегистрированной истории человечества. Поэтому концепция захоронения таких отходов должна основываться на принципах долгосрочной пассивной безопасности, и уже

давно существует международный консенсус, согласно которому захоронение этого типа отходов может производиться только в соответствующих глубоких стабильных геологических формациях; такое захоронение часто называется глубинным геологическим захоронением. Концепция глубинного геологического захоронения ВАО была впервые предложена более 60 лет назад Национальной академией наук Соединенных Штатов Америки [38]. Начиная с этого времени каждое государство-член, планирующее проведение работ по захоронению, рассматривает ту или иную форму глубинного геологического захоронения в качестве наиболее подходящего способа финальной изоляции ВАО и ОЯТ от окружающей среды.

4.4.1. Общие вопросы

Под ВАО, как правило, понимаются отходы, образующиеся в результате химической переработки (репроцессинга) отработавшего ядерного топлива. В состав образующихся отходов входят высококонцентрированные жидкие растворы, содержащие продукты ядерного деления. Эти жидкости обычно подвергаются отверждению и превращаются в стеклянные или керамические отходы, пригодные для хранения и последующего захоронения. Многие государства-члены также классифицируют непереработанное ОЯТ как отходы, требующие прямого геологического захоронения.

На сегодняшний день ни одно из государств-членов не построило и не эксплуатирует пункт глубинного геологического захоронения ВАО или ОЯТ, но при этом был достигнут значительный прогресс в демонстрации осуществимости ряда концепций проектирования. В частности, Финляндия добилась значительного прогресса и начала работы по строительству пункта захоронения после получения в 2015 году лицензии на строительство. Ожидается, что ООО «Посива» подаст заявку на получение эксплуатационной лицензии на захоронение ОЯТ примерно в 2020 году. Швеция также подала заявку на получение лицензии на строительство пункта захоронения ОЯТ, которая была рассмотрена регулирующими органами и находится на рассмотрении шведского экологического суда. Соединенные Штаты Америки завершили подготовку заявки на получение лицензии на строительство пункта захоронения на площадке «Юкка-Маунтин» в штате Невада, которая была представлена на рассмотрение регулирующим органам в 2008 году. Политические события, однако, привели к приостановке практически всех работ, связанных с рассмотрением лицензии. Во Франции в настоящее время ведется активная работа по подготовке заявки на получение лицензии и техническому проектированию пункта глубинного геологического захоронения ВАО. Германия, добившаяся значительного прогресса, в частности, в разработке пилотных поверхностных пунктов захоронения, а также в проведении подповерхностных исследований в поддержку предварительной оценки безопасности, приняла решение возобновить свою программу по выбору площадки с учетом мнений заинтересованных сторон. Большинство других стран, активно занимающихся обращением с ВАО и/или ОЯТ, находятся на стадии выбора площадки либо на этапе подготовки к выбору площадки для пункта геологического захоронения.

Первый специализированный пункт глубинного геологического захоронения — комплекс «WIPP» в Карлсбаде, шт. Нью-Мексико, был построен и введен в эксплуатацию в 2000 году. Первоначально планировалось, что захоронению будут подлежать ВАО, однако впоследствии было принято решение об ограничении инвентарного списка (реестра) отходов, подлежащих захоронению в комплексе «WIPP», нетепловыделяющими НСАО. Национальная лаборатория им. Лоуренса в Беркли, Соединенные Штаты Америки, подготовила справочник по применяемым в мире методологиям захоронения радиоактивных отходов [39], в котором основное внимание уделено пунктам глубинного геологического захоронения и описаны потенциальные проблемы, которые могут возникать по мере развития программ по созданию пунктов захоронения, а также изложены возможные методы обмена концепциями проектирования и разработки обоснования безопасности.

4.4.2. Концепция захоронения

Концептуальная основа геологического захоронения также базируется на многобарьерной системе, в которой ряд инженерно-технических и естественных барьеров действует пассивно и совместно и обеспечивает изоляцию отходов и локализацию содержащихся в них радионуклидов. Относительная эффективность различных барьеров в разное время после закрытия пункта геологического захоронения и их взаимодействие друг с другом зависят от геологической среды, в которой планируется строительство пункта. Следовательно, в разных концепциях геологического захоронения элементы многобарьерной системы могут работать по-разному в различное время, выполняя функции по изоляции и локализации в целях обеспечения высокого уровня безопасности. В практике многих национальных программ по геологическому захоронению предусматривается определение функций безопасности для каждого элемента с установлением вклада каждого конкретного барьерного элемента в обеспечение безопасности после закрытия объекта. Эти функции варьируются в зависимости от концепции захоронения, геологической среды и сроков, в течение которых должна обеспечиваться их эффективность. Общая безопасность системы захоронения не зависит только от одной из этих функций, а обусловлена взаимодействием этих функций друг с другом по мере медленного эволюционирования состояния закрытого пункта захоронения.

На сегодняшний день детально изучены четыре основных типа пород в качестве вмещающих формаций для геологического захоронения: аргиллитовые отложения (глины, отвердевший ил, мергели), твердые кристаллические подстилающие породы (гнейсы, граниты), эвапоритовые формации (в основном пластовая или купольная каменная соль) и сваренные вулканические туфы. Характеристики выбранной вмещающей формации и фактические условия, существующие на выбранной площадке, будут доминирующими при выборе проектных решений.

Функции безопасности применительно ко всем типам пород могут включать устойчивость формы отходов к выщелачиванию, коррозионную стойкость контейнеров для отходов, сорбционные свойства и низкую проницаемость материала обратной закладки (засыпки) и свойства вмещающей геологической формации, которые обеспечивают механически и химически стабильную среду с малыми скоростями движения подземных вод (низкой проницаемостью подземных вод) для инженерно-технических барьеров, а также замедляют миграцию радионуклидов и позволяют обеспечить изоляцию от доступной среды.

При определении потенциально пригодных условий для вмещающих пород, которые могут быть использованы при сооружении пунктов геологического захоронения, можно руководствоваться следующими общими принципами:

- глубина залегания. Геологическая изоляция достигается путем обеспечения достаточной разделенности между пунктом захоронения и биосферой, включая зоны инженерно-технических систем герметизации. Кроме того, такие факторы, как скорость движения и химический состав глубинных подземных вод, механические и прочностные свойства пород, могут определять практическую и функциональную глубину пункта захоронения;
- мощность формации. Для размещения инженерно-технических выработок и обеспечения разделенности между объектом по захоронению и окружающими формациями, которые могут иметь менее подходящие свойства локализации, требуется достаточная мощность (толщина) и соответствующее латеральное простираие вмещающей формации. Мощность формации является особенно важным фактором в случае слоистых осадочных формаций;
- однородность и структура. Предпочтительно наличие достаточно однородной вмещающей формации, так как она позволяет упростить характеристику породы, уменьшить неопределенности при оценке функциональных характеристик, а также облегчить планирование строительства и эксплуатацию пункта захоронения;

- тектоническая стабильность. Регионы с низким уровнем сейсмичности, поднятия/эрозии и вулканической активности являются благоприятными для проектирования пункта захоронения и его долгосрочного функционирования;
- гидрогеология. Низкая гидравлическая проводимость вмещающей формации и малые скорости движения подземных вод через нее и окружающие формации способствуют обеспечению долгосрочной локализации. Очень низкие скорости движения и геологически стабильные условия также могут способствовать формированию системы переноса, в которой преобладают диффузионные процессы (а не потоки воды), в сочетании со специально спроектированными инженерно-техническими барьерами;
- геохимия. Условия химического восстановления минимизируют коррозию инженерно-технических барьеров и форм отходов и могут снизить растворимость радионуклидов и улучшить сорбцию.

Во многих программах, в рамках которых разрабатываются объекты по захоронению ВАО или ОЯТ, планируется параллельное захоронение САО в той же вмещающей формации. В планах программ, как правило, предусматривается размещение отходов в разных частях подземных объектов, в том числе на различной глубине, что позволяет учитывать различные требования, предъявляемые к инженерно-техническим барьерам применительно к каждому классу отходов. Особое внимание при этом уделяется обеспечению надлежащего разделения объемов породы, в которую помещаются различные категории отходов, с целью исключить любые потенциальные неблагоприятные (например, химические) взаимодействия между отходами или барьерными материалами.

4.4.3. Типичные примеры

В следующих ниже подразделах приводятся примеры пунктов геологического захоронения ВАО и/или ОЯТ, которые находятся в стадии разработки, с использованием каждого из основных типов пород, описанных ранее.

4.4.3.1. Формации аргиллитовых пород

Аргиллитовые осадочные формации содержат большое количество глинистых минералов, которые обуславливают их низкую проницаемость и высокую удерживающую способность. Они могут иметь различную степень уплотненности и механической прочности — от пластичных глин до отвердевших иловато-глинистых пород и сланцев. Ряд стран рассматривает аргиллитовые формации для захоронения ВАО/ОЯТ, в том числе Бельгия (пластичная глина), Франция (аргиллит) и Швейцария (окаменелая глина). Каждая из этих стран осуществляет перспективные программы по созданию пунктов захоронения и располагает значительной научной базой, сформированной в результате многолетних натурных испытаний.

- а) Промышленный центр геологического захоронения (Centre industriel de stockage géologique) — французская концепция захоронения ВАО и САО

Начиная с 1993 года во Франции агентство «Андра» изучает осуществимость безопасного захоронения с возможностью извлечения и перезахоронения ВАО и САО в глубоких глинистых формациях. НИОКР и эксперименты, проведенные в подземной лаборатории, находящейся в районе населенного пункта Бюр, были использованы для итеративной консолидации и демонстрации характеристик безопасности Промышленного центра геологического захоронения («Сижео») — пункта глубинного геологического захоронения, спроектированного агентством «Андра». В случае получения разрешения от ответственных органов подготовку к строительству центра «Сижео» планировалось начать в 2022/2023 годах, с тем чтобы вскоре после оформления

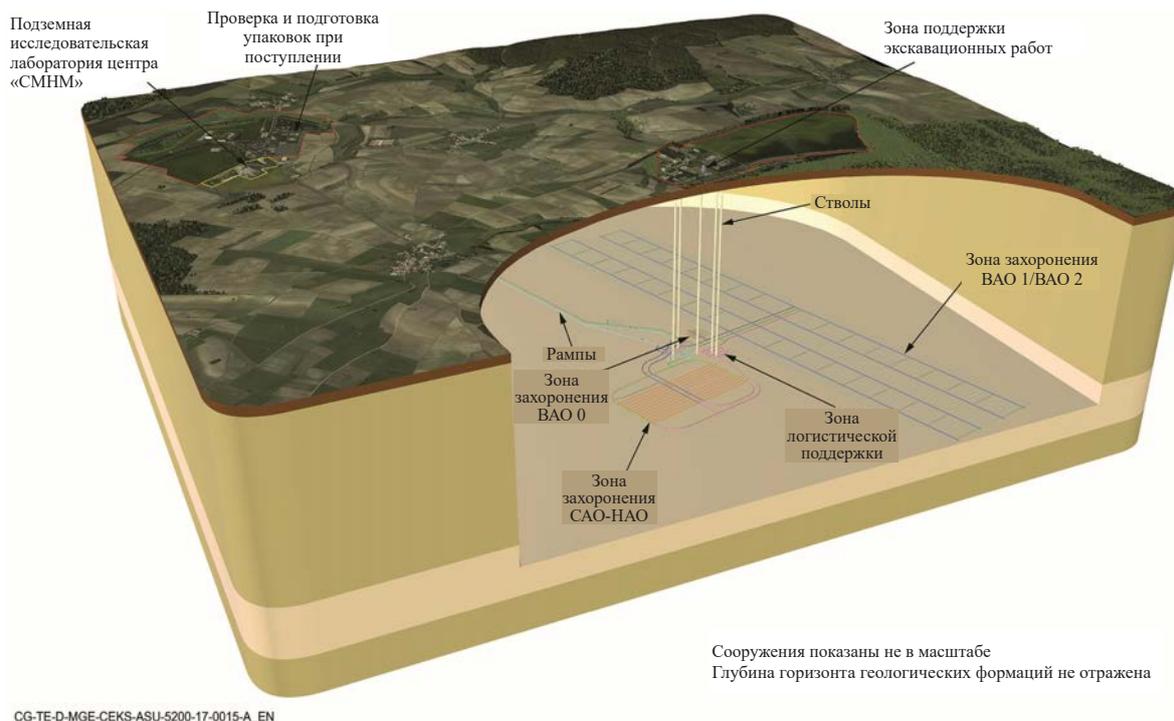


РИС. 34. Схематическое изображение наземных и подземных объектов центра «Сижео» на окончательной стадии ввода в эксплуатацию (иллюстрация: «Андра»).

лицензии приступить к строительству самого пункта захоронения. Согласно имеющимся планам, эксплуатация пилотной очереди начнется до конца этого десятилетия. Ожидается, что полный эксплуатационный период центра «Сижео» будет длиться более ста лет. Концепция предусматривает обеспечение обратимости захоронения (возможности последующего извлечения отходов), с тем чтобы будущие поколения были в состоянии принимать собственные решения в отношении наилучшего способа обращения с ВАО. Концепция обратимого захоронения включает подход к управлению, позволяющий сохранить возможность принятия решений и в будущем. Это также подразумевает обеспечение определенного уровня гибкости в разработке проекта центра «Сижео». Кроме того, концепция обратимого захоронения предполагает осуществление мониторинга деятельности и развития центра «Сижео», а также поддержку непрерывного проведения НИОКР с целью получения данных и информации, которые могут потребоваться для обоснования будущих решений.

Проект центра «Сижео» предназначен для захоронения как ВАО, так и долгоживущих САО, как показано на рис. 34. Согласно французской классификации отходов, во Франции проводится различие между долгоживущими САО и короткоживущими САО; в центре «Сижео» будет осуществляться захоронение только долгоживущих САО, а также ВАО.

Отходы будут размещаться на глубине около 500 м в центре непроницаемой аргиллитовой формации (келловей-оксфордского аргиллита) мощностью около 140 м. Подземный объект состоит из трех основных зон: центральной зоны материально-технического обеспечения, связанной с наземными сооружениями посредством стволов и рампы для перемещения упаковок отходов, и двух отдельных зон захоронения ВАО и САО. Поскольку строительство будет вестись поэтапно в течение эксплуатационного периода, работы по перемещению отходов и строительные работы физически будут разделены и осуществляться в разных галереях доступа. Агентство «Андра» еще на ранних этапах своей программы приняло решение о захоронении отходов в упаковках, что потребует использования экранированных бочек во время всех операций по перемещению отходов.

