

Серия изданий МАГАТЭ по ядерной энергии

№ NF-T-3.3

Основные
принципы

Цели

Руководства

Технические
доклады

**Хранение
отработавшего
топлива до отправки
на переработку или
захоронение**



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**.

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.

ХРАНЕНИЕ ОТРАБОТАВШЕГО
ТОПЛИВА ДО ОТПРАВКИ НА
ПЕРЕРАБОТКУ ИЛИ ЗАХОРОНЕНИЕ

Членами Международного агентства по атомной энергии являются следующие государства:

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

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

СЕРИЯ ИЗДАНИЙ МАГАТЭ ПО ЯДЕРНОЙ ЭНЕРГИИ, № NF-T-3.3

ХРАНЕНИЕ ОТРАБОТАВШЕГО ТОПЛИВА ДО ОТПРАВКИ НА ПЕРЕРАБОТКУ ИЛИ ЗАХОРОНЕНИЕ

МЕЖДУНАРОДНОЕ АГЕНТСТВО ПО АТОМНОЙ ЭНЕРГИИ,
ВЕНА, 2021

УВЕДОМЛЕНИЕ ОБ АВТОРСКОМ ПРАВЕ

Все научные и технические публикации МАГАТЭ защищены положениями Всемирной конвенции об авторском праве, принятой в 1952 году (Берн) и пересмотренной в 1972 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, должно быть получено разрешение, которое обычно оформляется соглашениями типа роялти. Предложения о некоммерческом воспроизведении и переводе приветствуются и рассматриваются в каждом случае в отдельности. Вопросы следует направлять в Издательскую секцию МАГАТЭ по адресу:

Группа маркетинга и сбыта (Marketing and Sales Unit)
Издательская секция
Международное агентство по атомной энергии
Венский международный центр,
а/я 100,
А1400 Вена, Австрия
Факс: +43 1 26007 22529
Тел.: +43 1 2600 22417
Эл. почта: sales.publications@iaea.org
<https://www.iaea.org/ru/publikacii>

© МАГАТЭ, 2021 год
Отпечатано МАГАТЭ в Австрии
Декабрь 2021 года
STI/PUB/1846

ХРАНЕНИЕ ОТРАБОТАВШЕГО ТОПЛИВА ДО
ОТПРАВКИ НА ПЕРЕРАБОТКУ ИЛИ ЗАХОРОНЕНИЕ
МАГАТЭ, 2021 ГОД
STI/PUB/1846
ISBN 978–92–0–428720–2 (paperback : alk. paper, печатный формат)
ISBN 978–92–0–428820–9 (формат pdf)
ISSN 2664–4886

ПРЕДИСЛОВИЕ

Главной целью МАГАТЭ является достижение «более скорого и широкого использования атомной энергии для поддержания мира, здоровья и благосостояния во всем мире». Одним из путей достижения этой цели является публикация различных серий документов по техническим вопросам. Две из них — это Серия изданий МАГАТЭ по ядерной энергии и Серия норм безопасности МАГАТЭ.

Согласно статье III.A.6 Устава МАГАТЭ, издания Серии норм безопасности устанавливают «нормы безопасности для охраны здоровья и сведения к минимуму опасностей для жизни и имущества». Публикуемые нормы безопасности включают Основы безопасности, Требования безопасности и Руководства по безопасности. Эти документы составлены в основном в нормативном стиле и являются обязательными для применения МАГАТЭ в его собственных программах. Основными пользователями являются регулирующие органы в государствах-членах и другие национальные компетентные органы.

Серия изданий МАГАТЭ по ядерной энергии состоит из докладов, имеющих целью способствовать и содействовать НИОКР в области ядерной энергии и ее мирному применению. Эти доклады включают практические примеры для использования, в частности, владельцами и операторами энергопредприятий в государствах-членах, организациями-исполнителями, научными работниками и государственными должностными лицами. Такая информация представлена в руководствах, докладах о состоянии дел и достижениях в области технологий, а также в примерах наилучшей практики использования ядерной энергии в мирных целях, подготовленных на основе представленных международными экспертами материалов. Серия изданий МАГАТЭ по ядерной энергии дополняет Серию норм безопасности МАГАТЭ.

Отсутствие достаточной политической воли и общественной поддержки создает серьезные проблемы для достижения конечной точки в процессе обращения с отработавшим топливом (ООТ) — такой как переработка или захоронение, — что обуславливает необходимость увеличения сроков хранения. С учетом нынешних и прогнозируемых показателей использования ядерной энергетики наряду с прогнозами относительно мощностей по переработке и захоронению отработавшего топлива ожидается, что периоды хранения отработавшего топлива могут быть продлены на несколько десятилетий.

Крайне важно, чтобы государства приняли необходимые политические решения по определению и достижению конечной точки в процессе ООТ, что является залогом ответственного и устойчивого использования ядерной энергетики. Это может устранить излишние риски, в том числе связанные с упаковкой отработавшего топлива в отсутствие приемлемых критериев для переработки или захоронения, а также излишние затраты, связанные с сохранением ведомственного контроля и программ управления старением в течение более длительных периодов хранения.

Тем временем необходимо обеспечивать безопасное, надежное и эффективное хранение отработавшего топлива при всех прогнозируемых условиях. В настоящей публикации рассматриваются подходы к достижению этой цели с учетом нынешних неизвестных сроков хранения. В ней разбираются вопросы и проблемы, имеющие отношение к разработке и реализации схем, политики, стратегий и программ, которые охватили бы весь спектр будущих сценариев до появления достаточных мощностей по переработке или захоронению. В ней не ставится цель содействовать продлению сроков хранения отработавшего топлива или поощрять такое продление.

