

Серия изданий МАГАТЭ по ядерной энергии

№. NW-T-1.31

Основные
принципы

Цели

Руководства

Технические
доклады

**Опыт обращения
с радиоактивными
отходами после
ядерных аварий:
основа для
предварительного
планирования**



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.

ОПЫТ ОБРАЩЕНИЯ
С РАДИОАКТИВНЫМИ ОТХОДАМИ
ПОСЛЕ ЯДЕРНЫХ АВАРИЙ:
ОСНОВА ДЛЯ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОГО
ПЛАНИРОВАНИЯ

Членами Международного агентства по атомной энергии являются следующие государства:

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

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».

ОПЫТ ОБРАЩЕНИЯ
С РАДИОАКТИВНЫМИ ОТХОДАМИ
ПОСЛЕ ЯДЕРНЫХ АВАРИЙ:
ОСНОВА ДЛЯ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОГО
ПЛАНИРОВАНИЯ

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, 2025

Отпечатано МАГАТЭ в Австрии

Май, 2025

STI/PUB/2022

ОПЫТ ОБРАЩЕНИЯ С РАДИОАКТИВНЫМИ
ОТХОДАМИ ПОСЛЕ ЯДЕРНЫХ АВАРИЙ: ОСНОВА ДЛЯ
ПРЕДВАРИТЕЛЬНОГО ПЛАНИРОВАНИЯ

МАГАТЭ, ВЕНА, 2025 ГОД

STI/PUB/2022

ISBN 978-92-0-401524-9 (печатный формат)

ISBN 978-92-0-401724-3 (формат pdf)

ISBN 978-92-0-401624-6 (формат epub)

ISSN 2664-4886

ПРЕДИСЛОВИЕ

В соответствии с положениями своего Устава МАГАТЭ «стремится к достижению более скорого и широкого использования атомной энергии для поддержания мира, здоровья и благосостояния во всем мире». Помимо прочих функций, МАГАТЭ уполномочивается также «способствовать обмену научными и техническими сведениями о применении атомной энергии в мирных целях». Одним из путей к достижению этих целей является выпуск разнообразных 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 методические, технологические и управленческие аспекты планирования и реализации видов деятельности, связанных с использованием ядерных технологий в мирных целях. Руководящие указания, содержащиеся в публикациях Серии изданий МАГАТЭ по ядерной энергии, не отражают консенсуса государств-членов, но они проходят внутреннюю независимую экспертизу и перед опубликованием направляются на отзыв государствам-членам.

Нормы безопасности МАГАТЭ устанавливают основополагающие принципы, требования и рекомендации, касающиеся обеспечения ядерной безопасности, и служат глобальным источником 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.

Крупные аварии на АЭС или на установках топливного цикла происходят редко, но они могут привести к образованию больших объемов радиоактивных отходов с самыми разнообразными характеристиками, с которыми может быть трудно иметь дело. Наглядным примером этому служат проблемы, возникшие в результате аварии на АЭС «Три-Майл-Айленд» в 1979 году, и проблемы, сохраняющиеся после аварий на реакторе № 1 в Уиндскейле в 1957 году, на Чернобыльской АЭС в 1986 году и на АЭС «Фукусима-дайити» в 2011 году. Большие объемы радиоактивных отходов также могут образовываться в результате аварий на военных объектах или вследствие неправильного обращения с высокоактивными закрытыми источниками излучений. Необходимость обращения с большими, сопоставимыми по объему массами отходов, образующимися при реабилитации некоторых объектов ядерного наследия, также может стать источником ценного опыта при обращении с аварийными отходами.

Безопасное и экономически эффективное обращение с отходами, образовавшимися в результате крупной ядерной аварии, оказалось сложным и ресурсоемким делом. Немалые сложности могут возникнуть и при небольших авариях. Должны приниматься решения о конструкциях и технологиях, которые будут использоваться для переработки и захоронения разнородных веществ, входящих в состав отходов, а также о выборе площадок, которые будут использоваться для обращения с отходами перед захоронением, и самих пунктов захоронения.

В случае крупной аварии объемы радиоактивных отходов могут нарастать такими темпами, что ресурс существующей национальной инфраструктуры обращения и захоронения будет быстро исчерпан. Подходящих объектов для захоронения отходов с точки зрения их объемов или характеристик может не оказаться в наличии. В таких обстоятельствах неправильные меры реагирования, принятые вскоре после аварии, могут сузить круг возможных вариантов обращения и захоронения в будущем, значительно увеличить затраты и стать причиной серьезного облучения персонала и повышенного риска облучения населения. Таких ситуаций можно избежать благодаря упреждающему предварительному планированию действий на случай аварий, даже если вероятность серьезных аварий считается крайне низкой.

Новые знания, полученные при обращении с отходами, образовавшимися в результате аварий на Чернобыльской АЭС и АЭС «Фукусима-дайити», а также опыт, связанный с бывшими установками ядерного топливного цикла и предприятиями по производству ядерного оружия, неядерными авариями и использованием инструментов оценки отходов радиологических инцидентов, служат ценным материалом, на котором можно поучиться для упреждающего предварительного планирования и разработки стратегий. Во многих государствах-членах также накоплен большой опыт обращения со значительными объемами радиоактивных отходов прошлой деятельности на основе различных подходов, обеспечивающих достаточный уровень защиты и экономическую эффективность. Это позволило усовершенствовать эксплуатационные методы и получить опыт применения принципов изъятия и освобождения от контроля.

Проблемы обращения с отходами зависят от масштабов и тяжести аварии, а также от стадии реагирования. Ранние стадии реагирования на аварийные ситуации могут представлять трудность с той точки зрения, что решения должны приниматься быстро, количество работников и доступность установки ограничены, а приоритетом текущего момента является взятие под контроль самой аварийной ситуации. Проблемы могут быть связаны со сбором и хранением небольших количеств отходов в контейнерах без специальной обработки; необходимостью создания полноценных систем кондиционирования для локализации и стабилизации радионуклидов и поврежденного топлива; требованием организовать обращение с широким спектром отходов; работой в тяжелых физических и радиологических условиях и т.д. Выбор и/или создание системы обращения с отходами зависит от многих факторов, в том числе таких, как количество отходов и их географическая рассредоточенность, уровни загрязнения, физические и химические свойства, доступные методики и ресурсы, а также требования и возможности в области хранения и захоронения. Обращение с отходами может стать помехой для проведения восстановительных мероприятий, если соответствующие установки для обращения с отходами, логистическое и кадровое обеспечение не будут предоставлены в срок. Важное значение имеет интеграция программы восстановления с программой обращения с отходами.

Благодаря основательному планированию готовности государства-члены могут минимизировать количество отходов, требующих захоронения, обеспечить разделение отходов по типам и уровню радиоактивности, переработать или иным образом подготовить хранящиеся отходы к захоронению, а затем произвести их захоронение, сделав все это безопасным, эффективным и экономичным образом. Работа по решению этих взаимосвязанных задач всегда ведется в соответствии с принятыми стандартами, обеспечивающими защиту работников, населения и окружающей среды. Опыт прошлых крупных аварий, обобщенный в настоящей публикации, призван помочь в таком планировании готовности.

Сотрудниками МАГАТЭ, ответственными за настоящую публикацию, являются Г.Х. Нидер-Вестерман и Ф.Н. Драголич 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.

Хотя для обеспечения точности информации, содержащейся в настоящей публикации, были приложены большие усилия, ни МАГАТЭ, ни его государства-члены не несут ответственности за последствия, которые могут возникнуть в результате ее использования.

Данные здесь руководящие указания с описанием положительной практики отражают мнение экспертов и не являются рекомендациями, сформулированными на основе консенсуса государствами-членами.

Использование тех или иных названий стран или территорий не означает какого-либо суждения со стороны издателя — МАГАТЭ — относительно правового статуса таких стран или территорий, их органов и учреждений либо относительно определения их границ.

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

МАГАТЭ не несет ответственности за постоянство и точность приводимых в настоящей публикации адресов сайтов внешних или третьих сторон и не гарантирует того, что информационное наполнение таких сайтов является или останется точным и релевантным.

СОДЕРЖАНИЕ

1.	ВВЕДЕНИЕ	1
1.1.	Общие сведения	1
1.2.	Цель	4
1.3.	Область применения	4
1.4.	Структура	5
2.	ПРОИСХОЖДЕНИЕ И ХАРАКТЕРИСТИКИ АВАРИЙНЫХ ОТХОДОВ	7
2.1.	Объемы отходов	8
2.2.	Характеристики отходов	10
2.3.	Различия между аварийными и обычными отходами	12
3.	МЕТОД СИСТЕМНОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ ПРИ ПЛАНИРОВАНИИ ОБРАЩЕНИЯ С ОТХОДАМИ	13
3.1.	Система организации и иерархия требований	16
3.2.	Внедрение системы организации требований	17
4.	ПЛАНИРОВАНИЕ НА ПЕРИОД ДО И ПОСЛЕ АВАРИИ	41
4.1.	Предварительное планирование захоронения	46
4.2.	Планирование обращения с отходами после аварии	51
4.3.	Дополнительные замечания по плану мероприятий в период после аварии	57
5.	РЕАЛИЗАЦИЯ ПЛАНА ОБРАЩЕНИЯ С ОТХОДАМИ	58
5.1.	Переоборудование существующих объектов	61
5.2.	Размещение новых объектов	62
5.3.	Проектирование	62
5.4.	Лицензирование	63
5.5.	Строительство объектов и исполнение проектов	64
5.6.	Ввод в эксплуатацию и испытания	65
5.7.	Обучение	66
5.8.	Эксплуатация и техническое обслуживание	66
5.9.	Вывод из эксплуатации установок для обращения с отходами и их хранения	67
5.10.	Обеспечение качества и контроль качества	68
6.	СТРАТЕГИИ, МЕТОДОЛОГИИ И МЕТОДЫ ХАРАКТЕРИЗАЦИИ ОТХОДОВ	69
6.1.	Стратегия и методология характеристики	69
6.2.	Разноплановые требования к данным о характеристиках	73
6.3.	Методы и методики характеристики	77
6.4.	Примеры характеристики во время прошлых ядерных аварий	81
7.	СБОР, ПЕРЕМЕЩЕНИЕ И ИЗВЛЕЧЕНИЕ ОТХОДОВ	85

7.1.	Первоначальный сбор отходов	85
7.2.	Перемещение крупногабаритных предметов и/или сыпучих материалов	86
7.3.	Дистанционная оценка материалов в поврежденных сооружениях.	90
7.4.	Извлечение из хранилищ	92
8.	ПЕРЕРАБОТКА ОТХОДОВ	93
8.1.	Предварительная обработка	94
8.2.	Обработка.	99
8.3.	Кондиционирование	111
8.4.	Контейнеры и упаковка.	117
9.	ПЕРЕВОЗКА И ПЕРЕМЕЩЕНИЕ	123
10.	ХРАНЕНИЕ	127
10.1.	Первоначальные соображения	128
10.2.	Проблемы планирования хранения	129
10.3.	Выбор подходящих технических решений по хранению	132
10.4.	Импровизированные временные сооружения для хранения.	132
10.5.	Специально оборудованные сооружения для временного хранения	135
11.	ЗАХОРОНЕНИЕ.	141
11.1.	Объем отходов влияет на национальную деятельность по захоронению отходов	143
11.2.	Определение типов пунктов захоронения, которые могут потребоваться, на основе дифференцированного подхода	145
11.3.	Количество, размер и тип необходимых пунктов захоронения	146
11.4.	Размещение новых пунктов захоронения после аварии	147
11.5.	Эксплуатация пункта захоронения после аварии	152
11.6.	Опыт захоронения отходов после крупных аварий	155
12.	ЗАКЛЮЧЕНИЕ: О ТОМ, КАК ВАЖНО БЫТЬ ВО ВСЕОРУЖИИ	157
Приложение I:	АВАРИЯ НА РЕАКТОРЕ В УИНДСКЕЙЛЕ	159
Приложение II:	АВАРИЯ НА АЭС «ТРИ-МАЙЛ-АЙЛЕНД»	163
Приложение III:	АВАРИЯ НА ЧЕРНОБЫЛЬСКОЙ АЭС	168
Приложение IV:	АВАРИЯ НА АЭС «ФУКУСИМА-ДАЙТИ»	178
Приложение V:	ДРУГИЕ ЯДЕРНЫЕ АВАРИИ	184
Приложение VI:	РЕАБИЛИТАЦИЯ ОБЪЕКТОВ ЯДЕРНОГО НАСЛЕДИЯ	188
	СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ	197
	СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ.	207
	СОСТАВИТЕЛИ И РЕЦЕНЗЕНТЫ.	209
	СТРУКТУРА СЕРИИ ДОКУМЕНТОВ МАГАТЭ ПО ЯДЕРНОЙ ЭНЕРГИИ	211

1. ВВЕДЕНИЕ

1.1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

В результате крупной аварии на атомной электростанции (АЭС) или на установке топливного цикла обычно образуются большие объемы радиоактивных отходов и/или отходов с самыми разнообразными характеристиками. Примером этому могут служить проблемы обращения с отходами на площадке, возникшие после аварии на энергоблоке № 2 АЭС «Три-Майл-Айленд» (ТМА)¹ в 1979 году в Пенсильвании, Соединенные Штаты Америки (США) [1, 2], и сохраняющиеся проблемы с отходами как на площадке, так и за ее пределами после аварий на Чернобыльской АЭС в 1986 году [3–6] на Украине и АЭС «Фукусима-дайити» в 2011 году [7–12] в Японии. Большие объемы радиоактивных отходов могут также образовываться в результате аварий на военных объектах или вследствие непреднамеренных/преднамеренных действий, связанных с рассеиванием радиоактивного материала в районах городской застройки или других местах.

Авария на АЭС может иметь самые разные последствия — от практически полного отсутствия прямого воздействия на окружающую среду до крупных выбросов ядерных материалов в окружающую среду. В настоящей публикации рассматриваются уроки деятельности по обращению с отходами, образовавшимися в результате наиболее серьезных аварий в ядерной отрасли, в первую очередь опыт такой деятельности на реакторе № 1 в Уиндскейле, Камбрия (бывший Камберленд), Соединенное Королевство, а также на АЭС ТМА, Чернобыльской АЭС и АЭС «Фукусима-дайити». Хотя последствия этих аварий сильно отличались друг от друга, они наглядно демонстрируют весь спектр последствий прошлых аварий и могут служить основой для предварительного планирования потребностей в обращении с отходами при будущих ядерных или радиологических аварийных ситуациях.

На стадиях развертывания усилий и первоначального реагирования на аварии в Уиндскейле, на Чернобыльской АЭС и АЭС «Фукусима-дайити» произошли значительные выбросы радионуклидов в окружающую среду. На Чернобыльской АЭС во время аварии произошел выброс газообразных продуктов деления, летучих радионуклидов и частиц топлива. Аварии на реакторе в Уиндскейле и на АЭС «Фукусима-дайити» привели к выбросу газообразных продуктов деления и летучих радиоактивных веществ. Авария на АЭС ТМА, напротив, привела к незначительному выбросу радионуклидов, в основном инертных газообразных продуктов деления, которые были быстро рассеяны.

В случае с АЭС «Фукусима-дайити» выбросы преимущественно короткоживущих радионуклидов распространились за пределы площадки, что потребовало масштабной эвакуации жителей и активной кампании по очистке территории за пределами площадки для снижения уровня загрязнения и восстановления в максимально возможной степени среды обитания человека. На момент подготовки настоящей публикации в эвакуированные районы постепенно возвращалось население.

Усилия, предпринятые после аварии на Чернобыльской АЭС, включали в себя снижение уровней загрязнения и восстановление в максимально возможной степени среды обитания человека. Однако в случае с Чернобыльской АЭС выбросы за пределы площадки наряду с короткоживущими радионуклидами содержали долгоживущие актиниды, что потребовало не только эвакуации жителей, но и создания зоны отчуждения вокруг места аварии. Ввиду уровня и характера загрязнения постоянное проживание в пределах зоны отчуждения в обозримом будущем будет запрещено.

В случае аварии на АЭС ТМА последствия были ограничены ядерной установкой без значительных выбросов в окружающую среду. В случае с реактором в Уиндскейле произошел

¹ Список сокращений приведен в конце данной публикации.

выброс, но в основном очень короткоживущих радионуклидов, и эвакуировать жителей или проводить кампанию по очистке территории за пределами площадки не потребовалось.

Работы по обращению с отходами, скорее всего, начнутся, когда важнейшие противоаварийные мероприятия для стабилизации ситуации уже будут идти полным ходом или будут по большей части завершены. Однако противоаварийные мероприятия могут также предполагать частичную очистку площадки или пострадавшей установки для снижения уровней радиации и загрязнения, с тем чтобы получить или улучшить доступ к установке, так что некоторые работы по обращению с отходами начнутся одновременно с противоаварийными мероприятиями. По всей вероятности, эти работы будут включать в себя разделение загрязненного материала по измеренной мощности дозы гамма-излучения (МДГ) и/или по типу материала (грунт, растительность, обломки и т.д.) и отправку этих необработанных отходов во временные хранилища, чтобы облегчить выполнение шагов по обращению с отходами перед захоронением. В случае каждой конкретной аварии приоритеты будут разными; кроме того, они будут различаться для аварий с выбросами за пределы площадки и аварий, при которых повреждения локализованы/ограничены пределами ядерной установки или площадки. Например, в случае аварии на Чернобыльской АЭС приоритетом противоаварийной деятельности было в основном снижение уровня активности на площадке, чтобы работники многоблочной АЭС могли продолжить эксплуатацию трех оставшихся энергоблоков, не получивших серьезных повреждений во время аварии. Вне площадки усилия были сосредоточены на дезактивации для снижения уровня активности в окружающей среде, мерах контроля за распространением загрязнения и установлении контроля над эвакуированными территориями после выпадения радиоактивных осадков. С другой стороны, на реакторе в Уиндскейле и АЭС ТМА было на самой ранней стадии принято решение стабилизировать ситуацию путем окончательного останова действующего реактора и АЭС соответственно. На АЭС «Фукусима-дайити» главной задачей было обеспечить стабилизацию трех затронутых аварией реакторов и окончательно заглушить три оставшихся реактора, несмотря на то что энергоблоки № 5 и № 6 не были затронуты аварией. Параллельно с этим масштабные усилия, развернутые за пределами площадки в связи с радиоактивными выпадениями в результате повреждения реакторов, были осложнены необходимостью преодоления серьезных последствий стихийного бедствия, вызванного землетрясением и последовавшим за ним цунами. Эти разноплановые цели обусловили применение совершенно разных подходов к ликвидации последствий аварийных ситуаций, что впоследствии отразилось на проведении работ по обращению с отходами, описываемых в настоящем документе.

Объемы отходов, возникающих после аварии, могут без труда превысить годовой объем радиоактивных отходов, образующихся в государстве-члене, выйдя за пределы возможностей существующих лицензированных пунктов обращения с радиоактивными отходами и пунктов захоронения. Такие аварии могут также привести к образованию разнотипных, потенциально проблемных потоков отходов, которые не возникают в ходе нормальной эксплуатации. Физические, химические и радиологические характеристики некоторых отходов могут быть несовместимы с существующими установками по обработке отходов или пунктами захоронения. Как следствие, существующая национальная инфраструктура и процедуры обращения с радиоактивными отходами (методы характеристики отходов; регламенты эксплуатации установок, мощность оборудования или конструкции; критерии приемлемости отходов для захоронения; пункты захоронения отходов; порядок выдачи разрешений на перевозку и захоронение и т.д.) могут не справиться с образовавшимися отходами ни в силу их характера, ни из-за их объема.

В силу внезапного характера ядерные аварии могут создать кризисные условия из-за возможности возникновения непосредственных и значительных рисков для здоровья и безопасности людей, а также рисков причинения большого ущерба имуществу и хозяйственной деятельности. Эти кризисные условия могут усугубиться, если авария вызвана масштабным стихийным бедствием — как это было в случае с АЭС «Фукусима-дайити», — когда инфраструктура за пределами площадки серьезно повреждается или затрагивается иным образом. На начальных стадиях аварии образование отходов происходит в течение короткого периода

времени (дней или недель). Обращение с отходами не входит в круг первоочередных задач на этой начальной стадии аварийной ситуации, на которой все усилия закономерно сосредоточены на сохранении жизни людей и окружающей среды. Однако меры и решения, принятые на начальных стадиях реагирования, могут осложнить дальнейшие действия по обращению с отходами. В дальнейшем, по завершении начальной, активной стадии аварии, деятельность по обращению с отходами может продолжаться в течение длительного времени (от нескольких лет до нескольких десятилетий). Основательное планирование готовности позволит оставить в запасе ценные альтернативные варианты обращения с отходами, которые в противном случае могут быть ограничены или исключены.

Потоки отходов, образующихся в результате ядерной или радиологической аварии, могут отличаться от отходов, образующихся при нормальной эксплуатации ядерных установок, и, к примеру, включать:

- большие объемы, до миллионов кубических метров, преимущественно слабозагрязненных материалов, которые, возможно, придется обрабатывать как радиоактивные отходы;
- меньшие количества неконтролируемых высокоактивных отходов;
- рассеянные радионуклиды, которые, как правило, не встречаются в отходах нормальной эксплуатационной деятельности.

На тип и степень загрязнения будут влиять тип и количество радионуклидов на установке на момент события и тип и количество радионуклидов, выброшенных поврежденной установкой во время события, а также условия окружающей среды во время и после события.

Характеристики отходов также зависят от конструкции установки, сценария события, метеорологических условий, избирательного характера осаждения радионуклидов, распада короткоживущих радионуклидов и того, каким образом и насколько тщательно проводится очистка.

Характер деятельности по обращению с отходами после аварии, повлекшей за собой выброс радиоактивных материалов в окружающую среду, должен отражать как масштаб события (например, причину, тип установки, размер затронутой территории и т.д.), так и его серьезность (например, массу, активность, период полураспада и скорость выброса радионуклидов, их рассеивание в окружающей среде и близость к населенным пунктам, а также уязвимость экосистем). Тяжесть аварии будет оцениваться также по всем сопутствующим нерадиологическим последствиям. Международная шкала ядерных и радиологических событий (ИНЕС) — это полезный инструмент, позволяющий судить о значимости ядерной или радиологической аварии или инцидента, связанного с выбросом радиоактивных материалов в окружающую среду, с точки зрения безопасности. Это логарифмическая шкала от уровня 1 (наименьшее воздействие) до уровня 7 (наибольшее воздействие).

Подход к обращению с отходами в случае аварии, разумеется, должен быть соразмерен ее тяжести и масштабу. При относительно малозначащих событиях, представляющих ограниченную радиологическую опасность с возможностью ее локализации, радиоактивные материалы можно без труда собрать и поместить на хранение в простые контейнеры, пока не будет принято решение о способе захоронения. Другая крайность — это ситуация, когда захват, стабилизация и локализация высокоактивных радионуклидов или поврежденного ядерного топлива, скорее всего, потребуют использования дистанционных или автоматизированных методов для ограничения облучения и сбора выброшенного материала, а также сложных методов кондиционирования, обеспечивающих безопасное и надежное хранение до принятия дальнейших решений. В любой ситуации, требующей обращения с отходами, детали принятого подхода будут учитывать широкий спектр радиологических и логистических факторов и не в последнюю очередь объем отходов и концентрацию активности в них, физические и химические характеристики отходов, а также ресурсы, доступные для реализации технических решений.

Помимо проблем, связанных с ликвидацией последствий аварии и обращением с образующимися отходами, и одновременно с ними встает задача ведения эффективной

информационной работы с пострадавшими. Большинство лиц из населения не знают, чего ожидать в случае внезапного выброса радиоактивных материалов в окружающую среду, но можно предположить, что они будут опасаться худшего. Такая ситуация может породить сильное общественно-политическое давление, подталкивающее к оперативным действиям в ответ на реальные и гипотетические опасности. В зависимости от обстоятельств общественный и государственный интерес к происходящему может возникнуть и в соседних странах. Такие условия предъявляют огромные требования к людским и финансовым ресурсам организаций, ответственных за реагирование на аварию и точное информирование о принимаемых мерах. Во многих государствах-членах эти обязанности распределены между несколькими организациями на национальном, региональном (штатном/провинциальном) и местном уровнях. Это само по себе ставит на повестку дня сложнейшие задачи координации, логистического обеспечения и обмена информацией.

Общепризнан тот факт, что соблюдение идеальных правил обращения с отходами не всегда бывает возможным, особенно на ранних стадиях ядерной аварии, когда во главу угла ставится задача безопасного установления контроля над ситуацией. Вместе с тем требования и принципы обращения с отходами и последствия их применения должны учитываться на каждой стадии аварии, даже если они не вполне выполнимы в данный момент и необходимо добиться их полного соблюдения в разумный срок после окончания начальной стадии аварии. Основные принципы безопасности при обращении с радиоактивными отходами и проведении послеаварийных мероприятий изложены в других публикациях МАГАТЭ, см. [13–20].

1.2. ЦЕЛЬ

Исходя из прошлого опыта крупных ядерных аварий можно предугадать некоторые аспекты потенциальных сценариев аварии и использовать их в качестве основы для предварительного планирования и подготовки, что может значительно улучшить качество восстановительных мероприятий в случае будущей аварии [21].

Цель настоящей публикации — использовать этот опыт для представления систематизированной и развернутой информации о технологических аспектах обращения с потенциально большими объемами отходов и/или сложными отходами, образующимися в течение короткого срока при аварии. Эта информация может быть использована в качестве вводной на мероприятиях по упреждающему предварительному планированию, в ходе которых анализируются возможные сценарии аварии на ядерных установках в том или ином государстве-члене. В данном контексте предполагается, что объемы таких отходов выйдут за пределы возможностей и/или мощностей, имеющихся у существующей инфраструктуры обращения с отходами в государстве-члене.

Приведенные здесь руководящие указания с описанием положительной практики отражают мнение экспертов и не являются рекомендациями, сформулированными на основе консенсуса государствами-членами.

1.3. ОБЛАСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ

Главная задача настоящей публикации — дать руководящие указания по планированию и реализации технологических аспектов обращения с отходами ядерных аварий, от их образования вплоть до окончательного захоронения, опираясь на соответствующий опыт предыдущих событий.

На рис. 1 представлена обобщенная хронология действий по обращению с отходами после аварии. Отображение такой деятельности в виде дискретных этапов — это неизбежное упрощение реальных ситуаций. На практике одни виды деятельности будут в значительной мере пересекаться с другими. Начальная стадия неотложных действий по локализации распространения последствий



РИС. 1. Хронология действий по обращению с аварийными отходами. Взято с изменениями из [22].

перерастает в промежуточную стадию, на которой создаются более безопасные условия на площадке, а затем в более долгосрочную стадию реабилитации, вывода из эксплуатации и восстановления площадки. На приведенной хронологической шкале не соблюдается масштаб: например, начальная стадия аварийного реагирования может длиться от нескольких часов до нескольких недель, а последующие работы по ликвидации последствий, выводу из эксплуатации и восстановлению — от нескольких лет до нескольких десятилетий.

1.4. СТРУКТУРА

В разделе 2 описываются источники отходов, которые могут возникнуть в результате аварии на ядерной установке, и их возможные характеристики. В разделе 3 рассматривается применение метода системного проектирования при обращении с отходами, в разделе 4 — планирование мероприятий на период до и после аварии. В разделе 5 разбираются этапы и возможные схемы обращения с отходами перед захоронением. В разделе 6 описывается практический процесс обращения с отходами. В разделе 7 описываются различные методики, которые могут быть применены для характеристики аварийных отходов. В разделах 8–11 рассматриваются вопросы сбора/перемещения, перевозки, переработки и хранения аварийных отходов соответственно. В разделе 12 описаны возможные варианты и процедуры захоронения отходов. В разделе 13 представлены общие выводы. Каждый раздел начинается с краткого перечисления некоторых основных уроков, которые были извлечены в данной тематической области из деятельности по ликвидации последствий прошлых ядерных аварий.

В шести приложениях приведены краткие описания четырех крупных аварий и связанных с ними отходов, которые используются в качестве основных примеров по всему тексту публикации, а также информация о других авариях и опыте обращения с большими объемами отходов, образовавшихся в ходе работ по реабилитации объектов ядерного наследия. В приложении I описана авария 1957 года на реакторе № 1 в Уиндскейле, в приложении II — авария на АЭС ТМА, в приложении III — авария на Чернобыльской АЭС и в приложении IV — авария на АЭС «Фукусима-дайти». В приложении V дана подборка сведений о других авариях с меньшими последствиями, а в приложении VI описываются некоторые работы по обращению с большими объемами отходов (сопоставимыми с теми, которые могут возникнуть в результате аварии), которые образуются в процессе реабилитации объектов ядерного наследия.

Настоящая публикация — одна из серии публикаций МАГАТЭ, имеющих целью поддержать усилия государств-членов по повышению готовности к ядерной или радиологической аварийной ситуации:

- IAEA-TECDOC-1826, «Management of Large Volumes of Waste Arising in a Nuclear or Radiological Emergency» («Обращение с большими объемами отходов, образующихся в результате ядерной или радиологической аварийной ситуации») [21];
- IAEA Nuclear Energy Series No. NW-T-2.7, «Experiences and Lessons Learned Worldwide in the Cleanup and Decommissioning of Nuclear Facilities in the Aftermath of Accidents» («Мировой опыт и уроки очистки и вывода из эксплуатации ядерных установок после аварий») [22];
- IAEA Nuclear Energy Series No. NW-T-2.10, «Decommissioning after a Nuclear Accident: Approaches, Techniques, Practices and Implementation Considerations» («Вывод из эксплуатации после ядерной аварии: подходы, методы, практика и соображения по фактическому осуществлению») [23].

Первая публикация, «Management of Large Volumes of Waste Arising in a Nuclear or Radiological Emergency» [21], дает широкую картину ситуации с учетом аспектов безопасности, технологии и отношения общества. В сопутствующей публикации более детально описывается технический опыт и уроки, полученные при очистке и выводе из эксплуатации ядерных установок после аварии [22], а в третьей публикации, дополняющей две первые, излагаются соображения, связанные с методами, практикой и методологией фактического осуществления [23]. Вопросы обращения с аварийными радиоактивными отходами на всех стадиях вплоть до захоронения рассматриваются в данной публикации.

В настоящей публикации рассматриваются несколько источников аварийных отходов. Для целей данной публикации они определяются следующим образом:

- a) первичные отходы: образуются как прямой результат аварии (например, загрязненное оборудование, обломки твэлов, поврежденное или загрязненное оборудование или сооружения в зоне аварии и т.д.). Как правило, это будут твердые отходы, которые находятся на площадке и могут иметь высокую активность;
- b) отходы стабилизационной деятельности: образуются в результате стабилизации условий (например, подачи воды для охлаждения реактора) или создания безопасной для входа зоны (например, первичного удаления сильно загрязненных обломков конструкций). Эти отходы могут быть твердыми или жидкими и будут в основном находиться на площадке;
- c) отходы восстановления/реабилитации: как правило, твердые отходы, образующиеся в результате восстановления загрязненных территорий (например, грунт, листва, строительный мусор и т.д.) как на площадке, так и за ее пределами;
- d) вторичные отходы: твердые или жидкие отходы, связанные с очисткой и другими мероприятиями (например, защитная одежда работников, дезактивационные жидкости и т.д.) или обработкой первичных отходов (например, фильтры системы газоочистки после сжигания и т.д.);

- е) сопутствующие отходы: твердые или жидкие отходы, образующиеся как косвенное следствие аварии (например, в результате очистки мест временного хранения после того, как они выполнили свою функцию) как на площадке, так и за ее пределами;
- ф) отходы деятельности по выводу из эксплуатации: образуются в результате демонтажа установки, затронутой аварией, и всех связанных с ней объектов, включая новые объекты по обработке и хранению отходов, построенные или переоборудованные для использования в процессе послеаварийного восстановления/реабилитации. Эти отходы могут быть твердыми или жидкими и, как правило, содержат крупное оборудование и/или строительный мусор. Они могут иметь более высокую активность и/или быть больше по объему, чем отходы «обычной» деятельности по выводу из эксплуатации.

Вышеуказанные типы отходов могут не быть взаимоисключающими и на практике могут не разделяться и не утилизироваться по отдельности. Однако при планировании мероприятий по обращению с отходами важно учитывать все возможные источники отходов, их характеристики и местонахождение. В контексте настоящей публикации под «отходами» понимается любой загрязненный материал, образующийся в результате аварии, ликвидации ее последствий и/или восстановления площадки.

В настоящей публикации не рассматриваются:

- подробности обращения с облученным топливом (например, вопросы деградации топлива, расплава ядерного топлива и т.д.);
- вопросы учета ядерных материалов и гарантий;
- отходы, образующиеся в результате нарушения нормального режима эксплуатации или незначительных инцидентов, которые могут быть утилизированы с помощью существующей инфраструктуры и/или методов;
- вопросы нетехнологического планирования (например, вопросы государственного регулирования и т.д.), которые освещаются в [21].

2. ПРОИСХОЖДЕНИЕ И ХАРАКТЕРИСТИКИ АВАРИЙНЫХ ОТХОДОВ

Основные извлеченные уроки

- Требуется предварительная системная оценка общего объема отходов (классифицируемых вначале по уровню активности, а затем по типу) и скорости образования отходов при ликвидации последствий аварии.
- Эти отходы почти наверняка будут больше по объему и будут менее однородными, чем «обычные» отходы, образующиеся на действующей лицензированной ядерной установке.
- При планировании следует учитывать, что отходы могут образовываться в результате деятельности как на площадке (внутри границ лицензированной площадки), так и за ее пределами (вне границ площадки).
- Объемы и типы образующихся отходов будут определяться принятыми критериями ликвидации последствий и ожидаемым конечным состоянием.
- Обращение с опасными (например, хемотоксичными) отходами, подвергшимися радиоактивному загрязнению, может быть сложной задачей.

В настоящей публикации рассматривается обращение с радиоактивными отходами, образующимися в результате ядерной аварии и последующих мероприятий по очистке/восстановлению. В ней не рассматриваются отходы, образования которых можно ожидать в результате нормальной эксплуатации ядерных установок. В результате ядерных аварий могут образовываться чрезвычайно большие объемы разнородных отходов, с трудом поддающихся характеристике. Примеры конкретных аварий и образовавшихся потоков отходов, положенные в основу данной публикации, приведены в приложениях. Следует отметить, что список прошлых аварий не является исчерпывающим.

В Глоссарии МАГАТЭ по вопросам безопасности [24] нет определения «аварийных отходов». Для целей данной публикации под ними понимаются радиоактивные отходы, образовавшиеся в результате ядерной аварии, которые не могут быть безопасно утилизированы на базе современных мощностей национальной системы обращения с отходами. Можно ожидать образования всех классов отходов, определенных в публикации Серии норм безопасности МАГАТЭ, № GSG-1, «Классификация радиоактивных отходов» [13], включая освобожденные от контроля отходы (ОО), очень короткоживущие отходы (ОКЖО), очень низкоактивные отходы (ОНАО), низкоактивные отходы (НАО), среднеактивные отходы (САО) и высокоактивные отходы (ВАО). Можно также дать определение отходам, образующимся на разных стадиях аварии, как указывается в разделе 1. В таблице 1 показаны отходы, разделенные на общие группы по типу и активности, которые обычно образуются в результате крупной ядерной аварии.

Потенциальные объемы отходов, которые могут образоваться в результате ядерной аварии, рассматриваются в разделе 2.1, характеристики отходов представлены в разделе 2.2, а различия между отходами, образующимися при ожидаемой нормальной эксплуатации ядерных установок, и отходами, образующимися в результате аварии, рассматриваются в разделе 2.3.

2.1. ОБЪЕМЫ ОТХОДОВ

Для планирования стратегий обращения с потенциально очень большим объемом радиоактивных отходов, образующихся в результате аварии, необходима предварительная системная оценка общего объема отходов (классифицируемых вначале по уровню активности, а затем по типу) и скорости образования отходов в процессе очистки. Эта информация станет ключевым элементом основы всех дальнейших мероприятий, необходимых для ликвидации последствий аварии. Необходимо учесть следующие моменты:

- критерии очистки и уровни действий по дезактивации (например, уровень освобождения от контроля);
- характер аварии, тип и объем восстановительных мероприятий (например, механизм образования отходов, метод дезактивации, вторичные отходы и т.д.);
- объем и скорость образования отходов, оцениваемые на поэтапной основе в зависимости от стадии реагирования (например, активная стадия, стадия восстановления, последующая долгосрочная стадия обращения с отходами).

Типы и объемы радиоактивных отходов, образовавшихся во время четырех крупных аварий на АЭС, используемых в качестве примеров в данной публикации, подробно описаны в приложениях I–IV. Эти показатели варьируются в широких пределах — от самых низких, как, например, на реакторе в Уиндскейле и АЭС ТМА, где образовались десятки тысяч кубометров отходов, до Чернобыля и Фукусимы, где образовались миллионы кубометров отходов. Для сравнения, годовое производство отходов типичным реактором мощностью 1000 МВт (эл.) составляет ~250–400 м³ в год. За типичный 60-летний срок службы это составит ~25 000 м³, а еще 10 000 м³ образуется в результате вывода реактора из эксплуатации.

ТАБЛИЦА 1. ТИПЫ ОТХОДОВ, ОБЫЧНО ОБРАЗУЮЩИХСЯ В РЕЗУЛЬТАТЕ КРУПНОЙ ЯДЕРНОЙ АВАРИИ

Уровень активности отходов	Потенциально большие объемы твердых отходов	Отдельные крупные элементы твердых отходов	Жидкие/влажные твердые отходы
НАО (могут включать ОО, ОКЖО и ОНАО, в зависимости от национальных систем классификации)	— Грунт, на площадке и за ее пределами — Мусор, на площадке и за ее пределами, например деревья — Бетон из разрушенного сооружения — Абсорбенты — Пыль — Вторичные отходы, например использованная защитная одежда	— Транспортные средства и т.д. — Поврежденное оборудование	— Вода, используемая для дезактивации — Масла, растворители и т.д. — Многофазные жидкости
САО	— Грунт на площадке — Мусор на площадке — Абсорбенты радионуклидов в охлаждающей воде и т.д. — Зольный остаток от сжигания — Бетон и другие обломки	— Поврежденное оборудование	— Вода охлаждения активной зоны реактора — Жидкости для дезактивации — Рафинаты с перерабатывающих предприятий — Шлам из очистных систем — Отработавшие ионообменные среды
ВАО	— Поврежденное топливо и топливосодержащие материалы	— Активная зона реактора	— Рафинаты с перерабатывающих предприятий

Помимо этих четырех общеизвестных крупных аварий, большие объемы радиоактивных отходов образовались также в результате ряда других аварий. К ним относятся (подробные сведения о каждой из них приведены в приложении V):

- a) взрыв емкости для хранения жидких высокоактивных отходов в 1957 году на заводе по производству плутония «Маяк» близ города Кыштым на Урале, Российская Федерация;
- b) крушение военного самолета с ядерным оружием на борту в 1966 году близ Паломареса, Испания;
- c) случайное попадание в металлолом и расплавление установки для дистанционной лучевой терапии в 1983 году в Сьюдад-Хуаресе, Мексика;
- d) неправильное обращение местных жителей с заброшенной радиотерапевтической установкой в 1987 году в Гоянии, Бразилия;
- e) случайное расплавление изъятых из употребления закрытого радиоактивного источника в 1998 году на сталеплавильном заводе «Асеринокс» в Лос-Барриосе, Испания.

Имел место ряд аварий с ограниченным прямым воздействием за пределами площадки или полным отсутствием такового, которые все же имели серьезные последствия с точки зрения обращения с отходами. Например, было несколько случаев повреждения активной зоны реакторов с натриевым теплоносителем, которые потребовали обращения с отработавшим топливом с натриевым контактным слоем и с загрязненными натрием системами и конструкциями (энергоблок «Ферми-1», 1966 год; EBR-1, 1955 год), что создало технически сложные проблемы обращения с отходами для их последующего хранения и захоронения. Аналогичные локальные, но серьезные проблемы обращения с отходами могут возникнуть в результате аварий и событий, не связанных с реакторами. Например, на заводе по извлечению плутония и урана, площадка «Ханфорд» (США), были закрыты и опечатаны железнодорожные перегрузочные туннели, в результате чего под землей остались загрязненные железнодорожные вагоны. Туннель и подвижной состав были загрязнены ядерными материалами, полученными при производстве ядерного оружия, что имело последствия с точки зрения радиологической, ядерной и токсической безопасности. Это потребовало масштабных и тщательно продуманных действий по изоляции и утилизации отходов.

2.2. ХАРАКТЕРИСТИКИ ОТХОДОВ

Чтобы классифицировать отходы для дальнейшего обращения с ними и определения подходящих технических решений по захоронению, на различных этапах процесса обращения с отходами потребуется детальная характеристика, описанная в разделе 7. Отходы, образующиеся в результате аварии, обычно можно разделить на жидкости, твердые отходы, влажные твердые отходы и газы. Общие свойства этих потоков отходов описаны ниже, а ключевые характеристики, которые необходимо знать для обращения с ними, сведены в таблицу 2.

- a) Жидкие:
 - большие объемы; активность от очень низкой до высокой; сложный химический состав (например, соли, масла, взвеси, биологические загрязнения и т.д.); могут происходить из многих источников;
 - примеры: загрязненная вода теплоносителя, природные источники (подземные воды, дождь, озера/реки/море), вода для дезактивации и т.д.
- b) Твердые:
 - большие объемы; активность от очень низкой до высокой; вторичные отходы, материалы, попавшие в загрязненную зону (инструменты, оборудование и т.д.); разнородные материалы;
 - примеры: поврежденное топливо, обломки конструкций активной зоны, грунт, мусор, металл, растительность, компоненты, средства защиты, загрязненные туши домашних животных, загрязненные тела людей, фильтры, зольный остаток от сжигания и т.д.
- c) Влажные твердые:
 - активность от низкой до высокой; первичные и вторичные отходы; различные характеристики материала;
 - примеры: ионообменные смолы, шламы, осадки и т.д.
- d) Газообразные:
 - смеси продуктов деления (видовая принадлежность зависит от типа установки и условий эксплуатации); различные концентрации радионуклидов; потенциально воспламеняющиеся смеси;
 - примеры: летучие продукты деления, образующиеся при вентилировании после аварии, дымовой газ с неядерных мусоросжигательных установок, переоборудованных для использования в радиологических целях (примечание: дымовой газ с мусоросжигательных установок может содержать летучие элементы, такие как цезий, но системы рукавных

фильтров могут эффективно снижать концентрацию цезия до уровня ниже предела обнаружения, даже если используется пробоотборник воздуха большого объема), и т.д.

Для опасных отходов (например, гниющих или хемотоксичных материалов) определяющим фактором могут быть их нерадиологические свойства. Это может иметь значение при переработке/перемещении отходов (например, при наличии асбестового загрязнения), при хранении отходов (например, если наблюдается ускоренное разложение отходов) и при окончательном захоронении (например, если отходы содержат свинец).

ТАБЛИЦА 2. КЛЮЧЕВЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТВЕРДЫХ И ЖИДКИХ ОТХОДОВ, ОБРАЗУЮЩИХСЯ В РЕЗУЛЬТАТЕ КРУПНОЙ ЯДЕРНОЙ АВАРИИ

Характеристика	Твердые и влажные твердые отходы	Жидкие отходы
Физические характеристики	— Форма, объем и вес отходов — Место образования — Реологические свойства (шламов) — Содержание жидкости	— Объем отходов — Место образования, для нужд классификации радиологических свойств
Химические характеристики	— Химический состав (металл, цемент, полимер, комплексы и т.д.) — Химическая стабильность (например, самопроизвольная реакция, реакция с кислородом и т.д.) — Растворимость загрязнителей — Хемотоксичность	— Химический состав (соленость, pH, присутствие органики и т.д.) — Хемотоксичность
Радиологические характеристики	— Уровни активности β-γ- и α-излучающих радионуклидов — Содержание продуктов деления, продуктов активации и актинидов — Категории по уровням эквивалентной дозы (например, < 0,1, 0,1–10, 10–1000 и > 1000 мЗв/ч): полезно для определения подходящей схемы предварительного временного хранения — Проблемы ядерной критичности (остатки топлива)	— Уровни активности β-γ- и α-излучающих радионуклидов — Содержание продуктов деления, продуктов активации и актинидов — Проблемы ядерной критичности (остатки топлива)
Тепловые характеристики	— Воспламеняемость — Скорость тепловыделения при радиоактивном распаде и химической реакции — Теплопроводность	— Температура кипения — Летучесть — Воспламеняемость
Биологические характеристики	— Биологические реакции (например, разложение, микробиологические реакции и т.д.) — Гниение материалов животного происхождения — Возбудители инфекций	— Биологические реакции (например, разложение, микробиологические реакции и т.д.) — Возбудители инфекций

2.3. РАЗЛИЧИЯ МЕЖДУ АВАРИЙНЫМИ И ОБЫЧНЫМИ ОТХОДАМИ

Как уже говорилось ранее, в результате аварии может образоваться большой, незапланированный объем очень разнородных отходов. Чтобы составить план обращения с ними, полезно понять некоторые важные различия между аварийными отходами и отходами, образующимися в результате нормальной эксплуатации/условий. Основные различия вкратце перечислены ниже.

- a) Объемы аварийных отходов, как правило, больше тех, которые образуются в условиях нормальной эксплуатации. Например, объемы жидких и твердых отходов, образовавшихся после аварии на АЭС «Фукусима-дайти», и объемы твердых отходов, образовавшихся на Чернобыльской АЭС, на много порядков превышают объемы, образующиеся при нормальной эксплуатации.
- b) После ядерной аварии спектр радионуклидов и их концентрации в отходах могут быть больше. Например, количество короткоживущих бета/гамма-излучающих и связанных с топливом альфа-излучающих радионуклидов, выброшенных во время аварии на Чернобыльской АЭС, значительно превышало объемы любых газообразных выбросов, которые происходили во время нормальной работы.
- c) Короткоживущие радионуклиды могут в значительной степени подвергнуться распаду к тому времени, когда будет проводиться очистка. Таким образом, их концентрация будет ниже, чем в обычных отходах. Это может быть использовано в процессе планирования.
- d) В отличие от обычных отходов, химическое/биологическое содержимое и опасные факторы аварийных отходов могут быть сложными и изменчивыми.
- e) Характеристики обычных отходов известны на основе знания технологического процесса, тогда как характер отходов, образующихся во время аварии, зависит от сценария события и вызванных им воздействий, которые часто становятся известны не сразу или которые не до конца понятны.
- f) Физические характеристики отходов, образующихся в результате аварий, могут быть очень разнообразными, что приводит к появлению разнотипных отходов.
- g) В зависимости от преобладающих погодных условий аварийные отходы (в отличие от обычных отходов) могут быть рассеяны на большой площади и затронуть территории соседних стран.

Для жидких отходов желательно иметь представление как минимум о следующих свойствах, чтобы спланировать временное хранение и обращение с ними, а также последующие этапы обработки с учетом того, что методы обработки могут различаться в зависимости от процедуры сбора отходов:

- 1) концентрация активности (например, радионуклидный анализ);
- 2) место образования (для нужд классификации радиологических свойств);
- 3) объем и скорость образования отходов;
- 4) физический и химический состав.

Кроме того, в случае с отходами дезактивационной деятельности необходимо понимать суть процесса дезактивации и/или то, какие средства в нем используются.

Если подытожить вышесказанное, то аварийные отходы, как правило, больше по объему, более сложны и изменчивы, чем обычные отходы, и поэтому их труднее охарактеризовать, разделить и определить адекватные меры по обращению с ними.

3. МЕТОД СИСТЕМНОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ ПРИ ПЛАНИРОВАНИИ ОБРАЩЕНИЯ С ОТХОДАМИ

Основные извлеченные уроки

- Следует заранее определить роли, обязанности и ресурсы для разработки и реализации стратегии обращения с отходами, а также инстанции, принимающие решения.
- Чтобы найти оптимальные технические решения, при оценке и выборе вариантов обращения с отходами необходимо оценить все требования по показателям эффективности, учитывая взаимосвязь между ними и последствия для жизненного цикла.
- Формальный метод системного проектирования, который будет применяться в рамках системы управления требованиями, обеспечивает надежную основу для определения и учета целей, приоритетов и возможных вариантов, и он может быть разработан в ходе национального предварительного планирования.
- Следует разработать план, облегчающий информационную работу с общественностью и другими заинтересованными сторонами.
- Перед проектированием и строительством полномасштабных установок могут потребоваться некоторые научно-исследовательские и опытно-конструкторские работы, а также пилотные испытания.

Рациональный подход к обращению с отходами после аварии обеспечит эффективность и результативность предпринимаемых действий. По мере развития и стабилизации аварийной ситуации будут меняться приоритеты. Обращение с отходами не будет наивысшим приоритетом на ранних стадиях события. Однако некоторые из этих принимаемых на ранних стадиях решений могут оказать значительное влияние на количество и тип образующихся отходов. Кроме того, они могут сузить круг вариантов, доступных для последующих этапов обращения с отходами, или иным образом повлиять на эти варианты. Поэтому в качестве положительной практики рекомендуется заблаговременно установить четкие роли и обязанности по разработке и реализации стратегии обращения с отходами, которая может быть применена в случае аварии. При разработке этой стратегии целесообразно вначале определить все технические и нетехнические требования, которые будут предъявляться к системе обращения с отходами. Эти требования будут исходить из многих источников — как внутренних, от организаций, ответственных за ликвидацию последствий аварии и управление соответствующей установкой, так и внешних, от заинтересованных сторон в виде юридических, регулирующих, политических и общественных организаций, возможно, как на национальном, так и на международном уровне.

Как показывает опыт, разработка и применение прозрачных стратегий взаимодействия с заинтересованными сторонами может сыграть важную роль в формировании у общества доверия к общему подходу к обращению с отходами, что позволит сохранить гибкость в принятии последующих мер реагирования. Для достижения успеха необходимо тесно сотрудничать с регулируемыми органами и заинтересованными сторонами, чтобы вызвать доверие друг у друга и гарантировать выработку, принятие и внедрение грамотных технических подходов, позволяющих выполнить работы по очистке. Важно, чтобы эти технические подходы специально подбирались для учета и удовлетворения определенных требований.

Ликвидация последствий аварии на энергоблоке № 2 АЭС ТМА — один из ранних примеров взаимовлияния различных требований, осложненного как техническими, так и нетехническими (например, нормативными, политическими, корпоративными, общественными) проблемами [2]. Выше всех других целей была поставлена безопасность, которая использовалась в качестве основного требования при планировании и проведении работ. Кроме того, на ранних стадиях было принято решение не перезапускать реактор, и это помогло сфокусировать усилия на

обработке и дезактивации отходов. Была также применена стратегия использования гибких и параллельных технологий очистки, чтобы избежать накладок и свести к минимуму необходимость перезапуска проекта. Для выработки приемлемых решений руководство также взаимодействовало с регулирующими органами и заинтересованными сторонами. Действовавшие на момент аварии в Соединенных Штатах Америки правила захоронения низко- и среднеактивных отходов (НСаО) не отличались ни полнотой, ни четкостью. Хотя впоследствии были разработаны и изданы более адекватные регулирующие положения, в то время руководство энергоблока № 2 АЭС ТМА столкнулось с целым рядом технических и нормативных проблем, которые потребовали активного взаимодействия с регулирующим органом, а также изобретения на ходу первых методов обращения с отходами, особенно в том, что касается систем извлечения, хранения и переработки жидких отходов. Тем не менее деятельность по обращению с радиоактивными отходами велась безопасным образом как до, так и после введения в действие соответствующих правил. Адекватные правила, разработанные с учетом результатов аварии и мер реагирования, были изданы спустя примерно три года после аварии.

Осенью 1979 года был разработан сводный технический план, в котором были определены цели работы, расставлены приоритеты и установлены критерии завершения [2]. В январе 1980 года, примерно через девять месяцев после аварии, на АЭС ТМА было создано бюро по техническим и интеграционным вопросам. Это обеспечило присутствие на площадке персонала для руководства работами по ликвидации последствий [25]. В 1984 году под руководством бюро по техническим и интеграционным вопросам была разработана программная стратегия, в которой был более детально определен план мероприятий по ликвидации последствий. Эта программная стратегия показана на рис. 2.

Систематическое определение ключевых целей и приоритетов в области обращения с отходами вместе с пониманием наиболее важных внешних факторов и ограничений, а также их влияния на имеющиеся варианты обеспечивает важную основу для принятия решений по реагированию на события и обращению с отходами. Ожидается, что стратегия обращения с отходами будет отвечать

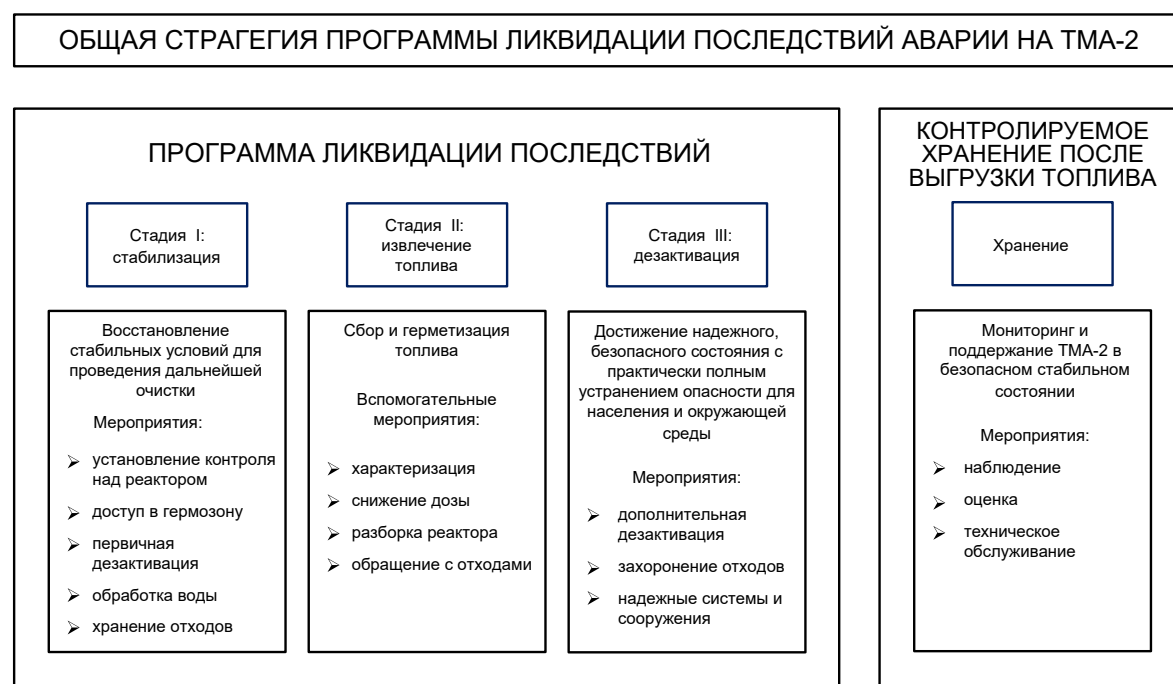


РИС. 2. Стратегия мероприятий по ликвидации последствий аварии на ТМА-2: стадии и мероприятия на каждой стадии. Взято с изменениями из [2].

многочисленным и подчас противоречивым требованиям. К их числу относятся требования, связанные с безопасностью работников на площадке и за ее пределами, безопасностью населения, правилами ядерной безопасности, вопросами физической безопасности, конечным состоянием площадки, где произошла авария, и установок по обращению с отходами, нуждами местного населения, национальной и местной политикой, международными соглашениями и т.д. Если эти требования не будут в целом пониматься до аварии и если не будет оперативно разработана стратегия по их уточнению в случае аварии, то это, скорее всего, обернется серьезными последствиями по ходу дальнейшей работы. Например, могут быть приняты технические решения, которые в конечном итоге не будут отвечать некоторым ключевым требованиям (в частности, касающимся свойств переработанных отходов и местонахождения, конструкции и конечного состояния хранилищ и пунктов захоронения), что приведет к дополнительным затратам и радиологическим последствиям, связанным с их корректировкой или адаптацией к ним.

Надежную основу для определения и учета целей, приоритетов и возможных вариантов обеспечивает формальный метод системного проектирования, реализуемый в рамках системы организации требований (COT). Если говорить об обеспечении готовности к авариям, то в национальные мероприятия по предварительному планированию будет целесообразным включить COT, устанавливающую иерархию применимых требований и способы, при помощи которых можно продемонстрировать их соблюдение (рис. 3). В случае аварии эта COT может быть

Уровень COT		Описание
1	Внешние требования высокого уровня	Внешние требования высокого уровня, касающиеся обращения с отходами: международные соглашения, государственная политика, регулирующие органы, местное население и т.д.
2	Требования к системе обращения с отходами	Качественные и количественные требования, определяющие, как общая система обращения с отходами будет отвечать внешним требованиям высокого уровня: они будут в основном определяться внутри организаций, управляющих установкой и ликвидацией последствий аварии, и использоваться для разработки мер реагирования и системы обращения с отходами.
3	Требования к подсистемам	Конкретные требования к каждой из основных конструкций, систем и элементов (КСЭ) системы обращения с отходами и связанной с ними деятельности, при необходимости выраженные в виде функций безопасности каждой КСЭ.
4	Проектные требования	Качественные показатели эффективности, определенные организацией, управляющей ликвидацией последствий аварии и системой обращения с отходами, для каждой КСЭ и каждого вида деятельности, чтобы обеспечить выполнение требований к подсистемам и связанных с ними функций безопасности.
5	Проектные спецификации	Показатели эффективности каждого компонента каждой отдельной КСЭ в системе обращения с отходами, а также подробные спецификации для проектирования, строительства и производства каждого компонента или вида деятельности, чтобы обеспечить достижение показателей эффективности, указанных в проектных требованиях.

РИС. 3. Возможная иерархия требований в COT для системы обращения с аварийными отходами.

напрямую увязана с обстоятельствами, характерными для конкретной установки и конкретной аварии. Использование метода системного проектирования в контексте захоронения отходов описано в сопутствующей публикации МАГАТЭ «Принципы и подходы, применяемые при проектировании пунктов захоронения радиоактивных отходов» [26].

Формализованный метод системного проектирования и строгое применение СОТ могут быть ресурсоемкими и затратными. Последовательная организация требований требует наличия ряда ключевых элементов, включая идентификацию требований и определение их применимости; подтверждения доступности практических инструкций и регламентов; положений, подтверждающие достижение желаемых результатов. Рекомендуется потратить время и ресурсы на определение эффективных требований в случае, если в государстве-члене возможна реализация нескольких сценариев аварии. Важно, чтобы в ходе оценки были также рассмотрены соответствующие механизмы эффективного соблюдения требований на всех стадиях послеаварийной деятельности. Следует отметить, что применение метода системного проектирования требует твердой приверженности его принципам, планомерных усилий по его внедрению и наличия достаточной ресурсной базы.

3.1. СИСТЕМА ОРГАНИЗАЦИИ И ИЕРАРХИЯ ТРЕБОВАНИЙ

Для того чтобы выработать оптимальные технические решения, при оценке и выборе вариантов обращения с отходами будет необходимо всесторонне оценить и систематизировать основные требования, включая использование показателей эффективности, а также организовать их применение. Они могут быть выстроены в соответствии с иерархическим подходом к организации требований. На рис. 3 показано, как может быть построена СОТ для системы обращения с аварийными отходами на основе типичной иерархической структуры, состоящей из ниспадающих каскадов требований.

На высшем уровне СОТ должны учитываться в основном внешние факторы/требования, которые задают граничные условия для общего подхода к обращению с отходами. Они происходят из правовых, политических и нормативных источников, а также из стратегических требований организации, ответственной за управление проектом. На этом верхнем уровне требования будут возникать в следующих основных областях:

- a) соблюдение нормативных положений в отношении здоровья и безопасности населения и работников;
- b) соблюдение нормативно-правовых положений в отношении воздействия на окружающую среду — как национальных, так и, возможно, трансграничных;
- c) требования к осуществимости, эффективности и практичности системы (включая требования к применению имеющихся технологий, использованию доступных земельных площадей и транспортных систем, совместимости между процессами на начальном и конечном этапах и т.д.);
- d) требования к затратам и финансированию (как общие, так и специально установленные для различных компонентов планируемого подхода, включая требования и ограничения, позволяющие компенсировать первоначальные затраты меньшими затратами на последующие мероприятия);
- e) требования к графику (общие и детальные цели графика; требования к срокам подготовки и завершения; наличие необходимых ресурсов и методик);
- f) требования к взаимодействию с общественностью/заинтересованными сторонами и ожидания;
- g) стратегические требования, касающиеся будущей судьбы аварийной установки и/или связанного с ней промышленного комплекса.

По мере определения конкретных составляющих конструкций, систем и элементов (КСЭ), которыми будет пользоваться система обращения с отходами, к ним могут предъявляться требования системного уровня и подсистемного уровня (уровни 2 и 3), результатом чего станет выработка спецификаций проекта/процессов на последних уровнях системного проектирования СОР. КСЭ будут включать в себя существующие элементы и конструкции внутри и вне самой аварийной установки, а также новые установки/системы, созданные для обращения с аварийными отходами. Нижние уровни СОР, показанные на рис. 3, постепенно становятся все более конкретными и детальными, и в конечном итоге функции безопасности и целевые показатели эффективности подсистемных компонентов и мероприятий приводят к составлению детальных спецификаций проекта.

3.2. ВНЕДРЕНИЕ СИСТЕМЫ ОРГАНИЗАЦИИ ТРЕБОВАНИЙ

В настоящем разделе описывается применение стратегии СОР сообразно иерархическому подходу к организации требований, описанному в разделе 3.1. Предметом рассмотрения являются, в частности, внешние факторы требований, которые должны быть учтены в структуре СОР. К ним относятся:

- требования к конечному состоянию аварийной площадки и контрольные точки промежуточных состояний;
- критерии приемлемости отходов для размещения в хранилищах, перевозки и захоронения;
- критерии свободной передачи, освобождения от контроля и рециклирования;
- требования к выбросам;
- требования лицензирования и нормативного регулирования всех соответствующих видов деятельности и установок;
- решения в отношении контроля затрат и бюджета;
- возможные варианты минимизации отходов и требования в этой связи;
- требования к управлению документацией и данными;
- требования к контролю качества.

Кроме того, при разработке СОР необходимо учесть ряд ограничений и возможностей, которые повлияют на разработку и реализацию подхода к обращению с отходами, включая:

- имеющиеся организационные структуры;
- имеющуюся инфраструктуру;
- резервы для покрытия непредвиденных расходов, которые могут быть связаны с обращением с аварийными отходами, таких как расходы на оборудование, материалы, вспомогательный персонал и капитальные затраты;
- возникающие в послеаварийный период требования к финансированию и источникам финансирования, в том числе косвенных затрат, такие как преобразование активов в ликвидный капитал для покрытия расходов на логистику и закупку предметов снабжения и т.д.;
- наличие персонала;
- формы применения технологий (стационарные либо мобильные/транспортабельные);
- возможность взаимодействия с другими программами или государствами-членами в части удовлетворения технических, логистических и финансовых потребностей;
- способность определять области, в которых было бы целесообразным проведение научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ (НИОКР);
- необходимость постоянной обратной связи и учета извлеченных уроков по ходу проведения работ.

Перечисленные выше внешние факторы требований СОР более низкого уровня и связанные с ними ограничения и возможности более подробно рассматриваются в нижеследующих подразделах.

3.2.1. Требования к конечному состоянию аварийной площадки и контрольные точки промежуточных состояний

Требования, определяющие конечное состояние аварийной площадки, необходимо установить на возможно более ранней стадии. Определение конечного состояния может обусловить выбор и внедрение технологий обращения с отходами. Например, если выбранное конечное состояние будет допускать только контролируемое будущее использование *in situ*, можно будет применить методики дезактивации и вывода из эксплуатации, что потенциально упростит деятельность по извлечению и обработке отходов.

Если же конечной целью является восстановление площадки для общего использования, потребуется значительно больший объем работы и технология для более глубокой переработки отходов. Таким образом, планирование мероприятий по восстановлению зависит от желаемого конечного состояния. Политика и стратегии в области реабилитации загрязненных площадок рассматриваются в других публикациях, например в [16, 27, 28].

Определение требуемого конечного состояния — непростая задача, и ее может быть нелегко решить одновременно с другими, не менее насущными задачами на ранних стадиях послеаварийной деятельности. Кроме того, ввиду длительных сроков, которые обычно требуются для достижения заданного конечного состояния восстановления после аварии, может быть оправдано применение адаптивного или поэтапного подхода к проведению работ. Для этого могут быть определены промежуточные состояния с четкими контрольными точками и конечные состояния промежуточных этапов, которые не предопределяют финального конечного состояния. Определение конечных состояний промежуточных этапов может также обеспечить более гибкое удовлетворение меняющихся требований заинтересованных сторон, укрепить доверие общества и дать возможность внедрения технологических новшеств — исходя из того, что за указанный срок все это может измениться. Промежуточные состояния могут быть полезны тем, что, помимо прочего, дают время на выработку целостного подхода к принятию решений и организацию более конструктивного и итеративного процесса взаимодействия с заинтересованными сторонами.

Пример применения такого поэтапного подхода — строительство нового безопасного конфайнмента (НБК) на Чернобыльской АЭС. Установка НБК над существующим объектом «Укрытие» отвечала задаче создания безопасной рабочей зоны для будущего демонтажа первоначального объекта «Укрытие» и окончательного извлечения поврежденных конструкций активной зоны. Расчетный срок службы НБК составляет 100 лет, что является достаточным сроком для разработки, испытания и безопасного внедрения требуемых технологий, включая роботизированное и дистанционно управляемое оборудование, необходимое для вывода из эксплуатации объекта «Укрытие» и энергоблока № 4. Сам объект «Укрытие» представляет собой промежуточное состояние, целью которого является стабилизация выбросов из энергоблока № 4 и локализация радиации в контролируемой зоне.

Одним из основных соображений при определении конечного состояния является решение о том, следует ли перезапускать поврежденную ядерную установку, а также то, как решение о перезапуске может повлиять на неповрежденные соседние энергоблоки и установки. Сроки и последствия принятия этого решения напрямую повлияют на направленность деятельности по обращению с отходами, выводу из эксплуатации, очистке и восстановлению — либо деятельности по ремонту и перезапуску. Двуправленная деятельность по перезапуску и ликвидации последствий будет интенсивным и сложным с управленческой точки зрения мероприятием, которое приведет к образованию значительного количества отходов во время и после его осуществления. Здесь наблюдаются разные ситуации: например, в отношении энергоблока № 2 АЭС ТМА (ТМА-2), энергоблоков №№ 1–3 АЭС «Фукусима-дайти», энергоблока № 4 Чернобыльской АЭС и реактора № 1 в Уиндскейле было на ранней стадии принято решение не перезапускать

поврежденные энергоблоки. Вместе с тем в отношении использования других установок на ядерных площадках, где эксплуатировались эти поврежденные энергоблоки, решения будут иными.

Поскольку выбросов за пределы поврежденного ТМА-2 зафиксировано не было, было принято решение продолжить эксплуатацию энергоблока № 1 АЭС ТМА (ТМА-1), находящегося в непосредственной близости от него. Это определило желаемое промежуточное состояние для поврежденного ТМА-2: провести работы по очистке, которые обеспечат соблюдение условий безопасности на ТМА-2 в достаточной мере для того, чтобы продолжить эксплуатацию ТМА-1, что потребует нескольких лет. Это также привело к тому, что вывод из эксплуатации и окончательная реабилитация площадки — то есть достижение конечного состояния — были отложены до момента останова ТМА-1 в сентябре 2019 года. Снос станции был отложен за счет применения подхода SAFSTOR («безопасная консервация») Комиссии по ядерному регулированию США (КЯР), который позволяет достичь конечного состояния за 60 лет и тем самым также отложить принятие решения о конечном состоянии ядерной площадки на более поздний срок. Этот подход, безусловно, повлияет на масштаб требуемых мероприятий по обращению с отходами.

Чернобыльская АЭС проектировалась как многоблочная станция, где некоторые системы были общими для энергоблоков № 1 и № 2, а также для энергоблоков № 3 и № 4. Энергоблоки № 1 и № 2 не были затронуты аварией, а изоляция энергоблока № 3 от разрушенного энергоблока № 4 была сочтена возможной. Было определено промежуточное состояние: ограничить распространение радиоактивности поврежденным энергоблоком путем стабилизации выбросов с энергоблока № 4. Это привело к строительству объекта «Укрытие» и достижению первоначальных целей очистки в пределах зоны отчуждения, что позволило за несколько лет восстановить работу энергоблоков №№ 1, 2 и 3. В итоге было принято новое решение — заглушить все остальные реакторы, и последним остановленным реактором стал энергоблок № 3, который был заглушен 15 декабря 2000 года. Кроме того, выделение зоны отчуждения дало возможность локализовать отходы и создать безопасные условия для пострадавшего населения, что позволило продвинуться вперед в деятельности по очистке. Создание зоны отчуждения и эвакуация населения могут рассматриваться как начальное промежуточное состояние, облегчающее текущие и будущие усилия по выводу станции из эксплуатации.

Когда уровни активности снизятся, границы этой зоны можно будет изменить. Чернобыльскую зону отчуждения можно также воспринимать как временное место хранения долгоживущих отходов или ВАО, которые в конечном итоге будут захоронены в геологическом хранилище. Окончательное решение о конечном состоянии площадки станции и зоны отчуждения обсуждается до сих пор. Однако предполагается, что искомое конечное состояние будет предусматривать будущее использование в промышленных целях по крайней мере части зоны отчуждения. Первый шаг в этом направлении уже сделан: в зоне отчуждения построена солнечная электростанция.

На АЭС «Фукусима-дайити» было принято решение не перезапускать неповрежденные энергоблоки №№ 4, 5 и 6 и сосредоточить усилия на смягчении последствий аварии для всей ядерной площадки. Это соответствовало идее о том, что в будущем эта площадка не будет использоваться ни для какой ядерной деятельности. Данное решение опять-таки повлияло на образование отходов и дало возможность разместить временные установки для обращения с отходами непосредственно на площадке. В более длительной перспективе это решение, конечно же, повлияет на сроки вывода из эксплуатации всех шести энергоблоков, а также на общий объем отходов, которые будет необходимо переправить с площадки на пункты долгосрочного хранения или в хранилища, расположенные за пределами площадки. Аналогичным образом динамичная кампания по очистке, конечной целью которой является восстановление большей части затронутой территории в соответствии с условиями будущего использования, определенными Министерством окружающей среды (МОС), также повлияет на количество отходов, которые будут формироваться, перерабатываться, храниться, перевозиться и утилизироваться.

На реакторе № 1 в Уиндскейле после первичных мероприятий по ликвидации последствий аварии установка была переведена в режим контроля и технического обслуживания. Ожидается, что реактор и объекты вспомогательной инфраструктуры останутся в своем нынешнем пассивно



РИС. 4. Анализ целей и граничных условий, влияющих на решения, конфигурацию и эффективность реализации программы или проекта (метод системного анализа).

безопасном состоянии в течение длительного времени, а полный вывод из эксплуатации намечено произвести в 2040-х годах. Текущий подход был одобрен регулирующими органами, и он подлежит регулярному пересмотру.

Как отмечалось в начале раздела 3.2, метод системного проектирования — это проверенная методология оптимизации, при помощи которой требования в виде целей и граничных условий, подобных рассмотренным выше, анализируются посредством СОР для определения последовательной стратегии, приоритетов, программ реализации и организационных моментов, чтобы придать законченный вид мероприятиям или проектам. На рис. 4 показаны необходимые исходные данные для определения курса действий, направленных на принятие решений о конечном и промежуточном состояниях, методом системного анализа. Как видно на рис. 4, анализ начинается с определения комплексных целей, которые могут быть достигнуты, и выяснения граничных условий и доступных ресурсов, а также других ограничений, которые важно понимать при определении курса действий.

3.2.2. Критерии приемлемости отходов для размещения в хранилищах и на пунктах захоронения

Критерии приемлемости отходов (КПО) для хранилищ и пунктов захоронения должны рассматриваться уже на ранних стадиях и в течение всего периода разработки и внедрения системы обращения с отходами, а также при передаче физического материала отходов или ответственности за материал отходов, даже если эта передача происходит в рамках единой организационной структуры предприятия. КПО — это важная форма требований, которые должны быть включены в СОР, и они определяются в виде характеристик формы отходов. Таким образом, характеристика формы отходов важна для определения радионуклидов и концентраций наиболее важных типов радионуклидов и физических форм различных потоков отходов, которые потребуют захоронения, установления доступных технических решений и определения потребности в новых пунктах захоронения. Первоначальная общая картина характеристик форм отходов вначале поможет определить круг возможных технических решений по обращению с ними; затем характеристики

можно будет уточнить, чтобы выработать конкретные критерии приемлемости отходов для каждого хранилища/пункта захоронения, который имеется или может быть создан.

Данные характеристики могут подсказать технические решения, которые упростят порядок хранения или устранят необходимость хранения отходов некоторых типов либо, наоборот, обусловят необходимость создания более крупных мощностей по обработке или хранению отходов на аварийной площадке или за ее пределами. В некоторых случаях они укажут на необходимость создания новых хранилищ и пунктов захоронения и/или определения характеристик новых потоков отходов. Так или иначе, разработанные КПО должны гарантировать, что потоки направляемых на хранение отходов соответствуют возможностям хранилищ/пунктов захоронения, которые имелись изначально или которые потребуется создать в будущем. Деятельность по извлечению и переработке отходов должна осуществляться с учетом характеристик отходов и требований приемлемости отходов. Неправильные действия могут привести к образованию отходов, которые могут оказаться проблематичными с точки зрения хранения или захоронения или негативно повлиять на соответствующие объекты.

Чтобы добиться соответствия между характеристиками формы отходов, возможностями хранилища и КПО, необходимо тесно увязать КПО с требованиями стратегии безопасности и результатами оценки безопасности пункта захоронения, чтобы выбор и реализация всех шагов по обращению с отходами перед захоронением (предшествующих шагов) не оказали негативного влияния на хранение или захоронение. Аварии на Чернобыльской АЭС и на АЭС «Фукусима-дайити» привели к образованию таких форм отходов, объемов отходов и такому географическому рассредоточению отходов, которые ранее не предполагались. Фактические условия серьезно отличались от всех прежних представлений о возможных авариях и их последствиях. Отсутствие надлежащего предварительного планирования мер реагирования привело к тому, что фактические меры реагирования были гораздо более реактивными по характеру и, как указывается в других разделах данной публикации, быть может, более примитивными, чем те, которые были бы приняты при заранее спланированном подходе. Признание того, что потребности в захоронении аварийных отходов могут и, скорее всего, будут превышать возможности существующих хранилищ и пунктов захоронения, является неотъемлемым элементом сценариев предварительного планирования.

При подборе подходящих пунктов захоронения учитывается текущая ситуация во многих государствах-членах, где создание пунктов захоронения отходов АЭС идет медленными темпами, а типы хранилищ, которые были бы необходимы для размещения аварийных отходов, недоступны. Это относится в первую очередь к пунктам геологического захоронения. Даже если такие объекты и существуют, большие объемы, нетипичные, проблемные и сложные потоки отходов, образующихся в результате аварии, скорее всего, будет трудно разместить из-за проблем с площадью или несоответствия существующим КПО объектов или другим требованиям, которые составляют (отдельную) СОТ существующего объекта. Ключевой задачей, по-видимому, станет создание новых пунктов захоронения как в непосредственной близости от площадки, затронутой аварией, так и в рамках существующей национальной системы обращения с отходами. Если на аварийной площадке или вблизи нее требуется создать новые мощности для хранения или захоронения отходов, то для обоснования проектирования таких объектов и разработки их КПО можно воспользоваться соответствующей информацией о существующих пунктах захоронения отходов (например, с аналогичными отходами, в аналогичной геологической среде, местности или климате, на территории страны или в соседних государствах-членах).

Чрезвычайный характер потоков отходов, образовавшихся в результате аварий, описанных в приложениях к настоящей публикации, их объемы и радиологические характеристики делают целесообразным предварительное планирование возможных вариантов и мощностей для хранения и захоронения в национальном и местном масштабе. В ходе такого предварительного планирования может быть рассмотрен широкий круг сценариев, что будет полезно для создания первоначальной основы для обращения с отходами. Если предварительное планирование не проводилось вообще или проводилось на недостаточно детальном уровне, то обращение с отходами на основании

только частично применимых либо еще не определенных КПО может повлечь за собой серьезные проблемы практического плана.

Важно убедиться, что все стороны, участвующие в разработке и утверждении КПО, полностью осознают пределы и условия такой незапланированной ситуации и соответствующим образом корректируют свои подходы, чтобы взять на вооружение риск-ориентированный подход, который не поставит под угрозу долгосрочную безопасность. Надлежащая характеристика облегчит выработку обоснованного, риск-ориентированного подхода к разделению, хранению, обработке и окончательному захоронению отходов. Такой риск-ориентированный подход может оказаться более прозрачным и полезным как для регулирующих органов, так и для заинтересованных сторон и сделать обращение с отходами более эффективным в экономическом отношении. В качестве первоначального подхода первая попытка разделить отходы после аварии может быть сделана исходя из мощности дозы, физических характеристик и типов материалов. Позднее более детальная характеристика будет проводиться с учетом требований и условий предприятий по переработке, хранению или захоронению, информация о которых станет доступна.

Выполнение различных действий по обращению с отходами перед захоронением может быть оптимизировано, чтобы обеспечить их захоронение на соответствующих предприятиях наиболее экономичным способом. Различные шаги по обращению с отходами перед захоронением и КПО могут разрабатываться с учетом этой цели. Однако могут возникнуть ситуации, когда КПО для захоронения на определенном объекте (например, на приповерхностном пункте) не могут быть соблюдены из-за наличия в составе отходов долгоживущих радионуклидов или химически токсичных элементов либо по другим причинам. Это может значительно усложнить операции по обработке отходов перед захоронением или увеличить их стоимость. Необходимо рассмотреть запасной вариант, заключающийся в долгосрочном хранении отходов до тех пор, пока не будет определен и найден подходящий объект для геологического захоронения таких типов отходов.

Для новых объектов разработка критериев приемлемости отходов — это итеративный процесс, тесно связанный с проектированием объектов (обработка, кондиционирование, хранение и захоронение), а также с оценкой их безопасности и лицензированием, как показано на рис. 5, где количество итераций для наглядности указывается на основе общих подходов к проектированию хранилищ радиоактивных отходов [26].



РИС. 5. Пример итеративного подхода к разработке проекта, оценке безопасности и КПО.

3.2.2.1. КПО на АЭС «Три-Майл-Айленд»

На момент аварии на АЭС ТМА ни для одного типа твердых отходов, образовавшихся в результате восстановительных мероприятий, не существовало классификации. Согласно нормативным документам США [29], в зависимости от уровня активности НАО делятся на класс А, класс В и класс С. Отходы классов А, В и С могут быть захоронены на коммерческих пунктах. Как выяснилось, некоторые отходы превышают установленные в США ограничения на коммерческое захоронение (выше класса С — GTCC), поэтому их нельзя размещать на существующих коммерческих пунктах захоронения. Была проведена оценка для подготовки заключения о воздействии на окружающую среду, и между КЯР США и Министерством энергетики США (МЭ) было заключено соглашение о том, что МЭ будет принимать эти отходы для целей НИОКР, чтобы оценить технологии обработки, системы хранения и т.д. [30]. Эта часть программы очистки, известная как «программа отправки аномальных отходов», стала важнейшим элементом ликвидации последствий аварии.