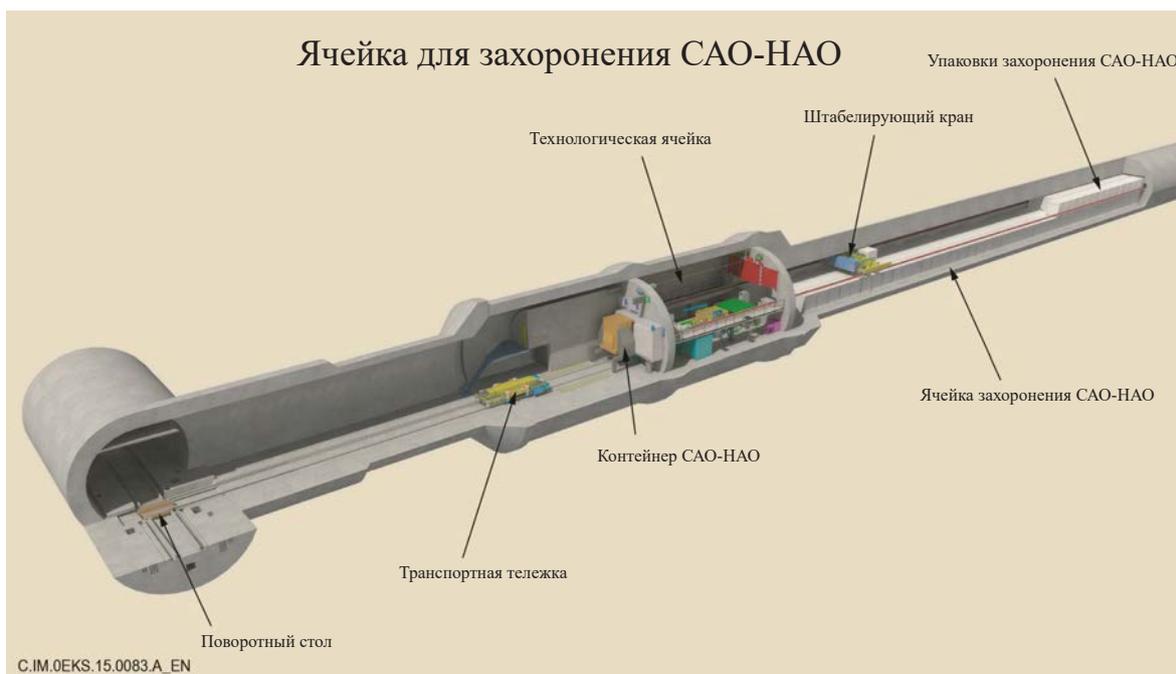


Рис. 35. Конструкция ячейки для захоронения долгоживущих CAO (иллюстрация: «Андра»).

Тоннели для захоронения, ориентированные по направлению главного напряжения основной породы, состоят из двух блоков ячеек для захоронения и зоны стыковки/сопряжения.

Ячейки для захоронения CAO с тоннелем длиной 400–500 м соединены на одном конце с выработкой доступа. Вентиляция каждой ячейки обеспечивается второй выработкой в дальнем конце ячейки со специальным помещением для фильтрации воздуха, которое обеспечивает обратный поток воздуха. Расстояние между упаковками для захоронения отходов представляет собой компромисс между эксплуатационными требованиями и долгосрочной стабильностью, который необходим для обеспечения возможности последующего извлечения отходов. Точный диаметр каждой ячейки для захоронения CAO определяется геометрией упаковки для захоронения, высотой штабелей упаковок и критериями совместного захоронения различных типов долгоживущих CAO. Рис. 35 иллюстрирует концепцию проектирования ячеек для захоронения CAO.

Тоннели для захоронения ВАО (также называемые микротоннелями или ячейками для захоронения) будут иметь длину 80–100 м. Упаковки для захоронения будут размещены в металлической оболочке толщиной не менее 25 мм, окружающей каждый тоннель. Величина поперечного сечения микротоннелей была определена как компромисс между требованиями в отношении разрешения на проведение транспортно-технологических операций с отходами с целью их последующего извлечения и ограничениями, связанными с нарушением зоны вмещающей породы в результате проведения работ по выемке породы. В зависимости от геометрии различных канистр для захоронения отходов диаметр проложенного микротоннеля равен 800–900 мм, при этом диаметр оболочек составляет 800–700 мм. Микротоннели проектируются как глухие конструкции без вентиляции. Расстояние между тоннелями определяется с учетом тепловой нагрузки на вмещающую породу после закрытия объекта. Схематическое изображение ячейки для захоронения ВАО представлено на рис. 36.

Ячейки захоронения имеют металлическую оболочку толщиной не менее 25 мм и диаметром 700 мм. Упаковки с ВАО, называемые CSD-Vs (colis standard de déchets vitrifiés — стандартные упаковки остеклованных отходов), размещаются в металлических контейнерах для захоронения. В рамках стратегии, направленной на обеспечение терморегулирования с целью разделения

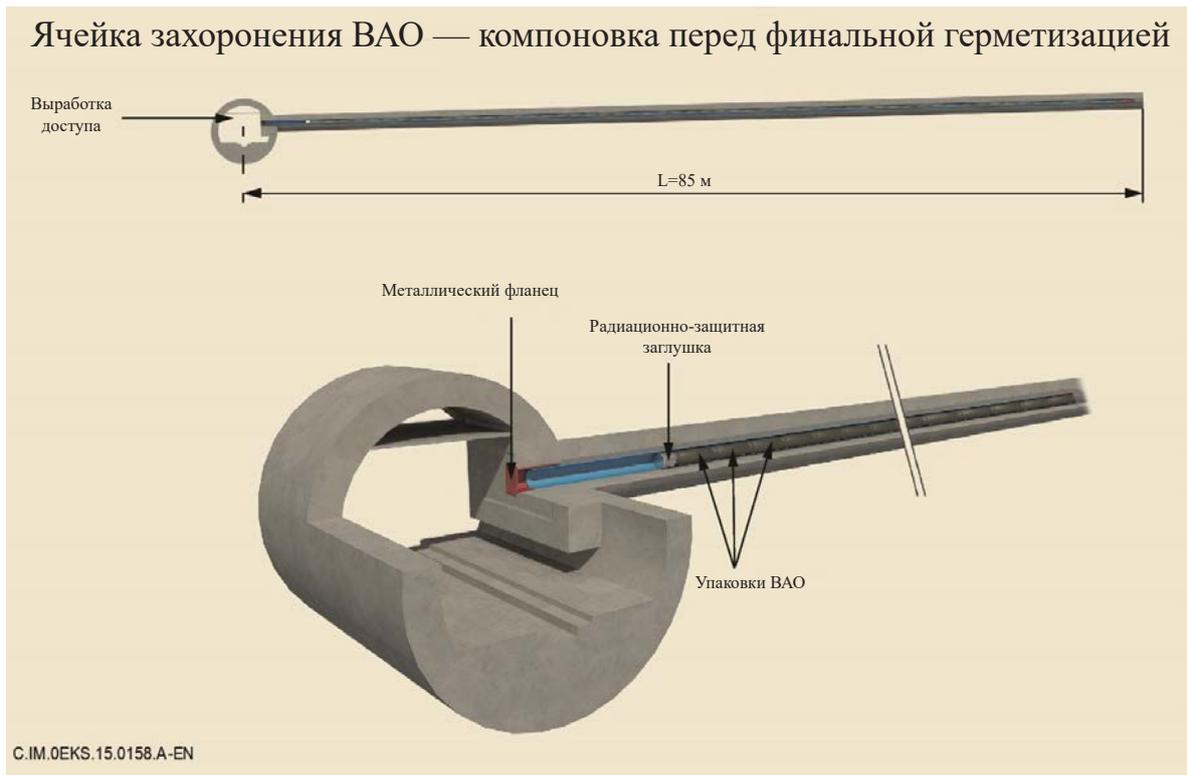


Рис. 36. Поперечный разрез ячейки для захоронения ВАО (иллюстрация: «Андра»).

упаковок для захоронения отходов применяются специальные дистанционные элементы. В период эксплуатации 10-метровая головка ячейки отделяет выработку доступа от размещенных отходов. Головка ячейки имеет металлический фланец и снабжена стыковочными устройствами для контейнеров. После заполнения ячейки устанавливается заглушка для защиты от излучения, и стыковочные устройства удаляются. Обратная засыпка ячеек не предусматривается.

Закрытие подземного пункта захоронения будет осуществляться поэтапно. После закупоривания ячеек для захоронения будет произведена обратная закладка (засыпка) и герметизация выработок доступа, затем основных выработок, далее стволов и наконец рампы. Наземные строения будут демонтированы одновременно с закрытием подземного объекта.

б) Концепция бельгийского пункта глубинного геологического захоронения

Бельгийское национальное агентство по радиоактивным отходам (ОНДРАФ/НИРАС) рассматривает две потенциальные формации вмещающей породы для своей программы строительства пункта глубинного геологического захоронения: бумские и ипрские глины. Обе формации состоят из слабо затвердевших глин с низкой проницаемостью и высокой пластичностью. Низкая проницаемость и низкая гидравлическая проводимость глин являются ключевыми факторами в обосновании безопасности.

В референтном проекте пункта захоронения предусматриваются отдельные зоны захоронения для САО и ВАО/ОЯТ. Согласно концепции данного пункта захоронения, рассматриваемой в рамках осуществляемой программы НИОКДР, размещение отходов планируется на глубине от 200 до 600 м. Компоновка пункта захоронения показана на рис. 37. Тупиковые галереи захоронения создаются перпендикулярно основным галереям доступа во вмещающей формации. Проект осуществляется с разделением на две очереди, без одновременного проведения строительных работ и работ по захоронению отходов. В ходе первой

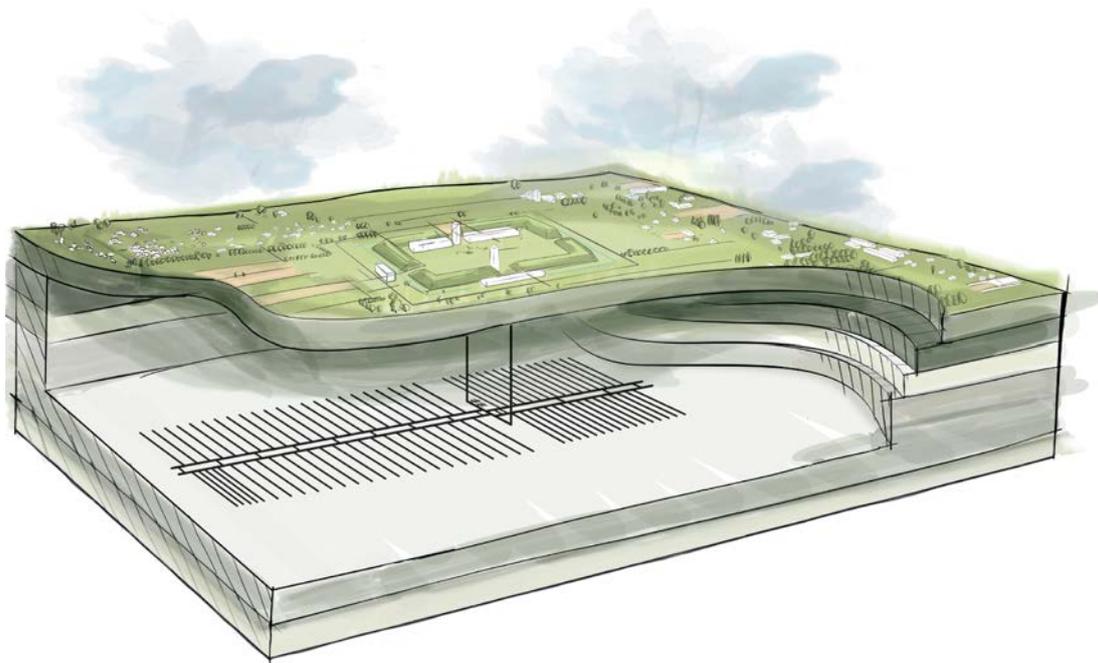


РИС. 37. Общая компоновка концептуального решения бельгийского пункта глубокого геологического захоронения (иллюстрация: ОНДРАФ/НИРАС).

очереди эксплуатации будет производиться размещение САО, а в период второй очереди будут осуществляться соответствующие строительные работы и размещение ВАО. Доступ в подземную зону будет осуществляться через два ствола, которые располагаются между двумя зонами укладки. Ствол доставки отходов позволит перемещать упаковки с САО и ВАО в зоны захоронения. Ствол доступа предназначен для транспортировки персонала и материалов. Оба ствола используются для обеспечения необходимой вентиляции.

Перед транспортировкой и размещением в пункте захоронения первичные упаковки отходов будут помещаться в предназначенные для захоронения упаковки специальной конструкции. Захоронение САО будет осуществляться в бетонных упаковках «монолит В», в то время как ВАО/ОЯТ будут захораниваться помещенными в стальной транспортный пакет, а затем в «суперконтейнеры», изготовленные из бетона с внешней стальной оболочкой. Цемент в бетоне создает высокощелочную среду, способную замедлять миграцию радионуклидов. На рис. 38 и 39 показаны два типа упаковок отходов.

Упаковки «монолита В» и суперконтейнеры обеспечивают радиологическую защиту работников (максимум 25 мкЗв/ч на расстоянии 1 м), позволяя безопасно проводить транспортно-технологические операции с предназначенными для захоронения упаковками отходов без дополнительной защиты. Помимо радиологической защиты суперконтейнер также должен обеспечивать полную локализацию отходов в период стадии активного тепловыделения, определяемую как период времени, в течение которого температура на стенке выработки остается повышенной, что длится от нескольких сотен до тысяч лет в зависимости от типа захороненных отходов.

В целях решения проблемы, связанной с беспокойством общественности, в проекте учитывается требование об обратимости захоронения, и в концепции проектирования предусматривается возможность последующего извлечения отходов в период до окончания эксплуатационной стадии. Для обеспечения возможности последующего извлечения проводится оценка применения характеризующейся низкой прочностью при сжатии цементной закладки, которая может быть демонтирована с выполнением сравнительно небольшого объема работ [41].

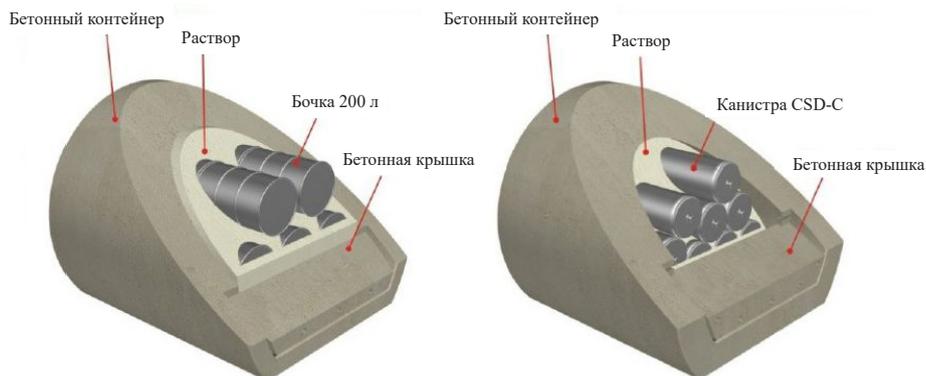


РИС. 38. Бельгийские концепции контейнеров для отходов: бетонный контейнер «монолит В» для САО [41] (иллюстрация: ОНДРАФ/НИРАС).

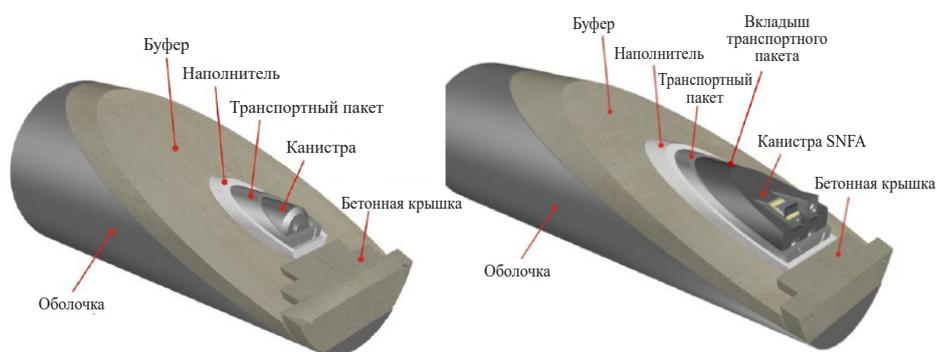


РИС. 39. Бельгийские концепции контейнеров для отходов: суперконтейнер для ВАО/ОЯТ (справа) [40] (иллюстрация: ОНДРАФ/НИРАС).

По мере выполнения операций по захоронению используемые для захоронения галереи будут постепенно заполняться материалом закладки и закупориваться заглушками, а после закрытия всех галерей захоронения будет проведена обратная закладка и герметизация галерей доступа. После закрытия двух зон укладки отходов вспомогательная зона и стволы также будут заполнены материалом закладки (засыпки). Целесообразность установки заглушек и герметизации в нескольких местах пункта захоронения все еще остается открытым вопросом и является предметом продолжающихся НИОКДР.

с) Швейцарская концепция захоронения ВАО/ОЯТ

В Швейцарии Национальное объединение по захоронению радиоактивных отходов («Nagra») выполнило работу по оценке шести потенциальных площадок с благоприятными характеристиками для строительства, эксплуатации, закрытия и обеспечения долгосрочной безопасности пункта глубинного геологического захоронения в рамках второго этапа процесса выбора площадки [42]. После сравнения потенциальных площадок с точки зрения безопасности в 2014 году объединение «Nagra» продолжает работы по исследованию трех потенциальных площадок. В случае всех площадок в качестве вмещающей формации планируется использовать опалиновую глину. Она представляет собой однородную, умеренно пластичную, окаменелую глину с незначительной или нулевой адвекцией флюидов и геохимическими восстановительными условиями. В соответствии с

концепцией швейцарского проекта по захоронению ВАО/ОЯТ предусматривается закладка (засыпка) тоннелей после их заполнения отходами и возможность последующего извлечения отходов до закрытия объекта без необходимости приложения чрезмерно больших усилий. Запланированные подземные сооружения будут включать пилотную и основную зоны захоронения ВАО/ОЯТ, а также исследовательский центр. Рассматривается возможность создания отдельной зоны захоронения САО, но она также может быть совмещена с пунктом захоронения ВАО, который будет построен в формации опалиновой глины. (Следует отметить, что в Швейцарии в категорию САО входят отходы, относимые к классам НАО и САО по классификации МАГАТЭ.)

На первом этапе в пилотный объект будет помещен репрезентативный инвентарный объем отходов с целью проведения наблюдений за поведением и взаимодействием различных типов отходов, материала закладки (засыпки) и вмещающей формации в течение определенного срока в период проведения мониторинга. На протяжении этого времени будет проводиться сбор данных для подтверждения безопасности в период после закрытия объекта с целью обеспечения безопасного закрытия пункта захоронения. Лаборатория для подземных геологических исследований, в которой можно получить данные о свойствах и процессах, имеющих отношение к безопасности, и провести демонстрационные работы в подземных условиях до осуществления операций по захоронению,

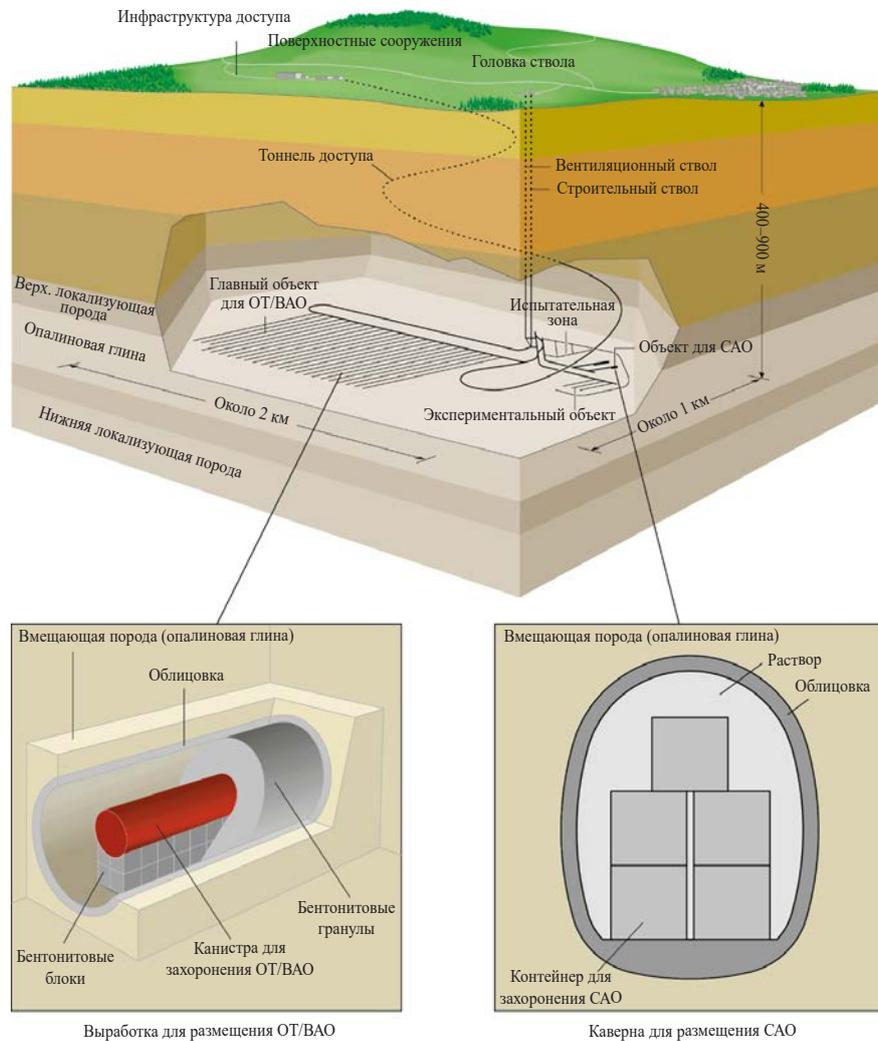


РИС. 40. Примерная компоновка швейцарского пункта захоронения САО и ВАО и его основные сооружения (не в масштабе). (Иллюстрация: «Награ», рис. 3-3 в [43].)

может продолжать исследования как минимум во время некоторой части периода мониторинга. Мониторинг будет проводиться на наземных и подповерхностных объектах, в частности на пилотном объекте, в течение всего периода мониторинга.

Подземные сооружения, согласно проектной концепции (рис. 40), будут построены на глубине в несколько сотен метров под поверхностью земли, примерно в середине формации опалиновой глины. Для оптимального использования имеющегося пространства в пункте захоронения в данной концепции предусматривается несколько пространственно разделенных участков захоронения, каждый из которых имеет несколько камер для размещения отходов, тупиково заканчивающихся во вмещающей формации. Длина каждой камеры для размещения отходов может варьироваться, но не должна превышать 1000 м. Между отдельными подземными сооружениями, а также потенциальными геологическими объектами предусматриваются минимальные расстояния смещения. Камеры захоронения проектируются так, чтобы обеспечивались достаточная механическая стабильность и соответствующие условия для безопасного и надежного строительства, эксплуатации, закладки (засыпки) и герметизации. Камеры для размещения ВАО/ОЯТ будут иметь внутренний диаметр около 3 м и бетонную облицовку. Между отдельными камерами для размещения отходов предусматривается расстояние, равное примерно 40 м, которое позволит обеспечить соблюдение ограничений по тепловому режиму.

Сборки ОЯТ и бочки с ВАО будут загружаться в канистры (контейнеры) специальной конструкции, используемые для захоронения. В данной концепции используются канистры, изготовленные из углеродистой стали. Канистры для захоронения могут вмещать от четырех до девяти сборок ОЯТ, но возможны и другие конфигурации. С целью оптимального использования имеющегося подземного пространства в данной концепции тепловыделение канистр при размещении для захоронения ограничивается 1500 Вт на канистру. Канистры для захоронения отходов будут размещаться коаксиально через определенные интервалы вдоль камер и опираться на постаменты, изготовленные из уплотненных бентонитовых блоков. Сразу после размещения каждой канистры будет производиться закладка (засыпка) соответствующего участка выработки высокоуплотненным гранулированным бентонитом. Бентонитовые блоки и гранулы образуют защитный механический, гидрогеологический и химический буфер вокруг канистр для захоронения. Возможно использование других материалов для обратной закладки. Окончательное решение будет приниматься перед подачей заявки на получение лицензии на строительство.

Для обеспечения прямого физического контакта между бентонитом герметизирующего уплотнения и глиной вмещающей формации могут использоваться промежуточные бентонитовые герметизирующие уплотнения. Эти уплотнения могут устанавливаться с частыми интервалами вдоль камер для размещения отходов. В соответствии с принятой в настоящее время концепцией после заполнения каждой камеры будет производиться финальная герметизация бентонитом.

На данном этапе программы Швейцария также рассматривает возможность создания «комбинированного комплекса захоронения», в котором будут располагаться как пункты захоронения САО и ВАО/ОЯТ, так и отдельные сооружения для размещения различных потоков отходов. В концепции комбинированного комплекса захоронения будет обеспечено пространственное отделение зон захоронения отходов друг от друга, но при этом они будут иметь общие пути доступа. Решение о строительстве двух отдельных пунктов захоронения (раздельно для САО и для ВАО) в разных местах или комбинированного комплекса захоронения в одном месте будет принято перед подачей заявки (заявок) на получение генеральной лицензии.

4.4.3.2. Формации кристаллических пород

В Финляндии и Швеции для захоронения ОЯТ выбраны кристаллические подстилающие породы, а в ряде других стран, включая Республику Корея, Российскую Федерацию, Чешскую Республику, Соединенное Королевство и Японию, рассматривается использование гранитных или гнейсовых пород. В рамках финской и шведской программ были совместно разработаны концептуальные проекты, выбраны и охарактеризованы площадки под пункты захоронения («Форсмарк» в Швеции

и «Олкилуото» в Финляндии), и обе программы находятся на примерно одинаковых стадиях лицензирования, причем в Финляндии уже получена лицензия на строительство. Финскую программу возглавляет компания «Посива», а шведскую — компания «СКБ». Обе ООО были созданы соответствующими предприятиями атомной энергетики в каждой стране специально для управления захоронением радиоактивных отходов. В Финляндии и Швеции используется концепция проекта «KBS-3», которая очень хорошо разработана и служит основой для референтных примеров, оценка которых проводится в ряде других стран.

Геотехнические свойства пород фундамента субкембрийского пенеплена Фенноскандского щита отличаются сочетанием сильно выраженного механического поведения и низкой проницаемости с ограничением просачивания по сетям трещин, различной степенью неоднородности и хорошей теплопроводностью. Сети трещин в кристаллических породах приводят к неоднородной скорости движения подземных вод, которая может быть относительно высокой в верхних сотнях метров коренной породы, но значительно снижаться на типичной глубине размещения пункта захоронения. Адвективный перенос радионуклидов, высвобождающихся из инженерно-технических барьеров в сеть трещин, согласно расчетам, ограничивает эффективность удержания, что предъявляет повышенные требования к функциональным характеристикам упаковки отходов и системы инженерно-технических барьеров для обеспечения требуемой локализации.

Для указанных пунктов захоронения была выбрана глубина 400–500 м. Проекты обоих пунктов захоронения являются относительно схожими, единственное существенное различие заключается в способе транспортировки отходов в подповерхностное пространство для захоронения: в проекте компании «Посива» используется шахтная лифтовая система, а в проекте компания «СКБ» — наклонная раampa. В обоих проектах применяется прямолинейная система тоннелей для захоронения отходов, которые создаются вдоль направления максимального горизонтального напряжения. Концептуальная компоновка обоих пунктов захоронения выстроена на одном горизонте, однако в некоторых странах (например, в Соединенном Королевстве и Японии) рассматривается возможность реализации проектов многоуровневых пунктов захоронения с целью сокращения площади, занимаемой пунктом захоронения. Рис. 41 иллюстрирует компоновку финского проекта пункта захоронения, находящегося в стадии строительства.

В концепции захоронения «KBS-3», используемой в Финляндии и Швеции и первоначально разработанной компанией «СКБ», применяются коррозионно-стойкие долговечные медные

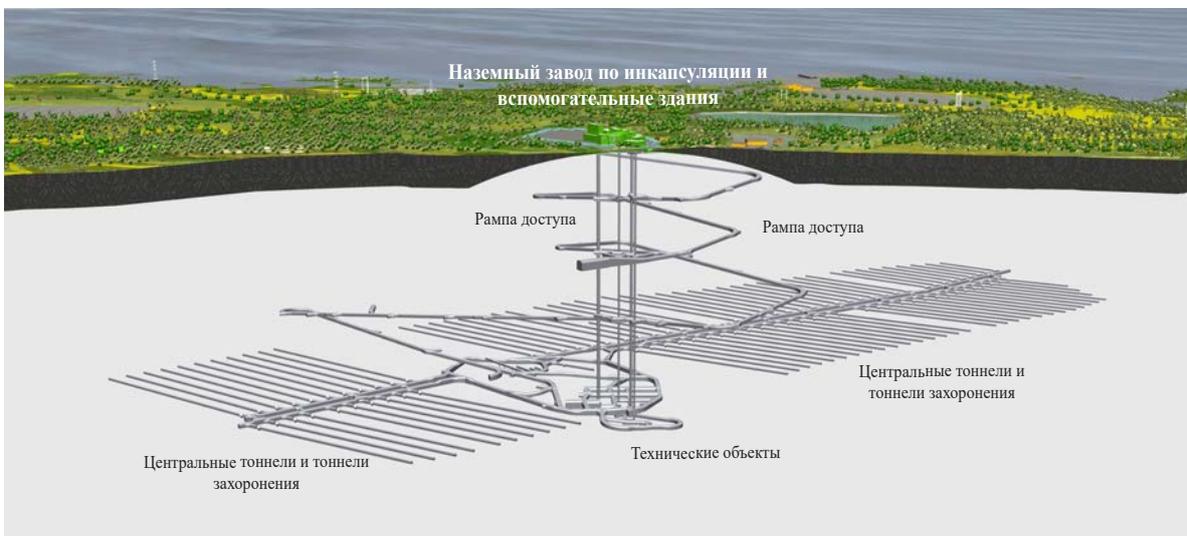


РИС. 41. Компоновка пункта захоронения ОЯТ компании «Посива» на острове Олкилуото, Финляндия (иллюстрация: АО «Посива»).