3.2.2.2. КПО на Чернобыльской АЭС

После аварии на Чернобыльской АЭС в связи с загрязнением большой территории долгоживущими и альфа-излучающими радионуклидами, которое в настоящее время не может быть ликвидировано экономически эффективным способом, была создана зона отчуждения. Было принято решение использовать эту зону отчуждения для размещения всех пунктов приповерхностного захоронения всех потоков отходов, образующихся на ядерных установках и в результате использования ядерных технологий по всей стране, а также пунктов долгосрочного хранения отходов, которые будут находиться там до тех пор, пока не будет создано геологическое хранилище. Согласно эталонному плану, КПО для приповерхностных пунктов (ППП) должны гарантировать, что после 200 лет эксплуатации и 300 лет мониторинга после закрытия пункт захоронения может быть освобожден от регулирующего контроля. Также предполагается, что отходы из всех новых или существующих хранилищ ВАО или НСАО с долгоживущими радионуклидами будут в течение периода эксплуатации переправлены в подходящее геологическое хранилище. При таком подходе КПО для PPP должны быть строгими — несмотря на то что эти пункты приповерхностного захоронения находятся в зоне отчуждения, которую будет необходимо сохранять в том или ином виде в течение неопределенного времени. Если такой долгосрочный режим отчуждения сохранится, то сроки освобождения PPP от регулирующего контроля могут быть увеличены. Благодаря дополнительному времени регулирующего контроля с учетом радиоактивного полураспада может быть увеличена загрузка отходов в упаковки с кондиционированными отходами, что позволит значительно снизить стоимость захоронения при соблюдении требований безопасности.

3.2.2.3. КПО на АЭС «Фукусима-дайити»

Существующие оценки безопасности для нескольких типов отходов могут дать представление о возможных будущих способах захоронения (т.е. приповерхностном захоронении, захоронении на средней глубине или глубоком геологическом захоронении), позволяющее оценить потенциальные концепции захоронения на площадке. Однако на ранней стадии обращения с отходами и с учетом неопределенности, связанной с будущей разработкой критериев приемлемости отходов для захоронения, рекомендуется ввести стандартные процедуры отбора проб во время сбора и переработки отходов. Эти пробы могут дать возможность проведения будущей детальной характеристики, необходимой для обоснования решений о захоронении. Дальнейшая судьба сыпучих отходов, образовавшихся в результате работ по демонтажу, будет определена в будущем.

Существует несколько критериев оценки пригодности загрязненных отходов для хранения и захоронения за пределами площадки АЭС «Фукусима-дайити». Для дозы облучения работников

на пунктах захоронения был установлен уровень радиации в 8000 Бк/кг (т.е. менее 1 мЗв/год), а для дозы облучения жителей вблизи мест захоронения — 100 000 Бк/кг (т.е. менее 10 мкЗв/год).

Загрязненные отходы с активностью > 8000 Бк/кг (кроме тех, которые образуются в результате дезактивационных работ) называются «особо обозначенными отходами». В префектуре Фукусима отходы дезактивации и особо обозначенные отходы с активностью > 100 000 Бк/кг будут отправлены в промежуточное хранилище (ПХ) до тех пор, пока в будущем они не будут захоронены в подходящем, специально оборудованном сооружении. Особо обозначенные отходы с активностью < 100 000 Бк/кг будут утилизироваться на существующих пунктах захоронения контролируемого типа в соответствии с процедурами, установленными Законом о специальных мерах по борьбе с загрязнением окружающей среды радиоактивными материалами.

За пределами префектуры Фукусима захоронение особо обозначенных отходов планируется осуществлять в специально оборудованных хранилищах, находящихся в ведении МОС. Вопрос о захоронении отходов дезактивации за пределами префектуры Фукусима находится в стадии обсуждения. Все отходы с активностью < 8000 Бк/кг, за исключением отходов дезактивации, могут отправляться на существующие пункты захоронения контролируемого типа вместе с другими обычными отходами.

В отношении отходов, содержащих водорастворимый радиоактивный цезий, необходимо принять особые меры к тому, чтобы не допустить быстрого растворения, что достигается путем засыпки их незагрязненным грунтом. Законом предписаны методы захоронения и контроля загрязненных отходов, в том числе особо обозначенных отходов и отходов с активностью < 8000 Бк/кг.

Дополнительные руководящие указания по разработке критериев приемлемости отходов можно найти в других публикациях, например в [31].

3.2.3. Критерии свободной передачи, освобождения от контроля и рециклирования

Большое количество отходов, образовавшихся во время ядерной аварии, будет иметь минимальный уровень загрязнения. При надлежащем мониторинге они могут быть пригодны для передачи или рециклирования для других нужд вместо дальнейшего обращения с ними как с радиоактивными отходами. Политика, правила и процедуры передачи таких материалов в разных государствах-членах неодинаковы, и они должны включаться в СОТ в качестве требований высокого уровня. Передача может быть «безусловной» (т.е. «свободная передача» в неограниченное пользование) или «условной» (например, для использования с определенными ограничениями: строительства дорожного полотна, захоронения в определенных местах, повторного использования в конкретных промышленных отраслях и т.д.). При превышении уровня освобождения от контроля (обычно порядка 100 Бк/кг) в каждом случае требуется проведение радиационной оценки, исходя из того, что существует множество способов радиационного облучения (например, прямое облучение, пероральное, ингаляционное и т.д.).

На АЭС «Фукусима-дайти» загрязненные материалы были оценены на предмет использования в нижнем слое дорожного покрытия, и для этой цели было разрешено использовать материал с активностью < 3000 Бк/кг [32]. В соответствии с этой рекомендацией префектура Мияги использовала золошлаковые отходы от сжигания мусора, образовавшегося в результате цунами, на мусорных полигонах. На основании этого правила Японское геотехническое общество выпустило руководство по переработке загрязненных золошлаковых отходов [33]. Различные дозовые пределы для других материалов регламентируются МОС [34].

На Чернобыльской АЭС свободная передача слабозагрязненного материала, образовавшегося в результате аварии, не практиковалась ввиду существования зоны отчуждения. Отходы, наработанные при дезактивации территории на площадке и за ее пределами, были захоронены, и эти места были особо помечены. Первоначально было устроено более 1000 земляных траншей и буртов для локализации загрязненного материала, образовавшегося в ходе работ по ликвидации последствий аварии, проводившихся с 1986 по конец 1988 года.

Кроме того, в официальном кадастре Украины значатся 53 хранилища отходов дезактивации и специальные станции дезактивации вне зоны отчуждения, которые использовались в основном для дезактивации транспортных средств, эксплуатировавшихся в зоне отчуждения во время работ по ликвидации последствий. Эти объекты находятся в ведении киевской компании «Радон» и расположены в Киевской, Житомирской и Черниговской областях.

В настоящее время по итогам проведенных исследований около 200 траншей в зоне отчуждения были переведены в категорию площадок с нерадиоактивными отходами. Аналогичные усилия предпринимаются и в отношении хранилищ отходов дезактивации и специальных станций дезактивации вне зоны отчуждения.

Программой обращения с радиоактивными отходами на площадке Чернобыльской АЭС предусмотрена эксплуатация объекта, предназначенного для освобождения отходов от регулирующего контроля. Работы, связанные с этим объектом, выполняются по контракту в рамках проекта, финансируемого Европейской комиссией.

В целом следует отметить, что общественные или политические круги могут занять весьма категоричную позицию, которая повлияет на решения об уровнях освобождения от контроля, передаче и рециклировании загрязненных материалов, образующихся в результате крупной аварии. Эта позиция, которая отчасти может быть формально отнесена к внешним требованиям в СОТ, может помешать освобождению отходов от контроля или по крайней мере ограничить их применение пределами загрязненных зон или затронутых территорий. Освобождение от контроля требует установления критериев для передачи (например, максимальных концентраций радионуклидов), а также разработки протоколов измерений для подтверждения того, что концентрации находятся ниже этих уровней. Для измерений требуется чувствительная аппаратура, позволяющая точно зафиксировать очень низкие уровни радиации. Дополнительные руководящие указания по методикам измерения для нужд освобождения от контроля приведены в разделе 7. Дополнительные руководящие указания в отношении свободной передачи, освобождения от контроля и рециклирования можно найти в других публикациях, например в [35–37].

3.2.4. Требования к выбросам

Удаление некоторых обработанных или необработанных потоков жидких или газообразных отходов может осуществляться путем сброса в окружающую среду в соответствии с национальными нормами и в пределах установленных ограничений по выбросам, которые лягут в основу специальных требований высокого уровня в СОТ [38, 39]. Понимание ограничений по выбросам — неперемное условие для выбора и применения технологии очистки, а также для принятия решений об одобрении или отклонении технологий-кандидатов. Организации, внедряющей соответствующие технологии, возможно, потребуется взаимодействовать с регулирующими органами с целью согласовать проведение анализа путей загрязнения в каждом конкретном случае, при этом всегда соблюдая принципы, установленные в правилах безопасности, и уважая настроения общества. Например, очень низкие концентрации трития, которые не могут быть удалены из водных потоков, могут потребовать гибкости при принятии решений об утилизации с целью найти экономичный способ обращения с отходами.

В результате аварии на реакторе в Уиндскейле было признано существование опасности, связанной с выбросом продуктов деления в окружающую среду. Риск ингаляционного и внешнего облучения, судя по всему, носил ограниченный характер, но измерения содержания иода в молоке местного производства выявили более серьезную проблему, требующую принятия экстренных мер. В связи с этим производство и сбыт молока на территории в 500 км² вокруг площадки были ограничены. Молоко сбрасывалось в сточную канализацию, чтобы избежать попадания в организм и одновременно обеспечить достаточный уровень растворения в окружающей среде.

После аварии экстренные меры, принятые местными властями (ранее Камберленда, теперь Камбрии), были изучены на предмет эффективности. Одним из основных недостатков, который был очевиден, было то, что на тот момент не было опубликовано данных о «безопасном» уровне

содержания в молоке ^{131}I . В результате был выбран крайне осторожный подход — введение запрета на потребление молока на относительно большой территории. Было очевидно также, что время между аварией и началом программы отбора проб молока было больше, чем могло бы быть, если бы были запланированы эффективные процедуры и ресурсы на случай аварии. После этого инцидента были высказаны критические замечания по поводу того, что вначале зона не была сделана настолько большой, насколько этого требовали пессимистические прогнозы, и что затем она была уменьшена, поскольку было сочтено, что такой подход будет более приемлемым с психологической точки зрения. Управление по атомной энергии Соединенного Королевства (УАЭСК) заявило, что выплатит компенсацию за утилизированное молоко [40].

При определении характера мер по обращению с отходами после аварии, приведшей к выбросу радиоактивных материалов в окружающую среду, следует учитывать масштаб события (например, причину, тип установки, площадь затронутой территории и т.д.), а также его серьезность (например, массу, активность, период полураспада и скорость выброса радионуклидов, их рассеивание в окружающей среде, близость к населенным пунктам и уязвимость экосистем). Тяжесть аварии будет оцениваться также по всем сопутствующим нерадиологическим последствиям. Международная шкала ядерных и радиологических событий (ИНЕС) — это полезный инструмент, позволяющий судить о значимости ядерной или радиологической аварии или инцидента, связанного с выбросом радиоактивных материалов в окружающую среду, с точки зрения безопасности. Это логарифмическая шкала от уровня 1 (наименьшее воздействие) до уровня 7 (наибольшее воздействие).

Подход к обращению с отходами в случае аварии, разумеется, должен быть соразмерен ее тяжести и масштабу. При относительно малозначимых событиях, представляющих ограниченную радиологическую опасность с возможностью ее локализации, радиоактивные материалы можно без труда собрать и поместить на хранение в простые контейнеры в ожидании распада, отправки на долгосрочное хранение или принятия решения о способе захоронения. Другая крайность — это ситуация, когда захват, стабилизация и локализация высокоактивных радионуклидов или поврежденного ядерного топлива, скорее всего, потребуют использования дистанционных или автоматизированных методов для ограничения облучения и сбора выброшенного материала, а также сложных методов кондиционирования, обеспечивающих безопасное и надежное хранение до принятия дальнейших решений. В любой ситуации, требующей обращения с отходами, детали принятого подхода будут учитывать широкий спектр радиологических и логистических факторов, и не в последнюю очередь объем отходов и концентрацию активности в них, физические и химические характеристики отходов, а также ресурсы, доступные для реализации технических решений.

В силу характера аварии твердые отходы, образовавшиеся в результате аварии на реакторе в Уиндскейле, были локализованы на территории площадки, и хотя скорость образования отходов была выше обычной, они не перегрузили существующую инфраструктуру. Эти отходы были утилизированы на существующих установках или оставлены в пассивно безопасном состоянии в корпусе реактора.

Во время аварии в реактор было закачено около 7000 м^3 воды. В основном вода поступала в пруд-охладитель реактора, а ее излишки — в воздуховоды. Вода из пруда-охладителя реактора сбрасывалась в море (приблизительно $1,1 \text{ м}^3 \times 10^5 \text{ м}^3$), а вода из воздухопроводов — в систему поверхностного дренажа. К моменту сброса воды в море, по прошествии месяца, она стала значительно менее активной в результате радиоактивного распада [41].

Другой пример: прямые выбросы в результате аварии на АЭС ТМА были в основном ограничены продуктом деления — инертным газом (Kr), попавшим в теплоноситель в результате повреждения активной зоны и затем удаленным из теплоносителя стационарными системами в таких объемах, что это привело к незапланированным выбросам из вентиляционной трубы станции при срабатывании предохранительных клапанов. Даже с учетом стабильных погодных условий, существовавших на протяжении большей части времени выброса, рассчитанные максимальные дозы облучения населения за пределами площадки были очень малыми «дозами

погружения» — порядка 10 мкЗв. На стадиях первоначального реагирования и послеаварийного восстановления за пределами площадки не было зафиксировано облучения от значительных выбросов радиоактивных частиц или сбросов твердых или жидких радиоактивных отходов [42].

На АЭС ТМА возникла серьезная проблема утилизации воды после очистки из-за оставшихся концентраций трития. Концентрация трития была на достаточно низком уровне для того, чтобы ее прямой сброс мог обеспечить достаточное разбавление с падением концентрации заведомо ниже нормативных пределов. Однако из-за политически чувствительного характера проблемы и отсутствия одобрения со стороны общества в итоге был применен метод выпаривания [2]. Аналогичные проблемы, связанные со сбросом воды, сохраняются и на АЭС «Фукусима-дайти», где большие объемы очищенной воды находятся на хранении из-за остаточного трития.

3.2.5. Требования лицензирования и нормативного регулирования всех соответствующих видов деятельности и установок

Существующие нормативные акты и лицензионные требования должны учитываться в рамках всей системы обращения с отходами и включаться в СОТ. Установление рабочих взаимоотношений с регулирующими органами и заинтересованными сторонами важно для обеспечения понимания требований друг друга. Применимые международные нормы, правила и руководства — включая [13–20, 35–39, 43–49] — могут облегчить лицензирование и дать ценную информацию для обсуждения вопросов регулирования. Уникальный характер отходов, образующихся в результате аварии, может потребовать особого внимания со стороны регулирующих органов. Например, важным элементом ликвидации последствий аварии на АЭС ТМА была программа отправки аномальных отходов [1]. В рамках этой программы МЭ США согласилось принять некоторые отходы, объем которых превышал пределы для коммерческого захоронения. Это позволило решить проблему утилизации нескольких потоков отходов (например, цеолитовых сред для водоочистки), которые не могли быть предусмотрены существующими нормами. Это служит примером сотрудничества, которое было налажено между коммерческим оператором АЭС и федеральным правительством с целью выработки рационального подхода к решению сложной проблемы обращения с отходами.

3.2.6. Решения в отношении контроля затрат и бюджета

Из-за больших объемов и сложности отходов, образующихся в результате ядерной аварии, затраты на обращение с отходами могут быть исключительно высокими. Для системы обращения с отходами должны быть всесторонне продуманы механизмы получения достаточного финансирования, оптимизации расходования средств и контроля затрат, и важную роль в этой связи опять же играет предварительное планирование. Метод системного проектирования, рассматриваемый в этом разделе, может облегчить анализ возможных вариантов и процесс принятия решений за счет подготовки обоснования для владельцев/операторов установок, государственных структур и регулирующих органов. Хотя основными лицами, принимающими решения, скорее всего, являются руководители установки, на принятие и/или исполнение решений могут существенно повлиять внешние заинтересованные стороны. Определение соответствующих требований к бюджету и расходованию средств в СОТ будет деликатным вопросом, который целесообразно изучить в ходе предварительного планирования сценария.

В рамках деятельности по управлению затратами и финансированию руководство установки может произвести эффективный и консервативный расчет расходов, применить агрессивные методы менеджмента затрат и графика, а также предусмотреть в бюджете достаточные ассигнования/резерв на покрытие непредвиденных расходов. Такой подход к планированию и взаимодействию может повысить уверенность вовлеченных сторон в надлежащем управлении затратами и расчете потребностей в финансировании. Хотя круг вовлеченных сторон в разных государствах-членах неодинаков, он, как правило, обязательно включает в себя сотрудников

государственных органов, принимающих решения по вопросам политики и финансирования, многочисленные регулирующие организации, страховщиков и владельцев/операторов аналогичных установок, оказывающих ресурсную поддержку. Например, вскоре после аварии на ТМА-2 правительство США приняло участие в восстановительных работах, выделив средства на различные аспекты обращения с отходами, включая долгосрочное хранение обломков конструкций активной зоны, технологию дезактивации и сбор данных о технологии, применявшейся для конструирования активной зоны реактора. Финансирование, основанное преимущественно на смете расходов энергопредприятия, позволило компенсировать затраты, сократив общие расходы как самого энергопредприятия, так и его страховщиков [50].

В рамках процесса планирования и составления бюджета для обоснования планирования и решений технологического характера может быть использован анализ затрат, выгод и эффекта от финансирования. Обращение с отходами требует предварительной оценки и планирования, чтобы гарантировать выбор наиболее экономичного варианта, удовлетворяющего требованиям. Процесс оценки обычно включает в себя определение требований и целей, выявление возможных вариантов и сценариев их реализации, определение критериев оценки, оценку возможных вариантов и выбор предпочтительного варианта. Важными инструментами для лучшего понимания потенциальных альтернатив также являются инструменты многоатрибутного анализа. К атрибутам, которые необходимо оценить, относятся:

- цель обращения с отходами;
- типы и объемы отходов и места их образования;
- способность работать с разными или новыми типами отходов;
- риски, связанные с безопасностью работников, а также с долгосрочной безопасностью упаковок с отходами, которая важна с точки зрения захоронения;
- время, необходимое для реализации данной альтернативы;
- затраты на реализацию рассматриваемых альтернатив.

Включение в метод системного проектирования формальных процедур контроля изменений позволяет выявлять и оценивать возможные варианты, чтобы адаптироваться, например, к появлению новых, проблемных потоков отходов или другим изменениям. Это ведет к выработке решения, которое может быть оправданным, поскольку основывается на разумном процессе принятия решений. Дополнительную информацию и руководящие указания по применению многоатрибутного процесса принятия решений для выбора возможных вариантов обращения с отходами можно найти в других публикациях, например в [51].

3.2.7. Возможные варианты минимизации отходов

Как и во всех системах обращения с отходами, важной составляющей обращения с аварийными отходами является минимизация отходов. Количество и тип отходов, образующихся в ходе работ по очистке и восстановлению, определяются радионуклидами и их концентрациями, степенью распространения загрязнения, а также выбранным конечным состоянием площадки и схемами захоронения [52]. Степень распространения загрязнения зависит в первую очередь от характера аварии и условий окружающей среды на момент аварии (ветер, осадки, потоки поверхностных вод и т.д.). Эти конкретные условия неподконтрольны ни эксплуатирующей организации, ни организации, занимающейся ликвидацией последствий аварии. Однако рекомендуется изучить один или несколько запроектных, более экстремальных сценариев возможных условий окружающей среды, характерных для конкретной площадки, чтобы полнее учесть потенциальные последствия такой аварии и лучше подготовиться к ним (как показывает опыт Чернобыльской АЭС и АЭС «Фукусима-дайти»). Такие дополнительные исследования и анализ потенциальных последствий могут представлять ценность и быть рассмотрены на предмет включения в обоснование безопасности действующих или новых площадок. Лучшее понимание

последствий, вероятность наступления которых крайне мала, не ведет к автоматическому определению новых граничных условий или установке нового комплекса инженерных барьеров, а обеспечивает лучшую готовность к ликвидации последствий аварии, включая обращение с образующимися отходами.

Кроме того, неконтролируемому распространению загрязнения может способствовать массовая эвакуация (например, в результате передвижения транспортных средств, перевозки загрязненного личного имущества и т.д.). Контроль за распространением загрязнения таким путем входит в обязанности организации по ликвидации последствий аварии, хотя это может и не быть ее главным приоритетом (который состоит в непосредственном обеспечении здоровья и безопасности пострадавших).

Еще один аспект минимизации отходов, который часто упускается из виду, — это окончательное удаление отходов из центров хранения и сортировки, созданных для обработки аварийных отходов. Каждый такой объект в конце срока службы сам превратится в отходы. В этой связи необходимо тщательно планировать количество и характер создаваемых объектов и, насколько это возможно, оптимизировать их с точки зрения объема отходов деятельности по выводу из эксплуатации. Кроме того, важно, чтобы, насколько это практически возможно, количество и типы объектов, а также находящееся на них оборудование соответствовали применимым требованиям безопасности и охраны окружающей среды. Графики и крайние сроки не следует использовать в качестве определяющих факторов, если только это не продиктовано требованиями защиты работников или населения.

При проектировании любых новых объектов рекомендуется предусмотреть возможность легкой дезактивации и минимизации вторичных отходов. Необходимо тщательно продумать и задокументировать основные радиологические условия, при этом требования к сохранению учетных документов должны распространяться на весь период функционирования объекта, чтобы эти документы могли использоваться при выводе из эксплуатации и дезактивации. К таким учетным документам могут относиться данные регулярных обследований рабочих зон; данные периодических обследований и отбора проб из бункеров, резервуаров, высокопрочных контейнеров (ВПК) и т.д.; записи, фиксирующие течи, непреднамеренные выбросы и загрязнение вне обычных зон радиологического контроля; аналогичные записи, фиксирующие как нормальное, так и аномальное радиологическое загрязнение.

3.2.8. Управление документацией и данными

Для поддержки усилий по обращению с отходами необходимо на раннем этапе создать систему управления документацией. К документам, связанным с отходами, возможно, потребуется обращаться в течение многих десятилетий, поэтому в системе управления документацией должны учитываться такие факторы, как ухудшение качества физических носителей данных или устаревание цифровых систем [53].

Эксплуатационные документы, фиксирующие условия на площадке и вблизи нее до и во время аварийной стадии, могут оказаться полезными для оценки характеристик отходов. Кроме того, документы, сохраняемые на стадии ликвидации последствий, необходимы для понимания меняющихся условий на площадке и для нужд, связанных с прогнозированием образования отходов. Характеризация потоков отходов необходима для определения требований к мощностям для обработки, хранения и, в конечном счете, захоронения. Управление данными о характеристиках необходимо для надлежащего подкрепления будущих требований к обработке, хранению и захоронению, возникающих в результате изменения условий на площадке. В прогнозах образования отходов должны учитываться имеющиеся отходы, а также отходы, которые будут набираться в ходе будущей деятельности, и вторичные отходы, образующиеся в результате плановых работ по извлечению и обработке/переработке отходов.

Необходимость управления данными и документацией с самого начала аварии была важным уроком, извлеченным из аварии на АЭС ТМА [2]. Изначально вся деятельность на площадке была

подчинена задаче аварийного реагирования, при этом оценке и документированию состояния станции уделялось мало внимания. После того как станция была приведена в стабильное состояние, внимание переключилось на очистку и была сформулирована конечная цель — разгрузка активной зоны в максимально короткие сроки. Стало понятно, что важнейшее значение для принятия решений имеют получение и интерпретация данных. Поэтому одним из главных уроков стала необходимость централизации функций сбора, управления и анализа данных. Кроме того, для обеспечения последовательности, качества и, по возможности, полноты данных было необходимо контролировать процесс сбора данных. Еще одним важным соображением была необходимость досконально разобраться в целях, связанных с анализом проб, включая знание аналитических средств, которые будут использоваться (и их ограничений), и обеспечение ясности представления данных (например, единиц измерения).

Управление данными также было признано важным в случае с АЭС «Фукусима-дайити». Подробности описаны в руководстве по пилотной программе транспортировки отходов. Японские строительные компании, участвовавшие в восстановительных мероприятиях, разработали новые системы управления данными.

Дополнительные руководящие указания по управлению документацией и данными, связанными с отходами, можно найти в других публикациях, таких как [54, 55].

3.2.9. Проблемы менеджмента качества

В связи с ядерными авариями возникают серьезные проблемы менеджмента качества. Предварительное планирование разработки систем менеджмента качества в преддверии возникновения потенциальных проблем поможет избежать негативных последствий, которые могут возникнуть в силу внезапного, сложного и быстро меняющегося характера большинства ядерных аварий. Выявив значительные зоны риска, можно привести системы и процессы в готовность до того, как произойдет авария. Зоны риска, связанные с обращением с отходами перед захоронением и захоронением отходов, включают в себя следующее:

- создание новых пунктов захоронения всех аварийных отходов может быть надолго отложено или стать невозможным в отсутствие достаточной информации об отходах или о функционировании установки, что помешает выполнению необходимых оценок безопасности;
- неспособность предоставить приемлемые данные для соблюдения КПО может помешать приему отходов на существующие установки по обработке или пункты захоронения;
- если состав отходов неизвестен или если произошло объединение несовместимых отходов, работники могут подвергнуться повышенным радиологическим и другим рискам безопасности;
- неудовлетворительный контроль процессов, в результате которого отходы с более низкой концентрацией смешиваются с сильно загрязненными отходами, может привести к тому, что большие объемы отходов придется утилизировать так, как это требуется делать с наиболее опасными компонентами, — с гораздо большими затратами, чем это может быть в противном случае.

Отсутствие приемлемой системы менеджмента качества может повлечь за собой и другие проблемы, связанные с захоронением отходов и обращением с отходами перед захоронением, включая:

- недостаточное доверие к проектированию, закупочной деятельности, строительству и эксплуатации установок для обращения с отходами из-за недостаточных гарантий качества либо их полного отсутствия, что окажет непосредственное влияние на поддержку обществом национальной стратегии захоронения аварийных отходов;

— использование неквалифицированных работников, если качество обучения не соответствует требованиям.

3.2.10. Существующая организационная структура

Для налаживания, направления, координации и осуществления деятельности по обращению с отходами необходимо наличие некоей организации. Важно, чтобы у этой организации были ясно определенные обязанности, чтобы она была подотчетна заинтересованным сторонам и регулирующим органам и имела четко выстроенные взаимоотношения с группой по ликвидации последствий аварии. В круг управленческих обязанностей этой организации должны входить такие стандартные функции, как принятие стратегических решений и руководство их исполнением, управление проектами и контроль над ними, но, помимо этого, организация должна выполнять функции охраны здоровья и безопасности, разработки технологий, обучения и закупок или быть способна влиять на эти функции. Организация и меры реагирования должны оставаться гибкими, поскольку организация будет развиваться и должна будет адаптироваться к меняющимся требованиям и условиям в течение всего периода реагирования, который может занять от нескольких лет до нескольких десятилетий.

3.2.10.1. Реактор в Уиндскейле

Что касается реактора в Уиндскейле, то существовавшие на тот момент организационные структуры площадки, УАЭСК и местных населенных пунктов (например, местная полиция, совет по сбыту молока) продолжали действовать на протяжении всей стадии аварии и ликвидации ее последствий. Хотя первоначально к разгрузке реактора приступила небольшая группа из восьми человек, силы реагирования выросли за счет включения в них многих сотрудников из числа персонала площадки, а также специалистов, привлеченных на добровольной основе с других объектов. В результате расследования аварии как такового был образован совет по лицензированию всех будущих гражданских ядерных реакторов. В 1959 году был принят Закон о ядерных установках, положивший начало формированию инспекции по ядерным установкам в составе Министерства энергетики. Эти организации были созданы для того, чтобы сообща обеспечивать необходимые функции управления и поддержки для всех гражданских реакторов.

Аналогичным образом на реакторах № 1 и № 2 под надзором инспекции были проведены работы по выводу из эксплуатации, и были разработаны структурированные проектные основы для координации, коммуникации, согласования, управления и контроля всех видов деятельности, обеспечивающие планомерное достижение стратегических целей и выполнение проекта в соответствии с надежным планом. В настоящее время площадка «Селлафилд» принадлежит Управлению по выводу из эксплуатации ядерных объектов, а за вывод из эксплуатации реактора в Уиндскейле отвечает компания «Селлафилд, лтд.». Планы предусматривают выгрузку топлива из реакторов к 2030 году, а полный вывод из эксплуатации будет завершен в 2040-х годах.

3.2.10.2. АЭС «Три-Майл-Айленд»

Организационная структура на АЭС ТМА претерпела эволюцию, превратившись из организации, занимавшейся эксплуатацией станции сразу после аварии, в структуры, лучше приспособленные к деятельности по очистке и захоронению отходов. В некоторых случаях эта эволюция оказалась полезной для удовлетворения потребностей текущей деятельности. Вместе с тем эти изменения нелегко дались персоналу из-за постоянной необходимости менять круг выполняемых обязанностей и адаптироваться к новым организациям.

Первая организация была рассчитана на управление антикризисной деятельностью, и она хорошо справилась с задачей стабилизации станции после аварии. Изменения в структуре отделов организации отражали потребности, возникающие в связи с восстановительными мероприятиями.

По мере развертывания и реализации восстановительных мероприятий эта адаптивная структура превратилась в проектно-ориентированную организацию, что потребовало переноса центра тяжести на управление стабилизированной, но сильно поврежденной установкой, а также на обращение с отходами, образовавшимися в результате аварии, восстановления и первоначальных работ по очистке. На всех этапах осуществления программы возникали серьезные организационные проблемы, поскольку к работе привлекались многочисленные подрядчики, а незапланированные события требовали принятия адаптационных мер. Последнее было особенно актуально на этапе разгрузки активной зоны и потребовало создания межведомственных целевых групп для решения возникающих проблем.

К началу 1980-х годов основная часть топлива была извлечена из энергоблока № 2, упакована и переправлена на хранение в Айдахскую национальную лабораторию. Примерно 1% топлива остается в недоступных частях корпуса реактора. Энергоблок № 2 был передан «ФерстЭнерджи корпорейшн» и переведен в режим безопасной консервации и стабилизации в ожидании будущего вывода из эксплуатации. Организация по проведению восстановительных работ вновь изменилась, превратившись в значительно меньшую по размеру организацию, необходимую для наблюдения за энергоблоком в его стабильном режиме долгосрочной консервации. Лицензия на энергоблок № 2 была передана подрядчику, отвечающему за вывод из эксплуатации, в декабре 2020 года [56]. Энергоблок № 1, принадлежащий «Экселон корпорейшн», продолжал эксплуатироваться до сентября 2019 года, когда реактор был окончательно заглушен. Энергоблок № 1 планируется перевести в режим безопасной консервации, а вывод из эксплуатации отложить, возможно, до 2075 года.

3.2.10.3. Чернобыльская АЭС

Во время аварии на Чернобыльской АЭС неотложные противоаварийные меры принимались по указанию специальной группы государственных экспертов и под руководством спецподразделений вооруженных сил бывшего Советского Союза. Этот организационный подход имел целью ликвидацию прямых последствий аварии, включая пожаротушение, охлаждение разрушенного реактора и эвакуацию населения, после чего была создана зона отчуждения. Работы по ликвидации последствий аварии начались сразу после аварии в апреле 1986 года под руководством правительственной комиссии СССР [57], которая продолжала работать до 1991 года, а организационная структура изменилась таким образом, чтобы выполнять функции контроля и управления в отношении как местного населения, так и большого количества зданий и сооружений, подвергшихся загрязнению.

Зона отчуждения площадью 2600 км² была создана вскоре после аварии в мае 1986 года и взята под охрану военными, а население было эвакуировано ввиду высокого уровня радиации и риска загрязнения. Правительство переориентировало всю деятельность Академии наук Украины и других государственных ведомств и организаций на оказание технической и научной поддержки правительству в ликвидации последствий аварии. В течение недели после аварии правительство образовало оперативную группу (ОГ) для координации различных мер реагирования.

Академия наук, Министерство водных ресурсов, Государственное управление сельского хозяйства Украины и другие заинтересованные ведомства создали аналитический центр при Институте кибернетики Национальной академии наук Украины, которому было поручено оценить возможное загрязнение вдоль русла реки Днепр. Осенью 1986 года ОГ и правительству Украины был представлен первый прогноз, и регулярное прогнозирование продолжалось до 1998 года. Характерной чертой деятельности всех официальных комиссий и, в первую очередь, правительственной ОГ в этот период было тесное сотрудничество с учеными.

Вследствие аварии в 1989 году при Академии наук Украины была создана межведомственная комиссия, которой было поручено доработать проекты нормативно-правовых актов о защите населения. Основные принципы этих законов были разработаны исследователями из Украины, работавшими совместно с коллегами из Беларуси и Российской Федерации. Эта работа послужила

основой для принятия Верховной радой (парламентом) Украины более гибких законов и нормативно-правовых актов, которые значительно облегчили социально-экономическое положение ликвидаторов и пострадавшего населения.

Сегодня Государственному агентству Украины по управлению зоной отчуждения (ГАЗО), являющемуся частью Министерства экологии и природных ресурсов, поручена реализация государственной политики в области обращения с радиоактивными отходами, включая долгосрочное управление объектами по хранению и захоронению радиоактивных отходов. При выполнении своих функций ГАЗО взаимодействует с государственными специализированными предприятиями по обращению с радиоактивными отходами на Чернобыльской АЭС, ответственными за вывод из эксплуатации энергоблоков №№ 1–3 и преобразование объекта «Укрытие» в экологически безопасную систему. В соответствии с государственной политикой производители отходов несут ответственность за обращение с отходами до момента их передачи на специализированные предприятия по обращению с радиоактивными отходами. По закону производители отходов не имеют права утилизировать радиоактивные отходы.

3.2.10.4. АЭС «Фукусима-дайити»

На момент аварии АЭС «Фукусима-дайити» принадлежала Токийской электроэнергетической компании (ТЕПКО) и эксплуатировалась ею под регулирующим надзором Агентства по ядерной и промышленной безопасности (АЯПБ) — специальной организации, входящей в состав Агентства по природным ресурсам и энергетике при Министерстве экономики, торговли и промышленности. Одной из функций Агентства по природным ресурсам и энергетике было содействие развитию ядерной энергетики. Комиссия по ядерной безопасности, подведомственная кабинету министров Японии, была уполномочена проверять работу регулирующих органов, таких как АЯПБ.

Сразу после землетрясения правительство создало штаб реагирования на ядерную аварийную ситуацию, который издал необходимые приказы об эвакуации. АЯПБ также создало свой центр аварийного реагирования, в состав которого вошли представители соответствующих министерств, включая Силы самообороны Японии и другие профильные организации, такие как Организация по безопасности ядерной энергетики Японии (ОБЯЭЯ, которая оказывала техническую поддержку АЯПБ), Японское агентство по атомной энергии (ЯААЭ, научно-исследовательская организация) и т.д., и который начал сбор информации о реакторах в пострадавшей зоне.

После полного пересмотра правил безопасности в результате аварии на АЭС «Фукусима-дайити» было создано Управление по ядерному регулированию (УЯР) в качестве внешнего агентства Министерства окружающей среды. Комиссия по ядерной безопасности и АЯПБ, включая регулирующие полномочия министра экономики, торговли и промышленности, были переданы в ведение УЯР. ОБЯЭЯ также была включена в состав УЯР.

В сентябре 2011 года в соответствии с Законом о Корпорации по содействию возмещению ядерного ущерба была учреждена Корпорация по содействию возмещению ядерного ущерба с целью гарантировать, что компенсационные выплаты будут производиться быстро и в надлежащем порядке [58]. Цель заключалась в том, чтобы обеспечить стабильные поставки электроэнергии за счет предоставления компенсационных средств, необходимых операторам ядерных установок, которые могут понести крупный ядерный ущерб.

Поскольку в декабре 2011 года все реакторы на площадке АЭС «Фукусима-дайити» были приведены в состояние холодного останова, правительство приняло среднесрочную и долгосрочную дорожную карту вывода из эксплуатации АЭС «Фукусима-дайити» компании ТЕПКО [59], и в соответствии с этой дорожной картой началась стадия вывода из эксплуатации. С тех пор дорожная карта обновлялась пять раз; последний актуализированный вариант был принят в декабре 2019 года. В августе 2013 года был создан Международный исследовательский институт по выводу из эксплуатации ядерных объектов (ИРИД) для проведения НИОКР в области технологий, которые могут использоваться для вывода из эксплуатации АЭС.

В августе 2014 года Корпорация по содействию возмещению ядерного ущерба была реорганизована и переименована в Корпорацию по содействию возмещению ядерного ущерба и выводу из эксплуатации, чтобы включить в круг ее ведения такие функции, как содействие выводу из эксплуатации. В мае 2017 года после внесения поправки в Закон к ее функциям было добавлено управление резервным фондом для вывода из эксплуатации и смежной деятельности, необходимой для проведения работ по выводу из эксплуатации.

3.2.11. Имеющаяся инфраструктура

Стратегия обращения с отходами может быть подкреплена использованием инфраструктуры и оборудования, имеющихся как на площадке, так и за ее пределами. Полезные ресурсы могут быть получены как из внутренних, так и из международных источников. Если это практически возможно, для облегчения обращения с отходами и поддержки восстановительных мероприятий на площадке можно использовать и переоборудовать существующие объекты. Для поддержки усилий по обращению с отходами можно также рассмотреть возможность использования подходящих объектов за пределами площадки. Рекомендуется обратиться за помощью к аналогичным ядерным установкам, не затронутым аварией, если таковые имеются.

В ходе работ по ликвидации отходов на АЭС ТМА существующий бассейн выдержки топлива был вначале переоборудован для монтажа установки обессоливания воды погружного типа (SDS), чтобы воспользоваться преимуществами усиленной защиты, которую обеспечивает бассейн выдержки отработавшего топлива, и выполнять операции дистанционно [1]. После того как материалы SDS были обработаны и утилизированы, бассейн выдержки топлива использовался для хранения заполненных контейнеров с топливом в ожидании отправки — опять же для того, чтобы воспользоваться преимуществами усиленной защиты. Сразу после аварии металлический ангар, который использовался для покрасочных работ, был превращен в место для сбора и временного хранения твердых отходов. Он был оборудован спринклерной системой и находился в пределах главной дамбы обвалования станции. Это строение было расположено относительно близко к границе площадки, и иногда требовалось временное экранирование. Вскоре стало очевидным, что для хранения твердых отходов необходима более сложная инженерная система, и были сооружены новые объекты.

Аналогичным образом на АЭС «Фукусима-дайити» компания ТЕПКО переоборудовала несколько зданий вблизи реакторов (машинный зал, здание установки для высокотемпературного сжигания и главное технологическое здание) для деятельности по водоочистке [7]. Многие существующие резервуары для воды, особенно сварные резервуары для хранения концентрированной соленой воды, используются теперь для хранения загрязненной воды, прошедшей очистку. Кроме того, вскоре после аварии у различных поставщиков по всему миру были закуплены резервуары и другие специализированные инструменты и оборудование.

Правительство совместно с корпоративными поставщиками дистанционно проводит дезактивационные работы внутри здания реактора и гермообъема. Кроме того, ведутся НИОКР в области технологий, подходящих для извлечения обломков твэлов. Энергоблоки № 5 и № 6, которые не были затронуты аварией и в отношении которых было принято окончательное решение, исключающее перезапуск, теперь служат в качестве полноценных испытательных стендов, на которых можно проводить макетные испытания (испытания для проверки реального устройства).

Что касается повторного использования инфраструктуры за пределами площадки, то стадион «Джей-виллидж» (огромный спортивный комплекс, связанный с национальным центром подготовки футболистов) сразу после аварии был превращен в базу для операций по ликвидации последствий аварии. На этом перепрофилированном объекте проводилась дезактивация пожарных машин, военных транспортных средств и вертолетов, использовавшихся для охлаждения бассейна выдержки отработавшего топлива и удаления обломков конструкций. На нем также находятся жилые помещения и места для отдыха, используемые Силами самообороны Японии, полицией и другими задействованными организациями. В январе 2013 года ТЕПКО создала в «Джей-виллидж»

Штаб возрождения префектуры Фукусима, в котором работают более 4000 сотрудников. Часть работы по рассмотрению заявок на выплату компенсаций была передана из головного офиса ТЕПКО в Токио в этот штаб. В апреле 2019 года комплексу «Джей-виллидж» была возвращена его первоначальная функция — поддержка развития японского футбола.

Во время и после аварии на реакторе № 1 в Уиндскейле все жидкие и твердые отходы утилизировались при помощи имевшихся инфраструктурных мощностей. Топливо и изотопы в основном сбрасывались, пусть и нестандартным способом, по существующей разработанной схеме в пруд-охладитель, где они хранились и/или перерабатывались по существующей схеме топливного цикла. Фильтры из вытяжной трубы были извлечены вместе с другими загрязненными твердыми отходами и утилизированы в одном из нескольких доступных пунктов захоронения твердых отходов, расположенных на площадке реактора в Уиндскейле. Вода, использовавшаяся во время тушения пожара, перед сбросом в море по мере возможности отводилась в пруд-охладитель на короткий период времени, пока не произойдет распад радиоизотопов.

На момент аварии на реакторе в Уиндскейле для подготовки к чрезвычайной ситуации подобного рода не было сделано практически ничего. Сэр Кристофер Хинтон (который отвечал за проектирование и строительство первых объектов гражданской ядерной энергетики Соединенного Королевства) позднее заметил, что реактор № 1 станет «памятником нашему невежеству» [60]. Технология, использовавшаяся во время и непосредственно после аварии, сама по себе была простой и доступной [60], например:

- все стальные стержни, имеющиеся в распоряжении персонала, были использованы для того, чтобы выдавить картриджи из реактора;
- в активную зону был закачан диоксид углерода (взятый из запасов, хранившихся на АЭС «Колдер-Холл»), но особого эффекта это не возымело;
- затем в качестве крайнего средства была использована вода — техника должна была закачивать ее в реактор, используя импровизированные приемы. Четыре шланга от пожарной машины были подсоединены к стойкам строительных лесов и вставлены в реактор.

Во время ликвидации последствий аварии на Чернобыльской АЭС и работ по очистке территории в максимально возможной степени использовалась существующая инфраструктура. Здание склада твердых отходов использовалось для хранения аварийных отходов, равно как и склад, изначально спроектированный как хранилище отходов для строящегося в то время энергоблока № 5. Последний объект был превращен в пункт захоронения радиоактивных отходов (ПЗРО) III очереди, который в литературе также известен как ПЗРО «Комплексный».

Кроме того, очень большой пруд-охладитель Чернобыльской АЭС использовался для хранения значительного количества загрязненного материала во время первоначальных противоаварийных мероприятий, и теперь он находится в процессе вывода из эксплуатации.

В настоящее время несколько объектов на Чернобыльской АЭС, находящихся на этапе вывода из эксплуатации, используются в качестве мест временного хранения радиоактивных материалов или отходов. Как показано на рис. 6, машинный зал энергоблока № 3 используется для хранения фрагментов демонтированной вентиляционной трубы начиная со второй стадии вывода АЭС из эксплуатации.

3.2.12. Наличие опытного персонала и потребности в обучении

По всей вероятности, для реагирования на аварию потребуются значительно больший объем ресурсов по сравнению с тем, который обычно имеется у соответствующих организаций (включая, к примеру, регулирующие органы), и эта потребность может сохраняться в течение многих месяцев или лет. Потенциально большому числу новых работников — возможно, носителей иных языков, диалектов или культуры по сравнению с местными работниками — может потребоваться, к примеру, базовый инструктаж по радиационной защите. Важно, чтобы при предварительном



РИС. 6. Временное (буферное) хранилище в машинном зале энергоблока № 3 Чернобыльской АЭС с фрагментами демонтированных вентиляционных труб с энергоблоков № 3 и № 4. Публикуется с разрешения Государственного специализированного предприятия «Чернобыльская АЭС».

планировании были должным образом учтены возможности и знания, которые могут потребоваться для выполнения конкретных функций по содействию ликвидации последствий ядерной аварии. Будет необходимо найти достаточно квалифицированных специалистов не только для ликвидации последствий аварии, но и для того, чтобы свести к минимуму разлад в других сегментах ядерной отрасли страны и обеспечить скорейшее возобновление нормальной работы. Параллельно с набором персонала возникнет необходимость в обучении новых сотрудников или повышении квалификации имеющихся сотрудников для выполнения действий по обращению с отходами. Необходимо учесть, каким образом задачи восстановительной деятельности будут меняться с течением времени, чтобы определить момент, когда потребуется выделить ресурсы или высвободить их для использования в другом месте.

Существующий персонал ядерной установки, скорее всего, не будет обладать необходимыми навыками для выполнения возросшего объема задач по обращению с отходами после ядерной аварии. Подбор квалифицированного персонала для участия в деятельности по обращению с отходами будет иметь большое значение для успеха восстановительных мероприятий. По сравнению с обычными операциями потребуется больше квалифицированного персонала, поскольку многие виды деятельности не будут охвачены существующими системами и процессами менеджмента. Еще одним важным моментом является укрепление кадровой базы за счет национальных и международных экспертов в области управления авариями и обращения с отходами. Использование международных экспертов может обусловить необходимость специального обучения, учитывающего языковые и культурные различия, а также потребовать, чтобы внешние эксперты были полностью осведомлены о местных методах работы и правилах техники безопасности. Потребуется разработать программы обучения для обеспечения охраны и гигиены труда работников. Исходя из фактических условий труда, которые могут быть крайне

сложными, и масштабов деятельности может быть целесообразно использовать большое количество работников с сокращенными рабочими сменами. В некоторых случаях может быть целесообразно полностью передать функцию обращения с отходами на подряд опытной организации.

В ликвидации последствий аварии на ТМА-2 участвовало в среднем около 1000 работников в год. Число работников станции варьировалось от максимального значения почти в 1400 в 1985 году до минимума примерно в 500 в 1989 году (в конце программы) [2]. Вначале персонал состоял в основном из сотрудников эксплуатирующей реактор компании «Дженерал паблик ютилитиз (ДПЮ) ньюклар». С самого начала восстановительные мероприятия поддерживались рядом волонтеров из многочисленных подразделений ДПЮ. Для обеспечения безопасности труда работников была оперативно введена программа обучения. Волонтеры занимались в основном проведением дезактивационных работ, что позволило более квалифицированным инженерам и операторам сосредоточиться на решении более сложных задач. Большая численность работников помогла свести к минимуму дозу облучения каждого человека. Позднее для оказания помощи персоналу ДПЮ активно привлекались подрядчики.

С учетом уникального характера работы и проблем, связанных с необученным персоналом, в программу восстановительных мероприятий были включены следующие меры:

- a) планирование задач: детальное планирование всех рабочих операций с целью минимизации времени и применения необходимых мер охраны труда работников (дистанционных инструментов, робототехники, средств индивидуальной защиты и т.д.);
- b) макеты: тренировки и оценки рабочей практики, чтобы максимально повысить эффективность и результативность труда;
- c) зоны технологической подготовки: места в зонах с низким уровнем радиации использовались для сборки и обслуживания оборудования, а также для перерывов на отдых и т.д.;
- d) обучение: была разработана и развернута широкая программа обучения, чтобы работники были осведомлены об опасных условиях и эффективных методах работы.

Аналогичные методики используются на АЭС «Фукусима-дайити», и эта процедура описана в руководстве по дезактивации [61].

3.2.13. Формы применения технологий (стационарные либо мобильные/транспортбельные)

Масштаб аварии и количество/тип отходов, с которыми придется иметь дело, могут определить тип используемого оборудования. Вместе с тем выбор централизованного или мобильного/транспортбельного оборудования часто зависит от конкретного случая. В некоторых случаях могут существовать доступные технологии, включая специализированные инструменты и оборудование, либо бригады, которые могут быть быстро развернуты для решения неотложной задачи. На процесс принятия решения о выборе подходящих технологий или сочетания оборудования может повлиять целый ряд технических и нетехнических факторов. Типичные процессы и критерии выбора более подробно описаны в [51]. На ранних стадиях аварии или ликвидации последствий аварии может возникнуть потребность в быстром развертывании оборудования и служб. Поэтому часто предпочтение отдается легко развертываемому оборудованию и средствам (например, мобильному оборудованию), даже несмотря на то, что они могут не быть идеальными с технической точки зрения или наиболее экономичными в данной ситуации. Можно рассмотреть возможность использования мобильного/транспортбельного оборудования, имеющегося в других государствах-членах, при условии, что это оборудование не загрязнено настолько, что его транспортировка исключена.

Процессы очистки воды после аварий на АЭС ТМА и «Фукусима-дайити» осуществлялись на базе централизованных очистных сооружений, которые были построены на площадке и эксплуатировались в течение длительного времени. На АЭС «Фукусима-дайити» был построен

целый ряд централизованных установок для очистки воды — от процесса удаления цезия до монтажа и ввода в действие упрощенной активной системы извлечения и восстановления воды (SARRY) для более эффективного удаления цезия и, наконец, пуска в строй усовершенствованной системы водоочистки (ALPS) для выведения из загрязненной воды нескольких радионуклидов. Очистка загрязненной воды в главной траншее энергоблоков № 2 и № 3 была проведена при помощи мобильной системы водоочистки. Еще одна мобильная система водоочистки используется для очистки охлаждающей воды из бассейнов выдержки отработавшего топлива. Чтобы снизить уровень стронция в концентрированной воде, полученной методом обратного осмоса, была установлена мобильная система удаления стронция.

Мобильные системы более подробно описаны в разделе 9 настоящей публикации и в [62].

3.2.14. Потребности в научно-исследовательских и опытно-конструкторских работах

Из-за сложного характера отходов и опасных условий на площадке существующих технологий характеризации, извлечения и обработки отходов может оказаться недостаточно. Может потребоваться проведение НИОКР — от разработки или адаптации технологий специального назначения до создания крупных систем переработки отходов. При определении потребностей в НИОКР может быть весьма эффективной оценка технологий с привлечением национальных и международных экспертов соответствующей квалификации. Используя результаты оценки технологий, можно разработать план НИОКР, чтобы определить потребности в НИОКР и наметить соответствующий план разработки технологий. В некоторых случаях можно разработать и использовать сценарии демонстрации параллельных технологий. Этот подход был применен на АЭС «Фукусима-дайти», и он может помочь быстрее подобрать наиболее перспективные технологии и подтвердить их пригодность.

В 2017 году на АЭС «Фукусима-дайти» было выделено здание для проведения международных совместных исследований с целью перевода фундаментальных НИОКР в русло прикладных исследований, в частности для лучшего понимания характеристик радиоактивных отходов. План НИОКР способствует решению ключевой задачи объединения исследователей и научно-исследовательских институтов и служит мостом, связывающим между собой исследовательские центры и выводимые из эксплуатации объекты.

3.2.15. Обратная связь/извлеченные уроки

Предыдущий опыт ликвидации последствий ядерных аварий является источником ценной информации и рекомендаций, которые заслуживают рассмотрения в процессе планирования, но также важен для получения и актуализации знаний о соответствующем прежнем и новом отраслевом опыте группой, реализующей программы обращения с отходами, и в качестве подспорья при определении требований. Значительный объем этих сведений имеется в открытом доступе, в том числе в [2, 22, 47, 49, 52, 60, 63–66], а конкретная информация представлена в настоящей публикации. Публикации, посвященные другим промышленным авариям (например, аварии на химическом заводе в Бхопале, крушению железнодорожных поездов, разливам нефти и т.д.), также могут дать представление об эффективных методах очистки и обращения с отходами.

Большую пользу стратегии обращения с отходами может принести реализация активной программы повышения осведомленности, обратной связи или учета извлеченных уроков, которая будет способствовать дальнейшему развитию технологий и ляжет в основу деятельности по внедрению этой стратегии. Можно на регулярной основе выявлять положительные и отрицательные практики и обсуждать их с персоналом. Формирование настроения на постоянное совершенствование может стать эффективным стимулом к достижению наивысших показателей в области безопасности, экономической эффективности и эксплуатационной деятельности.

После аварии на АЭС ТМА были предприняты согласованные усилия по документированию результатов аварии, в том числе операций по очистке и обращению с отходами. Эти публикации

имеются в открытом доступе, и на них делаются ссылки в настоящей публикации. Например, была подготовлена серия отчетов, обобщающих ряд аспектов работ по очистке и обращению с отходами. Эти отчеты, известные как отчеты GEND, были составлены под руководством «Дженерал паблик ютилитиз» (оператора АЭС ТМА), Научно-исследовательского электроэнергетического института, Комиссии по ядерному регулированию США и Министерства энергетики США [66].

После аварии на Чернобыльской АЭС было выпущено большое количество отчетов и научных статей с анализом извлеченных уроков. К ним относятся публикации МАГАТЭ (например, INSAG–1 [64] и INSAG–7 [65]), а также многочисленные статьи в научных журналах на украинском и русском языках и статьи в международных научных журналах. По мере продвижения вперед восстановительных работ на АЭС «Фукусима-дайити» многочисленными агентствами и странами подготавливаются отчеты и научные публикации (некоторые из них указаны в приложении IV).

3.2.16. Взаимодействие с другими программами

В стратегии обращения с отходами и при разработке соответствующих требований могут использоваться преимущества взаимодействия с другими смежными структурами, включая программы учета ядерных материалов и гарантий, органы гражданской обороны, местные и региональные министерства, национальные правительственные органы, соседние государства и международные организации. Сохранение, по мере необходимости, механизмов коммуникации будет иметь важное значение для одобрения стратегии обращения с отходами.

Логистическая, ресурсная, технологическая и экспертная поддержка может быть получена от других аналогичных или родственных национальных организаций, а также от других государств-членов. Консультации и взаимодействие с этими структурами, МАГАТЭ и другими международными организациями могут расширить возможности группы по обращению с отходами, но при этом они не должны отвлекать внимание от выполнения наиболее срочных операций по обращению с отходами. Следует опять же подчеркнуть важность предварительного планирования, включающего взаимодействие с соответствующими учреждениями. В случае аварии организации, отвечающей за обращение с отходами, будет необходимо определить, каких национальных ресурсов ей недостает, чтобы сфокусировать международную поддержку именно на тех областях, где может быть получена дополнительная польза.

После аварии на АЭС ТМА быстро пришло понимание того, что для успешного восстановления окружающей среды необходимы скоординированные действия коммерческих и государственных организаций. В 1980 году был образован уникальный консорциум для использования экспертного потенциала национальных организаций Соединенных Штатов Америки. Соглашение GEND, о котором говорилось выше, обеспечило координацию усилий сотрудников ДПЮ, Научно-исследовательского электроэнергетического института (ЭПРИ), КЯР США и МЭ США [2, 66].

Что касается аварии на АЭС «Фукусима-дайити», то в 2013 году был создан ИРИД для развития НИОКР в области вывода ядерных установок из эксплуатации в рамках интегрированной системы менеджмента. Усилия ИРИД сосредоточены на наиболее актуальной проблеме — выводе из эксплуатации АЭС «Фукусима-дайити» — с целью укрепления основ технологий вывода из эксплуатации. Членами ИРИД являются Японское агентство по атомной энергии, Национальный институт передовых промышленных наук и технологий, 4 производственные компании и 12 энергопредприятий.

3.2.17. Потребности в коммуникации и привлечение общественности

Восстановление окружающей среды и обращение с соответствующими отходами после ядерной аварии будет сложной задачей на длительную перспективу, и вопросы восстановления площадки и прилегающих территорий, а также будущего местного населения привлекают к себе большой интерес целого ряда заинтересованных сторон, включая государственные структуры, общественных лидеров, представителей ядерной отрасли и население. Одной из главных

составляющих стратегии восстановления окружающей среды и обращения с отходами является налаживание процессов, обеспечивающих эффективное взаимодействие с заинтересованными сторонами. Кроме того, взаимодействие с заинтересованными сторонами — это непереносимое условие оживления общественной активности, поскольку оно позволяет заинтересованным сторонам сообща вырабатывать видение будущего. Требования, сформулированные по итогам взаимодействия с заинтересованными сторонами, — важная составляющая общей системы организации требований.

Представители общественности, скорее всего, будут стараться получить информацию из различных источников, включая операторов установок, регулирующие органы и местные/национальные правительственные организации, а также, в некоторых случаях, из не столь хорошо или потенциально плохо информированных неофициальных источников. Для обеспечения последовательности и точности передаваемых сообщений важно, чтобы между организациями существовала определенная координация и связь. Функции и обязанности этих организаций в области коммуникации должны быть заранее уточнены, поскольку возникнет необходимость в передаче как упреждающих сообщений, так и сообщений постфактум. Различные организации могут делать акцент на разных проблемах или темах, поэтому необходима надлежащая координация, чтобы избежать разногласий в отношении фактической стороны дела и свести к минимуму недоразумения. Последовательное предоставление информации, основанной на фактах, крайне важно для выстраивания и поддержания доверительных отношений с обществом. МАГАТЭ подготовило публикацию Серии норм безопасности МАГАТЭ, № GSG-14, «Организация информационной работы с населением в порядке обеспечения готовности и реагирования в случае ядерной или радиологической аварийной ситуации», в которой описаны инфраструктура и процессы, необходимые для предоставления населению полезной, своевременной, правдивой, последовательной, четкой и актуальной информации в случае ядерной или радиологической аварийной ситуации [67].

Было признано, что вскоре после аварии на АЭС ТМА произошел сбой в информационной работе с общественностью, что вызвало напряженность в отношениях с ней. Кроме того, АЭС ТМА оказалась в центре внимания групп и политиков, выступающих против использования ядерной энергии [2]. Эта проблема сохранялась на протяжении всей кампании по ликвидации последствий, поскольку внимание руководства часто отвлекалось на решение вопросов, волнующих общественность. Согласованные усилия по поддержанию связей с общественностью, включая частую публикацию информационных сообщений и демонстрацию прозрачности программы, могли бы смягчить остроту некоторых из этих проблем.

Чтобы помочь людям понять планы и усилия, реализуемые для вывода из эксплуатации АЭС «Фукусима-дайти», в 2013 году в ТЕРКО была учреждена должность специалиста по рисковому коммуникации и создан отдел социальных коммуникаций [68]. Они были созданы в знак признания того, что корпоративная культура не поощряет признания рисков и не позволяет открыто ставить о них в известность общество. В компании существовала идея непогрешимости, которая внушалась обществу в целом. Отдел социальных коммуникаций, а также должности специалистов по рисковому коммуникации были созданы для развития коммуникации, основанной на фактах и нацеленной на установление доверия. В круг их задач входит устранение недоразумений, укрепление связей с общественностью и информирование о потенциальных рисках.

Как показал опыт МОС, имели место серьезные трудности в информационной работе с заинтересованными сторонами, такими как жители, которым было предписано эвакуироваться, или жители районов, требующих проведения дезактивационных работ или расположенных рядом с местами хранения отходов. Возникали некоторые недоразумения между различными звеньями центрального правительства и МОС, а также во взаимоотношениях с ТЕРКО. Однако благодаря упреждающим мерам удалось наладить конструктивное и активное сотрудничество при деятельном участии ученых и других специалистов.

Опыт АЭС «Фукусима-дайти» ясно показал, что может потребоваться проведение нескольких и повторяющихся индивидуальных и групповых встреч, для того чтобы дать ответ на

эмоциональную и перцептивную реакцию общества. Эти взаимодействия важны для того, чтобы у общества сложилась ясная картина происходящего и чтобы оно дало добро на организацию дезактивационных работ. Только после успешной реализации соответствующих усилий в течение примерно трех лет удалось достичь существенного прогресса в проведении дезактивационных работ. По сути, график этих работ во многом определялся этими усилиями по достижению консенсуса в обществе, а не простым решением технических проблем. Сведения о выполненных работах в пунктах дезактивации, а также соответствующие разъяснения по вопросам безопасности были обобщены и опубликованы МОС в 2018 году [69].

Проблемы рискованной коммуникации и методы решения проблем активно изучаются исследователями как в Японии, так и на международном уровне (например, в публикации МАГАТЭ [70] и проекте АЯЭ 2020 года [71]). Вместе с тем следует отметить, что методы рискованной коммуникации не универсальны и всегда должны учитывать национальные особенности и политические решения, принятые в данный момент. Следует отметить, что характер необходимой коммуникации может быть очень разным, в зависимости от потребностей общества в регионе, пострадавшем от ядерной аварии.

Однако, несмотря на различия, будут иметься и некоторые общие черты, такие как:

- a) предоставление физических мест, таких как местный информационный центр (а не только контактных данных в интернете), где представители общественности могли бы получить информацию и разобраться в основных проблемах, чтобы самостоятельно оценить ситуацию. Эти места полезны для взаимного обмена информацией и общения по поводу возникающих проблем. Одной лишь опоры на каналы массовой коммуникации, такие как интернет, недостаточно, особенно после стихийных бедствий, когда может быть повреждена инфраструктура;
- b) проведение встреч для дачи разъяснений в формате небольших групп, размер которых не должен превышать разумного предела, например 20 человек;
- c) усилия по налаживанию доверительных отношений за счет приглашения на местные встречи выступающих, которые пользуются доверием и уважением местных жителей.

4. ПЛАНИРОВАНИЕ НА ПЕРИОД ДО И ПОСЛЕ АВАРИИ

Основные извлеченные уроки

- Предварительное планирование, охватывающее широкий спектр потенциальных сценариев аварии и учитывающее организационные функции и взаимодействия, сделает более понятными доступные варианты обращения с отходами и поможет подготовиться к начальной стадии быстрого реагирования на аварию.
- Анализ прошлых аварий и того, как ликвидировались их последствия (извлеченные уроки — как положительные, так и отрицательные), ляжет в основу разработки стратегий и планов обращения с отходами.
- Объем необходимого предварительного планирования зависит от характера и размеров ядерных установок и вероятных сценариев аварии в данном государстве-члене и соседних государствах-членах.
- Предварительное планирование позволяет определить, какие объекты базовой инфраструктуры уже имеются в наличии или могут иметься в наличии для деятельности по обращению с отходами.

- Обращение с отходами перед захоронением: определение методов и процедур выполнения операций по извлечению, переработке, хранению и захоронению отходов и определение того, в каких случаях целесообразно перепрофилирование существующих объектов или их переоборудование в новые установки для обращения с аварийными отходами, особенно на ранних стадиях события, когда такие установки должны быть пущены в строй в кратчайшие сроки.
- Захоронение: определение возможных вариантов захоронения, которые могут быть доступны как в национальном, так и в местном масштабе, в том числе возможности размещения и строительства новых пунктов захоронения.
- Обзор потенциальных вариантов захоронения, концептуальных проектов хранилищ, их местоположения, вместимости и стратегий захоронения послужит основой для разработки концептуальных критериев приемлемости отходов. Это окажет большое влияние на принятие конкретных решений по разделению и обработке отходов с самого начала деятельности по обращению с отходами после аварии.
- То, как организации отреагируют на аварию и последующую ликвидацию ее последствий, окажет большое влияние на объемы и типы радиоактивных отходов, с которыми придется иметь дело.
- Для анализа планов и технологий и консультирования по этим вопросам может быть полезным привлечение независимых экспертов, особенно при оценке предлагаемых технических решений.

Несмотря на существование множества руководств по разработке политики и стратегий обращения с отходами в обычных ситуациях [72], в них редко учитываются уникальные потребности послеаварийных ситуаций, которые описываются в настоящем разделе.

Исторический опыт аварий (см. приложения) указывает на возникновение чрезвычайных, непредвиденных условий, таких как выброс материала активной зоны из гермооболочки и чрезвычайно больших объемов отходов разного уровня активности — от очень низкого или крайне высокого — в окружающую среду, которые значительно превосходили условия, предусмотренные в анализе безопасности и процедурах лицензирования установок. Соответственно, образовавшиеся отходы было сложно извлекать, собирать и хранить, особенно с учетом оказываемого ими воздействия на здоровье работников и населения, на окружающую среду, а также на экономику страны, региона, данной местности и предприятия.

Предварительное планирование мер реагирования на потенциальные аварии и обращения с радиоактивными материалами и отходами, которые могут возникнуть в результате этих аварий, скорее всего, потребует участия нескольких организаций в государстве-члене и выделения ресурсов на проведение комплексных совместных мероприятий. При предварительном планировании для анализа может быть выбран широкий круг сценариев, относящихся к конкретным ядерным установкам в государстве-члене; возможно также проведение мероприятий с участием профильных национальных (и международных) организаций, которые могут быть задействованы в ликвидации последствий аварии. В ходе мероприятий по предварительному планированию могут быть также рассмотрены возможные аварии на ядерных установках соседних стран. Определение и понимание круга вероятных сценариев аварии даст возможность в предварительном порядке определить потенциальные параметры источников выбросов, потенциальные пути выбросов и типы радиоактивных отходов, а также радиоактивные материалы, которые могут быть задействованы, и то, как они могут измениться с течением времени после аварии. Информацию о мерах по обращению с радиоактивными отходами во время и после аварийной ситуации можно найти в публикации Серии норм безопасности МАГАТЭ, № GSG-11, «Меры по прекращению ядерной или радиологической аварийной ситуации» [73].

Обращение с радиоактивными отходами — это, конечно же, только один из аспектов предварительного планирования мер реагирования на возможные ядерные аварии. Большое внимание на мероприятиях по предварительному планированию будет уделяться управлению

выбросами радиоактивности и уменьшению прямого облучения населения и работников. Все мероприятия по предварительному планированию противоаварийных мер будет объединять то, что такие мероприятия:

- предполагают привлечение национальных и региональных учреждений по вопросам ядерной безопасности, радиологической защиты и аварийного планирования и реагирования, а также владельцев и операторов всех соответствующих ядерных установок и отработку их функций и взаимодействия между ними;
- основаны на определении сценариев аварий для конкретных установок, которые могут использоваться для установления типов аварий, возможной последовательности событий, вовлеченных материалов и зон, которые могут быть затронуты;
- предполагают учет налагаемых заинтересованными сторонами, обществом и ресурсной базой ограничений на уровень практической готовности, который может быть достигнут для каждого сценария и установки, а также того, как могут быть расставлены приоритеты при планировании;
- позволяют определить стратегии и планы по конкретной установке для круга возможных сценариев, которые могут быть быстро и эффективно введены в действие соответствующими организациями в случае возникновения аварии.

Полезным мероприятием по планированию, которое следует провести при разработке планов реагирования на возможную ядерную аварию, является предварительный отбор и определение потенциально применимых технологий. Многие государства-члены уже занимаются такой деятельностью в рамках своих программ обеспечения аварийной готовности [74]. Один из примеров приведен на рис. 7.

Criterion	Technology																								
	A-1	A-2	A-3	A-4	A-5	A-6	A-7	A-8	A-9	A-10	A-11	A-12	A-13	A-14	A-15	A-16	A-17	A-18	A-19	A-20	A-21	A-22	A-23	A-24	A-25
Safety, health & environment	Yellow	Yellow	Yellow	Red	Red	Green	Yellow	Yellow	Yellow	Yellow	Yellow	Yellow	Yellow	Yellow	Yellow	Green	Yellow	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Yellow
Time to implement	Green	Yellow	Red	Green	Yellow	Yellow	Yellow	Yellow	Yellow	Yellow	Green	Yellow	Yellow	Yellow	Red	Yellow	Red	Yellow	Yellow	Yellow	Yellow	Yellow	Yellow	Yellow	Yellow
Technical performance	Green	Yellow	Red	Red	Yellow	Green	Green	Yellow	Yellow	Yellow	Yellow	Green	Yellow	Yellow	Green	Green	Yellow	Green	Green	Yellow	Yellow	Green	Yellow	Yellow	Green
Availability	Green	Yellow	Green	Green	Yellow	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Red	Red	Green	Red	Green	Yellow	Green	Green	Yellow	Yellow	Yellow	Yellow	Yellow	Green
Costs	Yellow	Yellow	Yellow	Green	Yellow	Yellow	Yellow	Yellow	Yellow	Yellow	Yellow	Red	Red	Green	Red	Yellow	Yellow	Green	Green	Yellow	Red	Green	Yellow	Yellow	Yellow
Process waste	Green	Green	Green	Green	Green	Yellow	Yellow	Yellow	Yellow	Yellow	Red	Yellow	Red	Yellow	Green	Green	Yellow	Yellow	Yellow	Yellow	Yellow	Yellow	Yellow	Yellow	Yellow
Throughput	Yellow	Green	Yellow	Green	Yellow	Yellow	Yellow	Yellow	Green	Yellow	Yellow	Green	Green	Yellow	Yellow	Yellow	Yellow	Green	Green	Green	Yellow	Green	Green	Green	Green

Note: Color coding designations: Green = high/advantageous; Yellow = medium/neutral; Red = low/not advantageous

Enhanced surveying:
A-1. Manual Survey
A-2. Automated Survey

Soil burial:
A-3. Dig (Plow)

Foliage removal; composting:
A-4. Lawn Mowing
A-8. Selected Removal of Vegetation
A-14. Composting of Organic Matter

Thin-layer soil surface removal:
A-5. Sod Cutter

Dig and haul, demolition, and removal of contaminated materials for disposal:
A-7. Large-Scale Dig and Haul

Physical removal of surface layer of material from hard surfaces:
A-6. Scanification
A-10. Vacuuming
A-11. High-Pressure Washing

Physical cleaning of hard surfaces:
A-9. Street Sweeping

Waste volume reduction:
A-12. Segmented Gate System
A-13. Soil Washing
A-17. Incineration

Waste stabilization:
A-15. Plasma Arc Vitrification
A-16. Cementitious Stabilization/Solidification

Wastewater Cleanup or Volume Reduction:
A-18. Chelating Agents
A-19. Ion Exchange (IX)
A-20. Reverse Osmosis
A-21. Electrodialysis/Electrodialysis Reversal (ED/EDR)
A-22. Membrane Filtration
A-23. Conventional Filtration
A-24. Activated Carbon (AC)
A-25. Evaporation (Passive or Active)

РИС. 7. Пример предварительного отбора технологий для реагирования на аварию. Публикуется с разрешения Агентства по охране окружающей среды США [74].

Можно ожидать, что в ходе тех частей предварительного стратегического планирования, которые касаются собственно образования отходов и разработки стратегии и системы обращения с отходами, будут:

- a) выполнены качественные и количественные оценки возможных последствий события, включая выброс радиоактивного материала и образование радиоактивных отходов на каждой стадии аварии, с тем чтобы определить границы или диапазон параметров, необходимых для предварительного планирования: например, форму, содержание радионуклидов, диапазоны активности, механизмы облучения и дозы радиации, объемы, места, влияние на работу станции, возможность извлечения и т.д.;
- b) определены потенциальные стратегии и системы обращения с отходами и требования, которые будут диктовать решения о выборе, конструкции и эксплуатации каждого компонента системы обращения с отходами на основе метода системного проектирования;
- c) определены потенциальные компоненты системы обращения с отходами конкретной установки для сбора, хранения и захоронения материалов: например, оборудование для извлечения и экскавации; места сбора и хранения как вблизи установки, так и на удалении от нее; вместимость и близость пункта захоронения; потенциальное перепрофилирование объектов; перевозка и соответствующие логистические возможности и т.д.;
- d) определены необходимые и доступные финансовые ресурсы, персонал и оборудование для каждого сценария и разработаны соответствующие планы обращения с предполагаемыми отходами;
- e) выявлены недостатки в возможностях и средствах, из-за которых могут быть не выполнены ключевые требования, и обеспечено их устранение.

В стратегии обращения с отходами и планах ее реализации должна учитываться стадийность в развитии аварийной ситуации. На начальной (или активной) стадии решения должны приниматься быстро, а приоритетами являются установление контроля над ситуацией и смягчение последствий, а не оптимизация обращения с отходами [45]. По мере того как авария переходит в стадию восстановления и ликвидации последствий, высвобождается больше времени для планирования, оптимизации и реализации стратегии обращения с отходами. Стратегия и планы обращения с отходами перед захоронением должны составляться с учетом плана захоронения, стратегий ликвидации последствий и реабилитации и быть интегрированы с ними. Деятельность по обращению с отходами перед захоронением, скорее всего, придется подстраивать под неизбежные изменения в этих других планах.

В случае аварии детальное планирование обращения с отходами может быть выполнено только после стабилизации первоначальной чрезвычайной ситуации, когда станет лучше понятен весь ее масштаб. Если национальное стратегическое предварительное планирование будет выполнено надлежащим образом, оно обеспечит прочную основу для более детального тактического планирования и высветит важные темы, которые должны быть рассмотрены в плане. Темы, рассматриваемые ниже в подразделах данного раздела, посвященных планированию на период до и после события, приведены только в качестве примера. Уровень фактически проводимого предварительного планирования будет зависеть от политики и организаций в отдельных государствах-членах.

Как уже говорилось выше, предварительное планирование основывается на отработке сценариев, при которой учитывается национальная специфика, в том числе следующие факторы:

- количество и типы ядерных установок и источников излучений в государстве-члене;
- состояние установок (т.е. в эксплуатации или в процессе вывода из эксплуатации);
- местонахождение существующих пунктов захоронения как радиоактивных, так и нерадиоактивных отходов;

- характер окружающей среды на конкретных установках (сельская или городская местность, побережье или материк, топография, геология, землепользование, стабильность почвы, климат и погодные условия и т.д.);
- близость к государственным границам.

Эффективное рассмотрение сценариев предполагает учет маловероятных событий, событий с серьезными последствиями и наихудших предположений, чтобы оценить вероятный диапазон и характер распространения загрязнения и образующихся отходов. Авария на АЭС «Фукусима-дайити» показала, что исключать сценарии на основе плохо изученных вероятностей или существующих проектных основ неразумно. С учетом вышеуказанных типов событий процесс предварительного планирования может гарантировать, что принятых мер по обращению с отходами будет достаточно для ликвидации последствий рассмотренных сценариев.

Помимо использования сценариев, можно рассмотреть возможность проверки эффективности плана и его реализации. В дальнейшем, если потребуется, в план могут быть внесены изменения. Как и во всей подобной деятельности, важно регулярно актуализировать план с учетом меняющихся обстоятельств.

На ядерных установках уже существуют планы аварийного реагирования. Однако в этих планах, как правило, не затрагиваются вопросы обращения с отходами. Можно рассмотреть возможность расширения этих планов аварийного реагирования за счет включения в них положений об обращении с отходами на ранней активной стадии, чтобы предусмотреть соответствующие действия до начала национальной деятельности по ликвидации последствий.

Для стран, в которых нет ядерных установок, процесс предварительного планирования обращения с отходами может быть меньшим по масштабу и соразмерным обстоятельствам. При этом будет необходимо учитывать сценарии, основанные на аварийных ситуациях с радиоизотопами и источниками излучений, а также на возможных злоумышленных действиях.

В ходе предварительного планирования может быть определена организационная структура, которую можно будет ввести в действие сразу после аварии для реализации и адаптации стратегии обращения с отходами. Досконально понять диапазоны потенциальных последствий аварии и соответствующую региональную и национальную политику и нормативные требования по обращению с отходами необходимо еще до аварии, чтобы гарантировать, что меры реагирования на аварию и долгосрочные меры по обращению с отходами будут учитывать фактическую ситуацию и соответствовать применимым положениям и политике.

Примером предварительного планирования может служить работа группы CODIRPA² во Франции. В 2005 году на основании межведомственной директивы о действиях государственных органов в случае радиологической аварийной ситуации Управлению по ядерной безопасности было поручено заложить основу и определить, подготовить и реализовать меры, необходимые для реагирования на ситуации, возникающие после ядерной аварии. Управление по ядерной безопасности образовало руководящий комитет (CODIRPA), отвечавший за разработку подхода и методологии, которые будут использоваться. Этот комитет объединил в своем составе различные заинтересованные стороны, включая главные профильные отделы министерств, экспертные органы, ассоциации, выборных должностных лиц и операторов ядерных установок, и обратился за помощью к международным экспертам.

Еще один пример методики предварительного планирования приведен в приложении 1 к [21].

² CODIRPA: COmité DIRecteur pour la gestion de la phase Post Accidentelle d'un accident nucléaire ou d'une situation d'urgence radiologique (Руководящий комитет по управлению действиями на послеварийной стадии ядерной аварии или радиологической аварийной ситуации).

4.1. ПРЕДВАРИТЕЛЬНОЕ ПЛАНИРОВАНИЕ ЗАХОРОНЕНИЯ

При предварительном планировании захоронения аварийных отходов важно понимать, что на сроки выполнения различных действий может повлиять доступность технических, финансовых и нормативных ресурсов. Ниже приведены соответствующие примеры.

- а) Немедленное захоронение: государство-член, обладающее необходимыми ресурсами, опытом и инфраструктурой, может взять на вооружение стратегию, имеющую целью относительно быстрое захоронение. В такой ситуации при предварительном планировании больше внимания будет уделено выявлению существующих объектов, которые могут быть безопасно переоборудованы или расширены, использованию одного или нескольких дополнительных пунктов захоронения или ранее не применявшихся концепций захоронения и/или определению потенциально пригодных мест для размещения новых объектов с применением, по мере возможности, существующих процедур лицензирования. Немедленное захоронение целесообразно в тех случаях, когда имеется достаточно информации о площадках и в ходе предварительного планирования эти места были сочтены пригодными — это позволит избежать ситуации, когда в случае аварии в будущем возникнут проблемы вследствие освоения не прошедших характеризацию и непригодных площадок для захоронения.
- б) Отложенное захоронение: пока государство-член не будет уверено в том, что оно решило все свои внутренние социальные, политические и технические вопросы, связанные с размещением, строительством и лицензированием пункта захоронения, оно может придерживаться стратегии отложенного захоронения. В таком случае при предварительном планировании больше внимания будет уделено временным площадкам или объектам для обращения с отходами, будь то зоны технологической подготовки, где отходы находятся в течение ограниченного времени, или места для более длительного хранения. Предварительное планирование временного обращения с отходами в идеале должно охватывать такие темы, как критерии определения местоположения, лицензирование, строительные нормы и методы эксплуатации.
- с) Гибридная стратегия: можно также взять на вооружение гибридную стратегию — в том смысле, что могут существовать некоторые предполагаемые типы отходов, которые можно относительно легко утилизировать на существующих объектах, в то время как для отходов более сложных типов или для размещения очень больших объемов может быть принят более долгосрочный подход.

4.1.1. Оценка существующих мощностей для захоронения

В некоторых странах для удовлетворения неотложных потребностей в захоронении большинства или всех отходов, образующихся даже в результате крупных аварий, может быть достаточно существующих объектов. В других странах пунктов захоронения может не быть вовсе либо они могут быть недостаточно вместительными для размещения отходов, образующихся в результате разумно допустимых сценариев аварии.

На этапе предварительного планирования полезно принять во внимание регулируемые пункты захоронения отходов различных типов, а не только те, которые принимают радиоактивные отходы. В некоторых государствах-членах пункты захоронения нерадиоактивных отходов могут быть модернизированы или расширены, чтобы дать возможность захоронения определенных типов высокообъемных, низкоактивных отходов, образующихся в результате аварийной ситуации, в соответствии с надлежащим образом разработанным обоснованием безопасности.