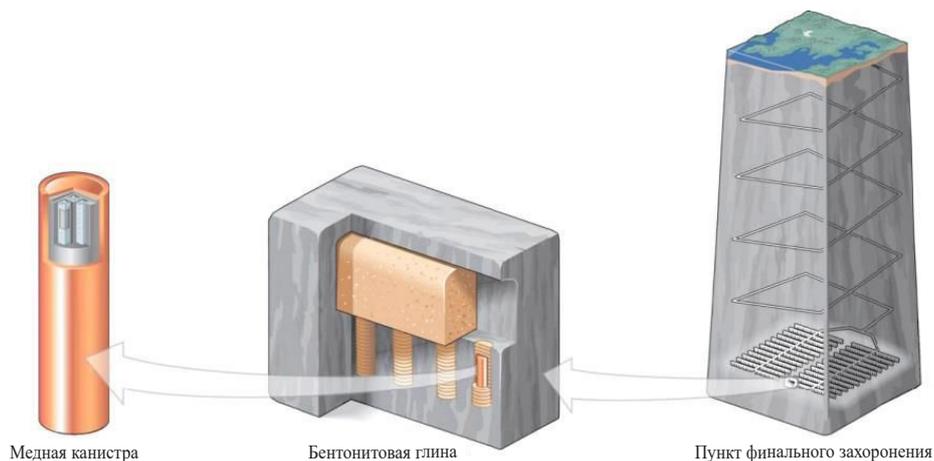


РИС. 42. Концепция захоронения «KBS-3» [44].

канистры для инкапсуляции ОЯТ. Каждая канистра будет помещена в одну вертикальную скважину для захоронения, пробуренную в полу тоннеля для захоронения, и окружена бентонитовым буфером в виде сборных колец, как показано на рис. 42 [44]. Бентонит обеспечивает физическую защиту канистры в случае каких-либо подвижек в породе. Он также действует как гидравлический барьер, ограничивающий движение подземных вод и коррозионных агентов к канистре, а также любых радионуклидов, которые могут высвободиться из отходов в растворе или в коллоидной форме. Очень медленная диффузия является доминирующим процессом переноса растворенных веществ в бентоните. Ожидается, что медная канистра сможет противостоять коррозии в течение как минимум 100 000 лет [45]. Обустройство скважин для захоронения и создание бентонитового буфера, а также системы обратной закладки и герметизации тоннелей были продемонстрированы в подземных исследовательских и демонстрационных лабораториях (Эспё в Швеции и «ОНКАЛО» в Финляндии на площадке пункта захоронения [46]).

Требование, установленное для теплового режима буферного материала, сводится к обеспечению температуры на уровне менее 100°C, поэтому тепловыделение упаковок ОЯТ необходимо ограничивать, а расстояние между канистрами следует выбирать в соответствии с тепловыми свойствами породы. Расстояние между канистрами зависит от конкретной площадки и обычно составляет около 6–10 м. Время хранения ОЯТ перед захоронением и стратегии упаковывания топлива должны соответствовать требованиям, предъявляемым к тепловому режиму. Путем подбора соответствующего сочетания минимального расстояния между отверстиями для захоронения и максимального теплосодержания упаковки обеспечивается выполнение требования, установленного для теплового режима буфера.

На стадии закрытия пункт захоронения будет целиком, включая все ramпы, стволы и тоннели, заполнен материалом обратной закладки (засыпки) и герметизирован. В качестве материала обратной закладки и герметизации обычно используется бентонит. Материал, применяемый для обратной закладки (засыпки), может состоять из крупной россыпи и гранул. В некоторых местах извлеченная порода может быть смешана с бентонитом с целью уменьшения объема грунта, остающегося на поверхности, и сокращения требуемого объема бентонита; однако при этом должны соблюдаться требования, предъявляемые в отношении обеспечения низкой проницаемости системы инженерных барьеров. Компании «Посива» и «СКБ» разработали прототипы оборудования, предназначенного для бурения скважин для захоронения, а также для закладки бентонитового буфера, и прототипы канистр для захоронения и материалов обратной закладки (засыпки) тоннелей и провели их испытания в своих подземных лабораториях.

4.4.3.3. Эвапоритовые формации (например, каменная соль)

Каменная соль (галит), которая может встречаться как в пластовых, так и в купольных структурах, обладает многими благоприятными характеристиками для захоронения радиоактивных отходов. Она практически непроницаема, легко поддается выемке, и благодаря пластичности породы возникающие трещины быстро затягиваются и пустоты естественным образом заполняются. Отходы, размещенные в пункте захоронения в соляной формации, будут полностью инкапсулированы и изолированы от окружающей среды в течение относительно короткого периода времени после закрытия объекта. Кроме того, соль обладает высокой теплопроводностью, что делает ее идеальной средой для захоронения ВАО и ОЯТ. В ряде стран за период более чем 150 лет накоплен богатый опыт добычи соли в шахтах, и с 1970-х годов в Германии [47] и Нидерландах ведутся детальные исследования по захоронению ВАО и ОЯТ в структуре соляных куполов. В Соединенных Штатах Америки исследовались как пластовая, так и купольная соль, причем самые ранние исследования по захоронению тепловыделяющих отходов были начаты в 1960-х годах.

Комплекс «WIPP» — это пункт глубинного геологического захоронения долгоживущих радиоактивных отходов, создание которого было санкционировано Конгрессом США в 1979 году. В 1980-х годах было начато строительство комплекса, наряду с проведением многочисленных экспериментов и демонстрационных работ, связанных с характеристикой и подтверждением функциональных характеристик площадки. Первоначальные концепции комплекса «WIPP» предусматривали захоронение как высокоактивных, так и неактивных отходов, но в 1992 году работы в рамках проекта «WIPP» было решено ограничить захоронением оборонных трансурановых отходов с введением пределов как в отношении общего объема, так и активности отходов, разрешенных к захоронению [48]. В 1998 году Агентство по охране окружающей среды США признало комплекс «WIPP» соответствующим регулирующим положениям по безопасности, и в 2000 году была начата его эксплуатация.

Комплекс «WIPP» обеспечивает постоянную изоляцию САО на глубине 655 м под землей в толще пластовой соляной формации пермского периода. Отходы при выполнении транспортно-технологических операций в контактном режиме перевозятся в прочных контейнерах многоразового использования, в которые укладываются стандартные блоки отходов — семь упаковок бочек объемом 208 л или десять транспортных пакетов с бочками. Складирование отходов этого типа осуществляется в открытых камерах. Отходы, транспортно-технологические операции с которыми осуществляются дистанционно, транспортируются в комплекс «WIPP» в экранированных контейнерах с использованием дорожного транспорта. После доставки в комплекс «WIPP» содержимое контейнеров извлекается с помощью роботов, транспортируется в подземное пространство в отдельной экранированной упаковке, помещается в горизонтальную скважину и закрывается бетонной заглушкой. Все отходы, направляемые в комплекс «WIPP», упаковываются на площадке производителя отходов. Рис. 43 иллюстрирует операции по захоронению отходов.

Камеры захоронения имеют высоту 4 м, ширину 14 м и длину 93 м, и их разделяет 30-метровый целик. В комплексе предусмотрено восемь секций, в каждой из которых по семь камер. Для доступа персонала, выполнения транспортно-технологических операций с материалами, доставки отходов и вентиляции предусмотрены вертикальные стволы с подземным доступом, как схематично показано на рис. 44. Выемка секций производится по мере возникновения в них необходимости, поскольку окружающая соляная порода деформируется и заполняет открытое пустое пространство. Ползучесть соли играет важную роль в процессах, происходящих во время эксплуатации и закрытия объекта. Со временем соляная формация полностью инкапсулирует отходы, обеспечивая их окончательную изоляцию. Мировой опыт добычи соли и других эвапоритовых минералов, таких как калий, позволил получить исключительно обширную базу знаний для использования при выполнении работ по безопасной выемке, контролю за состоянием грунта и эксплуатации объекта.

После закрытия объекта постоянная изоляция обеспечивается устойчивой системой герметизации шахтного ствола, для создания которой используются обычные строительные



РИС. 43. Операции по захоронению отходов в комплексе «WIPP» (США); показаны упаковки отходов, транспортно-технологические операции с которыми выполняются в дистанционном и контактном режимах (фото: Министерство энергетики США).

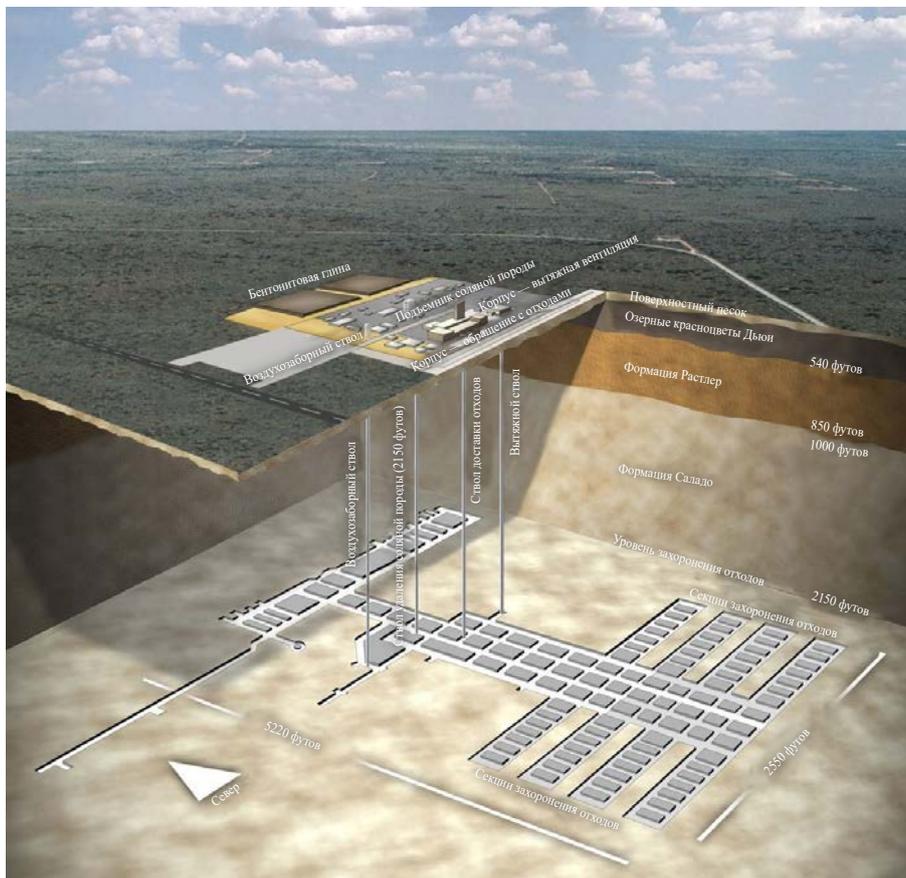


РИС. 44. Компонировка комплекса «WIPP» (США) (иллюстрация: Министерство энергетики США).

материалы, включая битум, соляной бетон, бентонит и реконсолидированную дробленую соль. Для закрытия секций также используется соляная порода. Регулирующий орган потребовал установить дополнительный инженерно-технический барьер из оксида магния (MgO). Он предназначен для снижения растворимости актинидов, потенциально присутствующих в трансурановых отходах. Большие мешки с MgO укладываются сверху штабелей отходов, как показано на рис. 43.

В 1970-х годах в качестве потенциальной площадки для захоронения ВАО в Германии был выбран соляной купол «Горлебен». В 2013 году была завершена работа по предварительной оценке безопасности объекта [47], которая подтвердила осуществимость захоронения выделяющих тепло отходов на этом объекте. Однако спустя два года в результате рассмотрения вопросов, вызывающих обеспокоенность у общественности и политиков относительно беспристрастности первоначального процесса выбора площадки для объекта «Горлебен», был принят новый закон, согласно которому поиск подходящей площадки был возобновлен. В рамках проводимой Германией переоценки имеющихся вариантов захоронения было начато осуществление проекта «KOSINA» [49], целью которого было изучение технической осуществимости и безопасности типовых концепций хранилищ с использованием двух геологических моделей размещения в пластовых залежах соли. Геомеханические факторы определяют геометрию камер и целиков, необходимых для захоронения имеющихся и будущих инвентарных объемов отходов, и проектирование зоны размещения отходов зависит от соблюдения требований, установленных для теплового режима.

В концепциях захоронения в соляных формациях часто используется дробленая соль в качестве природного материала обратной засыпки. Строительные демонстрационные испытания и природные аналоги показали, что реконсолидированная гранулированная соль эволюционирует, достигая тепловых, механических и гидравлических свойств, приближающихся к свойствам ненарушенных соляных формаций. Повторное использование ранее извлеченной соли позволяет повысить эксплуатационную эффективность объекта, сократить объем грузоподъемных работ и оптимизировать логистику транспортировки материалов.

4.4.3.4. *Формации вулканического туфа*

Для захоронения высокоактивных отходов/ОЯТ на площадке «Юкка-Маунтин», расположенной примерно в 160 км к северо-западу от Лас-Вегаса, штат Невада, было рассмотрено использование твердого сваренного вулканического туфа. Как видно из рис. 45, площадка находится в отдаленной пустынной местности. Она характеризуется очень глубоким залеганием подземных вод, в результате чего вмещающие породы пункта захоронения будут оставаться ненасыщенными. Такие гидрогеологические условия делают данную площадку уникальной среди площадок, рассматриваемых во всем мире для размещения пунктов геологического захоронения. Окончательное решение о выборе площадки было принято в 1987 году в результате принятия поправки к Закону о политике в области ядерных отходов, согласно которой полигон «Юкка-Маунтин» стал единственной площадкой для исследований по созданию пункта захоронения ВАО и ОЯТ. Потенциальный пункт захоронения будет расположен в пределах вулканического террейна на глубине около 300 м под землей в пластах высокотрещиноватых сваренных туфов возрастом 13 миллионов лет. Проект, в котором получили широкое применение инженерно-технические барьеры, был принят с подачей заявки на получение лицензии на строительство в 2008 году. Основными характеристиками, которые учитывались при проектировании, являются долговременные ненасыщенные условия, твердая порода с упруго-хрупкой деформацией, низкая или средняя пористость и проницаемость матрицы, высокая пористость и проницаемость трещин, высокая неоднородность и средний уровень теплопроводности. Было принято допущение, что после выхода радионуклидов из инженерно-технических барьеров будет возможен их адвективный перенос в геосфере, и поэтому потенциальные задержки в переносе из-за ненасыщенных условий учитывались в незначительном степени. В связи с этим особое внимание было уделено функциональным характеристикам упаковки отходов и системе инженерно-технических



Рис. 45. Аэрофотоснимок гребня горы Юкка в штате Невада, США (фото: Министерство энергетики США).

барьеров, которые действуют совместно с ненасыщенным вмещающим блоком природной системы, ограничивая или уменьшая количество воды, контактирующей с отходами, и тем самым обеспечивая требуемый уровень локализации.

В данном проекте предусматривается захоронение отходов в выработках с использованием коррозионностойких упаковок отходов, плотно прилегающих друг к другу, без применения обратной закладки (засыпки), что делает этот проект уникальной концепцией «открытого» размещения отходов. В первую очередь решению подлежат проблемы быстрой коррозии, образования потоков паров и конденсации на стадии активного тепловыделения и связанного с ним периода остывания. Благодаря заданному расстоянию между упаковками отходов обеспечивается равномерный нагрев вдоль выработки захоронения, что обеспечивает снижение вероятности образования холодной зоны и связанной с ней конденсации жидкости. Расстояние между выработками выбиралось так, чтобы достигалась минимизация скопления паров жидкости над выработками на стадии активного тепловыделения путем обеспечения достаточно большого расстояния, позволяющего парам конденсироваться и дренировать на целике между выработками. В качестве барьера для влаги и распространения коррозии над упаковками отходов на всей территории зоны захоронения была установлена титановая каплезащитная система. Каплезащитные экраны также обеспечивают защиту упаковок отходов от повреждений при падении породы. Рис. 46 иллюстрирует систему инженерно-технических барьеров и компоновку упаковки отходов [50].

За 30 лет проект пункта захоронения «Юкка-Маунтин» прошел долгий путь от проведения общего анализа до получения в конечном итоге лицензии. Детальное описание характеристик проекта и эволюции процесса его реализации в ходе характеристики площадки изложено в [51]. Заявка на строительство была подана в 2008 году, спустя 10 лет после того, как Министерство энергетики США должно было получить право собственности на гражданское отработавшее ядерное топливо. В 2014 году Комиссия по ядерному регулированию США пришла к выводу, что площадка «Юкка-Маунтин» отвечает требованиям по обеспечению долгосрочной безопасности после окончательного закрытия объекта [52]. В настоящее время проект не осуществляется, и его дальнейшая судьба зависит от принятия решения и выделения финансирования Конгрессом США и завершения регуляторного процесса.

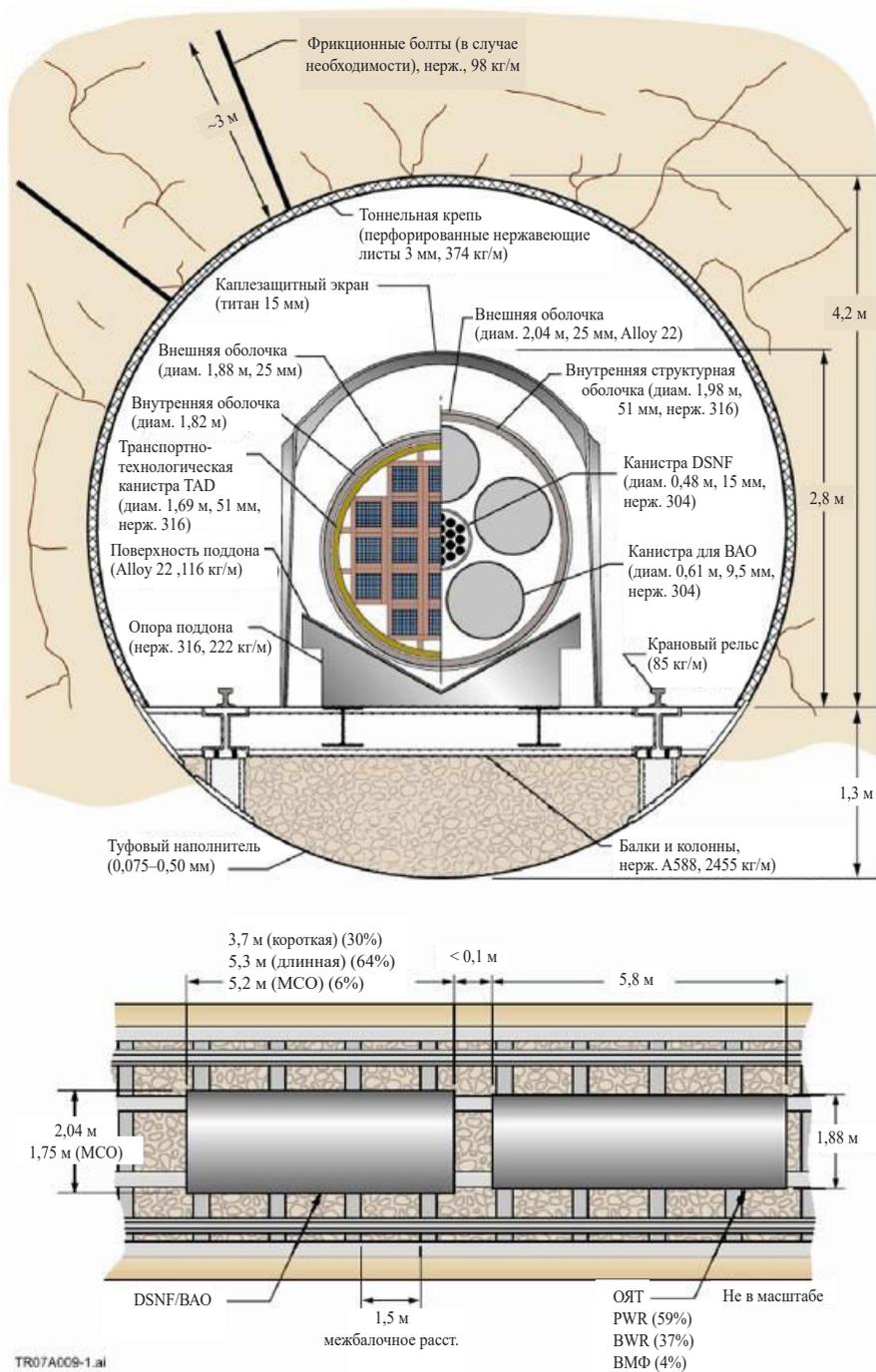


РИС. 46. Инженерно-технический барьер и упаковка отходов для пункта захоронения «Юкка-Маунтин» (иллюстрация: Министерство энергетики США).

В проекте пункта захоронения горизонт захоронения располагается в последовательности сваренных туфовых блоков в районе, характеризующемся длиннопериодным засушливым климатом и глубокой ненасыщенной зоной, и захоронение производится в окислительной среде, и такие условия кардинально отличаются от ранее рассмотренных геологических концепций захоронения. Скорость потока флюидов низкая, но трещиноватость породы обуславливает высокую степень пространственно-временной изменчивости свойств среды в пункте захоронения. Геологическая обстановка и ненасыщенный характер вмещающего горизонта потребовали оценки поступления воды в пункт захоронения, процессов и скорости коррозии, а также последующего переноса радионуклидов из пункта захоронения через ненасыщенную зону в насыщенную зону до потенциального попадания в доступную среду.

При разработке проекта «Юкка-Маунтин» был учтен ряд фундаментальных требований. Во-первых, это необходимость обеспечения захоронения чрезвычайно большого и разнородного объема отходов, включенных в инвентарный список (70 000 тТМ), преимущественно состоящего из гражданского ОЯТ, а также включающего оборонные и гражданские ВАО. Важными требованиями, установленными для теплового режима, являются температура 200°C на стенке выработки и предельный уровень 375°C на оболочке ОЯТ. Проект также должен обеспечивать возможность последующего извлечения ОЯТ в течение 50 лет [50]. Для успешного сокращения хранящегося запаса ОЯТ требовалось обеспечить темпы размещения на уровне 3000 тТМ/год, что на 50% превышает скорость наработки ОЯТ в Соединенных Штатах Америки [50]. Затраты на строительство и эксплуатацию должны покрываться из фонда обращения с ядерными отходами, формируемого за счет налога на производство электроэнергии в соответствии с Законом о политике в области ядерных отходов 1982 года (на момент составления настоящей публикации взимание этого сбора было приостановлено).

Окончательный проект пункта захоронения «Юкка-Маунтин» предусматривал доступ по наклонной рампе и прямое захоронение в выработках без обратной закладки (засыпки). Упаковки отходов планировалось разместить примерно в 99 параллельных горизонтальных выработках средней длиной 605 м. Открытие и эксплуатация пункта захоронения будет осуществляться в четыре этапа. Предполагалось, что модульное, поэтапное строительство позволит выполнить финансовые требования и в то же время обеспечит гибкость в адаптации компоновки, учитывающей возможные технологические усовершенствования в течение срока эксплуатации.

4.5. ДРУГИЕ РЕШЕНИЯ ПО ЗАХОРОНЕНИЮ

Рассматривались и другие решения по подземному захоронению радиоактивных отходов. К ним относятся использование буровых скважин различной глубины и переоборудование существующих подземных объектов, таких как неиспользуемые шахты, для захоронения САО. В данном подразделе представлены примеры обоих вариантов.

4.5.1. Адаптация существующих подземных объектов

Несколько существующих пунктов захоронения НСАО были созданы путем перепрофилирования имеющихся подземных объектов, таких как выведенные из эксплуатации шахты или штольни. Спроектированные таким образом пункты захоронения являются уникальными в национальных программах, в рамках которых они создаются, а также с точки зрения обстоятельств и условий на конкретном объекте, выбранном для перепрофилирования. Поэтому решения о выборе объекта для его перепрофилирования под пункт захоронения зависят от национальной политики данного государства-члена. В Германии, например, в 1960-х годах было принято политическое решение, предусматривающее захоронение всех радиоактивных отходов в глубинных геологических средах. Благодаря этому решению, принятому на ранней стадии, Германия приступила к исключительному использованию бывших шахт и рудников для

захоронения НСАО, называемых в Германии «отходами с незначительным тепловыделением». Вместе с тем для захоронения ВАО немецкое законодательство требует использовать специально построенные пункты захоронения. Другие страны приняли также решение использовать бывшие шахты не только исключительно для захоронения части своих НСАО, включенных в инвентарный список (реестр); в числе этих стран Румыния (пункт захоронения «Байта-Бихор») и Чешская Республика (пункт захоронения «Рихард»).

При разработке концепции проекта по перепрофилированию объекта необходимо проводить детальное изучение существующих наземных и подземных объектов и сооружений, оборудования и арматуры с целью обеспечения выполнений требований по безопасному захоронению радиоактивных отходов, включая аспекты эксплуатационной безопасности. При этом важно понимать и осознавать, что данный объект первоначально был предназначен для совершенно иных целей. Первоначальное назначение и время, истекшее с момента окончания эксплуатации объекта, могут оказывать существенное влияние на проектные решения, необходимые для обеспечения безопасной изоляции и локализации отходов.

Потенциальным преимуществом использования существующих объектов является наличие как минимум ограниченных знаний о геологических условиях, хотя маловероятно, что эти данные будут характеризоваться степенью детализации, которая необходима для разработки надежного обоснования безопасности, и в связи с этим может потребоваться проведение дополнительных работ по характеризации площадки. Кроме того, имеется возможность получения прямой экономической выгоды. Например, открытым будет доступ к подповерхностному пространству, однако пути доступа, вероятнее всего, необходимо будет перестраивать в соответствии с требованиями, относящимися к проведению транспортно-технологических операций с отходами. На месте может находиться опытный персонал, а также часть установленного оборудования будет пригодна для дальнейшего использования. Как минимум, на начальном этапе работ может быть достигнута экономия средств, связанных с доступом в подземные выработки.

Вместе с тем участки объекта, которые не планируется перепрофилировать, а также периферийные установки и оборудование необходимо будет поддерживать в стабильном состоянии и управлять ими в течение всего срока эксплуатации пункта захоронения и после его закрытия, что может потребовать значительных затрат. Эти работы могут включать демонтаж установленных систем, а также обратную закладку (засыпку) и герметизацию неиспользуемых полостей. Существующие подземные выработки также могут оказывать влияние на гибкость проектирования и воздействовать на функциональные характеристики естественной барьерной системы. Нарушенные в результате выемки породы зоны могут оказаться более обширными по сравнению с условиями, ожидаемыми в случае специально построенного пункта захоронения, что требует применения специальных проектных решений. Для блокирования преимущественных путей распространения загрязнения, каковыми являются существующие шахтные стволы или выработки (штреки), не требующиеся для целей захоронения, необходимо предусматривать их герметизацию. Большие неиспользуемые открытые объемы, характерные для бывших шахт, могут влиять на общую стабильность объекта, что также требует специальных проектных решений. В связи с этим процесс установления пригодности существующего объекта для его перепрофилирования в пункт захоронения может оказаться более сложной задачей, чем признание пригодности специально спроектированного пункта захоронения, сооружаемого в ненарушенной среде.

Германия имеет большой опыт в перепрофилировании, эксплуатации и закрытии пунктов захоронения, создаваемых на базе отработанных шахт. Пункт захоронения в Морслебене (Endlager für radioaktive Abfälle Morsleben («ERAM»)) был создан в начале 1970-х годов путем перепрофилирования для захоронения НСАО бывшей шахты по добыче калийных солей и каменной соли. В пункте захоронения «ERAM» на глубине около 480 м было размещено в общей сложности 37 000 м³ НСАО, пока операции по размещению отходов не были приостановлены в 1998 году. В настоящее время объект проходит процедуру лицензирования для закрытия. В целях обеспечения стабильности подземных работ в период с 2003 по 2011 год для обратной закладки

27 камерных отсеков, расположенных в центральной части бывшей шахты, был использован почти миллион кубометров «сольбетона» (бетона, приготовленного с применением каменной соли). Концепция закрытия объекта предусматривает, что большинство оставшихся подземных камерных отсеков будет аналогичным образом заполнено материалом обратной закладки. В качестве дополнительной меры предосторожности перед финальной обратной закладкой (засыпкой) будут установлены заглушки выработок для изоляции участков пункта захоронения. На рис. 47 показан камерный отсек для захоронения отходов в его современном виде в пункте захоронения «ERAM».