Продуманный процесс планирования будет включать в себя определение и оценку следующих вопросов, касающихся существующих пунктов захоронения и мощностей по обращению с отходами:

- a) занимаемая площадь и расположение по отношению к существующим АЭС, военным объектам или другим потенциальным местам аварии, предприятиям по обработке и кондиционированию отходов, а также путям движения железнодорожного и автомобильного транспорта;
- b) разрешенные типы отходов, общая разрешенная емкость хранилища с точки зрения объема и активности, планируемая дополнительная емкость хранилища, показатели использования в прошлом и потенциал расширения объекта;
- c) существующие законы, нормы, условия выдачи разрешений, договоренности с местным населением или факторы социальной справедливости, которые могут допустить, исключить или ограничить использование или расширение пункта захоронения отходов, образующихся в аварийной ситуации;
- d) условия окружающей среды, ограничения, налагаемые буферной зоной или инфраструктурой, будущие планы землепользования или другие факторы, которые могут исключить или ограничить использование или расширение пункта захоронения аварийных отходов.

4.1.2. Оценка потенциальных новых мест размещения пунктов захоронения и новых технологий

Нормами безопасности МАГАТЭ установлены требования к выбору площадок, определяющие, что можно считать технически приемлемой площадкой для захоронения, которая обеспечит защиту здоровья людей и окружающей среды. Отдельные государства-члены по-разному подходят к экономическим, социальным и культурным критериям выбора площадок, а также к экологическим критериям, которые не имеют прямого отношения к обоснованию безопасности. Процесс выбора площадки, который эффективно совмещает в себе все типы критериев выбора, повышает шансы на успех. Однако вес, придаваемый критериям выбора площадки для пункта захоронения, особенно в зоне, сильно загрязненной в результате ядерной аварии, будет отличаться от того, который придается критериям размещения пункта захоронения в неаварийных ситуациях в зонах, не имеющих радиологических ограничений.

Если существующие пункты захоронения имеют ограниченную вместимость или плохие перспективы расширения, будет полезно заранее, до аварийной ситуации, наметить общие границы районов, обладающих благоприятными характеристиками с точки зрения гидрогеологии, геологии, поверхностного стока и сейсмической активности. Такое зондирование обстановки даст несколько преимуществ:

- a) заблаговременное определение объективных критериев размещения, а также возможности сбора и обсуждения информации, касающейся этих критериев, с соответствующими заинтересованными сторонами в отсутствие фактических аварийных условий;
- b) сокращение времени на определение местоположения и одобрение новых площадок, которые могут потребоваться после фактической аварии;
- c) укрепление доверия общества благодаря созданию группы информированных общественных активистов, участвующих в процессе предварительного зондирования, что может облегчить коммуникацию, благодаря которой общество будет с большим доверием относиться к решениям, принимаемым после фактической аварии.

При таком зондировании можно использовать существующие данные либо новые данные, если позволяет финансирование. Однако, поскольку выбор площадок для захоронения может быть весьма деликатным вопросом, при предварительном планировании, возможно, имеет смысл

провести лишь относительно общее исследование вариантов на территории вблизи оцениваемой ядерной установки. Окончательный выбор площадки(ок) и технологий для захоронения будет сделан, если произойдет авария.

При рассмотрении потенциальных концепций захоронения, которые могут быть одобрены в предварительном порядке, опыт работы с объектами, имеющими установленные проектные требования, будет, возможно, проще оценить, чем концепции, которые потребуют обстоятельной оценки конкретной площадки.

Примером изучения потенциальных объектов для захоронения в порядке предварительного планирования может служить работа CODIRPA во Франции (о которой говорилось ранее в этом разделе). В ходе предварительного планирования CODIRPA центр CIREN в Морвилье (см. приложение VI) не был изначально выбран в качестве подходящего прототипа новых установок для обращения с большими объемами радиологически загрязненных отходов, которые могут образоваться в результате аварии, из-за отсутствия уверенности в том, что геологические условия в районе аварии будут аналогичными району Морвилье и будут отвечать тем же критериям приемлемости площадки, которые применяются к Морвилье. CODIRPA занимается определением того, можно ли принципы, использованные для центра в Морвилье (правила захоронения опасных отходов), применить при создании специального объекта, который мог бы также принимать отходы с очень низкими уровнями радиологического загрязнения, при условии локального сооружения (восстановления) естественного барьера из завезенного материала, такого как глина, как это делается на полигонах опасных отходов.

Аналогичным образом в США определены специальные требования к проектированию и строительству полигонов химически опасных отходов, которые должны обеспечить необходимый уровень локализации отходов в различных геологических и метеорологических условиях. Эти требования (Свод федеральных нормативных актов: 40 CFR Part 264) включают такие элементы, как конструкции и материалы, которые должны использоваться для противодиффузионных экранов и систем сбора фильтрата, требования к устойчивости и конструкции верхнего покрытия. При одновременном соблюдении базовых критериев размещения (например, исключение пойменных террас или сейсмически активных зон) такие объекты успешно работают как во влажной среде с относительно неглубоким залеганием подземных вод, так и в засушливых районах с очень глубокими водоносными горизонтами. Многие объекты также используются для захоронения отходов с относительно низкими концентрациями радионуклидов, которые помещаются туда в порядке исключения либо в результате, к примеру, нефтегазодобывающей деятельности. Универсальность и возможность приспособления к разным условиям окружающей среды желательны для целей предварительного планирования.

В США регулирующие органы издадут стандартные требования к содержанию заявки для получения разрешения на эксплуатацию пункта захоронения и стандартные планы экспертизы захоронения НАО регулирующим органом. Наличие этих стандартных форм позволяет сократить время, необходимое для подачи и последующего рассмотрения заявок на получение разрешений для новых пунктов захоронения.

4.1.3. Методы усреднения, разбавления и смешивания

Анализ объемов отходов в контексте ядерной или радиологической аварийной ситуации будет неполным без учета потенциального влияния намеренного и непреднамеренного разбавления на общие объемы захоронения. Для целей настоящей публикации под намеренным разбавлением понимается контролируемое смешивание отходов более высокого и более низкого уровня активности или добавление в отходы незагрязненного материала с целью снизить общий уровень активности и получить возможность разрешенного захоронения на лицензированном объекте. Эти методы обычно разрабатываются регулирующими органами на основе соответствующего обоснования безопасности.

Несанкционированное разбавление с целью обхода критериев допустимого захоронения не является международно признанной практикой. Разрешенное разбавление может быть частью дифференцированного подхода к захоронению, обеспечивающей экономию средств за счет надлежащего использования нескольких пунктов захоронения. Для целей настоящей публикации под непреднамеренным разбавлением понимаются действия, предпринятые (или не предпринятые) после аварийной ситуации, которые привели к увеличению уровней загрязнения (и, вероятно, объемов отходов) ранее незагрязненного или слабозагрязненного материала. Такие непредусмотренные объемы могут оказать значительное влияние на будущие потребности в мощностях для захоронения и соответствующие потребности в ресурсах.

Размещение аварийных отходов в неэкранированных траншеях или в других местах с неудовлетворительной локализацией может привести к значительному загрязнению окружающих грунтов и подземных и поверхностных водных объектов за счет миграции радионуклидов из блоков захоронения. Как показывает опыт Чернобыльской АЭС, рассмотренный в данном документе, и положение дел с различными объектами ядерного наследия, описанными в приложении VI, непреднамеренное загрязнение особенно вероятно в районах с большим количеством осадков и проницаемыми грунтами. Неблагоприятные последствия имеют тенденцию к усилению для долгоживущих гетерогенных отходов. Поэтому со временем объем загрязненных окружающих грунтов может увеличиваться. В случае аварии может быть оправдано временное хранение в условиях надлежащей локализации, до тех пор пока не появятся надлежащим образом оборудованные пункты захоронения, на создание которых может уйти от нескольких лет до нескольких десятилетий.

Запашка загрязненного грунта для снижения уровня загрязнения поверхностей позволяет разбавить концентрацию радионуклидов на большей глубине загрязненного грунта. Принятое в дальнейшем решение об экскавации и захоронении таких загрязненных грунтов может привести к образованию больших объемов отходов, требующих захоронения. Хотя запашка может проводиться и без намерения проводить экскавацию в будущем, изменение планов использования земли для сельскохозяйственных нужд, рост населения или другие причины могут привести к отмене этого первоначального решения [75].

4.1.4. Вовлечение заинтересованных сторон в деятельность по захоронению аварийных отходов

Информирование и вовлечение широкого круга заинтересованных сторон, особенно тех, кто пострадал в результате аварии, крайне важно для планирования и разработки стратегии реагирования на ядерную аварию, включая вопросы обращения с отходами и их захоронения. Основные цели программы вовлечения и коммуникации — это укрепление доверия общества, поощрение широкого участия и максимально возможного одобрения предлагаемых технических решений по захоронению, а также сведение к минимуму негативных реакций общества, обусловленных тем, что оно не получает ответы на свои вопросы или дезинформируется. Предоставление информации и приглашение к обсуждению проблем захоронения отходов в аварийных ситуациях может дать множество преимуществ, например:

- разработанные планы и стратегии захоронения могут лучше отражать местные потребности и предпочтения, увеличивая шансы на широкое одобрение планов и стратегий, которые в конечном счете будут введены в действие;
- чувствительные темы могут быть рассмотрены в спокойной, неаварийной обстановке, что будет способствовать вдумчивому диалогу, высказыванию разных точек зрения и проверке фактов в компетентных источниках;
- могут быть налажены механизмы связи и подготовлен персонал, с тем чтобы в случае фактической аварии обмен информацией мог осуществляться через уже созданную сеть;

- после аварии средства массовой информации и обществу могут быть более эффективно предоставлены надежные сторонние источники информации с целью передать быструю и точную информацию и развеять ложные слухи.

Начать эти диалоги могут помочь вопросы о возможных вариантах, пунктах и местах захоронения, сформулированные ниже.

- Имеет ли смысл увеличивать вместимость существующих пунктов захоронения радиоактивных отходов? Если да, то до какой степени такое увеличение желательно или целесообразно? Можно ли использовать несколько установок для обращения с отходами, чтобы рассредоточить радиационное воздействие?
- Если могут потребоваться новые пункты захоронения отходов, то при помощи какого процесса будет вестись поиск подходящих площадок? Должны ли быть заранее определены в целом благоприятные места?
- До какой степени размещение новых объектов негативно повлияет на текущие или перспективные планы землепользования в районах, которых это коснется?
- Должны ли предоставляться экономические стимулы районам, соглашающимся на значительное расширение существующих пунктов захоронения отходов или на размещение новых объектов? Если да, то как должен происходить этот процесс?
- Нужны ли изменения в законодательстве, стандартах безопасности или нормативной базе, для того чтобы ускорить получение разрешений на строительство новых пунктов захоронения отходов или повысить эксплуатационную гибкость существующих пунктов в случае аварии? Следует ли оценивать исключения в режиме нормативного регулирования, соразмерные рискам для безопасности и относительным рискам для общества?

Используемые процессы и заинтересованные стороны, вовлеченные в решение этих вопросов, будут варьироваться в зависимости от законодательства и политики отдельных государств-членов. МАГАТЭ выпустило ряд публикаций по вопросу о вовлечении заинтересованных сторон, в том числе о всесторонних подходах к выбору новых площадок и технологий для захоронения, программах стимулирования и других аспектах (например, [70, 76]).

4.1.5. Другие технические вопросы предварительного планирования захоронения

При планировании способов захоронения аварийных отходов необходимо учитывать множество технических вопросов. Эффективным подспорьем в предварительном планировании может стать анализ пробелов. МАГАТЭ [21] предлагает:

- а) провести анализ пробелов, чтобы оценить возможности и потенциал существующей инфраструктуры захоронения, а также других инструментов, методов и т.д., которые потребуются для реализации государственной политики по захоронению отходов в случае аварии (на основе рассмотренных сценариев);
- б) наметить новые направления работы, необходимые для устранения всех выявленных пробелов; они могут включать научно-исследовательские и опытно-конструкторские работы, нацеленные на улучшение существующих мощностей для захоронения или разработку новых подходов;
- в) оценить возможные объемы отходов при постулируемых аварийных ситуациях, отражающих специфику данной страны (с учетом количества, типов и мест расположения ядерных установок и пользователей радиоизотопов и источников излучений);
- г) при оценке этих объемов учитывать вероятное распространение (шлейф) загрязнения, подвижность загрязняющих веществ в окружающей среде, объем и характеристики загрязненных материалов (например, грунтов, деревьев, зданий и т.д.);

- е) изучить возможность создания модульных и масштабируемых конструкций для захоронения аварийных отходов, которые могут быть оперативно лицензированы и быстро возведены;
- ф) оценить возможность заимствования проектов существующих лицензированных пунктов захоронения для быстрого сооружения и лицензирования новых объектов для размещения аварийных отходов — при том понимании, что если типы отходов, конструкции и места размещения предполагаемых новых объектов аналогичны соответствующим действующим объектам, то можно ожидать, что их показатели безопасности также будут аналогичными.

4.2. ПЛАНИРОВАНИЕ ОБРАЩЕНИЯ С ОТХОДАМИ ПОСЛЕ АВАРИИ

После того как авария перешла в стадию стабилизации, проводится системное планирование обращения с отходами, главная цель которого — защитить здоровье и благополучие людей, а также свести к минимуму объем радиоактивных отходов, который потребует внимания в долгосрочной перспективе.

Реагирование на аварию будет происходить поэтапно. При планировании важно тщательно продумать различные стадии реагирования, в том числе переходы между стадиями. В публикации Серии норм безопасности МАГАТЭ, № GSG-11 [73] содержится информация о мероприятиях, проводимых на стадии перехода от аварийного реагирования к прекращению ядерной или радиологической аварийной ситуации, включая деятельность по обращению с радиоактивными отходами. Установление конечных точек может облегчить переход к последующим стадиям и дать осязаемые критерии успеха деятельности по реагированию. Например, на АЭС ТМА по мере продвижения работ по ликвидации последствий аварии стало возможным выделить четыре операционные стадии [2]:

- а) стабилизация станции (1979–1980 годы);
- б) обращение с отходами (1980–1983 годы);
- с) дезактивация (1981–1985 годы);
- д) выгрузка топлива (1984–1990 годы).

Эти стадии накладывались друг на друга, и деятельность на этих стадиях, как правило, не имела точных дат начала и окончания. В течение первых 15 месяцев после аварии реактор был выведен в режим холодного останова, из гермообъема были удалены газы деления, был применен системный подход к контролю загрязнения и начаты процессы очистки загрязненной воды. Стадия обращения с отходами включала в себя переработку загрязненной воды, извлечение отходов, иммобилизацию отходов и, наконец, хранение и транспортировку радиоактивных отходов. Стадия дезактивации имела целью прежде всего снижение облучения работников и обеспечение доступа для облегчения деятельности по очистке и окончательному извлечению топлива. Стадия выгрузки топлива была сложной и первоначально включала в себя разработку стратегий характеристики обломков ТВЭЛов и подходов к их извлечению.

Далее в настоящем разделе будут более подробно рассмотрены два примера планирования в послеаварийный период на основе опыта Чернобыльской АЭС и АЭС «Фукусима-дайти», которые описаны в подразделах 4.2.1 и 4.2.2.

4.2.1. Пример 1: планирование восстановительных мероприятий на площадке энергоблока № 4 Чернобыльской АЭС

Для детального планирования действий и мер по реагированию на сложные и тяжелые послеаварийные условия на Чернобыльской АЭС потребовалось проведение тщательного анализа. Планирование, описанное в документе «Chornobyl Unit 4: Short and Long Term

Measures» («Чернобыльский блок 4: кратко- и долгосрочные мероприятия»)³ [1], было начато в начале 1996 года с целью анализа вариантов и подготовки подробных рекомендаций по достижению экологически безопасных условий. Этот анализ был проведен международной группой экспертов, которая совместно с украинскими экспертами определила необходимые меры и подходы, которые могли быть использованы для их реализации. В ноябре 1996 года был выпущен заключительный отчет с кратким изложением результатов. В качестве одного из главных результатов в отчет было включено описание рекомендуемого порядка действий. Опираясь на результаты отчета, Украина, страны Группы семи/восьми и Европейская комиссия поручили группе подготовить План осуществления мероприятий на объекте «Укрытие» (ПОМ) [1]. ПОМ был окончательно доработан в июне 1997 года и утвержден на 23-м саммите Группы восьми в Денвере, штат Колорадо, в июне 1997 года. Ниже вкратце описаны мероприятия по разработке, методология принятия решений и подготовленные в итоге планы.

4.2.1.1. Приоритеты и решения по преобразованию площадки энергоблока № 4 Чернобыльской АЭС

Международная группа взяла на вооружение подход, основанный на анализе недостатков, для определения целей преобразования энергоблока № 4 Чернобыльской АЭС в экологически безопасную систему. Главной целью группы экспертов являлась защита населения, работников и окружающей среды, для чего было необходимо обеспечить безопасное хранение всех радиоактивных и ядерных материалов. После продолжительного диалога было достигнуто общее понимание, что энергоблок № 4 Чернобыльской АЭС не может быть переоборудован в безопасное постоянное хранилище ядерных материалов. В этой связи конечной долгосрочной целью было определено извлечение радиоактивных материалов на основе поэтапного дифференцированного подхода к обеспечению безопасности, как показано на рис. 8. Вопрос о сроках захоронения радиоактивных материалов остается открытым в ожидании принятия будущих решений.



РИС. 8. Поэтапный подход к преобразованию площадки энергоблока № 4 Чернобыльской АЭС в экологически безопасную систему. Взято с изменениями из [1].

³ «Чернобыльский блок 4» — это энергоблок № 4 Чернобыльской АЭС, который был поврежден в результате ядерной аварии в апреле 1986 года. Чернобыльский блок 4 часто называют «Укрытием» или объектом «Укрытие», по-украински «Укриття»; иногда также используется термин «саркофаг».

На следующем этапе эксперты пришли к выводу о необходимости разработки и осуществления мер по системному решению следующих конкретных проблем безопасности:

- a) риски, связанные с источниками;
- b) ядерная безопасность: топливо/топливосодержащий материал (ТСМ) (делящийся материал);
- c) радиологическая безопасность: радиоактивные материалы, включая обломки конструкций активной зоны;
- d) другие опасные материалы: горючие, взрывоопасные, токсичные материалы;
- e) эксплуатационные риски;
- f) опасные рабочие функции и действия, техника безопасности;
- g) пыль, излучение;
- h) подъездные пути, техника безопасности;
- i) аварийные риски;
- j) энергоблок № 4 — обрушение «Укрытия»;
- k) пожарная опасность;
- l) аварийные системы и готовность.

Эти проблемы безопасности были разбиты на категории действий и более тщательно проанализированы с точки зрения срочности, выполнимости и возможности скорейшей реализации соответствующих мер. В результате этой работы был составлен список стратегических мер, которые были неотложными, необходимыми и желательными. Подробности процесса и связанные с ним проблемы описаны в соответствующем отчете [1].

После того как цели и стратегические меры были определены и расставлены в порядке важности, было подготовлено дерево решений по снижению рисков, основанное на принципе безопасности. По методу исключения предполагалось выполнить три верхних решения: в качестве главного приоритета следовало устранить краткосрочные риски с помощью срочных мер в короткие сроки и с немедленным финансированием (решение № 1). На следующем этапе требовалось принять решение о том, можно ли, следуя международно признанным стандартам, оставить радиоактивные материалы на их нынешнем месте (решение № 2). Исходя из общего понимания был сделан вывод, что площадка не может быть преобразована в хранилище, отвечающее этим стандартам. Следующее необходимое решение (решение № 3) касалось сроков извлечения радиоактивных материалов и их перемещения в хранилище. На момент подготовки настоящей публикации решение № 3 принято не было.

4.2.1.2. Анализ сценариев и разработка рекомендуемого курса действий

Экспертами и экспертными организациями, поддерживающими проект, были предложены различные сценарии. Они были детально проанализированы, в том числе их осуществимость, риск реализации, стоимость и сроки. После анализа каждого предложенного сценария и последующего сравнительного анализа их плюсов и минусов был разработан «Рекомендуемый курс действий» в качестве системной основы, на которой можно было бы вести работу по устранению как краткосрочных, так и долгосрочных рисков. В результате было подготовлено специальное исследование сценариев под названием «Исследование консорциума Alliance». В нем были предложены комплексные меры по созданию нового долговечного бетонного укрытия арочного типа с двойными стенами и вспомогательными сооружениями для безопасной локализации и герметизации поврежденного реакторного блока в течение как минимум 100 лет. Рассматривались и другие сценарии, например структурная стабилизация существующего объекта «Укрытие», герметизация поврежденного реактора в мощном монолитном бетонном сооружении или возведение конфайнмента из легких конструкций. Самое оптимальное решение, которое в итоге было реализовано, — это НБК, который был успешно установлен на свое окончательное

место в 2016 году. Ниже для справки приведены выдержки из описания задач, связанных с каждой фазой [78].

«Фаза 1. Неотложные действия и другие краткосрочные меры

- Задача 1.1. Уменьшение вероятности обрушения путем стабилизации конструкции (должно быть скоординировано с задачами 2.1. и 2.2.)
- Задача 1.2. Уменьшение последствий обрушения (должно быть скоординировано с задачами 2.1. и 2.2.)
- Задача 1.3. Повышение ядерной безопасности за счет управления критичностью и контроля локализованной воды (как часть интегрированной системы мониторинга)
- Задача 1.4. Повышение безопасности работников и улучшение техники безопасности (необходимо соответствующее контрольное и защитное оборудование)

Фаза 2. Подготовка к долгосрочному преобразованию в экологически безопасный объект

- Задача 2.1. Обеспечение более безопасных подъездов за счет экранирования и стабилизации, насколько это возможно, при помощи цементирующего наполнителя и средств пылеподавления (будет запланировано параллельно с реализацией фазы 1)
- Задача 2.2. Создание конфайнмента и удаление неустойчивых верхних частей. В качестве альтернативы конфайнмент должен быть спроектирован таким образом, чтобы выдержать обрушение
- Задача 2.3. Разработка стратегии извлечения и, как вариант, осуществление частичного извлечения на раннем этапе

Фаза 3. Преобразование в экологически безопасный объект

- Задача 3.1. Превращение объекта в безопасное сооружение (будет запланировано параллельно с реализацией фазы 1)
- Задача 3.2. Контроль и техническое обслуживание безопасного сооружения до момента извлечения (будет запланировано параллельно с реализацией фазы 1)
- Задача 3.3. Извлечение оставшегося радиоактивного материала, когда это будет целесообразно и необходимо».

«Рекомендуемый курс действий» был разработан с намерением заложить основу для перевода аварийной площадки в экологически безопасное состояние. Полученная основа предлагает поэтапный, но гибкий подход к принятию решений, который также облегчит принятие будущих мер оптимизации. «Рекомендуемый курс действий» разрабатывался в период с мая 1996 года по декабрь 1997 года.

4.2.1.3. План осуществления мероприятий на объекте «Укрытие»: текущее состояние и достигнутые результаты

Выполнение задач 2.3 и 3.1–3.3, имевших отношение к вероятности и последствиям обрушения укрытия, осложнялось многими неопределенностями, связанными с выполнением задач 1.1–2.2. По общему мнению, следовало продолжить выполнение задач 1.1–2.2, сосредоточившись на обеспечении значительного улучшения безопасности и создании лучшей основы для принятия последующих решений, необходимых в рамках задач 2.3–3.3.

В начале 1997 года правительство Украины, страны Группы семи и Европейский союз приняли решение о реализации фазы 1 и задач 2.1 и 2.2 фазы 2 и параллельной подготовке основы для принятия решений, относящихся к последующим этапам (задаче 2.3 и задачам

фазы 3). ПОМ, разработанный международной группой экспертов, представляет собой план реализации, охватывающий фазу 1 и задачи 2.1 и 2.2 фазы 2. Таким образом, ПОМ охватывает первую часть рекомендуемого курса действий, для которого была разработана надежная схема финансирования. Результаты проекта «Кратко- и долгосрочные мероприятия» послужили отправной точкой для принятия решения о подготовке и реализации ПОМ [1].

Реализация ПОМ началась в 1998 году. В 2008 году с завершением стабилизационных мероприятий на объекте «Укрытие» была достигнута первая важная веха на пути к обеспечению безопасности. В 2007 году был заключен контракт на строительство НБК и начались работы. Основное назначение НБК — защитить работников, население и окружающую среду от воздействия ядерной и радиационной опасности, связанной с объектом «Укрытие», и создать условия для проведения дальнейших работ по демонтажу и извлечению ТСМ и радиоактивных отходов.

Перед установкой НБК потребовалось выполнить ряд других работ в целях улучшения общих условий безопасности на объекте «Укрытие». В их число входило создание и эксплуатация Интегрированной автоматизированной системы мониторинга, которая включала в себя несколько подсистем, предназначенных для мониторинга радиационной и ядерной безопасности, а также сейсмической активности на площадке и структурной устойчивости первоначального объекта «Укрытие». Кроме того, был модернизирован ряд существующих систем, включая системы физической защиты, пылеподавления и противопожарной защиты.

Для окончательной установки НБК над объектом «Укрытие» было также необходимо выполнить большое количество подготовительных работ, таких как демонтаж «старых» конструкций и элементов (например, старой вентиляционной трубы ВТ-2), удаление демонтированных материалов из доступных зон объекта «Укрытие» и сооружение самого НБК на безопасном расстоянии от объекта «Укрытие». В 2016 году НБК был установлен на свое место над объектом «Укрытие», а в 2017 году начались пусконаладочные работы. Работы по установке и вводу в эксплуатацию НБК были завершены в 2019 году.

4.2.1.4. Проблемы и перспективы на будущее

Сохраняется ряд проблем и связанных с ними неопределенностей, которые требуют тщательной оценки, изучения, исследования и принятия сложных решений и которые могут оказать существенное влияние на будущее планирование и реализацию фазы 3 «Преобразование в экологически безопасный объект». Они описываются ниже.

- a) Обращение с ТСМ. ТСМ должны быть полностью охарактеризованы с точки зрения ядерного, физического и химического состояния. Необходимо разработать методы и технологии удаления ТСМ с площадки. Большую пользу этой деятельности может принести разработка комплексной программы НИОКР, прежде чем начнется сбор и извлечение материалов на площадке. Местонахождение и расположение ТСМ внутри объекта «Укрытие», высокие экспозиционные дозы и недоступность некоторых частей конструкции создадут технические проблемы при извлечении накопленных и идентифицированных ТСМ.
- b) Обращение с «топливной пылью». Помимо удаления существующей топливной пыли, образовавшейся в результате аварии, для сбора и удаления ТСМ потребуются грубые разрушающие методы; эти методы также приведут к образованию «топливной пыли». Особую озабоченность вызывает очень тонкодисперсная пыль, возможность распространения загрязнения и вдыхания этой пыли человеком. Необходимые исследования и мероприятия по планированию для решения проблем топливной пыли потребуют всестороннего изучения и исследования в рамках программы НИОКР. Ключевое значение в будущих мероприятиях по планированию будет иметь разработка надлежащих методов реализации, а также мер по снижению рисков облучения работников и обеспечению радиационной защиты.
- c) Обращение с загрязненной водой и жидкими радиоактивными отходами с объекта «Укрытие». Установки для выделения трансурановых радионуклидов и органических частиц

из воды, образующейся на объекте «Укрытие», в настоящее время не существует, но это было бы необходимым шагом для того, чтобы сделать возможной обработку этого потока отходов на существующих установках по обработке жидких радиоактивных отходов.

- d) Демонтаж существующего объекта «Укрытие». Неустойчивые конструкции объекта «Укрытие» требуют демонтажа. Однако эта деятельность также несет в себе риски повышения уровня радиоактивного загрязнения воздуха и экспозиционных доз внутри НБК. Более того, при демонтаже радиоактивно загрязненных конструкций и элементов будут образовываться радиоактивные отходы, в том числе обломки ТСМ, которые потребуют извлечения и последующего хранения/захоронения. Для решения соответствующих задач необходимо подготовить дополнительную инфраструктуру по обращению с отходами, прежде чем предпринимать серьезные шаги по демонтажу существующего объекта «Укрытие».
- e) Дополнительные установки по обращению с радиоактивными отходами. Как упоминалось выше, демонтаж объекта «Укрытие» и извлечение ТСМ и других радиоактивных отходов приведут к образованию дополнительных потоков отходов, требующих переработки, хранения и, в конечном итоге, захоронения. Для НАО будут строиться и эксплуатироваться дополнительные объекты вблизи Чернобыльской АЭС, а другие объекты для более высокоактивных отходов, такие как глубинные геологические хранилища для САО и/или ВАО, еще только предстоит спроектировать. Из-за сопутствующих затрат и требований к планированию, связанных с пунктами геологического захоронения, создание специального пункта для захоронения более высокоактивных и долгоживущих аварийных отходов на Чернобыльской АЭС считается нереалистичным. Можно рассматривать только вариант захоронения этих отходов вместе с образующимися в стране САО и ВАО/ОЯТ. Таким образом, планирование мероприятий, связанных с обращением с теми аварийными отходами, которые нуждаются в геологическом захоронении, потребует тесной координации с национальной организацией по обращению с отходами, которая отвечает за создание пунктов геологического захоронения и связана с Национальной стратегией по обращению с радиоактивными отходами Украины.

В отношении планирования дальнейшей реализации мер по обеспечению будущей безопасности объекта «Укрытие» можно сделать следующие общие выводы.

- 1) Объект «Укрытие» под НБК остается поврежденной ядерной установкой. НБК — это не самоцель, а способ обеспечить более безопасные условия для населения, работников и окружающей среды в ходе дальнейших работ по выводу из эксплуатации. Обстановка на энергоблоке № 4 Чернобыльской АЭС, ставшая безопаснее, все еще остается опасной, и для достижения действительно экологически безопасного состояния потребуются значительные усилия, в том числе затраты ресурсов и времени. Хотя НБК оснащен всем необходимым для демонтажа и извлечения ТСМ и других радиоактивных отходов, сохраняется множество проблем, которые необходимо решить. Эти проблемы и связанные с ними риски и неопределенности, характерные для извлечения ТСМ и радиоактивных отходов, требуют тщательной оценки, чтобы обеспечить надлежащее планирование, разработку и, в конечном итоге, реализацию всех необходимых мер.
- 2) Для того чтобы надлежащим образом учесть объем работ, которые предполагается выполнить в течение 100-летнего срока службы НБК, необходимо провести переоценку текущих долгосрочных и краткосрочных стратегий преобразования объекта «Укрытие», включая составление подробной дорожной карты будущих мероприятий. Для этого можно взять на вооружение поэтапный подход, который обеспечит будущую гибкость при выборе вариантов проектирования. Международное сотрудничество и дальнейший обмен экспертами будут по-прежнему иметь важнейшее значение для планирования и последующей реализации стратегии восстановления в рамках фазы 3 «Преобразование в экологически безопасный объект».

4.2.2. Пример 2: дорожная карта АЭС «Фукусима-дайити»

На дорожной карте среднесрочных и долгосрочных мероприятий по выводу из эксплуатации АЭС «Фукусима-дайити» компании ТЕРКО [59] показаны фазы работ на площадке. Дорожная карта часто актуализируется и состоит из трех фаз, кратко описанных ниже.

- a) Фаза 1:
 - период стабилизации и подготовки к извлечению отработавшего топлива из бассейна выдержки отработавшего топлива энергоблока № 4;
 - эта фаза завершилась 18 ноября 2013 года, когда началось извлечение отработавшего топлива из бассейна выдержки отработавшего топлива энергоблока № 4.
- b) Фаза 2:
 - от окончания фазы 1 до начала извлечения обломков ТВЭЛов;
 - расчетный период: ~10 лет;
 - включает НИОКР, инженерно-техническое планирование и изучение внутренних условий;
 - постепенная обработка и очистка застоявшейся воды в зданиях и бассейнах выдержки отработавшего топлива.
- c) Фаза 3:
 - от окончания фазы 2 до завершения вывода из эксплуатации;
 - расчетный период: ~30–40 лет;
 - фаза 3–(1) — это период с момента начала извлечения обломков ТВЭЛов до конца 2031 года;
 - завершение извлечения топлива из бассейнов выдержки отработавшего топлива на энергоблоках №№ 1–6;
 - начало пробного извлечения обломков отработавших ТВЭЛов, которое будет постепенно увеличиваться в масштабе.

В ноябре 2012 года УЯР поручило ТЕРКО представить план реализации мер, которые будут приниматься на АЭС «Фукусима-дайити» [79]. В соответствии с этим указанием УЯР ТЕРКО составила план реализации [80] и представила его УЯР в декабре 2012 года. План реализации был рассмотрен УЯР и утвержден в августе 2013 года. В сентябре 2013 года была подана заявка на внесение изменений в план реализации, которая была одобрена в ноябре 2013 года. В плане реализации описан общий график монтажа указанных установок, их конструкция, защита и оценка рисков. В нем также изложены планы по извлечению обломков ТВЭЛов и рассмотрены вопросы вывода из эксплуатации. В отношении окончательного захоронения за пределами площадки АЭС «Фукусима-дайити» МОС предполагает применить многоступенчатый подход — начиная от создания промежуточного хранилища, выполнения НИОКР и оценки возможных вариантов до выбора площадки и окончательного захоронения; план будет состоять из восьми этапов и будет рассчитан на тридцатилетний период [81].

4.3. ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ ЗАМЕЧАНИЯ ПО ПЛАНУ МЕРОПРИЯТИЙ В ПЕРИОД ПОСЛЕ АВАРИИ

Эффективный план обращения с отходами в период после аварии позволит составлять и актуализировать график жизненного цикла и смету расходов. Это будет необходимо для того, чтобы определить потребности в финансировании и изыскать источники финансовых средств. Определение и анализ возможных вариантов и принятие соответствующих решений — ключевые составляющие плана обращения с отходами. Оценка технологических альтернатив была одним из ключевых элементов восстановительных мероприятий на ТМА-2. Техническая история ликвидации последствий аварии на ТМА-2 дает наглядную картину всего процесса принятия решений, который использовался для определения и выбора технологий [2].

Важно, чтобы планирование стадии обращения с отходами перед захоронением (см. следующий раздел) координировалось с общими планами управления жизненным циклом и восстановительных мероприятий на площадке. С этой целью план обращения с отходами может использоваться для установления приоритетов в области снижения опасностей и рисков. В свою очередь, оценка общего объема отходов, включая прогнозы образования будущих отходов, обеспечит основу для обращения с отходами перед захоронением и позволит установить сроки текущих и будущих действий по обращению с отходами. Как и при учете любых других отходов, при планировании необходимо учитывать отходы, которые будут наработаны в ходе будущей деятельности, и вторичные отходы, являющиеся результатом планируемой деятельности по извлечению и обработке/переработке отходов. На основе этих прогнозов в отношении отходов можно определить необходимость и сроки строительства будущих объектов или модификации инфраструктуры.

Эффективное планирование обращения с отходами также предполагает учет взаимодействия с внешними сторонами, связанного с процессами одобрения и лицензирования со стороны регулирующих органов. Контакты с заинтересованными сторонами, включая общественность, являются ключевыми компонентами плана, которые могут обеспечить площадку для открытого обмена информацией. Регулярная актуализация плана, особенно фиксация реально достигнутого прогресса, позволит укрепить доверие общества.

Кроме того, план может включать в себя положения о проведении НИОКР для устранения уже известных и новых недостатков технологического характера. Для нужд, связанных с проведением НИОКР, может быть задействован потенциал внешних организаций — как национальных, так и международных. Кроме того, эти структуры можно использовать для проведения программных и технологических экспертиз в ходе работы по ликвидации последствий аварии.

К плану обращения с отходами не следует относиться как к застывшему документу и его следует периодически актуализировать с учетом новых и меняющихся потребностей в информации и вводимых данных. Предполагается регулярный анализ и пересмотр плана обращения с отходами в свете меняющихся приоритетов, изменчивых условий и новых потребностей. В отчеты об экспертизе программ рекомендуется включать замечания по поводу как положительных, так и отрицательных результатов, чтобы гарантировать дальнейший прогресс в деятельности по ликвидации последствий аварии.

5. РЕАЛИЗАЦИЯ ПЛАНА ОБРАЩЕНИЯ С ОТХОДАМИ

Основные извлеченные уроки

- Требования к обращению с отходами и выбор технологии будут зависеть от подробностей сценария аварии с точки зрения объемов и типов образующихся отходов и их географического распределения.
- Основные этапы обращения с отходами — те же, что и для всех радиоактивных отходов. Вместе с тем масштаб требуемых работ может быть намного больше, а сроки выполнения короче. Может возникнуть потребность в широком трансграничном сотрудничестве.
- При определении того, какие установки будут использоваться — централизованные, рассредоточенные или мобильные, — необходимо учитывать широту географического рассеивания отходов. Часто может требоваться комбинация разных установок.

- Почти наверняка возникнет необходимость в организации аварийного хранения, прежде чем будет создана инфраструктура для переработки и более долгосрочного хранения или захоронения отходов.
- Повторное использование или перепрофилирование существующих установок может сократить сроки и расширить круг доступных вариантов обращения с отходами.
- Неотложный характер ситуации может обусловить сжатые временные графики проектирования, лицензирования и строительства новых или временных установок.
- Строительство и/или эксплуатация установок на загрязненной площадке повлечет за собой применение дополнительных требований к радиационной защите работников и увеличит количество образующихся вторичных отходов (например, защитной одежды).
- В жизненном цикле проекта должен учитываться вывод из эксплуатации всех новых установок в конце срока их службы (т.е. необходимо принять во внимание количество, размер и сложность требующихся работ по выводу из эксплуатации).
- Внедрение интегрированной системы менеджмента может сыграть значительную роль в обеспечении качества и управлении конфигурацией при проектировании, лицензировании, строительстве и эксплуатации, а также в контроле качества и ведении учетной документации.

План обращения с отходами, разработанный до и непосредственно после аварии, будет включать в себя несколько этапов, как показано на рис. 9. Первым требованием будет оценка местонахождения, количества, радиоактивности и типа отходов, которые будут нарабатываться в процессе ликвидации последствий аварии. Эта оценка должна проводиться в рамках планомерного процесса характеризации, включающего прогнозирование выявленных и предполагаемых отходов с точки зрения ожидаемого типа, объемов и содержания радионуклидов.

Первым шагом в ликвидации последствий аварии может стать «аварийное хранение» определенных отходов на площадке, где произошла авария, или вблизи нее, что даст возможность их первоначальной характеризации, предварительной обработки, сортировки и разделения. В

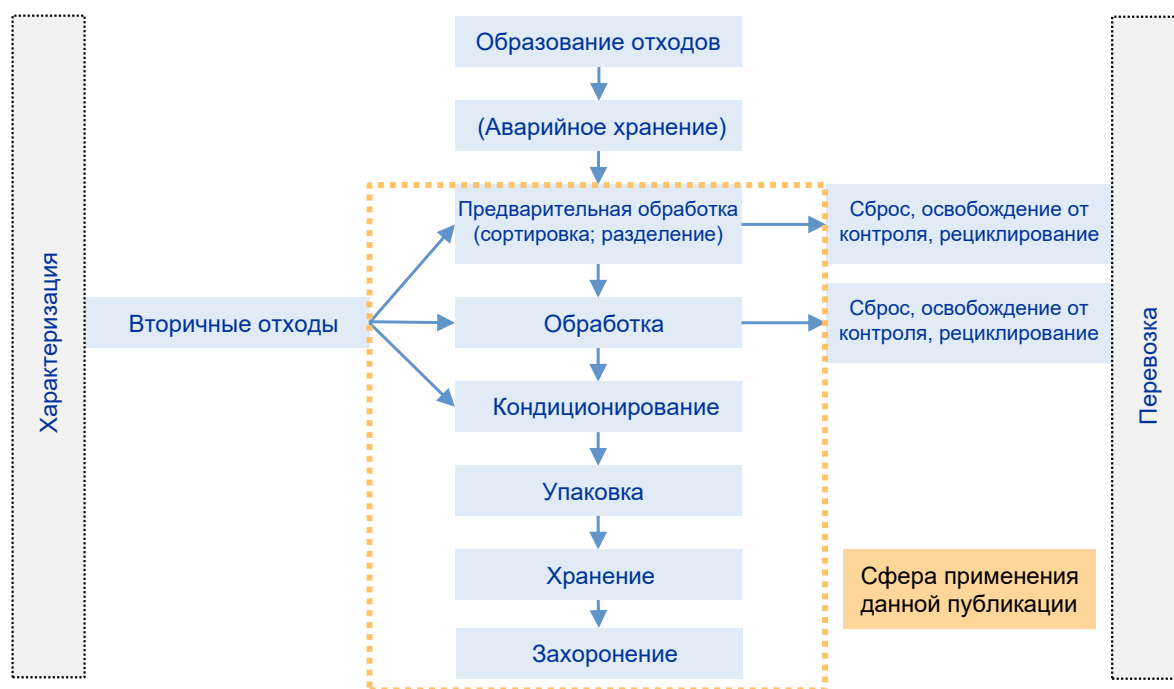


РИС. 9. Общая схема основных этапов плана обращения с аварийными отходами.

контексте данной публикации аварийное хранение — это буферное (временное) хранение в течение некоторого периода, прежде чем можно будет приступить к дальнейшей обработке или кондиционированию отходов. Как правило, период аварийного хранения длится как минимум до окончания первоначальной активной стадии аварии и может продолжаться до тех пор, пока не появится возможность принятия последующих управленческих мер и не будут доступны соответствующие средства. Этот период может длиться от нескольких месяцев до нескольких лет.

Характеризация может происходить на разных стадиях процесса обращения с отходами — от первоначальной грубой сортировки до более детальной характеристики с целью упаковки отходов, подлежащих хранению и захоронению. Для простоты показано, что она охватывает весь жизненный цикл. Аналогичным образом в промежутках между некоторыми этапами, по мере того как становятся доступными различные процессы и объекты, может происходить перевозка необработанных или упакованных отходов. Может возникнуть необходимость транспортировки больших объемов необработанных отходов, что само по себе является серьезной проблемой (см. раздел 10).

В зависимости от уровней активности и содержания радионуклидов могут существовать возможности для отвода или рециклирования некоторых отходов на этапах предварительной обработки или обработки. В зависимости от систем нормативного регулирования в государствах-членах, возможно, будут определены некие большие объемы низкоактивных загрязненных материалов, которые могут быть напрямую переправлены на существующие полигоны или иным образом утилизированы как ОО. Например, КЯР США недавно издала руководство по альтернативному захоронению ОНАО на нетрадиционных объектах [82].

Для различных потоков и типов отходов потребуется выбирать подходящие процессы обработки, типы упаковки и методы и технологии хранения. Выбранные технологии должны не просто соответствовать рассматриваемому потоку отходов; они должны быть универсальными, надежными и, по возможности, экономически эффективными, чтобы с их помощью можно было работать с отходами, имеющими разные характеристики. Выбор и внедрение технологий могут осуществляться постепенно (например, чтобы уменьшить объем отходов, стабилизировать отходы, а затем упаковать их для хранения/захоронения). В некоторых случаях важное значение может также иметь быстрота внедрения технологии. При принятии решений в отношении возможных вариантов важно учесть весь жизненный цикл отходов и убедиться в том, что выбранные варианты не исключают возможности выполнения будущих шагов по обращению с отходами.

На самом этапе обработки могут образоваться вторичные отходы, которые потребуется утилизировать, и при выборе подходящих технологий обработки необходимо найти правильное соотношение между краткосрочной оптимизацией процесса и возможностью захоронения и снижения облучения в более долгосрочной перспективе. В аварийной ситуации предпочтение нередко отдается техническим решениям, которые можно внедрить в кратчайший срок, возможно, используя простые технологии или существующие объекты, которые можно легко приспособить для новой цели. Поскольку на начальных этапах весь спектр отходов и/или их характеристик может быть неизвестен, важное значение имеет также универсальность технологии для обращения с широким спектром отходов. Большие объемы некоторых отходов, связанных с авариями, также могут потребовать размещения установок по переработке вблизи источника отходов, чтобы свести к минимуму необходимость транспортировки.

Хотя способы и методы захоронения могут и не быть точно известны на момент обработки отходов, важно принимать в расчет необходимые и существующие схемы окончательного захоронения во время планирования и осуществления шагов по обращению с отходами перед захоронением (см. раздел 11). При выборе и/или контроле процессов обработки и кондиционирования, когда точные критерии приемлемости отходов для пункта захоронения еще неизвестны, следует проявлять осмотрительность, чтобы не допустить применения излишне консервативного подхода. Тем не менее общие КПО и ограничения для большинства типов хранилищ хорошо понятны и могут быть адаптированы к отходам, связанным с аварией.

Крайне важно понять необходимость заблаговременного установления такой связи между техническими решениями по обращению с отходами перед захоронением и будущими решениями по их захоронению. Это особенно верно в контексте оптимизации методик захоронения, поскольку в зависимости от требований к изоляции и локализации отходов могут быть применены различные варианты для, по существу, одних и тех же потоков отходов (например, глубокое геологическое захоронение для ВАО или САО, захоронение на средней глубине или приповерхностное захоронение для ОНАО или НАО). Таким образом, возможные схемы обращения с отходами перед захоронением должны быть оптимизированы с учетом потенциальных технических решений по их захоронению (см. раздел 11). Кроме того, могут возникнуть проблемы с последующим извлечением хранящихся отходов, особенно если изначально они были помещены на хранение в сыром (необработанном) виде.

Почти все этапы, показанные на рис. 9, связаны с использованием объектов инфраструктуры для обработки, переработки, хранения или захоронения отходов. Одни объекты уже существуют, но могут нуждаться в переоборудовании, другие могут работать на базе перепрофилированной инфраструктуры, но почти неизбежно возникнет необходимость в проектировании, размещении и строительстве неких совершенно новых объектов. При создании всех объектов будет необходимо учитывать такой аспект, как лицензирование.

Исходя из предполагаемого объема и характеристик отходов важно оценить возможность использования или переоборудования существующих объектов. Если существующие установки для обращения с радиоактивными отходами не обладают достаточной мощностью или ресурсом для обращения с отходами и/или были повреждены в результате аварии, потребуются новые или альтернативные объекты на временной или долгосрочной основе.

5.1. ПЕРЕОБОРУДОВАНИЕ СУЩЕСТВУЮЩИХ ОБЪЕКТОВ

Переоборудование существующих ядерных и неядерных объектов с отказом от их первоначального назначения, если оно возможно, может оказаться полезным для решения задач обращения с отходами (раздел 4.1.1). Например, установки для сжигания нерадиоактивных бытовых отходов потенциально могут использоваться для сжигания очень низкоактивного органического мусора (например, древесины, деревьев, листьев и т.д.), образующегося при очистке загрязненных территорий. Это может потребовать определенных модификаций, в частности таких, как добавление систем мониторинга отходящих газов или добавление систем ограждения для локализации радиоактивной золы. Кроме того, полигоны для обычных и опасных отходов могут быть оборудованы системами задержания фильтрата и контроля газообразования для захоронения низкоактивных загрязненных материалов и ОНАО. Другие примеры использования существующих объектов приведены в разных местах данной публикации. Как и в случае с новым объектом, для получения необходимых лицензий на переоборудование существующего объекта и его использование для работы с радиоактивным материалом потребуется выполнить применимые правила и процедуры лицензирования.

Хотя переоборудование существующих зданий в новые установки для обращения с отходами может обеспечить экономию времени и средств, не исключено, что проблемы прошлой эксплуатации этих объектов могут не сразу заявить о себе.

Недостатками старых и выведенных из эксплуатации ядерных установок являются естественный износ конструкций и деградация, вызванная прекращением технического обслуживания или происходящая в процессе вывода из эксплуатации. Старые объекты можно оценить на возможность их ремонта экономически эффективным способом, чтобы они стали отвечать современным нормам, правилам и эксплуатационным стандартам. Ремонтно-эксплуатационные расходы также могут быть выше, чем для аналогичных современных зданий. Это факторы, которые могут вынудить отказаться от переоборудования и повторного использования [83].

5.2. РАЗМЕЩЕНИЕ НОВЫХ ОБЪЕКТОВ

Если было проведено предварительное планирование конкретной ядерной установки (раздел 4.1.2), то одним из результатов будет составление списка вариантов размещения различных типов инфраструктурных объектов по обращению с отходами на ядерной площадке или вблизи нее. Важно иметь в запасе несколько вариантов, поскольку с учетом характера аварии некоторые из этих мест могут стать непригодными для использования в случае повреждения или сильного загрязнения объектов инфраструктуры.

В дополнение к обычным техническим и нетехническим факторам размещения ядерных установок, есть некоторые особые соображения в отношении размещения новых установок для обращения с аварийными отходами, которые включают в себя следующее:

- являются ли данные объекты временными (например, хранилища) или постоянными (пункты захоронения) и о каких сроках идет речь;
- доступность и простота перемещения материалов от одной установки для обращения с отходами к другой;
- влияние на будущие варианты планирования управления ядерной площадкой;
- приемлемость создания новых объектов вне площадки в сравнении с сохранением всей инфраструктуры по обращению с отходами на площадке.

Особые соображения, связанные с размещением новых постоянных пунктов захоронения, рассматриваются в разделе 12.

5.3. ПРОЕКТИРОВАНИЕ

После выбора места размещения и базовой технологии установки для обращения с отходами можно ускорить техническое проектирование для нужд строительства. По сравнению с проектом, не требующим срочного исполнения по причине аварии, график строительства объекта, который будет эксплуатироваться на ранних стадиях аварии, может быть значительно сокращен. Это может означать, к примеру, сокращение количества циклов утверждения проекта. Можно рассмотреть вопрос о дифференцированном подходе к реализации качественных характеристик программы, но здесь следует проявлять осторожность, чтобы не допустить снижения технологических барьеров, препятствующих низкому качеству, и чтобы качество проектирования, закупок или строительных и пусконаладочных работ на месте, особенно для систем, связанных с безопасностью, не было принесено в жертву ради соблюдения ускоренного графика. Полагаясь на использование коммерческих товаров с разумным уровнем обоснования качества, таких как противопожарное оборудование и электрооборудование, отвечающее национальным стандартам, можно минимизировать затраты и время приобретения, обеспечив при этом адекватный уровень производительности.

Помимо сжатого графика, существуют также некоторые специфические проектные требования и особенности, которые необходимо учитывать, когда речь заходит об обращении с аварийными отходами. Например, в оцениваемых проектах:

- a) должен быть учтен широкий спектр отходов, часто с недостаточно ясно определенными характеристиками. Это означает, что предпочтение следует отдавать простым, надежным и отработанным технологиям. Использовать технологии, которые весьма чувствительны к свойствам или составу отходов, не рекомендуется;
- b) должны быть приняты во внимание неопределенные конечные точки для отходов, в том числе вторичных отходов (например, неизвестные способы захоронения). Поэтому проект должен

быть гибким и на протяжении всего процесса предусматривать действия по отбору проб для определения характеристик продукта;

- с) должно быть предусмотрено достаточное экранирование оборудования и помещения (в том числе от возможного воздействия очень высокого внешнего облучения), а также учтена возможность использования дистанционных технологий и/или автоматики, чтобы уменьшить дозу облучения работников и увеличить производительность;
- d) должна быть учтена взаимозависимость и последующие шаги (даже если они не полностью известны или недостаточно хорошо определены), такие как меры по отбору проб, опорожнению резервуаров и емкостей, дезактивации и выводу из эксплуатации самого перерабатывающего объекта и т.д.;
- e) должна быть учтена необходимость окончательного вывода объекта из эксплуатации, например за счет обеспечения доступа для дезактивации, использования легко дезактивируемых материалов и т.д.

Кроме того, процесс проектирования должен базироваться на ясном понимании применимых норм, правил и стандартов, особенно при наличии нескольких подрядчиков и многонациональных коллективов.

5.4. ЛИЦЕНЗИРОВАНИЕ

Процесс лицензирования переоборудованного или нового объекта будет зависеть от режима регулирования, действующего в затронутом аварийей государстве-члене. Здесь существует ряд возможностей для маневра, которые могут повлиять на принятие решений как на этапе предварительного планирования противоаварийных мероприятий, так и на этапе ликвидации последствий. К ним относятся:

- предварительное лицензирование (или использование ранее лицензированных) типовых проектов (например, процессов, контейнеров, концепций хранения и т.д.);
- заблаговременное определение основ безопасности, а также потребностей в принятии природоохранных мер в аварийных ситуациях и сроков их принятия;
- потенциал для изменения нормативных требований с учетом аварийной ситуации, например упрощенный процесс для различных фаз аварии; учет краткосрочных потребностей и сроков службы установок, где это необходимо; эффективная интеграция процесса принятия нормативных решений со сложным графиком ликвидации последствий аварии, чтобы вопросы радиологической и ядерной безопасности, требующие безотлагательного внимания, решались своевременно;
- возможность применения международных руководств, таких как руководства по обращению с чрезвычайно большими объемами радиоактивных отходов после аварии, о которых говорится в [21].

Во многих государствах-членах для строительства и эксплуатации ядерной установки может потребоваться ряд лицензий или разрешений от ядерных, природоохранных и других регулирующих органов, в чью компетенцию входит проектирование и строительство. С точки зрения ядерного регулирования они могут включать в себя лицензию или разрешение на строительство (после одобрения технического проекта), лицензию на ввод в эксплуатацию (после начального этапа пусконаладочных работ и холодных испытаний), лицензию на эксплуатацию (после завершения горячих испытаний и обеспечения управления конфигурацией) и, наконец, лицензию на вывод из эксплуатации (когда установка больше не нужна). Эти разрешения могут включать официальные лицензии, выданные регулирующим органом, а также разрешения, выданные другими корпоративными или государственными органами и/или учреждениями.

Во многих случаях требуется также оценка воздействия на окружающую среду. Однако в послеаварийных ситуациях, особенно на начальном этапе деятельности по обращению с отходами перед захоронением и создания соответствующих объектов, когда работа должна быть выполнена в сжатые сроки, регулирующим органам и лицензиату имеет смысл тесно координировать свои действия для максимального упрощения процесса, включая, где это уместно и необходимо, освобождение от выполнения требований на краткосрочной или долгосрочной основе.

Например, на АЭС «Фукусима-дайити» соответствующие законы и правила основываются на нормальных условиях эксплуатации станции, которые было трудно или невозможно применить к послеаварийной ситуации. Японское УЯР присвоило реакторам на АЭС «Фукусима-дайити» статус «особой реакторной установки», то есть установки, на которой произошла ядерная авария, и ввело в действие специальные правила. После определения потребностей в обеспечении безопасности в послеаварийных условиях УЯР ввело серию особых положений и потребовало от оператора (ТЕПКО) применить планы по их выполнению, связанные с эксплуатацией установки. За пределами площадки АЭС «Фукусима-дайити» дезактивационные работы проводятся под контролем местных органов власти и на основании распоряжений в отношении региональных зон загрязнения, подконтрольных МОС [84], которое отвечает за особую зону дезактивации.

Когда речь заходит об отходах, связанных с аварией, следует особо учесть то обстоятельство, что авария может затронуть несколько государств-членов. Например, от аварии на Чернобыльской АЭС и ликвидации ее последствий серьезно пострадал ряд соседних государств. Неизбежным результатом этого станет подключение к работе ряда национальных регулирующих и исполнительных организаций, каждая из которых может иметь в корне отличные от других стандарты и лицензионные требования. Даже в пределах одного государства-члена могут вводиться разные требования на национальном, провинциальном/штатном и/или местном уровнях.

5.5. СТРОИТЕЛЬСТВО ОБЪЕКТОВ И ИСПОЛНЕНИЕ ПРОЕКТОВ

После выбора проекта можно приступить к строительству и подготовке к эксплуатации, получив лицензию заблаговременно или получая соответствующие лицензии в процессе работ. У большинства государств-членов есть необходимая инфраструктура, экспертные ресурсы и персонал, которые могут потребоваться для реализации проектов строительства ядерных объектов. Такие экспертные ресурсы также имеются в свободном доступе на международном рынке, если государство-член нуждается в дополнительной помощи.

В послеаварийных условиях при выполнении и организации строительных работ потребуются учесть следующие моменты:

- a) создание группы руководства строительством с ясными функциями и обязанностями, которая будет тесно связана с существующей группой реагирования, включая существующий эксплуатационный персонал на ядерной площадке, с целью обеспечить достаточную координацию строительства в послеаварийных условиях;
- b) доступ к персоналу, сведущему в разных технических дисциплинах и обладающему достаточной квалификацией для того, чтобы обеспечить квалифицированное сопровождение процесса проектирования/закупок/строительства/пусконаладки в областях, требующих специальных технических знаний, таких как обработка отходов. Важное значение будут иметь навыки и умения, выходящие за рамки обычных знаний о ядерных установках;
- c) надлежащий и достаточный инструктаж по вопросам проведения работ в условиях радиационного облучения, включая полное понимание всех соответствующих потребностей в логистической поддержке;
- d) меры по обеспечению безопасной и эффективной интеграции большого количества краткосрочных проектов и подрядчиков, а также взаимодействия с множеством других смежных проектов реагирования и ответственных учреждений;

- e) прием и размещение международных консультантов, подрядчиков и персонала с целью их интеграции (например, для решения языковых/культурных вопросов, включая необходимость привлечения устных переводчиков и перевода рабочих инструкций и чертежей);
- f) планомерное внедрение культуры ядерной безопасности и соблюдение послеаварийных эксплуатационных процедур;
- g) может потребоваться должная осмотрительность при применении существующих эксплуатационных и инженерных регламентов, которые действовали при нормальной эксплуатации, но могут оказаться не вполне подходящими для послеаварийной ситуации.

К другим факторам, которые могут иметь важное значение для строительства необходимых объектов в послеаварийной ситуации, относятся:

- наличие финансовых средств, строительных материалов, оборудования, инфраструктуры и опытного персонала;
- возможная сборка основных узлов или компонентов проекта вне площадки с целью минимизировать время строительства на площадке и/или радиационное облучение.

Важным компонентом, о котором не следует забывать во время проектирования, строительства, пуска в строй и эксплуатации объекта, является управление конфигурацией. Управление конфигурацией гарантирует, что фактически сооруженный объект соответствует проектной документации и основе для лицензирования [85]. Судя по прошлому опыту ликвидации последствий аварий, этот аспект зачастую не учитывался должным образом или полностью игнорировался при проектировании и строительстве объектов при сжатых сроках реагирования или нехватке ресурсов или финансирования. Обеспечение того, чтобы конфигурация фактически реализованного проекта и эксплуатационная конфигурация соответствовали анализу безопасности, важно для сохранения целостности функций, связанных с радиологической безопасностью, ядерной безопасностью, локализацией и изоляцией отходов. Например, любые физические модификации объекта перед внедрением должны проходить экспертизу безопасности и объект должен эксплуатироваться в пределах, определенных регламентами эксплуатации, технического обслуживания и испытаний, которые были разработаны в соответствии с анализом безопасности.

В сжатые сроки, которые могут быть установлены для объектов, связанных с авариями, строительство, возможно, иногда потребуется начинать до того, как все аспекты проекта будут полностью проработаны. В этом случае крайне важно, чтобы существовала строгая и эффективная система управления конфигурацией, гарантирующая, что объект будет построен в полном соответствии с проектом и что все изменения будут должным образом задокументированы. В идеале оператору объекта должна быть предоставлена полная и точная документация (чертежи, руководства и т.д.) по проектированию и строительству объекта до начала эксплуатации. Кроме того, важное значение для обеспечения безопасной текущей эксплуатации имеют строгие процедуры актуализации чертежей и анализов фактически сооруженных объектов, особенно если они предполагают внесение изменений в регламенты эксплуатации, технического обслуживания и испытаний.

5.6. ВВОД В ЭКСПЛУАТАЦИЮ И ИСПЫТАНИЯ

Вновь построенный или переоборудованный объект почти всегда должен пройти программу пусконаладочных работ и испытаний, подтверждающую, что все оборудование работает исправно, а все основные регламенты эксплуатации и технического обслуживания соответствуют проекту и анализу безопасности. В плане пусконаладочных работ определяются критерии испытаний и эффективности, которые должны быть выполнены, чтобы продемонстрировать, что объект сооружен и может эксплуатироваться в соответствии с проектными основами. Ввод в эксплуатацию

обычно включает в себя этап холодных испытаний (нерадиоактивных, с использованием имитаторов) и этап горячих (радиоактивных) испытаний, после чего объект переходит в фазу полномасштабной эксплуатации. Этот переходный процесс важен для проверки эффективности регламентов эксплуатации, технического обслуживания и испытаний, а также как средство обучения персонала, которому предстоит работать с новым оборудованием на этапе эксплуатации. В послеаварийном сценарии можно ожидать, что горячая стадия будет использоваться для передачи нового или реконструированного объекта работникам, которые будут его эксплуатировать.

В послеаварийной ситуации время на проведение пусконаладочных испытаний может быть ограничено, а критерии эффективности могут быть определены не полностью (например, вследствие обобщенных характеристик отходов). Кроме того, могут возникнуть проблемы, связанные с переходом от стендовых к более масштабным испытаниям, или недочеты, которые могут объясняться сжатым графиком первоначального проектирования. Их необходимо устранить до начала работы с радиоактивным материалом. Таким образом, в той мере, в какой это практически возможно, эти испытания необходимо провести в соответствии с требованиями регулирующего органа, чтобы убедиться, что объект функционирует в строгом соответствии с проектом, до начала крупномасштабной работы с радиоактивным материалом.

5.7. ОБУЧЕНИЕ

Новые или переоборудованные установки для обращения с отходами и связанные с ними технологии, скорее всего, потребуют организации специальных программ обучения как для существующего персонала ядерной площадки, так и для новых сотрудников, занятых в программе ликвидации последствий аварии. Как правило, обучение персонала начинается не позднее, чем на этапе ввода объекта в эксплуатацию, — задолго до того, как он будет готов к работе. Важно, чтобы обучение способствовало внедрению высокой культуры ядерной безопасности, которая предусматривает строгое соблюдение регламентов объекта и готовность поставить интересы безопасности выше интересов производства.

В качестве дополнения к занятиям в аудитории может практиковаться привлечение сотрудников к программе пусконаладочных работ или их направление на аналогичные объекты. Этап пусконаладочных работ дает хорошую возможность для ознакомления с объектом и его регламентами. При планировании необходимо учитывать наличие подходящих учебных помещений. Если таковых не имеется, их потребуется оборудовать в рамках проекта сооружения объекта и подготовить к использованию до завершения строительства основного объекта.

5.8. ЭКСПЛУАТАЦИЯ И ТЕХНИЧЕСКОЕ ОБСЛУЖИВАНИЕ

Многие технологии и типы объектов, которые будут использоваться для обращения с отходами после аварии, хорошо изучены и широко применяются в других областях, не связанных с авариями. Вместе с тем эксплуатация и техническое обслуживание установки для обращения с отходами в послеаварийной ситуации могут представлять определенные трудности. Привычные регламенты эксплуатации, технического обслуживания и испытаний, а также методы управления могут потребовать адаптации — посредством модификации регламентов, действующих на объекте, либо разработки новых регламентов с учетом послеаварийных условий. Это потребует учета различных факторов, включая следующее:

- некоторые послеаварийные ситуации требуют переработки отходов в гораздо большем объеме, чем это практиковалось в прошлом, что подразумевает использование гораздо более крупного оборудования или большего количества модульных установок;

- необходимость обеспечения эксплуатационной гибкости с учетом меняющихся объемов отходов, поступающих в технологический процесс (например, может потребоваться больше, чем обычно, ручных операций для управления параметрами процесса);
- организацию рабочего времени (например, в связи с условиями окружающей среды и/или повышенной мощностью дозы радиации) и связанную с этим расстановку приоритетов и последовательность действий;
- адаптацию штатного расписания и сменного графика работы с учетом рабочего времени и требований производительности;
- адаптацию методов технического обслуживания к сложным условиям (например, таким как поля ионизирующего излучения, загрязнение воздуха, отсутствие полной документации на систему или компоненты, срочность возвращения установки в эксплуатацию, выбор между заменой или ремонтом на месте и т.д.);
- сложившиеся условия могут потребовать использования дистанционного управления и специализированных технологий для регулирования уровня облучения работников, что также потребует специальных регламентов, обучения и управленческих процессов перед внедрением;
- в связи с регламентами эксплуатации нового или переоборудованного объекта могут возникнуть потребности в логистической поддержке, включая поддержку цепочки поставок для удовлетворения потребностей в материалах, логистику на площадке и поддержку персонала, включая улучшение бытовых условий (например, раздевалки, пункты дезактивации, жилые помещения, транспорт, вспомогательные помещения и т.д.).

5.9. ВЫВОД ИЗ ЭКСПЛУАТАЦИИ УСТАНОВОК ДЛЯ ОБРАЩЕНИЯ С ОТХОДАМИ И ИХ ХРАНЕНИЯ

Все установки, используемые для обращения с радиоактивными отходами перед захоронением, рано или поздно перестанут использоваться: они либо выполнят свое предназначение, либо будут выведены из эксплуатации в силу возраста или устаревания. При выводе из эксплуатации будут образовываться дополнительные отходы, а работники получают новые дозы облучения. Поэтому необходимо тщательно продумать количество используемых установок. Кроме того, минимизация вторичных отходов и простота дезактивации — это важные факторы, которые должны учитываться в проектах любых новых установок.

Следует отметить, что послеаварийная ситуация может длиться значительно дольше, чем типичный расчетный срок службы установок для обращения с отходами. Этот момент важно учесть на ранних стадиях планирования вывода из эксплуатации, чтобы вовремя предусмотреть либо капитальную реконструкцию, либо замену оборудования, либо даже строительство совершенно новых установок. К досрочному выводу из эксплуатации установок для обращения с отходами может также подтолкнуть внедрение более современных и эффективных технологических решений или лучшее понимание характеристик потоков отходов, с которыми придется иметь дело с течением времени. Например, извлечение и утилизация обломков твэлов из черновыбского объекта «Укрытие» может происходить в течение 50–100 лет и потребует проектирования и строительства специализированных установок для обращения с отходами, в то время как все существующие перерабатывающие установки на Чернобыльской АЭС уже давно вырабатывают свой ресурс.

Вывод ядерных установок из эксплуатации — это хорошо освоенная практика в большинстве государств-членов, где эксплуатируются объекты ядерной энергетики или имеется современный потенциал в области ядерных исследований. Что касается установок, используемых для обращения с аварийными отходами перед захоронением, особенно тех, которые изначально не проектировались как ядерные установки, то потребуются проявить особую осторожность, чтобы не допустить распространения загрязнения во время демонтажа оборудования и зданий.

Как и в любом проекте вывода ядерного объекта из эксплуатации, потребуется принять решение о конечном состоянии установки (т.е. определить условия ее использования в будущем). В случае послеаварийной ситуации критерии конечного состояния должны быть увязаны с конечным состоянием других объектов и зон, затронутых аварией, и должен быть применен последовательный подход. Например, выделять ресурсы на достижение значительно более высокого уровня дезактивации выведенной из эксплуатации установки для обращения с отходами по сравнению с окружающей территорией неразумно и непрактично, если эта территория будет оставаться загрязненной в результате самой аварии.

5.10. ОБЕСПЕЧЕНИЕ КАЧЕСТВА И КОНТРОЛЬ КАЧЕСТВА

Обеспечение качества (ОК) — это часть интегрированной системы менеджмента, которая включает в себя все запланированные или систематические действия, необходимые для обеспечения достаточной уверенности в том, что продукт или услуга будут именно того типа и качества, которые необходимы клиенту и другим заинтересованным сторонам и которые те рассчитывают получить. В сочетании с ОК применяется контроль качества (КК) — функция подтверждения качества или создания уверенности, которая включает в себя все запланированные или систематические действия (например, научные меры предосторожности, такие как калибровка, использование дубликатов проб, методология пробоотбора, цепь обеспечения сохранности, физический осмотр, неразрушающие исследования и т.д.), необходимые для обеспечения уверенности в том, что продукт или результат действительно соответствует спецификациям. ОК, дополненное КК, — это важный элемент системы обращения с отходами. Базовые требования к качеству указаны в других публикациях, например в [46].

Заинтересованные стороны, регулирующие органы и другие государственные учреждения пользуются документацией программы обеспечения качества, чтобы удостовериться в высоком качестве любого ядерного проекта; в самой программе обеспечения качества установлены строгие требования к документации, чтобы она служила доказательством удовлетворительного качества продуктов и деятельности. Следовательно, важно создавать и сохранять документацию об успехах, достигнутых с точки зрения качества.

В послеаварийной ситуации ожидается, что определенная документация, необходимая для проектирования или эксплуатации установки для обращения с отходами и относящаяся к самым ранним фазам аварии, особенно документы об активной стадии аварии и первых мероприятиях, связанных с отходами, может отсутствовать или быть неполной. Важными считаются документы о типах и объемах отходов, их характеристиках, способах обработки и/или упаковки, а также о том, где они хранятся или где они были утилизированы. В таких обстоятельствах руководству установки может потребоваться реконструировать или заменить недостающую информацию, чтобы обеспечить восстановление надлежащих уровней качества и безопасности. Это может предполагать восстановление документации, если это возможно, либо повторное выполнение действий по созданию учетных документов, как только это станет реальным.

6. СТРАТЕГИИ, МЕТОДОЛОГИИ И МЕТОДЫ ХАРАКТЕРИЗАЦИИ ОТХОДОВ

Основные извлеченные уроки

- Для обращения с отходами (в том числе для их освобождения от контроля), восстановления, ликвидации последствий аварии и защиты персонала, а также для принятия решений необходима характеристика отходов, присутствующих на установках и в местах за пределами площадки.
- Оперативное получение данных о характеристиках лежит в основе принятия технических решений, планирования и инженерного проектирования. Это итеративный, непрерывный процесс.
- Чтобы оптимизировать отбор проб, перед началом программы характеристики должны быть четко уяснены и задокументированы стратегия, цели и задачи характеристики.
- В результате аварии могут потребоваться дополнительные лабораторные помещения и/или аналитические методы (например, в зоне с низкой мощностью фонового излучения).
- Для ряда нестандартных типов отходов может потребоваться определение форм переноса радионуклидов или коэффициентов масштабирования с учетом конкретной ситуации.
- Необходимо уделить внимание управлению данными в плане сбора, систематизации и распространения технических данных.

6.1. СТРАТЕГИЯ И МЕТОДОЛОГИЯ ХАРАКТЕРИЗАЦИИ

В требованиях безопасности МАГАТЭ указывается, что характеристика должна проводиться на каждом этапе обращения с радиоактивными отходами. Характеристика также проводится в отношении отходов, образовавшихся в результате ядерной аварии [17–19]. Можно взять на вооружение дифференцированный подход, то есть учитывать степень характеристики и затраты труда на характеристику для данной конкретной цели. Когда происходит ядерная авария, задача состоит в том, чтобы в короткие сроки задействовать соответствующих специалистов и оборудование для оценки распространения радиоактивности по различным путям и в различных средах, исходя из того, что главной целью является защита населения. Поэтому на начальной стадии ядерной аварии характеристика отходов будет сосредоточена на оценке уровней дозы, чтобы определить масштабы аварии. Эти данные облегчат технологическую подготовку и сортировку отходов, а также дадут тем, кто занимается ликвидацией последствий аварии, представление о необходимых защитных мерах. При разработке планов последующей обработки отходов будет необходимо получить более подробные данные характеристики, касающиеся типов и концентрации радионуклидов, химического состава и физических свойств, чтобы обосновать решения по переработке, хранению, кондиционированию/упаковке и окончательному захоронению.

6.1.1. Знание процессов

В случае ядерной аварии знание сценария аварии, конструкции установок, затронутых аварией, имеющихся мощностей для обращения с отходами, преобладающих условий окружающей среды, материалов и концентрации радионуклидов в выбросах — все это способствует определению необходимых методологий отбора и измерения проб. Это особенно важно для радионуклидов, которые с трудом поддаются отбору или измерению. Потребности в характеристике после ядерной аварии весьма разнообразны: от необходимости оценить радиологическое воздействие на большой

географической территории до потребности в количественных данных о радионуклидах для расчетов эффективности деятельности с целью облегчить захоронение отходов.

6.1.2. Разработка программы характеристики

Стадия ликвидации последствий аварии начинается сразу после (или даже до) стабилизации аварии. Программа характеристики необходима для классификации отходов и обеспечения их соответствия как требованиям безопасности, так и критериям приемлемости отходов. В программе характеристики должны учитываться следующие важные факторы:

- a) перед началом программы характеристики должны быть четко уяснены и задокументированы цели, задачи и стратегия характеристики, чтобы избежать отбора ненужных проб и связанной с этим дозы облучения работников;
- b) в процессе характеристики для некоторых особенно проблемных участков места аварии, возможно, потребуется установить приоритеты на ранней стадии — до того как будут предприняты шаги по снижению дозы или смягчению последствий выброса; речь идет, например, о ликвидации горячих зон или учете времени пребывания в зоне радиации или других рабочих ограничений, вызванных условиями окружающей среды;
- c) требования к логистической поддержке, включая поиск квалифицированного и обученного персонала, приборное и (мобильное) лабораторное обеспечение, материалы (расходные материалы для отбора проб, средства индивидуальной защиты и т.д.) и бытовые удобства для персонала (например, раздевалки, пункты дезактивации, жилые помещения, транспорт, вспомогательные помещения и т.д.);
- d) потенциал использования технологии дистанционно управляемых беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) для снижения уровня облучения работников с целью получения доступа в зоны с тяжелыми радиологическими или другими опасными условиями; например, аэрофотосъемка с помощью дронов, малые и большие дистанционно управляемые транспортные средства и роботы;
- e) требования к экранированию приборов, оборудования и помещений для характеристики с целью снижения фоновых радиационных помех и защиты работников;
- f) возможности технического обслуживания оборудования и помещений для характеристики в сложных условиях (например, принятие решений о замене либо ремонте на месте).

При выборе подходящих методов и технологий пробоотбора и характеристики важно учитывать моменты, перечисленные ниже.

- 1) Стратегия отбора проб отходов:
 - спектр материалов, которые необходимо охарактеризовать по физическим, радиологическим и ядерным свойствам (необработанные отходы, крупные объекты, сыпучие материалы, обломки, растительность, грунты, специальные ядерные материалы и т.д.);
 - затраты труда, частота, точность и аккуратность, необходимые для отбора проб, включая выбор точек пробоотбора и любые ограничения на доступ к материалам, требующим характеристики;
 - ограничения на отбор проб, связанные с условиями пробоотбора (доза облучения работников, условия окружающей среды, физическое местоположение).
- 2) Ограничения на выполнение измерений, связанные с условиями пробоотбора (уровни радиации, влияющие на минимальную обнаруживаемую активность, и т.д.).
- 3) Использование специальных и дифференцированных подходов для решения проблемы неопределенности и влияния на репрезентативность выборки; например, подходы,

используемые в режимах нормальной эксплуатации или при выводе из эксплуатации, могут быть неприменимы из-за особых потребностей в характеристизации при хранении, обработке и захоронении аварийных отходов.

- 4) Необходимость использования специальных методов измерения, например для определения характеристик альфа- и чистого бета-излучения в аварийных ситуациях (например, требуемый размер пробы, фоновые уровни гамма-излучения, пределы обнаружения, мокрые химические методы анализа, потребности в специальных средствах, например транспортировке проб за пределы площадки и т.д.), а также все специальные требования к калибровке приборов.
- 5) Использование косвенных методов характеристизации, таких как неразрушающий анализ (НРА) вместо разрушающего анализа (РА), и разница в требованиях к отбору проб на площадке и за ее пределами, поскольку планы пробоотбора для НРА не будут строиться на тех же принципах (например, гамма-спектрометрия *in situ* и РА).
- 6) Использование коэффициентов масштабирования; при необходимости, учитывая потенциальный объем и разнородность потоков отходов, может потребоваться экстраполирование ограниченных данных отбора проб и характеристизации, основанное на знании технологических процессов на аварийной установке.
- 7) Использование целей в области качества данных (ЦКД; см. ниже) и применение процедур ОК и КК к отбору проб и анализу, в том числе к менее прямым технологиям измерения, таким как НРА и РА, включая применение эффективных процедур с целью гарантировать целостность данных и учетной документации и для обеспечения:
 - прослеживаемости учетных документов и точности сбора данных;
 - физической (и электронной) защиты и соответствующей каталогизации хранящихся записей и данных, включая принятие мер, обеспечивающих доступность самой свежей информации и ее предоставление пользователям;
 - контроля за распространением записей и данных с целью обеспечить их доставку пользователям и подотчетность за их использование.

Ниже описано использование ЦКД и применение знаний о стационарных технологических процессах.

6.1.3. Цели в области качества данных

ЦКД — это качественные и количественные утверждения, определяющие тип, качество и количество данных, необходимых для принятия обоснованных решений по менеджменту рисков. Концепция ЦКД была разработана Агентством по охране окружающей среды США и предназначена для использования при разработке эффективного плана отбора проб или испытаний, позволяющего оптимизировать собираемые данные [86]. Вместе с тем принципы ЦКД можно применить и к другим аспектам, требующим принятия решений. Например, «Селлафилд, лтд.» (Соединенное Королевство) применяет ЦКД для определения потребностей в НИОКР.

ЦКД определяются перед сбором данных, в рамках программы отбора проб/характеристизации, чтобы установить логическую структуру, которая ориентирует сбор данных на удовлетворение информационных потребностей. В частности, в ЦКД должны:

- a) уточняться цели сбора данных;
- b) содержаться указания на то, как будут использоваться данные и как они будут способствовать принятию решений по менеджменту рисков;
- c) определяться типы данных, подлежащих сбору;
- d) указываться количество и качество данных, подлежащих сбору.

Понимание того, какая информация уже имеется и может быть использована, может сократить затраты труда на отбор проб/характеристизацию. Использование процесса ЦКД ведет к

эффективному и рациональному расходованию ресурсов, согласованию типа, качества и количества данных, необходимых для достижения цели, и полному документированию предпринимаемых действий. Процесс ЦКД носит итеративный характер. По мере изменения допущений или потребностей в данных либо в тех случаях, когда полученные результаты обусловят новые потребности в данных, ЦКД будут требовать подтверждения, а при необходимости и пересмотра, как показано на рис. 10.

Процесс ЦКД состоит из семи шагов, перечисленных ниже.

- 1) Шаг 1. Изложение проблемы. Четкое определение проблемы, для решения которой требуются новые данные, чтобы направленность исследования была ясной и однозначной.
- 2) Шаг 2. Определение путей решения/целей исследования. Определение решения указанной проблемы с помощью данных.
- 3) Шаг 3. Определение исходной информации. Необходимо для решения проблемы и определения того, какие исходные данные требуют измерения.
- 4) Шаг 4. Определение границ исследования. Уточнение пространственных и временных условий, в которых существует указанная проблема.
- 5) Шаг 5. Разработка аналитического подхода. Сведение результатов предыдущих шагов в единое заключение, излагающее логическую основу для выбора одного из альтернативных действий.
- 6) Шаг 6. Определение требуемых уровней точности и аккуратности и отражение их в критериях эффективности или приемлемости, чтобы помочь лицам, принимающим решения, понять и учесть неопределенности в данных.
- 7) Шаг 7. Разработка плана получения данных. Определение наиболее эффективной с точки зрения ресурсов схемы отбора и анализа проб для получения данных, которые, как ожидается, будут отвечать ЦКД.