Второй пункт захоронения в Германии, получивший наименование «Конрад», создается на базе бывшей шахты по добыче железной руды. «Конрад» представляет собой первый пункт захоронения радиоактивных отходов, который будет утвержден и построен в полном соответствии с национальным законом об атомной энергии. В 2002 году после завершения почти 20-летнего процесса лицензирования пункту захоронения было выдано разрешение на захоронение до 303 000 м³ НСАО, а в 2007 году лицензия была подтверждена Федеральным административным судом Германии. Строительные работы включают проходку новых выработок (рис. 48) и



Рис. 47. НСАО в пункте захоронения «ERAM» в Морслебене, Германия (фото: Bundesgesellschaft für Endlagerung mbH).



Рис. 48. Строительство транспортной выработки в пункте захоронения «Конрад», Германия (фото: Bundesgesellschaft für Endlagerung mbH).

переоборудование существующих сооружений для проведения транспортно-технологических операций с отходами и их захоронения.

Бывший рудник находился в эксплуатации чуть более десяти лет, и на нем было добыто 6,7 млн тонн железной руды, после чего его закрыли, так как он перестал быть экономически рентабельным. Вмещающая формация пункта захоронения представляет собой низкопроницаемый оолитовый известняк, который гидрогеологически изолирован окружающими низкопроницаемыми формациями. Мощные пласты низкопроницаемых глин, мергелей и отвердевшего ила находятся как над рудным телом, так и под ним, обеспечивая существенную изоляцию и локализацию. Отходы будут складироваться в новых камерных отсеках, размещенных на глубине от 800 до 1100 м. Будет обустроено 11 камерных отсеков шириной около 7 м, высотой 6 м и длиной до 1000 м. Бывшие шахтные выработки и пункт захоронения показаны на рис. 49.

КПО для пункта захоронения «Конрад» предусматривают возможность использования шести кубических и пяти цилиндрических типов контейнеров, изготовленных из стали, чугуна или бетона.

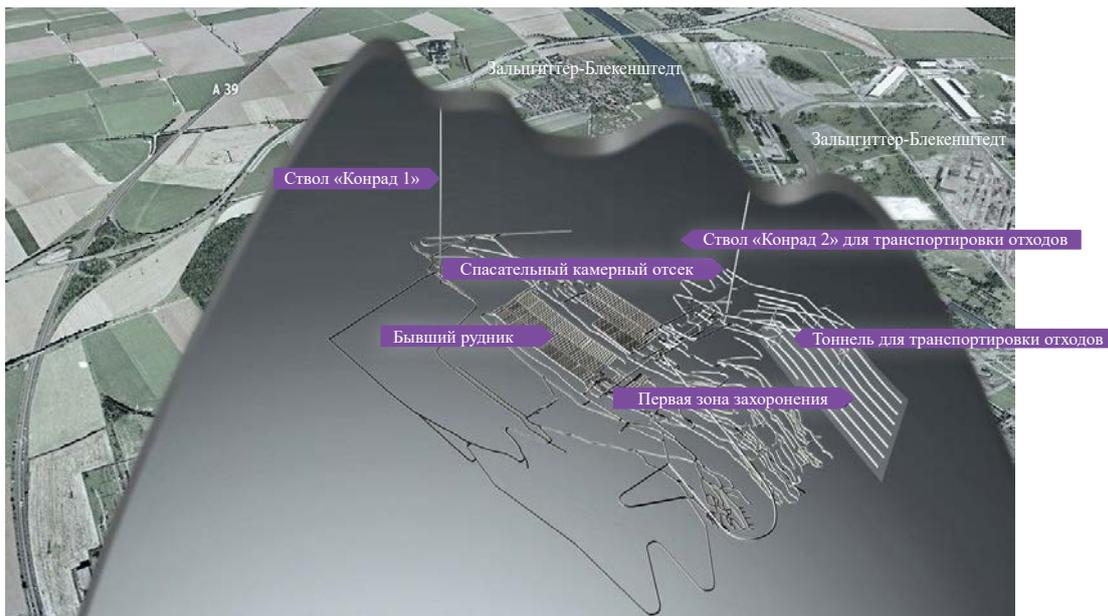


РИС. 49. 3D-модель пункта захоронения «Конрад» и бывших выработок, Германия (иллюстрация: Bundesgesellschaft für Endlagerung mbH).



РИС. 50. Контейнеры для отходов (цилиндрические и кубические), отвечающие критериям приемлемости отходов (КПО) для захоронения в пункте «Конрад», Германия (фото: Gesellschaft für Nuklear Service (слева) и Bundesgesellschaft für Endlagerung mbH (справа)).

Объем контейнеров для отходов варьируется от 0,7 до 10,9 м³, а максимальный вес достигает 20 т. В соответствии с радиологическими требованиями будут приниматься контейнеры для отходов двух классов. Типичные контейнеры для отходов показаны на рис. 50. Доставка как кубических, так и цилиндрических упаковок отходов к месту их захоронения в подземном пространстве будет осуществляться на грузовом автотранспорте. Размещаемые отходы будут укладываться штабелями в секции захоронения длиной 50 м. Каждая секция будет герметизирована торкрет-бетонной стеной, укладываемой непосредственно на последний ряд упаковок с отходами. Для заполнения пустот в каждой секции будут использоваться трубы, по которым будет подаваться водоцементно-агрегатная смесь. С целью герметизации каждого камерного отсека после его заполнения будет устанавливаться финальная бетонная заглушка. После завершения всех работ по размещению отходов будут произведены операции по заполнению материалом закладки всех оставшихся подземных полостей как в пункте захоронения, так и в шахте, а также операции по герметизации шахтного ствола и закрытию пункта захоронения.

4.5.2. Скважинное захоронение

Для захоронения определенных категорий радиоактивных отходов, которые обычно имеют относительно небольшой объем, была проведена оценка использования как неглубоких скважин (глубиной от нескольких десятков до сотен метров), так и очень глубоких скважин (глубиной в несколько километров).

4.5.2.1. Концепция скважинного захоронения ИЗРИ

Концепция захоронения в скважинах ИЗРИ, образующихся главным образом в ходе медицинского и промышленного применения, была впервые предложена в 1995 году на учебных курсах, которые проводились Южноафриканской корпорацией по атомной энергии в рамках Африканского регионального соглашения о сотрудничестве при проведении исследований, разработок и при подготовке кадров в связанных с ядерной наукой и техникой областях. Многие государства-члены не располагают возможностями для совместного захоронения инвентарных объемов ИЗРИ с другими радиоактивными отходами и проявляют интерес к экономически целесообразным решениям по захоронению. В качестве возможного экономически эффективного решения было предложено скважинное захоронение ИЗРИ, включенных в инвентарный список (реестр). Эта идея эволюционировала за время, прошедшее с 1995 года, и сформировалась в четко определенную концепцию, предлагающую признанное на международном уровне решение по захоронению широкого спектра ИЗРИ в различных геологических средах и климатических условиях.

Для целей захоронения ИЗРИ сначала кондиционируются и преобразуются в упаковку отходов. В соответствии с данной концепцией упаковка отходов представляет собой первичный инженерно-технический барьер, обеспечивающий локализацию радионуклидов в течение периода, предусмотренного в оценке безопасности. Кроме того, в данной концепции для облегчения проведения транспортно-технологических операций с отходами и их захоронения предусматривается использование стандартных упаковок отходов диаметром 115 мм, состоящих из выполненной из нержавеющей стали капсулы с толщиной стенок 3 мм, помещенной в цементирующий буферный материал, который, в свою очередь, находится в контейнере из нержавеющей стали с толщиной стенок 6 мм (рис. 51). Длина контейнеров варьируется от 250 до 600 мм.

Использование коррозионностойкого материала (например, нержавеющей стали марки 316L) в сочетании с размещением в высокощелочной среде, обеспечиваемой цементным буфером, должно способствовать снижению скорости коррозии и, следовательно, увеличению срока службы контейнера. В зависимости от геохимических условий на данной площадке сконструированные

таким образом упаковки отходов смогут сохранять свои защитные функции в течение нескольких тысяч лет после их захоронения.

Упаковки отходов будут помещаться в скважину диаметром 26 см с обсадкой из полиэтилена высокой плотности или стали, на глубину, определяемую по результатам оценки безопасности данной площадки, которая, как правило, составляет величину от нескольких десятков до сотен метров. По окончании операций по размещению отходов скважина будет заполнена цементным материалом. Рис. 52 иллюстрирует концепцию проектирования скважинного захоронения.

Во время закрытия скважины над зоной захоронения под углом 60° устанавливается пластина из нержавеющей стали толщиной 10 мм для отвода бура от места размещения отходов при непреднамеренном бурении в будущем. Для снижения вероятности функционирования обсадной колонны в качестве преимущественного пути миграции радионуклидов на поверхность верхний участок скважины демонтируется, что обеспечивает прямой контакт материала герметизации скважины с формацией окружающей породы. Затем верхний участок скважины закупоривается бентонитом.



РИС. 51. Стандартизированная конструкция упаковки отходов для ИЗРИ. Капсула из нержавеющей стали (слева) диаметром 7 см; внутренний цементный буфер (в центре) различных размеров (справа).

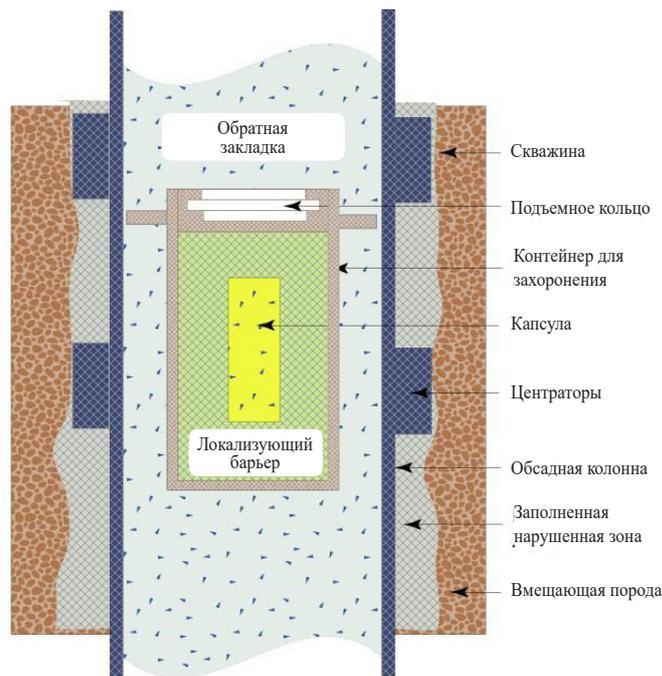


РИС. 52. Схематический поперечный разрез зоны захоронения ИЗРИ в скважине.

В соответствии с требованиями по захоронению на средних глубинах, изложенными в SSG-1 [6], минимальная глубина захоронения составляет 30 м от земной поверхности, что соответствует глубине, указанной в SSG-1 [6], для дифференциации между приповерхностным захоронением и захоронением на средних и больших глубинах. Порог в 30 м считается целесообразным с точки зрения значительного снижения вероятности непреднамеренного проникновения человека в систему захоронения отходов, связанного с проведением обычных строительных работ.

Детали проекта пункта захоронения применительно к конкретной площадке, такие как количество скважин, глубина захоронения и (в соответствующих случаях) расстояние между скважинами, будут зависеть от количества источников, подлежащих захоронению, типа источников и любых ограничивающих факторов, связанных с площадкой, согласно оценке безопасности объекта после его закрытия.

Источники, содержащие радионуклиды с периодом полураспада до 30 лет (например, ^{60}Co , ^{90}Sr или ^{137}Cs), распадутся до незначительных уровней радиоактивности через несколько сотен лет, в пределах порядка 1000 лет (например, 1200 лет — это примерно 40 периодов полураспада ^{90}Sr или ^{137}Cs). Учитывая предполагаемый срок службы упаковок отходов и конкретные условия площадки, можно ожидать, что в источниках, содержащих эти радионуклиды, произойдет распад до уровней активности ниже уровня изъятия из-под регулирующего контроля задолго до того, как упаковка разрушится и радионуклиды смогут попасть в геосферу. Вместе с тем радионуклиды с более длительным периодом полураспада, такие как ^{226}Ra или ^{241}Am , скорее всего, будут проникать в геосферу, поскольку контейнеры в конечном итоге утратят свою целостность. При захоронении источников с более долгоживущими радионуклидами характеристики локализации формаций пород, такие как проницаемость и геохимическая среда, будут играть важную роль в обеспечении общей безопасности системы захоронения.

Общая оценка безопасности [53] была проведена исходя из допущения, что инвентарный объем референтных источников соответствует инвентарным спискам (реестрам) ИЗРИ, имеющимся во многих африканских странах. В рамках общей оценки безопасности рассматривались три основных типа климата (влажный, сезонно влажный и засушливый/полузасушливый) в двадцати различных сценариях состояния окружающей среды. По результатам общей оценки безопасности был сделан вывод о том, что для реализации концепции скважинного захоронения ИЗРИ пригодным может быть признан широкий спектр различных геосферных ситуаций и биосферных условий.

4.5.2.2. Концепция скважинного захоронения на очень большой глубине

Для захоронения долгоживущих высокоактивных отходов в значительно более глубоких скважинах — на глубине 5 км и более, как показано на рис. 53, также были рассмотрены соответствующие концепции [54]. К настоящему времени наиболее обстоятельные исследования были проведены в Соединенных Штатах Америки, в ходе которых Министерство энергетики США изучило осуществимость и безопасность концепции захоронения в глубоких скважинах. Несмотря на то, что данная концепция до конца не разработана, ряд стран проявляет к ней интерес. В 2014 году была разработана дорожная карта НИОКДР, включающая планы научных исследований и инженерно-технических демонстрационных работ, а также план полевых испытаний в глубокой скважине, однако на момент подготовки настоящей публикации работы по этому проекту пока не проводились.

Концепция захоронения в глубоких скважинах может оказаться подходящей для государств-членов с небольшим количеством радиоактивных отходов высокой активности, для которых необходимо или целесообразно обеспечить отдельное захоронение. Например, данная концепция рассматривалась для захоронения отходов цезия с очень высокой удельной активностью в Соединенных Штатах Америки, а также она была предложена для захоронения отходов плутония. Несмотря на то, что возможность последующего извлечения является обязательным требованием в ряде государств-членов, данная концепция специально разрабатывалась для обеспечения

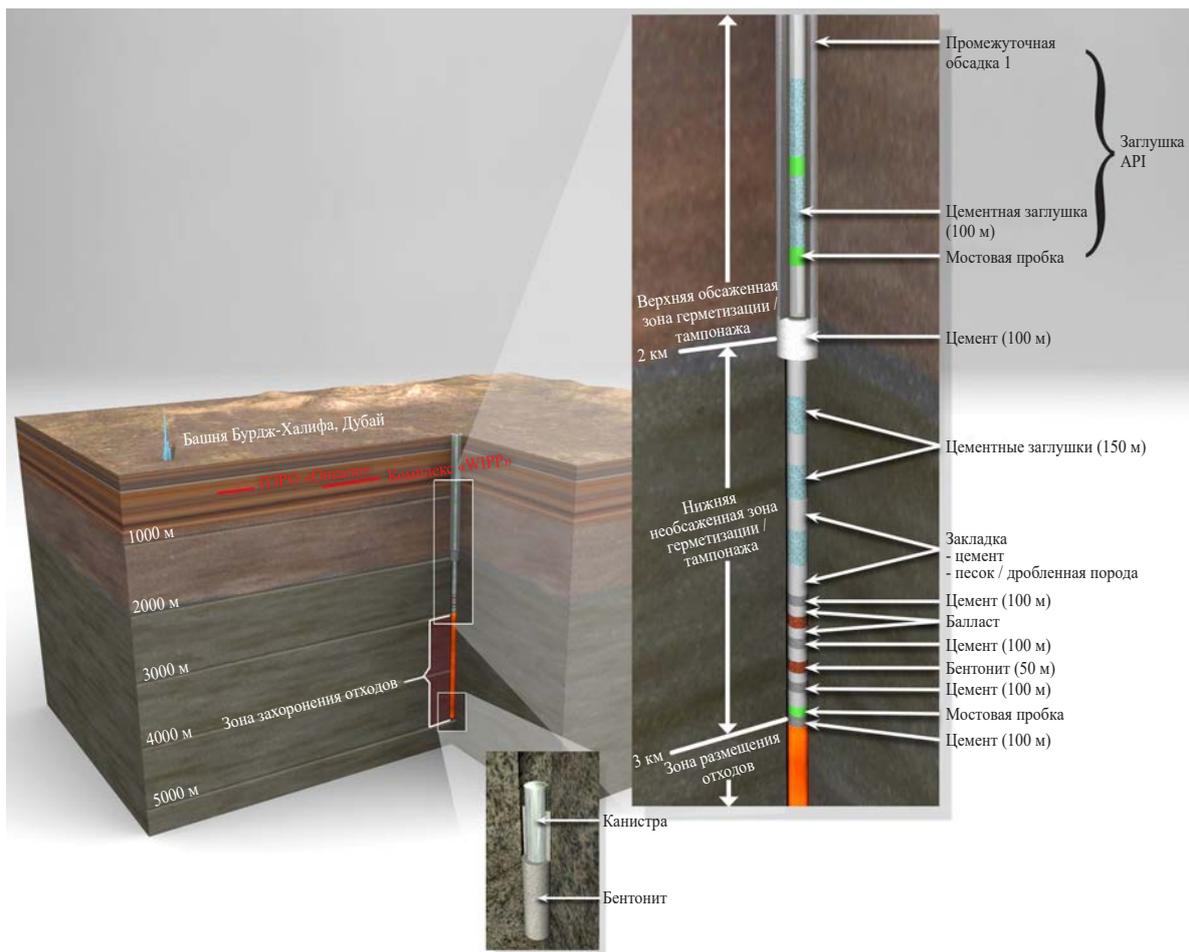


РИС. 53. Схематическое изображение концепции глубинного скважинного захоронения [55] (иллюстрация: Сандийские национальные лаборатории).

очень высокого уровня изоляции отходов, при котором их извлечение после закрытия объекта будет практически невозможным, что делает ее потенциально привлекательной для захоронения разделенных расщепляющихся материалов. Ее также рассматривали для реализации захоронения ОЯТ в Швеции и Соединенных Штатах Америки. Вместе с тем необходимо провести значительные НИОКДР, а также разработать комплексное обоснование безопасности, прежде чем данная концепция будет признана пригодной для реализации. Безопасность захоронения в глубоких скважинах базируется на очень длительном периоде отсутствия мобильности у глубинных флюидов, что связано с низкой проницаемостью пород и сильными градиентами солености. Восстановительные условия резко ограничивают растворимость критических с точки зрения дозы радионуклидов на глубине, и высокая ионная сила глубинных флюидов может препятствовать коллоидному переносу [55]. Современные технологии бурения позволяют создавать скважины диаметром до 440 мм и глубиной 5000 м, что, соответственно, ограничивает диаметр упаковок отходов [56]. Практический опыт размещения упаковок в скважинах относительно большого диаметра на таких глубинах отсутствует. В рамках программы, осуществляемой в Соединенных Штатах Америки, была подготовлена предварительная оценка безопасности концепции захоронения в глубоких скважинах [57].

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Государства-члены, разрабатывающие программы захоронения радиоактивных отходов, в идеальном случае первоначально составляют национальный инвентарный список (реестр) отходов и затем проводят оценку концепций захоронения применительно к данным видам отходов и возможным вариантам размещения площадок для пунктов захоронения. В настоящей публикации изложена информация о доступных в настоящее время вариантах захоронения, а также о начальной организации и последующем поэтапном осуществлении процесса проектирования пункта захоронения, основанного на соблюдении требований, с использованием инженерно-технических систем. Руководящие принципы проектирования должны применяться на всех последовательных стадиях и этапах предусмотренного плана работ, включающих выбор площадки, лицензирование, строительство, эксплуатацию и закрытие объекта. Программы создания пунктов захоронения (репозиториев) предусматривают принятие обязательств, выполнение которых часто должно осуществляться на протяжении многих десятилетий. Важно обеспечить применение четко определенного, прозрачного и поэтапного процесса проектирования и выбора вариантов с промежуточными рубежами и результатами, а также с обеспечением официально организованного взаимодействия с заинтересованными сторонами.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- [1] Объединенная конвенция о безопасности обращения с отработавшим топливом и о безопасности обращения с радиоактивными отходами, INFCIRC/546, МАГАТЭ, Вена (1997).
- [2] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Upgrading of Near Surface Repositories for Radioactive Waste, Technical Report Series No. 433, IAEA, Vienna (2005).
- [3] АГЕНТСТВО ПО ЯДЕРНОЙ ЭНЕРГИИ ОЭСР, ВСЕМИРНАЯ ОРГАНИЗАЦИЯ ЗДРАВООХРАНЕНИЯ, ЕВРОПЕЙСКОЕ СООБЩЕСТВО ПО АТОМНОЙ ЭНЕРГИИ, МЕЖДУНАРОДНАЯ МОРСКАЯ ОРГАНИЗАЦИЯ, МЕЖДУНАРОДНАЯ ОРГАНИЗАЦИЯ ТРУДА, МЕЖДУНАРОДНОЕ АГЕНТСТВО ПО АТОМНОЙ ЭНЕРГИИ, ПАНАМЕРИКАНСКАЯ ОРГАНИЗАЦИЯ ЗДРАВООХРАНЕНИЯ, ПРОГРАММА ОРГАНИЗАЦИИ ОБЪЕДИНЕННЫХ НАЦИЙ ПО ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЕ, ПРОДОВОЛЬСТВЕННАЯ И СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННАЯ ОРГАНИЗАЦИЯ ОБЪЕДИНЕННЫХ НАЦИЙ, Основополагающие принципы безопасности, Серия норм безопасности МАГАТЭ, № SF-1, МАГАТЭ, Вена (2007).
- [4] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Nuclear Energy Basic Principles, IAEA Nuclear Energy Series No. NE-BP, IAEA, Vienna (2008).
- [5] МЕЖДУНАРОДНОЕ АГЕНТСТВО ПО АТОМНОЙ ЭНЕРГИИ, Захоронение радиоактивных отходов, Серия норм безопасности МАГАТЭ, № SSR-5, МАГАТЭ, Вена (2011).
- [6] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Borehole Disposal Facilities for Radioactive Waste, IAEA Safety Standards Series No. SSG-1, IAEA, Vienna (2009).
- [7] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Near Surface Disposal Facilities for Radioactive Waste, IAEA Safety Standards Series No. SSG-29, IAEA, Vienna (2014).
- [8] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Geological Disposal Facilities for Radioactive Waste, IAEA Safety Standards Series No. SSG-14, IAEA, Vienna (2011).
- [9] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, The Safety Case and Safety Assessment for the Disposal of Radioactive Waste, IAEA Safety Standards Series No. SSG-23, IAEA, Vienna (2012).
- [10] МЕЖДУНАРОДНОЕ АГЕНТСТВО ПО АТОМНОЙ ЭНЕРГИИ, Классификация радиоактивных отходов, Серия норм безопасности МАГАТЭ, № GSG-1, МАГАТЭ, Вена (2014).
- [11] МЕЖДУНАРОДНОЕ АГЕНТСТВО ПО АТОМНОЙ ЭНЕРГИИ, Политика и стратегии обращения с радиоактивными отходами, МАГАТЭ, Серия изданий МАГАТЭ по ядерной энергии, № NW-G-1.1, МАГАТЭ, Вена (2012).
- [12] ЕВРОПЕЙСКАЯ КОМИССИЯ, ПРОДОВОЛЬСТВЕННАЯ И СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННАЯ ОРГАНИЗАЦИЯ

- ОБЪЕДИНЕННЫХ НАЦИЙ, МЕЖДУНАРОДНОЕ АГЕНТСТВО ПО АТОМНОЙ ЭНЕРГИИ, МЕЖДУНАРОДНАЯ ОРГАНИЗАЦИЯ ТРУДА, АГЕНТСТВО ПО ЯДЕРНОЙ ЭНЕРГИИ ОЭСР, ПАНАМЕРИКАНСКАЯ ОРГАНИЗАЦИЯ ЗДРАВООХРАНЕНИЯ, ПРОГРАММА ОРГАНИЗАЦИИ ОБЪЕДИНЕННЫХ НАЦИЙ ПО ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЕ, ВСЕМИРНАЯ ОРГАНИЗАЦИЯ ЗДРАВООХРАНЕНИЯ, Радиационная защита и безопасность источников излучения: Международные основные нормы безопасности, Серия норм безопасности МАГАТЭ, № GSR Part 3, МАГАТЭ, Вена (2015).
- [13] МЕЖДУНАРОДНОЕ АГЕНТСТВО ПО АТОМНОЙ ЭНЕРГИИ, Глоссарий по вопросам безопасности: терминология, используемая в области ядерной безопасности и радиационной защиты (издание 2018 года), МАГАТЭ, Вена (2023).
- [14] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Status and Trends in Spent Fuel and Radioactive Waste Management, IAEA Nuclear Energy Series No. NW-T-1.14, IAEA, Vienna (2018).
- [15] МЕЖДУНАРОДНОЕ АГЕНТСТВО ПО АТОМНОЙ ЭНЕРГИИ, Рекомендации по физической ядерной безопасности, касающиеся физической защиты ядерных материалов и ядерных установок (INFCIRC/225/Revision 5), Серия изданий МАГАТЭ по физической ядерной безопасности, № 13, МАГАТЭ, Вена (2011).
- [16] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, International Project on Demonstrating Safety of Geological Disposal (2019), www.iaea.org/topics/disposal/international-project-on-demonstrating-the-safety-of-geological-disposal.
- [17] CHAPMAN, N., MCKINLEY, I., The Geological Disposal of Nuclear Waste, John Wiley & Sons, Chichester, UK (1987).
- [18] FRANK, E., "Disposal of radioactive wastes", Chemical Containment of Waste in the Geosphere (METCALFE, R., ROCHELLE, C.A., Eds), Special Publication No. 157, Geological Society of London (1999) 27–45.
- [19] MILDOWSKI, A.E., et al., A Catalogue of Analogues for Radioactive Waste Management, British Geological Survey Commissioned Report No. CR/15/106, British Geological Survey, Nottingham (2015).
- [20] FUENTES CATILLANA, J.L., GARCIA-SINERZ, J.L. Full-scale engineered barriers experiment in crystalline host rock: final design and installation of the 'in situ' test at grimsel. Publicación tecnica num. 12/98. ENRESA, Madrid (1998).
- [21] WEBER, H.P., et al., "LUCOEX / FE bentonite buffer emplacement — Mont Terri Rock Laboratory, Switzerland", paper presented at LUCOEX Mid-term Workshop, Montpellier, 2012.
- [22] EUROPEAN COMMISSION PROJECT: ENGINEERING STUDIES AND DEMONSTRATION OF REPOSITORY DESIGNS (ESDRED), Deliverable 6 of Module 6, Work Package 4: Final Summary Report and Global Evaluation of the Project, European Commission, Brussels (2009).
- [23] OECD NUCLEAR ENERGY AGENCY, Geological Disposal of Radioactive Waste: Review of Developments in the Last Decade, OECD, Paris (2000).
- [24] McCOMBIE, C., "Repository implementation", Deep Geological Disposal of Radioactive Waste (ALEXANDER, W.R., MCKINLEY, L.E., Eds), Elsevier, Amsterdam (2007).
- [25] МЕЖДУНАРОДНАЯ КОНСУЛЬТАТИВНАЯ ГРУППА ПО ЯДЕРНОЙ БЕЗОПАСНОСТИ, Сохранение целостности конструкции ядерных установок в течение всего срока эксплуатации, INSAG-19, МАГАТЭ, Вена (2015).
- [26] INSTITUTE OF NUCLEAR POWER OPERATIONS, Principles for a Strong Nuclear Safety Culture, INPO, Atlanta, GA (2004).
- [27] МЕЖДУНАРОДНАЯ КОНСУЛЬТАТИВНАЯ ГРУППА ПО ЯДЕРНОЙ БЕЗОПАСНОСТИ, Взаимосвязь между безопасностью и физической безопасностью на атомных электростанциях, INSAG-24, МАГАТЭ, Вена (2014).
- [28] Договор о нераспространении ядерного оружия INFCIRC/140, МАГАТЭ, Вена (1970).
- [29] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Nuclear Power Objectives: Achieving the Nuclear Energy Basic Principles, IAEA Nuclear Energy Series No. NP-O, IAEA, Vienna (2009).
- [30] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Technological Implications of International Safeguards for Geological Disposal of Spent Fuel and Radioactive Waste, IAEA Nuclear Energy Series No. NW-T-1.21, IAEA, Vienna (2010).
- [31] OFFICE FOR NUCLEAR REGULATION, Geological Disposal, Nuclear Safety Technical Assessment Guide No. NS-TAST-GD-101 Rev. 0, ONR, Bootle, UK (2018).
- [32] CAROLISSEN, A., "Overview of South Africa's radioactive disposal programme", paper presented at the DISPONET Technical Meeting held in Kozloduy, Bulgaria, 2017.
- [33] RUIZ LOPEZ, M.C., ZULOAGA, P., ALONSO, J., "Design and licensing of the El Cabril L/ILW disposal