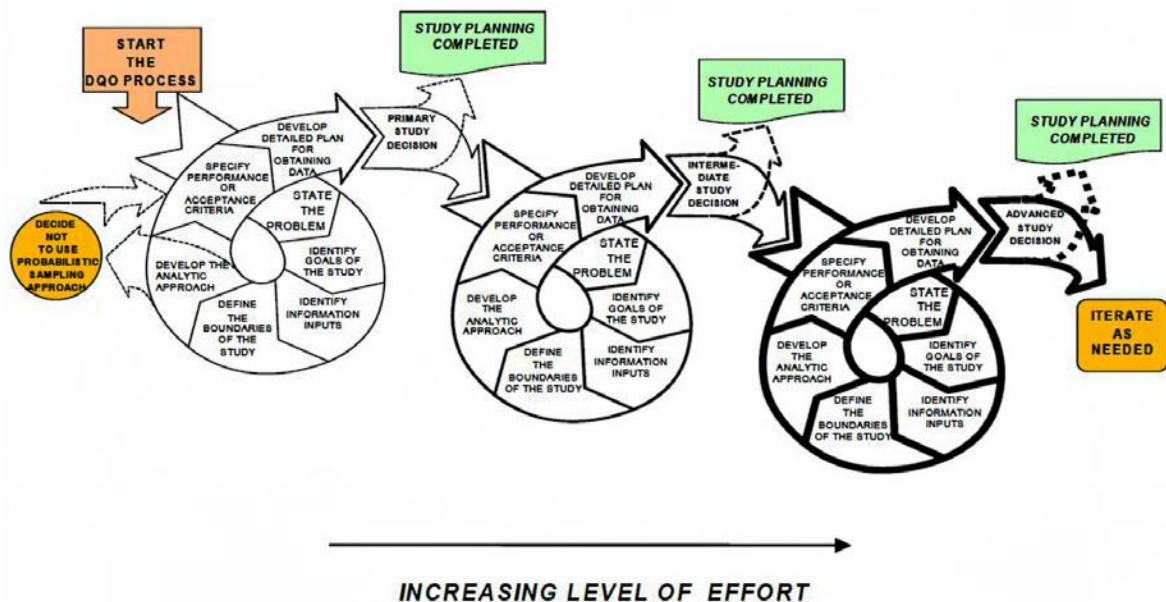


РИС. 10. Итерации процесса достижения целей в области качества документов на протяжении жизненного цикла проекта. Публикуется с разрешения Агентства по охране окружающей среды США [86].

6.2. РАЗНОПЛАНОВЫЕ ТРЕБОВАНИЯ К ДАННЫМ О ХАРАКТЕРИСТИКАХ

Характеризацию потребуется провести для многих типов материалов, в широком диапазоне пространственных и объемных величин, для большого круга конечных пользователей и целей. В данном разделе рассматриваются некоторые из разноплановых требований к информации, собираемой при характеристике, которые могут возникнуть после аварии.

6.2.1. Характеризация сыпучих отходов

Тяжелая ядерная авария может привести к загрязнению огромной территории. Уровни загрязнения должны быть оценены по соответствующей шкале, чтобы обеспечить безопасность населения и окружающей среды и поддержать разработку стратегий ликвидации последствий. Кроме того, могут потребоваться усилия по налаживанию координации с соседними странами.

Сочетание технологии детектирования излучений с использованием спутников глобальной системы определения местоположения (GPS) значительно расширило наши возможности для характеристики радиологических условий на обширных географических территориях. После аварий на АЭС были задействованы пилотируемые летательные аппараты, наземные транспортные средства, а также переносные средства для измерения мощности излучений. К числу новшеств относятся также беспилотные летательные аппараты (БПЛА, дроны) и дистанционно управляемые наземные автотранспортные системы.

Например, для АЭС «Фукусима-дайти» была сконструирована машина полевого мониторинга, предназначенная для регистрации мощности дозы и уровней загрязнения местности, включая дороги, детские площадки, школьные дворы, спортивные площадки, парки и т.д. [87]. Эта система смонтирована на базе японского сельскохозяйственного трактора с прицепом. Она включает в себя гидравлические демпферы, позволяющие передвигаться по неровным поверхностям, например ухабистым дорогам, и гасить вибрации. При обнаружении превышения заданных пороговых значений встроенное красящее устройство автоматически отмечает место загрязнения. В технологии обнаружения используются детекторы Гейгера — Мюллера для измерения мощности дозы, GPS для определения местоположения и пластиковый сцинтиллятор размером $1000 \text{ мм}^2 \times 500 \text{ мм}^2$ для измерения загрязнения поверхностей. Блок обнаружения защищен свинцовым экраном, что позволяет обнаруживать низкий уровень загрязнения поверхностей даже в зонах с высоким фоном. Порог обнаружения составляет приблизительно $1000\text{--}2000 \text{ Бк/м}^2$ при естественном фоне $\sim 0,1 \text{ мкЗв/ч}$.

6.2.2. Характеризация для сортировки и технологической подготовки

Сортировка отходов — это разумная мера для обеспечения эффективного временного хранения, регулирования мощности доз, подготовки к последующей переработке, упаковки для захоронения и т.д. На ранних стадиях ликвидации последствий аварии измерения мощности дозы могут использоваться для разделения отходов с целью временного хранения и повышения безопасности работников за счет хранения отходов с более высокой мощностью дозы на удалении от рабочих зон. После определения процессов обработки конкретных отходов и получения данных об их характеристиках отходы могут быть надлежащим образом распределены по очередям обработки. Данные характеристики конкретных параметров необходимы для того, чтобы удостовериться, что для обработки выбраны правильные отходы.

6.2.3. Характеризация отходов в мешках и упаковках

Временное хранение отходов, образовавшихся в результате аварии, должно быть грамотно спланировано и организовано, зачастую в кратчайший срок после аварии, чтобы снизить радиационное облучение населения и персонала. Тип используемого контейнера зависит от

уровня радиации, химической природы и физических свойств отходов. Контейнеры могут включать в себя мешки, бочки, ящики, ВПК и т.д. различных форм и размеров. Данные о характеристиках необходимы для правильного выбора упаковок для временного хранения, чтобы обеспечить контроль мощности дозы и загрязнения в зоне хранения или на установке, а также для инвентаризации и последующего обращения и захоронения. Вне площадки АЭС «Фукусима-дайити» мощность дозы на расстоянии 1 см от поверхности измеряется для каждого гибкого контейнера, а мощность дозы в воздухе на расстоянии 1 м измеряется после погрузки этих контейнеров на грузовой транспорт, как показано на рис. 11.

6.2.4. Передача, освобождение от контроля и рециклирование материалов

Были разработаны процедуры изъятия материалов на основе уровней освобождения от контроля. Процедуры освобождения от контроля начинаются со спецификации материалов, рассматриваемых на предмет освобождения от регулирующего контроля, и заканчиваются любыми последующими действиями по результатам мониторинга. Для того чтобы обеспечить соответствие уровням изъятия и освобождения от контроля, необходимо разработать программу



	Средняя концентрация радиоактивности (Бк/кг)						Максимальная эквивалентная доза в 1 м от грузовика (правила передачи транспортных средств)
	3 000	8 000	30 000	150 000	500 000	1 000 000	
Мощность дозы в воздухе (мкЗв/ч)	0,27	0,72	2,7	13	44	89	100

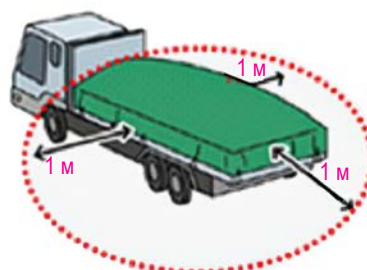
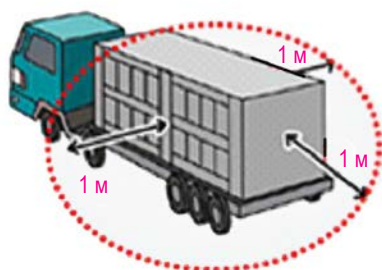


РИС. 11. Пример измерения радиации для мешка (вверху) и грузового автомобиля на АЭС «Фукусима-дайити» (внизу). Взято с изменениями из [88].

мониторинга. По сравнению с радиационным мониторингом на действующих установках такой процесс контроля соответствия может быть весьма сложным и отнимать много времени. Контроль уровней освобождения от контроля обычно предполагает измерение больших объемов материалов. Вместе с тем уровни освобождения от контроля близки к нижним пределам обнаружения полевого оборудования, и может возникнуть необходимость в анализе подтверждающих проб в специально оборудованных лабораториях [35].

На АЭС «Фукусима-дайити» были приняты радикальные меры для решения проблемы скопления воды из-за притока подземных вод и предотвращения ее проникновения в здания реакторов [80]. Были последовательно введены в строй 12 обводных насосных скважин для перехвата и откачки подземных вод, прежде чем они смогут попасть в поврежденные реакторные здания. Вначале откачанная подземная вода временно хранилась в резервуарах, а с 2014 года она начала сбрасываться в море — после того как ТЕПКО и сторонняя организация подтвердили, что операционные цели по качеству достигнуты [89].

На Чернобыльской АЭС свободная передача слабозагрязненного аварийного материала не практиковалась ввиду создания зоны отчуждения вокруг места аварии. Материалы, полученные в результате дезактивационных работ, связанных с аварией, были захоронены и помечены указателями. На всей территории зоны отчуждения установлен полный контроль доступа. Внутри границ зоны отчуждения была выделена еще одна запретная зона, включающая в себя все места временного хранения отходов, где были захоронены загрязненные материалы.

6.2.5. Характеризация продуктов питания

Существует три основных пути попадания радиоактивных веществ в пищевые продукты после аварии: они могут переноситься ветром (т.е. по воздуху), водой или через грунт и отложения. Радионуклиды, содержащиеся в воздухе, могут оседать на растениях, которые употребляются в пищу животными. Радионуклиды в водоемах могут аналогичным образом воздействовать на водную флору и фауну. В зависимости от уровня загрязнения загрязненные продукты питания и другие биологические материалы могут потребовать обработки как радиоактивные отходы. Поэтому может потребоваться характеристика продуктов питания для целей обращения с отходами, а также для защиты здоровья людей.

Концентрации активности радионуклидов в окружающей среде служат важным начальным критерием для определения возможных будущих схем организации сельскохозяйственной деятельности и производства продовольствия. На ранних стадиях ликвидации последствий аварии и в качестве первого шага важно оценить, как загрязнение распространяется в окружающей среде, путем измерения концентраций радионуклидов, а затем нанесения этих значений на карту. Концентрации радионуклидов могут измеряться как на месте, так и в лаборатории.

Префектура Фукусима — очень богатый сельскохозяйственный район, поставляющий высококачественный рис, говядину и фрукты в другие регионы Японии. До аварии предельный уровень суммарного содержания радионуклидов $^{134+137}\text{Cs}$ в пищевых продуктах по всей Японии составлял 600 Бк/кг. В марте 2012 года этот предел был снижен еще больше — до 100 Бк/кг. Закупки из префектуры Фукусима сократились, несмотря на широкую программу отбора и анализа проб, которая обеспечила соответствие критериям освобождения от контроля и употребления в пищу. Чтобы еще больше укрепить доверие общества, на радиоактивность был проверен каждый мешок риса из префектуры Фукусима, а не только статистическая выборка. Этот же процесс был использован для вяленой хурмы анпогаки — деликатеса из этой местности. В результате процесса вяления хурмы анпогаки в плодах повышается концентрация радиоактивности, и измерения гарантируют, что на рынок не попадет хурма, превышающая предельные дозы.

Чтобы поддержать деятельность по мониторингу продуктов питания, после аварии на АЭС «Фукусима-дайити» было развернуто несколько проектов по проверке уровня загрязнения и подтверждения пригодности пищевых продуктов для употребления человеком. Система радиологического анализа пищевых продуктов FoodScreen производства компании

«Канберра» — это лабораторный гамма-спектрометрический анализатор пищевых продуктов, использующий детектор на высокочистом германии, для измерения загрязнения сырых или обработанных пищевых продуктов [90]. Эта система предварительно настроена и откалибрована по типовым параметрам, охватывающим широкий спектр контейнеров и матриц с образцами сырых и обработанных пищевых продуктов. Возможны также специальные геометрические формы.

После аварии на Чернобыльской АЭС были разработаны системы измерения (гамма-излучатели, такие как изотопы цезия) для проверки на радиоактивность живых животных, прежде чем они попадут в пищевую цепь. Мониторинг живых животных может проводиться как на ферме, так и на бойне, что обеспечивает высокую степень уверенности в том, что мясо безопасно, прежде чем оно попадет в пищевую цепь. В Японии этот подход так и не стал популярным в силу различий в практике мясного животноводства. Вместе с тем была разработана система для измерения радиоактивности в местном сене и силосе, заготавливаемом для кормления скота. Это примеры адаптации и оптимизации методов контроля пищевых продуктов для обеспечения быстрого и эффективного анализа проб.

После аварии на реакторе в Уиндскейле в связи с выбросами стронция была развернута масштабная программа мониторинга окружающей среды, в результате которой была на несколько недель ограничена продажа молока из местности, где находится комплекс в Уиндскейле [91].

6.2.6. Характеризация водоемов

После ядерной аварии также необходимо провести радиологическую оценку водоемов, чтобы убедиться в безопасности питьевой воды для растений и животных, обитающих в затронутых аварией водоемах, а также для водопользования (например, для сельскохозяйственных нужд). Сильное загрязнение водоемов может также привести к образованию дополнительных радиоактивных отходов — напрямую либо в ходе программ очистки.

Традиционно для работы под водой использовались γ -спектрометры *in situ* [92]. Первоначально эти спектрометры содержали детекторы на NaI(Tl). Позднее были также разработаны спектрометры, использующие детекторы на высокочистом германии, с адаптированной электроникой, системами сбора и обработки данных. Обе системы находят широкое применение. Существуют также установки с гидравлической лебедкой с сотнями метров проводящего кабеля. Эти системы используются для измерения радиоактивности в морской воде и мониторинга морского дна. Подводная γ -спектрометрия используется для мониторинга *in situ* утечек радионуклидов из выброшенных или затонувших ядерных объектов/отходов (например, атомных подводных лодок) или сбросов с атомных станций.

Для подводного обследования дна озер в районе Фукусимы с целью измерения загрязнения отложений были применены дистанционно управляемые машины (ДУМ), такие как аппарат производства компании «АРЕВА» [93], оснащенный гамма-спектрометром. ДУМ может работать на глубине до 200 м. Технология обнаружения основана на использовании радиометра из LaBr_3 со средствами, позволяющими решить проблему экранирования излучения толщей воды. ДУМ локализуется с помощью ультракороткой базовой линии, которая представляет собой систему подводного позиционирования, использующую установленный на судне приемопередатчик для определения дальности и пеленга до цели при помощи акустических сигналов, связанных с судном на поверхности. Положение судна определяется с помощью GPS.

6.2.7. Характеризация для переработки, хранения и захоронения

Отходы, образующиеся в результате ядерной аварии, будут обладать различными физическими, химическими и радиологическими (и, возможно, ядерными) характеристиками, что создает особые проблемы при их кондиционировании, упаковке, хранении, перевозке и захоронении. Необходимо наладить тесную координацию между всеми, кто участвует во всей цепочке операций по обращению с отходами — от разработки процессов, необходимых для кондиционирования

отходов, до установления критериев приемлемости отходов на этапах обращения с отходами перед захоронением. В программе характеристики отходов должно учитываться, что первоначальные характеристики отходов (определенные на более ранних стадиях) могут со временем измениться в результате различных процессов деградации, включая биоразложение, химические реакции, коррозию и радиоактивный распад. В итоге исходной документации, сопровождающей упаковку отходов, без дополнительной информации может оказаться недостаточно для описания текущего состояния отходов. Более того, может возникнуть скептическое отношение к имеющимся источникам данных, поскольку разные пути сбора информации могут привести к получению противоречивых данных.

Как уже говорилось ранее, для последующей обработки и захоронения отходов потребуется комплекс данных об их характеристиках. Ввиду сложности и большого объема отходов программа обращения с отходами может потребовать значительных затрат труда на отбор и анализ проб. Таким образом, крайне важно разработать такую программу отбора и анализа проб, которая позволит получить требуемые данные максимально эффективными способами. Для того чтобы облегчить планирование деятельности по отбору и анализу проб, может быть использован процесс ЦКД, описанный в разделе 6.1.3.

Для нужд, связанных с переработкой, хранением и захоронением отходов, потребуются как неразрушающие, так и разрушающие методы характеристики. Выполняемые измерения и/или используемые методы могут включать:

- a) неразрушающий анализ:
 - картографирование величин мощности дозы и методы пересчета мощности дозы;
 - измерение загрязнения поверхностей портативными приборами;
 - гамма-спектрометрию;
 - нейтронные измерения (для целей демонтажа перерабатывающей установки, измерения материалов, загрязненных Pu, Cm и т.д.);
 - рентгенографию (для оценки упаковок/контейнеров, содержащих радиоактивные отходы);
- b) разрушающий анализ:
 - радиохимические анализы;
 - химические анализы;
 - оценку реологических свойств.

На аварийной площадке, скорее всего, будут иметься лишь ограниченные аналитические возможности, и для нужд аналитической программы, вероятно, потребуются лаборатории, расположенные за пределами площадки. Однако в зависимости от масштабов аналитической программы транспортировка проб может оказаться проблематичной, что может обусловить необходимость создания специальной аналитической базы на площадке или вблизи нее. Поскольку для размещения лабораторного комплекса необходима зона с низкой мощностью фоновой дозы, уровни радиации, возникшие в результате аварии, могут усложнить эту задачу.

6.3. МЕТОДЫ И МЕТОДИКИ ХАРАКТЕРИЗАЦИИ

Важнейшую роль в ликвидации последствий ядерных аварий в прошлом сыграли инновационные методы характеристики и аналитические методы. Задействование мобильных систем, создание оборудования для выполнения анализов в сложных условиях и разработка аналитического метода для характеристики сложных матриц — все это внесло свой вклад в прошлую деятельность по обращению с отходами и выводу из эксплуатации. Сегодня эти методы и оборудование образуют инструментарий, который будет использоваться в будущем.

В данном разделе представлен обзор методов, методик и оборудования, которые использовались для выполнения работ по характеристике после ядерных аварий.

6.3.1. Измерения мощности дозы

Измерения мощности дозы в сочетании с системами исследования загрязнения воздуха позволят быстро установить степень тяжести ядерной аварии. Такие измерения могут также использоваться для характеристики материалов, грунтов, зданий, площадок и т.д. после аварии.

Измерение мощности дозы может выполняться при помощи детекторов различного типа. В зависимости от уровня мощности дозы и условий измерения могут использоваться газонаполненные детекторы, такие как трубки Гейгера — Мюллера, ионизационные камеры или сцинтилляторы — пластиковые либо из иодида натрия (например, NaI(Tl)). Мониторы мощности дозы могут быть ручными или монтироваться на транспортном средстве (легковом или грузовом автомобиле, вертолете, самолете, дистанционно управляемом подводном аппарате, роботе и т.д.) и могут использоваться совместно с системами GPS для создания карт мощности дозы или уровня загрязнения.

6.3.2. Исследование загрязнения с помощью альфа-, бета- и гамма-радиометров

Альфа-, бета- и гамма-радиометры дают информацию об уровне и типе загрязнения грунта, мощеных покрытий (например, улиц, тротуаров и т.д.), стен и других поверхностей. Их недостатком является то, что мониторинг отнимает много времени, а работники проводят исследование в опасных радиологических условиях. Этот тип оборудования пригоден для использования только в условиях низкой мощности внешней дозы. При помощи такого оборудования невозможно оценить загрязнение поверхности контейнера, заполненного отходами. Для этой цели подходит метод мазков, при этом активность мазка измеряется в зоне с низкой мощностью дозы.

Системы детектирования основаны на сцинтилляционном счетчике с окном сцинтиллятора большой площади и встроенным фотоэлектронным умножителем. Для детектирования альфа-частиц можно использовать такой сцинтиллятор, как сульфид цинка, для детектирования бета-частиц — пластиковые сцинтилляторы. Полученный энергетический спектр сцинтилляций можно различать, так что альфа- и бета-излучение можно измерять по отдельности одним и тем же детектором. Другие системы измерения основаны на использовании газонаполненного пропорционального детектора. Они состоят либо из ручных мониторов, либо из стационарного оборудования для обследования территории или персонального контроля либо устанавливаются для контроля загрязненности персонала, и они требуют большой площади детектирования для обеспечения эффективного и быстрого охвата контролируемых поверхностей. Эти радиометры можно установить на дистанционно управляемое транспортное или роботизированное средство.

6.3.3. Измерение загрязнения воздуха

В данном контексте под загрязнением воздуха понимаются выбросы газообразных или твердых частиц в атмосферу. Системы исследования загрязнения воздуха широко используются по всей ядерной отрасли для целей защиты от ионизирующих излучений и могут давать оперативную информацию о тяжести текущих аварийных ситуаций или недавно стабилизированных аварий. В большинстве систем мониторинга твердых частиц воздух втягивается в прибор при помощи внешнего насоса или вакуумной системы, и твердые частицы оседают на сменном фильтре рамного типа. Фильтр проверяется детектором, например пассивированным ионно-имплантированным планарным кремниевым детектором, который позволяет одновременно измерять альфа- и бета-радиоактивность осажденного на фильтре материала. Воздушный поток измеряется напрямую и фиксируется прибором. Конструкция системы воздухозабора оптимизирована таким образом, чтобы обеспечить высокую эффективность отбора проб воздуха и высокую скорость оседания

частиц на фильтре. Эти системы обычно используются внутри ядерных установок, но могут применяться и вне установок, а также устанавливаться в передвижных лабораториях. В системах обнаружения радиоактивных газов используются аналогичные устройства отбора проб из воздушного потока, но уровень активности газа считывается напрямую.

6.3.4. Гамма-спектрометрия

Измерения методом гамма-спектрометрии могут проводиться на пробах, упаковках с отходами и в полевых условиях, где они могут быстро дать представление о тяжести и характере ядерной аварии. Гамма-спектрометрия — это неразрушающий метод, который позволяет определить интенсивность и энергию гамма-лучей, испускаемых измеряемым предметом. Зафиксированные и проанализированные гамма-излучения дают гамма-спектр, который характеризует радиологический «след» измеряемых предметов с точки зрения источников гамма-излучения и при условии надлежащей калибровки позволяет оценить активность предмета.

Для гамма-спектрометрии используются два типа детекторов: сцинтилляторы, такие как кристаллы иодида натрия (NaI) или бромистый лантан (LaBr_3), и полупроводники, такие как CZT (кадмий-цинковый теллурид) или германиевые детекторы. Разрешающая способность зависит от типа детектора. Германиевое устройство детектирования включает в себя сосуд Дьюара для жидкого азота или электрический охладитель. Гамма-спектрометры могут быть ручными или монтироваться на транспортное средство (легковой или грузовой автомобиль, вертолет, самолет, подводный дистанционно управляемый аппарат, робот и т.д.) и могут использоваться в сочетании с GPS.

6.3.5. Гамма-визуализация

После ядерной аварии может быть использована гамма-камера для обнаружения горячих точек/концентраций активности, для улучшения моделирования (в сочетании с гамма-спектрометрией) и для планирования необходимых действий. Накоплен значительный опыт использования гамма-камер при обращении с отходами бывших объектов.

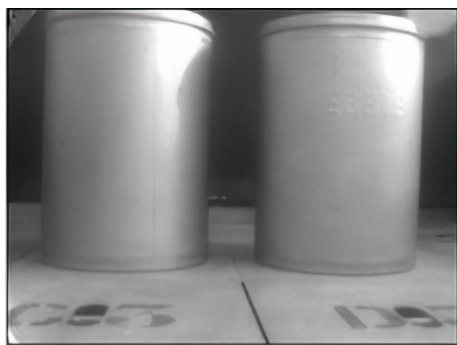
Гамма-изображение состоит из видимого изображения исследуемой области и наложенного на него гамма-профиля, показывающего местонахождение излучения, со ступенчатой цветовой схемой, обозначающей величину излучения, как показано на рис. 12.

6.3.6. Счет нейтронов

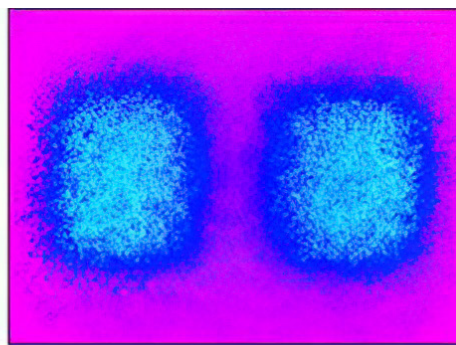
Система счета нейтронов измеряет количество нейтронов, испускаемых делящимся материалом и другими актинидами, и используется для нужд учета ядерного материала. Пассивный счет нейтронов основывается на присутствии актинидов, определяемом в результате радиохимического анализа проб. Источник нейтронов нельзя определить просто путем их детектирования. Требуется минимальное знание характеристик потока отходов. В большинстве методов используются пропорциональные детекторные трубки с ^3He или детекторы, наполненные BF_3 . Методы счета нейтронов — изначально сложные методы характеристики. Простых нейтронных методов не существует — каждый из них требует, чтобы измерениями руководил опытный физик для обеспечения точной интерпретации результатов. Существующие сегодня пассивные системы счета нейтронов позволяют охарактеризовать объемы менее 1 м^3 или $1,5 \text{ м}^3$, и в настоящее время ведутся НИОКР для характеристики больших объемов.

6.3.7. Разрушающий анализ

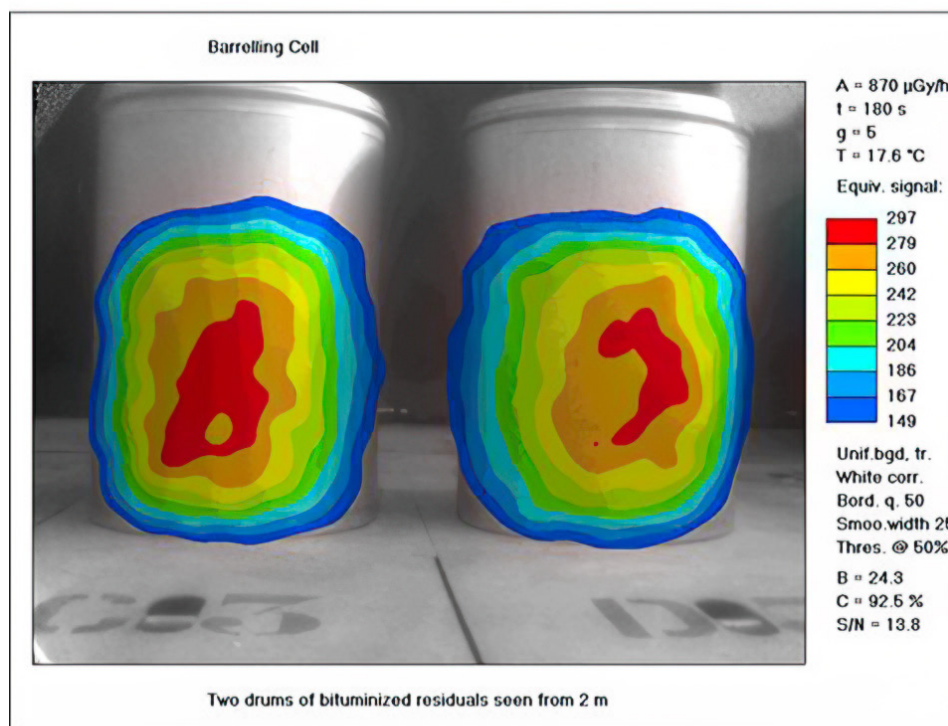
Для получения конкретных и точных данных о радионуклидном и химическом составе отходов могут потребоваться разрушающие методы анализа. Твердые пробы перед анализом



Видимое изображение



Гамма-изображение



Обработанное и наложенное изображение

РИС. 12. Пример системы гамма-визуализации. Публикуется с разрешения CEA-LIST.

могут потребовать растворения или сбраживания. Может потребоваться изоляция или разделение интересующего анализта.

На АЭС «Фукусима-дайти» до аварии была создана стройная система аналитических методов для низкоактивных радиоактивных отходов, образующихся в исследовательских лабораториях, имевшая целью простое и быстрое определение свойств. Эти методы были применены к аварийным отходам с определенными изменениями, зависевшими от пробы. Видоизмененный процесс показан на рис. 13. Твердые пробы, например обломков и растительности, после измельчения или разрезания на мелкие фрагменты перемешивались до гомогенного состояния [94]. При необходимости удаления ^{137}Cs , который часто повышает фоновый уровень, перед определением свойств применялся фосфомолибдат аммония. Для анализа ^3H , ^{14}C и ^{129}I пробы сжигались, чтобы

окислить их до газообразного состояния, и восстанавливались в жидкость. Для выделения Sr и актинидных радионуклидов использовались твердые экстрагенты [95].

6.4. ПРИМЕРЫ ХАРАКТЕРИЗАЦИИ ВО ВРЕМЯ ПРОШЛЫХ ЯДЕРНЫХ АВАРИЙ

В данном разделе рассматриваются стратегии и методы характеристики, применявшиеся при прошлых ядерных авариях, и извлеченные из них уроки.

6.4.1. Авария на АЭС «Три-Майл-Айленд»

На АЭС ТМА после аварии использовались многочисленные методы характеристики для выяснения состояния реактора, определения химического и радионуклидного состава жидких и твердых отходов с целью их обработки и захоронения, а также для нужд дезактивационной деятельности [96]. Стандартные и специально разработанные методики использовались для получения:

- проб газообразного, жидкого или твердого материала из стационарных систем, поврежденной активной зоны и соседних с ней зон [97];
- результатов химического и радиологического анализа [98–100];

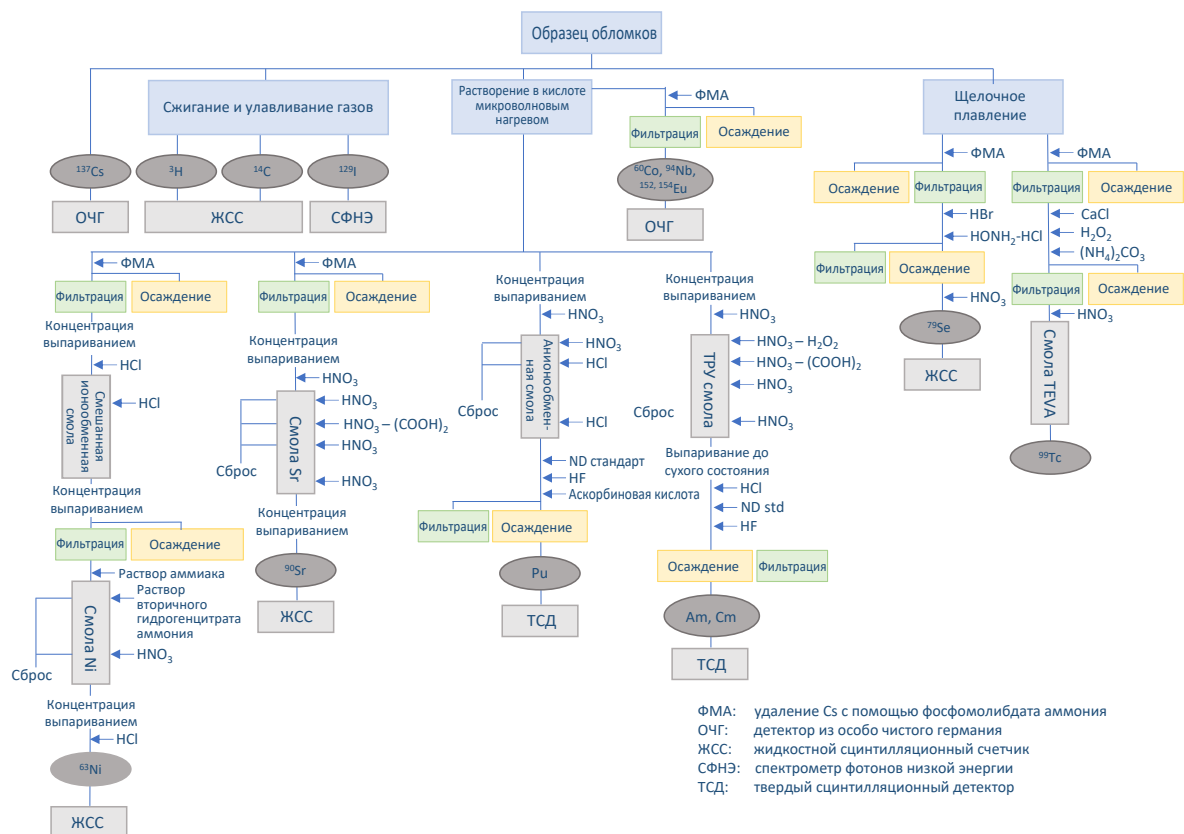


РИС. 13. Аналитический метод, разработанный для анализа ^3H , ^{14}C , ^{60}Co , ^{63}Ni , ^{79}Se , ^{90}Sr , ^{94}Nb , ^{99}Tc , ^{129}I , ^{137}Cs , ^{152}Eu , ^{154}Eu и альфа-излучающих радионуклидов в образцах обломков, собранных на АЭС «Фукусима-дайити». Взято с изменениями из [94].

- с) визуальной и размерной информации внутри активной зоны и станции [101];
- д) данных о состоянии станции при помощи расчетов и обработки данных на основе знаний о технологических процессах.

В [96] содержится подробное описание аналитических задач и методов, использованных для получения необходимых данных. Разбираются как успешные, так и неудачные методы получения данных. Основные уроки, полученные в процессе характеристики после аварии на АЭС ТМА, состояли в том, что фактическая характеристика и работа на местах оказались намного эффективнее любого теоретического метода. Характеризация легла в основу принятия технических решений, планирования и инженерного проектирования. В тех случаях, когда характеристика оказывалась наиболее сложной, она, как правило, давала самые важные данные. Характеризация была итеративным, непрерывным процессом.

Одной из главных последующих задач является управление данными: сбор, систематизация и распространение технических данных. Когда начались работы по ликвидации последствий аварии на АЭС ТМА, были подготовлены документы по планированию отбора и анализа проб, чтобы помочь в организации деятельности по отбору и анализу проб и обобщить результаты прошлых анализов, которые были связаны с текущими аналитическими работами. Таким образом, эти документы опирались на ранее составленные планы, что привело к созданию стройной структуры [102].

Как уже говорилось ранее, после аварии на АЭС ТМА в обществе в целом царилло чувство недоверия. Одной из попыток повысить прозрачность и ввести в курс дела общественность стало создание программы мониторинга доз на территориях, прилегающих к АЭС ТМА, которая стала известна как Программа гражданского радиационного мониторинга [103]. Эта программа выполнялась совместными усилиями МЭ США, департамента экологических ресурсов штата Пенсильвания, Университета штата Пенсильвания и Агентства США по охране окружающей среды. Она дала возможность общественности самостоятельно измерять уровни дозы облучения и обеспечила прозрачный способ оценки гражданами риска, связанного с аварией.

6.4.2. Чернобыльская авария

Характерной особенностью Чернобыльской аварии является присутствие в радиоактивных осадках «горячих частиц» [3, 104–111], состоящих из двух главных компонентов: частиц мелкодисперсного ядерного топлива («топливных частиц») и конденсационных частиц, образовавшихся в результате конденсации летучих продуктов деления (радиоизотопов I, Te, Cs) на поверхностях различных аэрозольных носителей. Во время механического разрушения ядерного топлива образовались неокисленные частицы, которые в изобилии присутствуют в западном следе выброса, возникшем непосредственно после взрыва. В ходе последующего пожара в реакторе ядерное топливо окислилось и были выброшены окисленные частицы, образовав северо-восточный и южный следы, а также перекрыв отдельные части первоначального западного следа [106]. Загрязнение грунта в 30-километровой зоне образует хорошо различимые следы: узкий западный след первого выброса, северо-западный след и южный след, представляющий собой наложение нескольких следов друг на друга. Наибольшее загрязнение грунта связано с западным следом, тянущимся в направлении села Толстый Лес, и северным следом, тянущимся в направлении сел Усов — Масаны [108]. Основным источником информации и данных о радиологических условиях внутри зоны отчуждения является система радиационного мониторинга, кратко описанная ниже.

Непрерывный мониторинг радиационной обстановки в зоне отчуждения осуществляется государственным специализированным предприятием (ГСП) «Экоцентр». ГСП «Экоцентр» определяет точки наблюдения/отбора проб, контролируемые параметры и частоту отбора проб. Программа мониторинга охватывает все природные среды, в которых происходит миграция радионуклидов (грунты, ландшафтный дренаж и биоту, воздух, подземные и поверхностные воды), и осуществляется на региональном уровне, а также на конкретных потенциально опасных

техногенных и природных объектах в зоне отчуждения. Сеть радиационного мониторинга насчитывает 147 точек наблюдения и 138 наблюдательных скважин.

Наиболее часто наблюдения проводятся с помощью автоматизированной системы контроля радиационной обстановки (АСКРО), которая замеряет внешние МДГ во всей сети пунктов наблюдения. Пробы атмосферного воздуха, поверхностных и подземных вод, а также экологических систем отбираются реже, чем пробы для АСКРО. Пробы окружающей среды анализируются на содержание ^{137}Cs и ^{90}Sr (основных радиоактивных загрязнителей, вызывающих беспокойство), а также альфа-излучающих трансурановых радионуклидов — ^{238}Pu , $^{239+240}\text{Pu}$ и ^{241}Am . Ежегодная программа отбора проб для мониторинга обычно включает в себя сбор 4500–5000 проб окружающей среды и проведение ~10 000–11 000 анализов на радиоактивность.

Методы характеристики радиоактивных отходов зависят от требований к захоронению отходов. Например, низко- и среднеактивные, короткоживущие твердые и сыпучие отходы, намеченные к захоронению на пункте «Буряковка», обычно характеризуются с помощью гамма-спектрометрической системы измерения объектов на местах (ISOCs) производства компании «Канберра». После характеристики составляется сертификат на захоронение и отходы переправляются на пункт. Радиоактивные отходы, которые планируется захоронить в приповерхностных хранилищах комплекса «Вектор», проходят процедуру характеристики с использованием оборудования и лабораторий, находящихся на заводе по переработке жидких радиоактивных отходов (ЗПЖРО) и промышленном комплексе по обращению с твердыми радиоактивными отходами (ПКОТРО).

Сразу же и вскоре после аварии в зоне отчуждения были реализованы многочисленные краткосрочные меры и сооружены объекты по обращению с отходами, что потребовало последующей характеристики отходов *in situ*. В их числе:

- a) создание девяти пунктов временной локализации радиоактивных отходов (ПВЛРО), в которых было произведено захоронение в траншеях и буртах на площадке загрязненной растительности, верхнего слоя почвы и строительного мусора, чтобы уменьшить поля ионизирующего излучения вблизи АЭС;
- b) создание трех ПЗРО для приема радиоактивных отходов, образующихся в ходе работ по ликвидации последствий аварии за пределами объекта «Укрытие»: ПЗРО «Подлесный», ПЗРО «III очередь ЧАЭС» (также называемый «Комплексный»), которые были закрыты после проведения ликвидационных мероприятий, и ПЗРО «Буряковка», пункт захоронения траншейного типа, по-прежнему используемый для захоронения низкоактивных сыпучих отходов.

Впоследствии, в 1994–1995 годах, для оценки этих объектов были проведены полевые процедуры характеристики *in situ*. Методология характеристики была разработана и опробована Всероссийским проектно-изыскательским и научно-исследовательским институтом промышленной технологии (ВНИПИПТ) для обследования в 1991–1992 годах Рыжего леса — территории площадью 10 км², окружающей Чернобыльскую АЭС [112–114]. Методы характеристики включали:

- визуальный осмотр (например, проседание грунта; растительные аномалии);
- использование передвижной лаборатории с оборудованием для исследования грунта и обнаружения траншей и буртов;
- бурение исследовательских скважин глубиной 1 м по регулярной квадратной сетке с площадью квадрата 5 м² и гамма-каротаж с вертикальным шагом 0,2 м;
- уточнение координатной сетки пробоотбора при обнаружении аномальных МДГ (> 3 мкЗв/ч) [113].

Исходя из результатов кампании по характеристике было рекомендовано применение следующих методик измерения для повышения качества работы по характеристике в зоне отчуждения [115]:

- 1) надежные портативные гамма-спектрометры для измерения угловых и спектральных распределений;
- 2) оборудование пассивного и активного счета нейтронов для измерения делящихся и расщепляющихся материалов;
- 3) радиохимическая лаборатория анализа проб, загрязненных трансурановыми (ТРУ) элементами.

6.4.3. Авария на АЭС «Фукусима-дайити»

Характеризация загрязненных материалов и отходов на АЭС «Фукусима-дайити» включала в себя целый ряд мероприятий и методов, касавшихся органических материалов, обломков и воды.

- a) Обломки, деревья и вторичные отходы водоочистки собираются на площадке и несколько раз в год переправляются в ЯААЭ (Ибараки) для анализа радиоактивности: общее количество проб составляет ~70 в год. Отношение концентраций ^{90}Sr и ^{137}Cs в обломках указывает на пропорциональную тенденцию, которая различается в зависимости от места, где отбирается проба. Продолжается сбор данных, чтобы повысить точность данной корреляции.
- b) Из-за высоких мощностей дозы отбор проб на анализ из емкостей для адсорбции цезия и/или шламов, образующихся в системе водоочистки, оказался сложным делом. Таким образом, необходима косвенная оценка, позволяющая сравнить данные анализа радиоактивности в загрязненных и очищенных водах.
- c) Хотя количество данных ограничено, общий объем всех потоков отходов на площадке оценивается на основе анализа, расчетов и моделирования. Аналитическая оценка объема производится путем построения моделей переноса радионуклидов, основанных на поведении радионуклидов при выбросе из реактора, растворении в загрязненной воде и сорбции радионуклидов на строительных и адсорбирующих материалах. Для каждого потока отходов составляются наборы данных об объеме, основанные на оценке результатов анализа и моделирования.

Важным направлением текущей деятельности является увеличение количества анализируемых проб и повышение точности оценки характеристик. ЯААЭ занимается созданием двух центров по разработке технологий переработки и захоронения отходов. В них будут работать две лаборатории: первая будет специализироваться на низкоактивных обломках и вторичных отходах, образующихся при очистке загрязненной воды, вторая — на ВАО, образующихся из загрязненной воды и обломков твэлов.

Процедура характеристики вне площадки АЭС «Фукусима-дайити» описана в различных руководствах, таких как руководство по исследованию загрязнения [116], руководство по дезактивации [61] и руководство по пилотной программе транспортировки [88]. Для фактического измерения количества отходов, поступающих в промежуточное хранилище, в настоящее время разрабатываются новые системы мониторинга транспортных средств для оценки мощности дозы в воздухе.

7. СБОР, ПЕРЕМЕЩЕНИЕ И ИЗВЛЕЧЕНИЕ ОТХОДОВ

Основные извлеченные уроки

- Отходы могут существовать в самых разнообразных формах (например, грунт, растительность, строительный мусор, оборудование, транспортные средства, гниющие отходы, отходы от очистки дорог, отложения в дождевых канавах, зола, шлам и т.д.) и могут быть рассеяны на больших географических территориях, включая районы городской застройки, лесные массивы, сельскохозяйственные угодья и отдаленные местности.
- Отходы могут находиться как на площадке, так и за ее пределами.
- Разделение отходов по типу, материалу, местонахождению и/или уровню радиации обеспечит основу для оптимизации обращения с отходами в будущем.
- В зонах, расположенных вблизи источника аварии, может потребоваться оборудование с дистанционным управлением.
- На начальных стадиях события могут потребоваться экстренные меры (например, засыпка некоторых участков дополнительным грунтом с целью экранирования). Это повлияет на количество материала, который в дальнейшем придется обрабатывать как отходы.
- Необходимо продумать методы извлечения отходов из временного хранилища (например, во время хранения биологические материалы будут разлагаться, а металлы — ржаветь).
- По каждому месту должны иметься подробные учетные документы о хранящихся материалах, обеспечивающие основу для будущего извлечения и обращения.
- Сбор и консолидация загрязненного материала может снизить радиологическую опасность для работников и населения. Тем не менее необходимо учитывать дозу облучения работников и затраты труда, связанные со сбором и перемещением материала (например, может быть безопаснее оставить материал на месте для временного хранения).

7.1. ПЕРВОНАЧАЛЬНЫЙ СБОР ОТХОДОВ

Многие из проблем, возникающих при обращении с отходами после аварии, связаны с первоначальным сбором отходов, особенно тех, которые находятся вне аварийной площадки. Отходы могут быть рассеяны на большой географической площади и состоять из самых разнообразных материалов с широким диапазоном физических, химических и радиологических характеристик. К числу отходов будут относиться те, которые находятся на аварийной площадке, те, которые были наработаны в результате очистки и восстановления аварийной площадки, отходы, образовавшиеся в результате восстановления загрязненных территорий вне площадки, и вторичные отходы, образовавшиеся при переработке других отходов. На этом начальном этапе отходы будут представлять собой в основном переработанные (сырые) отходы, которые могут иметь высокую степень нефиксированного загрязнения поверхности. Сбор отходов может быть также сопряжен с дополнительными опасностями, например с образованием радиоактивных аэрозолей (пыли), которые могут легко распространить загрязнение на соседние территории.

На начальных стадиях аварии может потребоваться быстро собрать загрязненные материалы, часто в сложных условиях, и переправить их в места временного хранения, чтобы снизить уровень прямой радиационной опасности для работников и населения. Времени на планирование или правильное разделение материалов по типам или характеристикам зачастую не хватает.

Прошлый опыт деятельности на этих начальных стадиях показывает, что используется легкодоступное оборудование, даже если оно не идеально подходит для выполнения поставленной задачи, и что можно ожидать трудностей с эффективной дезактивацией этого оборудования. В

итоге само это оборудование может превратиться в радиоактивные отходы. К такому оборудованию может относиться строительная техника, легкодоступные транспортные контейнеры и емкости, грузовые железнодорожные вагоны и аналогичное оборудование.

Существующие системы сбора отходов могут быть эффективным средством для сбора и концентрации загрязняющих веществ. Необходимо учитывать следующие аспекты:

- a) концентрированные формы отходов, которые могут образоваться в результате обычных процессов очистки загрязненных материалов, например шлам водоочистных сооружений, осадок сточных вод, зольный остаток от сжигания, зола в каминах, древесная кора, воздушные фильтры и т.д.;
- b) категории и/или классы отходов в процессе сбора, чтобы обеспечить их эффективное разделение для дальнейшего обращения с ними;
- c) прочность контейнеров для сбора и временного хранения (например, пластиковых пакетов, металлических ящиков и т.д.);
- d) отходы с более высокой активностью, в отношении которых потребуются особые меры предосторожности, такие как дополнительное экранирование, дистанционное манипулирование, ВПК и т.д.

Многие примеры методов сбора отходов, использовавшихся после аварии на АЭС «Фукусима-дайити», приведены в руководстве по дезактивации, подготовленном Министерством окружающей среды Японии [61].

7.2. ПЕРЕМЕЩЕНИЕ КРУПНОГАБАРИТНЫХ ПРЕДМЕТОВ И/ИЛИ СЫПУЧИХ МАТЕРИАЛОВ

В результате ядерной аварии может образоваться значительное количество крупногабаритных предметов (таких как поврежденное оборудование, загрязненные транспортные средства, строительные материалы и т.д.) или загрязненных сыпучих материалов (например, грунтов, растительности, строительного мусора и т.д.), которые необходимо собрать и утилизировать как отходы. Эти материалы часто можно собрать и переместить с помощью стандартной тяжелой строительной техники, такой как бульдозеры, краны, самосвалы, экскаваторы и другое аналогичное оборудование. В случае сильно загрязненных зон (т.е. с высокой мощностью амбиентной дозы) техника может нуждаться в специальной модификации, обеспечивающей экранирование кабин операторов и/или дистанционное управление.

Если возникает необходимость перевозки отходов по общественным транспортным маршрутам и если отходы необходимо транспортировать в упаковке типа В, то обращение с такими крупногабаритными предметами становится более проблематичным. Контейнеры типа В часто имеют небольшую емкость по сравнению, например, с грузовой промышленной тарой стандарта ИСО. Время, необходимое для проектирования, лицензирования и производства контейнеров большой емкости типа В, может легко составить пять лет и более (см. раздел 10).

Некоторые примеры модифицированной техники, использовавшейся на Чернобыльской АЭС, показаны на рис. 14–17. Для выполнения разноплановых задач по сбору и перемещению отходов в тяжелых условиях, возникших после аварии, потребовались принципиально иные и креативные подходы к использованию имеющихся средств. Базовая техника для землеройных работ и перемещения материалов потребовала установки экранов и модификации существующих средств захвата, разравнивания грунта, вакуумной очистки и транспортировки. Вся эта техника была оснащена герметичными и/или экранированными кабинами оператора. Некоторой техникой можно было также управлять дистанционно. В одних случаях были переоборудованы существующие военные машины, в других транспортные средства были сконструированы на заказ. Большинство машин, выполнив свое предназначение, сами превратились в радиоактивные отходы. Описание



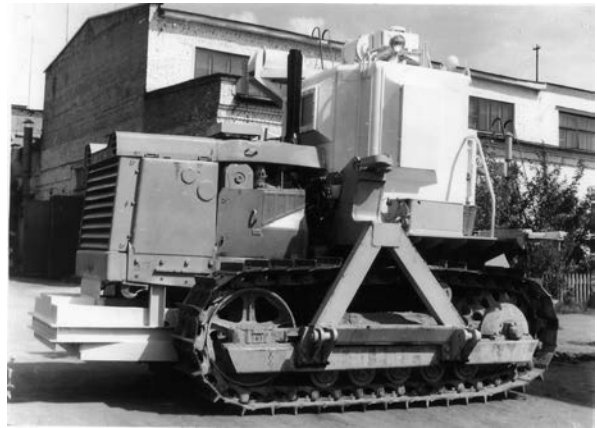
РИС. 14. Военная гусеничная инженерная машина разграждения ИМР-2 советского производства, широко использовавшаяся после аварии для радиологической разведки, демонтажа, разбора завалов, сбора отходов и других работ, связанных с очисткой. Публикуется с разрешения Украинского национального музея «Чернобыль».



РИС. 15. Бронетранспортер советского производства, использовавшийся после аварии на Чернобыльской АЭС для перевозки рабочих, занятых на опасных работах по ликвидации последствий аварии, и для радиологической разведки. Публикуется с разрешения Украинского национального музея «Чернобыль».



a)



b)

РИС. 16. Модифицированные тракторы, использовавшиеся при ликвидации последствий аварии на Чернобыльской АЭС. а) Трактор МТЗ-80, использовавшийся при очистке улиц для сбора радиоактивной пыли и мусора. б) Модифицированный трактор «Челябинск» с мощным экранированием, использовавшийся для очистки территорий, примыкающих к поврежденному реактору энергоблока № 4, и для перевозки грузов. Публикуется с разрешения Украинского национального музея «Чернобыль».



РИС. 17. Дистанционно управляемая машина для землеройных работ с герметичной кабиной, использовавшаяся на Чернобыльской АЭС. Публикуется с разрешения Украинского общества дружбы и культурных связей с зарубежными странами.

использованной техники можно найти в документах Серии технических докладов, опубликованных МАГАТЭ в 1990-х годах, например в [48, 117–121].

На АЭС «Фукусима-дайити» для извлечения обломков из реакторных и других зданий используются краны и роботы с дистанционным управлением. На рис. 18 показан постепенный разбор завалов на энергоблоке № 3, начиная с момента взрыва в 2011 году и до завершения этих



РИС. 18. Разбор завалов и стабилизация при помощи кранов на энергоблоке № 3 АЭС «Фукусима-дайити»: после аварии — 2011 год (вверху слева); во время разбора завалов — 2015 год (вверху справа); текущая стабилизированная ситуация — 2020 год (внизу). Две верхние фотографии публикуются с разрешения Токийской электроэнергетической компании.

работ в 2014 году и состояния дел на 2020 год. Обломки перевозятся в зону хранения на площадке на самосвалах.

Захоронение загрязненной растительности оказалась сложной задачей на АЭС «Фукусима-дайити» ввиду объема, площади распространения и уровней загрязнения за пределами площадки. Для удаления растительности в зонах с относительно высокой мощностью дозы в воздухе использовалась крупногабаритная и в некоторых случаях дистанционно управляемая техника, как показано на рис. 19.

Одним из проблемных мест реактора в Уиндскейле, доставшихся в наследство от аварии, является загрязненная вытяжная труба реактора. Эта труба высотой 125 м окружена другими старыми объектами, содержащими радиоактивные отходы, что не позволяло использовать обычные методы демонтажа. В 2019 году «Селлафилд, лтд.» приступила к демонтажу вытяжной трубы при помощи крана высотой 152 м (рис. 20), чтобы опустить 6-тонные блоки на уровень земли для захоронения в качестве ОНАО [122].

7.3. ДИСТАНЦИОННАЯ ОЦЕНКА МАТЕРИАЛОВ В ПОВРЕЖДЕННЫХ СООРУЖЕНИЯХ

Сильно поврежденные сооружения могут быть труднодоступными для персонала и настолько сильно загрязненными, что в них невозможно войти. В таких ситуациях все большее применение находят роботизированные системы, которые можно использовать для исследования и идентификации загрязненных материалов, требующих сбора. В настоящее время ведется



РИС. 19. Беспилотные строительные машины с дистанционным управлением, использовавшиеся для расчистки растительности за пределами площадки в префектуре Фукусима. Публикуется с разрешения «Кадзима корпорейшин».

разработка таких систем для решения конкретных задач, и на АЭС «Фукусима-дайити» накоплен большой опыт в этой области. Внутри здания реактора робот с дистанционным управлением, показанный на рис. 21, играет важную роль в снижении облучения работников.



РИС. 20. В Селлафилде был установлен 152-метровый кран для демонтажа вытяжной трубы реактора № 1 в Уиндскейле. Публикуется с разрешения Управления по выводу из эксплуатации ядерных объектов.



РИС. 21. Робот с дистанционным управлением (ASTACO-SoRa), использовавшийся для разбора завалов и обломков в реакторных зданиях, что позволило значительно снизить дозу облучения рабочих. Публикуется с разрешения Токийской электроэнергетической компании.

Ниже перечислены некоторые типы дистанционно управляемого оборудования, разработанного ИРИД для использования на АЭС «Фукусима-дайити».

- МНИ-MEISTeR, дистанционно управляемый робот, который используется для выполнения дезактивационных работ и отбору проб бетона из активной зоны.
- Два типа роботов-трансформеров, которые могут менять свое положение или форму в воде или в узких пространствах, окруженных препятствиями. Первые два «робота-перевертыша» застряли во время испытаний, но работа была продолжена, и в результате был создан робот PMORPH. Изначально эти устройства были созданы для исследования подвала здания первичного гермообъема энергоблока № 1, а в итоге их предполагалось использовать для извлечения обломков твэлов.

ИРИД продолжает разрабатывать и внедрять новых подводных роботов для использования в гермозонах других энергоблоков АЭС «Фукусима-дайити» для сбора данных, позволяющих изучить различные варианты и сценарии вывода из эксплуатации.

7.4. ИЗВЛЕЧЕНИЕ ИЗ ХРАНИЛИЩ

На начальных стадиях аварии может потребоваться быстро собрать загрязненные материалы, часто в сложных условиях, и переправить их в места временного хранения. Обычно это предполагает, что в конечном итоге отходы будут извлечены из первоначального места временного хранения для переработки и последующего захоронения.

Поскольку перед первоначальным помещением на хранение после аварии отходы могли быть не упакованы, они могут оказаться в неудовлетворительном состоянии, когда придет время их извлечения. Например, органические материалы подвергнутся разложению, иногда за очень короткие промежутки времени. Поэтому отходы, чтобы облегчить их последующее извлечение, рекомендуется по возможности упаковывать таким образом, чтобы свести к минимуму возможность деградации как упаковки, так и отходов. Можно использовать коррозионно-стойкие контейнеры с



РИС. 22. УИТРО в ПКОТРО, Чернобыль. Публикуется с разрешения Государственного специализированного предприятия «Чернобыльская АЭС».



РИС. 23. Специальная галерея с дистанционным управлением для перемещения контейнеров с отходами, соединяющая черновильскую УИТРО с ЗПТРО. Публикуется с разрешения Государственного специализированного предприятия «Черновильская АЭС».

долговечными и прочными погрузо-разгрузочными приспособлениями или конструировать их так, чтобы ими можно было легко манипулировать с помощью стандартного погрузо-разгрузочного оборудования. Если существует возможность деградации отходов, следует приложить максимум усилий для ее минимизации, возможно, путем кондиционирования, если способ захоронения хорошо понятен. В иных случаях, когда кондиционирование невозможно, впоследствии могут потребоваться технологии повторной обработки.

На Чернобыльской АЭС в ПКОТРО была сооружена установка по извлечению твердых радиоактивных отходов (УИТРО), показанная на рис. 22, для извлечения отходов из существующего хранилища твердых радиоактивных отходов (ХТРО). Для того чтобы регулировать объем и концентрацию твердых отходов, УИТРО оснащена оборудованием для дистанционного вскрытия и перемещения отходов из ХТРО и их последующей передачи по специальной транспортной галерее (рис. 23) на завод по переработке твердых радиоактивных отходов (ЗПТРО) для переработки и подготовки к захоронению.

Руководство по извлечению отходов для дальнейшей обработки содержится в предыдущих публикациях, например в [123, 124]. Однако объем такого опыта, как правило, значительно меньше того, который требуется в случае крупной ядерной аварии.

8. ПЕРЕРАБОТКА ОТХОДОВ

Основные извлеченные уроки

- Критерии приемлемости отходов, применяемые установками по переработке или захоронению, могут быть точно неизвестны на момент начала переработки.
- Могут потребоваться дополнительные НИОКР для аттестации подходящих методов обработки и кондиционирования конкретных типов отходов или проблемных отходов, образующихся в результате ядерной аварии.

- При строительстве и эксплуатации новых объектов на загрязненных территориях необходимо учитывать влияние уровней фоновое излучения.
- Из-за высоких уровней радиоактивности для некоторых потоков отходов может потребоваться дополнительное экранирование и/или дистанционное манипулирование.
- Кроме того, при переработке, возможно, потребуется учесть нерадиологические аспекты, такие как химические и биологические характеристики, наличие тяжелых металлов и других потенциально токсичных материалов, которые могут присутствовать в отходах в больших, чем обычно, количествах.
- Будет необходимо установить критерии радиационной защиты для всех операций по переработке, выполняемых в неконтролируемых зонах (например, на открытом воздухе).

В контексте данной публикации в понятие «переработки» входят предварительная обработка (сортировка и разделение), обработка, кондиционирование и упаковка отходов. Эти действия последовательно рассматриваются в нижеследующих частях данного раздела. На рис. 24 и 25 показаны общие схемы переработки твердых отходов и жидких отходов. Цель переработки жидких отходов — преобразовать их в твердую форму для захоронения либо подготовить к сбросу.

В послеаварийной ситуации при переработке необходимо учитывать сжатые сроки, большие объемы и сложные, плохо охарактеризованные и/или разнотипные потоки отходов. Можно рассмотреть возможность использования стационарных или мобильных установок. Мобильные системы более подробно описаны в [62]. Кроме того, можно рассмотреть возможность модификации нерадиоактивных установок для использования в обработке радиоактивных отходов.

8.1. ПРЕДВАРИТЕЛЬНАЯ ОБРАБОТКА

К предварительной обработке относятся такие действия, как характеристика, сортировка, разделение и дезактивация. Характеристика подробно рассматривается в разделе 6.

8.1.1. Сортировка и разделение

Для того чтобы повысить эффективность обращения с отходами, необходимо произвести их сортировку и разделение по заранее установленным критериям. Эти критерии будут зависеть от планов и доступных способов обращения с отходами [126]. Критерии могут быть относительно простыми, например:

- разделение материалов на горючие и негорючие (например, металл);
- сортировка по мощности дозы.

По ходу работ по ликвидации последствий аварии и составления планов обращения с отходами можно будет производить дополнительную сортировку и разделение по указанным ниже критериям.

- a) Уровень радиоактивности. Уровни активности β - γ -излучающих радионуклидов и α -излучающих радионуклидов. Разделение по уровням активности (например, по мощности дозы) — это первоочередная задача, которую необходимо решить в отношении первичных отходов для защиты работников и населения. Для разделения отходов ликвидационных работ, отходов восстановительных мероприятий и отходов очистки важно составление карты загрязнения (на площадке или вне площадки).
- b) Происхождение (на основе картирования мест образования отходов; разделенные зоны). Классификация отходов по реакторным блокам или местам происхождения может помочь в последующей радиологической характеристике.

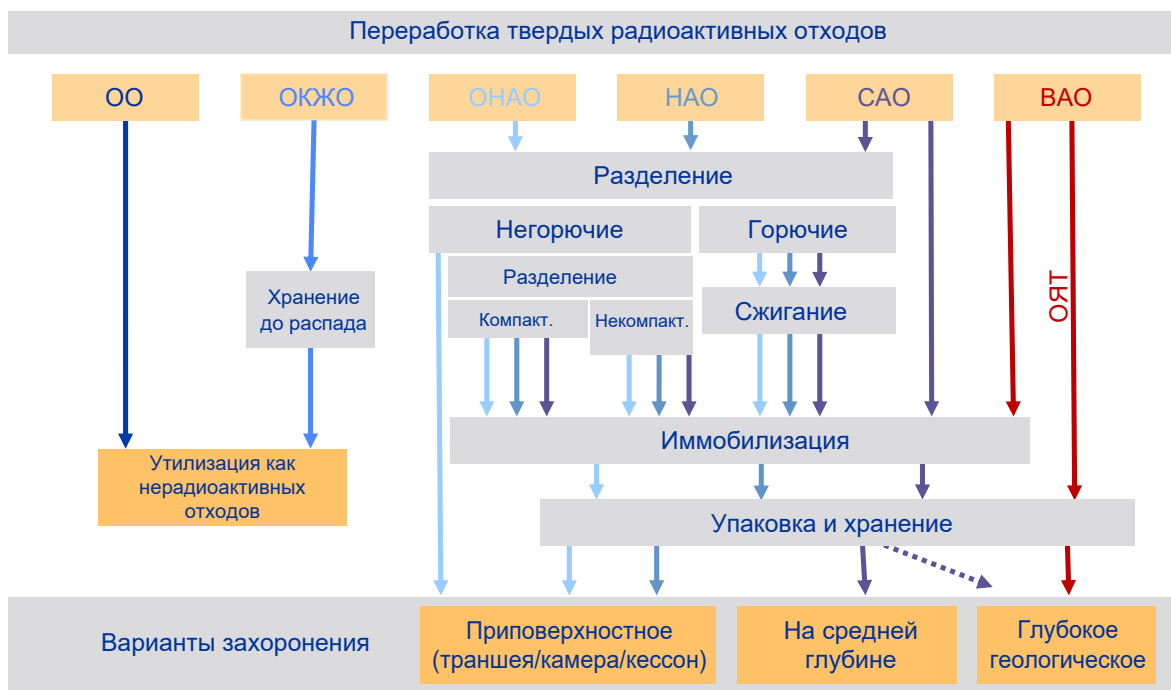


РИС. 24. Схема процесса обращения с твердыми радиоактивными отходами. Взято с изменениями из [125].



РИС. 25. Схема процесса обращения с жидкими радиоактивными отходами. Взято с изменениями из [125].

- с) Типы отходов. Классификация отходов по группам, представляющим диапазон соответствующих физических и химических свойств, для планирования обработки отходов, выбора типа контейнера для отходов или для дальнейшего изучения методов кондиционирования, которые будут применены на последующих этапах.
- д) Объем образования отходов. Объем первичных отходов регистрируется по мере их накопления; однако важно оценить объем образования отходов, связанных с ликвидацией последствий, восстановлением и очисткой, чтобы спланировать импровизированные и специально оборудованные объекты по обработке, хранению и захоронению отходов.

Основным фактором при разделении и сортировке отходов после аварии на Чернобыльской АЭС была концентрация радиоактивности, или мощность дозы, но принимался во внимание и физический тип отходов. Например, были спроектированы ПЗРО для приема твердых радиоактивных отходов, образовавшихся при ликвидации последствий аварии, которые не оставались на объекте «Укрытие» и не хранились на ПЗРО «Подлесный» и ПЗРО «III очередь ЧАЭС» (оба объекта прекратили работу после проведения ликвидационных мероприятий), а также ПЗРО «Буряковка», который представляет собой пункт захоронения траншейного типа, до сих пор принимающий низкоактивные сыпучие отходы.

ПЗРО «Подлесный» был предназначен для захоронения радиоактивных отходов с МДГ до 50 Р/ч (~500 мЗв/ч) в модуле А-1 и 250 Р/ч (2,5 Зв/ч) в модуле В. Большая часть отходов поступала из промышленной зоны Чернобыльской АЭС (промплощадки) в результате очистки территории разрушенного энергоблока № 4, а также поврежденного энергоблока № 3. ПЗРО «III очередь ЧАЭС» был предназначен для захоронения радиоактивных отходов, образующихся при очистке территории энергоблоков № 3 и № 4, с МДГ ниже 50 Р/ч (~500 мЗв/ч).

Было создано девять ПВЛРО, размещенных в пределах 10-километровой зоны вокруг Чернобыльской АЭС. На этих пунктах было устроено более 1000 земляных траншей и буртов, в которых были захоронены загрязненная растительность, верхний слой почвы и строительный мусор, образовавшийся в результате дезактивации радиоактивных выпадений в пострадавших селах и на территории зоны отчуждения. Все эти объекты были закрыты после окончания работ по ликвидации (очистке), проводившихся в 1986–1988 годах.

На АЭС «Фукусима-дайити» пришлось иметь дело с обломками бетона, металла и пластика. Обломки были собраны после взрыва водорода на энергоблоках №№ 1, 3 и 4 и извлечены из реакторных зданий. Они были отсортированы по мощности дозы (как показано на рис. 26) и помещены в хранилища. Часть обломков была засыпана грунтом, чтобы снизить мощность дозы. Деревья были разрублены на стволы, ветви с листьями и корни. Часть древесных отходов была измельчена и засыпана грунтом, чтобы предотвратить возгорание и снизить мощность дозы. Вторичные радиоактивные отходы, образовавшиеся при очистке загрязненной воды и охлаждении топлива, в настоящее время находятся в хранилищах, а слабозагрязненная вода из системы подземного дренажа вокруг реакторов сбрасывается в море. Все отходы, образовавшиеся на АЭС «Фукусима-дайити», хранятся на площадке.

На АЭС ТМА во время и после аварии практически не происходило внешних выбросов радиоактивного материала. Поэтому проблема сбора загрязненного строительного мусора, грунта, растительности и т.д. остро не стояла. Обращение с твердыми отходами в основном включало в себя обработку оборудования и средств для дезактивации, ионообменников и сорбентов для очистки воды, а также мусора и топливных материалов в станционных зданиях. Вместе с тем существовала потребность в сооружениях для технологической обработки отходов на площадке с целью последующей упаковки и перевозки отходов на захоронение за пределами площадки [1]. Сразу же после аварии металлический ангар, который ранее использовалось для покрасочных работ при строительстве станции, был приспособлен для сбора и временного хранения твердых отходов [1]. В 1980 году было составлено программное заключение о воздействии на окружающую среду [30], связанное с дезактивацией и захоронением радиоактивных отходов, образовавшихся в

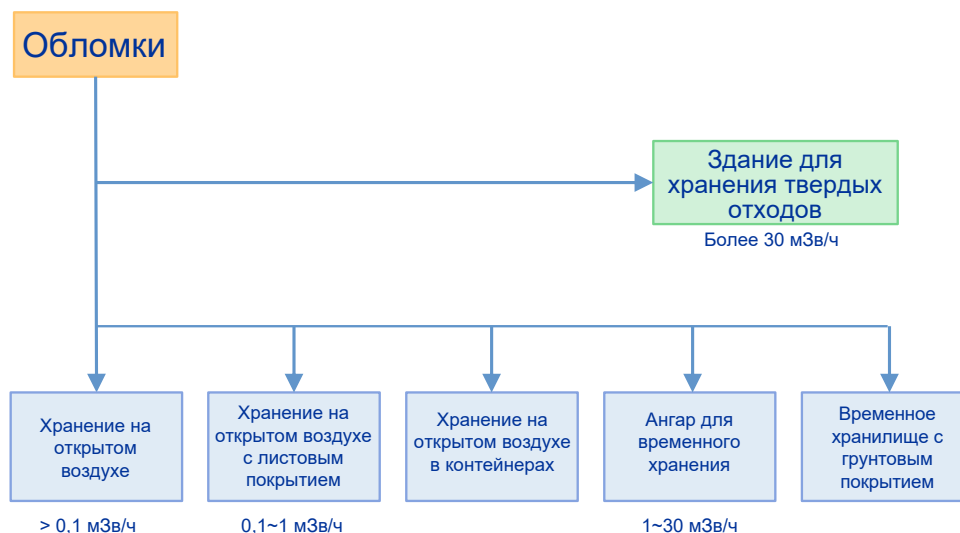


РИС. 26. Распределение обломочных отходов на АЭС «Фукусима-дайити» по группам в зависимости от мощности дозы на поверхности и требований к временному хранению.

результате аварии на АЭС ТМА, в котором было указано на необходимость строительства новых пунктов технологической подготовки и хранилищ на площадке.

8.1.1.1. Установка для сортировки грунта

В случае ядерной аварии может возникнуть необходимость в вывозе и захоронении огромного количества загрязненного грунта. Первым шагом является определение радиоактивности грунта и удаление грунта, активность которого превышает установленный порог. Установки для сортировки грунта обычно совмещают в себе функцию характеристики (обычно подсчет с помощью больших пластиковых сцинтилляторов) и функцию сортировки.

После аварии на АЭС «Фукусима-дайити» была разработана высокопроизводительная установка для сортировки грунта с учетом необходимости переработать миллионы тонн грунта [127]. Первая оценка загрязнения грунта вокруг АЭС «Фукусима-дайити» и опыт Чернобыльской АЭС показали, что грунт загрязняется на глубину 5–10 см и что загрязнение концентрируется в локализованных «леопардовых пятнах». Более половины грунтов, вызывавших беспокойство, оказались незагрязненными. Грунт легко поддавался обработке при помощи автоматизированной установки для сортировки грунта с высокой производительностью — до 150 т/ч (номинальная производительность 100 т/ч). Установка оснащена пластиковыми сцинтилляторами большого размера. Нижний предел обнаружения составляет ~20 Бк/кг ^{137}Cs (в зависимости от фона). Точность сортировки составляет 30–40 кг. Эта мобильная установка помещается в два 12-метровых ИСО-контейнера, что позволяет легко перебазировать ее с одного места обработки на другое. Принцип работы установки для сортировки грунта показан на рис. 27.

8.1.2. Дезактивация

Дезактивация (например, протирка, промывка или скребление поверхности для удаления загрязненных материалов) некоторых потенциальных отходов (например, зданий и оборудования) может эффективно сократить объем отходов, требующих утилизации, и в соответствующих случаях может быть рассмотрена как потенциальный вариант. При этом, однако, следует принять

в расчет такие соображения, как эффективность данного метода, образование вторичных отходов, образование аэрозолей и доза облучения работников в процессе дезактивации.

Дезактивация также может использоваться для того, чтобы работники смогли войти в зоны, куда иначе было бы невозможно безопасно попасть из-за высокого уровня радиации, нефиксированного загрязнения или других рисков загрязнения. К небольшому оборудованию и зданиям могут быть применены стандартные методы дезактивации. Кроме того, могут применяться и другие методы, подобные тем, которые были разработаны для крупномасштабных проектов вывода из эксплуатации.

Дезактивация после аварии на Чернобыльской АЭС проводилась весьма активно, поскольку основной целью кампании по очистке было создание условий для дальнейшей эксплуатации трех оставшихся неповрежденными энергоблоков электростанции. Дезактивационные работы велись не только на площадке, но и на прилегающей территории. Результатом дезактивационных работ было снижение уровня загрязнения и доз радиационного облучения более чем на порядок. Подробные сведения об использованных методах и технологиях дезактивации можно найти в документах Серии технических докладов, опубликованных МАГАТЭ в 1990-х годах (например, [48, 117–121]).

При проведении дезактивационных работ используются в основном мобильные технологии, которые можно применять в полевых условиях для очистки конкретных объектов. Опыт АЭС ТМА доказал эффективность пылесосов для влажной чистки, систем «Гидроланс», методов механического удаления поверхности и дистанционно управляемых методов для дезактивации определенных зон. На основе этого опыта была составлена матрица, описывающая эффективность этих методов при выполнении различных дезактивационных работ (таблица 3) [1].



РИС. 27. Установка для сортировки загрязненного грунта, использовавшаяся на АЭС «Фукусима-дайити». Публикуется с разрешения GRS VALTECH.

8.2. ОБРАБОТКА

Выбор процесса обработки зависит от характеристик отходов. В некоторых случаях одним из вариантов может быть отказ от обработки, как это имело место с твердыми отходами при ликвидации последствий аварии на Чернобыльской АЭС. Для схожих с жидкостью влажных твердых отходов (например, шлама) рекомендуется процесс отверждения, призванный уменьшить вероятность миграции или рассеивания радионуклидов. Например, на АЭС «Фукусима-дайити» рассматривалось несколько способов сушки с целью уменьшить содержание воды в шламах (вторичных отходах, образующихся при очистке загрязненной воды) и увеличить емкость матрицы для отверждения. Возможность использования установок по переработке твердых бытовых отходов и других существующих установок и инфраструктуры может быть рассмотрена после того, как эти объекты будут соответствующим образом модифицированы.

8.2.1. Твердые отходы

Существует несколько стандартных методов обработки твердых радиоактивных отходов, таких как сжигание, компактирование, дезактивация, дробление и т.д. Они подробно описаны в других публикациях, например в [128–138], и перечислены в таблице 4. Основываясь на результатах характеристики и базовых испытаний технологий переработки, можно сузить круг допустимых методов и определить проблемы, требующие решения. При сужении круга допустимых методов переработки можно также определить технические моменты, требующие учета при изучении следующих шагов.

8.2.1.1. Обработка твердых отходов на Чернобыльской АЭС

Объекты по переработке твердых отходов на площадке Чернобыльской АЭС и близлежащий комплекс «Вектор», призванный обеспечить вывод из эксплуатации энергоблоков №№ 1–3, а также привести в безопасное состояние энергоблок № 4, называются «ПКОТРО». Комплекс ПКОТРО оборудован техническими средствами для характеристики отходов, извлеченных из хранилищ на площадке, горячими камерами для разделения и установками для сжигания, суперкомпактирования, цементирования и упаковки.

8.2.1.2. Обработка твердых отходов на АЭС «Фукусима-дайити»

На АЭС «Фукусима-дайити» существующая инфраструктура по обращению с отходами (мусоросжигательная установка, компактор и т.д.) не использовалась. Эти установки слишком малы по размеру и ранее были переоборудованы для других целей. После аварии на площадке были сооружены две новые мусоросжигательные установки. Кроме того, мусоросжигательные установки вне площадки производят большое количество золы. Консервативная политика обращения с отходами в Японии требует дальнейшего уменьшения объема золы, о чем будет говориться ниже.

На рис. 28 показана блок-схема, демонстрирующая процесс обработки загрязненного грунта и отходов после аварии на АЭС «Фукусима-дайити». После аварии остатки от сжигания загрязненной растительности (например, опавшие листья и приставший к ним грунт), собранной в восточной Японии, содержали радиоактивный цезий. Отходы сжигались при температуре более 800°C, при этом большая часть цезия улетучивалась или испарялась, переносилась с дымовыми газами и задерживалась в цилиндрических фильтрах.

Вне площадки АЭС «Фукусима-дайити» имеются полигоны достаточной вместимости для хранения грунта. Однако ресурс для хранения относительно высокоактивной золы вскоре будет исчерпан, в связи с чем были разработаны различные технологии уменьшения объема или дезактивации. Один из простых методов — это промывка золы, которая эффективна при

ТАБЛИЦА 3. ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ МЕТОДОВ ДЕЗАКТИВАЦИИ НА АЭС ТМА [1]

[illegible]

ТАБЛИЦА 3. ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ МЕТОДОВ ДЕЗАКТИВАЦИИ НА АЭС ТМА [1] (продолжение)

Ситуация	Промывка под низким давлением	Промывка под высоким давлением	Многоплоскостная промывка	Повторный залив	Заполнение и выщелачивание	Простые инструменты	Сухая/влажная чистка пылесосом	Механическая скрубберная очистка	Окошка гидрониструментом	Рыхление гидрониструментом	Окошка	Рыхление	Чистка паровым пылесосом	Сухая абразивно-струйная обработка	Жидкая абразивно-струйная обработка	Насадка на гибком шланге	Снимающиеся покрытия	Самостоятельно снимающиеся покрытия	Химические пены	Ресурсы/моющие средства
Загрязнение порых/пористых стенных бетонных блоков				П	П															
Большая площадь, насыщенное/внутреннее загрязнение				П	П															
Загрязненное оборудование	X	X				X	X						П	С				С		X
Загрязнение внутренних трубопроводов																П				
Загрязнение внешних труб, кабельных лотков, соединительных коробок и т.д.						X	X						П						П	

^a П: превосходный эффект.

^b С: средний эффект.

^c X: хороший эффект.

Примечание. Пустое поле означает «неприменимо».

ТАБЛИЦА 4. СВОДНЫЕ ДАННЫЕ О ТЕХНОЛОГИЯХ ОБРАБОТКИ ТВЕРДЫХ РАДИОАКТИВНЫХ ОТХОДОВ [128–138]

Тип отходов	Применимые технологии				
	Сжигание	Компакти- рование	Дезактивация	Дробление	Компости- рование
О: технология отработана и широко применяется; Р: технология находится в стадии разработки или имеет ограниченное применение; пробел: технология неприменима к данному потоку отходов.					
Горючие	О ^a	О			
Негорючие		О			
Обломки навалом			О		
Металлические твердые		О	О	О	
Грунт навалом			Р ^c		
Зольный остаток от сжигания		О			
Растительность	О	О		О	О

^a О: технология отработана и широко применяется.

^b н.п.: технология неприменима к данному потоку отходов.

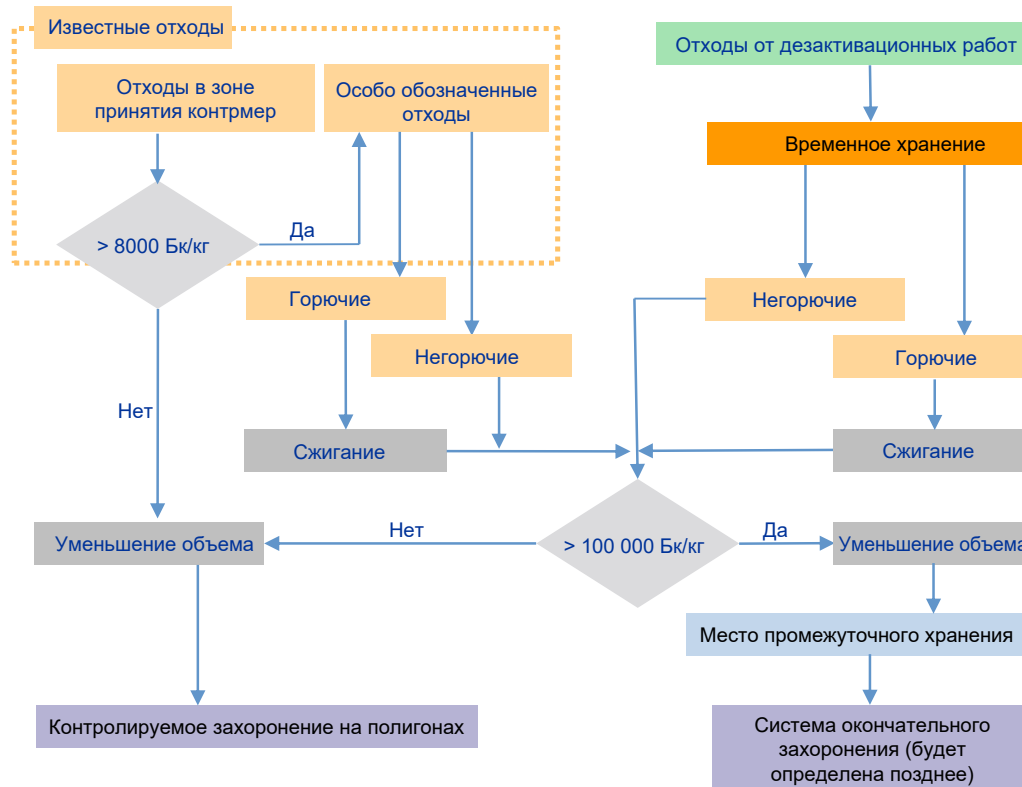
^c Р: технология находится в стадии разработки или имеет ограниченное применение.