- facility”, Proceedings of the Symposium on Waste Management, Tucson, 1993, (POST, R.G, Ed.), Arizona Board of Regents, Tucson (1993) 131–136.
- [34] REPUBLIC OF SLOVENIA MINISTRY OF THE ENVIRONMENT AND SPATIAL PLANNING SLOVENIAN NUCLEAR SAFETY ADMINISTRATION, Sixth Slovenian Report under the Joint Convention on the Safety of Spent Fuel Management and on the Safety of Radioactive Waste Management, Slovenian Nuclear Safety Administration, Ljubljana (2017).
- [35] Resolucija o nacionalnem programu ravnanja z radioaktivnimi odpadki in izrabljenim gorivom za obdobje 2016-2025 (ReNPRRO16–25), Uradni list RS, št. 31/16.
- [36] SVENSK KÄRNBRÄNSLEHANTERING, Low and Intermediate Level Waste in SFR, Reference Inventory for Waste 2013, SKB Report No. R-15-15, SKB, Solna, Sweden (2015).
- [37] SVENSK KÄRNBRÄNSLEHANTERING, SFR-Final Repository for Short-lived Radioactive Waste (2015), https://skb.se/upload/publications/pdf/SFR_folder_engelsk.pdf.
- [38] NATIONAL ACADEMY OF SCIENCES, Report on Disposal of Radioactive Waste on Land, NAC, Washington, DC (1957).
- [39] LAWRENCE BERKELEY NATIONAL LABORATORY, International Approaches for Nuclear Waste Disposal in Geological Formations: Geological Challenges in Radioactive Waste Isolation—Fifth Worldwide Review, No. LBNL-1006984, USDOE, Washington, DC (2016).
- [40] ONDRAF/NIRAS, Research, Development and Demonstration (RD&D) Plan for the Geological Disposal of High-level and/or Long-lived Radioactive Waste Including Irradiated Fuel if Considered as Waste, State-of-the-art Report as of December 2012, No. NIROND-TR 2013-12E, ONDRAF/NIRAS, Brussels (2013).
- [41] ONDRAF/NIRAS, Operation and Closure of the Geological Disposal Facility for Category B and Category C Wastes, No. NIROND-TR 2017-13 E V2, ONDRAF/NIRAS, Brussels (2017).
- [42] NAGRA, The Nagra Research, Development and Demonstration (RD&D) Plan for the Disposal of Radioactive Waste in Switzerland, Technical Report No. 16-02, Nagra, Wettingen (2016).
- [43] NAGRA, Waste Management Programme 2016 of the Waste Producers, Nagra Technical Report No. NTB 16-01 E, Nagra, Wettingen (2016).
- [44] LUNDQVIST, B., M. HAMMARSTRÖM, “Licensing of the KBS-3 concept for spent nuclear fuel in Sweden”, International Approaches for Nuclear Waste Disposal in Geological Formations: Geological Challenges in Radioactive Waste Isolation—Fifth Worldwide Review, No. LBNL-1006984, USDOE, Washington, DC (2016).
- [45] KING, F., LILJA, C., PEDERSEN, K., PITKÄNEN, P., VÄHÄNEN, M., An Update of the State-of-the-art Report on the Corrosion of Copper Under Expected Conditions in a Deep Geological Repository, Posiva, Eurajoki (2012).
- [46] LAHTI, M., “Towards implementation of the spent nuclear fuel repository in Finland”, International Approaches for Nuclear Waste Disposal in Geological Formations: Geological Challenges in Radioactive Waste Isolation—Fifth Worldwide Review, No. LBNL-1006984, USDOE, Washington, DC (2016).
- [47] GESELLSCHAFT FÜR ANLAGEN- UND REAKTORSICHERHEIT, Synthesebericht für die VSG, Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben, GRS, Köln (2013).
- [48] Waste Isolation Pilot Plant Land Withdrawal Act, Public Law 102-579, United States of America.
- [49] BOLLINGERFEHR, W., et al., Concept Development for a Generic Repository for Heat-generating Waste in Bedded Salt Formations in Germany as well as Development and Testing of a Safety and Demonstration Concept KOSINA, Synthesis Report DBE TECHNOLOGY GmbH, Peine (2018).
- [50] UNITED STATES DEPARTMENT OF ENERGY, Yucca Mountain Repository License Application, DOE/RW-0573 Rev. 1., USDOE, Las Vegas, NV (2009).
- [51] RECHARD, R.P., VOEGELE, M.D., Evolution of repository and waste package designs for Yucca Mountain disposal system for spent nuclear fuel and high-level radioactive waste, Reliab. Eng. Syst. Saf. **122** (2014) 53373.
- [52] NUCLEAR REGULATORY COMMISSION, Safety Evaluation Report Related to Disposal of High-Level Radioactive Wastes in a Geological Repository at Yucca Mountain, Nevada, Vol. 3, Rep. NUREG-1949, NRC, Washington, DC (2014).
- [53] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Generic Post-closure Safety Assessment for Disposal of Disused Sealed Radioactive Sources in Narrow Diameter Boreholes, IAEA-TECDOC-1824, IAEA, Vienna (2017).
- [54] BRADY, P., ARNOLD, B., FREEZE, G., SWIFT, P., Deep Borehole Disposal of High-Level Radioactive Waste, Rep. SAND2009-4401, Sandia National Laboratories, Albuquerque, NM (2009).
- [55] SANDIA NATIONAL LABORATORIES, Deep Borehole Field Test Conceptual Design Report, Rep. FCRD-UFD-2016-000070 Rev.1, SNL, Albuquerque, NM (2016).

- [56] BESWICK, A.J., GIBB, F.G.F., TRAVIS, K.P., Deep borehole disposal of nuclear waste: engineering challenges, *Proc. Inst. Civil Eng.* **167** 2 (2014) 47–66.
- [57] HARDIN, E.L., CLARK, A., SU, J., Methodology for Radiological Risk Assessment of Deep Borehole Disposal Operations, Rep. SAND2019-1827, Sandia National Laboratories, Albuquerque, NM (2019).

СОКРАЩЕНИЯ

ВАО	высокоактивные отходы
ИЗРИ	изъятый из употребления закрытый радиоактивный источник
КПО	критерии приемлемости отходов
НАО	низкоактивные отходы
НИОКДР	научно-исследовательские, опытно-конструкторские и демонстрационные работы
НСаО	низко- и среднеактивные отходы
ОНАО	очень низкоактивные отходы
ООО	организации по обращению с отходами
ОЯТ	отработавшее ядерное топливо
СаО	среднеактивные отходы
SFR	пункт финального захоронения короткоживущих радиоактивных отходов
«WIPP»	пилотный комплекс по изоляции отходов

СОСТАВИТЕЛИ И РЕЦЕНЗЕНТЫ

Aslam, N.M.	Пакистанская комиссия по атомной энергии, Пакистан
Bollingerfehr, W.	BGE Technology GmbH, Германия
Breen, B.	консультант, Соединенное Королевство
Carolissen, A.	Национальный институт по вопросам захоронения радиоактивных отходов, Южная Африка
Chapman, N.	«Нил Чепмен консалтинг лтд», Ирландия
Clark, A.	MCM Environmental Services Ltd, Соединенное Королевство
De Gregorio Robledo, S.	«Энреса», Испания
Delort, D.	«Андра», Франция
Dick, J.	Purposeful Systems Ltd, Соединенное Королевство
Faltejsek, J.	Международное агентство по атомной энергии
Gardner, W.P.	Сандийские национальные лаборатории, Соединенные Штаты Америки
Gaus, I.	Nagra, Швейцария
Gordon, I.	Международное агентство по атомной энергии
Hansen, F.	консультант, Соединенные Штаты Америки
Hardin, E.	Сандийские национальные лаборатории, Соединенные Штаты Америки
Jordanov, M.	EQE Bulgaria AD, Болгария
Kim, C.L.	Корейская корпорация по обращению с радиоактивными отходами, Республика Корея
Mayer, S.	Международное агентство по атомной энергии
Mmutle, N.	Национальный ядерный регулирующий орган, Южная Африка
Molina, M.	«Энреса», Испания
Mut Chable, D.A.	Comisión Nacional de Seguridad Nuclear y Salvaguardias (Национальная комиссия по ядерной безопасности и гарантиям), Мексика
Nieder-Westermann, G.	Международное агентство по атомной энергии
Niculae, O.	Агентство по ядерной энергии и обращению с радиоактивными отходами, Румыния
Navarro, M.	«Энреса», Испания
Phathanapirom, U.	консультант, Соединенные Штаты Америки
Raymaekers, D.	Бельгийское агентство по радиоактивным отходам и обогащенным делящимся материалам (ОНДРАФ/НИРАС)

Swidnicki, W.	Предприятие по обращению с радиоактивными отходами (ZUOP), Польша
Samwer, B.W.	Bundesgesellschaft für Endlagerung, Германия
Takács, T.	TS ENERCON, Венгрия
Uras, S.	Sogin, Италия
Yung, H.	Международное агентство по атомной энергии
Yusof, M.A.W.	Малазийское ядерное агентство, Малайзия
Zavazanova, A.	Международное агентство по атомной энергии

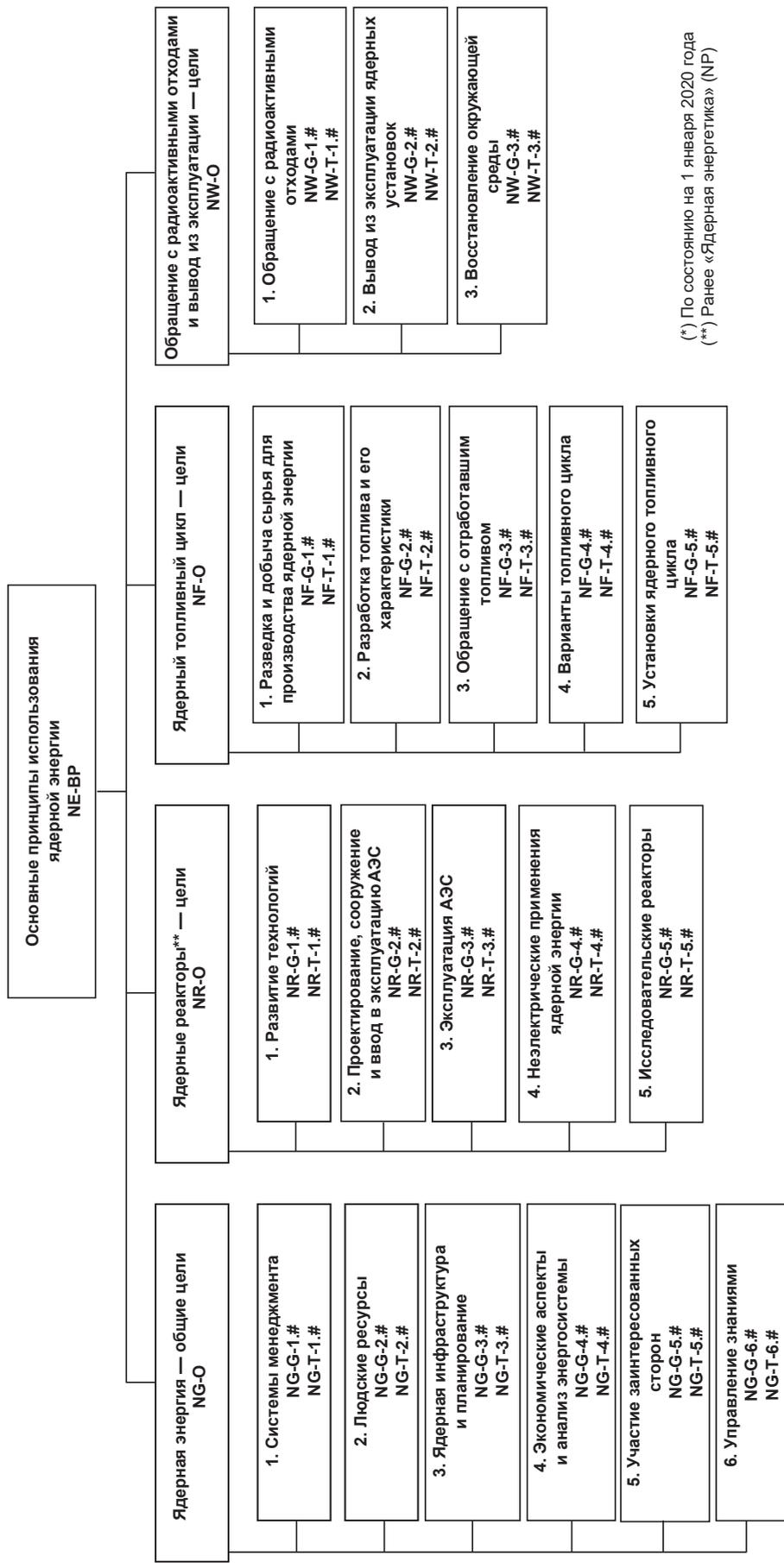
Техническое совещание

Вена, Австрия: 30 сентября — 4 октября 2013 года

Совещания консультантов

Вена, Австрия: 10–11 декабря 2012 года, 19–23 мая 2014 года, 23–27 апреля 2018 года

Структура Серии изданий МАГАТЭ по ядерной энергии*



(*) По состоянию на 1 января 2020 года
(**) Ранее «Ядерная энергетика» (NP)

Обозначения

- BP:** Основные принципы
O: Цели
G: Руководства и методологии
T: Технические доклады
№ 1–6: Обозначение тематик
#: Номер руководства или доклада

Примеры

- NG-G-3.1:** Общая тематика (NG), руководства и методологии (G), ядерная инфраструктура и планирование (тематика 3), #1
NR-T-5.4: Ядерные реакторы (NR), технический доклад (T), исследовательские реакторы (тематика 5), #4
NF-T-3.6: Ядерное топливо (NF), технический доклад (T), обращение с отработавшим топливом (тематика 3), #6
NW-G-1.1: Обращение с радиоактивными отходами и вывод из эксплуатации (NW), руководства и методологии (G), обращение с радиоактивными отходами (тематика 1), #1



IAEA

Международное агентство по атомной энергии

№ 27

ЗАКАЗ ПУБЛИКАЦИЙ В СТРАНАХ

Платные публикации МАГАТЭ можно приобрести у нашего основного дистрибьютора или в крупных книжных магазинах. Заказы на бесплатные публикации следует направлять непосредственно в МАГАТЭ.

Заказы на платные публикации

Просьба связаться с местным поставщиком по вашему выбору либо нашим основным дистрибьютором:

Eurospan

1 Bedford Row London
WC1R 4BU
United Kingdom

Торговые заказы и справочная информация:

Тел.: +44 (0)1235 465576
Эл. почта: trade.orders@marston.co.uk

Индивидуальные заказы:

Тел.: +44 (0)1235 465577
Эл. почта: direct.orders@marston.co.uk
www.eurospanbookstore.com/iaea

Дополнительная информация:

Тел.: +44 (0) 207 240 0856
Эл. почта: info@eurospan.co.uk
www.eurospan.co.uk

Заказы на платные и бесплатные публикации можно направлять напрямую по адресу:

Издательская секция (Publishing Section)
Международное агентство по атомной энергии
Vienna International Centre
PO Box 100
1400 Vienna, Austria
Телефон: +43 1 2600 22529 или 22530
Эл. почта: sales.publications@iaea.org
<https://www.iaea.org/ru/publikacii>