сжигании летучей золы из твердых бытовых отходов, поскольку радиоактивный цезий содержится в ней в водорастворимой форме. Существуют и другие термические процессы для выведения радиоактивного цезия с эффективностью до 99,9% из таких материалов, как грунт, зола и другие отходы. Может быть эффективной также система плавления золы.

8.2.1.3. Обработка твердых отходов на АЭС «Три-Майл-Айленд»

На АЭС ТМА около 75% отходов, образовавшихся после аварии, были отнесены к категории сухих активированных отходов (САКТО) [1], в результате чего образовалось ~3800 м³ САКТО. Эта категория была подразделена на компактированные отходы (~36%), некомпактированные отходы (~60%) и стабильные САКТО (~3%). В категорию стабильных САКТО вошли отходы, концентрация изотопов в которых (из-за высокого содержания ⁹⁰Sr и ТРУ элементов) не позволяла производить захоронение на коммерческих пунктах захоронения класса А. Поэтому эти отходы потребовалось поместить в высокопрочные контейнеры (ВПК; подробнее см. в разделе 8.3), чтобы облегчить их захоронение в системах захоронения класса В или С.

Поток отходов в пределах префектуры Фукусима



Поток отходов за пределами префектуры Фукусима

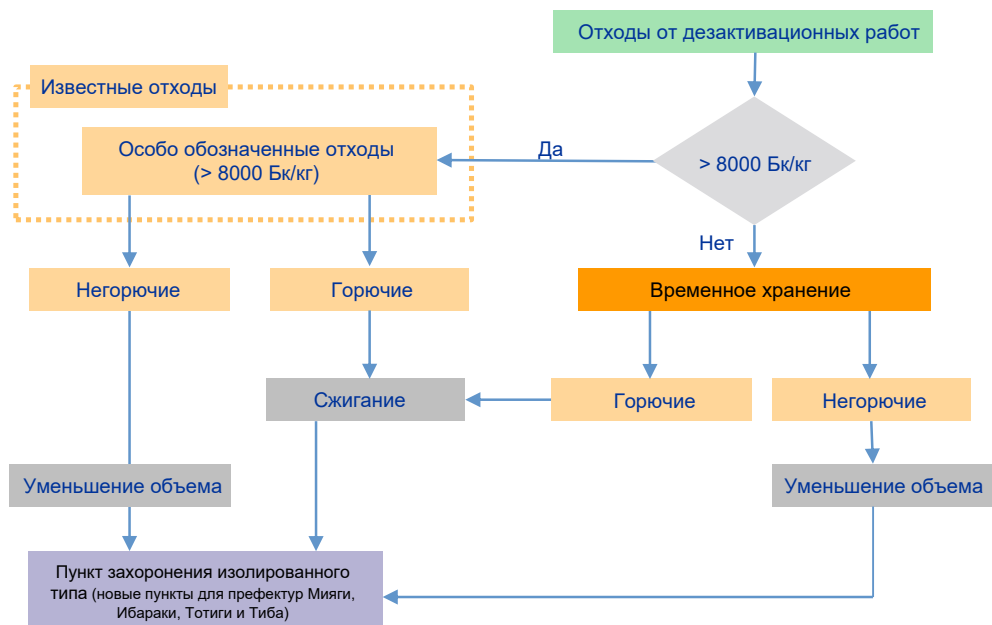


РИС. 28. Блок-схема процесса обработки загрязненного грунта и отходов в префектуре Фукусима и за ее пределами [139].

8.2.2. Жидкие отходы

Хранение загрязненных жидкостей в течение длительного времени ввиду их высокой подвижности в целом не считается положительной практикой, и поэтому обычно применяется та или иная форма обработки для удаления или концентрирования и последующего отверждения жидкости. Базовые методы обработки жидких радиоактивных отходов описаны в целом ряде других публикаций, например в [49, 140–149], и перечислены в таблице 5. Методы обработки включают фильтрацию, ионный обмен (включая как общие катион-анионные методы, так и специфические ионообменные среды), выпаривание, химическое осаждение и мембранные методы.

Опыт, полученный на АЭС ТМА, был напрямую заимствован АЭС «Фукусима-дайити» в качестве основы для нескольких систем очистки жидкостей, которые были созданы. Например, в системе удаления цезия KURION в качестве сорбента выступает цеолит; на АЭС ТМА цеолит с успехом использовался для очистки загрязненной воды [150]. Органические жидкости также могут обрабатываться сжиганием и при помощи других методов окисления. Небольшие объемы жидкостей часто обрабатываются методом прямой иммобилизации.

8.2.2.1. Обработка жидких отходов на Чернобыльской АЭС

На Чернобыльской АЭС основная масса непереработанных жидких радиоактивных отходов (не считая радиоактивно загрязненных вод, намеченных к переработке, и органических жидких радиоактивных отходов) находится в следующих хранилищах:

- a) хранилище жидких радиоактивных отходов;
- b) хранилище жидких и твердых радиоактивных отходов.

Первоначально эти объекты предназначались для хранения жидких отходов эксплуатации после их обработки (т.е. уменьшения объема) путем выпаривания в процессе работы станции. Были специально спроектированы хранилища для трех потоков отходов:

- 1) донный концентрат испарителя;
- 2) ионообменные смолы;
- 3) пульпа (фильтровальный перлит).

В настоящее время в емкостях для хранения содержится около 20 000 м³ жидких отходов, из которых примерно 13 500 м³ — это донный концентрат испарителя. В 2006 году для переработки этих отходов был построен ЗПЖРО. В 2014 году были проведены активные испытания станции и были сформированы 63 упаковки с иммобилизованными жидкими радиоактивными отходами, которые в 2018 году были отправлены на комплекс «Вектор» для захоронения. В середине 2019 года ЗПЖРО был полностью пущен в строй, и он будет также обрабатывать радиоактивно загрязненную воду, извлеченную из объекта «Укрытие». Эта вода содержит большое количество трансурановых радионуклидов, а также органические вещества и другие материалы, применявшиеся для пылеподавления.

8.2.2.2. Обработка жидких отходов на АЭС «Фукусима-дайити»

К числу особых проблем при работе с жидкостями, образовавшимися в результате аварии на АЭС «Фукусима-дайити», относятся большие объемы, сложный или разнородный химический состав и невозможность (или нежелание) сбрасывать радиологически «чистую», обработанную воду. Сложность и изменчивость жидких отходов обусловила необходимость налаживания многоступенчатого процесса с использованием сочетания разных технологий, как показано на рис. 29.

ТАБЛИЦА 5. СВОДНЫЕ ДАННЫЕ О ТЕХНОЛОГИЯХ ОБРАБОТКИ ЖИДКИХ РАДИОАКТИВНЫХ ОТХОДОВ [49, 140–149]

Тип отходов	Применимые технологии				
	Сжигание	Фильтрация/ ультрафильтрация/ обратный осмос	Ионный обмен ^а	Выпаривание	Химическое осаждение
О: технология отработана и широко применяется; Р: технология находится в стадии разработки или имеет ограниченное применение; пробел: технология неприменима к данному потоку отходов.					
Низкоактивные водные		О	О	О	О
Низкоактивные органические	О				
Высокоактивные водные		О/Р	О/Р		О/Р

^а Список сред в системе водоочистки на АЭС «Фукусима-дайити»:

- емкость для адсорбции цезия (KURION) ($1,7 \times 10^{17}$ Бк/емкость (^{137}Cs));
- цеолит (SMZ, H, AGH, EH, KH);
- вторая емкость для адсорбции цезия (SARRY) ($9,0 \times 10^{16}$ Бк/емкость (^{137}Cs));
- цеолит (IE-96, IE-911);
- устройство для дезактивации ($8,0 \times 10^{14}$ Бк (^{137}Cs));
- шлам;
- ALPS;
- активированный уголь, титанат, ферроцианидный материал, активированный уголь, пропитанный Ag, оксид титана, хелатная смола и смоляной адсорбент.

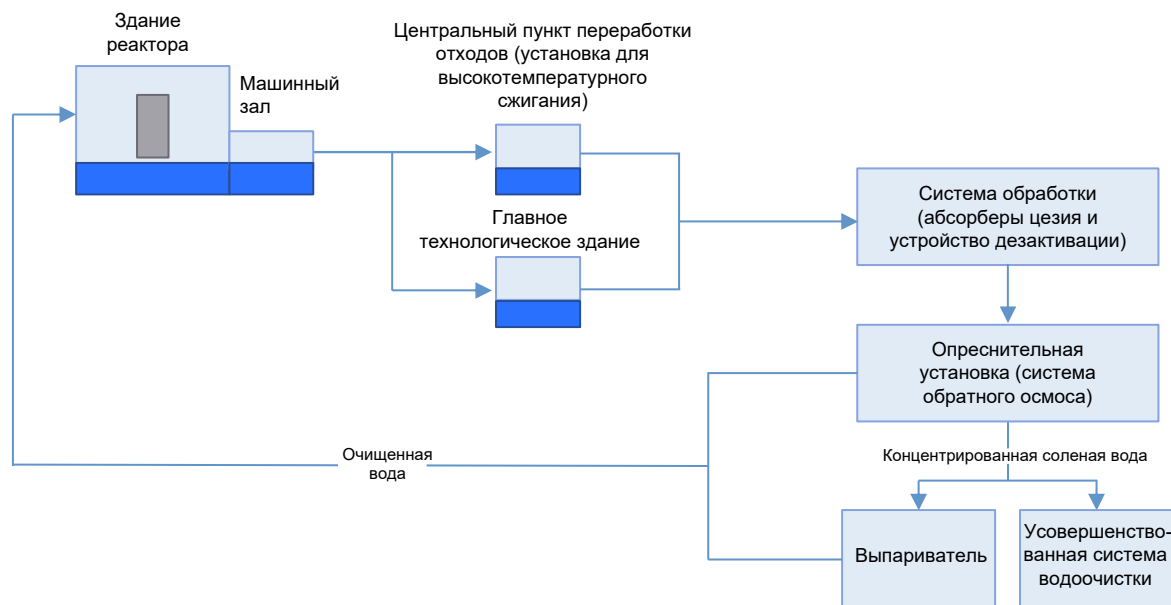


РИС. 29. Схема базовой системы очистки загрязненной воды на АЭС «Фукусима-дайити».

Абсорберы заполняются цеолитом для удаления цезия при помощи системы KURION (см. таблицу 5, сноска а). К главным абсорбентам цезия, используемым в этой системе, относятся:

- а) цеолит, модифицированный поверхностно-активными веществами;
- б) гершелит;
- с) гершелит, пропитанный серебром.

Кроме того, во втором абсорбенте цезия используются ^{96}IE (цеолит-шабазит) и ^{911}IE (кристаллический силикотитанат). После использования абсорбенты цезия хранятся на площадке. Был создан мобильный аналог водоочистной системы для очистки сильно загрязненной воды (рис. 30).

После удаления цезия вода проходит дальнейшую обработку. Для повышения глубины очистки загрязненной воды была внедрена система ALPS (см. рис. 29). На существующих очистных установках было сложно удалять другие радиоактивные материалы, помимо цезия, но установка по удалению нескольких радионуклидов ALPS способна удалять большинство радиоактивных материалов, за исключением трития. После очистки на ALPS вода хранится в резервуарах. К концу 2019 года почти в тысяче резервуаров хранилось более миллиона кубометров очищенной воды с низким содержанием трития в ожидании решения правительства о ее окончательной судьбе. Одним из рассмотренных вариантов является сброс в море, который, по оценкам МОС, повлечет за собой незначительную дозу облучения населения в размере менее 0,1 мкЗв/год — более чем на четыре порядка ниже естественного фона [151].

8.2.2.3. Обработка жидких отходов на АЭС «Три-Майл-Айленд»

На АЭС ТМА за время проведения работ по ликвидации последствий аварии было переработано более семи миллионов литров воды [2]. Очистка и обработка воды происходила в четыре этапа:

- а) этап 1: стабилизация ситуации, перемещение воды в стабильные места и, по возможности, очистка воды;
- б) этап 2: крупномасштабная очистка воды и захват радионуклидов;
- с) этап 3: поддержание очищенной воды в приемлемом состоянии для повторного использования или утилизации;
- д) этап 4: очистка и подготовка воды для окончательной утилизации.

На рис. 31 показана хронология обработки воды на АЭС ТМА. Вскоре после аварии, в 1979 году, деятельность, связанная с водой, была сосредоточена на локализации загрязненной воды и переработке/сбросе сточных вод, не связанных с аварией. В 1980 году была переработана вода из вспомогательного здания. Вода в подвале здания гермообъема перерабатывалась в течение двух лет — с 1981 по 1982 год. С 1982 по 1985 год производилась очистка теплоносителя реактора. Наконец, в период выгрузки топлива (1985–1990 годы) очищались воды, образующиеся в процессе выгрузки. Начиная с 1990 года находившиеся в хранилищах очищенные воды обрабатывались методом выпаривания.

На рис. 32 показана принципиальная схема переработки воды, применявшаяся на АЭС ТМА. Сразу же после аварии была выявлена необходимость в системе водоочистки. В течение семи дней после аварии была установлена и введена в строй система EPICOR I [1], первоначально для очистки воды во вспомогательном здании. За 1,5 года работы система EPICOR I удалила приблизительно 9×10^{12} Бк (244 Ки). Стало понятно, что система EPICOR I не справляется с большими объемами воды, требующими обработки, результатом чего стали проектирование и монтаж системы EPICOR II. Система EPICOR II была установлена в аттестованном на сейсмостойкость здании химической очистки и устроена таким образом, чтобы облегчить



РИС. 30. Мобильная система очистки загрязненной воды в главной траншее АЭС «Фукусима-дайити». Публикуется с разрешения Токийской электроэнергетической компании.

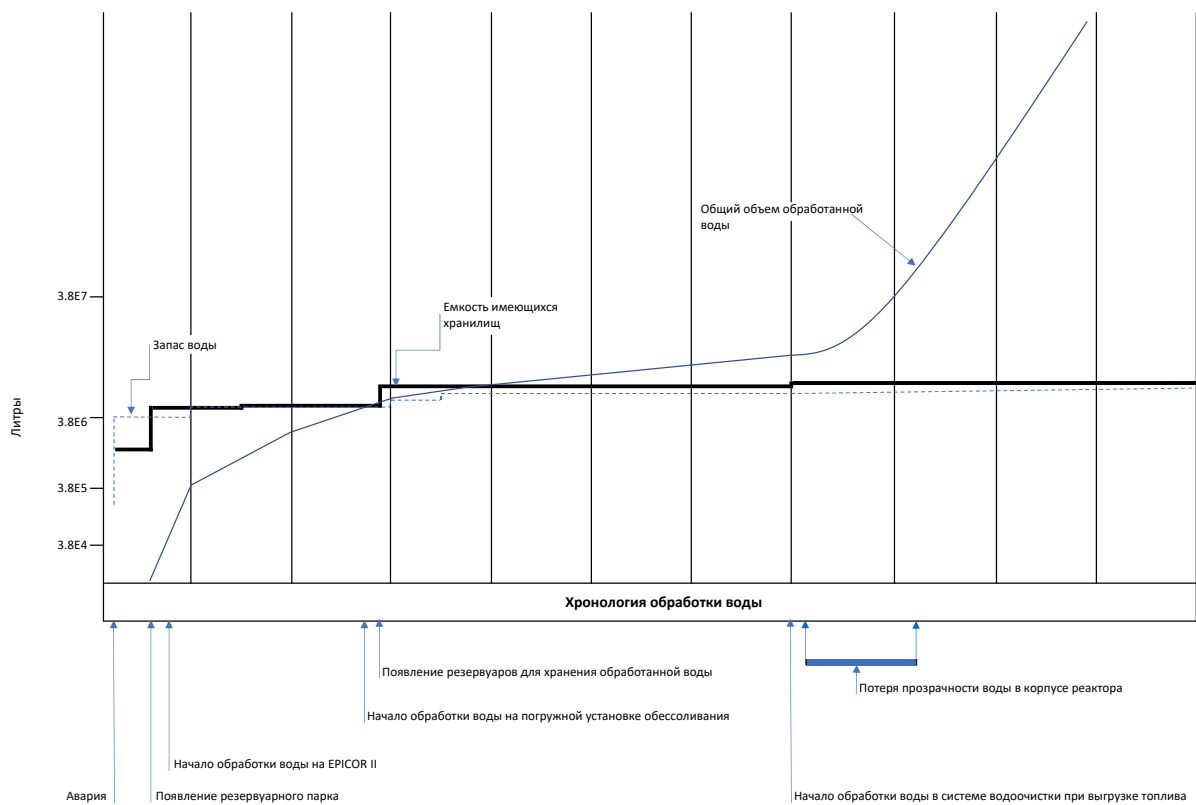


РИС. 31. Хронология обработки и хранения воды во время ликвидации последствий аварии на ТМА-2. Взято с изменениями из [2].

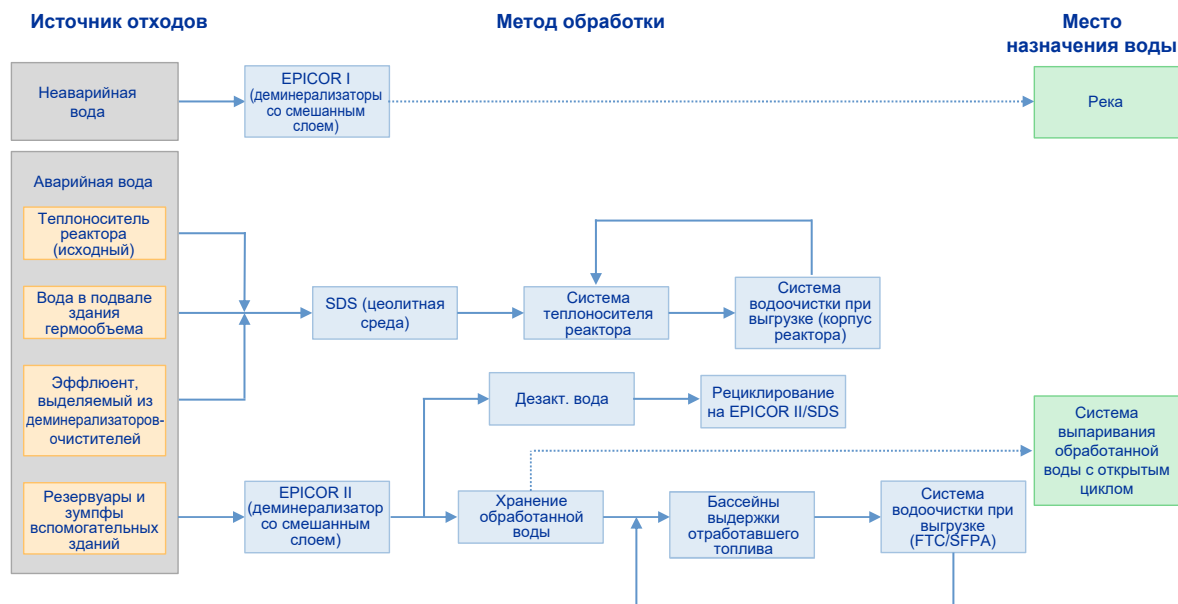


РИС. 32. Принципиальная схема переработки воды на ТМА-2. Взято с изменениями из [2].

установку и извлечение картриджей с ионитом при помощи монорельса. Это здание уже имело систему вентиляции и могло обеспечить необходимое экранирование для высоконагруженных слоев ионита. Система EPICOR II удалила приблизительно 3×10^{15} Бк (80 000 Ки) с помощью органических, цеолитных (шабазит) и угольных сред. Схематическое изображение резервуара EPICOR II приведено на рис. 33, а резервуары EPICOR II, установленные в здании химической очистки, показаны на рис. 34.

В бассейне выдержки отработавшего топлива В была установлена SDS [1]. Эта система была предназначена для обработки высокоактивных жидких отходов, содержащихся в подвале здания гермообъема реактора, системе теплоносителя реактора и системе подпитки и очистки, активность которых превышала $3,7 \times 10^9$ Бк/л (100 мКи/мл). Система была тщательно испытана в лабораторных условиях для оптимизации конструкции и производительности [153]. Перед подачей в ионообменные колонны со слоем ионита вода, подлежащая очистке, проходила молекулярную фильтрацию через цеолитовый фильтр. Система работала в нескольких последовательных и параллельных режимах, используя комбинацию цеолита (шабазита) и песчаной среды. После очистки в SDS воды были дополнительно очищены системой EPICOR II. При помощи системы SDS было удалено более $2,6 \times 10^{16}$ Бк (700 000 Ки) активности. Бак SDS в поперечном разрезе показан на рис. 35.

Система водоочистки при выгрузке топлива была спроектирована для удаления твердых частиц и поддержания концентраций Cs и Sr в разумных пределах во время выгрузки. При помощи цеолитной среды системы было удалено более $2,6 \times 10^{14}$ Бк (7000 Ки) активности, а системы фильтрации позволили удалить твердые частицы, чтобы сохранить прозрачность воды во время выгрузки.

Утилизация воды после очистки превратилась в серьезную проблему на АЭС ТМА, в первую очередь из-за остаточных концентраций трития. Хотя сброс в реку привел бы к столь сильному разбавлению воды, что первый потребитель, находящийся ниже по течению, подвергся бы облучению в размере $< 6\%$ от нормативного предела, в тот период прямой сброс был невозможен по политическим соображениям [2]. По этой причине были сконструированы резервуары для хранения из нержавеющей стали. К 1986 году объем накопленной воды составил $\sim 7,5$ млн л. На

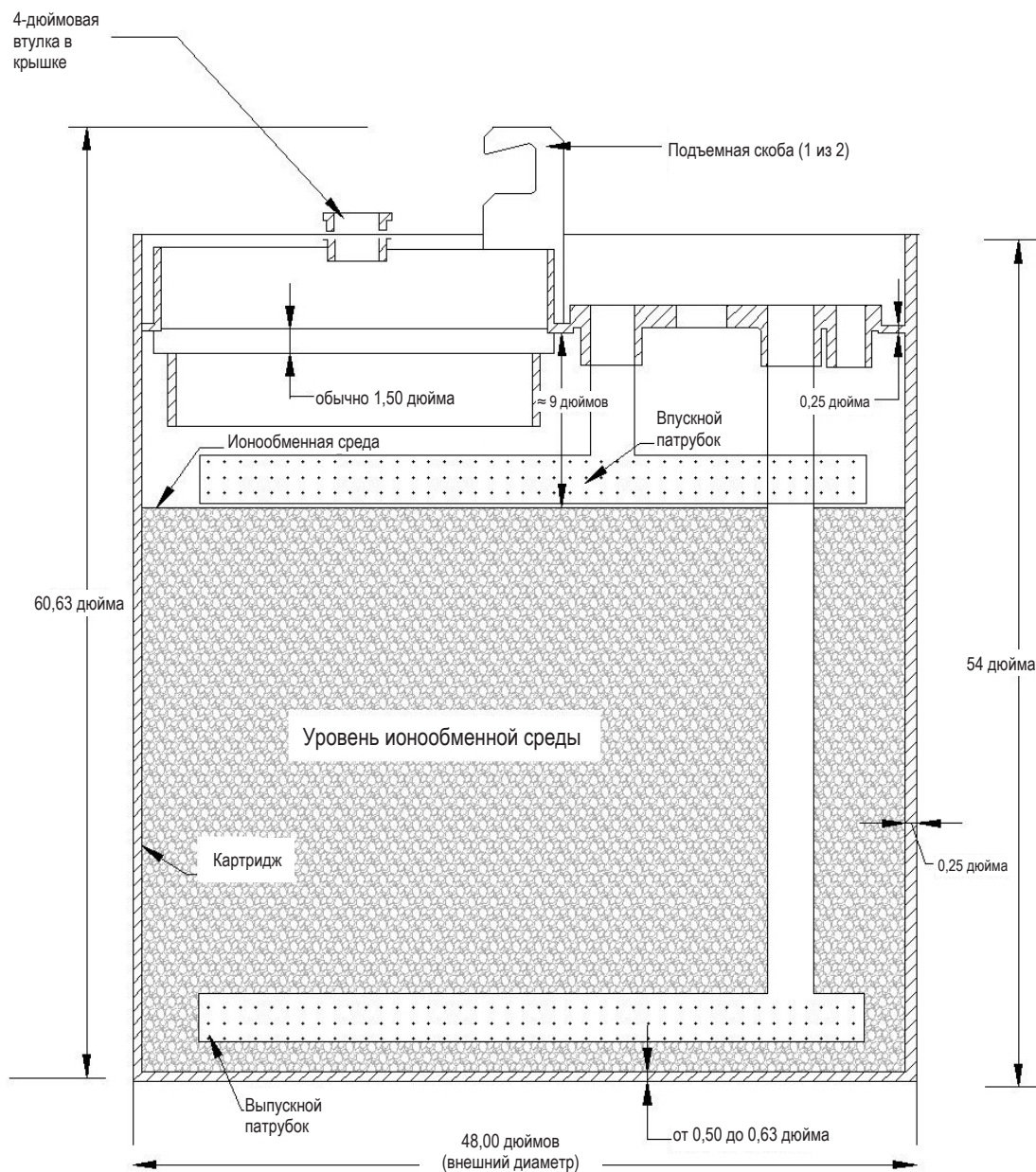


РИС. 33. Поперечный разрез прототипа ионообменного резервуара EPICOR II. Взято с изменениями из [2].

момент аварии концентрация трития в воде составляла $\sim 3,7 \times 10^7$ Бк/л (1 мкКи/мл), но она упала до $\sim 7,4 \times 10^6$ Бк/л (0,2 мкКи/мл) в результате перемешивания источников воды, испарения и распада трития. В процессе принятия решения о наилучшем способе очистки воды рассматривались следующие три варианта:

- сброс в реку;
- выпаривание;
- иммобилизация в бетонных плитах.

В качестве метода утилизации было выбрано выпаривание, хотя этот вариант был признан самым дорогостоящим, и был установлен испаритель. Система выпаривания состояла из двух

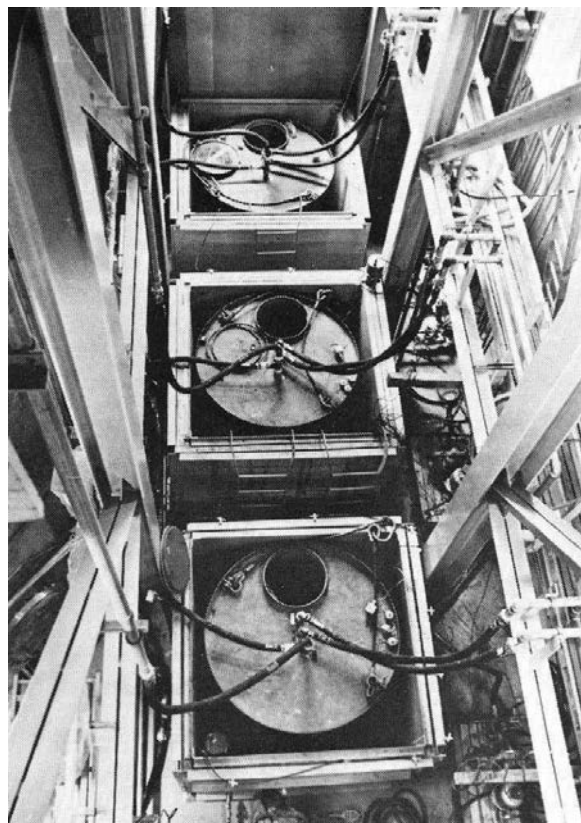


РИС. 34. Резервуары EPICOR II, установленные в здании химической очистки ТМА-2. Публикуется с разрешения Айдакской национальной лаборатории и Комиссии по ядерному регулированию США [152].

подсистем, одна из которых была предназначена для выпаривания, а другая — для упаковки. Концентрированный раствор непрерывно циркулировал через бак концентратора. Получаемые в результате осадки из бака концентратора отправлялись в сушилку и гранулятор для последующего захоронения в качестве НАО на коммерческой установке. В публикации «The Cleanup of Three Mile Island Unit 2 — A Technical History: 1979–1990» («Восстановительные мероприятия на энергоблоке № 2 АЭС "Три-Майл-Айленд" — техническая история: 1979–1990 годы») [2] рассказывается о процессах принятия решений, использованных для определения и выбора систем водоочистки.

8.2.3. Газообразные отходы

Базовые методы обработки газообразных отходов включают фильтрацию или скрубберную очистку с помощью системы вентиляции с последующим выбросом в атмосферу. Для контроля и повышения точности управления выбросами необходим мониторинг газообразных выбросов на выходе вытяжной системы. Возможно, потребуется установить надлежащую вентиляцию или усилить мощность существующей вентиляционной системы.

По оценкам, на АЭС ТМА после аварии внутри здания гермообъема реактора осталось $\sim 1,6 \times 10^{15}$ Бк ($\sim 43\,000$ Ки) ^{85}Kr [42]. Чтобы восстановить доступ в здание и избежать дальнейших неконтролируемых выбросов Kr, владелец и регулирующий орган оценили несколько подходов к осуществлению его выброса и подготовили консервативные оценки дозы облучения населения и программу информационной работы с общественностью. В июне — июле 1980 года Kr был



РИС. 35. Поперечный разрез резервуара SDS на TMA-2. Взято с изменениями из [2].

выброшен в атмосферу посредством контролируемой продувки при метеорологических условиях, благоприятствующих рассеиванию.

Мусоросжигательные установки, используемые для обработки твердых и жидких отходов, генерируют вторичные газообразные отходы, которые также нуждаются в обработке. Каждая мусоросжигательная установка в Японии оснащена системой очистки дымовых газов, например рукавным фильтром или электростатическим газоочистителем (ЭГ). В некоторых случаях, в зависимости от характера отходов, цезий во время сжигания испаряется в форме хлорида, но при быстром охлаждении, имеющем целью не допустить регенерации диоксинов, цезий конденсируется и более 99,9% может быть эффективно уловлено рукавными фильтрами, а более 99% — при помощи ЭГ [154].

8.3. КОНДИЦИОНИРОВАНИЕ

Под кондиционированием понимаются операции, посредством которых радиоактивные отходы преобразуются в форму, пригодную для перемещения, транспортировки, хранения и/или захоронения. Кондиционирование часто включает в себя:

- иммобилизацию радионуклидов;
- контейнеризацию отходов;
- дополнительную упаковку (в транспортные пакеты).

Иммобилизация определяется как процесс преобразования отходов в некую форму отходов путем отверждения, помещения в матрицу или герметизации, чтобы уменьшить вероятность

миграции или рассеивания радионуклидов. Для многих потоков радиоактивных отходов иммобилизация проводится одновременно с кондиционированием или в тесной взаимосвязи с ним.

После обработки многие отходы нуждаются в дополнительном кондиционировании перед длительным хранением или захоронением. Существует множество стандартных методов кондиционирования, таких как цементирование, иммобилизация полимерами, остекловывание, контейнеризация и т.д. Они описаны в других публикациях, например в [125], и цитируемых в них источниках.

Кондиционирование радиоактивных отходов — это важный этап подготовки отходов к длительному хранению или захоронению. Кондиционирование может проводиться по разным причинам, включая стандартизацию практики и/или форм отходов, требования к стабильности отходов, основанные на конструкции хранилища или критериях обоснования безопасности, а также технические требования, связанные с перевозкой отходов, установленные другими нормативными документами или необходимые для удовлетворения предпочтений общества. Так или иначе, чтобы выбрать подходящие методы, следует четко уяснить основания для кондиционирования.

Кондиционирование является связующим звеном между сырыми или частично обработанными отходами и конечной формой, пригодной для долгосрочного хранения или захоронения. В этом смысле оно выполняет важную функцию безопасности в системах обращения с отходами и тесно связано как с предыдущими этапами обработки, так и с последующими этапами хранения или захоронения.

Ниже приводятся некоторые важные соображения, относящиеся к выбору и оценке подходящих методов кондиционирования аварийных отходов.

- a) Основной вариант должен хорошо зарекомендовать себя как способ кондиционирования радиоактивных отходов и быть известен как надежный и устойчивый в эксплуатационном отношении.
- b) Многие методы кондиционирования, такие как цементирование, приводят к значительному увеличению объема. Это необходимо надлежащим образом учесть при обращении с аварийными отходами большого объема, такими как грунт, обломки конструкций и прочий мусор. Часто оптимальным решением для отходов этих типов является простая упаковка с целью минимизировать увеличение объема.
- c) Большие объемы также предъявляют требования к производительности установок, чтобы отходы могли перерабатываться в разумные сроки. У существующей инфраструктуры по обращению с отходами зачастую нет необходимых мощностей, и поэтому она может оказаться непригодной для работы с большими объемами материала после ядерной аварии.
- d) Для аттестации подходящего метода может потребоваться проведение определенных НИОКР. Многие отходы, образующиеся после аварии, сложны в химическом отношении, изменчивы по составу и содержат вещества, которые могут помешать процессу кондиционирования (например, органический материал, тяжелые металлы, мелкодисперсные частицы, хлориды, сульфаты, химически активные металлы, такие как алюминий и магний, и т.д.).
- e) Метод кондиционирования должен быть применим ко многим видам отходов. Например, железобетонный ВПК оказался приемлемым для утилизации смол и других сорбентов, полученных в результате водоочистки на АЭС ТМА. Футеровка ВПК была выполнена из коррозионно-стойкой стали. На дно ВПК был добавлен буферный материал для регулирования pH. ВПК закрывался путем приклеивания крышки к корпусу с помощью адгезивного геля и цементного раствора. Газоотводная система позволяла стравливать образующиеся радиолитические газы. Схематическое изображение железобетонного ВПК показано на рис. 36.
- f) Для эффективной разработки метода кондиционирования важно получить результаты изучения пригодности данной формы отходов для утилизации и определить требования к переработке с точки зрения безопасности утилизации.
- g) Представляется целесообразным кондиционирование при помощи методов *in situ* [128].

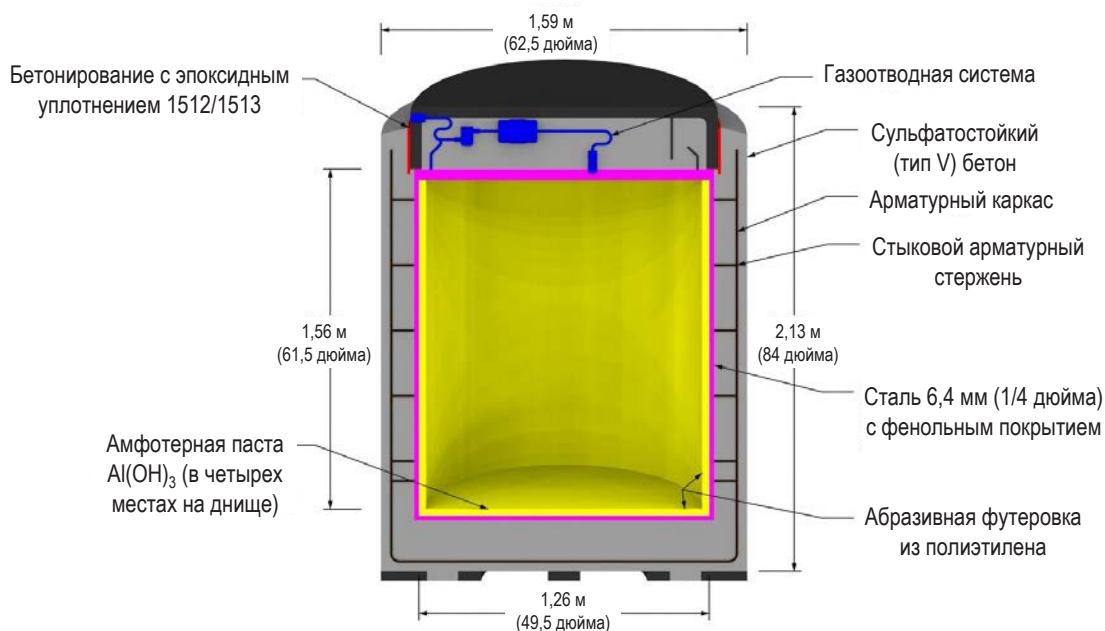


РИС. 36. Схематическое изображение конструкции железобетонного ВПК. Взято с изменениями из [2].

h) Необходимо оценить следующие аспекты рассматриваемых методов:

- концепция: вариативность, гибкость, размер, вместимость, удаленность и т.д.;
- свойства: достоинства/недостатки, ограничения, требования, возникшие проблемы и т.д.;
- условия обработки: температура, давление, контейнер, локализация и т.д.;
- производительность и опыт.

Наиболее часто используемой матрицей для иммобилизации как твердых, так и жидких отходов является, безусловно, цемент благодаря его низкой стоимости, долговечности и универсальности. Для оптимизации его характеристик при работе с разными типами отходов можно использовать различные добавки. Оборудование для цементирования позволяет работать с очень малыми объемами (например, литровыми порциями) или осуществлять крупные непрерывные операции (много кубометров в день). Более подробную информацию об оборудовании и системах иммобилизации можно найти в других источниках, например в [130, 135, 143, 144, 148, 149].

8.3.1. Твердые отходы

Твердые отходы могут быть кондиционированы путем иммобилизации либо прямой упаковки. Иммобилизация может быть гетерогенной (герметизация) либо гомогенной (смешивание твердых отходов с вяжущим веществом, например цементным раствором). Герметизация часто используется для заполнения пустот в контейнерах или для окружения крупных объектов (например, металлических деталей, обломков и т.д.) в контейнере, в то время как гомогенная иммобилизация применяется для твердых частиц (например, золы, ионообменных смол, грунтов и т.д.), которые можно легко «замешать» в вяжущее вещество. Данные об общедоступных технологиях сведены в таблицу 6.

ТАБЛИЦА 6. СВОДНЫЕ ДАННЫЕ О ТЕХНОЛОГИЯХ КОНДИЦИОНИРОВАНИЯ ТВЕРДЫХ РАДИОАКТИВНЫХ ОТХОДОВ

Тип отходов	Применимые технологии				
	Гомогенное цементирование	Цементирование с герметизацией	Остекловывание	Расплавление металла	Иммобилизация полимерами
О: технология отработана и широко применяется; Р: технология находится в стадии разработки или имеет ограниченное применение; пробел: технология неприменима к данному потоку отходов.					
Зольный остаток от сжигания	О		О		
Негорючие	О	О	О		О
Ионообменные среды	О				О
Обломки навалом ^а		О	Р		
Металлические твердые	О	О		О	О
Грунт навалом ^а	О		Р		

^а Следует отметить, что большие объемы низкоактивных сыпучих материалов могут не нуждаться ни в каком кондиционировании, кроме укладки в подходящие контейнеры (большой емкости).

При работе с большими объемами отходов, образующихся в результате ядерной или радиологической аварии, необходимо учитывать и оценивать следующие важные аспекты:

- общие требования к кондиционированию, включая критерии приемлемости отходов;
- доступные технические возможности: вариативность, гибкость, размер, вместимость, удаленность, местонахождение, стационарную или мобильную конструкцию, централизованную или распределенную систему, стоимость и т.д.;
- технические особенности процесса: преимущества, недостатки, ограничения, нормативные и другие требования и т.д.;
- условия работы и технологического процесса: температуру, давление, контейнер, локализацию, экранирование и т.д.;
- общую производительность системы и опыт эксплуатации.

Для иммобилизации радиоактивных отходов с целью упростить их захоронение широко используются цементируемые формы благодаря своей низкой стоимости. На характеристики цементируемой формы отходов может повлиять ряд нижеперечисленных факторов, влияние которых можно смягчить с помощью композиции цементного раствора, гибкости технологического процесса, особенностей упаковки или хранения:

- а) количество, тип и геометрия химически активных металлов;

- b) замедляющие агенты, такие как оксид цинка (ZnO), бораты и некоторые органические вещества (хотя цинк обычно используется в качестве замедлителя, со временем он может привести к механическому укреплению цемента);
- c) ускоряющие агенты, такие как лимонные кислоты или соли алюминиевой кислоты (зависит от начальной концентрации лимонной кислоты, поскольку она может также замедлить схватывание; соли алюминиевой кислоты также могут влиять на стабильность размеров, особенно для жидких отходов);
- d) вещества, негативно влияющие на гидратацию цемента, такие как полиэтиленгликоль;
- e) присутствие органики, которая может влиять на подвижность радионуклидов;
- f) присутствие органики, которая может влиять на скорость коррозии химически активных материалов;
- g) условия хранения;
- h) присутствие хлоридов в низких концентрациях, компенсируемое цементами с высоким pH;
- i) присутствие органики/свободных жидкостей и влияние на микробиологическую коррозию;
- j) присутствие органики, потенциально действующей как пенообразующее/воздухововлекающее вещество;
- k) высокое содержание воды и низкое качество цементного порошка, ведущее к снижению прочности продуктов.

На АЭС «Фукусима-дайти» проводится ряд экспериментов по отверждению неорганических матриц (например, цемента, геополимера, растворимого и обычного стекла) с использованием синтетического материала, состоящего из вторичных отходов, образующихся при очистке загрязненной воды (например, цеолита, шлама). Требования к хранению также снижаются благодаря повторному использованию материалов. Другие виды деятельности включают сбор информации о технологиях обработки и кондиционирования существующих отходов и представление перспективных методов кондиционирования, которые могут быть применены для отходов, характеристики которых лучше изучены (вторичные отходы водоочистки, обломки конструкций, дерева и т.д.) [155].

В дополнение к установкам по цементированию и упаковке завод по переработке твердых отходов в зоне отчуждения Чернобыльской АЭС будет оснащен оборудованием для разделения/сортировки, а также установками для сжигания и суперкомпактирования. Однако большинство отходов, которые в настоящее время захоронены в траншеях и буртах, не прошли предварительного кондиционирования и, по всей вероятности, могут быть оставлены на месте. Предполагается, что отходы, находящиеся в большинстве траншей, будут оказывать незначительное воздействие на окружающую среду в течение следующих 500 лет — срока, предусмотренного для освобождения пунктов захоронения НСАО комплекса «Вектор» от регулирующего контроля. Тем не менее в отношении некоторого количества траншей и буртов с повышенной активностью планируется провести рекультивационные мероприятия. Отходы будут извлечены и либо переработаны, либо переправлены в более подходящие места, в том числе на пункты приповерхностного захоронения комплекса «Вектор». ВАО и другие отходы, которые в настоящее время захоронены на ПЗРО «Подлесный», будет необходимо извлечь и разделить на потоки, которые будут упакованы и отправлены на глубокое геологическое захоронение, и потоки, которые могут быть переработаны или упакованы для приповерхностного захоронения. Отходы с ПЗРО «III очередь ЧАЭС» могут обрабатываться аналогично отходам с ПЗРО «Подлесный».

На АЭС ТМА для удовлетворения требований к свободной воде и/или требований к стабилизированным отходам перед захоронением было необходимо производить отверждение некоторых отходов [1]. Около 100 бочек с дезактивационными растворами были отверждены полимерами производства компании «Доу». Шлам из отстойников был отвержден в бетонной матрице. Кроме того, перед разработкой ВПК с возможностью обезвоживания 11 ионообменных картриджей были отверждены бетоном.

Кроме того, были проведены демонстрационные испытания для оценки иммобилизации ионообменных материалов в полимерных и цементных матрицах [156]. Было также

продемонстрировано остекловывание цеолитной ионообменной среды в большом масштабе (для остекловывания содержимого одного картриджа). Однако после того как было разрешено произвести захоронение ионообменного материала в ВПК, выяснилось, что эти процессы иммобилизации не оправдывают затрат [157, 158].

8.3.2. Жидкие отходы

Как правило, жидкости считаются непригодными для окончательного захоронения в хранилище отходов. Таким образом, их необходимо обрабатывать и преобразовывать в твердую форму для долгосрочного хранения и последующего захоронения. Обычно существует два варианта утилизации водных жидких отходов: сброс относительно чистого материала в окружающую среду (например, в виде эффлюента) или иммобилизация в твердой матрице. Первый вариант рассматривался выше. Обычно жидкости кондиционируются в виде гомогенной смеси (т.е. смешиваются непосредственно с вяжущим веществом, образуя твердый монолит). Органические жидкости обычно обрабатываются посредством сжигания или иммобилизации. В данном разделе рассматривается иммобилизация/кондиционирование жидкостей в твердой матрице. Данные об общедоступных технологиях сведены в таблицу 7.

ТАБЛИЦА 7. СВОДНЫЕ ДАННЫЕ О ТЕХНОЛОГИЯХ КОНДИЦИОНИРОВАНИЯ ЖИДКИХ РАДИОАКТИВНЫХ ОТХОДОВ

Тип отходов	Применимые технологии				
	Гомогенное цементирование	Остекловывание	Расстекловывание	Иммобилизация полимерами	Геополимеры
О: технология отработана и широко применяется; пробел: технология неприменима к данному потоку отходов.					
Низкоактивные водные	О	О	О	О	О
Низкоактивные органические	О				
Высокоактивные водные	О	О			

Как уже упоминалось ранее, наиболее распространенным процессом иммобилизации жидких отходов является цементирование. Жидкие отходы, образующиеся в результате ядерной аварии, могут содержать компоненты, мешающие некоторым типичным процессам цементирования (например, органические материалы, тяжелые металлы, высокое содержание хлоридов и т.д.). Поэтому для составления подходящей композиции обычно требуется провести некоторые научные исследования и испытания. Такие жидкости также могут иметь различный состав, поэтому может потребоваться более одной композиции.

В таблице 8 приведены основные характеристики различных процессов цементирования, используемых в настоящее время. Как правило, для обработки отходов большого объема, образующихся в результате ядерных аварий, лучше всего подходят высокопроизводительные автоматизированные процессы.

ТАБЛИЦА 8. СРАВНЕНИЕ ПРОЦЕССОВ СМЕШИВАНИЯ ПРИ ЦЕМЕНТИРОВАНИИ [159]

Процесс	Преимущества	Недостатки
Смешивание в контейнере	— Высокая однородность продукта — Простое технологическое оборудование — Хороший КК — Пригоден для смешанных потоков отходов — Вариант с «потерянной лопастью» позволяет избежать образования вторичных отходов и снижает вероятность распространения загрязнения — Пригоден для небольших объемов отходов	— При использовании варианта с фиксированной лопастью образуются вторичные отходы от очистки лопастей и возникает возможность распространения загрязнения — Может потребоваться предварительная обработка отходов
Вальцовый смеситель	— Простое технологическое оборудование — Пригоден для смешанных потоков отходов — Не допускает образования вторичных отходов — Пригоден для небольших объемов отходов	— Неопределенная степень однородности продукта — Плохой КК — Может потребоваться предварительная обработка отходов
Барабанный смеситель	— Простое технологическое оборудование — Пригоден для смешанных потоков отходов — Не допускает образования вторичных отходов — Пригоден для небольших объемов отходов	— Неопределенная степень однородности продукта — Плохой КК — Может потребоваться предварительная обработка отходов
Проточный смеситель	— Высокая однородность продукта — Хороший КК — Пригоден для больших объемов отходов — Непрерывное действие	— Образование вторичных отходов — Может потребоваться предварительная обработка отходов — Высокие требования к техническому обслуживанию
Диспергирование	— Хорошо подходит для очень малых потоков отходов — Не требует смешивания	— Неопределенная степень однородности продукта — Может потребоваться предварительная обработка отходов

8.4. КОНТЕЙНЕРЫ И УПАКОВКА

Одним из ключевых факторов, который необходимо учитывать при предварительном планировании, является необходимость временного хранения больших объемов отходов, образующихся в результате аварии. Сбор и организация временного хранения отходов, зачастую в сжатые сроки после аварии, становятся необходимыми для того, чтобы уменьшить радиационное облучение населения и работников в результате распространения радиоактивных веществ. Временное разделение этих отходов по уровням радиоактивности и типу (плотности и форме) — эффективный способ защиты населения и работников от радиационного облучения. Также необходимо выбрать оптимальные контейнеры, чтобы сохранить способность к манипулированию и возможность извлечения. Контейнеры должны обеспечивать определенный уровень защиты отходов, а сами контейнеры должны выдерживать условия окружающей среды, если они будут храниться на открытом воздухе. Например, при контакте

органических материалов с водой происходит их разложение с образованием водорода и метана, которые могут представлять пожарную опасность. В случае более высокоактивных отходов опасным фактором может быть радиолиз, в связи с чем могут потребоваться контейнеры с газоотводной системой, позволяющие стравливать радиолитические и другие образующиеся газы; см., например, резервуар SDS на рис. 35 и ВПК на рис. 36.

Таким образом, материал контейнера должен быть совместим как с отходами, так и с условиями хранения. Некоторые материалы контейнеров, например углеродистая сталь без покрытия, могут подвергаться коррозии как внутри (из-за взаимодействия с отходами), так и снаружи (например, от атмосферной влаги). Эти проблемы встают тем острее, чем больше запланированная продолжительность хранения. Покрытия и футеровки, такие как резина, эпоксидные смолы и промышленные краски, могут обеспечить дополнительную защиту.

Отходы меньшего уровня активности часто можно собирать и хранить в гибких мешочных контейнерах объемом до нескольких кубических метров. При расчете прочности мешка следует учитывать, что он должен быть достаточно прочным, для того чтобы прослужить весь расчетный срок хранения без разрывов, и при этом давать возможность легкого обращения и вскрытия при извлечении отходов. Обе эти проблемы возникли при использовании мешочных контейнеров на АЭС «Фукусима-дайити» — первые пластиковые мешки были низкого качества и вскоре разорвались, а более прочные, использовавшиеся позже, было трудно вскрывать, когда отходы извлекались для переработки.

Для адекватного экранирования, особенно во временных или импровизированных контейнерах, используемых для хранения относительно высокоактивных НСАО, необходим металл большей толщины или другие плотные материалы, такие как бетон. Это связано с тем, что с точки зрения радиационной защиты металлический или бетонный контейнер более эффективен, чем пластиковый, для защиты от γ -излучения, испускаемого ^{134}Cs и ^{137}Cs в отходах. В таблице 9 приведены типы контейнеров, обычно используемых для твердых отходов, и области их применения.

На АЭС «Фукусима-дайити» используются временные или импровизированные контейнеры, пока содержащиеся в них отходы не будут обработаны или переправлены в специально оборудованное хранилище. САО (например, абсорбенты с высокой концентрацией ^{134}Cs и ^{137}Cs) изолируются и хранятся на АЭС «Фукусима-дайити» в бетонном контейнере в трубах прямоугольного сечения. Некоторые загрязненные отходы АЭС «Фукусима-дайити» также хранились в гибких пластиковых контейнерах [61]. Существует несколько типов таких контейнеров различной прочности и водонепроницаемости, и их выбор зависит от отходов и условий хранения. Как выяснилось, недорогие контейнеры часто оказываются неустойчивыми к ультрафиолетовому излучению и при использовании на открытом воздухе обычно приходят в негодность в течение года.

В некоторых случаях может быть использован легкодоступный контейнер большого объема, способный вместить крупный компонент или большое количество сыпучего материала. Эти контейнеры могут быть сложены в штабель внутри или снаружи временного хранилища, как показано на рис. 37 и 38. Этот тип хранения на открытом воздухе может применяться для хранения ОНАО, и необходимо проследить за тем, чтобы такие объекты размещались там, где они не будут подвержены воздействию наводнений и других природных явлений. Такие временные контейнеры изготавливаются по спецификациям для экстренного использования, и они могут быть непригодны для окончательного захоронения. Таким образом, такие контейнеры могут сами превратиться в отходы после того, как их опорожнят. Другим техническим решением может стать изготовление наружных контейнеров для захоронения, которые позволят отходам оставаться в их первоначальном временном контейнере. Например, в некоторых государствах-членах в качестве контейнеров для захоронения НАО используются большие грузовые ИСО-контейнеры, которые могут выполнять функцию таких наружных контейнеров.

Как уже говорилось ранее, в силу нормативных и политических проблем захоронение отходов сразу же после аварии на АЭС ТМА оказалось невозможным. Первоначально губернаторы штатов Вашингтон и Южная Каролина отказались принимать отходы АЭС ТМА на пункты захоронения НАО в Ханфорде, Вашингтон, и Барнуэлле, Южная Каролина. В конце 1979 года губернатор

ТАБЛИЦА 9. ТИПЫ КОНТЕЙНЕРОВ ДЛЯ ТВЕРДЫХ ОТХОДОВ, ОБРАЗУЮЩИХСЯ В РЕЗУЛЬТАТЕ КРУПНОЙ ЯДЕРНОЙ АВАРИИ

Тип контейнера	Примеры отходов	Примечание
Большой металлический контейнер (например, грузовой ИСО-контейнер и т.д.)	Тяжелые отходы, металлические отходы, высокоактивные отходы и т.д.	В контейнере могут храниться крупные компоненты, отходы высокой плотности, относительно высокоактивные отходы. Контейнер можно использовать на открытом воздухе.
Ящичный поддон	Металлические отходы, бетон, грунт и т.д.	В контейнере могут храниться крупные компоненты, отходы высокой плотности.
Цилиндрический контейнер	Металлические отходы, бетон, грунт, зола и т.д.	В контейнере могут храниться мелкие компоненты, отходы высокой плотности. Контейнеры из мягкой стали могут потребовать облицовки для защиты от коррозии.
Гибкий контейнер (например, пластиковый мешок)	Бетон, грунт, растения и т.д.	В контейнере могут храниться отходы, которые не повреждают пластиковый мешок, и отходы низкой плотности. Некоторые мешки армированы волокном для повышения прочности.
Бетонный контейнер	Отходы повышенной активности	Толстостенный бетон может обеспечить защиту от радиации.
Сыпучие отходы (без контейнера)	Бетон, грунт, растения и т.д.	Временное складирование собранного материала в ожидании последующей утилизации. Хранение навалом материалов с низкой степенью опасности.



РИС. 37. АЭС «Фукусима-дайти»: контейнеры для временного хранения отходов. Публикуется с разрешения Токийской электроэнергетической компании.



РИС. 38. АЭС «Фукусима-дайити»: места временного хранения отходов в пластиковых мешках.

штата Вашингтон дал разрешение на переправку отходов в Ханфорд, но прием отходов на пункт захоронения в Барнуэлле, Южная Каролина, был разрешен только в 1987 году [2]. Последующая доступность этих объектов облегчила захоронение отходов классов А, В и С (по американской системе классификации НАО [29]). Для перевозки этих отходов использовались существующие утвержденные транспортные пакеты.

В американской системе обращения с отходами отходы GTCC представляют собой особую проблему с точки зрения утилизации. Между КЯР США и МЭ США было заключено соглашение о том, что МЭ будет принимать отходы GTCC для проведения НИОКР с целью оценки технологий обработки, систем хранения и т.д. В нем были определены шесть типов отходов, которые могут быть утилизированы в системе МЭ:

- a) отходы EPICOR II;
- b) отходы SDS;
- c) реакторное топливо;
- d) отходы, загрязненные ТРУ элементами;
- e) смолы и фильтры систем подпитки и очистки;
- f) другие твердые радиоактивные отходы.

В 1981 году КЯР США отменила требование, касающееся отверждения смол EPICOR II, и были предприняты усилия по разработке средств для упаковки картриджей с ионитом с целью захоронения на объектах МЭ. Для захоронения смол из системы EPICOR II на площадке «Ханфорд» оказался пригодным железобетонный ВПК. Схема железобетонного ВПК, используемого на АЭС ТМА, показана на рис. 36.

Кроме того, были проведены обстоятельные исследования, касающиеся отходов SDS. Эти анализы показали, что вакуумное обезвоживание, вентиляция и инертизация — недостаточные средства для контроля образования радиолитического водорода. Поэтому для рекомбинации водорода и кислорода обратно в воду потребовалась система каталитической рекомбинации. В результате последующих испытаний в качестве рекомбинатора был выбран палладиевый катализатор на глиноземе. В результате было принято решение упаковать картриджи из SDS в ВПК с полиэтиленовой футеровкой и произвести захоронение отходов на площадке «Барнуэлл», Южная Каролина, как только будет разрешена перевозка на площадку «Барнуэлл».

На АЭС «Фукусима-дайити» шлам и отработавшие материалы адсорбента, образующиеся в ALPS (см. раздел 8.2.2.2), которая обрабатывает большие объемы загрязненной воды, перегружаются в высокопрочные контейнеры (ВПК; см. рис. 39), которые перевозятся во временное хранилище для хранения в трубах прямоугольного сечения.

На Чернобыльской АЭС используются два основных типа упаковки отходов. Твердые НАО и короткоживущие САО кондиционируются в бетонных контейнерах типа КЗ-3.0 объемом 3 м³ (рис. 40). Жидкие НАО и короткоживущие САО обрабатываются на ЗПЖРО и кондиционируются с помощью цементной смеси в металлических бочках для отходов типа МБ-0.2IV емкостью 0,2 м³ (рис. 41). Технические характеристики этих контейнеров приведены в таблице 10.

КЗ-3.0 — это бетонированный контейнер, обеспечивающий защиту персонала при перевозке и хранении/захоронении. Он лицензирован для использования на Чернобыльской АЭС. Контейнер оснащен двумя разными бетонными крышками — для перевозки и для длительного хранения или захоронения, которые также показаны на рис. 40.

Кондиционированные отходы доставляются в комплекс «Вектор» для захоронения в бетонных камерах. Стратегия захоронения предусматривает установку бочек в центральной части бетонных камер, а бетонные контейнеры размещаются так, чтобы образовать защищенный периметр вокруг бочек. Согласно этой стратегии размещения, бочки в каждой камере могут штабелеваться в семь ярусов, а бетонные контейнеры ставятся соответствующим образом, чтобы обеспечить защиту на протяжении всей операции по захоронению.

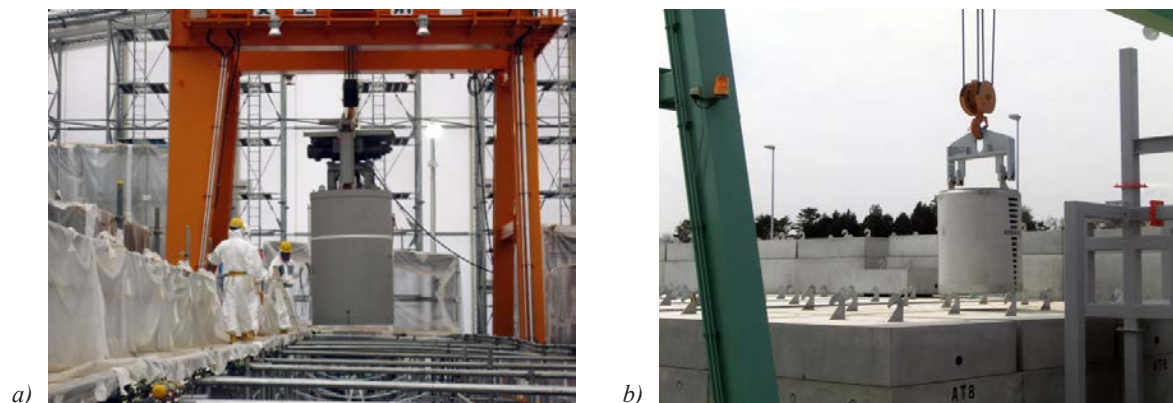


РИС. 39. ВПК, используемые для хранения шлама и отработавших адсорбентов, образовавшихся в результате очистки загрязненной воды на АЭС «Фукусима-дайити»: а) на ALPS и б) в зоне хранения. Публикуется с разрешения Токийской электроэнергетической компании.



РИС. 40. Бетонный контейнер КЗ-3.0, используемый на Чернобыльской АЭС: конфигурация для подъема и перемещения (слева); крышка для перевозки (в середине); хранение (справа). Публикуется с разрешения Государственного специализированного предприятия «Чернобыльская АЭС».



РИС. 41. Бочки МБ-0.2IV, используемые на Чернобыльской АЭС. Публикуется с разрешения Государственного специализированного предприятия «Чернобыльская АЭС».

На протяжении всего периода работ по ликвидации последствий аварии на Чернобыльской АЭС для отходов более высокого уровня активности, переправляемых на ПЗРО «Подлесный» или ПЗРО «III очередь ЧАЭС», использовались контейнеры разного типа. Более подробную информацию о контейнерах можно найти в других источниках (например, в [117]). Однако ни один из этих контейнеров не задумывался как долговременная упаковка для отходов, предназначенная для долгосрочной локализации и иммобилизации отходов. Локализация отходов обеспечивается мощными стенами и перекрытиями, используемыми в конструкции этих объектов, которые дополнительно изолированы от окружающей среды мощным слоем цемента, перекрывающим захороненные отходы. Кроме того, было разработано многослойное искусственное грунтовое покрытие, которое было уложено поверх обоих объектов, обеспечив дополнительную защиту от инфильтрации воды. Сыпучие отходы помещались в траншеи и бурты — контейнеры при этом не использовались.

Дополнительные рекомендации по контейнерам для аварийных ситуаций можно найти в других публикациях, например в [47, 49, 121, 160].

ТАБЛИЦА 10. СВОДНЫЕ ДАННЫЕ О КОНТЕЙНЕРАХ ДЛЯ ПЕРВИЧНЫХ ОТХОДОВ ЧЕРНОБЫЛЬСКОЙ АЭС

Технические данные	КЗ-3.0	МБ-0.2IV (бочка 200 л)
Проектный объем (м ³)	3,0	0,2
Внешняя длина (мм)	1 940	—
Внешняя ширина (мм)	1 940	593 (макс. наружный диаметр у крышки)
Внешняя высота (мм)	1 650	856
Толщина стенки (мм)	150	1,5
Собственный вес (кг)	5 600 (без крышки)	25
Вес крышки (кг)	1 000	—
Вес брутто (кг)	15 000	500
Материал	Железобетон	Углеродистая сталь
Применение	Твердые НСАО	Отвержденные жидкие НСАО

9. ПЕРЕВОЗКА И ПЕРЕМЕЩЕНИЕ

Основные извлеченные уроки

- Необходимо принимать в расчет транспортные операции как в пределах площадки (перемещение), так и за пределами площадки (перевозку).
- Для перевозки сыпучих предметов (грунта, обломков, растительности) могут потребоваться очень большие транспортно-упаковочные комплекты. Для крупногабаритных предметов (загрязненного оборудования и т.д.) также может потребоваться особый порядок перевозки. В силу ограничений на размер и массу транспортно-упаковочных комплектов размер упаковки для транспортировки некоторых материалов, возможно, потребуется уменьшить.
- Может потребоваться перевозка бестарных жидкостей.
- Высокая мощность дозы облучения (как от самих отходов, так и от окружающей среды) может потребовать использования дистанционно управляемых транспортных средств.
- В аварийных ситуациях строгое применение Правил перевозки МАГАТЭ может оказаться невозможным: одна из причин создания зоны отчуждения — устранить необходимость перевозки отходов через места общественного пользования.

В нормах безопасности МАГАТЭ, касающихся транспортной упаковки, даются руководящие указания по безопасной перевозке радиоактивных материалов. МАГАТЭ придерживается этих норм в своей деятельности, а государства-члены широко применяют эти нормы за счет включения их в собственные правила ядерной безопасности. Публикация Серии норм безопасности МАГАТЭ, № SSR-6 (Rev. 1), «Правила безопасной перевозки радиоактивных материалов» [44] периодически актуализируется; последняя редакция увидела свет в 2018 году [161]. К упаковкам и перевозочным

средствам применяется дифференцированный подход, в зависимости от опасности радиоактивного содержимого. Эти нормы могут использоваться в качестве ориентира при перевозке отходов после ядерной аварии.

К вышеуказанным нормам безопасности был подготовлен сопутствующий документ в форме справочного материала [44]. Задача этой публикации — более детально разъяснить идею о том, что требования к перевозке должны быть соразмерны опасности, изначально присущей перевозимому материалу, и обосновать это утверждение. В ней говорится о значении упаковки и отмечается, что по мере возможности адекватные средства безопасности должны предусматриваться уже на стадии проектирования упаковки. Делая акцент на надежности упаковки, можно не столь щепетильно подходить к организации перевозки, сведя к минимуму необходимость соблюдения особых условий перевозки.

Дополнительные руководящие указания по перевозке низкоактивных сыпучих отходов можно найти в публикации IAEA-TECDOC-1728 «Regulatory Control for the Safe Transport of Naturally Occurring Radioactive Material (NORM)» («Регулирующий контроль за безопасной перевозкой радиоактивного материала природного происхождения (РМПП)») [43]. В ней рассматриваются исключения из Правил безопасной перевозки радиоактивных материалов [44] для очень низкого уровня активности, присущего радиоактивным материалам природного происхождения [43]. Риск-ориентированные аргументы, приведенные в этой публикации, могут быть применимы к отходам большого объема с низкой активностью (например, грунтам, растительности, обломкам), образующимся в результате ядерной аварии.

Потребность в перевозке радиоактивных материалов будет возникать на протяжении всей программы обращения с отходами. Сложные и разнородные потоки отходов, ожидаемые после аварии, потребуют разнообразных транспортных контейнеров и методов перевозки. Потребности в перевозке отходов могут варьироваться от перевозки очень крупногабаритных предметов до перевозки мелких предметов в различных объемах и с самыми разными уровнями радиоактивности — от очень низкого до чрезвычайно высокого. Поэтому на этапе предварительного планирования необходимо, чтобы организация всесторонне оценила доступные способы и маршруты перевозки, предвосхитив потенциальные будущие потребности. Затем можно разработать планы чрезвычайных мер, в которых будут отражены результаты оценки. Например, для очень крупногабаритных предметов оптимальным решением может быть перевозка железнодорожным транспортом, но железнодорожная перевозка может быть недоступной для конкретного объекта. В планах чрезвычайных мер могут быть также рассмотрены возможности конструирования или приобретения больших контейнеров, готовых к перевозке автотранспортом, и/или определения реалистичных методов уменьшения размера.

Перевозка в пределах площадки (т.е. внутриплощадочное перемещение) осуществляется в соответствии с обоснованиями безопасности перевозки в пределах площадки и безопасности упаковки, соответствующими ситуации; например, вместо того чтобы полагаться на качество упаковки, можно использовать другие защитные меры для контроля дозы и воздействия, такие как дистанционное управление, локальное экранирование транспортного средства или принцип соблюдения определенного расстояния. Перевозка за пределы площадки осуществляется в соответствии с национальными правилами перевозки или Правилами перевозки МАГАТЭ с использованием, по мере необходимости, лицензированных упаковок, когда обоснование безопасности носит детерминистический характер. Если отходы перевозятся за пределы площадки в зоне отчуждения или на территории, подвергшейся загрязнению, можно принять во внимание местные требования к безопасности перевозки. Перевозка за пределы площадки на удаленный пункт захоронения более подробно рассматривается в разделе 11.5.2.

Перевозка отходов после аварии будет существенно отличаться от обычных операций, поскольку обычно применяемые требования будут слишком строги по сравнению с теми, которые могут быть соблюдены в послеварийной ситуации. Для удовлетворения самых неотложных потребностей может потребоваться модификация транспортных контейнеров и оборудования.

Для решения вопросов упаковки и перевозки может потребоваться установление контактов с национальными и международными организациями.

Важно обеспечить ясное понимание правил безопасности перевозки и наличие экспертов, которые будут руководить программой перевозки. Могут потребоваться диалог и координация действий с регулирующими органами для выработки уникальных технических решений, с тем чтобы получить добро на перевозку отходов или добиться временной отмены обычно применяемых нормативных требований в интересах смягчения последствий аварии.

Некоторые аварийные отходы могут потребовать перевозки в упаковке типа В (из-за высокой удельной активности отходов или мощности дозы, получаемой от отходов). Отсутствие сертифицированного контейнера типа В, скорее всего, повлечет за собой значительные расходы и изменения в графике, даже если речь пойдет всего лишь об использовании упаковочного комплекта из другого места. Например, в США для перевозки радиоактивных отходов лицензирован и используется контейнер TruPACT-III. Однако, если будет принято решение об использовании данного контейнера в Соединенном Королевстве, потребуются дополнительные шаги по получению необходимых согласований, что может занять два-три года, например на основе процедуры, описанной британской компанией «Лоу левел уэйст репозитори, лтд.» [162]. Для отходов с низкой удельной активностью возможно использование промышленных упаковок. Они могут быть более вместительными, чем упаковки типа В, и могут быть спроектированы, лицензированы и изготовлены значительно быстрее, чем контейнеры типа В.

На Чернобыльской АЭС при перевозке отходов для захоронения на ПЗРО «Подлесный» и ПЗРО «III очередь ЧАЭС» использовались транспортные средства с мощным экранированием, перевозившие отходы навалом либо в контейнерах. НАО с площадки, состоящие главным образом из загрязненного грунта, перевозятся для захоронения на ПЗРО «Буряковка» навалом грузовым автотранспортом с мощным экранированием. Отходы восстановительных мероприятий в зоне отчуждения, захороненные в траншеях или буртах, перевозились как сыпучие отходы на различном грузовом автотранспорте с экранированием. Изображения использованных транспортных средств можно найти в таких публикациях, как [121], и цитируемых в них источниках.

Отходы, образовавшиеся на АЭС «Фукусима-дайити», с площадки пока не вывезены. Вместе с тем пробы радиоактивных материалов, образовавшихся на площадке, перевозятся за пределы площадки для анализа на радиоактивность. Пробы радиоактивных материалов хранятся в ведрах, после чего они загружаются в грузовой автотранспорт и перевозятся на анализ в научно-исследовательский институт, который находится примерно в 100 км от АЭС «Фукусима-дайити». Порядок перевозки установлен в законодательстве. Для облегчения перевозки используются GPS и информационные технологии, которые также эффективны при хранении данных и ведении учета.

В случае с АЭС ТМА за время проведения работ по ликвидации последствий аварии было выполнено более 40 000 перевозок радиоактивных материалов. Они включали в себя перевозки загрязненной одежды, лабораторных проб и, в конечном итоге, топливных материалов активной зоны. Перевозки осуществлялись железнодорожным, автомобильным, воздушным транспортом и даже почтой США. Упаковка и перевозка стали важной частью программы ликвидации последствий, и была учреждена специальная организация по вопросам упаковки и перевозки. Используемые контейнеры были разделены на три категории:

- a) коммерческие «прочные герметичные»;
- b) соответствующие спецификациям Министерства транспорта США (MT);
- c) лицензированные КЯР США.

Прочные герметичные контейнеры использовались для материалов, которые классифицировались ниже класса А и перевозились на условиях «ограниченного количества», или для радиоактивных материалов с низкой удельной активностью. Для этих контейнеров была разработана спецификация, определяющая требования к типу материала, перевозимого в

контейнере данного типа. Например, независимо от отходов контейнер следовало изготавливать из металла с прочной крышкой.

Упаковки типов А и В относятся к категории контейнеров, соответствующих спецификациям МТ, и они широко использовались на АЭС ТМА. Соблюдение правил упаковывания для этих контейнеров основывается на характеристиках, что означает, что упаковка (в том виде, в каком она будет подготовлена для перевозки) должна соответствовать определенным критериям МТ для ее предполагаемого назначения. У грузоотправителя должен иметься сертификат на упаковку.

Лицензированные КЯР США упаковки относятся к перевозкам материалов выше класса А. Для этих контейнеров необходимо получить лицензию от КЯР США. Для перевозок этих грузов было важно выбрать упаковку, соответствующую данному назначению, чтобы обеспечить соблюдение ограничений на упаковку.

Для перевозки картриджей EPICOR II, помещенных в ВПК, требовался крупногабаритный контейнер. В качестве единственного доступного варианта был выбран контейнер для грузовых автомашин CNS 14-190. Контейнер CNS 14-190 показан на рис. 42. КЯР США разработала и лицензировала несколько контейнеров с целью облегчить перевозку специфических отходов АЭС ТМА. Для перевозки картриджей, используемых в SDS, на захоронение был сконструирован транспортный контейнер CNS 1-13С типа В (рис. 43). Он был аттестован для перевозки грузов до 600 Вт и за весь период работ по ликвидации последствий аварии перевез отходы SDS, содержавшие примерно $5,7 \times 10^{15}$ Бк (155 000 Ки) активности.



РИС. 42. Контейнер CNS 14-190 проходит инспекцию на АЭС ТМА. Публикуется с разрешения Айдахской национальной лаборатории [25].



РИС. 43. Контейнер CNS 1-13C, подготовленный к отправке на АЭС ТМА. Публикуется с разрешения Айдахской национальной лаборатории и Комиссии по ядерному регулированию США [152].

10. ХРАНЕНИЕ

Основные извлеченные уроки

- В зависимости от характера и объема отходов, а также их географического распространения может быть выбрана схема централизованного или распределенного хранения.
- Упаковывать некоторые отходы (например, транспортные средства, крупные обломки и т.д.) перед хранением может быть нецелесообразно; вместе с тем можно рекомендовать упаковку более мелких предметов для удобства обращения с ними.
- Повторное использование или переоборудование существующих объектов может сократить сроки и увеличить количество доступных вариантов хранения. На ранних стадиях аварии могут потребоваться такие первоначальные технические решения по временному хранению, которые могут быть реализованы в сжатые сроки.
- К отходам, содержащим значительные количества специального ядерного материала и/или концентрированного радиоактивного материала, который может быть легко извлечен и использован для совершения террористического акта с радиологическими последствиями, должны быть применены надлежащие меры физической безопасности.
- При принятии всех решений по хранению должна учитываться возможность последующего извлечения хранящегося материала для переработки и окончательного захоронения.
- Потребуется организовать хранение как необработанных, так и обработанных отходов.
- Отходы и контейнеры для их хранения могут потребовать защиты от воздействия окружающей среды (осадков, ветра, наводнений, солнечного света и т.д.) для предотвращения разложения отходов (особенно органических материалов) и контроля распространения загрязнения.
- Необходимо вести полный и точный учет мест и типов хранящихся отходов.
- Зоны хранения жидких отходов должны быть оборудованы соответствующими средствами защиты от течей.

10.1. ПЕРВОНАЧАЛЬНЫЕ СООБРАЖЕНИЯ

Необходимо выбрать подходящие технологии для хранения отходов как на площадке, так и за ее пределами. Помимо ядерных технологий, существует целый ряд технологий хранения общего назначения, которые могут быть рассмотрены. Планирование будет зависеть от того, какие отходы будут помещаться на хранение (жидкие или твердые), каков уровень их активности и где будет организовано хранение — на аварийной площадке или вблизи нее либо за пределами площадки. После аварии на АЭС «Фукусима-дайти» МОС выпустило специальные рекомендации по хранению отходов за пределами площадки [163].

Будет необходимо рассмотреть технические решения по краткосрочному (временному) и долгосрочному хранению. Временное или импровизированное хранилище — это объект, который можно быстро ввести в строй, чтобы решить неотложные проблемы сохранения собранных отходов, пока не будут спроектированы и сооружены более основательные объекты. Как правило, оно предназначается только для краткосрочного хранения, пока не будет введено в строй более надежное хранилище. Временное хранение обычно организуется в существующем складском помещении, здании или на открытой площадке либо в помещениях, которые могут быть легко переоборудованы для этой цели. Отходы могут храниться в простых и надежных контейнерах или навалом, без контейнера, в зависимости от потребностей. Во временном хранилище может оказаться сложным обеспечить надлежащее экранирование отходов. Кроме того, важно принять меры по предотвращению утечек из таких хранилищ и распространения загрязнения.

Специально оборудованные хранилища — это объекты, сооруженные в расчете на более длительное хранение отходов. Как импровизированные, так и специально оборудованные хранилища могут также использоваться как зоны технологической подготовки для разделения отходов с целью дальнейшей обработки или захоронения. Хотя специально оборудованное хранилище может быть рассчитано на длительное хранение, это не означает, что отходы будут храниться в нем вечно. На планы хранения повлияет разработка планов окончательного захоронения отходов. Возможные варианты захоронения, которые имеются в наличии или будут разработаны, определяют сроки, в течение которого хранилища должны оставаться доступными. Специально оборудованные хранилища могут сооружаться как на площадке, так и за ее пределами, а также в зонах отчуждения. Они могут строиться по централизованной или распределенной схеме. Во многих случаях они проектируются по модульному принципу, чтобы при необходимости можно было пристроить дополнительные хранилища. Эти объекты обеспечивают хранение отходов до тех пор, пока они не будут обработаны с целью окончательного захоронения. Однако не исключено, что отходы будут храниться в таком промежуточном состоянии в течение значительного времени, в зависимости от сроков разработки и доступности технических решений по окончательному захоронению. Учитывая это обстоятельство, необходимо принимать в расчет и планировать весь жизненный цикл обращения с отходами. Планирование, строительство и эксплуатация хранилища отходов могут потребовать больших затрат времени и сил. Необходимо учитывать людские ресурсы, требующиеся для перевозки, проектирования, строительства и эксплуатации хранилища, на объем которых повлияет решение о размещении, в частности о том, будет ли хранилище располагаться на площадке или за ее пределами и будет ли хранение централизованным или децентрализованным.

В процессе планирования и создания системы хранения можно выделить этапы, перечисленные ниже.

- a) Оценка/определение состояния и объемов радиоактивных отходов.
- b) Оценка возможности использования существующих хранилищ; на этом этапе станут очевидны приоритеты и временные ограничения применительно к разным типам/категориям отходов.

- с) Планирование использования временных хранилищ, если существующие хранилища радиоактивных отходов недостаточно вместительны или если подходящего хранилища не имеется. Могут быть рассмотрены следующие варианты:
- оборудование и материалы, которые могут быть быстро приобретены (тентовые ангары, бетонные блоки и стальные листы для общих строительных работ и т.д.);
 - контейнеры, которые могут быть быстро приобретены (гибкие контейнеры, контейнеры общего назначения и т.д.);
 - временные сооружения, которые могут быть возведены (тентовые ангары, использование пустующих помещений и т.д.);
 - системы, на которые можно быстро получить лицензию (использование простых, проверенных технологий и т.д.); в зависимости от нормативных процессов в государстве-члене может иметься возможность упрощения или ускорения процесса лицензирования;
 - системы, которые можно создать за короткий срок (выравнивание земли, укладка стальных листов, засыпка грунтом и т.д.);
 - изолированные системы (выбор удаленного участка, где расстояние заменяет экранирование).
- д) Строительство и эксплуатация временных хранилищ.
- е) Планирование более длительного хранения и захоронения; потребность в таких объектах будет зависеть от стратегии окончательного захоронения.

10.2. ПРОБЛЕМЫ ПЛАНИРОВАНИЯ ХРАНЕНИЯ

В основе проектирования хранилищ и применения методов хранения лежат следующие принципы радиационной защиты, которые должны применяться в этом процессе:

- а) локализация: предотвращение распространения радиоактивных веществ вследствие погодных условий, таких как дождь и ветер, из-за вмешательства людей или животных и т.д.;
- б) изоляция: снижение обычного радиационного облучения от радиоактивных отходов, находящихся в хранилище;
- с) экранирование: уменьшение контакта работников с радиоактивными отходами, находящимися в хранилище;
- д) время: сокращение времени облучения работников.

Например, в аварийной ситуации времени для строительства бетонного хранилища, которое обеспечит экранирование отходов, скорее всего, будет недостаточно. Таким образом, необходимое экранирование, возможно, потребует обеспечить другими средствами. Например, если для временного хранения используется тентовый ангар, может возникнуть необходимость защитить население, установив ангар в изолированном месте с ограниченным доступом. К мерам по снижению радиационного облучения работников относится возведение временных защитных стен (например, из бетонных блоков, используемых в общих строительных работах), сокращение рабочих смен, четкое обозначение границ зоны хранения и определение регламентов обращения с отходами, их размещения и мониторинга.

Дополнительным соображением при краткосрочном и долгосрочном хранении будет упреждающее применение дополнительных мер физической безопасности для защиты определенных категорий материалов от хищения и использования в злонамеренных целях. К отходам, содержащим значительные количества специального ядерного материала и/или концентрированного радиоактивного материала, который может быть изъят для совершения террористического акта с радиологическими последствиями, должны быть применены надлежащие меры физической безопасности. Например, на определенные малозначительные количества специального ядерного материала, как правило, распространяются специальные меры физической

безопасности и учета материала, которые могут быть применены в кратчайшие сроки после аварии. Как следствие, на международном уровне выражается озабоченность по поводу хищения или переключения радиоактивных материалов в количествах, вызывающих беспокойство, особенно тех материалов, которые могут быть вынесены из хранилища. Прежние представления о том, что высокий уровень радиоактивности, связанный с этими материалами, сам по себе является гарантией их неприкосновенности, могут оказаться неверными, судя по суицидальному поведению некоторых крайне радикально настроенных индивидов. Вполне уместно применение разумных критериев для обеспечения мер физической безопасности, таких как установка барьеров и/или наблюдение за материалами. Например, действующие в США правила (10 CFR 37) требуют применения таких мер физической безопасности к определенным концентрациям радионуклидов в материалах, которые могут быть вынесены из хранилища (например, источник ^{60}Co категории 2 содержит $\geq 0,3$ ТБк).

При планировании хранения необходимо решить следующие проблемы краткосрочного характера:

- a) расположение хранилищ отходов: на площадке или за ее пределами, в пределах или за пределами загрязненных зон отчуждения, устройство временных хранилищ вблизи очагов загрязнения с намерением в дальнейшем переправить отходы, например, на пункты дезактивации или кондиционирования и более длительного хранения;
- b) тип и способ использования хранилища: временное хранилище (например, контейнер для высокоактивных отходов, большой контейнер, тентовый ангар для временного хранения, хранение сыпучих материалов), временное использование существующего хранилища и т.д., методика размещения отходов и их будущее извлечение;
- c) требуемые периоды хранения отходов: предполагаемый период времени до появления места для долгосрочного хранения отходов и обеспечение достаточной стабильности в краткосрочной/среднесрочной перспективе;
- d) немедленная обработка радиоактивных отходов, если это необходимо; например мероприятия по дезактивации и уменьшению объема отходов.

Поскольку все вышеперечисленное носит лишь временный характер, параллельно с этим важно задуматься о разработке и внедрении схем более долгосрочного и/или постоянного хранения, а также, насколько это практически возможно, всех установок по обработке и кондиционированию.

Несмотря на то что самой неотложной задачей будет, разумеется, оперативная локализация опасных радиоактивных материалов, крайне важно наладить и вести надлежащий учет всех идентифицированных и находящихся в процессе обращения отходов. Важно также обратить внимание на поведение загрязняющих веществ в отходах и на их возможное взаимодействие с окружающей средой. Например, даже относительно низкий уровень загрязнения может создать высокую концентрацию в выщелачивающей воде, если на хранении находится большой объем отходов, загрязняющее вещество растворимо, а хранящийся материал недостаточно защищен от проникновения воды. Это может потребовать дополнительной защиты дренажной системы (например, отвода дождевой воды и подземных вод от хранилища, чтобы предотвратить его загрязнение).

Кроме того, важно оценить и понять проблемы химической реактивности, связанные с отходами. Происшествие, имевшее место в феврале 2014 года на экспериментальной установке по изоляции отходов (WIPP) в США, привлекло внимание к проблемам несовместимости материалов в хранящихся отходах. В секции 7 глубинного геологического хранилища в результате разрыва контейнера для хранения отходов произошел небольшой радиоактивный выброс через вытяжной воздуховод (рис. 44) [164]. По итогам расследования причин произошедшего был сделан вывод, что разрыв контейнера произошел из-за несовместимой смеси отходов на основе нитратов с органическим сорбирующим материалом, использовавшимся в процессе упаковки. Катализатором реакции также могли стать другие отходы, присутствующие в контейнере. Для



РИС. 44. Разорвавшийся контейнер в секции 7, камере 7 геологического хранилища WIPP. Публикуется с разрешения Министерства энергетики США [164].

осмотра проблемного места была сконструирована система видеонаблюдения, которая могла опускаться в хранилище на глубину ~25 м с возможностью поворота камеры примерно на 10 м. Эта система дала возможность дистанционно осмотреть разорвавшийся контейнер и другие контейнеры в помещении. Основной вывод, сделанный по итогам этого происшествия, заключался в том, что не была спрогнозирована и заранее проанализирована опасность, возникающая в результате смешивания органических материалов с соевыми отходами на основе нитратов. Это стало причиной неадекватной оценки содержимого контейнера и несоблюдения КПО WIPP производителем отходов. Последующий регламентный и эксплуатационный контроль также был неадекватным. Дополнительные выводы по результатам расследования аварии, проведенного на площадке, касались недостатков в конструкции вентиляционной системы и программах управления безопасностью, что усугубило последствия инцидента [165].

На АЭС «Фукусима-дайити» в 2015 году в некоторых ВПК со шламом из системы ALPS, находившихся в хранилище на площадке, был обнаружен газообразный водород. Кроме того, на нескольких контейнерах образовались лужи прозрачной жидкости, что было расценено как сопутствующая проблема. ТЕРКО изучила эти проблемы и пришла к выводу о следующих вероятных механизмах:

- а) при осаждении шлама в ВПК образовались надосадочные растворы;
- б) в результате радиолитиза воды, содержащейся в шламе, выделились газы;
- в) газы увеличивают объем осадочного шлама, повышая уровень раствора;
- г) раствор выливается из ВПК наружу и в некоторых случаях просачивается через вентиляционные отверстия и щели в крышках, скапливаясь на верхней части крышек.

ТЕПКО пришла к выводу о низкой вероятности воспламенения газообразного водорода, образующегося в результате радиолиза воды в ВПК. Кроме того, чтобы предотвратить утечку через крышку, ТЕПКО слила накопившуюся жидкость из хранящихся ВПК и начала заполнять новые контейнеры меньшим количеством шлама, чтобы предотвратить будущие утечки и скопление жидкостей на крышках [166].

10.3. ВЫБОР ПОДХОДЯЩИХ ТЕХНИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ ПО ХРАНЕНИЮ

На ранних стадиях ликвидации последствий крупной аварии должны оперативно приниматься стратегические решения по краткосрочному обращению с радиоактивными отходами с целью минимизации, насколько это возможно, действия опасных факторов. При принятии таких решений могут учитываться следующие моменты:

- a) целесообразность обработки или дезактивации отходов для уменьшения их объема и/или освобождения от регулирующего контроля либо их сбора, локализации и хранения в ожидании дальнейших разъяснений относительно стратегии обращения;
- b) целесообразность использования имеющихся складских помещений, переоборудования существующих площадей в зданиях или выделения временных складских помещений;
- c) сроки использования временных помещений;
- d) выбор типа контейнеров и хранилища;
- e) использование централизованной или распределенной схемы хранения;
- f) организация более долгосрочного надежного хранения.

В таблице 11 приведены требования к выбору и соответствующие факторы принятия решений.

10.4. ИМПРОВИЗИРОВАННЫЕ ВРЕМЕННЫЕ СООРУЖЕНИЯ ДЛЯ ХРАНЕНИЯ

Планирование и определение спецификаций импровизированных временных хранилищ (например, тентовых ангаров или контейнеров для твердых отходов, резервуаров для жидких отходов или их комбинаций) с целью выиграть время, необходимое для переправки радиоактивных отходов в специально оборудованное хранилище, требует понимания основных параметров, таких как объемы образования, концентрации активности и типы отходов. Опыт традиционного хранения отходов здесь может не пригодиться.

Необходимо рассмотреть следующие возможные способы снижения радиационного облучения, связанного с импровизированным временным хранением отходов:

- a) устройство импровизированного временного хранилища в изолированном, обособленном месте;
- b) помещение таких отходов в импровизированное временное оборудование (например, контейнер или тентовый ангар);
- c) добавление временного экрана (например, засыпка резервуара грунтом, использование контейнера с экранирующей способностью, например с большой толщиной стенок, или использование бетонных блоков, применяемых в общих строительных работах);
- d) использование заполненных земель бункеров-лодочек в качестве защитных стен;
- e) использование корзин с пластиковыми мешками в экранированных переносных хранилищах;
- f) уточнение рабочих операций для сокращения времени, необходимого для переправки отходов в хранилище;
- g) срок службы хранилища.

ТАБЛИЦА 11. ПРОЦЕСС ВЫБОРА ХРАНИЛИЩА АВАРИЙНЫХ ОТХОДОВ

Требование	Возможности	Факторы принятия решений
Обработка или хранение	Немедленный сбор и хранение либо немедленная обработка для дезактивации/уменьшения объема/освобождения отходов от регулирующего контроля	— Объемы отходов — Доступность технологий очистки — Наличие места для хранения — Ограничения по времени — Мощность дозы радиации/уровни загрязнения
Требования к временным хранилищам и соответствующим срокам службы	Использование существующих хранилищ либо устройство временных хранилищ	— Вместимость существующих хранилищ — Объемы отходов — Долговечность временных хранилищ — Социальная приемлемость временных хранилищ
Выбор типа оборудования для временного хранения	Твердые отходы: контейнер, тентовый ангар и т.д. Жидкие отходы: готовый резервуар и т.д.	— Уровень радиоактивности отходов — Местонахождение хранилищ (т.е. изолированность) — Объемы отходов — Метод обработки/кондиционирования отходов — Долговечность — Возможность экранирования и локализации
Выбор схемы хранения	Централизованная либо распределенная схема хранения	— Географические и социальные условия места расположения — Эффективность хранения — Перевозка отходов — Эксплуатация и техническое обслуживание хранилищ

Следует помнить, что такое хранение — это краткосрочное решение до момента планирования и реализации следующего шага по созданию специально оборудованного временного хранилища. Различные варианты приведены в таблице 12, а примеры показаны на рис. 45 и 46.

ТАБЛИЦА 12. ВОЗМОЖНЫЕ ВАРИАНТЫ ХРАНЕНИЯ ОТХОДОВ В ИМПРОВИЗИРОВАННЫХ ВРЕМЕННЫХ ХРАНИЛИЩАХ

Отходы для хранения	Хранение на площадке	Хранение вне площадки
Твердые отходы	— Тентовый ангар (с бетонным блоком для экранирования или без такового) — Контейнер (с толстой стенкой для экранирования или без таковой) — И т.д.	— Пластиковые мешки (изоляция мешков с высоким уровнем активности в центральной или нижней части, с грунтовым покрытием для экранирования или без такового) — Хранение в уже загрязненной зоне
Жидкие отходы	— Готовый резервуар (с грунтовым покрытием для экранирования или без такового) — Повторное использование простаивающего оборудования для хранения	— Готовый резервуар



РИС. 45. Временные места сбора загрязненного грунта и обломков в г. Окума, префектура Фукусима. Публикуется с разрешения городской администрации Окумы.



РИС. 46. Резервуары для хранения загрязненной воды на АЭС «Фукусима-дайити».



РИС. 47. Резервуары для бестарного хранения загрязненной воды на АЭС «Фукусима-дайити»: фланцевые (вверху) и сварные (внизу). Публикуется с разрешения Токийской электроэнергетической компании.

Временное хранение загрязненной воды может представлять серьезную проблему, если речь идет о больших объемах, как в случае с АЭС «Фукусима-дайити». Для упрощения процесса сооружения вначале использовались резервуары с фланцевыми соединениями (рис. 47, вверху), но впоследствии эти соединения дали течь и резервуары были заменены на сварные, как показано на рис. 47 (внизу).

Из резервуаров, в которых не были установлены уровнемеры, произошла утечка загрязненной воды, и понижение уровня воды зафиксировано не было. ТЕРКО приняла решение установить в резервуарах уровнемеры. Дополнительную защиту в случае течей обеспечивает двухрядная система обвалования, устроенная вокруг резервуаров.

10.5. СПЕЦИАЛЬНО ОБОРУДОВАННЫЕ СООРУЖЕНИЯ ДЛЯ ВРЕМЕННОГО ХРАНЕНИЯ

В ожидании окончательной обработки и захоронения необходимо соорудить специально оборудованные временные хранилища для обеспечения стабильной и надлежащей радиационной

защиты населения и работников. При планировании и определении технических характеристик специально оборудованного временного хранилища необходимо принять во внимание следующие возможности и условия:

- a) мониторинг, будущая обработка, перевозка, упаковка, захоронение;
- b) инфраструктура;
- c) местоположение хранилища;
- d) природа и характер отходов;
- e) наличие специализированного персонала для проектирования/строительства/эксплуатации/технического обслуживания;
- f) обязанности в области планирования, строительства и эксплуатации;
- g) срок службы хранилища;
- h) необходимость инспектирования и извлечения;
- i) требования к инспектированию сооружения и отходов и/или упаковок с отходами;
- j) извлечение отходов и/или упаковок с отходами.

Концепция централизованного хранилища радиоактивных отходов, образующихся в огромных количествах на большой территории, — хороший вариант с экономической и практической точек зрения. Параллельно с планированием такого централизованного хранилища необходимо также составлять планы обработки и перевозки отходов на централизованное хранилище, а также их окончательного захоронения.

Концепции специально оборудованного хранилища схожи с теми, которые описаны в [167], но эти хранилища могут быть более крупными ввиду больших объемов отходов, с которыми предстоит работать. Данные о применимости ряда существующих технологий приведены в таблице 13.

10.5.1. Специально оборудованные хранилища на АЭС «Фукусима-дайити»

Пример сооружения, специально построенного для временного хранения колонн для абсорбции цезия на АЭС «Фукусима-дайити», показан на рис. 48.

Резервуары для абсорбции цезия хранятся в бетонных трубах прямоугольного сечения. Мощность дозы снаружи такой трубы составляет приблизительно 10 мЗв/ч. Второй тип емкости для адсорбции цезия — упрощенная активная система извлечения и восстановления воды (SARRY) — имеет экранирование, и мощность дозы оценивается приблизительно в 1 мЗв/ч. Высокопрочные контейнеры (ВПК) хранятся в бетонных трубах прямоугольного сечения для предотвращения рассеяния в воздухе и защиты от дождя и ультрафиолетового излучения.

10.5.2. Специально оборудованные хранилища на Чернобыльской АЭС

Жидкие радиоактивные отходы хранятся в специально оборудованных хранилищах: жидкие отходы содержатся в пяти контейнерах емкостью 5000 м³, а радиоактивные отходы в жидкой и твердой фазе — в девяти баках емкостью 1000 м³. Жидкие отходы обрабатываются и кондиционируются на ЗПЖРО, и полученный продукт хранится (рис. 49) в ожидании последующей перевозки и захоронения на пунктах приповерхностного захоронения в виде бетонных камер на территории комплекса «Вектор».

Аналогичным образом в ПКОТРО также организовано временное хранение контейнеров с отходами (рис. 50) перед их передачей на пункты приповерхностного захоронения комплекса «Вектор». Кроме того, на площадке Чернобыльской АЭС осуществляется временное хранение упаковок с ВАО и долгоживущими НСАО до появления в будущем глубинного геологического хранилища. Вначале отходы кондиционируются в бочке емкостью 165 л, а затем заливаются цементным раствором в бочке емкостью 200 л.

ТАБЛИЦА 13. ТИПИЧНЫЕ ОБЛАСТИ ПРИМЕНЕНИЯ РАЗЛИЧНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ХРАНЕНИЯ

Тип хранилища	Некондиционированные отходы			Кондиционированные отходы	
	Твердые	Жидкие	Сыпучие/ обломочные	НАО	САО/ВАО
Резервуар		X			
Надземный кессон					X
Подземный кессон					X
Бункер	X		X	X	X
Надземная экранированная камера					X
Траншея	X		X	X	X
Экранированное здание	X			X	X
Неэкранированное здание	X		X	X	X ^a
Бурт			X		
Бочка					X
Бетонный контейнер	X		X	X	X

^a При использовании с экранированным контейнером.

В дополнение к возможностям для захоронения короткоживущих НСАО, в комплексе «Вектор» будут также иметься следующие объекты для хранения:

- а) приповерхностное хранилище для твердых НСАО с долгоживущими радионуклидами (ТРО-3);
- б) приповерхностное хранилище для твердых ВАО с долгоживущими радионуклидами (ТРО-4);
- с) хранилище для остекленных ВАО и долгоживущих НСАО.

На Чернобыльской АЭС создается хранилище отработавшего ядерного топлива (ОЯТ).

10.5.3. Специально оборудованные хранилища на АЭС ТМА

Вскоре после аварии на АЭС ТМА на повестку дня встала серьезная проблема хранения воды [2]. На момент аварии вместимость резервуаров для хранения воды составляла 680 000 л, однако в наличии имелось только 190 000 л свободного объема. Обращение с водой и ее хранение быстро стали оперативной необходимостью. Первое хранилище воды (названное «резервуарным парком») было устроено в бассейне выдержки отработавшего топлива А и состояло из шести резервуаров емкостью 416 000 л. Эти резервуары использовались для хранения высокоактивной воды. Поскольку прямой сброс очищенной воды в реку Саскуэханна был исключен, было необходимо создать хранилище для переработанной воды. Было сооружено два резервуара для хранения



РИС. 48. Пример хранения колонн для абсорбции цезия на АЭС «Фукусима-дайити». Публикуется с разрешения Токийской электроэнергетической компании.



РИС. 49. Зал для хранения обработанных жидких отходов на Чернобыльском заводе по переработке жидких радиоактивных отходов. Публикуется с разрешения Государственного специализированного предприятия «Чернобыльская АЭС».



РИС. 50. Временное хранилище твердых отходов в промышленном комплексе по обращению с твердыми радиоактивными отходами (ПКОТРО); показаны контейнеры типа КЗ-3 для хранения переработанных твердых короткоживущих отходов низкого и среднего уровня активности. Публикуется с разрешения Государственного специализированного предприятия «Чернобыльская АЭС».

очищенной воды, которая по-прежнему содержала следовые количества радиоактивных элементов. Эти резервуары из углеродистой стали с эпоксидным покрытием емкостью 1,4 млн л были введены в строй в 1981 году, одновременно с наращиванием объемов водоочистки на EPICOR II и SDS. Время от времени также использовался ряд других резервуаров вблизи станции. Например, два резервуара для конденсата емкостью 850 000 л, изготовленные из нержавеющей стали, использовались для хранения борированной воды, имевшей низкий уровень радиации. Впоследствии эта вода была рециркулирована и использовалась в качестве промывочной воды перед очисткой.

До аварии на станции имелось очень мало возможностей для хранения твердых отходов. Однако с началом работ по ликвидации последствий аварии на площадке стали быстро накапливаться твердые отходы [1]. Эти первые твердые отходы представляли собой главным образом мусор и отработавшие ионообменные материалы. В процессе ликвидации последствий аварии главными источниками радиоактивности, связанной с твердыми отходами, были отработавшие фильтры предварительной очистки и картриджи со смолой из ионообменника. Из-за нормативных и политических проблем, возникших после аварии, вывоз отходов с площадки для окончательного захоронения был проблематичным. По этой причине возникла необходимость в устройстве временных хранилищ. Эти хранилища были сделаны гибкими: они обеспечивали хранение отходов и их технологическую подготовку к вывозу за пределы площадки. Сразу же после аварии для хранения отходов были переоборудованы существующие объекты. Ангар, в котором хранились краски, был приспособлен для временного хранения слабозагрязненного мусора, защитной одежды, отходов дезактивационных работ и т.д. Рядом с градирнями ТМА-2 в пределах обвалованной территории было устроено временное хранилище для ионообменных сред. Вначале для хранения картриджей EPICOR II в кессоне перед отправкой на захоронение использовалась специальная мастерская TAN-607 (рис. 51). Однако вскоре

Кессон EPICOR II

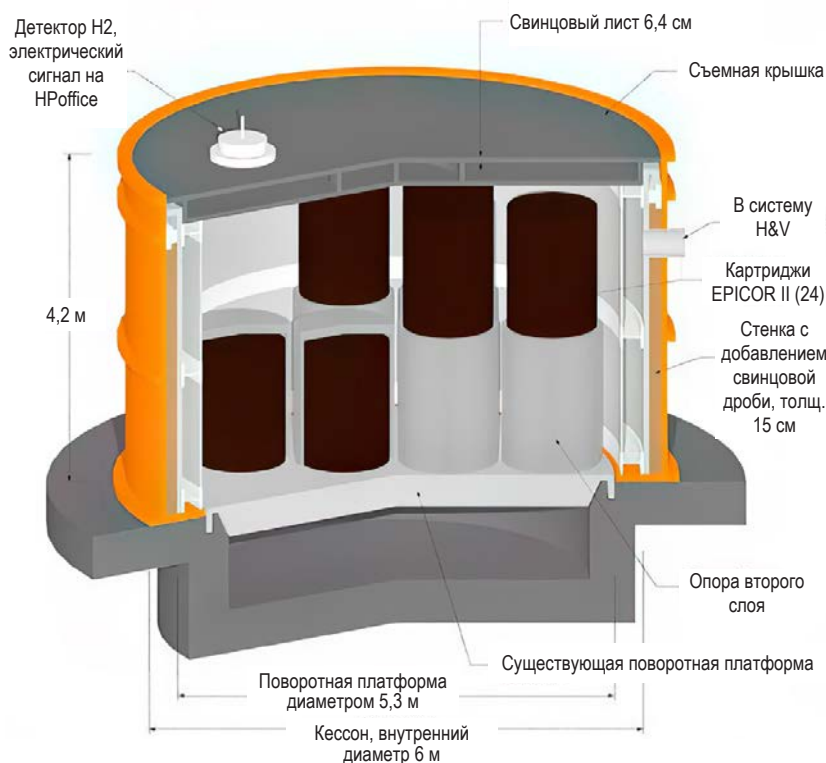


РИС. 51. Схематическое изображение кессона EPICOR II в специальной мастерской TAN-607, АЭС ТМА. Взято с изменениями из [25].

была осознана необходимость создания оборудованного временного хранилища. Было введено в строй хранилище, известное как «бросовая земля». Это модульное хранилище состояло из двух модулей для хранения с общим дренажным зумпфом. Конструкция позволяла добавлять модули, но дополнительные модули так и не понадобились. В каждом модуле имелось 6 рядов ячеек по 10 в каждом. Схематическое изображение модуля показано на рис. 52. Толщина стенок модуля составляла 1 м, крышки — также 1 м, чтобы обеспечить необходимое экранирование. Каждая ячейка имела диаметр 2 м и высоту 4 м. Каждая ячейка была оборудована дренажным каналом для слива жидкости в зумпф. Для перемещения ионообменных картриджей и бочек на хранение в ячейки и из них использовалась крановая система. В 1982 году был сооружен пункт временного хранения и технологической подготовки твердых отходов, чтобы создать дополнительную площадь для хранения бочек с НАО (208 л) и ящиков с низкоактивными отходами. Его конструкция опять же позволяла подготовить материалы к перевозке на пункты захоронения вне площадки.

В 1987 году был пущен в строй завод по сортировке и упаковке отходов. Это крупное предприятие использовалось для консолидации и упаковки твердых отходов, а также для их дезактивации. Затраты в размере 1,7 млн долл. США были оправданы значительным сокращением объема отходов (эффективность упаковывания была повышена на 25–30%) и позволяли выпускать дезактивированные материалы в коммерческий оборот. Чтобы еще больше сократить объемы отходов, отходы, поддающихся компактированию, уменьшались в объеме при помощи барабанного компактора, который был установлен во вспомогательном корпусе для операций с топливом.

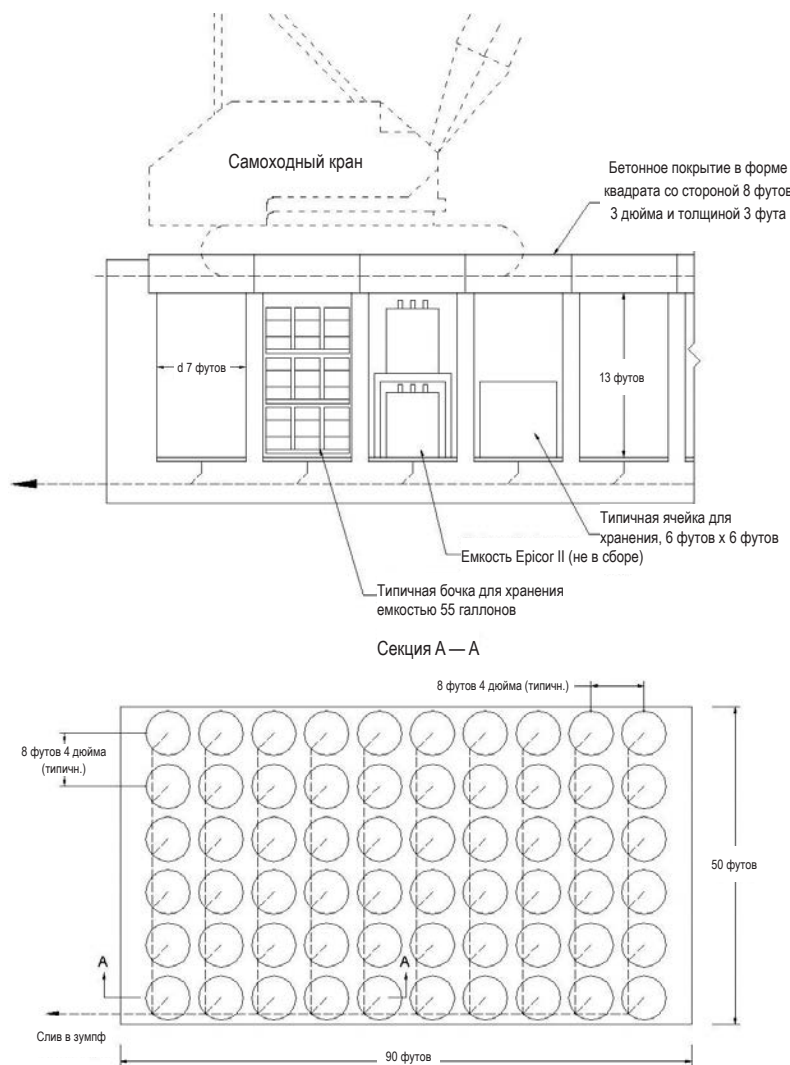


РИС. 52. Схема пункта технологической подготовки твердых отходов на АЭС ТМА. Взято с изменениями из [2].

11. ЗАХОРОНЕНИЕ

Основные извлеченные уроки

- Неспособность провести надлежащую инвентаризацию, паспортизацию, характеризацию и разделение отходов ограничивает будущие возможности захоронения и ведет к значительному росту расходов.
- Результатом спешного, незапланированного захоронения несортированных, не прошедших характеризацию отходов станет необходимость их извлечения и перезахоронения с большими затратами финансовых средств и ресурсов и значительным облучением работников.
- Нерациологические составляющие, присутствующие в отходах, увеличивают техническую сложность и стоимость захоронения.
- Подбор схем захоронения исходя из опыта работы существующих объектов может ускорить создание новых мощностей для захоронения аварийных отходов.

- Важной частью планирования и выполнения работ по захоронению является своевременное привлечение населения и других заинтересованных сторон и прозрачный обмен информацией с ними.
- Размещение новых пунктов захоронения отходов вызывает множество споров — независимо от того, находится ли предполагаемое место вблизи или на удалении от места аварии.
- Снижение концентрации отходов вблизи места аварии посредством запашки грунта ведет к увеличению общего объема отходов и соответствующих затрат на захоронение.
- Технологическая подготовка или временное хранение отходов, а также использование жидкостей для дезактивации транспортных средств, оборудования или других материалов при недостаточной локализации ведет к загрязнению грунтов и подземных вод, увеличивая объемы отходов и затраты на их захоронение.
- Использование секций системы захоронения очень большой вместимости, сооружаемых отдельными очередями, обеспечивает экономию за счет масштаба, которая существенно снижает удельные и общие затраты на захоронение.
- Захоронение отходов без учета обоснования безопасности (например, в экологически неприемлемых местах или без надлежащих инженерных барьеров) ведет к досрочному закрытию пунктов захоронения отходов и будущему извлечению и перезахоронению отходов с существенными затратами.
- В крупных аварийных ситуациях в прошлом имевшихся средств для захоронения оказывалось недостаточно, и поэтому иногда требовалось международное финансирование. Как правило, такая поддержка была направлена на решение других приоритетных задач, не связанных с захоронением.

Отходы, образующиеся при ликвидации последствий аварии, очистке и восстановлении, в конечном итоге потребуют захоронения — на площадке или за ее пределами. В зависимости от объема предварительного планирования, уже проведенного на национальном уровне, возможность окончательного захоронения некоторых отходов может появиться на ранних стадиях восстановительных работ. Для захоронения оставшихся отходов потребуются сооружение новых объектов — процесс, который может быть ускорен, если провести надлежащее предварительное планирование (см. раздел 4). Принятие решений о захоронении оставшихся отходов может потребоваться отложить, если захоронение на площадке нецелесообразно и если отсутствует комплексная национальная стратегия обращения с отходами. Например, оптимальным техническим решением по захоронению некоторых отходов может быть использование многофункционального национального центра, который может появиться только спустя несколько десятилетий. Последняя ситуация возникнет почти во всех государствах-членах, когда речь пойдет об отправке некоторых категорий аварийных отходов на национальный пункт геологического захоронения (ПГЗ) отходов более высокого уровня активности. Таким образом, планирование хранения и планирование захоронения должны быть тесно увязаны между собой. В целом можно отметить, что возможные способы захоронения аварийных отходов основываются на той же стратегии, что и захоронение отходов от нормальной эксплуатации установок. Возможные способы захоронения всех классов отходов рассматриваются в публикации «Design Principles and Approaches for Radioactive Waste Repositories» («Принципы и методы проектирования хранилищ радиоактивных отходов») [26]. На рис. 53 представлены концепции проектирования пунктов захоронения отходов.

При разработке и реализации стратегии захоронения возникает ряд вопросов. Они состоят в следующем:

- Как объемы отходов могут повлиять на национальную деятельность по захоронению отходов?
- Какие типы пунктов захоронения могут потребоваться для разных типов отходов?
- Какой объем отходов может нуждаться в захоронении?
- Как подобрать площадки для размещения пунктов захоронения?
- Как оптимизировать работу пункта захоронения аварийных отходов?

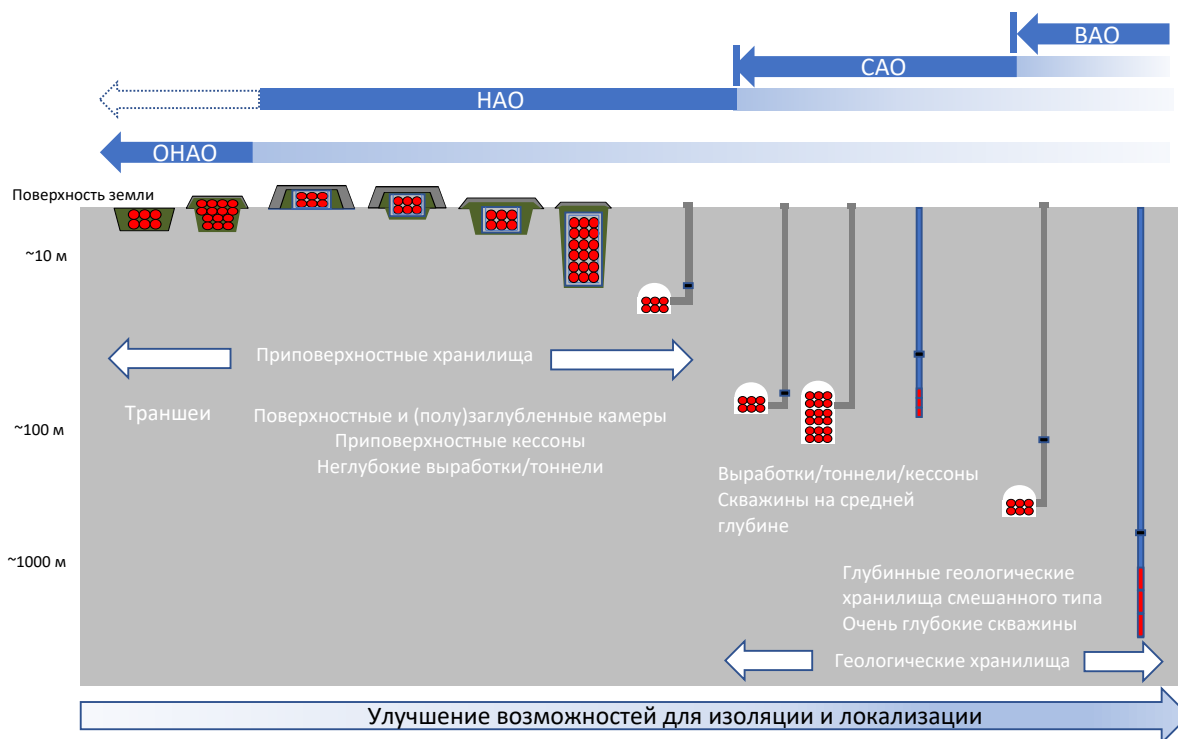


РИС. 53. Схематическое изображение диапазона возможных вариантов захоронения, от поверхностного до глубокого, которые в настоящее время рассматриваются или реализуются для разных классов радиоактивных отходов. Воспроизведено из [26].

Эти общие вопросы последовательно рассматриваются в нижеследующих частях данного раздела.

11.1. ОБЪЕМ ОТХОДОВ ВЛИЯЕТ НА НАЦИОНАЛЬНУЮ ДЕЯТЕЛЬНОСТЬ ПО ЗАХОРОНЕНИЮ ОТХОДОВ

Определение подходящих технических решений по захоронению зависит от опасности, которую представляют разные типы обрабатываемых отходов. Далее по тексту «опасность» употребляется как общий термин, который охватывает тип содержащихся радионуклидов (активность) и длительность их существования (период полураспада), а также химические или биологические компоненты.

На рис. 54 показана общая ожидаемая зависимость между объемами и опасностью отходов, образующихся в результате ядерной или радиологической аварийной ситуации, а также в результате обычных операций, не связанных с аварийной ситуацией. Предполагается, что аварийные отходы — это преимущественно материалы большого объема и низкого уровня опасности, и их объем может быть на несколько порядков больше объема обычных эксплуатационных отходов, как это наблюдалось после аварии на АЭС «Фукусима-дайити». В такой ситуации весьма вероятно, что существующих мощностей по захоронению отходов будет недостаточно для размещения столь значительного дополнительного объема отходов, и именно эта проблема в первую очередь и рассматривается в данной публикации. Однако даже если эти отходы удастся частично или полностью разместить, органы, принимающие решения, могут прийти к выводу, что наилучшим вариантом будет все же строительство новых мощностей, чтобы не допустить заполнения



РИС. 54. Соотношение между обычными и аварийными отходами, сравнимыми по уровню опасности, которые в конечном итоге могут потребовать захоронения.

хранилищ, которые используются для захоронения отходов обычной эксплуатационной деятельности. Таким образом, одним из потенциально не поддающихся количественной оценке стратегических факторов, который необходимо учесть, является нарушение нормальной работы национальной системы обращения с отходами и воздействие на других производителей отходов, которые пользуются общей инфраструктурой обращения с отходами. В случае аварийной ситуации некоторые части этой инфраструктуры, в том числе мощности, обычно предназначенные для обращения с нерадиоактивными отходами, могут стать важной составляющей общей стратегии реагирования.

И напротив, можно надеяться, что объем отходов высокого уровня опасности, образующихся в результате аварийной ситуации, будет относительно небольшим. В зависимости от состояния ядерной программы в затронутом аварией государстве-члене объемы отходов высокого уровня опасности, образовавшихся в результате аварийной ситуации, могут составлять малую долю от объемов отработавшего ядерного топлива, ВАО или САО, требующих захоронения. В такой ситуации использовать геологическое хранилище или другой высокотехнологичный пункт захоронения, предназначенный для отходов обычной эксплуатационной деятельности, будет выгоднее, чем строить новые мощности для захоронения. Пункт захоронения таких обычных отходов высокого уровня опасности, скорее всего, будет представлять собой тщательно продуманное, нетиповое сооружение, вместимость которого можно будет по мере необходимости увеличить на 5–10%. Текущая ситуация такова, что у большинства государств-членов не будет собственного пункта геологического захоронения в течение еще многих десятилетий, так как некоторые из этих объектов намечены к сооружению только во второй половине столетия. Как представляется, в случае крупной аварии практически в любом государстве-члене неизбежно потребуются долгосрочные, специально оборудованные хранилища такого типа, о котором говорилось в предыдущем разделе, для хранения аварийных отходов высокого уровня опасности в течение нескольких десятилетий.

Вместе с тем государства-члены, не реализующие крупных ядерных программ, в обычных условиях могут не производить высокоактивных отходов (т.е. кривая обычных отходов на рис. 54 не будет заходить в правую часть графика). Такая ситуация создаст дополнительную дилемму, связанную с захоронением отходов более высокого уровня опасности по сравнению с теми, которые предусмотрены национальной программой обращения с отходами.

11.2. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТИПОВ ПУНКТОВ ЗАХОРОНЕНИЯ, КОТОРЫЕ МОГУТ ПОТРЕБОВАТЬСЯ, НА ОСНОВЕ ДИФФЕРЕНЦИРОВАННОГО ПОДХОДА

При принятии решений о выборе подходящей технологии захоронения можно воспользоваться дифференцированным подходом, основанным на учете рисков и стоимости. Для применения такого подхода предлагается использовать принципы, описанные ниже.

- a) Захоронение отходов осуществляется на основе самой простой из существующих концепций захоронения, для которой можно продемонстрировать уровень безопасности и защиты окружающей среды, соразмерный имеющимся опасностям. Если подходящего способа захоронения не существует, то соответствующие отходы будут необходимо хранить до тех пор, пока не будет найдено техническое решение по их захоронению.
- b) Захоронение наиболее опасных отходов потребует использования более сложных инженерных решений для обеспечения адекватной изоляции и локализации, включая захоронение на большей глубине.
- c) Если предположить, что пункты захоронения имеются в наличии, можно вначале изучить вопрос о том, можно ли их использовать и как, прежде чем задумываться о создании новых объектов. Для приема аварийных отходов на существующих объектах могут потребоваться дополнительные согласования в регулирующих органах и, следовательно, дополнительные анализы с целью учета требований, уже установленных действующими КПО и эксплуатационными регламентами.
- d) Отходы разделяются таким образом, чтобы слабозагрязненные, короткоживущие компоненты отходов не смешивались с долгоживущими компонентами, имеющими значительное загрязнение (см. раздел 8.1). Кроме того, отходы желательно разделить по принципу радиологической и нерадиологической опасности.
- e) Введение четких критериев для определения того, какой материал должен быть обработан как радиоактивные отходы, а какой может быть одобрен для захоронения в качестве нерадиологических отходов либо для рециклирования или повторного использования.

В таблице 14 иллюстрируется применение дифференцированного подхода и показывается, какой тип технологии захоронения может быть наиболее подходящим для определенных типов аварийных отходов. Эта таблица затрагивает только качественную сторону дела, и в каждом конкретном случае решения о захоронении отходов должны приниматься с учетом фактических условий аварии, характеристик отходов, применимых регулирующих требований и общей стратегии ликвидации последствий аварии, которая будет взята на вооружение.

Хотя аварийная ситуация может привести к образованию очень больших объемов отходов, которые, по всей вероятности, потребуют создания новых мощностей для захоронения, работа по захоронению должна по мере возможности вестись в «штатном» режиме с целью обеспечить эксплуатационную и долгосрочную безопасность. С этой точки зрения может быть эффективным дифференцированный подход, когда требуемый уровень контроля над отходами, образовавшимися в результате аварии, соразмеряется с опасностью материала и уровень безопасности, достигаемый за счет окончательного захоронения, становится сопоставимым с уровнем безопасности в «штатной» эксплуатационной ситуации.

Благодаря предварительному планированию (см. раздел 4.1) можно определить уже существующие объекты, которые могут быть потенциально задействованы, и разработать общие подходы к захоронению и предварительные проекты, чтобы облегчить создание новых объектов, если в них возникнет необходимость. Впрочем, окончательные требования к этим объектам будут зависеть от характера аварийной ситуации, а также от объема и характеристик отходов. Аналогичным образом обоснование безопасности этих объектов будет во многом построено так же, как и для «штатной» ситуации, с теми же элементами и конечными точками. Предварительное планирование поможет облегчить разработку обоснования безопасности и определение предварительных КПО. В ходе предварительного планирования можно определить обобщенные КПО, подходящие для тех типов объектов, которые могут потребоваться, опираясь на международный опыт эксплуатации аналогичных хранилищ и разработанные для них обоснования безопасности. Знание предполагаемых способов захоронения, которые станут доступны, и типичных КПО для предполагаемых объектов позволит эффективно организовать обращение с отходами на начальных этапах.

11.3. КОЛИЧЕСТВО, РАЗМЕР И ТИП НЕОБХОДИМЫХ ПУНКТОВ ЗАХОРОНЕНИЯ

Важно также учитывать физическую площадь, которую занимают секции системы захоронения, дороги, автостоянки, зоны приема и инспектирования отходов, административные и другие вспомогательные службы, а также незастроенная буферная зона для контроля и поддержания расстояния между пунктом и окружающими его объектами землепользования. Потребности в площадях могут возрасти, если планируется организовать железнодорожное сообщение или операции по переработке отходов. С учетом преимуществ эффекта масштаба может быть также целесообразным отведение места для будущего расширения зон захоронения.

Кроме того, по ряду причин первоначальные оценки объемов аварийных отходов могут со временем значительно возрасти. Это необходимо принять во внимание при определении размера площадки, которая потребуется, в том числе достаточной площади для размещения секций системы захоронения и прилегающей незастроенной территории. Эта незастроенная территория может быть использована для мониторинга окружающей среды; строительства необходимых дорог; административных зданий; пунктов приема и разгрузки отходов; потенциальных испытаний, переработки, упаковки отходов и других видов деятельности.

Большие объемы НАО или ОНАО могут быть экономичным способом переправлены на крупные пункты захоронения, созданные специально для таких отходов. Имеется значительный опыт захоронения очень больших объемов строительного мусора и обломков снесенных сооружений, твердых бытовых отходов, опасных химических отходов, хвостов уранового производства и других отходов горнодобывающей промышленности, а также низкоактивных или очень низкоактивных радиоактивных отходов таким образом, чтобы обеспечить защиту здоровья населения и окружающей среды. Большая часть этого опыта связана с захоронением сыпучих, неупакованных отходов путем реализации концепций приповерхностного захоронения. Хотя для этого обычно выбирается ровная местность, имеется также опыт захоронения отходов в долинах с ограниченными земельными площадями. В этом случае менее вместительные сооружения, строительство и эксплуатация которых обходится дороже, а удельная стоимость захоронения в которых выше, могут использоваться исключительно для захоронения меньших объемов отходов с более высоким уровнем активности.

Французский опыт эксплуатации пунктов захоронения в департаменте Об и Морвилье показывает, что разные пункты захоронения отходов неодинакового типа могут располагаться в непосредственной близости друг от друга [76]. Тем самым можно обеспечить совместное покрытие значительных расходов на общие дороги, коммунальные услуги и работу административных служб. Важным моментом является также размещение объектов на достаточном расстоянии друг от друга для проведения независимого мониторинга их работы.

Глубина захоронения и возможность использования искусственных барьеров для ограничения миграции загрязняющих веществ варьируется в зависимости от типа отходов, местных грунтов, гидрологических и других экологических условий на площадке, а также климата, близлежащих объектов землепользования, действующих норм и других факторов. Для достаточной изоляции отходов от подземных вод или проницаемой коренной породы может потребоваться меньшая глубина захоронения. Для предотвращения миграции жидкостей из секций системы захоронения обычно используется обделка уплотненной глиной, синтетические мембраны или комбинации этих барьеров. При очень низкой проницаемости грунта на площадке или в пустынных районах с очень малым количеством осадков и высоким суммарным испарением такие барьеры могут не потребоваться.

Для ограничения инфильтрации воды и контроля отвода поверхностных вод, после того как секции системы захоронения будут заполнены до отказа, над отходами обычно сооружается перекрытие. Увеличение объема захоронения часто достигается путем заполнения секций системы захоронения значительно выше первоначальной поверхности земли с использованием искусственных земляных валов и насыпей для обеспечения достаточной устойчивости склонов.

Может быть допустимым совместное захоронение нескольких типов отходов, позволяющее сократить количество и типы необходимых новых пунктов захоронения. Например, в США разрешено совместное захоронение слабозагрязненных насыпных грунтов, мусора, обломков снесенных зданий и других ОНАО на официальных пунктах захоронения опасных химических отходов.

11.4. РАЗМЕЩЕНИЕ НОВЫХ ПУНКТОВ ЗАХОРОНЕНИЯ ПОСЛЕ АВАРИИ

Как показывает опыт, размещение новых пунктов захоронения будет сопряжено со значительными трудностями. В зависимости от ситуации, возможно, потребуются принять политические решения об освоении новых площадок для захоронения в сжатые сроки. Если решение одних задач по размещению пункта может быть ускорено, то другие задачи не могут быть выполнены быстро без ущерба для обоснования безопасности. Любой ускоренный процесс потребует согласования с регулирующими органами. Необходимо найти баланс между очевидной потребностью в неотложных действиях и выделением достаточного времени на выполнение всех необходимых мероприятий и разъяснительную работу с общественностью. Существующие графики могут потребовать внесения коррективов, которые должны быть рассмотрены регулирующими органами, чтобы ускорить работу по характеристике площадки или другие работы без ущерба для безопасности.

11.4.1. Размещение пунктов захоронения по отношению к загрязненной территории

Может возникнуть принципиальный вопрос о том, следует ли выбирать площадки в пределах или за пределами загрязненной территории. На этот выбор могут повлиять технические, экономические и социально-политические факторы, вступающие в противоречие друг с другом. В конечном итоге решения будут определяться конкретными обстоятельствами аварии и политикой государств-членов. При оценке альтернативных мест расположения площадки необходимо дать ответы на следующие вопросы:

- Пригодна ли территория рядом с местом аварии в экологическом отношении для захоронения отходов с учетом требований, необходимых для выдачи разрешений, и других нормативных стандартов?
- Не ограничит ли размещение пункта захоронения на загрязненной территории способность контролировать работу нового пункта и адекватно реагировать на неожиданные выбросы?

ТАБЛИЦА 14. ДИФФЕРЕНЦИРОВАННЫЙ ПОДХОД К ВЫБОРУ ПРЕДПОЧТИТЕЛЬНОЙ ТЕХНОЛОГИИ ЗАХОРОНЕНИЯ, В ПОРЯДКЕ УВЕЛИЧЕНИЯ СТЕПЕНИ ИЗОЛЯЦИИ И ЛОКАЛИЗАЦИИ

Базовая концепция	Примеры концептуальных проектов	Группы отходов	Примеры типов отходов	Примечания в отношении свойств отходов
Приповерхностное				
Земляные траншеи	— Простая земляная траншея с адекватными естественными или искусственными барьерами — Искусственное покрытие	- ОО, - ОКЖО	— Местный строительный мусор, обломки — Грунт, крупногабаритные предметы и сыпучие отходы	— Твердые, химически инертные материалы с очень низким радиационным риском — Потенциальное использование существующих полигонов или специально оборудованных строительных котлованов/карьеров
	— Оборудованная земляная траншея — Геомембрана и/или обделка уплотненной глиной — Искусственное покрытие — Система мониторинга фильтрата — Варианты проекта для влажного и засушливого климата	- ОНАО, - НАО	— Местный строительный мусор — Грунт, крупногабаритные предметы и сыпучие отходы — Грунт, подвергшийся химическому воздействию — Транспортные средства и крупногабаритное оборудование — Биологические отходы (домашний скот, сельскохозяйственные культуры, деревья, растительный покров и т.д.) — СИЗ, инструменты, ветошь — Зольный остаток от сжигания	— Твердые, возможно химическое загрязнение — Относительно короткий период радиоактивного полураспада и/или низкая концентрация радиоактивности — Повышенное содержание органики (например, растительной массы и гниющих материалов)

ТАБЛИЦА 14. ДИФФЕРЕНЦИРОВАННЫЙ ПОДХОД К ВЫБОРУ ПРЕДПОЧТИТЕЛЬНОЙ ТЕХНОЛОГИИ ЗАХОРОНЕНИЯ, В ПОРЯДКЕ УВЕЛИЧЕНИЯ СТЕПЕНИ ИЗОЛЯЦИИ И ЛОКАЛИЗАЦИИ (продолжение)

Базовая концепция	Примеры концептуальных проектов	Группы отходов	Примеры типов отходов	Примечания в отношении свойств отходов
Оборудованные приповерхностные сооружения	— Бетонные камеры, кессоны	НАО	— Обломки здания реактора — Грунт с потенциальным химическим загрязнением — СИЗ, инструменты, материалы для очистки — Кондиционированные, отвержденные жидкости и шламы — Зольный остаток от сжигания	— Твердые иммобилизованные отходы, возможно захоронение некоторых загрязненных сыпучих отходов — Преимущественно короткоживущие радионуклиды с небольшим количеством долгоживущих — Более высокие концентрации радиоактивности, чем в земляных траншеях — Относительно низкое содержание органики и отсутствие свободных жидкостей
Геологическое захоронение				
Захоронение на средней глубине	— Существующие подземные сооружения (шахты, туннели) — Штреки, туннели, кессоны — Концепция скважинного захоронения	САО	— Некоторые облученные внутрикорпусные устройства реактора и трубы — Кондиционированные, отвержденные жидкости и шламы — Обломки конструкций биологической защиты реактора — Зольный остаток от сжигания	— Долгоживущие радионуклиды и высокая концентрация короткоживущих радионуклидов — Относительно низкое содержание органики — Жидкости, если они присутствуют в ВПК

ТАБЛИЦА 14. ДИФФЕРЕНЦИРОВАННЫЙ ПОДХОД К ВЫБОРУ ПРЕДПОЧТИТЕЛЬНОЙ ТЕХНОЛОГИИ ЗАХОРОНЕНИЯ, В ПОРЯДКЕ УВЕЛИЧЕНИЯ СТЕПЕНИ ИЗОЛЯЦИИ И ЛОКАЛИЗАЦИИ (продолжение)

Базовая концепция	Примеры концептуальных проектов	Группы отходов	Примеры типов отходов	Примечания в отношении свойств отходов
Глубокое геологическое захоронение	— Специально оборудованное глубинное геологическое хранилище	ВАО, САО	— Отработавшее и поврежденное ядерное топливо — Облученные внутрикорпусные устройства реактора — Отвержденные высокоактивные жидкости и шламы	— Возможно образование тепла — Высокие концентрации долгоживущих радионуклидов — Сложные отходы со свойствами, не допускающими долгосрочную локализацию

Примечание. СИЗ: средства индивидуальной защиты

- Не будет ли экономия на транспортных или иных расходах, достигаемая за счет захоронения отходов вблизи места аварии, сведена на нет, если тому же местному населению, которое сильнее всего ощущает на себе последствия аварии, будет предложено взять на себя еще и труд, связанный с захоронением? Если да, то можно ли решить эту проблему при помощи специальных экономических льгот и стимулов?
- Если требуются несколько объектов, должны ли они быть расположены компактно в интересах экономической эффективности или географически рассредоточены, чтобы обязанности по обслуживанию нескольких объектов были распределены более равномерно? Если да, то каковы последствия рассредоточения с точки зрения транспорта?
- Совместимы ли прогнозируемые будущие объекты землепользования в зоне аварии с созданием нового пункта захоронения?

11.4.2. Стимулы для местного населения как способ ускорить создание новых объектов

Как отмечалось выше, предоставление льгот и стимулов, помогающих определить приемлемые для местных жителей места размещения новых объектов, дает неоднозначные результаты. Впрочем, опыт в этой области ограничен, так что данный подход заслуживает изучения. Предоставление стимулов может существенно ускорить процесс размещения объекта, если сформируется сообщество волонтеров и если поддержка объекта будет сохраняться в течение всего времени, необходимого для получения необходимых разрешений на строительство нового объекта.

И напротив, если волонтеры не найдутся или если первоначальная готовность местного населения разместить у себя новый пункт захоронения впоследствии, после запуска проекта, ослабнет, может быть потеряно ценное время. Последствия последнего сценария могут быть смягчены, если будут определены несколько волонтерских структур, готовых к размещению объекта. Провал усилий по привлечению волонтеров может также вызвать негативное отношение, которое может усилить сопротивление других сообществ, когда процесс выбора площадки будет переориентирован и начат заново.

Поскольку предоставление стимулов не гарантирует успеха, при выборе площадки для нового пункта захоронения, возможно, будет целесообразно действовать по нескольким параллельным направлениям, включая запуск процессов, не зависящих от волонтеров из числа местного населения.

11.4.3. Применение критериев выбора площадки в аварийной ситуации

Обычный процесс использования многоаспектных критериев пригодности площадки для определения предпочтительных мест захоронения, как правило, включает в себя поэтапное применение исключающих и дискреционных компонентов. Исключающие критерии охватывают характеристики, которые исключают большие зоны или отдельные площадки из рассмотрения на предмет захоронения отходов. Затем используются дискреционные критерии, чтобы отделить более благоприятные места от менее благоприятных.

Если технические заключения должны непременно основываться на наличии данных, то исключающие критерии, как правило, носят более абсолютный характер. В целом проблемы, имеющие отношение к исключающим факторам, не могут быть решены реально доступными инженерными средствами. К техническим характеристикам, исключающим приповерхностное захоронение, обычно относятся поверхностные водоемы, поймы рек, зоны активных или потенциально активных сейсмических разломов и зоны значительной эрозии или гравитационного перемещения горных пород, артезианские или неглубоко залегающие подземные воды, зоны добычи нефти или полезных ископаемых, а также прогнозируемый рост населения. К исключающим экологическим характеристикам могут относиться заболоченные места, обозначенные места обитания диких животных или редких растений, а также дикие территории

или зоны живописного природного ландшафта. Наконец, к исключаящим характеристикам, связанным с культурой и землепользованием, можно отнести археологические и исторические объекты, парки и зоны отдыха. В случае ядерной аварии может быть оправданным размещение объектов на территориях, которые в неаварийных условиях обычно не рассматриваются. Например, если возникнет необходимость в переселении пострадавших жителей (из долгосрочной зоны отчуждения) на постоянное место жительства в другой район, это позволяет рассмотреть возможность размещения объекта на территории, которая в противном случае была бы исключена из-за ранее проживавшего населения. И наоборот, прогнозируемый рост населения в этой зоне может исключить из рассмотрения экологически благоприятные площадки.

Дискреционные критерии основаны на относительной важности, определяемой общественно-политическими ценностями и практическими ограничениями. К дискреционным техническим характеристикам относятся условия, которые поддаются устранению при помощи искусственных барьеров или других технических решений, но эти характеристики все же полезны для отделения более благоприятных площадок от менее благоприятных. Для взвешивания или ранжирования важности дискреционных факторов размещения площадки используются разнообразные методы, помогающие вычленив благоприятные места размещения из числа мест, не исключенных из списка. Благоприятные технические условия могут включать глубокие, локализованные или не пригодные для питья подземные воды; глубокие или низкопроницаемые поверхностные грунты; непористую коренную породу; пологий рельеф. Примерами дискреционных характеристик, связанных с окружающей средой, землепользованием и культурой, могут служить сельскохозяйственные и лесные угодья, наличие инженерных коммуникаций и местные планы землепользования. Чрезвычайно важным дискреционным фактором может быть доступность дорожной сети и железнодорожного сообщения.

11.5. ЭКСПЛУАТАЦИЯ ПУНКТА ЗАХОРОНЕНИЯ ПОСЛЕ АВАРИИ

Аварийные отходы, не схожие с отходами, нарабатываемыми для захоронения в обычных условиях, могут потребовать применения дополнительных КПО. Новые требования к конкретным объектам могут потребовать согласования в ответственных регулирующих органах. Нерадиологические составляющие отходов могут относиться к компетенции нескольких ведомств.

Демонстрация соблюдения требований на момент приема отходов на пункте захоронения, как правило, основывается на сочетании физического осмотра с изучением документации, подготовленной в соответствии с действующей программой менеджмента качества. Физический осмотр, в зависимости от типа аварийных отходов, может включать в себя вскрытие упаковок, отбор проб отходов и лабораторные исследования. Уроки, извлеченные из предыдущих аварий, показывают, что для правильного применения КПО требуются детальные регламенты и строгий независимый надзор, чтобы не допустить неправильного захоронения. Плохой контроль отходов при приеме может нанести большой ущерб работе пункта захоронения.

КПО также применимы и важны для хранилищ отходов или временных зон технологической подготовки, где хранятся отходы и откуда они в дальнейшем отправляются на захоронение, о чем говорится в разделе 3.1. Неспособность ввести и адекватно применять такие критерии в этих местах может стать причиной длительных задержек в подготовке отходов к отправке, отказа в отправке на пункт захоронения и прочих негативных последствий. По этой причине операторам пунктов захоронения важно следить за тем, чтобы в отношении хранения отходов и других операций по обращению с отходами перед захоронением также действовали соответствующие программы проверки отходов и менеджмента качества.

11.5.1. Строительство нового пункта захоронения

Строительство пункта захоронения аварийных отходов может отличаться от строительства при неаварийных условиях по ряду признаков. Как показывает имеющийся опыт, для ускорения строительства без ущерба для безопасности при условии правильного планирования и выполнения работ могут применяться методы, описанные ниже.

- a) Секции системы захоронения могут сооружаться отдельными очередями, сроки которых могут продлеваться, что даст возможность построить и ввести в эксплуатацию первоначальную зону захоронения, а затем пристраивать новые, соединенные с ней очереди. Схема так называемых непрерывных траншей для захоронения с противофильтрационным экраном применяется на пункте захоронения опасных отходов и ОНАО близ Гранд-Вью, штат Айдахо, США [168].
- b) Ускорить сроки строительства поможет четкое планирование порядка выполнения работ, начиная с заблаговременной доставки необходимой строительной техники и персонала на площадку. Для этого в строительной отрасли существуют стандартные инструменты управления проектами.
- c) В процессе согласования строительства секций системы захоронения могут быть сооружены вспомогательные инженерные коммуникации, дороги, автостоянки, ограждения, мастерские для ремонта и технического обслуживания оборудования и другая вспомогательная инфраструктура.
- d) До начала строительства на площадке могут быть оборудованы и другие вспомогательные объекты, такие как мобильные офисы для административных служб и служб безопасности, а также раздевалки и душевые для работников.
- e) Координация действий с регулирующими органами облегчает своевременное рассмотрение чертежей фактически построенных объектов, что сокращает время между завершением строительства и получением разрешения на операции по размещению отходов.

Если строительство ведется на загрязненной территории, обычно применяются особые меры. Речь может идти о следующем:

- проведении программы радиационной дозиметрии для строительных рабочих, а также соответствующих инструктажей;
- процедурах обработки загрязненной одежды, инструментов и оборудования — они могут предполагать сочетание дезактивации таких материалов с их захоронением.

11.5.2. Перевозка на пункт захоронения за пределами площадки: маршруты, способы и оборудование

Объемы отходов, связанных с аварийной ситуацией, могут быть настолько велики, что государство-член будет не в состоянии справиться с ними при помощи обычных рабочих операций по загрузке, транспортировке, инспектированию и разгрузке сыпучих и других отходов на выбранной площадке для захоронения. В деле обращения с большими объемами отходов накоплен значительный опыт, о котором будет говориться ниже, а конкретные примеры, касающиеся аварийных отходов, приведены в разделе 9.

Важным аспектом планирования захоронения является выбор транспорта — автомобильного, железнодорожного или их сочетания с использованием контейнеров для смешанной перевозки отходов. Следует должным образом учесть состояние дорог, включая потенциальную необходимость их улучшения и ограничения по весу транспортных средств. Если используется железнодорожный транспорт, могут потребоваться новые боковые пути для съезда с основной железнодорожной магистрали и заезда на нее. Кроме того, и в пункте отправления, и в пункте прибытия потребуются оборудование для погрузки и разгрузки отходов.

Перевозка отходов железнодорожным транспортом позволяет перевозить большие объемы по ускоренному графику, особенно если используются выделенные поезда, предназначенные исключительно для транспортировки отходов. Твердые отходы могут перевозиться в полувагонах, накрытых брезентом или жесткими крышками. Отходы в вагоне могут быть завернуты в пластиковую оболочку, что облегчает погрузку отходов на месте аварии.

Большие объемы могут также перевозиться грузовым автотранспортом. Сыпучие отходы обычно накрывают брезентом. Грузоподъемность может быть увеличена за счет использования многоосных тягачей с прицепом, который распределяет общий вес. С одобрения правительства допуски по весу на дорогах могут быть временно увеличены в связи с аварией. В зависимости от уровня прямого радиоактивного излучения отходов может потребоваться экранирование кабин грузовиков для ограничения дозы облучения водителей; кроме того, может применяться программа дозиметрии персонала.

В зависимости от типа отходов могут использоваться различные транспортные контейнеры. Для упаковок с высокой дозой радиации могут потребоваться сертифицированные защитные контейнеры. Крупные компоненты реактора также могут перевозиться в неразобранном виде на барже, по железной дороге или в специализированных трейлерах.

11.5.3. Оборудование для погрузки и разгрузки грузов

На месте аварии, на пунктах захоронения и во всех промежуточных местах, таких как временные зоны технологической подготовки, промежуточные хранилища или перерабатывающие предприятия, потребуется наличие совместимых погрузочно-разгрузочных средств и оборудования. В зависимости от объемов обрабатываемых отходов и используемых видов транспорта для этого могут потребоваться большие площади. Например, на железнодорожных терминалах на площадке целесообразно предусмотреть несколько дополнительных путей, на которых будут находиться вагоны в ожидании разгрузки, очистки, осмотра и отправки обратно на основную региональную железнодорожную магистраль.

Разнообразная техника для транспортировки и разгрузки отходов широко представлена на рынке. Сыпучие отходы, перевозимые грузовым транспортом, могут транспортироваться самосвалами с задней и боковой разгрузкой, безбортовыми платформами, на которые грузятся контейнеры для смешанных перевозок или другие ящики, а также крытыми прицепами, на которые грузятся бочки или другие контейнеры с отходами. Для упаковок с высокой мощностью дозы может подойти разгрузка при помощи крана или другого оборудования для дистанционного манипулирования.

На погрузочно-разгрузочные станции распространяются программы и процедуры обучения, техники безопасности, ОК, дозиметрии персонала и другие программы и процедуры радиационной защиты, действующие для всей остальной территории пункта захоронения.

11.5.4. Верификация КПО на пункте захоронения

Как показывает опыт, прием большого количества грузов с аварийными отходами может привести к тому, что пункт не сможет должным образом проверять все поступающие отходы. Адаптация к таким ситуациям обычно требует расширения штата и обучения персонала, тщательного контроля и увеличения частоты проверок для обеспечения соблюдения регламентов. Еще один способ выявить направления для улучшения работы — это увеличение количества аудитов в рамках программы ОК. Мероприятия, заслуживающие особого внимания, могут включать следующее:

- координацию проверок отходов между персоналом пункта захоронения и всеми предприятиями по обращению с отходами перед захоронением, которые занимаются переправкой отходов;

- изучение грузовых манифестов с целью удостовериться в соблюдении КПО;
- прямые измерения радиоактивности поступающих грузов, а также оборудования, покидающего зоны радиационного контроля;
- визуальные осмотры, отбор и тестирование проб отходов для проверки их характеристик;
- увеличение частоты калибровки приборов;
- паспортизацию и учет поступающих отходов и мест их захоронения (обычно секции системы захоронения располагаются в узлах координатной сетки) с целью облегчить извлечение в случае необходимости.

Чтобы свести к минимуму отказы в приеме отходов и обеспечить дальнейшее соблюдение КПО, на месте аварии и на всех промежуточных пунктах передачи или переработки отходов целесообразно разместить квалифицированный персонал, который наблюдал бы за подготовкой грузов и осуществлял независимый надзор. Может быть также целесообразным предварительное утверждение программ ОК, используемых в таких местах за пределами площадки. Благодаря этим мерам оператор пункта захоронения может лучше уяснить следующее:

- a) каким был источник отходов в зоне аварии;
- b) были ли отходы адекватно охарактеризованы и отделены от других, несовместимых типов отходов;
- c) была ли надлежащим образом проведена возможная обработка;
- d) соответствуют ли уровни прямого излучения на сыпучих грузах и упаковках с отходами предельным значениям, установленным для данного пункта захоронения.

11.5.5. Эксплуатационный контроль и надзор на пункте захоронения

В зависимости от потоков отходов, образующихся в результате аварийной ситуации, и конструкции пункта захоронения программы контроля и надзора могут потребовать модернизации. К областям, которые потенциально в этом нуждаются, можно отнести следующее:

- расширенный мониторинг подземных вод с учетом опасных химических или других нерадиологических компонентов, вызывающих беспокойство;
- газообразование в результате разложения органических отходов;
- противопожарная защита, если со временем увеличатся объемы горючих отходов или будет образовываться значительное количество метана;
- вопросы техники безопасности, связанные с потенциальным использованием нового оборудования для обращения с отходами, воздействием дополнительных опасностей, таких как химические вещества или инфицированные отходы, и другими проблемами безопасности работников.

11.6. ОПЫТ ЗАХОРОНЕНИЯ ОТХОДОВ ПОСЛЕ КРУПНЫХ АВАРИЙ

Помимо крупных аварий, взятых в качестве примера в данной публикации, самый богатый опыт захоронения больших объемов отходов, образовавшихся на загрязненных территориях, был получен при обращении с отходами прошлой деятельности по созданию ядерного оружия. Примерами могут служить работы по реабилитации объектов по разработке ядерного оружия в США, комплекса в Селлафилде в Соединенном Королевстве и полигона «Маралинга» в Австралии (см. приложение VI).

Когда объемы отходов относительно невелики и существуют объекты, способные принять их на захоронение, предпочтительным вариантом часто является захоронение за пределами загрязненной территории. В качестве примера можно привести захоронение отходов восстановительных мероприятий на небольших объектах, связанных с ядерным оружием (например, в приповерхностном

хранилище и на пункте скважинного захоронения на Невадском объекте национальной безопасности), и проект WIPP в США, а также захоронение отходов от загрязненных установок в районах городской застройки, например инцидент с рассеиванием радионуклидов из заброшенного источника в Гоянии, Бразилия (см. приложение V) [169].

Кроме того, практикуется захоронение отходов на загрязненных территориях в сочетании с захоронением за их пределами. Обычно это предполагает экскавацию и извлечение отходов, которые загрязнены сильнее, для захоронения за пределами площадки, чтобы слабозагрязненные материалы могли быть захоронены вблизи места аварийной ситуации. Примерами этой стратегии являются программы захоронения отходов в Маралинге, Австралия, и Паломаресе, Испания [75, 170–172].

В ходе чрезвычайного реагирования на аварию на Чернобыльской АЭС отходы были захоронены быстро, без предварительной характеристики и тщательного проектирования пунктов захоронения [3]. Последующая реабилитационная деятельность, вероятно, будет продолжаться десятилетиями. Кроме того, имело место множество случаев реабилитации старых, необорудованных объектов без подготовки обоснования безопасности. Предварительное планирование может стать основой для оценки характеристик площадки и определения минимальных стандартов инженерного проектирования, необходимых в случае аварии.

Как показывает опыт прошлой деятельности, если КПО не будут введены или не будут последовательно применяться, это может повлечь за собой необходимость проведения обширных восстановительных работ в будущем. Речь идет об извлечении отходов путем эксгумации и последующем перезахоронении — чрезвычайно дорогостоящем и трудоемком процессе, в ходе которого работники серьезно рискуют подвергнуться повышенному воздействию радиологических и других опасностей. Извлечение и перезахоронение отходов широко практиковалось в США при реабилитации объектов, связанных с оружием.

Что касается сроков захоронения, то здесь наблюдается весьма пестрая картина. В публикации Серии норм безопасности МАГАТЭ, № SF-1, «Основополагающие принципы безопасности» [173] не рекомендуется переносить ответственность за захоронение радиоактивных отходов на будущие поколения, что подразумевает своевременное, безопасное захоронение отходов. Избежать такого переноса ответственности после аварии весьма проблематично в случае аварий на Чернобыльской АЭС и АЭС «Фукусима-дайти», где захоронение отходов происходит в течение длительного времени из-за больших объемов и разнородности отходов и где существует необходимость создания новых мощностей по захоронению. Отложенный вывод из эксплуатации также практиковался после аварийных ситуаций на ТМА-2 и реакторе в Уиндскейле. В случае небольших ядерных аварий и реабилитации объектов ядерного наследия захоронение производилось быстро, с использованием существующих мощностей.

Когда планы работ по захоронению уже составлены, возникает ряд новых проблем, связанных со сроками. Если существующих мощностей по захоронению достаточно для приема всех аварийных отходов, задачи и графики могут быть определены более или менее уверенно при наличии достаточных финансовых и людских ресурсов. Здесь имеется богатый опыт применения общепринятых инструментов управления проектами для планирования и реализации последовательности действий по выбору площадки, а также характеристики отходов, обработке, переработке, погрузке, транспортировке, приему и захоронению больших объемов отходов.

В тех случаях, когда возможности для захоронения отсутствовали, а финансовых средств было недостаточно, на национальном уровне принималось решение о том, чтобы отложить захоронение. В Японии после аварии на АЭС «Фукусима-дайти» было принято решение организовать долгосрочное хранение до тех пор, пока в будущем не будут определены предпочтительные места и технологии захоронения. На Украине прогресс в деятельности по захоронению сдерживается нехваткой финансовых ресурсов.

12. ЗАКЛЮЧЕНИЕ: О ТОМ, КАК ВАЖНО БЫТЬ ВО ВСЕОРУЖИИ

О характере и масштабе любой будущей ядерной аварии нельзя сказать ничего определенного. Вместе с тем в некоторых государствах-членах уже накоплен большой опыт, касающийся последствий крупных аварий и эффективности реагирования на них. Практический опыт и извлеченные уроки в области обращения с аварийными отходами, описанные в настоящей публикации, дают другим государствам-членам хорошую основу для предварительного планирования вариантов обращения с аварийными отходами и возможных технических решений в этой области. Этот опыт можно объединить с полученными за многие десятилетия знаниями об обращении с большими объемами отходов, наработанными при реабилитации крупных загрязненных объектов ядерного наследия и при выводе АЭС из эксплуатации. В своей совокупности эта информация дает надежную основу для понимания проблем обращения с отходами, которые будут возникать при ликвидации последствий аварии.

Один из главных извлеченных уроков состоит в том, что безопасное и экономически эффективное обращение с отходами, образовавшимися в результате крупной ядерной аварии, оказалось невероятно сложной задачей, которую можно было бы упростить, если бы на национальном уровне и на уровне установки были заранее составлены планы чрезвычайных мер. Государства-члены могут осуществить предварительное планирование и провести подготовительные мероприятия, которые значительно повысят эффективность обращения с отходами и восстановления площадки в случае аварии. Такое предварительное планирование может основываться на определении и анализе потенциальных сценариев аварии на конкретных ядерных установках и включать в себя региональные и местные исследования, посвященные возможным вариантам обращения с отходами, и учения с участием организаций, которые будут заняты ликвидацией последствий аварии. Предварительное планирование может служить основой для реагирования с целью гарантировать выбор разумных технологических и программных решений после аварии и задавать направление чрезвычайным действиям по мере развития аварийной ситуации и изменения условий на площадке и за ее пределами. Эти усилия по предварительному планированию также помогут заинтересованным сторонам и общественности понять, какие варианты и методы обращения с отходами будут иметься у них в распоряжении.

Таким образом, неперенным условием успеха будет наличие четко проработанной стратегии обращения с отходами и процесса планирования. В отсутствие четкой стратегии действия по реагированию, предпринятые вскоре после аварии, могут ограничить круг возможных вариантов обращения в будущем, существенно увеличить расходы и повлечь за собой значительные риски облучения для персонала. Заранее спланированная стратегия обращения с отходами обеспечит надежную основу для принятия решений по выбору технологий и размещению объектов по обращению с отходами и их захоронению, которые должны будут функционировать в условиях острой нехватки времени на начальных стадиях аварии, а также в течение длительного периода очистки и реабилитации площадки.

Благодаря грамотному предварительному планированию государства-члены могут также провести подготовительную работу, для того чтобы минимизировать объем отходов, требующих захоронения, разделить отходы по типам и уровню радиоактивности, переработать или иным образом подготовить хранящиеся отходы к захоронению, а затем произвести их захоронение безопасным, эффективным и экономичным способом. Для программы обращения с отходами исключительно важно, чтобы в ходе всех проводимых работ обеспечивалась защита работников, населения и окружающей среды в соответствии с принятыми нормами.

Приложение I

АВАРИЯ НА РЕАКТОРЕ В УИНДСКЕЙЛЕ

Пожар на реакторе № 1 в Уиндскейле в 1957 году был подробно задокументирован как во время аварии, так и в последующих исследованиях. В данном приложении содержится краткое описание аварии и порядка обращения с образовавшимися отходами.

I.1. РЕАКТОРЫ В УИНДСКЕЙЛЕ

Комплекс «Уиндскейл уоркс» (ныне часть комплекса «Селлафилд»), расположенный на западном побережье Камбрии в Соединенном Королевстве, был создан в 1947 году. Здесь были построены два реактора мощностью 180 МВт (тепл.) с графитовым замедлителем и воздушным охлаждением для наработки плутония для нужд национальной обороны и производства радиоизотопов для медицинских, военных и промышленных целей. Тепловыделяющие стержни из природного урана были заключены в оребренные алюминиевые оболочки. Реактор № 1 был пущен в строй в октябре 1950 года (рис. 55).

В период с 1952 по октябрь 1957 года периодически проводился плановый отжиг путем повышения температуры активной зоны реактора для удаления накопленной в графите энергии Вигнера. Авария на реакторе № 1 произошла во время одного из таких отжигов.

I.2. ПОЖАР НА РЕАКТОРЕ № 1

10 октября 1957 года отжиг привел к неожиданному повышению температуры активной зоны. Попытка охладить активную зону реактора путем продувки воздуха через топливные каналы привела к тому, что некоторые из каналов загорелись. Из горящих каналов было вручную извлечено топливо, и была предпринята безуспешная попытка потушить пожар с помощью CO_2 . В итоге пожар был потушен путем прокачки через активную зону $\sim 7000 \text{ м}^3$ воды. Эта вода сбрасывалась в море или в систему отвода поверхностных вод. Эта авария подробно описана в [60, 174, 175], а недавняя оценка последствий и воздействия представлена в [176]. Отчет следственной комиссии, немедленно назначенной Управлением по атомной энергии Соединенного Королевства, был подготовлен через две недели после аварии. Отчет этой комиссии, которую возглавлял сэр Уильям Пенни («отчет Пенни»), был впоследствии опубликован в 1988 году и теперь доступен в [177].

Пожар привел к выбросу радиоактивности в воздух через вытяжную трубу. Труба была оснащена фильтрами, которые оказались весьма эффективными, но шлейф загрязнения распространился за пределы площадки. В течение всего периода выброса на площадке и в прилегающем районе проводились замеры уровней загрязнения воздуха. Эти измерения продолжались в течение всего периода выброса, и стало очевидно, что авария не вызвала сколько-нибудь значительного внешнего облучения людей, живущих в этом районе, и что внешнее облучение населения, живущего в непосредственной близости от комплекса, было ничтожно малым [178]. На большем расстоянии два шлейфа активности, примерно одинаковые по размерам, распространились на юг и на восток, при этом значительные выпадения иода-131 были отмечены по всему Мидлендсу, а загрязнение было зафиксировано даже в Бельгии.

В результате пожара население подверглось опасности ингаляционного, перорального и внешнего облучения, причем основную угрозу для здоровья рабочих и населения представлял радиоактивный иод. Для оценки последствий были проведены исследования щитовидной

железы, и самая высокая активность, обнаруженная в щитовидной железе одного сотрудника УАЭСК, составила 0,5 мкКи. Кроме того, были проведены обследования работников для оценки облучения $^{89}\text{Sr}/^{90}\text{Sr}$. Самые высокие уровни, которые были обнаружены, не превышали одной десятой максимально допустимого содержания радионуклидов в организме. Уровень содержания радиоактивного цезия в биологических пробах был признан допустимо низким [179]. Уже на ранней стадии можно было исключить необходимость принятия экстренных мер, связанных с ингаляционным и внешним путями облучения. Возможная опасность перорального облучения радионуклидами с загрязненных пастбищ была проверена путем отбора молока на местных фермах. Из-за содержания в молоке йода-131 пришлось ограничить продажу молока из районов, окружающих площадку, площадь которых в итоге составила ~500 км². Примерно 3000 м³ молока было собрано и утилизировано¹. Питьевая вода в Камберленде, Ланкашире и Северном Уэльсе также была проанализирована на радиоактивность, и выяснилось, что уровень загрязнения был значительно ниже того, который представлял бы опасность [178].



РИС. 55. Реакторы №№ 1 и 2 в Уиндскейле. Публикуется с разрешения «Рэйддиоэктив уэйст менеджмент, лтд.»

¹ См. Nuclear Power and the Environment, <https://pubs.rsc.org/en/content/ebook/978-1-84973-194-2>.

1.3. ОБРАЩЕНИЕ С ТВЕРДЫМИ ОТХОДАМИ

Оба реактора оставались заглушенными, отжиг активных зон не продолжался, а реактор № 1 был признан не подлежащим восстановлению. Начальные стадии очистки начались в 1958 году и были в основном завершены к 1959 году [180]. Большая часть топлива из реактора № 1 была извлечена и отправлена на хранение и/или переработку.

На первых стадиях ликвидации последствий твердые отходы, включавшие фильтры вытяжной трубы и обломки различных конструкций реактора № 1, были отправлены на имеющиеся объекты на площадке в Уиндскейле, включая бункер для хранения твердых отходов (использовавшийся для хранения материалов для расчехловки твэлов), траншеи для захоронения НАО в Уиндскейле и хранилище отходов Северной группы (кирпичное сооружение с плоской крышей, в котором производилось захоронение отходов). Документов о захоронении отходов на этих объектах существует мало, и современные объемы приходится оценивать на основе других исторических документов, в том числе хранящихся в национальных архивах и на заводах, с которых эти отходы были отправлены. В 1981 году было сделано заключение, что риск возгорания активной зоны и проблема критичности при обрушении активной зоны отсутствуют, что позволило в середине 1980-х годов начать вывод из эксплуатации. Стадия 1 вывода из эксплуатации была завершена в июле 1999 года.

Окончательный вывод из эксплуатации обоих реакторов не завершен. Ряд предложений и некоторые первоначальные мероприятия по выводу из эксплуатации в сочетании с рядом изменений в обязанностях организаций по отношению к площадке и постоянным совершенствованием методов управления выводом из эксплуатации стали причиной внесения в план нескольких коррективов. В последнее время это стало означать более активное привлечение заинтересованных сторон, в особенности тех, которых интересует определение желаемого конечного состояния площадки. Ключевым вопросом является характеристика материалов, необходимая перед тем, как будет разработан технический проект и начаты физические работы, которые приведут к образованию отходов. Характеризация лежит в основе планирования обращения с отходами с целью определения их дальнейшей судьбы, а также НИОКР и обоснований безопасности, требующихся для выполнения работ по выводу из эксплуатации.

Схемой вывода реактора № 1 из эксплуатации предусмотрено сооружение над крышкой реактора конструкции с прорезью в крышке с целью облегчить спуск инструментов и оборудования. Вначале это позволит извлечь топливные и изотопные кассеты, которые в настоящее время остаются в активной зоне, и провести их последующую обработку. Кассеты помещаются в гильзы из мягкой стали и затем герметизируются внутри гильзы при помощи органического полимера. Затем гильза будет зацементирована в бочке из нержавеющей стали емкостью 500 л, что создаст кольцевое пространство из цемента между бочкой и герметизированными отходами. Бочки емкостью 500 л будут помещены на временное хранение в экранированное хранилище в Селлафилде в ожидании окончательного захоронения в намеченном к строительству национальном ПГЗ. Полимер был выбран вместо обычного цементного раствора по той причине, что в щелочной среде металлический уран может вступать в реакцию с образованием объемных и химически активных продуктов коррозии.

Предполагается, что потребуется несколько моделей гильз с учетом неодинаковой природы различных компонентов топлива и изотопных отходов, например более высокой степени экранирования для кобальтовых кассет, и операции предполагается проводить очередями, каждая из которых будет включать извлечение кассет определенного типа, а также упаковку уже извлеченных и находящихся на хранении предметов. Топливные и изотопные кассеты, оставшиеся в реакторе № 1 после пожара, находятся в разном состоянии: одни остались неповрежденными, другие превратились в золу и обломки. Считается, что зола представляет собой смесь оксидов и гидроксидов урана, материалов оболочки и изотопных источников.

Графит из реактора № 1 будет укладываться в корзины и помещаться в ящики объемом 3 м³ (рис. 56), которые будут также переправляться в экранированное хранилище в Селлафилде для



РИС. 56. Ящик объемом 3 м³ для графита из реактора № 1 и других реакторных отходов, которые в конечном итоге будут захоронены на национальном ПГЗ. Публикуется с разрешения Управления по выводу из эксплуатации ядерных объектов.

последующего захоронения в национальном ПГЗ. Пока не будут решены проблемы, связанные с энергией Вигнера и потенциальной необходимостью отжига графита, извлеченный графит герметизироваться не будет. Чтобы сохранить возможность герметизации и отжига, корзины для отходов будут спроектированы с таким расчетом, чтобы их можно было извлечь из ящиков объемом 3 м³, если будет доказана необходимость этого, и заполнить отходами таким образом, чтобы обеспечить проникновение цементного раствора в будущем, устранив ненужные пустоты.

До тех пор пока не будет сооружен национальный ПГЗ, САО, образующиеся при выводе из эксплуатации реактора № 1, будут находиться во временных хранилищах комплекса «Селлафилд». Это согласуется с предпочтительными вариантами, выбранными в ходе ранее проведенных исследований по выбору вариантов, и отвечает принципу близкого расположения установок по обращению с отходами. Это позволяет поместить контейнеры с отходами напрямую в безопасное место хранения и устраняет необходимость подготовки упаковок с САО к транспортировке по дорогам общего пользования в настоящее время. Согласно рекомендации Инспектората ядерных установок, радиоактивные отходы и материалы, помещаемые в хранилища в настоящее время, потребуют локализации в течение общего периода не менее 150 лет [181]. Чтобы сохранить требуемую долговечность ящиков объемом 3 м³ и бочек емкостью 500 л, в промежуточном хранилище будут поддерживаться контролируемые условия: будет ограничиваться содержание хлоридов и регулироваться температура и влажность.

Приложение II

АВАРИЯ НА АЭС «ТРИ-МАЙЛ-АЙЛЕНД»

АЭС ТМА расположена на острове Три-Майл-Айленд на реке Саскуэханна в г.Лондондерри, штат Пенсильвания, США. На станции имеются два отдельных энергоблока, представляющие собой легководные реакторы с водой под давлением, ТМА-1 и ТМА-2, которые были пущены в строй в 1974 году. ТМА-1 продолжал работать до тех пор, пока не был окончательно заглушен в сентябре 2019 года. Авария произошла 28 марта 1979 года на энергоблоке № 2 (ТМА-2). В данном приложении содержится краткое описание аварии и порядка обращения с образовавшимися отходами.

II.1. АВАРИЯ НА ТМА-2

Авария была вызвана рядом механических неисправностей, которые усугубились неспособностью оператора станции распознать аварийную ситуацию с потерей теплоносителя и неопределенным состоянием клапанов системы. В результате произошло частичное расплавление активной зоны реактора. К счастью, за пределы гермооболочки было выброшено очень небольшое количество радиоактивного материала и последствия для здоровья людей и окружающей среды были минимальными. Тем не менее ликвидация последствий этой аварии заняла более 14 лет и обошлась более чем в 1 млрд долл. США.

Во время аварии в районе ТМА-2 проживало около 2 миллионов человек, и они, по оценкам, получили среднюю дозу радиации, которая лишь на $\sim 0,01$ мЗв превысила обычную фоновую дозу [42]. Различные государственные ведомства, которым был поручен мониторинг территории, собрали образцы воздуха, воды, молока, растительности, грунта и пищевых продуктов. Были обнаружены очень низкие уровни радионуклидов, которые можно было связать с аварийными выбросами. Несмотря на серьезное повреждение реактора, фактические выбросы оказали ничтожно малое воздействие на физическое здоровье людей и окружающую среду (таблица 15).

На сегодняшний день реактор ТМА-2 окончательно заглушен и 99% его топлива извлечено. Система теплоносителя реактора осушена, а радиоактивная вода дезактивирована и выпарена. Радиоактивные отходы, образовавшиеся в результате аварии, были отправлены за пределы площадки на захоронение или хранение. После удаления отходов ТМА-2 был переведен в режим долгосрочной, контролируемой консервации в ожидании окончательного останова ТМА-1 [42]. В декабре 2020 года лицензия на ТМА-2 была передана подрядчику, взявшему на себя работы по выводу из эксплуатации [56].

II.2. ОБРАЩЕНИЕ С АВАРИЙНЫМИ ОТХОДАМИ

ЭПРИ задокументировал проблемы и решения, принятые после аварии, и изучил вопросы и проблемы, которые были выявлены, возможные варианты ликвидации последствий и обращения с отходами, которые были оценены, предпринятые действия и последствия этих действий [182]. В другом отчете ЭПРИ содержалась подробная техническая и эксплуатационная информация по всем аспектам обращения с аварийными отходами [183]. В данном приложении обобщена информация, содержащаяся в этих и других отчетах.

После аварии образовались твердые, жидкие отходы (в основном загрязненная вода) и отходы в виде расплавленного топлива из активной зоны. За время ликвидации последствий

ТАБЛИЦА 15. ТВЕРДЫЕ И ЖИДКИЕ ОТХОДЫ, ОБРАЗОВАВШИЕСЯ В РЕЗУЛЬТАТЕ АВАРИИ НА АЭС «ТРИ-МАЙЛ-АЙЛЕНД»

«ТРИ-МАЙЛ-АЙЛЕНД»	
Твердые отходы (тип и количество)	Жидкие отходы (тип и количество)
САКТО (бетон, обломки конструкций активной зоны, материалы дезактивационных работ, отходы, связанные с управлением рабочим процессом, и т.д.): всего ~3900 м³ (36% компактированных, 60% некомпактированных, 3% стабильных, 1% прочих) Влажные твердые отходы (ионообменные материалы, шламы и т.д.): всего ~1200 м³ Класс А: 93%; класс В: 4%; класс С: ~3%; выше класса С: ~1%	Низкоактивная вода (< 1 мкКи/мл): вода, не связанная с аварией Среднеактивная вода (1–100 мкКи/мл): пол здания для операций с топливом и баки для сбора протечек теплоносителя реактора Высокоактивные жидкие отходы (> 100 мкКи/мл): подвал здания реактора и системы подпитки и очистки Всего 7500 м³
Примечание. В принятых в США классификациях отходов класс определяется концентрацией определенных радионуклидов. Класс А: от фоновой до 700 Ки/м³; класс В: 0,04–700 Ки/м³; класс С: 44–7000 Ки/м³.	

аварии было обработано более 5000 м³ твердых радиоактивных отходов (сухих и влажных). При помощи ионообменников и сорбционных установок было обработано свыше четырех миллионов литров загрязненной воды с целью удаления радионуклидов, что привело к образованию влажных твердых отходов, требующих захоронения. Из реактора было извлечено приблизительно 140 000 кг обломков конструкций активной зоны, которые были 52 партиями переправлены в Айдахскую национальную лабораторию, где они до сих пор хранятся в сухом виде.

Некоторые отходы превысили установленные в США пределы на коммерческое захоронение и не могли быть захоронены на существующих пунктах. Была проведена оценка воздействия на окружающую среду для подготовки соответствующего программного заключения, и между КЯР США и МЭ США была достигнута договоренность о том, что МЭ примет эти отходы для целей проведения НИОКР, чтобы оценить технологии обработки, системы хранения и т.д.

Ликвидация последствий аварии проводилась с 1979 по 1990 год, и в ней выделялись четыре операционные фазы, не имевшие четких дат начала и завершения: стабилизация станции, обращение с отходами, дезактивация и выгрузка топлива. При планировании и проведении мероприятий главным приоритетом было обеспечение безопасности. На ранних стадиях было принято решение не перезапускать реактор, что помогло сосредоточиться на переработке отходов и дезактивации. Чтобы избежать перерывов в осуществлении проекта и как можно реже начинать работы заново, была выбрана стратегия использования гибких и параллельных технологий очистки. Руководство также взаимодействовало с регулирующими органами и заинтересованными сторонами, чтобы выработать приемлемые решения.

Получение и анализ данных о характеристиках материалов были признаны жизненно важными для принятия обоснованных решений о стабилизации станции, методах очистки и обращении с отходами. На площадке была создана мощная аналитическая база, но многие пробы также приходилось отправлять на анализ за пределы площадки в другие учреждения. Перевозка этих материалов стала одной из центральных проблем, и работа координатора процесса упаковки стала важным элементом процесса очистки.

Во время аварии и после нее внешних выбросов радиоактивных материалов, по сути, зафиксировано не было, и поэтому обращение с твердыми отходами в основном включало в себя обращение с оборудованием и средствами для дезактивации, ионообменниками и сорбентами для очистки воды, а также с обломками и топливными материалами, связанными с топливом в реакторе.

Основной проблемой обращения с отходами после аварии было извлечение, обработка и хранение загрязненной воды, для чего потребовалось разработать системы водоочистки. Система EPICOR II была сооружена в аттестованном на сейсмостойкость здании химической очистки и устроена таким образом, чтобы облегчить установку и извлечение картриджей с ионитом при помощи монорельса. С ее помощью было удалено приблизительно 3×10^{15} Бк (80 000 Ки) активности из ~4 000 000 л воды за счет использования органических, цеолитных и угольных сред. Кроме того, потребовалось разработать различные системы водоочистки для обработки высокоактивных жидких отходов (содержавшихся в подвале здания реактора и в системах охлаждения и очистки реактора, которые имели активность > 100 мкКи/мл воды), а также для удаления твердых частиц и поддержания уровней Cs и Sr в допустимых пределах во время выгрузки топлива за счет использования цеолитных сред и систем фильтрации для удаления твердых частиц. Одной из серьезных проблем во время очистки было наличие достаточных емкостей для хранения воды.

До аварии на станции имелось очень мало возможностей для хранения твердых отходов. Однако с началом работ по ликвидации последствий аварии на площадке стали быстро накапливаться твердые отходы. Первые твердые отходы представляли собой в основном мусор и отработавшие ионообменные материалы. Позднее главными источниками радиоактивности, связанной с твердыми отходами, стали отработавшие фильтры предварительной очистки и картриджи со смолой из ионообменника. Нормативные и политические проблемы, возникшие после аварии, сделали проблематичным вывоз отходов за пределы площадки для окончательного захоронения, в связи с чем возникла необходимость в устройстве временных хранилищ. Эти хранилища были сделаны гибкими: они обеспечивали хранение отходов и их технологическую подготовку к вывозу за пределы площадки. Сразу же после аварии для хранения отходов были приспособлены существующие объекты, но вскоре стала очевидной необходимость в специально оборудованном временном хранилище. В 1980 году было введено в строй хранилище, известное как «бросовая земля». Это модульное хранилище состояло из двух модулей для хранения с общим дренажным зумпфом. В каждом модуле имелось 6 рядов ячеек по 10 в каждом (рис. 57). Толщина стенок модуля составляла 1 м, крышки — также 1 м, чтобы обеспечить экранирование. Каждая ячейка имела диаметр 2 м, высоту 4 м и была оборудована дренажным каналом для слива жидкости в зумпф. Для перемещения ионообменных картриджей и бочек для хранения в ячейки и из них использовалась крановая система.

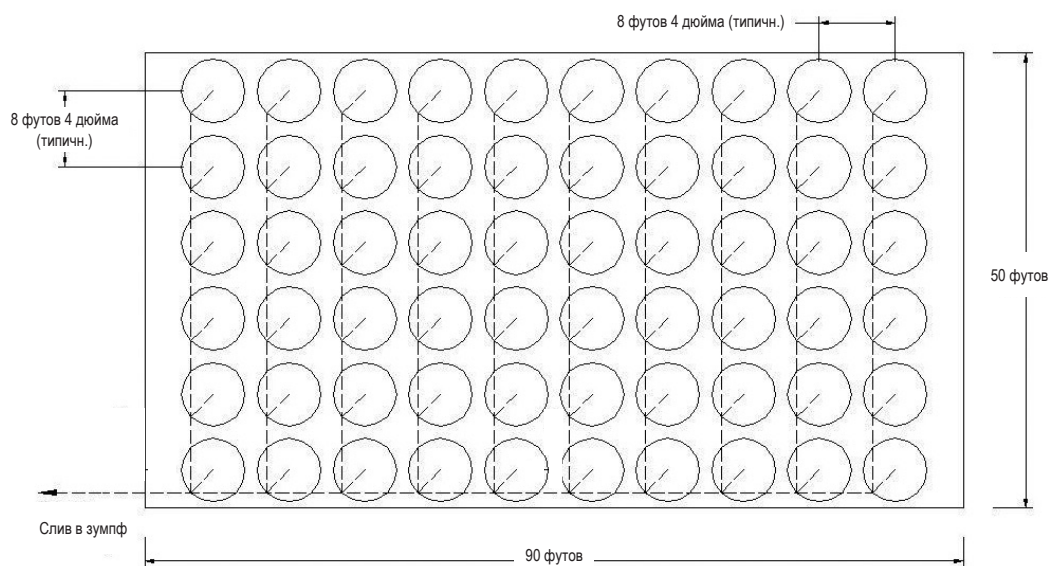


РИС. 57. Зона технологической подготовки твердых отходов, устроенная на ТМА-2. Взято с изменениями из [2].

В 1982 году был сооружен пункт временного хранения и технологической подготовки твердых отходов, обеспечивающий дополнительную площадь для хранения бочек с НАО (208 л) и ящиков с низкоактивными отходами. Его конструкция опять же позволяла подготовить материалы к перевозке на пункты захоронения вне площадки. В 1987 году был пущен в строй комплекс по переработке и упаковке отходов, предназначенный для консолидации и упаковки твердых отходов, а также для их дезактивации. Его работа позволила значительно сократить объемы отходов (эффективность упаковывания была повышена на 25–30%) и выпускать дезактивированные материалы в коммерческий оборот. Отходы, поддающиеся компактированию, уменьшались в объеме с помощью барабанного компактора.

Нормативные и политические проблемы исключили возможность захоронения отходов сразу после аварии. Вначале губернаторы двух штатов отказались принимать отходы ТМА-2 на захоронение на пунктах захоронения НАО в Ханфорде (штат Вашингтон) и Барнуэлле (Южная Каролина). В конце 1979 года губернатор штата Вашингтон дал разрешение на отправку отходов в Ханфорд, но прием НАО на пункт захоронения в Барнуэлле был разрешен только в 1987 году.

С отходами более высокого уровня активности возникли трудности, но между КЯР США и МЭ США была заключена договоренность о том, что последнее будет принимать отходы выше класса С для целей проведения НИОКР, чтобы оценить технологии обработки, системы хранения

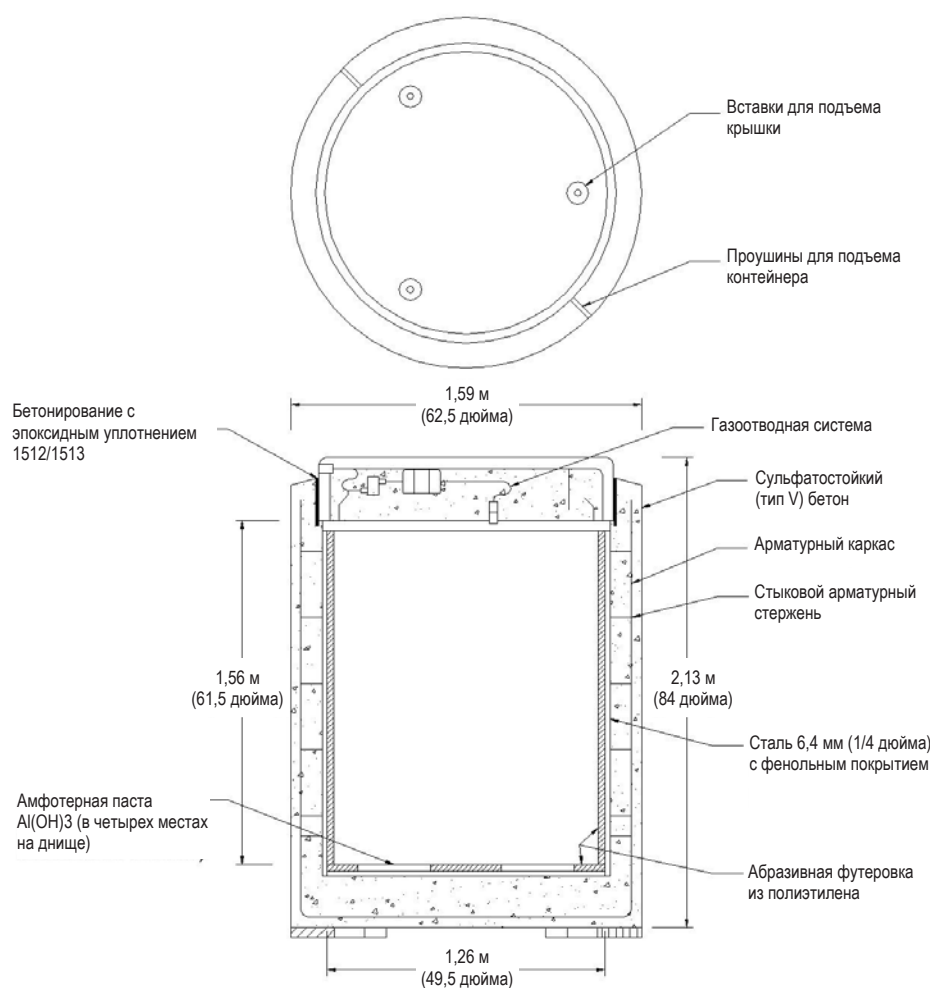


РИС. 58. Конструкция высокопрочного контейнера из железобетона. Взято с изменениями из [2].

и т.д. Это касалось нескольких типов отходов, включая топливо, смолы EPICOR II, фильтры, материалы, загрязненные ТРУ элементами, и картриджи, используемые на специализированных станциях дезактивации (SDS). В 1981 году КЯР США отменила требование об отверждении смол EPICOR II, и были предприняты усилия по разработке средств для упаковки картриджей с ионитом для захоронения на объектах МЭ. Сконструированный в итоге железобетонный ВПК (см. рис. 58) оказался пригодным для захоронения смол из системы EPICOR II на площадке «Ханфорд».

ВПК имел футеровку из коррозионно-стойкой стали. На дно был добавлен буферный материал для регулирования pH, и контейнер закрывался путем приклеивания крышки к корпусу с помощью адгезивного геля и цементного раствора. Газоотводная система позволяла стравливать радиолитические газы. Кроме того, была проведена общая оценка способов захоронения отходов SDS — систем, используемых для деминерализации высокоактивных жидкостей в подвале здания реактора. Отходами SDS были главным образом картриджи. Для целей захоронения картриджи SDS были упакованы в ВПК с полиэтиленовой футеровкой и отправлены на захоронение на площадку «Барнуэлл», как только были разрешены перевозки на площадку «Барнуэлл».

Приложение III

АВАРИЯ НА ЧЕРНОБЫЛЬСКОЙ АЭС

В апреле 1986 года в результате взрыва и пожара была разрушена Чернобыльская АЭС под Киевом, в бывшем СССР. Эта авария считается самой тяжелой из всех, когда-либо происходивших на ядерных энергетических установках. Она стала причиной немедленной и преждевременной смерти людей и сильного загрязнения обширных территорий нынешних Украины и Беларуси, а низкие уровни загрязнения были зафиксированы на большей части Европы. Большое количество местного населения пришлось навсегда переселить в другие места, а в наиболее загрязненных районах создать «зону отчуждения», которая, как ожидается, будет существовать еще неопределенное время. Авария имела колоссальные последствия для местного населения и для развития ядерной энергетики как в бывшем СССР, так и во всем мире. Восстановительные работы на площадке продолжаются уже более 30 лет и будут идти еще десятки лет в будущем.

В данном приложении кратко описывается большая работа по обращению с отходами, образовавшимися на площадке и за ее пределами, сделанная с момента аварии до настоящего времени. И программа обращения с отходами, и сама авария, а также ее последствия для здоровья людей описаны и рассмотрены в многочисленных исследованиях и публикациях, глубина и детальность которых не позволяют охватить их в полном объеме в рамках данного короткого приложения.

III.1. АВАРИЯ НА ЧЕРНОБЫЛЬСКОЙ АЭС

Реактор № 4, на котором произошла авария, был одним из четырех реакторов большой мощности канального типа (РБМК) с легководным теплоносителем и графитовым замедлителем на Чернобыльской АЭС. Причиной аварии стало сочетание плохой конструкции системы безопасности реактора и ошибок операторов [184]. Она произошла во время испытаний, призванных повысить безопасность реактора в случае потери энергии. Для проведения этих испытаний было отключено несколько критически важных систем безопасности реактора, который вышел из-под контроля так быстро, что операторы не смогли предотвратить мощный взрыв. Согласно одной из моделей, первоначальный взрыв в технологических каналах под реактором сорвал крышку биологической защиты весом 1000 тонн и поднял активную зону на 30 м, полностью выведя ее из шахты реактора. Активная зона взорвалась в воздухе внутри реакторного зала, разрушив здание и выбросив фрагменты твэлов в непосредственной близости от реакторных зданий и на площадку АЭС в целом, причем одна тепловыделяющая сборка, как сообщается, была найдена на расстоянии 1600 м [185]. Примерно половина активной зоны провалилась обратно в шахту реактора. Во время взрыва часть твэлов и других компонентов расплавилась и была выброшена в отдельные части здания реактора, застыв в виде «лавы» (расплава ядерного топлива). Обнажившаяся графитовая активная зона загорелась, став главным источником загрязнения воздуха, которое распространилось по Европе и Северному полушарию. Первоначальные попытки потушить пожар путем сброса на реактор с вертолетов тысяч тонн сыпучих твердых веществ (песка, свинца, дробленого доломита и т.д.) не увенчались успехом и только усилили распространение загрязнения воздуха твердыми частицами. Графит выгорел, и пожар был потушен через девять дней.

Спустя семь месяцев после аварии было построено укрытие (объект «Укрытие», или «саркофаг»), чтобы защитить обнажившиеся остатки здания реактора от воздействия окружающей среды и начать некоторые восстановительные работы. Сегодня реактор и объект «Укрытие» (который становился все более неустойчивым) полностью закрыты системой НБК — арочной

конструкцией, строительство которой при международном финансировании было завершено в 2018 году. Внутри НБК будет производиться демонтаж реактора № 4 и объекта «Укрытие».

III.2. АВАРИЙНЫЕ ОТХОДЫ

За три десятилетия, прошедшие со времени аварии, в ходе работ по ликвидации последствий образовалось огромное количество отходов, которые в настоящее время находятся на 17 пунктах хранения или захоронения на площадке и в других местах зоны отчуждения (см. таблицу 16). В совокупности они вмещают более 13 миллионов кубических метров материала. Дополнительные НАО, которые образуются в результате сноса реактора № 4 и старого объекта «Укрытие», могут быть захоронены на площадке, а САО и ВАО — помещены на долгосрочное хранение внутри НБК. Будущее топливных отходов еще не определено, и до сих пор не имеется полностью согласованной картины всех мест расположения топлива на площадке и вокруг нее.

Как видно из таблицы 16, основную часть аварийных отходов составляют загрязненные грунты в зоне отчуждения. Особая проблема состоит в том, что некоторые из этих грунтов содержат мелкие частицы топлива — шлейф из мелкодисперсных обломков твэлов неравномерно оседал по всей зоне отчуждения, преимущественно на западе и севере и вблизи АЭС, но в западном направлении он в виде узкой полосы распространился на расстояние до 100 км [187]. Вместе с тем преобладающими и наиболее широко распространенными загрязнителями в зоне отчуждения являются радионуклидные продукты деления. Более детальная разбивка отходов, находящихся на разных объектах на площадке и в зоне отчуждения, приведена в таблице 17.

Первоначальный сбор отходов происходил в течение 18 месяцев после аварии, когда началось строительство объекта «Укрытие», и во время дезактивации всей промплощадки, когда шла подготовка к перезапуску трех других реакторов АЭС. Основной период дезактивации большой территории зоны отчуждения, включая эвакуированные населенные пункты, начался в конце 1986 года и продолжался до конца 1988 года. В течение этого периода большая часть отходов, которые были помещены на временное хранение, была переправлена в места долгосрочного хранения.

Первый этап сбора и захоронения отходов был самым сложным этапом дезактивационных работ на площадке, поскольку он включал в себя сбор обломков конструкций активной зоны и реактора с чрезвычайно высоким уровнем радиоактивности. Военные, используя бронированные машины с усиленной радиационной защитой, помогли собрать рассеянные обломки в металлические

ТАБЛИЦА 16. ОБЩЕЕ РАСЧЕТНОЕ КОЛИЧЕСТВО РАДИОАКТИВНЫХ ОТХОДОВ НА УСТАНОВКАХ В ЧЕРНОБЫЛЬСКОЙ ЗОНЕ ОТЧУЖДЕНИЯ (ВЗЯТО С ИЗМЕНЕНИЯМИ ИЗ [186])

Тип хранилища	Кол-во установок	Объем отходов (м ³)	Активность (ТБк)
Пункты захоронения	3	631 519	5 420
Временные хранилища	9	1 296 588	1 840
Объект «Укрытие» (включая промплощадку)	1	662 500	740 000
Хранилища на площадке АЭС	4	19 794	385
Грунты зоны отчуждения	—	11 000 000	8 130
Всего:	17	13 610 401	755 775

контейнеры (первоначально это были контейнеры для бытового мусора с крышками), а верхний слой грунта вместе с частью обломков был сдвинут к границам разрушенного здания реактора бульдозерами. Очищенная территория закрывалась сборными железобетонными плитами. Рабочие смены были короткими, а транспортные средства проходили дезактивацию после каждой смены. Некоторые металлические контейнеры с ВАО вначале были захоронены на обычном пункте захоронения и перекрыты бетонными плитами и грунтом, а затем была разработана система, при которой контейнеры с отходами помещались за так называемыми «пионерными» стенами вдоль границ разрушенного здания станции, засыпались щебнем, песком и бетонировались. В конечном итоге они стали частью объекта «Укрытие» или оказались внутри него.

Для хранения срезанного бульдозерами и собранного верхнего слоя грунта с большей площади площадки, которая не была покрыта бетонными плитами, было создано временное хранилище. Эти ВАО также содержали обломки твэлов и конструкций реактора и собирались в контейнеры емкостью 1 м³. Некоторое количество отходов было помещено в недостроенный могильник для НАО на площадке [188]. В общей сложности от верхнего слоя грунта было очищено более полумиллиона квадратных метров территории площадки.

Особую опасность представляло удаление многих тонн материала активной зоны реактора (в том числе 16,5 тонн тепловыделяющих сборок и 182 тонны графита), который был выброшен на крыши соседних зданий, включая здание реактора энергоблока № 3, покрыв площадь около 3000 м². Это делалось вручную: материал либо заталкивался в пустоты разрушенного здания реактора, либо собирался в контейнеры и вывозился краном или вертолетом в одно из хранилищ. Часть материала была помещена в мешки по периметру зданий и забетонирована [188].

Соседние здания энергоблока № 3 также нуждались в серьезной внутренней дезактивации, чтобы обеспечить работу АЭС, а энергоблоки № 1 и № 2 также были сильно загрязнены радиоактивными аэрозолями, попавшими в них через вентиляционные системы. В 1987–1988 годах было дезактивировано более 24 млн м² внутренних помещений и более 6 млн м² прилегающей территории, в результате чего образовалось 38 000 тонн загрязненного оборудования и более 16 000 тонн радиоактивных отходов, нуждающихся в вывозе и захоронении.

После первоначальной очистки площадки внимание переключилось на очистку территорий в радиусе 30 км, на которых были зафиксированы самые высокие уровни поверхностных радиоактивных выпадений. Сильнее всего были загрязнены территории в пределах 5 км от АЭС, включавшие в себя эвакуированный город Припять. Многие временные или некапитальные строения с высоким уровнем загрязнения на крышах были снесены. Успешно провести дезактивацию большой территории города не представлялось возможным. Дезактивированные участки быстро подвергались повторному загрязнению [189].

ТАБЛИЦА 17. ПОДРОБНЫЕ ДАННЫЕ ОБ ОТХОДАХ, ОБРАЗОВАВШИХСЯ
В РЕЗУЛЬТАТЕ АВАРИИ НА ЧЕРНОБЫЛЬСКОЙ АЭС, И ИХ МЕСТОНАХОЖДЕНИЙ²

РАДИОАКТИВНЫЕ ОТХОДЫ, СВЯЗАННЫЕ С ОБЪЕКТОМ «УКРЫТИЕ»

Топливосодержащие массы с содержанием ядерного топлива более 1%

Радиоактивные материалы	Тип РАО по мощности дозы или активности	Кол-во	Масса (в тоннах)
Тепловыделяющие сборки со свежим топливом	ВАО	48 шт.	5,5
Тепловыделяющие сборки с отработавшим топливом		129 шт.	14,8
Пыль с содержанием ядерного топлива > 1% (масс.) и размером частиц до нескольких сотен микрон		---	≈50
Лавообразные топливосодержащие массы		---	1 250
Фрагменты активной зоны		Данные отсутствуют	
Вторичные урановые минералы		---	0,01

Твердые радиоактивные отходы на объекте «Укрытие» с содержанием ядерного топлива менее 1%

Радиоактивные материалы	Тип РАО по мощности дозы или активности	Кол-во	Масса (в тоннах)
Оборудование, металл (мощность дозы > 10 мЗв/ч)	ВАО		23 240
Строительные конструкции, включая бетон, железобетон, плиты, балки, обломки (мощность дозы > 10 мЗв/ч)		38 000 м ³	---
Графит		---	≈700
Пыль < 10 мЗв/ч	САО, НАО	---	---
Строительные конструкции, включая бетон, железобетон, плиты, балки, обломки (мощность дозы < 10 мЗв/ч)		299 000 м ³	---
Оборудование, металл (мощность дозы > 10 мЗв/ч)		---	18 200
Неметаллические материалы, включая пластмассу, кабели, теплоизоляцию и т.д. (мощность дозы > 10 мЗв/ч)	---	5 000 м ³	18 200

² Данные публикуются с разрешения Государственного специализированного предприятия «Чернобыльская АЭС».

ТАБЛИЦА 17. ПОДРОБНЫЕ ДАННЫЕ ОБ ОТХОДАХ, ОБРАЗОВАВШИХСЯ В РЕЗУЛЬТАТЕ АВАРИИ НА ЧЕРНОБЫЛЬСКОЙ АЭС, И ИХ МЕСТОНАХОЖДЕНИИ²
(продолжение)

РАДИОАКТИВНЫЕ ОТХОДЫ, СВЯЗАННЫЕ С ОБЪЕКТОМ «УКРЫТИЕ»

Жидкие радиоактивные отходы на объекте «Укрытие»

Радиоактивные материалы	Тип РАО по мощности дозы или активности	Кол-во/объем	Масса (т)
Водные растворы, пульпа, масло и масляные суспензии (удельная активность $< 3,7 \times 10^8$ Бк/м ³)	САО, НАО	2 500–5 000 м ³	
Водные растворы с содержанием урановых солей, пульпа, масло и масляные суспензии (удельная активность $< 3,7 \times 10^8$ Бк/м ³)	САО, НАО	500–600 м ³	

Твердые радиоактивные отходы, находящиеся на площадке на объекте «Укрытие»

Радиоактивные материалы	Тип РАО по мощности дозы или активности	Объем (м ³)	Масса (т)
Ядерное топливо, захороненное в земле	ВАО		≈0,6
Контейнеры с фрагментами активной зоны и другими материалами, захороненные в земле (вдоль ряда А, ось 68)	ВАО	600	
	САО	1 100	
Грунт навалом (щебень, песок, гравий)	ВАО	600	
	САО	2 000	
	НАО	137 000	
Бетон, бетонные плиты и блоки	ВАО	900	
	САО	5 800	
	НАО	131 000	
Металлоконструкции	НАО		1 440

РАДИОАКТИВНЫЕ ОТХОДЫ, ХРАНЯЩИЕСЯ НА ПЛОЩАДКЕ ЧЕРНОБЫЛЬСКОЙ АЭС

Твердые радиоактивные отходы			Жидкие радиоактивные отходы		
Тип	Объем (м ³)	Активность (МБк)	Тип	Объем (м ³)	Активность (МБк/м ³)
Низко- и среднеактивные короткоживущие отходы	2 002	4,22E+6	Донные концентраты испарителей	13 581	28 175,4

² Данные публикуются с разрешения Государственного специализированного предприятия «Чернобыльская АЭС».

ТАБЛИЦА 17. ПОДРОБНЫЕ ДАННЫЕ ОБ ОТХОДАХ, ОБРАЗОВАВШИХСЯ
В РЕЗУЛЬТАТЕ АВАРИИ НА ЧЕРНОБЫЛЬСКОЙ АЭС, И ИХ МЕСТОНАХОЖДЕНИЙ²
(продолжение)

РАДИОАКТИВНЫЕ ОТХОДЫ, СВЯЗАННЫЕ С ОБЪЕКТОМ «УКРЫТИЕ»					
Высокоактивные отходы	515	1,4E+8	Ионообменные смолы	4 110	552,4
Низко- и среднеактивные долгоживущие отходы	1,5	1,38E+5	Пульпа	2 298	1 688
			Отработавшее радиоактивное масло и масляно-топливная смесь	145,3	0,181
ОБРАЩЕНИЕ С РАДИОАКТИВНЫМИ ОТХОДАМИ В ЗОНЕ ОТЧУЖДЕНИЯ					
Пункты захоронения радиоактивных отходов (ПЗРО)					
Пункт	Объем (м³)	Активность (Бк)	Состояние	Примечание	
Буряковка	690 000	2,54E+15	В эксплуатации	В основном НАО и CAO; однако в первых траншеях имеется некоторое количество ВАО	
Подлесный	3 960	2,59E+15	Эксплуатация прекращена	Содержит CAO и ВАО в виде TCM	
III очередь ЧАЭС	26 200	3,02E+14	Эксплуатация прекращена	Содержит НАО, CAO и ВАО в одном отсеке	
Комплекс «Вектор»	670	1,73E+11	В эксплуатации	Предназначен для захоронения НАО и CAO	
Всего	720 380	5,47E+15			
Пункты временной локализации радиоактивных отходов (ПВЛРО)					
Пункт	Объем (м³)	Активность (Бк)	Состояние	Примечание	
Новая стройбаза	21 950	6,61E+12	—	Загрязненный верхний слой грунта, растительность и строительный мусор	
Старая стройбаза	40 150	3,52 E+13	—	Загрязненный верхний слой грунта, растительность и строительный мусор	

² Данные публикуются с разрешения Государственного специализированного предприятия «Чернобыльская АЭС».

ТАБЛИЦА 17. ПОДРОБНЫЕ ДАННЫЕ ОБ ОТХОДАХ, ОБРАЗОВАВШИХСЯ
В РЕЗУЛЬТАТЕ АВАРИИ НА ЧЕРНОБЫЛЬСКОЙ АЭС, И ИХ МЕСТОНАХОЖДЕНИИ²
(продолжение)

РАДИОАКТИВНЫЕ ОТХОДЫ, СВЯЗАННЫЕ С ОБЪЕКТОМ «УКРЫТИЕ»				
Нефтебаза	95 430	3,09E+13	—	Загрязненный верхний слой грунта, погибшие сосны, строительный мусор
Чистоголовка	874	7,11E+10	—	Отходы с промплощадки АЭС и ее окрестностей
Станция Янов	30 000	3,70E+13	Частично исследован	Загрязненный верхний слой грунта, погибшие сосны, строительный мусор
Копачи	110 000	3,33E+13	Частично исследован	Отходы строительства и сноса зданий
Рыжий лес	500 000	3,74E+14	Частично исследован	Загрязненные деревья, верхний слой грунта, лесная подстилка и некоторый строительный мусор
Песчаное плато	57 288	5,31 E+12	—	Загрязненный верхний слой грунта
Припять	16 000	2,59E+13	Частично исследован	Загрязненная техника, древесина, строительный мусор, бытовые отходы и т.д.
Всего для ПВЛРО	871 692	1,99E+15	—	—

Примечание. РАО: радиоактивные отходы

III.3. ПЕРВОНАЧАЛЬНЫЕ МЕРОПРИЯТИЯ ПО ЗАХОРОНЕНИЮ ОТХОДОВ

В 1986 году предпочтительным методом захоронения отходов после аварии было захоронение *in situ*, на месте образования отходов (как указывалось выше для отходов АЭС). Это было обусловлено прежде всего техническими возможностями сбора, упаковки и перевозки огромного количества отходов и отсутствием поблизости обычных хранилищ, которые могли бы их принять. Кроме того, ситуация требовала немедленных действий. Однако локализованные объекты считались временными, и рассматривался вопрос о перезахоронении отходов на объектах, отвечающих более долгосрочным требованиям экологической безопасности. Для управления работами по захоронению была создана комиссия, которая приняла решение о расположении, проектировании и срочном строительстве пунктов захоронения вблизи сел Буряковка и Подлесное, в нескольких километрах от АЭС.

² Данные публикуются с разрешения Государственного специализированного предприятия «Чернобыльская АЭС».

Во время активной стадии аварии в зоне отчуждения был устроен 51 пункт для временной локализации 135 500 м³ отходов. Они строились быстро, и их конструкция была чрезвычайно проста: траншеи глубиной 3–5 м с водонепроницаемым экраном из ПВХ — после заполнения края экрана заворачивались поверх отходов и траншея засыпалась чистым грунтом. Иногда траншеи располагались в канавах и оврагах, и переполнение иногда приводило к тому, что отходы оказывались выше уровня земли, в засыпанных грунтом буртах. В 1987–1988 годах часть отходов была перемещена на пункты захоронения радиоактивных отходов ПЗРО «Буряковка» и ПЗРО «Подлесный», но документов о перемещении материалов не сохранилось. Одним из наиболее известных мест временного захоронения был «Рыжий лес», где лес из сосны обыкновенной площадью 200 гектаров, который оказался прямо на пути движения интенсивного западного шлейфа, содержавшего частицы активной зоны, погиб в результате радиоактивных выпадений. Деревья были вырублены и захоронены *in situ* в траншеях, засыпанных грунтом. В целом, несмотря на наличие оценочных данных, достоверной информации о содержимом отходов, которые на этой ранней стадии были захоронены в многочисленных местах на площадке АЭС и вокруг нее, не существует [190]. Согласно оценке 2012 года, в этих временных хранилищах находится ~886 400 м³ отходов [191].

Последующий пункт захоронения радиоактивных отходов ПЗРО «Буряковка» был спроектирован по традиционной схеме приповерхностного хранилища НАО (рис. 59), с 30 траншеями с глиняным экраном, каждая емкостью ~23 000 м³. Считается, что для территории, где отсутствует население, данный объект обеспечивает достаточную изоляцию отходов.

На ПЗРО «Подлесный», созданном одновременно с ПЗРО «Буряковка», под слоем бетона находятся сложенные навалом или в контейнерах ВАО, окруженные бетонными стенами, выстроенными на бетонном фундаменте на поверхности земли, общий объем ~11 000 м³. Сегодня объект покрыт металлической кровлей. Оценка безопасности этого объекта не проводилась. ПЗРО «III очередь ЧАЭС» на площадке АЭС был создан на базе недостроенного (на момент аварии) хранилища «третьей очереди» для НАО и САО. Он состоит из семи бетонированных



РИС. 59. Пункт захоронения радиоактивных отходов «Буряковка». Публикуется с разрешения Государственного специализированного предприятия «Центральное предприятие по обращению с радиоактивными отходами».

траншей глубиной ~5 м и длиной от 90 до 140 м. Отходы размещены как навалом, так и в ~18 000 металлических контейнеров емкостью 1 м³ и закрыты бетонными плитами и грунтом.

III.4. УРОКИ, ИЗВЛЕЧЕННЫЕ НА РАННИХ СТАДИЯХ ОБРАЩЕНИЯ С ОТХОДАМИ

На ранних стадиях работ по ликвидации последствий аварии среди многих уроков, извлеченных из деятельности по обращению с отходами, были уроки, перечисленные ниже.

- a) В наличии не имелось подходящего оборудования для сбора и транспортировки отходов, особенно высокоактивных. Приспособленная для этого техника плохо работала в условиях высокой радиации.
- b) Не существовало системы для эффективной характеристики и разделения отходов, а также для учета материалов. Отсутствие такой информации затрудняет принятие управленческих решений в настоящее время.
- c) Не существовало процедуры обращения с отходами на активной стадии аварии. Отсутствовали проекты легко возводимых и эксплуатируемых временных хранилищ, отвечающих критериям безопасности, и быстро возводимых могильников для долгосрочного хранения ВАО.

III.5. СУЩЕСТВУЮЩИЕ ОБЪЕКТЫ ДЛЯ ХРАНЕНИЯ И ЗАХОРОНЕНИЯ ОТХОДОВ

Начиная с 1980-х годов ведутся работы по извлечению и консолидации отходов из многочисленных временных траншей. В частности, извлечены отходы из некоторых мест, где происходило загрязнение поверхностных вод. Сегодня в радиусе 10 км от площадки АЭС остаются девять пунктов временной локализации отходов (ПВЛРО), а также три ПЗРО, «Буряковка», «Подлесный» и «III очередь ЧАЭС», созданные вскоре после аварии.

ПЗРО «Буряковка» эксплуатируется до сих пор, и ведутся работы по созданию новых объектов на площадке. В 2013 году были проведены работы по стабилизации ПЗРО «Подлесный» и установке металлической кровли. Однако «Подлесный» — это объект, который является наследием аварии и непригоден для содержания находящихся в нем отходов. Знания о его барьерных системах ограничены или недостаточны, и ожидается, что находящиеся в нем отходы будут извлечены и переправлены на соответствующий пункт захоронения, когда тот станет доступен. ПЗРО «III очередь ЧАЭС» также не считается пригодным для окончательного захоронения, и он остается недостроенным, с искусственными барьерами, которые считаются неадекватными. Объект не оборудован системами защиты от воды, и в нижние части объекта периодически просачиваются подземные воды. Кроме того, в грунтовом покрытии образовались провалы. Наконец, ПЗРО «III очередь ЧАЭС» находится вблизи поверхностного водоема, что также считается неприемлемым с точки зрения долгосрочной безопасности.

Комплекс «Вектор», расположенный примерно в 17 км от АЭС, включает в себя ряд объектов для обработки и хранения отходов, а также несколько пунктов приповерхностного захоронения: ТРО-1 для захоронения отходов в контейнерах, ТРО-2 для захоронения отходов навалом и специально оборудованное приповерхностное хранилище (СОПХТРО, также называемое «Лот-3»). Эти мощности увеличиваются за счет новых пунктов приповерхностного захоронения и хранилищ для ВАО и отработавшего топлива. Предполагается, что со временем комплекс «Вектор» сможет принимать большую часть отходов от работ по выводу из эксплуатации энергоблоков №№ 1–3.

На самой площадке АЭС эксплуатируется ряд более современных объектов, например для приема отходов, образовавшихся при строительстве фундамента нового укрытия, НБК. Продолжает набираться значительное количество жидких отходов, и к числу новых объектов относится

завод по переработке жидких радиоактивных отходов (ЗПЖРО), который был введен в эксплуатацию в 2018 году для обработки и отверждения $\sim 20\,000\text{ м}^3$ накопленных жидких отходов.

С 1978 по 2003 год эксплуатировалось старое хранилище твердых отходов, представляющее собой наземное бетонное сооружение, разделенное на три отсека общей емкостью $\sim 4000\text{ м}^3$ для хранения всех типов твердых отходов (включая ВАО). В рамках нового ПКОТРО на площадке создается новая установка для извлечения твердых отходов, при помощи которой будут удаляться отходы из хранилища твердых отходов. Проект ПКОТРО является одним из компонентов комплексной программы обращения с радиоактивными отходами для всей АЭС и включает в себя извлечение, переработку и упаковку отходов для промежуточного хранения или окончательного захоронения. Это предполагает уменьшение объема путем компактирования и сжигания, а также отверждение путем иммобилизации в бетоне. Кроме того, на площадке находится завод по производству бочек и бетонных ящиков для хранения отходов [192]. В феврале 2004 года было введено в строй временное хранилище твердых высокоактивных отходов для хранения отходов до тех пор, пока не будет построен ПКОТРО. ПКОТРО включает в себя группу объектов, построенных в соответствии с современными международными стандартами в области обращения с отходами. В число объектов ПКОТРО входит временное хранилище низко- и среднеактивных долгоживущих и высокоактивных отходов, установка по извлечению твердых радиоактивных отходов, предназначенная для извлечения радиоактивных отходов из существующих на Чернобыльской АЭС хранилищ твердых отходов, и завод по переработке твердых радиоактивных отходов (ЗПТРО).

Демонтаж здания реактора энергоблока № 4 и первоначального объекта «Укрытие» будет производиться внутри НБК, и ожидается, что в результате этого процесса образуется ~ 3350 бочек с ВАО и долгоживущими НСАО, которые будут обрабатываться на ПКОТРО, а также значительный объем низкоактивных отходов и дополнительных жидких отходов. В этой связи ожидается, что деятельность по производству и переработке отходов будет продолжаться как минимум до 2065 года, когда демонтаж и реабилитация объекта будут завершены.

Приложение IV

АВАРИЯ НА АЭС «ФУКУСИМА-ДАЙТИ»

Великое землетрясение магнитудой 9,0, происшедшее в регионе Тохоку 11 марта 2011 года, и вызванное им цунами стали колоссальным стихийным бедствием, в результате которого на восточном побережье северного Хонсю, Япония, погибло более 18 000 человек. Результатом удара стихии по прибрежной АЭС «Фукусима-дайити» стало наводнение и длительная полная потеря электроснабжения, что привело к расплавлению трех из шести реакторов (энергоблоки №№ 1–3) и взрыву водорода, разрушившему здания энергоблоков №№ 1, 3 и 4. В данном приложении содержится краткое описание аварии и последующей работы по обращению с отходами, которые образовались в результате повреждения атомной электростанции и выбросов радиоактивности. МАГАТЭ был выпущен подробный отчет [193], из которого была взята большая часть информации в данном приложении.

IV.1. ПОСЛЕДСТВИЯ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ И ЦУНАМИ

На момент аварии три из шести реакторных блоков АЭС «Фукусима-дайити» работали, а три находились в режиме планового останова для перегрузки топлива или осмотра. Землетрясение вызвало автоматический останов работающих реакторов (энергоблоки №№ 1–3), но привело к потере внешнего электроснабжения атомной электростанции от энергосети. Вскоре после землетрясения на тихоокеанское побережье Хонсю обрушилась серия цунами. Высота второго цунами, достигшего побережья Фукусимы, составила 14 м; оно преодолело защитные стены, затопило первые этажи и подвалы реакторных зданий на станции и разрушило аварийные дизель-генераторы энергоблоков №№ 1–4, находившиеся на небольшой высоте. Удар цунами лишил операторов всякой возможности эффективно контролировать работающие реакторы, которые начали перегреваться (остаточное тепловыделение). В итоге это привело к расплавлению активных зон энергоблоков №№ 1–3 и взрывам газообразного водорода в энергоблоках №№ 1, 3 и 4, которые разрушили реакторные здания и еще больше ограничили возможности для дальнейшей работы и, в конечном счете, очистки площадки. Вентилирование и повреждение гермооболочек реакторов привели к выбросу радиоактивности в воздух и выпадению радиоактивных осадков как в море, так и на суше, вдоль прибрежной зоны по всей Фукусиме и в соседних префектурах. Было принято решение об эвакуации населения из зоны радиусом 20 км от АЭС «Фукусима-дайити».

Ни авария на АЭС «Фукусима-дайити», ни выбросы радиоактивности не привели к гибели людей. Было эвакуировано около 300 000 человек, из них 160 000 были переселены на длительный срок, что вызвало у людей серьезный стресс, который, как утверждается, стал причиной сотен преждевременных смертей. На территории, с которой было полностью эвакуировано население, проводятся восстановительные мероприятия. Ее окружает более обширная территория, куда было разрешено вернуться некоторым эвакуированным и где также проводится масштабная программа очистки. Работы по очистке, реабилитации и выводу из эксплуатации будут продолжаться в течение нескольких десятилетий. АЭС «Фукусима-дайити» будет выведена из эксплуатации (неповрежденные реакторы со времени аварии не эксплуатировались), но решение о конечном состоянии площадки еще не принято.

ТАБЛИЦА 18. ТВЕРДЫЕ И ЖИДКИЕ ОТХОДЫ, ОБРАЗОВАВШИЕСЯ В РЕЗУЛЬТАТЕ АВАРИИ НА АЭС «ФУКУСИМА-ДАЙТИ»

ОБРАЩЕНИЕ С РАДИОАКТИВНЫМИ ОТХОДАМИ НА АЭС «ФУКУСИМА-ДАЙТИ»

ТВЕРДЫЕ ОТХОДЫ
(ТИПЫ И КОЛИЧЕСТВО)

Обломки:
 — < 0,1 мЗв/ч: 268 200 м³
 — 0,1–1 мЗв/ч: 500 м³
 — хранилище твердых отходов: 21 100 м³
 Срубленные деревья: 134 200 м³
 Утилизированные СИЗ: 48 200 м³
 Отходы, образующиеся при водоочистке:
 — емкость для адсорбции цезия, отработавшая емкость ALPS:
 4686 емкостей
 — шлам: 597 м³

ЖИДКИЕ ОТХОДЫ
(ТИПЫ И КОЛИЧЕСТВО)

Жидкие отходы:
 — конденсированные сточные воды:
 9345 м³
 — очищенная вода (включая воду,
 очищенную от Sr): 1 201 434 м³

ВОССТАНОВИТЕЛЬНЫЕ МЕРОПРИЯТИЯ ВНЕ ПЛОЩАДКИ АЭС «ФУКУСИМА-ДАЙТИ»

Обращение с отходами в префектуре Фукусима

Грунт, собранный во время дезактивационных работ за пределами площадки:
 — ~14 млн м³
 Отходы в зоне принятия контрмер:
 перевозимые в места временного хранения: 2 630 000 т
 зольный остаток от сжигания:
 — < 100 000 Бк/кг: 1,55 Мм³
 — > 100 000 Бк/кг: 20 000 м³
 Особо обозначенные отходы (более 8000 Бк/кг):
 — зольный остаток от сжигания: 231 912 м³
 — прочее: 28 700 м³

Жидкие отходы не ожидаются

Обращение с отходами за пределами префектуры Фукусима

Особо обозначенные отходы (более 8000 Бк/кг):
 — зольный остаток от сжигания: 8841 м³
 — прочее: 18 732 м³

Жидкие отходы не ожидаются

IV.2. ОБРАЩЕНИЕ С ОТХОДАМИ

Активная стадия аварии, на которой АЭС «Фукусима-дайти» была выведена в режим холодного останова, была завершена примерно в конце 2011 года, после чего началась основная стадия стабилизации площадки и восстановления территорий за ее пределами. В то время не существовало закона, который регламентировал бы захоронение аварийных отходов и радиоактивно загрязненных материалов, а существующий на атомной электростанции пункт приповерхностного захоронения радиоактивных отходов обычной эксплуатационной деятельности не был доступен для захоронения радиоактивно загрязненных материалов. Сводные данные об отходах, образовавшихся в результате аварии, приведены в таблице 18.

IV.2.1. Отходы от восстановительных мероприятий вне площадки

Восстановительные мероприятия были сосредоточены на интенсивной дезактивации жилых районов с целью контроля внешнего облучения, а контроль внутреннего облучения основывался на ограничении и мониторинге пищевых продуктов и кормов для животных, а также на реабилитации сельскохозяйственных угодий. На сегодняшний день эти виды деятельности являются главными источниками радиоактивных отходов. Японское правительство придерживается консервативного подхода к установлению пределов дозы облучения людей, что значительно увеличивает объем необходимых восстановительных работ, а также влияет на передвижение населения и общий режим, действующий в отношении него. В нескольких муниципалитетах восстановительные работы завершены и эвакуированному населению разрешено вернуться.

Была разработана стратегия обращения с отходами за пределами площадки, включающая:

- a) сбор отходов в места временного хранения вблизи места дезактивации;
- b) перевозку из мест временного хранения в ПХ;
- c) уменьшение объема горючего материала путем сжигания в существующих установках для сжигания твердых бытовых отходов, оборудованных системами газоочистки для задержания ^{134}Cs и ^{137}Cs ;
- d) уменьшение объема грунта промывкой для отделения Cs или компонентов, богатых Cs;
- e) захоронение, в зависимости от концентрации радиоактивности, в ПХ, на муниципальных полигонах общего пользования или специально отведенных муниципальных полигонах либо на пунктах приповерхностного захоронения;
- f) создание системы учета для отслеживания активности и накопленных объемов.

Очистка осложняется тем, что необходимо также ликвидировать «катастрофические отходы», образовавшиеся в результате землетрясения и цунами на большей части территории, также подвергшейся радиоактивному загрязнению. По оценкам, общий объем твердых загрязненных отходов, с которыми приходится иметь дело в пределах внутренней зоны восстановительных работ (особого района дезактивации, или ОРД), составляет ~800 000 т. Кроме того, присутствует еще около 160 000 т «особо обозначенных отходов» (с активностью > 8000 Бк/кг), состоящих в основном из зольного остатка от сжигания и шламов.

Поверхностные грунты и другие материалы были срезаны, при этом приоритет отдавался местам, используемым населением и детьми. В ходе обследования были определены «горячие точки», которые включали, в частности, места, куда стекает или собирается дождевая вода. Леса, особенно листва и кора, накапливают загрязнения, а сжигание древесины ведет к концентрации загрязнения в золе. Чтобы избежать накопления сильно загрязненной золы, большое количество переработанной коры было помещено на хранение. К дезактивационным работам, в результате которых образуются отходы, относится удаление грунтов и растительности и промывка сооружений.

Одна из главных трудностей была связана с хранением и захоронением радиоактивно загрязненного материала, образующегося после восстановительных мероприятий. Подбор мест временного хранения был сложной задачей из-за опасений землевладельцев и трудностей с получением согласия, поскольку многие владельцы были переселены в отдаленные районы Японии. Между национальными, региональными и местными органами власти были заключены детально проработанные договоренности о том, как будут располагаться хранилища и пункты захоронения отходов и как на них будут переправляться отходы в различных муниципальных районах зон, подлежащих реабилитации. Эти договоренности в данном кратком приложении не рассматриваются. В качестве временной меры некоторые материалы укладывались в крытые штабеля в прочных мешках с песком или водонепроницаемых мешках или контейнерах вблизи пунктов дезактивации, а после переправлялись в специально оборудованные временные хранилища.

На месте сбора при разделении загрязненного материала учитывается форма отходов (горючие/негорючие/грунт) и концентрация активности цезия (< 8000 Бк/кг; $< 100\,000$ Бк/кг;

> 100 000 Бк/кг). Отходы с концентрацией активности менее 8000 Бк/кг обрабатываются обычными методами, применяемыми для отходов, не имеющих радиоактивного загрязнения (сжигание, рециклирование металлов и пластика, компостирование органических материалов и т.д.), и утилизируются как твердые бытовые отходы с использованием существующей инфраструктуры для транспортировки, обработки, уменьшения объема и захоронения на полигонах твердых бытовых отходов. Особо обозначенные отходы (с активностью более 8000 Бк/кг) требуют специальных мер по транспортировке, обработке, возможному рециклированию и повторному использованию или захоронению на специальных полигонах, оборудованных системами сбора фильтрата, контроля газообразования и мониторинга.

После временного хранения отходы должны быть переправлены в ПХ. В зависимости от активности отходов и особенностей окружающей среды на площадке рассматриваются различные типы конструкций ПХ, в том числе сооружения с экранированными траншеями, с системами контроля воды или без таковых, а также наземные бетонные сооружения. Вблизи АЭС «Фукусима-дайити» была выбрана площадка для размещения ПХ, и ожидается, что на этом объекте в сооружениях траншейного типа будет размещено от 16 до 22 миллионов кубических метров отходов, преимущественно загрязненных грунтов, которые пройдут процедуру уменьшения объема. Значительно меньшие по объему отходы с более высокой активностью (> 100 000 Бк/кг) будут храниться в бетонных зданиях на территории объекта.

Особо обозначенные отходы в конечном итоге будут захоронены на полигонах, оборудованных системами сбора фильтрата, которые потребуется разместить и построить в некоторых районах.

Договоренности об окончательном захоронении отходов за пределами площадки ожидают доработки. Предполагается, что основная часть грунтов в ПХ останется на месте (с возможностью ограниченного повторного использования в течение 30 лет и контролируемого повторного использования по истечении 30 лет), а отходы с повышенной остаточной активностью будут вывезены и захоронены за пределами префектуры Фукусима.

IV.2.2. Отходы деятельности по стабилизации и выводу из эксплуатации на площадке

В процессе получения доступа к поврежденным ядерным установкам и их стабилизации образовались твердые радиоактивные отходы. Позднее значительное количество отходов образовалось и продолжает образовываться при реализации программы восстановительных мероприятий. Первоначальными отходами были преимущественно обломки и другой мусор (бетон, металл, пластик), а также срубленные деревья и растительность. Их количество гораздо больше, а уровень загрязнения значительно выше по сравнению с отходами обычной эксплуатационной деятельности.

К середине 2015 года основные работы по очистке территории перед выводом из эксплуатации были завершены и в хранилища на площадке было помещено ~160 000 м³ обломков и мусора и ~83 000 м³ срубленных деревьев. Мусор (от поврежденных зданий и различных работ по очистке площадки) сортируется в зависимости от мощности дозы на поверхности и типа материала (например, бетон или сталь) и складывается в различных сооружениях, включая отвалы, покрытые грунтом, тентовые ангары, несколько сотен обычных транспортных контейнеров и переоборудованные здания (см. рис. 60). Обломки хранятся в буртах с непроницаемыми покрытиями под слоем грунта с целью снизить радиационное облучение. Срубленные деревья (многие из которых были вырублены для строительства сооружений по обращению с загрязненной водой) после удаления листвы складывались в штабеля высотой до 5 м, что обеспечивало приток воздуха и увлажнение для предотвращения возгорания.

Дорожная карта вывода из эксплуатации включает в себя три стадии, первая из которых (извлечение отработавшего топлива из бассейнов выдержки) была завершена для энергоблока № 4 в конце 2014 года. Вторая стадия предусматривает подготовку к извлечению обломков твэлов из поврежденных реакторов и будет продолжаться в течение всех 2020-х годов, а заключительной стадией станет вывод площадки из эксплуатации, который займет еще 30–40 лет. Вывод установки



РИС. 60. Дезактивация и сбор грунта в сельскохозяйственной зоне (вверху) и временное хранилище грунта (внизу). Публикуется с разрешения городской администрации Окумы.

из эксплуатации (демонтаж конструкций, систем и элементов) не может начаться до тех пор, пока не будут удалены топливо и обломки твэлов. На заключительной стадии извлечение обломков твэлов из реакторов, вероятно, займет намного больше времени, чем на ТМА-2, где это было сделано примерно за 12 лет. В планах на эту деятельность отводится до 30 лет.

По консервативным оценкам, при выводе из эксплуатации к концу цикла извлечения топлива образуется около 560 000 м³ загрязненного материала. Вместимость нового централизованного хранилища, которое планируется построить, составит примерно 160 000 м³. Предполагается, что разница между ожидаемым объемом в 560 000 м³ и запланированной вместимостью хранилища будет компенсирована за счет правильной сортировки отходов, уменьшения их объема и рециклирования. В марте 2016 года была введена в строй новая установка для сжигания отходов, образующихся на площадке.

IV.2.3. Обращение с жидкими отходами

Одной из главных проблем было обращение с большими объемами загрязненной воды — как из-за сохраняющегося требования обеспечивать циркуляцию воды для охлаждения поврежденных реакторов, так и из-за проникновения поверхностных и подземных вод в здания поврежденных реакторов. Ежедневно обработку проходит приблизительно 800 м³ загрязненной воды. Половина этой воды рециркулируется через гермооболочки реакторов для охлаждения обломков твэлов, а другая половина очищается для дезактивации. Обеспечение дальнейшего естественного притока воды в поврежденные подвалы снижает вероятность миграции загрязнений в грунт. Около миллиона тонн очищенной воды хранится на площадке примерно в 900 резервуарах.

Для извлечения радиоактивных компонентов из отходов используются разнообразные водоочистные установки, включая ALPS — установку для удаления нескольких радионуклидов. На этих установках образуются вторичные отходы, такие как осадки, шлам, адсорбционные емкости и адсорбционные среды, которые хранятся в бетонных контейнерах, сложенных штабелем во временных открытых хранилищах с бетонными покрытиями. Несмотря на удаление большинства радионуклидов, тритий удалению не поддается, а это означает, что в настоящее время вода не может быть сброшена в море. В конце 2018 года предполагалось, что расчетная вместимость хранилищ очищенной воды (1,37 млн м³) будет превышена через три-четыре года [194]. В настоящее время изучаются методы остекловывания и уменьшения объема вторичных отходов.

Обращение с отходами на площадке ставит перед учеными и инженерами сложные задачи, многие из которых являются беспрецедентными и трудноразрешимыми. Отечественные и зарубежные организации сотрудничают между собой, используя соответствующий мировой опыт и знания.

Приложение V

ДРУГИЕ ЯДЕРНЫЕ АВАРИИ

В данном приложении кратко описывается опыт обращения с отходами, образовавшимися при ликвидации последствий ряда прошлых ядерных аварий как в гражданском, так и в военном секторе.

V.1. КЫШТЫМ, БЫВШИЙ СССР: 1957 ГОД

Авария на производственном объединении «Маяк» в сентябре 1957 года была вызвана взрывом емкости, содержавшей высокоактивные жидкие отходы от перерабатывающей деятельности на заводе по производству плутония близ города Кыштым, бывший СССР, примерно в 100 км к югу от Свердловска [176, 195]. Это привело к загрязнению реки Теча и озера Карачай. Было выброшено около 10^{16} Бк продуктов деления, причем 91% от общей активности выброса составили короткоживущие радионуклиды ^{144}Ce и ^{95}Zr . После распада короткоживущих радионуклидов более долгосрочную радиологическую опасность представлял ^{90}Sr с активностью 4×10^{15} Бк. Радиоактивные выпадения происходили в сухих атмосферных условиях, охватив территорию площадью 15 000 км², при этом активность ^{90}Sr превышала 3,7 кБк/м² [195]. Радиоактивность выбросов определялась преимущественно продуктами деления, с очень низким вкладом продуктов активации и актинидов (например, изотопы Pu составляли всего 0,0043% активности).

Были предприняты значительные усилия для разделения отходов по материалам и их происхождению, но из-за нехватки времени и очень больших объемов материалов широкомасштабная характеристика отходов и разделение этих материалов оказались невозможными. Свыше 6000 гектаров сельскохозяйственной земли были подвергнуты глубокой вспашке, чтобы захоронить поверхностный слой сильно загрязненной почвы на глубине > 50 см, ниже глубины проникновения корней многих культур. В 1958–1959 годах было вспахано более 20 000 гектаров земли, чтобы уменьшить поглощение загрязнения растениями и снизить гамма-облучение. Менее загрязненные зоны были дезактивированы путем перемещения верхнего слоя почвы на более низкие участки местности, например в заброшенные строительные карьеры и канавы. Было вывезено и захоронено около 320 000 м³ грунта. Восстановление территории «Маяка» продолжается до сих пор, и очевидно, что процесс характеристики площадки как таковой будет весьма сложным и займет много времени.

Кыштымская авария — не самая серьезная проблема загрязнения в районе завода «Маяк». После прекращения сброса (с 1949 по 1956 год) высокоактивных жидких радиоактивных отходов напрямую в реку Теча ВАО были сброшены в озеро Карачай. Сегодня уровень загрязнения озера Карачай составляет $\sim 4,4 \times 10^{18}$ Бк [196], что сопоставимо с уровнем выбросов в результате аварии на Чернобыльской АЭС [197].

V.2. ПАЛОМАРЕС, ИСПАНИЯ: 1966 ГОД

В январе 1966 года два военных самолета США, на борту одного из которых находились четыре термоядерные бомбы, столкнулись во время дозаправки в воздухе. Спустя день после этого три бомбы были найдены на земле. Две из них были серьезно повреждены в результате детонации неядерного взрывного устройства при столкновении с землей. Четвертая была позднее найдена в море неповрежденной. Взрыв привел к рассеиванию оксида плутония на территории ~660 гектаров

с загрязнением почвы, сельскохозяйственных культур и другой растительности вблизи поселка Паломарес, в котором на тот момент проживало ~2000 человек [198].

Почва с уровнем радиоактивного загрязнения выше 1,2 МБк/м² была уложена в бочки емкостью 250 л и отправлена на завод в Саванна-Ривер, штат Южная Каролина, США, для захоронения. Этим методом было дезактивировано в общей сложности 2,2 гектара территории, в результате чего образовалось 6000 бочек с отходами. На площади 17 гектаров грунт с более низким уровнем загрязнения был перемещен на глубину 30 см путем боронования и вспашки. На каменистых склонах с загрязнением свыше 120 МБк/м² грунт срезался ручными инструментами и переправлялся в США в бочках [75].

Было выделено шесть зон для проведения первоначальных восстановительных мероприятий, которые были установлены в соглашении между правительствами Испании и США. Очистка предполагала сжигание сельскохозяйственных растений с уровнем Pu менее 400 отсчетов в минуту. Растения, в которых этот предел был превышен, были замульчированы, помещены на хранение, а позднее переправлены в США вместе с 823 м³ почвы с уровнем Pu, превышающим 60 000 отсчетов в минуту. Примерно 115 гектаров почвы с уровнями Pu от 700 до 60 000 отсчетов в минуту были политы водой и вспаханы. На близлежащих холмистых участках рекультивация не проводилась из-за крутизны склонов.

Внедрение интенсивного земледелия в 1980-х годах, а также рост туризма в 1990-х годах, строительство близлежащих водохранилищ и последующие наводнения привели к расширению программы радиологического контроля и усилению ограничений на землепользование. В рамках этой программы была проведена оценка параметров остаточных источников радиоактивности и ее распределения на глубине посредством экстенсивной характеристики территории площадью 660 га, интенсивной характеристики 41 га и георадарного картирования шурфов. Пробы окружающей среды, отбираемые на постоянной основе, включают в себя пробы воздуха, почвы, осадков, воды, растительности и продукции животноводства. В настоящее время проводится добровольный отбор биопроб у людей, чтобы оценить состояние здоровья населения в целом, обеспечить раннее выявление заболеваний и снять опасения, имеющиеся у общественности. Общественность также привлекается к оценке возможных будущих реабилитационных мер [172].

Исследование 2004 года показало, что в некоторых районах до сих пор сохраняется значительное загрязнение, и позднее испанское правительство экспроприировало некоторые участки земли, которые в противном случае были бы использованы для сельскохозяйственных нужд или строительства жилья. В 2006 году правительства Испании и США договорились провести дезактивацию оставшихся территорий и разделить соответствующие затраты труда и финансовых средств. В 2008 году были обнаружены две траншеи, куда американские военные сбросили ~2000 м³ загрязненной земли во время работ 1966 года. Траншеи были обнаружены недалеко от того места, где в 1966 году было найдено одно из ядерных устройств, и, вероятно, были вырыты американскими военными в последний момент перед тем, как покинуть Паломарес. В 2015 году Испания и США подписали соглашение о дальнейшем обсуждении вопросов очистки и вывоза грунта, загрязненного радиоактивными веществами.

Уроки обращения с отходами, извлеченные из аварии в Паломаресе, состоят в следующем:

- смена форм землепользования, более интенсивное использование земли (например, применение пестицидов), а также природные явления (например, наводнения) могут потребовать проведения в дальнейшем масштабных восстановительных работ и ужесточения ограничений на землепользование;
- первоначальные меры по срезанию, поливу и вспашке почвы оказались эффективным способом разбавления загрязнения в более глубоких почвенных слоях;
- сочетание мокрого и сухого просеивания оказалось эффективным для разделения частиц почвы по размеру, что позволило свести к минимуму объем материала, требующего захоронения в качестве радиоактивных отходов.

V.3. СЬЮДАД-ХУАРЕС, МЕКСИКА: 1983 ГОД

В декабре 1983 года на свалке металлолома в Сьюдад-Хуаресе, Мексика, был разобран аппарат для лучевой терапии, содержащий закрытый радиоактивный источник ^{60}Co , и корпус источника был вскрыт. Источник содержал более 6000 гранул ^{60}Co с общей активностью $1,7 \times 10^{13}$ Бк, которые были разбросаны среди металлолома. Позднее этот металлолом был отправлен в местные литейные цеха, которые произвели тысячи тонн загрязненных изделий. Загрязнение осталось незамеченным, и сталелитейная продукция поставлялась как в Мексику, так и в США. Первое признание того, что произошел некий инцидент, было фактически сделано после того, как загрязненные металлические изделия были обнаружены в США более месяца спустя. Только после этого маршрут поставленных партий был прослежен до склада металлолома в Сьюдад-Хуаресе.

В результате этого инцидента и последующего рассеивания радионуклидов были загрязнены тысячи тонн металлических изделий, несколько литейных цехов, улицы и сотни жилых домов. В США было обнаружено несколько сотен тонн загрязненной сталелитейной продукции. Была развернута широкомасштабная программа очистки [199]. Гранулы ^{60}Co и загрязненные металлические изделия были собраны и помещены в соответствующие бетонные контейнеры и стальные бочки. Кроме того, для захоронения было собрано значительное количество загрязненного грунта и обломков 814 загрязненных зданий, которые были частично или полностью снесены. В общей сложности в рамках программы очистки было собрано $21\,000\text{ м}^3$ радиоактивных отходов [200].

V.4. ГОЯНИЯ, БРАЗИЛИЯ: 1987 ГОД

В сентябре 1987 года двое местных жителей обнаружили брошенную радиотерапевтическую установку в бывшей клинике, намеченной к сносу. В ней находился радиоактивный источник ^{137}Cs с уровнем активности 5×10^{13} Бк. Они сняли вращающийся блок с источником и принесли его в соседний дом, где жил один из них. В последующие дни аппарат был вскрыт, и его фрагменты попали в руки множества людей. Загрязнение распространилось повсеместно, включая двор здания отделения Национального агентства санитарного надзора в городе Гояния, куда были помещены остатки источника.

В ходе первоначального реагирования были приняты некоторые первые меры для обеспечения сохранности остатков источника во дворе здания: они были забетонированы. Позднее было принято решение провести всестороннее обследование, прежде чем предпринимать какие-либо дальнейшие действия. В общей сложности около 10 различных объектов были загрязнены настолько сильно, что потребовалась их очистка. Были обнаружены мощности дозы в диапазоне 50–2000 мЗв/ч. Вскоре техническому персоналу стало ясно, что в процессе очистки будет образовываться большое количество отходов и что в районе Гоянии потребуются оборудовать объект, куда эти отходы, надлежащим образом упакованные, можно будет свозить и помещать на хранение. Место для временного хранения было выбрано в малонаселенном районе примерно в 20 км от Гоянии и в 2,5 км от Абадии-ди-Гояс [201].

В результате очистки образовалось около 3500 м^3 , или 6000 т, отходов, загрязненных ^{137}Cs . В 1995 году эти отходы были захоронены в двух приповерхностных хранилищах, устроенных в виде больших бетонных камер. Первое хранилище предназначалось для отходов очень низкого уровня активности (40% по объему с активностью $^{137}\text{Cs} < 87\text{ Бк/г}$), второе — для отходов с более высокой активностью (40% по объему с активностью $^{137}\text{Cs} > 87\text{ Бк/г}$). Продолжаются исследования для оценки долгосрочной безопасности этих объектов [202].

Некоторые из уроков, извлеченных при обращении с отходами, состояли в следующем [201]:

- а) составление почвенного профиля очень важно для определения слоя, который необходимо срезать, и для того, чтобы избежать удаления большого количества чистой почвы;

- b) местное население считало, что количество удаляемого материала пропорционально риску, которому оно подвергается, что приводило к непониманию смысла деятельности по обращению с отходами;
- c) в ходе последующих строительных работ и деятельности муниципальных служб захороненный загрязненный материал был вновь поднят на поверхность;
- d) отсутствие критериев эффективности восстановительных мероприятий и информации о конкретном объекте стало причиной использования консервативных подходов и возникновению ненужного стресса у населения, трат и расходов;
- e) привлечение местного населения, государственных и неправительственных организаций — непременное условие принятия грамотных решений в отношении выбираемых стратегий;
- f) необходимо разработать политику и стратегию реабилитации загрязненных объектов и обращения с отходами, которые могут быть сделаны частью национальной политики и стратегии обращения с отходами.

V.5. «АСЕРИНОКС», ИСПАНИЯ: 1998 ГОД

В мае 1998 года источник ^{137}Cs для медицинской лучевой терапии с активностью около 4,5 ТБк был случайно расплавлен в электропечи на заводе по переработке металлолома «Асеринокс» в Лос-Барриосе, Испания [203]. Выброс ^{137}Cs из литейного цеха привел к образованию радиоактивного облака, которое не было обнаружено детекторами дымовой трубы «Асеринокс», но которое в итоге было зафиксировано во Франции, Италии, Швейцарии, Германии и Австрии. Часть паров попала в фильтрующую систему, что привело к загрязнению уже собранных 270 т золы. Зола была извлечена и в рамках программы планового технического обслуживания отправлена на две фабрики на переработку. Одна фабрика получила 150 т, которые затем были использованы в процессе стабилизации болотистой местности, следствием чего стало увеличение массы загрязненного материала до 500 т и загрязнение болота.

Максимальная активность отходов до начала операций по дезактивации составляла приблизительно 2000 Бк/г. Образовавшиеся отходы были помещены в контейнеры двух типов. Зола была уложена в мешки емкостью 1 м³, а металлические, пластиковые, бумажные отходы и т.д. — в бочки емкостью 220 л. На различных объектах хранятся в общей сложности ~2000 т зольных отходов и 150 т прочих отходов, намеченных к захоронению на пункте захоронения «Эль-Кабриль». Были проанализированы различные методики обработки, для того чтобы уменьшить объемы отходов, требующих захоронения, или освободить их от регулирующего контроля, чтобы захоронить их как ОО.

Приложение VI

РЕАБИЛИТАЦИЯ ОБЪЕКТОВ ЯДЕРНОГО НАСЛЕДИЯ

В данном приложении кратко описывается опыт обращения с большими объемами отходов, образовавшимися при реабилитации объектов ядерного наследия. Это не аварийные отходы, но их объемы, искомые конечные состояния площадки и применяемые подходы представляют интерес с точки зрения обращения с большими объемами отходов, образующимися в результате ядерных аварий. Кроме того, в данном приложении приводится тесно связанная с этой темой информация о французских объектах по захоронению больших объемов ОНАО, образующихся в результате демонтажа ядерных установок.

VI.1. БЫВШИЕ ОБЪЕКТЫ ГРАЖДАНСКОЙ ЯДЕРНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ СОЕДИНЕННОГО КОРОЛЕВСТВА

Первые в мире коммерческие ядерные энергетические реакторы в Колдер-Холле, Уиндскейл (сегодня это часть комплекса «Селлафилд»), достигли критичности в 1956 году, и с тех пор эта площадка на протяжении 60 лет была центром деятельности Соединенного Королевства в области топливного цикла. В 2004 году правительство Соединенного Королевства учредило Управление по выводу из эксплуатации ядерных объектов, которому была поручена реабилитация бывших объектов гражданской ядерной энергетики страны, расположенных на 17 площадках. В число этих объектов входят заводы по обогащению урана и изготовлению топлива, центры реакторных исследований, ядерные энергетические реакторы и заводы по переработке отработавшего топлива в Селлафилде.

Управление по выводу из эксплуатации ядерных объектов разработало стратегию и план реабилитации бывших объектов, которые актуализируются не реже одного раза в пять лет [204]. Ключевым аспектом данной стратегии является снижение опасности: это означает, что первоочередное внимание уделяется работам, связанным с наибольшей опасностью. Если риски неприемлемы, принимаются срочные меры по их уменьшению. Если риски не столь существенны, больше внимания уделяется техническим, социальным и экономическим факторам. Тем не менее во главу угла по-прежнему ставится снижение риска и опасности настолько, насколько это практически возможно.

Важным аспектом планирования реабилитационных мероприятий является определение надлежащего конечного состояния — физического состояния площадки после завершения всех восстановительных работ. Это включает определение объема остаточного загрязнения, которое может сохраняться в грунте или быть связано с любыми зданиями или подземными сооружениями, не намеченными к сносу.

Вместо применения единого, общего для всех объектов целевого показателя реабилитации определяются конечные состояния каждого конкретного объекта с учетом вероятных сценариев повторного использования. Ввиду большой разбросанности площадок и разного уровня спроса на землю для перепланировки целевые показатели реабилитации согласуются с тем, каким может быть следующее вероятное использование данной площадки. В одних случаях это может означать, что некоторые загрязнения будут оставлены на месте, а контроль рисков будет осуществляться за счет ограничения доступа. В других случаях это может означать удаление всех остаточных загрязнений с площадки, с тем чтобы полностью освободить ее от регулирующего контроля (отменить режим лицензирования), разрешив неограниченное повторное использование. Поэтому затраты труда, необходимые для достижения разных конечных состояний, и объемы наработанных радиоактивных отходов будут разными, как показано на рис. 61.

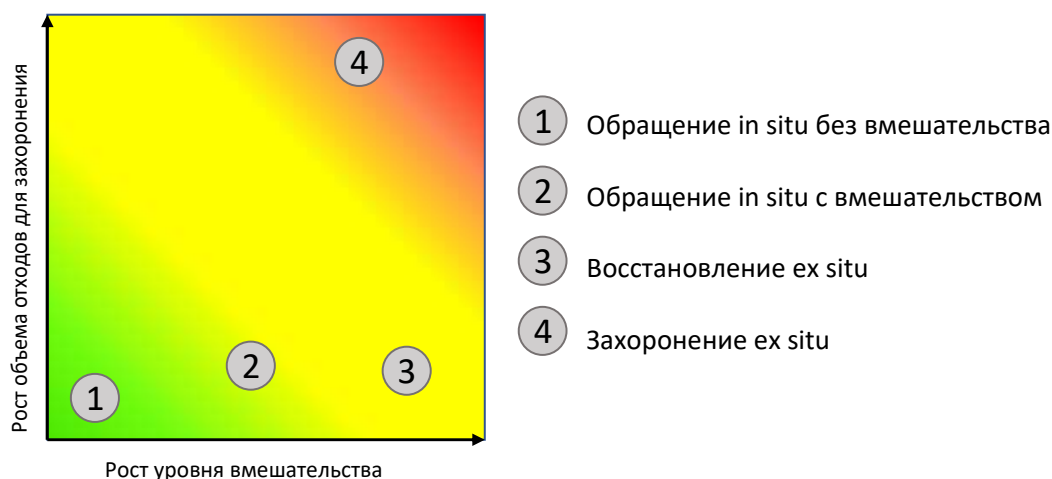


РИС. 61. Типичное распределение вариантов реабилитации загрязненной территории на ядерных объектах Соединенного Королевства по ключевым критериям принятия решений. Взято с изменениями из [205, 206].

Работы по очистке связаны с очень большими объемами отходов, большинство из которых радиоактивно загрязнены или активированы лишь в незначительной степени. Большая часть этого материала образуется в результате вывода из эксплуатации ядерных установок (сталь, бетон, кирпич и т.д.), но будет также включать грунты, собранные в ходе реабилитации загрязненной территории. Общий объем радиоактивных отходов из всех источников оценивается в 4 770 000 м³ [205], включая:

- ОНАО: 2 720 000 м³;
- НАО: 1 600 000 м³;
- САО: 449 000 м³;
- ВАО: 1500 м³.

Чтобы обеспечить эффективное использование национальных ресурсов, необходимо придерживаться соразмерных подходов к обращению с этими большими объемами отходов. Пересмотренная национальная стратегия обращения с ОНАО и НАО была представлена в 2010 году [207] и актуализирована в 2016 году [208]. В ней развиваются две ключевые темы:

- a) повсеместное применение иерархии отходов, в частности для того, чтобы больше материалов направлялось на повторное использование и рециклирование, а не на захоронение;
- b) лучшее отделение ОНАО от НАО и захоронение ОНАО на приповерхностных объектах с грунтовой засыпкой (а не в оборудованных камерах), исходя из соответствующей оценки риска.

Эта стратегия подкрепляется пересмотренными правилами освобождения от контроля, которые позволяют обращаться с отходами (и утилизировать их) как с «находящимися вне сферы применения» регулирующих положений (т.е. нерадиоактивными). Ядерная отрасль Соединенного Королевства разработала практическое руководство и свод правил по освобождению от контроля, в которых проводится важное различие между чистыми материалами, которые, как можно доказать на основании их происхождения и документов, не могут быть загрязненными или активированными, и исключенными материалами, которые, как можно доказать при помощи измерений, имеют уровни радиоактивности ниже пределов освобождения от контроля [209].

Совместное применение правил освобождения от контроля, методов сортировки ОНАО и методов захоронения с учетом факторов риска кардинально изменило порядок обращения с очень большими объемами отходов восстановительной деятельности в Соединенном Королевстве.

В Соединенном Королевстве действует один национальный пункт захоронения НАО: близ Дригга, рядом с комплексом «Селлафилд». Это оборудованное наземное хранилище камерного типа принимает НАО, которые зацементированы и уложены в контейнеры. Максимальная вместимость хранилища НАО составляет 1,7 млн м³. В соответствии с национальной политикой срок его эксплуатации был продлен за счет перенаправления НАО на альтернативные полигоны (строящиеся теперь на коммерческой основе).

Общие уроки реабилитации бывших объектов состоят в следующем:

- 1) обращение с радиоактивными отходами, образующимися в результате аварий (например, пожара на реакторе в Уиндскейле), может осуществляться в рамках комплексной национальной стратегии обращения с отходами, охватывающей все радиоактивные отходы;
- 2) реабилитацию необходимо планировать на основе четко определенных и практически достижимых показателей конечного состояния. Конечное состояние (и, следовательно, уровни очистки) должно определяться с учетом соображений безопасности, технических и социально-экономических факторов и может быть разным для разных объектов;
- 3) применяя соразмерный, основанный на учете рисков, подход к захоронению, можно добиться более эффективного использования ресурсов. Если для захоронения отходов с низким уровнем риска не будут использоваться дорогостоящие, специально оборудованные сооружения, это поможет сохранить имеющиеся мощности и даст возможность своевременного захоронения других типов отходов.

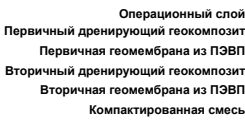
VI.2. СОЕДИНЁННЫЕ ШТАТЫ АМЕРИКИ: БЫВШИЕ ОБЪЕКТЫ ПО ИССЛЕДОВАНИЯМ, РАЗРАБОТКЕ И ПРОИЗВОДСТВУ ЯДЕРНОГО ОРУЖИЯ

Реабилитация тысяч загрязненных объектов на многочисленных площадках по всей территории США, которые используются или некогда использовались для исследований, разработки и производства ядерного оружия, — это задача непреходящей важности, рассчитанная на многие десятилетия. По оценкам, на сегодняшний день произведено захоронение более 10 млн м³ разнотипных отходов. Во многих из этих мест продолжается работа. Как правило, новые объекты по захоронению отходов на месте сооружаются там, где имеется достаточный объем отходов, для достижения экономии за счет масштаба. Такой подход также позволяет избежать затрат на погрузку, транспортировку и выгрузку отходов на пунктах захоронения, удаленных на сотни или тысячи километров.

Для каждого из объектов, подлежащих реабилитации, созданы местные комитеты по консультированию граждан, которые предоставляют информацию местным жителям и привлекают их к планированию и выполнению реабилитационных мероприятий. Благодаря этому, а также ввиду создания новых пунктов захоронения вблизи существующих загрязненных зон противодействие местной общественности носит ограниченный характер.

Одним из крупнейших объектов, созданных для этой цели, является Центр захоронения отходов для восстановления окружающей среды (ERDF), расположенный на территории Ханфордской резервации в штате Вашингтон [210]. Этот объект, открытый в 1996 году, был создан для приема грунта и мусора, содержащих низкоактивные отходы, в том числе материалов, смешанных с опасными химическими компонентами. Для захоронения отходов в ERDF используются большие, обособленные секции с защитным подстилающим слоем из геомембраны и дренирующими системами, а также с искусственными покрытиями. Схема объекта показана на рис. 62.

**Центр захоронения отходов для
восстановления окружающей среды**



В настоящее время в ERDF насчитывается восемь секций, или ячеек, системы захоронения. Новейшие ячейки имеют ширину 152 м, длину 305 м и глубину 21,3 м и могут вместить 2,8 млн т отходов. Экономия за счет масштаба была дополнительно повышена за счет использования единой системы сбора фильтрата (в предыдущих проектах их было две) и замены гравийного дренирующего слоя толщиной 30 см геокомпозитным материалом, что позволило снизить капитальные затраты и увеличить вместимость хранилища.

Уроки реабилитации бывших объектов по созданию ядерного оружия в США состоят в следующем:

- 191

- d) при проведении сложных восстановительных работ для оптимизации технических решений может потребоваться несколько пунктов захоронения, спроектированных, построенных и эксплуатируемых для разных типов отходов;
- e) использование преимуществ этой схемы может быть затруднено в случае ядерной аварии из-за требований общественности реализовать более быстрые технические решения, чем позволяет этот подход;
- f) местные комитеты по консультированию граждан — эффективное средство информирования местного населения о планировании и реализации реабилитационных мероприятий и его привлечения к этому процессу.

VI.3. АВСТРАЛИЯ: БЫВШИЙ ПОЛИГОН ДЛЯ ИСПЫТАНИЙ ЯДЕРНОГО ОРУЖИЯ «МАРАЛИНГА»

В период с 1952 по 1957 год Соединенное Королевство проводило атмосферные испытания ядерного оружия на трех австралийских полигонах, включая полигон «Маралинга». Результатом этих испытаний и сотен мелких экспериментов стало образование долгоживущих высокорadioактивных загрязнителей. Некоторые из этих материалов, размером от частиц пыли, которые могут попасть в организм через дыхательные пути, до крупных фрагментов, были запаханы в землю в 1967 году, чтобы разбавить концентрацию и уменьшить вероятность их сбора людьми и рассеивания в окружающей среде. Среди этих фрагментов были проволока, ржавые стальные листы, свинец, битум и желтый бакелит. Некоторые наиболее опасные материалы, объем которых неизвестен, были сброшены бульдозерами в неглубокие ямы глубиной 2–3 м. В 1979 году из одного из могильников было извлечено 0,4 кг Pu и переправлено в Соединенное Королевство.

Факт загрязнения привлек внимание австралийских регулирующих органов в 1984 году, когда на обширной территории на поверхности земли и на небольшой глубине было обнаружено большое количество частиц и фрагментов, сильно загрязненных ураном, плутонием и америцием. Главную опасность представляло вдыхание частиц плутония. Ранее эта загрязненная территория принадлежала коренным народам, которые намеревались вернуть себе право владения и пользования землей. С учетом этого правительство предоставило соответствующую информацию этим заинтересованным сторонам и привлекло их к проведению топографической съемки и исследований для характеристики отходов.

Критерии очистки были установлены исходя из предельного уровня экспозиционной дозы 5 мЗв/год. Очистка всей территории по этому критерию была признана экономически нецелесообразной. В связи с этим была выделена «нежилая зона» площадью 120 км², использование которой человеком было ограничено туризмом, охотой, устройством кемпингов и другими временными видами деятельности, не связанными с проживанием. Кроме того, были организованы альтернативные маршруты в объезд этой территории, чтобы ограничить ее использование. Внутри этой нежилой зоны на отдельных участках общей площадью 2,3 км² были удалены загрязненные грунты, а также некоторые виды загрязненного мусора. Борьба с рассеянным загрязнением велась посредством срезания грунта для достижения среднего уровня активности < 3 кБк/м² на гектар.

Очистка высокоактивных могильников включала в себя остекловывание *in situ* половины содержимого ямы, эксгумацию и перезахоронение оставшихся в яме отходов в новой траншее для приповерхностного захоронения на площадке. Остекловывание *in situ* было прекращено после подземных взрывов, вызванных захороненным материалом. Приблизительно 263 000 м³ загрязненного грунта было захоронено на глубине 15 м и покрыто слоем чистого грунта толщиной не менее 5 м. На месте захоронения сохраняются ограничения на землепользование, чтобы предотвратить вмешательство человека и уменьшить вероятность контакта с любыми необнаруженными фрагментами. В ходе текущего мониторинга будут учитываться факторы здоровья и безопасности посетителей и пользователей реабилитированных территорий [211].

Уроки реабилитации полигона «Маралинга» состоят в следующем:

- a) решения по захоронению отходов и другие решения определялись характером местной окружающей среды, землепользования и общественными факторами;
- b) приоритет был отдан сценариям с высокой мощностью дозы;
- c) во время загрязнения земля считалась бесполезной и впредь непригодной для жизни; спустя 40 лет эта земля стала высоко цениться владельцами, что показывает, как могут измениться ценности за несколько десятилетий;
- d) захоронение отходов, не прошедших характеризацию, в неглубоких ямах сделало последующую очистку трудной и дорогостоящей;
- e) благодаря сочетанию консультаций с заинтересованными сторонами, научных и инженерных знаний и высокого уровня технической поддержки можно повысить уровень доверия общественности;
- f) включение в планы захоронения элементов обратимости и извлекаемости обеспечивает гибкость при работе с долгоживущими отходами;
- g) остекловывание *in situ* без достаточных знаний о составе захороненных отходов может оказаться проблематичным.

Опыт реабилитации объектов ядерного наследия обобщен в таблице 19.

ТАБЛИЦА 19. СВОДНЫЕ ДАННЫЕ О РЕАБИЛИТАЦИИ ОБЪЕКТОВ ЯДЕРНОГО НАСЛЕДИЯ

Деятельность	Наработанные отходы
Реабилитация бывших объектов гражданской ядерной энергетики (Соединенное Королевство)	Ориентировочно 4 490 000 м ³ из всех источников: в основном в результате работ по выводу из эксплуатации ядерных установок, но также грунты, собранные при рекультивации загрязненных земель: — 2 840 000 м ³ (63,2%) ОНАО — 1 370 000 м ³ (30,5%) НАО — 286 000 м ³ (6,4%) САО — 1080 м ³ (0,1%) ВАО
Реабилитация бывших объектов, связанных с ядерным оружием (США)	По оценкам, на сегодняшний день захоронено 10 млн м ³ разнотипных отходов: — на ряде объектов ведутся работы, причем там, где имеется достаточный объем отходов, для достижения экономии за счет масштаба по мере необходимости сооружаются пункты захоронения отходов на площадке
Очистка полигона для испытаний ядерного оружия «Маралинга» (Австралия)	Создана нежилая зона площадью 120 км ² , использование которой человеком ограничено туризмом, охотой, устройством кемпингов и другими временными видами деятельности, не связанными с проживанием: — на отдельных участках вместе с мусором удалено в общей сложности 2,3 км ² загрязненных грунтов Реабилитация могильников с высокой активностью: — 263 000 м ³ грунта захоронено на глубине 15 м и покрыто слоем чистого грунта толщиной не менее 5 м — Остекловывание <i>in situ</i> половины содержимого высокоактивных могильников

VI.4. ФРАНЦИЯ: ЗАХОРОНЕНИЕ ОЧЕНЬ НИЗКОАКТИВНЫХ РАДИОАКТИВНЫХ ОТХОДОВ, ОБРАЗОВАВШИХСЯ ПРИ ДЕМОНТАЖЕ ЯДЕРНЫХ УСТАНОВОК

В 2003 году в Морвилье, Франция, был открыт центр CIREС для захоронения очень низкоактивных радиоактивных отходов. Решение о создании такого объекта было принято ввиду отсутствия во Франции безусловного уровня освобождения от контроля при демонтаже ядерных установок, что означало, что значительный объем материалов, образовавшихся в ходе демонтажа, не мог быть использован повторно и подлежал захоронению в качестве отходов даже при очень низком уровне загрязнения [212].

Основной принцип проектирования хранилища заключался в соблюдении правил, регламентирующих работу пунктов захоронения нерадиоактивных опасных отходов. Применяя такой принцип, можно размещать радиоактивные отходы вместе с токсичными химическими веществами. Локализация будет обеспечена, если будет найден низкопроницаемый поверхностный глинистый слой, в котором и будет сооружено хранилище.

Как показано на рис. 63, траншеи для захоронения выкапываются в слое природной глины, а стенки и дно траншеи дополнительно защищаются непроницаемой геомембраной. Траншеи устраиваются на глубине 8 м ниже уровня земли и по окончании работ поднимаются на 4 м выше уровня земли. Отходы укладываются поверх мембраны, а подвижная кровля отводит дождевые осадки в дренажные системы, чтобы они не мешали операциям, в течение всего процесса загрузки. Принимаются контейнеры и некоторые сыпучие материалы. Заполненные траншеи засыпаются и герметизируются той же мембраной. В конечном итоге хранилище покрывают глиной и засаживают растительностью. Чтобы убедиться, что к отходам не просачивается вода, используется смотровой колодец.

За 10 лет работы центр CIREС хорошо себя зарекомендовал: ежегодно здесь производится захоронение более 30 000 м³ отходов. На его территории устроено и заполнено отходами более 10 траншей, и центр имеет достаточную вместимость для размещения доставляемых отходов. После заполнения траншей отходами сооружается окончательное покрытие. Ожидается, что объект будет работать более 20 лет, а его расчетная вместимость составляет 650 000 м³. Среднее содержание активности в отходах составляет ~9 Бк/г.

В январе 2014 года был установлен новый тип укрытий под названием Prémorails (см. рис. 64). Это эффективное запатентованное сооружение, которое легче перемещать и безопаснее эксплуатировать, было спроектировано агентством по обращению с отходами («Андра») для защиты будущих камер. Оно представляет собой металлическую конструкцию на рельсах с брезентовым покрытием, которая может быть разделена на секции. Проект является инновационным в трех отношениях:

- a) автономность: гибкая разборная конструкция перемещается в виде отдельных секций на рельсах, а не с помощью крупного подъемного оборудования, как это было прежде;
- b) герметичность: все секции вместе взятые образуют водонепроницаемое укрытие длиной 180 м, а на стыке секций добавляются дополнительные защитные тенты;
- c) безопасность: наличие центрального прохода внутри укрытия в верхней его части облегчает безопасную сборку и разборку разных секций.

Подход к обеспечению безопасности в центре в Морвилье согласуется с подходом, принятым для пункта захоронения низкоактивных радиоактивных отходов в департаменте Об, находящегося в 1,5 км от CIREС, и учитывает последствия функционирования центра с точки зрения как радиологической, так и химической токсичности отходов. Риск токсичности, выраженный пороговыми или референсными значениями, был установлен для As, Zn, Pb и Cd, а также для химических элементов с канцерогенным эффектом (As, Cd). Радиологический риск характеризуется путем расчета доз. Дозы сравниваются с предельными значениями, установленными регулирующим органом в соответствии с международными нормами.



РИС. 63. Схема пункта захоронения ОНАО CIREs в Морвилье. Публикуется с разрешения «Андра».



РИС. 64. Укрытия Прémorails в центре CIREs.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- [1] DELTETE, P., HAHN, R., TMI-2 Waste Management Experience, EPRI TR-100640, Electric Power Research Institute, Palo Alto, CA, 1992.
- [2] HOLTON, W.C., NEGIN, C.A., OWRUTSKY, S.L., The Cleanup of Three Mile Island Unit 2 — A Technical History: 1979–1990, EPRI NP-6931, Electric Power Research Institute, Palo Alto, CA, 1990.
- [3] МЕЖДУНАРОДНОЕ АГЕНТСТВО ПО АТОМНОЙ ЭНЕРГИИ, Экологические последствия аварии на Чернобыльской АЭС и их преодоление: двадцатилетний опыт, Серия докладов по радиологическим оценкам, № 8, МАГАТЭ, Вена (2008).
- [4] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Chernobyl: Looking Back to Go Forward, Proceedings Series, IAEA, Vienna (2008).
- [5] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Present and Future Environmental Impact of the Chernobyl Accident, IAEA-TECDOC-1240, IAEA, Vienna (2001).
- [6] МЕЖДУНАРОДНОЕ АГЕНТСТВО ПО АТОМНОЙ ЭНЕРГИИ, Десятилетие после Чернобыля: оценка последствий аварии, INFCIRC/510, МАГАТЭ, Вена (1996).
- [7] TOKYO ELECTRIC POWER COMPANY, Situation of Storage and Treatment of Accumulated Water Including Highly Concentrated Radioactive Materials at Fukushima Daiichi Nuclear Power Station (155th Release), Press Release (2014),
https://www.tepco.co.jp/en/press/corp-com/release/2014/1237952_5892.html
- [8] COMITÉ DIRECTEUR POUR LA GESTION DE LA PHASE POST-ACCIDENTELLE, Policies and Strategies for Radioactive Waste Management, Policy Elements for Post-Accident Management in the Event of Nuclear Accident, CODIRPA, Montrouge (2012).
- [9] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, The Follow-up IAEA International Mission on Remediation of Large Contaminated Areas Off-Site the Fukushima Daiichi NPP, Final Report NE/NEFW/2013, IAEA, Vienna, 2014.
- [10] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, The International Mission on Remediation of Large Contaminated Areas Off-Site the Fukushima Daiichi NPP, Final Report NE/NEFW/2011, IAEA, Vienna, 2011.
- [11] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, IAEA International Peer Review Mission on Mid-and-Long-Term Roadmap Towards the Decommissioning of TEPCO's Fukushima Daiichi Nuclear Power Station Units 1–4, Tokyo and Fukushima Prefecture, Japan, 25 November–4 December 2013, Mission Report, IAEA, Vienna, 2014.
- [12] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, IAEA International Peer Review Mission on Mid-and-Long-Term Roadmap Towards the Decommissioning OF TEPCO'S Fukushima Daiichi Nuclear Power Station Units 1–4, Tokyo and Fukushima Prefecture, Japan, 15–22 April 2013, Mission Report, IAEA, Vienna, 2013.
- [13] МЕЖДУНАРОДНОЕ АГЕНТСТВО ПО АТОМНОЙ ЭНЕРГИИ, Классификация радиоактивных отходов, Серия норм безопасности МАГАТЭ, № GSG-1, МАГАТЭ, Вена (2014).
- [14] ВСЕМИРНАЯ ОРГАНИЗАЦИЯ ЗДРАВООХРАНЕНИЯ, МЕЖДУНАРОДНАЯ ОРГАНИЗАЦИЯ ТРУДА, МЕЖДУНАРОДНОЕ АГЕНТСТВО ПО АТОМНОЙ ЭНЕРГИИ, ПАНАМЕРИКАНСКАЯ ОРГАНИЗАЦИЯ ЗДРАВООХРАНЕНИЯ, ПРОДОВОЛЬСТВЕННАЯ И СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННАЯ ОРГАНИЗАЦИЯ ОБЪЕДИНЕННЫХ НАЦИЙ, Критерии для использования при обеспечении готовности и реагирования в случае ядерной или радиологической аварийной ситуации, Серия норм безопасности МАГАТЭ, № GSG-2, МАГАТЭ, Вена (2012).
- [15] МЕЖДУНАРОДНОЕ АГЕНТСТВО ПО АТОМНОЙ ЭНЕРГИИ, Обращение с радиоактивными отходами перед захоронением, Серия норм безопасности МАГАТЭ, № GSR Part 5, МАГАТЭ, Вена (2010).
- [16] АГЕНТСТВО ПО ЯДЕРНОЙ ЭНЕРГИИ ОЭСР, ВСЕМИРНАЯ ОРГАНИЗАЦИЯ ЗДРАВООХРАНЕНИЯ, ЕВРОПЕЙСКАЯ КОМИССИЯ, МЕЖДУНАРОДНАЯ ОРГАНИЗАЦИЯ ТРУДА, МЕЖДУНАРОДНОЕ АГЕНТСТВО ПО АТОМНОЙ ЭНЕРГИИ, ПАНАМЕРИКАНСКАЯ ОРГАНИЗАЦИЯ ЗДРАВООХРАНЕНИЯ, ПРОГРАММА ОРГАНИЗАЦИИ ОБЪЕДИНЕННЫХ НАЦИЙ ПО ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЕ, ПРОДОВОЛЬСТВЕННАЯ И СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННАЯ ОРГАНИЗАЦИЯ ОБЪЕДИНЕННЫХ НАЦИЙ, Радиационная защита и безопасность источников излучения: Международные основные нормы безопасности, Серия норм безопасности МАГАТЭ, № GSR Part 3, МАГАТЭ, Вена (2015).
- [17] МЕЖДУНАРОДНОЕ АГЕНТСТВО ПО АТОМНОЙ ЭНЕРГИИ, Обращение с радиоактивными отходами атомных электростанций и исследовательских реакторов перед захоронением, Серия норм безопасности МАГАТЭ, SSG-40, МАГАТЭ, Вена (2023).

- [18] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Predisposal Management of Radioactive Waste from Nuclear Fuel Cycle Facilities, IAEA Safety Standards Series No. SSG-41, IAEA, Vienna (2016).
- [19] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Remediation Process for Areas Affected by Past Activities and Accidents, IAEA Safety Standards Series No. WS-G-3.1, IAEA, Vienna (2007).
- [20] МЕЖДУНАРОДНОЕ АГЕНТСТВО ПО АТОМНОЙ ЭНЕРГИИ, Хранение радиоактивных отходов, Серия норм безопасности МАГАТЭ, № WS-G-6.1, МАГАТЭ, Вена (2008).
- [21] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Management of Large Volumes of Radioactive Waste Arising from Nuclear or Radiological Incidents, IAEA-TECDOC-1826, IAEA, Vienna (2017).
- [22] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Experiences and Lessons Learned Worldwide in the Cleanup and Decommissioning of Nuclear Facilities in the Aftermath of Accidents, IAEA Nuclear Energy Series No. NW-T-2.7, IAEA, Vienna (2014).
- [23] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Decommissioning after a Nuclear Accident: Approaches, Techniques, Practices and Implementation Considerations, IAEA Nuclear Energy Series No. NW-T-2.10, IAEA, Vienna (2019).
- [24] МЕЖДУНАРОДНОЕ АГЕНТСТВО ПО АТОМНОЙ ЭНЕРГИИ, Глоссарий МАГАТЭ по вопросам безопасности, издание 2018 года, МАГАТЭ, Вена (2023).
- [25] RENO, H.W., SCHMITT, R.C., Historical Summary of the Fuel and Waste Handling and Disposition Activities of the TMI-2 Information and Examination Programme (1980–1988), EGG-2529, EG&G Idaho, Idaho Falls, ID (1988).
- [26] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Design Principles and Approaches for Radioactive Waste Repositories, IAEA Nuclear Energy Series No. NW-T-1.27, IAEA, Vienna (2020).
- [27] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Policy and Strategies for Environmental Remediation, IAEA Nuclear Energy Series No. NW-G-3.1, IAEA, Vienna (2015).
- [28] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Guidelines for Remediation Strategies to Reduce the Radiological Consequences of Environmental Contamination, Technical Report Series No. 475, IAEA, Vienna (2012).
- [29] NUCLEAR REGULATORY COMMISSION, Licensing Requirements for Land Disposal of Radioactive Waste, 10 CFR 61, US Govt Printing Office, Washington, DC (1983).
- [30] NUCLEAR REGULATORY COMMISSION, Programmatic Environmental Impact Statement Related to Decontamination and Disposal of Radioactive Wastes Resulting from 28 March 1979 Accident Three Mile Island Nuclear Station, Unit 2, NUREG 0683 Supplement 1, Docket No. 50-320, US Govt Printing Office, Washington, DC (1984).
- [31] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Approach to Develop Waste Acceptance Criteria for Low and Intermediate Level Waste, IAEA, Vienna (в стадии подготовки).
- [32] MINISTRY OF THE ENVIRONMENT, Recycling Technology Development Strategy Study Group: Volume Reduction and Recycling for Intermediate Storage Removal, Technical Issues on Recycling, Presentation (2015),
http://josen.env.go.jp/chukanchozou/facility/effort/investigative_commission/pdf/proceedings_150721_06.pdf
- [33] EAST JAPAN GREAT EARTHQUAKE RESPONSE RESEARCH COMMITTEE, Characterization Scheme for Recycled Materials from Incineration Bottom Ash of Disaster Wastes for Ground Materials, Fact Sheet (2012),
http://geotech.gee.kyoto-u.ac.jp/JGS/Scheme_abstract01.pdf
- [34] JAPAN CONSTRUCTION FEDERATION ASSOCIATION, List of Quality Standards Relating to the Reconstruction and Utilization of Disaster Waste, Fact Sheet (2012),
www.nikkenren.com/pdf/disaster/2012_1109saigaihaiki.pdf
- [35] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Monitoring for Compliance with Exemption and Clearance Levels, Safety Reports Series No. 67, IAEA, Vienna (2012).
- [36] МЕЖДУНАРОДНОЕ АГЕНТСТВО ПО АТОМНОЙ ЭНЕРГИИ, Применение концепций исключения, изъятия и освобождения от контроля, Серия норм безопасности МАГАТЭ, № RS-G-1.7, МАГАТЭ, Вена (2006).
- [37] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Derivation of Activity Concentration Values for Exclusion, Exemption and Clearance, Safety Reports Series No. 44, IAEA, Vienna (2005).
- [38] МЕЖДУНАРОДНОЕ АГЕНТСТВО ПО АТОМНОЙ ЭНЕРГИИ, Регулирующий контроль радиоактивных сбросов в окружающую среду, Серия норм безопасности МАГАТЭ, № WS-G-2.3, МАГАТЭ, Вена (2023).
- [39] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Setting Authorized Limits for Radioactive Discharges: Practical Issues to Consider, IAEA-TECDOC-1638, IAEA, Vienna (2010).
- [40] TYROR, J.G., PEARSON, G.W., “The medical implications of NPP accidents”, Medical Response to Effects of Ionizing Radiation (Proc. Conf. London 1989) UKAEA, London (1989).

- [41] CHAMBERLAIN, A.C., Emission of Fission Products and Other Activities During the Accident to Windscale Pile No. 1 in October 1957, AERE-M3194, UKAEA, London, 1981.
- [42] NUCLEAR REGULATORY COMMISSION, Backgrounder on the Three Mile Island Accident, Fact Sheet (2018),
<https://www.nrc.gov/reading-rm/doc-collections/fact-sheets/3mile-isle.html>
- [43] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Regulatory Control for the Safe Transport of Naturally Occurring Radioactive Material (NORM), IAEA-TECDOC-1728, IAEA, Vienna (2013).
- [44] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Advisory Material for the IAEA Regulations for the Safe Transport of Radioactive Material (2012 Edition), IAEA Safety Standards Series No. SSG-26, IAEA, Vienna (2014).
- [45] АГЕНТСТВО ПО ЯДЕРНОЙ ЭНЕРГИИ ОЭСР, ВСЕМИРНАЯ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКАЯ ОРГАНИЗАЦИЯ, ВСЕМИРНАЯ ОРГАНИЗАЦИЯ ЗДРАВООХРАНЕНИЯ, ИНТЕРПОЛ, МЕЖДУНАРОДНАЯ МОРСКАЯ ОРГАНИЗАЦИЯ, МЕЖДУНАРОДНАЯ ОРГАНИЗАЦИЯ ГРАЖДАНСКОЙ АВИАЦИИ, МЕЖДУНАРОДНАЯ ОРГАНИЗАЦИЯ ТРУДА, МЕЖДУНАРОДНОЕ АГЕНТСТВО ПО АТОМНОЙ ЭНЕРГИИ, ПАНАМЕРИКАНСКАЯ ОРГАНИЗАЦИЯ ЗДРАВООХРАНЕНИЯ, ПОДГОТОВИТЕЛЬНАЯ КОМИССИЯ ОРГАНИЗАЦИИ ПО ДОГОВОРУ О ВСЕОБЪЕМЛЮЩЕМ ЗАПРЕЩЕНИИ ЯДЕРНЫХ ИСПЫТАНИЙ, ПРОГРАММА ОРГАНИЗАЦИИ ОБЪЕДИНЕННЫХ НАЦИЙ ПО ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЕ, ПРОДОВОЛЬСТВЕННАЯ И СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННАЯ ОРГАНИЗАЦИЯ ОБЪЕДИНЕННЫХ НАЦИЙ, УПРАВЛЕНИЕ ОРГАНИЗАЦИИ ОБЪЕДИНЕННЫХ НАЦИЙ ПО КООРДИНАЦИИ ГУМАНИТАРНЫХ ВОПРОСОВ, Готовность и реагирование в случае ядерной или радиологической аварийной ситуации, Серия норм безопасности МАГАТЭ, № GSR Part 7, МАГАТЭ, Вена (2016).
- [46] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Leadership, Management and Culture for Safety in Radioactive Waste Management, IAEA Safety Standards Series No. GSG-16, IAEA, Vienna (2022).
- [47] ORGANISATION FOR ECONOMIC CO-OPERATION AND DEVELOPMENT NUCLEAR ENERGY AGENCY, Management of Radioactive Waste after a NPP Accident, NEA Report 7305, OECD, Paris (2016).
- [48] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Disposal of Waste from the Cleanup of Large Areas Contaminated as a Result of a Nuclear Accident, Technical Reports Series No. 330, IAEA, Vienna (1992).
- [49] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Management of Abnormal Radioactive Wastes at NPPs, Technical Reports Series No. 307, IAEA, Vienna (1990).
- [50] GENERAL ACCOUNTING OFFICE, Impact of Federal R&D funding on Three Mile Island Cleanup Costs, EMD-82-28, US GAO, Gaithersburg, MD (1982).
- [51] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Selection of Technical Solutions for the Management of Radioactive Waste, IAEA-TECDOC-1817, IAEA, Vienna (2017).
- [52] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Restoration of Environments Affected by Residues from Radiological Accidents: Approaches to Decision Making, IAEA-TECDOC-1131, IAEA, Vienna (2000).
- [53] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Maintenance of Records for Radioactive Waste Disposal, IAEA-TECDOC-1097, IAEA, Vienna (1999).
- [54] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Retrieval, Restoration and Maintenance of Old Radioactive Waste Inventory Records, IAEA-TECDOC-1548, IAEA, Vienna (2007).
- [55] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Waste Inventory Record Keeping Systems (WIRKS) for the Management and Disposal of Radioactive Waste, IAEA-TECDOC-1222, IAEA, Vienna (2001).
- [56] NRC NEWS, NRC Approves License Transfer for Three Mile Island, Unit 2, Press Release (2020),
<https://www.nrc.gov/reading-rm/doc-collections/news/2020/20-058.pdf>
- [57] БАЛОГА В.И. и др., 20 лет Чернобыльской катастрофы: взгляд в будущее, национальный доклад Украины, «Атика», Киев (2006).
- [58] THE NUCLEAR DAMAGE COMPENSATION FACILITATION CORPORATION, The Nuclear Damage Compensation and Decommissioning Facilitation Corporation (NDF), Fact Sheet (2021),
https://www.ndf.go.jp/files/user/soshiki/pamph_e.pdf
- [59] TOKYO ELECTRIC POWER COMPANY, Mid- and Long-Term Roadmap Towards the Decommissioning of TEPCO's Fukushima Daiichi Nuclear Power Station, Report (2019),
https://www.meti.go.jp/english/earthquake/nuclear/decommissioning/pdf/20191227_3.pdf
- [60] ARNOLD, L., Windscale 1957: Anatomy of a Nuclear Accident, 3rd edn, Palgrave Macmillan, London (2007).
- [61] MINISTRY OF THE ENVIRONMENT, Decontamination Guidelines, Report (2013),
http://josen.env.go.jp/en/framework/pdf/decontamination_guidelines_2nd.pdf

- [62] МЕЖДУНАРОДНОЕ АГЕНТСТВО ПО АТОМНОЙ ЭНЕРГИИ, Мобильные системы переработки для обращения с радиоактивными отходами, Серия изданий МАГАТЭ по ядерной энергии, № NW-T-1.8, МАГАТЭ, Вена (2022).
- [63] BONDARKOV, M. (Ed.), 30 Years of the Chernobyl Disaster (Reviews), KIM Publishing House, Kyiv (2016).
- [64] МЕЖДУНАРОДНАЯ КОНСУЛЬТАТИВНАЯ ГРУППА ПО ЯДЕРНОЙ БЕЗОПАСНОСТИ, Итоговый доклад о совещании по рассмотрению причин и последствий аварии в Чернобыле, Серия INSAG-1, МАГАТЭ, Вена (1988).
- [65] МЕЖДУНАРОДНАЯ КОНСУЛЬТАТИВНАЯ ГРУППА ПО ЯДЕРНОЙ БЕЗОПАСНОСТИ, Чернобыльская авария: дополнение к INSAG-1, Серия INSAG-7, МАГАТЭ, Вена (1993).
- [66] EG AND G IDAHO INC., ALLIED-GENERAL NUCLEAR SERVICES, ARGONNE NATIONAL LABORATORY, ELECTRIC POWER RESEARCH INSTITUTE, SANDIA NATIONAL LABORATORIES, Planning Report, GEND-001, Three Mile Island Operations Office, Washington DC (1980).
- [67] ИНТЕРПОЛ, МЕЖДУНАРОДНАЯ ОРГАНИЗАЦИЯ ГРАЖДАНСКОЙ АВИАЦИИ, МЕЖДУНАРОДНОЕ АГЕНТСТВО ПО АТОМНОЙ ЭНЕРГИИ, ПОДГОТОВИТЕЛЬНАЯ КОМИССИЯ ПО ДОГОВОРУ О ВСЕОБЪЕМЛЯЮЩЕМ ЗАПРЕЩЕНИИ ЯДЕРНЫХ ИСПЫТАНИЙ, ПРОДОВОЛЬСТВЕННАЯ И СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННАЯ ОРГАНИЗАЦИЯ ОБЪЕДИНЕННЫХ НАЦИЙ И УПРАВЛЕНИЕ ОРГАНИЗАЦИИ ОБЪЕДИНЕННЫХ НАЦИЙ ПО ВОПРОСАМ КОСМИЧЕСКОГО ПРОСТРАНСТВА, Организация информационной работы с населением в порядке обеспечения готовности и реагирования в случае ядерной или радиологической аварийной ситуации, Серия норм безопасности МАГАТЭ, № GSG-14, МАГАТЭ, Вена (2023).
- [68] TOKYO ELECTRIC POWER COMPANY, Reviewing the Two Years of Nuclear Safety Reform, Press Release (2014),
https://www4.tepco.co.jp/en/press/corp-com/release/betu15_e/images/150330e0302.pdf
- [69] MINISTRY OF THE ENVIRONMENT, Decontamination Projects for Radioactive Contamination Discharged by Tokyo Electric Power Company Fukushima Daiichi Nuclear Power Station Accident, Internal Report (2019),
http://josen.env.go.jp/en/policy_document/
- [70] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Communication and Stakeholder Involvement in Radioactive Waste Disposal, IAEA Nuclear Energy Series No. NW-T-1.16, IAEA, Vienna (2022).
- [71] OECD NUCLEAR ENERGY AGENCY, International Roundtable on the Final Disposal of High-Level Radioactive Waste and Spent Fuel, Summary Report NEA No. 7529, OECD, Paris, 2020.
- [72] МЕЖДУНАРОДНОЕ АГЕНТСТВО ПО АТОМНОЙ ЭНЕРГИИ, Политика и стратегии обращения с радиоактивными отходами, Серия изданий МАГАТЭ по ядерной энергии, № NW-G-1.1, МАГАТЭ, Вена (2012).
- [73] МЕЖДУНАРОДНОЕ АГЕНТСТВО ПО АТОМНОЙ ЭНЕРГИИ, Меры по прекращению ядерной или радиологической аварийной ситуации, Серия норм безопасности МАГАТЭ, № GSG-11, МАГАТЭ, Вена (2023).
- [74] UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY, Technologies to Improve Efficiency of Waste Management and Cleanup After a Radiological Dispersal Device Incident: Standard Operational Guideline, EPA/600/R-13/124, US Environmental Protection Agency, Washington, DC (2013).
- [75] LLERANDI, C.S., “Palomares: From the accident to the rehabilitation plan”, Paper No. 2.3, paper presented at Int. Symp. on Decontamination: Towards the Recovery of the Environment, Fukushima, 2011.
- [76] OUZOUNIAN, G., DUTZER, M., TORRES, P., Disposal of short-lived waste in France, News article (2012),
<https://www.neimagazine.com/features/featuredisposal-of-short-lived-waste-in-france/>
- [77] MOLITOR, N., DRACE, Z., JAVELLE, C., “Achievements and remaining challenges for the conversion of Chernobyl NPP Unit 4 into ecologically safe conditions”, 30 Years of the Chernobyl Disaster (Reviews), KIM Publishing House, Kyiv (2016).
- [78] EUROPEAN COMMISSION JOINT RESEARCH CENTRE, Chernobyl Unit 4 — Follow-up Actions, Short and Long Term Measures for Chernobyl NPP, Contracts (2022),
[https://nuclear.jrc.ec.europa.eu/tipins/contracts/](https://nuclear.jrc.ec.europa.eu/tipins/contracts/chernobyl-unit-4-follow-actions-short-and-long-term-measures-chernobyl-npp)
[chernobyl-unit-4-follow-actions-short-and-long-term-measures-chernobyl-npp](https://nuclear.jrc.ec.europa.eu/tipins/contracts/chernobyl-unit-4-follow-actions-short-and-long-term-measures-chernobyl-npp)
- [79] NUCLEAR REGULATORY AUTHORITY, Order from NRA to TEPCO, Document No. 121107002, Correspondence (2012), <https://www.nsr.go.jp/data/000069063.pdf>
- [80] TOKYO ELECTRIC POWER COMPANY, Implementation Plan of the Measures for the Specified Reactor Facilities at Fukushima Daiichi Nuclear Power Station, Press Release (2013),
https://www.tepco.co.jp/en/press/corp-com/release/2013/1228248_5130.html

- [81] MINISTRY OF THE ENVIRONMENT, Interim Storage Facility, Fact Sheet (2022), <http://josen.env.go.jp/en/storage/>
- [82] NUCLEAR REGULATORY COMMISSION, Guidance for the Reviews of Proposed Disposal Procedures and Transfers of Radioactive Material Under 10 CFR 20.2002 and 10 CFR 40.13(A), ML19295F109, US Govt Printing Office, Washington DC (2020).
- [83] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY Redevelopment and Reuse of Nuclear Facilities and Sites: Case Histories and Lessons Learned, IAEA Nuclear Energy Series No. NW-T-2.2, IAEA, Vienna (2011).
- [84] MINISTRY OF THE ENVIRONMENT, On Progress of Decontamination, Presentation (2015), <http://josen.env.go.jp/material/session/pdf/015/mat05.pdf>
- [85] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Application of Configuration Management in NPPs, Safety Reports Series No. 65, IAEA, Vienna, (2010).
- [86] UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY, Guidance on Systematic Planning Using the Data Quality Objectives Process, EPA QA/G-4, US Environmental Protection Agency, Washington DC (2006).
- [87] AREVA, AREVA Develops Two Innovative Solutions for Contamination Monitoring, Press Release (2012), <https://www.sa.areva.com/EN/news-9623/japan-areva-develops-two-innovative-solutions-for-contamination-monitoring.html>
- [88] MINISTRY OF THE ENVIRONMENT, Liaison and Coordination Meeting Regarding Transportation of Removed Soil to Intermediate Storage Facilities, Meeting Minutes (2020), http://josen.env.go.jp/chukanchozou/action/investigative_commission/pdf/transportation_200129.pdf
- [89] MINISTRY OF THE ENVIRONMENT, Mid-and-Long-Term Roadmap Towards the Decommissioning of TEPCO's Fukushima Daiichi Nuclear Power Station Units 1–4, Monthly Progress Report (2020), <https://www.meti.go.jp/english/earthquake/nuclear/decommissioning/>
- [90] MIRION TECHNOLOGIES, In-Situ Measurements: FoodScreen™ Radiological Food Screening System, Data Sheet (2019), https://mirion.s3.amazonaws.com/cms4_mirion/files/pdf/spec-sheets/c39444_foodscreen_spec_sheet_2.pdf?1562600743
- [91] DUNSTER, H.J., HOWELLS, H., TEMPLETON, W.L., District surveys following the Windscale incident, October 19 J. Radiol. Prot. 27 (2007) 217–230.
- [92] UNITED STATES DEPARTMENT OF ENERGY, In Situ Underwater Gamma Spectroscopy System, Innovative Technology Summary Report OST/TMS ID 2990, USDOE, Idaho Falls, ID (2001).
- [93] AREVA, Mapping Contamination at Fukushima with Robots, News Brief (2013), <https://web.archive.org/web/20141115193411/http://areva.com/EN/news-9866/japan-mapping-contamination-at-fukushima-with-robots.html>
- [94] YOSHIYUKI SATO, et al., “Radiochemical analysis of rubble collected from around and inside reactor buildings at Units 1 to 4 in Fukushima Daiichi Nuclear Power Station”, Hot Laboratories and Remote Handling Working Group (Proc. 54th Ann. Mtg Mito, 2017) JAEA, Tokyo (2017).
- [95] KOMA, Y., et al., Radiochemical analysis of rubble and trees collected from Fukushima Daiichi Nuclear Power Station. J. Nucl. Sci. Tech. 51, (2014) 1032–1043.
- [96] URLAND, C S., TMI-2 Postaccident Data Acquisition and Analysis Experience, Interim Report, USDOE, Washington, DC, 1992.
- [97] AKERS, D.W., ROYBAL, G.S., Examination of Concrete Samples from the TMI-2 Reactor Building Basement, GEND-INF-081, EG&G Idaho, Idaho Falls, ID (1987).
- [98] MEINKRANTZ, D.M., et al., First Results of Sump Samples Analyses — Entry 10, GEND-INF-011, EG&G Idaho, Idaho Falls, ID (1981).
- [99] MCISAAC, C.V., et al., Results of Analyses Performed on Concrete Cores Removed from Floors and D-Ring Walls of the TMI-2 Reactor Building, GEND-054, EG&G Idaho, Idaho Falls, ID (1984).
- [100] MCISAAC, C.V., KEEFER, D.G., TMI-2 Reactor Building Source Term Measurements: Surfaces and Basement Water and Sediment, GEND-042, EG&G Idaho, Idaho Falls, ID (1984).
- [101] RUSSELL, M.L., TMI-2 Core Cavity Sides and Floor Examinations December 1985 and January 1986, GEND-074, EG&G Idaho, Idaho Falls, ID (1987).
- [102] RUSSELL, M.L., et al., TMI-2 Accident Evaluation Programme Sample Acquisition and Examination Plan for FY87 and Beyond, EGG-TMI-7521, EG&G Idaho, Idaho Falls, ID (1987).
- [103] BARATTA, A.J., GRICAR, B.G., JESTER, W.A., The Citizen Radiation Monitoring Programme for the TMI Area, GEND-008, Pennsylvania State University, University Park, PA (1981).

- [104] KURINY, V.D., IVANOV, Y.A., KASHPAROV, V.A., et al., Particle associated Chernobyl fall-out in the local and intermediate zones. *Ann. Nucl. Energy* 20 (1993) 415–420.
- [105] KASHPAROV, V.A., OUGHTON, D.H., ZVARICH, S.I., et al., Kinetics of fuel particles weathering and ⁹⁰Sr mobility in the Chernobyl 30-km exclusion zone, *Health Phys.* 76 (1999) 251–259.
- [106] KASHPAROV, V.A., et al., Kinetics of dissolution of Chernobyl fuel particles in soil in natural conditions. *J. Environ. Radioact.* 72 (2004) 335–353.
- [107] БОБОВНИКОВА Ц.И., ВИРЧЕНКО Е.П., КОНОПЛЕВ А.В. и др., Химические формы долгоживущих радионуклидов и их трансформация в почвах зоны аварии на ЧАЭС, «Почвоведение», № 10 (1990) 20–25.
- [108] KASHPAROV, V.A., LUNDIN, S.M., ZVARICH, S.I., Territory contamination with the radionuclides representing the fuel component of Chernobyl fallout, *Sci. Total Environ.* 317 (2003) 105–119.
- [109] KASHPAROV, V.A., LUNDIN, S.M., KHOMUTININ, Y.V., et al., Soil contamination with ⁹⁰Sr in the near zone of the Chernobyl accident, *J. Environ. Radioact.* 56 (2001) 285–298.
- [110] МНТЦ «УКРЫТИЕ», Анализ текущей безопасности объекта «Укрытие» и прогнозные оценки развития ситуации: Отчет/МНТЦ «Укрытие» НАН Украины, арх. № 3601, Чернобыль (1996).
- [111] IVANOV, Y.A., KASHPAROV, V.A., Long-term dynamics of the radioecological situation in terrestrial Chernobyl exclusion zone, *Environ. Sci. Pollut. Res.* 10 (2003) 13–20.
- [112] ВСЕРОССИЙСКИЙ ПРОЕКТНО-ИЗЫСКАТЕЛЬСКИЙ И НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ ПРОМЫШЛЕННОЙ ТЕХНОЛОГИИ, Обследование и инвентаризация уч. 2.1 ПВЛРО «Рыжий лес», 1992, Научный отчет/ВНИИПТ, Москва, 1992.
- [113] ГОСУДАРСТВЕННОЕ ПРЕДПРИЯТИЕ «НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЦЕНТР ДЕЗАКТИВАЦИИ И КОМПЛЕКСНОГО ОБРАЩЕНИЯ С РАДИОАКТИВНЫМИ ОТХОДАМИ, ВЕЩЕСТВАМИ И ИСТОЧНИКАМИ ИОНИЗИРУЮЩИХ ИЗЛУЧЕНИЙ», Обследование и инвентаризация уч. 5.1 ПВЛРО «Нефтебаза», НТЦ КОРО, Желтые Воды (1994).
- [114] ANTROPOV, V.M., et al. Review and Analysis of Solid Long-Lived and High Level Radioactive Waste Arising at the Chernobyl NPP and the Restricted Zone, EUR 19897, European Commission, Luxembourg (2001).
- [115] BROWN, T.D., BILLON, F., Characterisation of Radioactive Waste Located at ‘Shelter’ Industrial Site, EUR 19844, European Commission, Luxembourg (2001).
- [116] MINISTRY OF THE ENVIRONMENT, Guidelines for the Contamination Survey Method, Fact Sheet (2012), <http://www.env.go.jp/press/files/jp/18929.pdf>
- [117] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Cleanup and Decommissioning of a Nuclear Reactor After a Severe Accident, Technical Reports Series No. 346, IAEA, Vienna (1992).
- [118] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Planning for Cleanup of Large Areas Contaminated as a Result of a Nuclear Accident, Technical Reports Series No. 327, IAEA, Vienna (1991).
- [119] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Airborne Gamma Ray Spectrometer Surveying, Technical Reports Series No. 323, IAEA, Vienna (1991).
- [120] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Management of Severely Damaged Nuclear Fuel and Related Waste, Technical Reports Series No. 321, IAEA, Vienna (1990).
- [121] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Cleanup of Large Areas Contaminated as a Result of a Nuclear Accident, Technical Reports Series No. 300, IAEA, Vienna (1989).
- [122] SELLAFIELD LTD, NUCLEAR DECOMMISSIONING AUTHORITY, Demolition Starts on Windscale chimney, Press Release (2019), <https://www.gov.uk/government/news/demolition-starts-on-windscale-chimney>
- [123] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Retrieval and Conditioning of Solid Radioactive Waste from Old Facilities, Technical Reports Series No. 457, IAEA, Vienna (2007).
- [124] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Retrieval of Fluidizable Radioactive Wastes from Storage Facilities, IAEA-TECDOC-1518, IAEA, Vienna (2006).
- [125] OJOVAN, M.I., Handbook of Advanced Radioactive Waste Conditioning Technologies, Woodhead Publishing Series in Energy No. 12, Woodhead Publishing, Cambridge (2011).
- [126] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Categorizing Operational Radioactive Wastes, IAEA-TECDOC-1538, IAEA, Vienna (2007).
- [127] FRENCH ALTERNATIVE ENERGIES AND ATOMIC ENERGY COMMISSION, Retour sur la Journée ‘Fukushima, 4 ans après’, News article (2015), <https://prositon.cea.fr/drf/prositon/Pages/Actualites/2015/actualite%20C3%A9-20150519.aspx>
- [128] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Technologies for In-situ Immobilization and Isolation of Radioactive Wastes at Disposal and Contaminated Sites, IAEA-TECDOC-972, IAEA, Vienna (1997).

- [129] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Treatment of Low- and Intermediate-Level Solid Radioactive Wastes, Technical Reports Series No. 223, IAEA, Vienna (1983).
- [130] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Treatment of Spent Ion-Exchange Resins for Storage and Disposal, Technical Reports Series No. 254, IAEA, Vienna (1985).
- [131] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Treatment of Alpha Bearing Wastes, Technical Reports Series No. 287, IAEA, Vienna (1988).
- [132] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Status of Technology for Volume Reduction and Treatment of Low and Intermediate Level Solid Radioactive Waste, Technical Reports Series No. 360, IAEA, Vienna (1994).
- [133] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Management of Waste Containing Tritium and Carbon-14, Technical Reports Series No. 421, IAEA, Vienna (2004).
- [134] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Management of Problematic Waste and Material Generated During the Decommissioning of Nuclear Facilities, Technical Reports Series No. 441, IAEA, Vienna (2006).
- [135] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Innovative Waste Treatment and Conditioning Technologies at NPPs, IAEA-TECDOC-1504, IAEA, Vienna (2006).
- [136] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Application of Thermal Technologies for Processing of Radioactive Waste, IAEA-TECDOC-1527, IAEA, Vienna (2006).
- [137] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Treatment and Conditioning of Radioactive Solid Wastes, IAEA-TECDOC-655, IAEA, Vienna (1992).
- [138] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, The Volume Reduction of Low-activity Solid Wastes, Technical Reports Series No. 106, IAEA, Vienna (1970).
- [139] MINISTRY OF THE ENVIRONMENT, Decontamination Report: A Compilation of Experiences to Date on Decontamination for the Living Environment Conducted by the Ministry of the Environment, FY2014, Ministry of the Environment, Tokyo, 2015.
- [140] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Treatment of Liquid Effluent from Uranium Mines and Mills, IAEA-TECDOC-1419, IAEA, Vienna (2004).
- [141] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Application of Membrane Technologies for Liquid Radioactive Waste Processing, Technical Reports Series No. 431, IAEA, Vienna (2004).
- [142] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Combined Methods for Liquid Radioactive Waste Treatment, IAEA-TECDOC-1336, IAEA, Vienna (2003).
- [143] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Treatment and Conditioning of Radioactive Organic Liquids, IAEA-TECDOC-656, IAEA, Vienna (1992).
- [144] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Treatment of Low- and Intermediate-level Liquid Radioactive Wastes, Technical Reports Series No. 236, IAEA, Vienna (1984).
- [145] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Chemical Precipitation Processes for the Treatment of Aqueous Radioactive Waste, Technical Reports Series No. 337, IAEA, Vienna (1992).
- [146] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Advances in Technologies for the Treatment of Low and Intermediate Level Radioactive Liquid Wastes, Technical Reports Series No. 370, IAEA, Vienna (1994).
- [147] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Application of Ion Exchange Processes for the Treatment of Radioactive Waste and Management of Spent Ion Exchangers, Technical Reports Series No. 408, IAEA, Vienna (2002).
- [148] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Handling and Treatment of Radioactive Aqueous Wastes, IAEA-TECDOC-654, IAEA, Vienna (1992).
- [149] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Waste Treatment and Immobilization Technologies Involving Inorganic Sorbents, IAEA-TECDOC-947, IAEA, Vienna (1997).
- [150] TRIPLETT, M., Caesium Removal and Storage — Update on Fukushima Daiichi Status, Briefing for Hanford Advisory Board Tank Waste Committee (2015),
http://www.hanford.gov/files.cfm/Attachment_6-Cs_Presentation_PNNL.pdf
- [151] MINISTRY OF ECONOMY, TRADE AND INDUSTRY, The Outline of the Handling of ALPS Treated Water at Fukushima Daiichi NPS (FDNPS), Presentation (2019),
https://www.meti.go.jp/english/earthquake/nuclear/decommissioning/pdf/20191121_current_status.pdf
- [152] NUCLEAR REGULATORY COMMISSION, Knowledge Management Library for the Three Mile Island Unit 2 Accident of 1979 (2016),
<https://tmi2kml.inl.gov/HTML/Page1.html>

- [153] OAK RIDGE NATIONAL LABORATORY, Evaluation of the Submerged Demineralizer System (SDS) Flowsheet for Decontamination of High-Activity-Level Waste at the Three Mile Island Unit 2 Nuclear Power Station, ORNL/TM-7448, Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, TN (1980).
- [154] NATIONAL INSTITUTE FOR ENVIRONMENTAL STUDIES, Appropriate Treatment and Disposal of Disaster Waste and Waste Contaminated by Radioactive Substance (2022), <http://www.nies.go.jp/shinsai/1-1-e.html>
- [155] MIYAMOTO, Y., “R&D on the Radioactive Waste Treatment and Disposal”, International Research Institute for Nuclear Decommissioning (Proc. Ann. Symp. Tokyo 2014), IRID, Tokyo (2014), http://irid.or.jp/wp-content/uploads/2014/07/Sympo_Miyamoto_E.pdf
- [156] MCCONNELL, J.W., ROGERS, R.D., “Results of field testing of waste forms using lysimeters”, Waste Management '90 (Proc. Int. Symp. Tucson 1990) WM Symposia, Tucson, AZ, (1990).
- [157] BRYAN, G.H., SIEMENS, D.H., “Development and Demonstration of a Process for Vitrification of TMI Zeolite”, Transactions of the American Nuclear Society (ANS Winter Mtg, San Francisco, 1981) American Nuclear Society, La Grange Park, IL (1981).
- [158] BARNER, J.O., DANIEL, J.L., MARSHALL, R.K., Zeolite Vitrification Demonstration Programme: Characterization of Radioactive Vitrified Zeolite Materials, GEND-INF-043, Pacific Northwest National Laboratory, Richland, WA, 1984.
- [159] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Handling and Processing Radioactive Waste from Nuclear Applications, Technical Reports Series No. 402, IAEA, Vienna (2001).
- [160] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Containers for Packaging of Solid Low and Intermediate Level Radioactive Wastes, Technical Reports Series No. 355, IAEA, Vienna (1993).
- [161] МЕЖДУНАРОДНОЕ АГЕНТСТВО ПО АТОМНОЙ ЭНЕРГИИ, Правила безопасной перевозки радиоактивных материалов, Серия норм безопасности МАГАТЭ, № SSR-6 (Rev. 1), МАГАТЭ, Вена (2019).
- [162] UNITED KINGDOM GOVERNMENT, NATIONAL WASTE PROGRAMME, Container Signposting Resource, Fact Sheet (2018), <https://www.gov.uk/government/publications/nwp-container-signposting-resource>
- [163] MINISTRY OF THE ENVIRONMENT, Guidelines for Designated Waste, Fact Sheet (2013), <http://www.env.go.jp/en/focus/docs/files/20140725-87-3.pdf>
- [164] UNITED STATES DEPARTMENT OF ENERGY, Accident Investigation Report: Phase 2 Radiological Release Event at the Waste Isolation Pilot Plant, 14 February 2014, Office of Environmental Management, Washington, DC (2015).
- [165] WASTE ISOLATION PILOT PLANT, What Happened at WIPP in February 2014, <https://wipp.energy.gov/wipprecovery-accident-desc.asp>
- [166] MINISTRY OF FOREIGN AFFAIRS OF JAPAN, Events and Highlights on the Progress Related to Recovery Operations at Fukushima Daiichi Nuclear Power Station (2015), https://www.mofa.go.jp/dns/inec/page22e_000222.html
- [167] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Handbook on the Storage of Radioactive Waste, IAEA Nuclear Energy Series, IAEA, Vienna (в стадии подготовки).
- [168] ROMANO, S., WELLING, S, BELL, S., “Environmentally Sound Disposal of Radioactive Materials at a RCRA Hazardous Waste Disposal Facility”, Waste Management '03, (Proc. Int. Symp. Tucson 2003) WM Symposia, Tucson, AZ, (2003).
- [169] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, The Radiological Accident in Goiânia, IAEA, Vienna (1988).
- [170] DEPARTMENT OF EDUCATION, SCIENCE AND TRAINING, Rehabilitation of Former Nuclear Test Sites at Emu and Maralinga (Australia) 2003, Maralinga Rehabilitation Technical Advisory Committee, Commonwealth of Australia, Canberra (2002).
- [171] MERRIL, E, GESELL, T.F., Environmental Radioactivity: From Natural, Industrial and Military Sources, Academic Press, London (1997) p. 429.
- [172] LLERANDI, C.S., “Remediation after the Palomares accident: Scientific and social aspects”, IAEA Report on Decommissioning and Remediation after a Nuclear Accident, Action Plan on Nuclear Safety Series, IAEA, Vienna (2013).
- [173] 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, Основопологающие принципы безопасности, Серия норм безопасности МАГАТЭ, № SF-1, МАГАТЭ, Вена (2007).
- [174] THE NATIONAL ARCHIVES, Windscale Pile Incident October 1957: Report of Work Carried Out by the R&D Windscale Branch from 10 October 1957 to 5 November 1957, Ref. AB 7/6435, The National Archives, Kew (1957).
- [175] UNITED KINGDOM ATOMIC ENERGY OFFICE, Accident at Windscale No. 1 Pile on 10th October, 1957, Nature 180 (1957) 1043.
- [176] WAKEFORD, R., A double diamond anniversary — Kyshtym and Windscale: the nuclear accidents of 1957, J. Radiol. Prot. 37 (2017) E7.
- [177] PENNEY, W., et al., Report on the accident at Windscale No. 1 Pile on 10 October 1957, J. Radiol. Prot., 37 (2017) 780–796.
- [178] STEWART, N.G., CROOKS, R.N., Long-range travel of the radioactive cloud from the accident at Windscale, Nature 182 (1958) 627–8.
- [179] GARLAND, J.A., WAKEFORD, R., Atmospheric emissions from the Windscale accident of October 1957, Atmos. Environ. 41 (2007) 3904–20.
- [180] RUTHERFORD, T.N., The Windscale Piles: Situation April 1961, May 1961, Ref. AB62/71, The National Archives, London (1961).
- [181] UNITED KINGDOM HEALTH AND SAFETY EXECUTIVE, Guidance for Inspectors on the Management of Radioactive Materials and Radioactive Waste on Nuclear Licensed Sites, UK HSE, Nuclear Safety Directorate, London (2001).
- [182] ELECTRIC POWER RESEARCH INSTITUTE, The Cleanup of Three Mile Island Unit 2 — A Technical History: 1979–1990, Report NP-6931, EPRI, Palo Alto, CA (1990).
- [183] ELECTRIC POWER RESEARCH INSTITUTE, TMI-2 Waste Management Experience, Report TR-100640, EPRI, Palo Alto, CA (1992).
- [184] NUCNET, NucNet's Updated 'Chernobyl Fact File' Now Online, News Article (2016), <https://www.nucnet.org/news/nucnet-s-updated-chernobyl-fact-file-now-online>
- [185] KISELEV, A.N., CHERCHEROV, K.P., Model of the destruction of the reactor in the No. 4 unit of the Chernobyl NPP, Atomic Energy 91 (2001) 967–975.
- [186] OSKOLKOV, B.Y., et al., Radioactive waste management in the Chernobyl exclusion zone: 25 years since the Chernobyl NPP accident, Health Phys. 101 (2011) 431–441.
- [187] КАШПАРОВ В.О., Формирование и динамика радиоактивного загрязнения окружающей среды во время аварии на Чернобыльской АЭС и в послеаварийный период, Чернобыль: зона отчуждения: дайджест научных трудов (ред. Барьяхтар В.), «Наукова думка», Киев (2001), сс. 11–46.
- [188] САМОЙЛЕНКО Ю.Н., ГОЛУБЕВ В.В., Дезактивация «особой зоны», Чернобыль 88. Доклады 1 Всесоюзного научно-технического совещания по итогам ликвидации последствий аварии на Чернобыльской АЭС, ГНТУ, ПО «Комбинат», Министерство атомной энергетики СССР (1989), сс. 205–225.
- [189] ИЛЬИН Л.Н., «Химические войска», Чернобыль: Катастрофа. Подвиг. Уроки и выводы (ред. Дьяченко А.А.), «Интер-Весы», Москва (1996), сс. 523–552.
- [190] АНТРОПОВ В.М., КУМШАЕВ С.Б., СКВОРЦОВ В.В., ХАБРИКА А.И., Уточнение данных о радиоактивных отходах, размещенных в хранилищах Чернобыльской зоны отчуждения, Бюллетень экологического состояния зоны отчуждения и зоны безусловного (обязательного) отселения, ГАЗО 2 (2004) 24.
- [191] АНТРОПОВ В.М., МЕЛЬНИЧЕНКО В.П., ТРЕТЬЯК О.Г., ХАБРИКА А.И., Анализ состояния радиоактивных отходов в траншеях ПВЛРО «Нефтебаза» (ред. Антропов и др.), Издательство КИМ, Киев (2012).
- [192] EICHORN, H. Industrial Complex for Solid Radwaste Management (ICSRM) at Chernobyl NPP functionality of the facilities. Factors of success, Atw. Internationale Zeitschrift fuer Kernenergie 57 (2011) 105–107.
- [193] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, The Fukushima Daiichi Accident, IAEA, Vienna (2015).
- [194] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, International Peer Review Mission on Mid-and-Long-Term Roadmap Towards the Decommissioning of TEPCO's Fukushima Daiichi Nuclear Power Station Units 1–4: Fourth Mission: Preliminary Summary Report to the Government of Japan, IAEA, Vienna (2018).
- [195] БАТОРИШИН Г., МОКРОВ Ю.Г., Опыт ликвидации последствий аварии 1957 года на производственном объединении «Маяк», доклад, представленный на Совещании международных экспертов по вопросам снятия с эксплуатации и восстановительных мероприятий после ядерной аварии, МАГАТЭ, Вена (2013).
- [196] МЕРКУШКИН А.О., «Озеро Карачай — хранилище радиоактивных отходов под открытым небом», представлено на Международном молодежном ядерном конгрессе 2000 «Молодежь, будущее и ядерные технологии», протоколы и мультимедийная презентация, Служба информационных технологий МОЯОР, Российская Федерация (2001).

- [197] WORLD NUCLEAR ASSOCIATION, Chernobyl Accident 1986, Fact Sheet (2020), <https://www.world-nuclear.org/information-library/safety-and-security/safety-of-plants/chernobyl-accident.aspx>
- [198] IRANZO, E., ESPONOSA, A., IRANZO, C.E., “Evaluation of remedial actions taken in an agricultural area contaminated by transuranides”, Radioecology: The Impact of Nuclear Origin Accidents on Environment (Proc. IV Int. Symp. Cadarache, 1988), CEA Centre d'Etudes Nucleaires, Cadarache (1988).
- [199] MOLINA, G., “Lessons learned during the recovery operations in the Ciudad Juarez accident”, Recovery Operations in the Event of A Nuclear Accident or Radiological Emergency, Proceedings Series, IAEA, Vienna (1990).
- [200] LEHTO, J., PAAJANEN, A.A., Review of cleanup of large radioactive-contaminated areas, Cleanup of Large Radioactive Contaminated Areas and Disposal of Generated Waste (Lehto, J., Ed.), vol. 1994/567, TemaNord (1994) pp. 3–21.
- [201] AMARAL, E., “Remediation following the Goiânia accident”, paper presented at Int. Expert Mtg on Decommissioning and Remediation after a Nuclear Accident, IAEA, Vienna (2013).
- [202] PONTEDEIRO, E.M., HEILBRON, P.F., PEREZ-GERRERO, J. et al., Reassessment of the Goiânia radioactive waste repository in Brazil using HYDRUS-1D, J. Hydrol. Hydromech. 66 (2018).
- [203] ARNAL, J.M., et al., Management of Radioactive Ashes after a ¹³⁷Cs Source Fusion Incident (2004), <http://irpa11.irpa.net/pdfs/7e5.pdf>
- [204] NUCLEAR DECOMMISSIONING AUTHORITY, Nuclear Decommissioning Authority: Strategy (2016), <https://www.gov.uk/government/consultations/nuclear-decommissioning-authority-draft-strategy>
- [205] NUCLEAR DECOMMISSIONING AUTHORITY, Radioactive Wastes in the UK: A Summary of the 2016 Inventory, Nuclear Decommissioning Authority, Moor Row (2017).
- [206] NUCLEAR DECOMMISSIONING AUTHORITY, Land Quality Management. Preferred Option (Gate B), Ref: SMS/TS/A3-LQM/001/B, Nuclear Decommissioning Authority, Moor Row, 2011.
- [207] NUCLEAR DECOMMISSIONING AUTHORITY, UK Strategy for the Management of Solid Low Level Radioactive Waste from the Nuclear Industry, Report (2010), https://assets.publishing.service.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/457083/UK_Strategy_for_the_Management_of_Solid_Low_Level_Radioactive_Waste_from_the_Nuclear_Industry_August_2010.pdf
- [208] DEPARTMENT OF ENERGY AND CLIMATE CHANGE, UK Strategy for the Management of Solid Low Level Waste from the Nuclear Industry, URN 15D/472, Department of Energy and Climate Change, Kew, 2016.
- [209] NUCLEAR INDUSTRY SAFETY DIRECTORS FORUM, Clearance and Radiological Sentencing: Principles, Processes and Practices, A Nuclear Industry Guide, Guide (2017), https://www.nuclearinst.com/write/MediaUploads/SDF%20documents/CEWG/Clearance_and_Exemption_GPG_2.01.pdf
- [210] HAWKINS, A.R., Hanford Regulatory Experience Regulation at Hanford — A Case Study, US Department of Energy, US Department of Energy, DOE-0333-FPNA, Richland, WA (2007).
- [211] WILLIAMS, G. Remediation of Contaminated Lands: the Maralinga lessons, Australian Radiation Protection and Nuclear Safety Agency (ARPANSA), Presentation (2013), <https://www-pub.iaea.org/iaea meetings/IEM4/31Jan/Williams.pdf>
- [212] SOLENTE, N., “VLLW disposal and management of large volume of slightly contaminated materials: The French experience”, paper presented at IAEA Technical Meeting on the Disposal of Large Volume of Radioactive Waste, IAEA, Vienna (2013).

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ

АСКРО	автоматизированная система контроля радиационной обстановки
АЭС	атомная электростанция
АЯПБ	Агентство по ядерной и промышленной безопасности, Япония
БПЛА	беспилотный летательный аппарат
ВАО	высокоактивные отходы
ВНИПИПТ	Всероссийский проектно-изыскательский и научно-исследовательский институт промышленной технологии
ВПК	высокопрочный контейнер
ГАЗО	Государственное агентство Украины по управлению зоной отчуждения
ГСП	государственное специализированное предприятие
ДПЮ	«Дженерал паблик ютилитиз»
ЗПЖРО	завод по переработке жидких радиоактивных отходов
ЗПТРО	завод по переработке твердых радиоактивных отходов
ИНЕС	Международная шкала ядерных и радиологических событий
ИРИД	Международный исследовательский институт по выводу из эксплуатации ядерных объектов
КК	контроль качества
КПО	критерии приемлемости отходов
КСЭ	конструкции, системы и элементы
КЯР	Комиссия по ядерному регулированию США
МДГ	мощность дозы гамма-излучения
МОС	Министерство окружающей среды, Япония
МТ	Министерство транспорта США
МЭ	Министерство энергетики США
НАО	низкоактивные отходы
НБК	новый безопасный конфайнмент
НИОКР	научно-исследовательские и опытно-конструкторские работы
НРА	неразрушающий анализ
НСАО	низко- и среднеактивные отходы
ОБЯЭЯ	Организация по безопасности ядерной энергетики Японии
ОГ	оперативная группа
ОК	обеспечение качества
ОКЖО	очень короткоживущие отходы
ОНАО	очень низкоактивные отходы
ОО	освобожденные отходы
ОРД	особый район дезактивации
ПВЛРО	пункт временной локализации радиоактивных отходов
ПЗРО	пункт захоронения радиоактивных отходов
ПКОТРО	промышленный комплекс по обращению с твердыми радиоактивными отходами
ПОМ	План осуществления мероприятий на объекте «Укрытие»
ППП	приповерхностный пункт
ПХ	промежуточное хранилище
РА	разрушающий анализ
РАО	радиоактивные отходы
РБМК	реактор большой мощности канального типа
САКТО	сухие активированные отходы

CAO	среднеактивные отходы
СИЗ	средства индивидуальной защиты
СОПХТРО	специально оборудованное приповерхностное хранилище
СОТ	система организации требований
СФНА	Свод федеральных нормативных актов
ТЕПКО	Токийская электроэнергетическая компания
ТМА	«Три-Майл-Айленд»
ТРУ	трансурановый
TSM	топливосодержащий материал
УАЭСК	Управление по атомной энергии Соединенного Королевства
УИТРО	установка по извлечению твердых радиоактивных отходов
УЯР	Управление по ядерному регулированию, Япония
ХТРО	хранилище твердых радиоактивных отходов
ЦКД	цель в области качества данных
ЭГ	электростатический газоочиститель
ЭПРИ	Научно-исследовательский электроэнергетический институт
ЯААЭ	Японское агентство по атомной энергии
ALPS	усовершенствованная система водоочистки
CIRES	Промышленный центр сбора, хранения и захоронения
CODIRPA	Руководящий комитет по управлению действиями на послеварийной стадии ядерной аварии или радиологической аварийной ситуации
CZT	кадмий-цинковый теллурид
ERDF	Центр захоронения отходов для восстановления окружающей среды
GEND	«Дженерал паблик ютилитиз», Научно-исследовательский электроэнергетический институт, Комиссия по ядерному регулированию США и Министерство энергетики США
GPS	спутник глобальной системы определения местоположения
GTCC	выше класса С
ISOCS	система измерения объектов на местах
SAFSTOR	безопасная консервация
SARRY	упрощенная активная система извлечения и восстановления воды
SDS	установка обессоливания воды погружного типа
USFCRFC	Украинское общество дружбы и культурных связей с зарубежными странами
WIPP	экспериментальная установка по изоляции отходов

СОСТАВИТЕЛИ И РЕЦЕНЗЕНТЫ

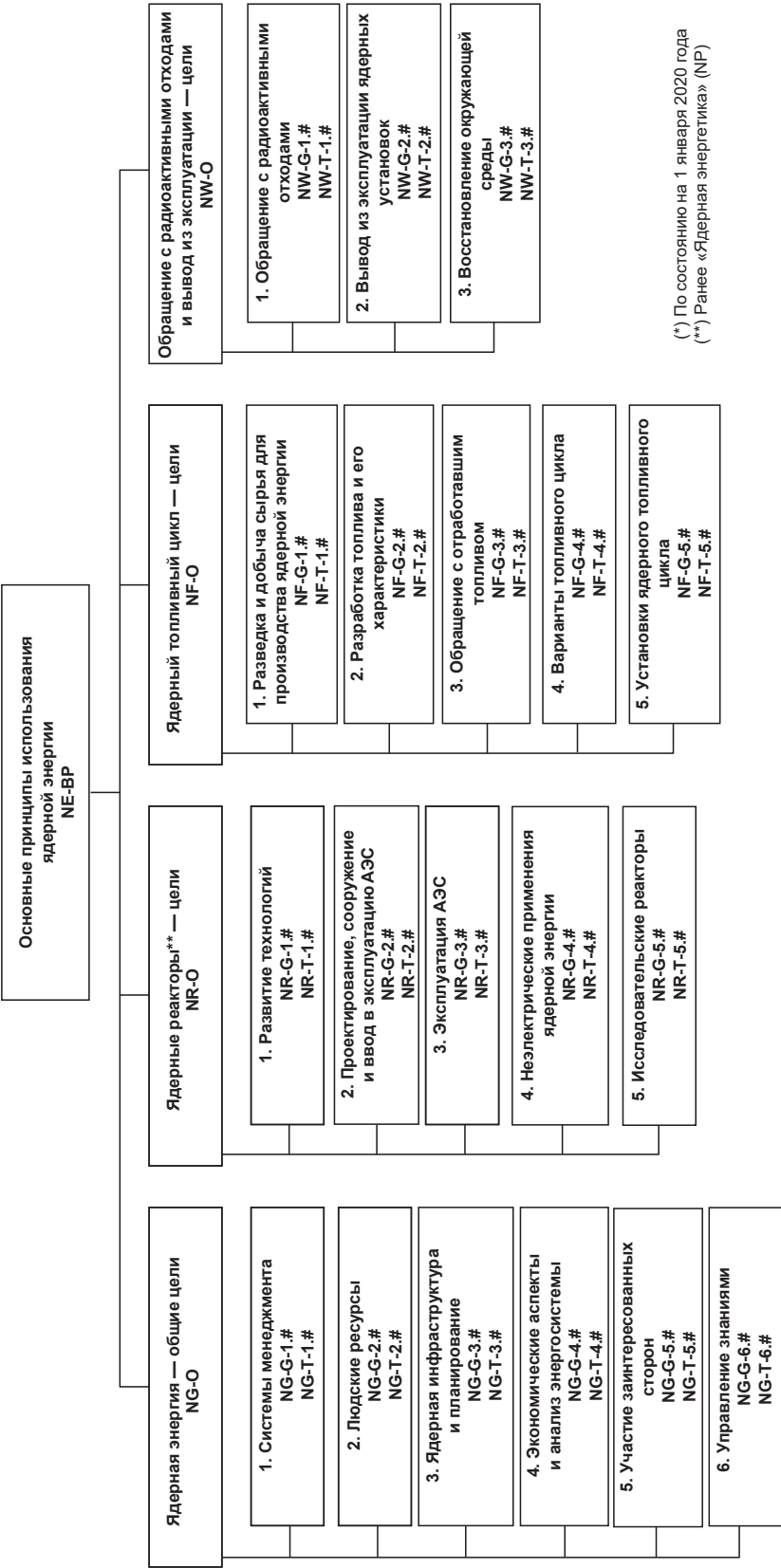
Ashida, T.	Японское агентство по атомной энергии, Япония
Barboa, J.	Соединенные Штаты Америки
Beckman, D.	«Бекман энд ассошиэйтс», Соединенные Штаты Америки
Бондарьков, М.	Государственное агентство Украины по управлению зоной отчуждения, Украина
Brennecke, P.	Германия
Chapman, N.	Ирландия
Clifford, J.	«Селлафилд, лтд.», Соединенное Королевство
Drace, Z.	Международное агентство по атомной энергии
Dragolici, F.	Международное агентство по атомной энергии
Durham, L.A.	Отдел экологических наук, Аргоннская национальная лаборатория, США
Dutzer, M.	«Андра», Франция
Garamszeghy, M.	Организация по обращению с ядерными отходами, Канада
Green, T.	«Нувиа, лимитед», Соединенное Королевство
Grogan, H.	«Каскэйд сайентифик, инк.», Соединенные Штаты Америки
Inoue, T.	Центральный научно-исследовательский институт электроэнергетической промышленности, Япония
Кучинский, В.	ГСП «Чернобыльская АЭС», Украина
Kumalo, Y.	Международное агентство по атомной энергии
Marra, J.	Саванна-Риверская национальная лаборатория, Министерство энергетики США, США
Masaki, K.	Токийская электроэнергетическая компания
Mayer, S.J.	Международное агентство по атомной энергии
Miller, B.	АМЕК, Соединенное Королевство
Ojovan, M.I.	Международное агентство по атомной энергии
Ormai, P.	Международное агентство по атомной энергии
Phathanapirom, U.	Международное агентство по атомной энергии
Pillette-Cousin, L.	«Андра», Франция
Poisson, R.	«Андра», Франция
Prevost, T.	АРЕВА, Франция

Robbins, R.A.	Международное агентство по атомной энергии
Romano, S.	«Американ экологичи груп», США
Samanta, S.K.	Международное агентство по атомной энергии
Schultheisz, D.	Агентство США по охране окружающей среды, Соединенные Штаты Америки
Shimba-Yamada, M.	Международное агентство по атомной энергии
Сизов, А.	Институт проблем безопасности АЭС, Национальная академия наук, Украина
Скрипов, М.	Государственное специализированное предприятие «Чернобыльская АЭС», Украина
Solente, N.	«Андра», Франция
Токаревский, В.	Институт проблем Чернобыля, Украина
Tsurikov, N.	«Калитрикс консалтинг, пропрайетари лтд.», Австралия
Walsch, C.	«Селлафилд, лтд.»
Yagi, M.	Международное агентство по атомной энергии
Yamada, K.	Национальный институт экологических исследований, Япония

Технические совещания и совещания консультантов

Вена, Австрия: 14–17 мая 2013 года, 18–21 ноября 2013 года, 25–28 ноября 2013 года,
23–27 июня 2014 года, 9–13 марта 2015 года, 24–28 августа 2015 года,
18–21 июля 2017 года, 27–31 мая 2019 года
Вашингтон, округ Колумбия: 2–6 марта 2015 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



МЕЖДУНАРОДНОЕ АГЕНТСТВО ПО АТОМНОЙ ЭНЕРГИИ
ВЕНА