Настоящая публикация призвана помочь ядерной отрасли донести мысль о важности ясной, заслуживающей доверия и устойчивой стратегии ООТ, и в ней руководству отрасли предлагается изучить разные подходы, которые могут оказаться полезными для устранения неопределенности, вызванной неизвестной длительностью хранения и неопределенной конечной точкой процесса ООТ. Настоящая публикация рассчитана на государства, в которых эксплуатируются или эксплуатировались энергетические реакторы и исследовательские, материаловедческие реакторы или реакторы по производству изотопов, а также на страны, изучающие возможность создания

ядерной энергетики. В ней признается, что конкретные решения будут разными в зависимости от потребностей государства и что описанные в ней подходы будут соответствующим образом адаптироваться.

МАГАТЭ хотело бы выразить признательность всем, кто принял участие в подготовке данной публикации, и, в частности, Б. Карлсену (Соединенные Штаты Америки). Сотрудниками МАГАТЭ, ответственными за настоящую публикацию, являются А. Бевильаква и А. Гонсалес-Эспартеро из Отдела ядерного топливного цикла и технологии обращения с отходами.

РЕДАКЦИОННОЕ ПРИМЕЧАНИЕ

Настоящая публикация был отредактирован редакционным персоналом МАГАТЭ в той степени, в какой это было сочтено необходимым для удобства читателей. В нем 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

РЕЗЮМЕ.....	1
1. ВВЕДЕНИЕ	2
1.1. Общие сведения	2
1.2. Цель.....	3
1.3. Сфера охвата	3
1.4. Структура.....	3
2. ОБЩИЙ ОБЗОР	4
2.1. Поэтапное увеличение сроков хранения отработавшего топлива	4
2.2. Безопасность хранения отработавшего топлива	5
2.2.1. Контеймент	5
2.2.2. Подкритичность	5
2.2.3. Отвод остаточного тепловыделения	6
2.2.4. Экранирование	6
2.2.5. Возможность извлечения и перевозки	6
2.2.6. Активные и пассивные системы	6
2.3. Устойчивость хранения отработавшего топлива	7
3. ПРОГРАММЫ УПРАВЛЕНИЯ СТАРЕНИЕМ	8
3.1. Управление старением применительно к хранению отработавшего топлива	8
3.1.1. Планирование	9
3.1.2. Действие	9
3.1.3. Проверка	9
3.1.4. Корректировка	10
3.2. Ликвидация пробелов в данных о старении материалов при хранении отработавшего топлива	11
4. ПРОЕКТИРОВАНИЕ И РАЗМЕЩЕНИЕ БУДУЩИХ СИСТЕМ ХРАНЕНИЯ ОТРАБОТАВШЕГО ТОПЛИВА	12
4.1. Основы проектирования систем	13
4.1.1. Соображения, касающиеся управления старением и продления лицензий	14
4.1.2. Соображения, касающиеся гарантий и физической безопасности	15
4.2. Отличия между мокрыми и сухими хранилищами	16
4.3. Централизованные хранилища отработавшего топлива	17
4.4. Соображения, касающиеся выбора площадки	18
5. СХЕМЫ ХРАНЕНИЯ ОТРАБОТАВШЕГО ТОПЛИВА	19
5.1. Канистры и контейнеры	20
5.2. Отдельные сборки	21

6.	СООБРАЖЕНИЯ, КАСАЮЩИЕСЯ РЕГУЛИРОВАНИЯ	22
6.1.	Роль регулирующих органов	22
6.1.1.	Исследовательская деятельность регулирующих органов	23
6.1.2.	Лицензирование, инспектирование и надзор	23
6.1.3.	Информационная работа с общественностью	24
6.2.	Регулирующая основа продления периодов хранения	24
6.3.	Риск-ориентированное и основанное на результатах эксплуатации регулирование	26
7.	СООБРАЖЕНИЯ, КАСАЮЩИЕСЯ ПОЛИТИКИ	28
7.1.	Ясно определенная конечная точка	28
7.2.	Ясная ответственность и подотчетность за отработавшее топливо	29
7.3.	Устойчивое обращение с отработавшим топливом	30
7.4.	Многонациональные подходы	30
7.5.	Стабильная долгосрочная политика	30
7.6.	Ставка на краткосрочные решения	32
8.	ДРУГИЕ КЛЮЧЕВЫЕ СООБРАЖЕНИЯ	33
8.1.	Управление взаимодействиями на протяжении топливного цикла	33
8.2.	Доверие общества	35
8.2.1.	Дилемма в связи с доверием общества	35
8.2.2.	Гипотетические риски в противовес гипотетическим выгодам	36
8.2.3.	Социальная приемлемость и продление периодов хранения отработавшего топлива	37
8.3.	Ведомственный контроль.	38
	СПРАВОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ	41
	БИБЛИОГРАФИЯ	45
	СОКРАЩЕНИЯ	51
	СОСТАВИТЕЛИ И РЕЦЕНЗЕНТЫ	53
	СТРУКТУРА СЕРИИ ИЗДАНИЙ МАГАТЭ ПО ЯДЕРНОЙ ЭНЕРГИИ	54

РЕЗЮМЕ

Хранение отработавшего топлива намного дольше первоначально запланированного срока — это повседневная реальность. В настоящей публикации предлагается ряд идей и подходов, которые могут быть изучены в свете проблемы растущих сроков хранения топлива. Ее задача — повысить осведомленность о проблеме, стимулировать диалог и сформулировать идеи относительно обращения с отработавшим топливом. Основные идеи состоят в следующем.

- Вследствие задержек с переработкой или захоронением хранение отработавшего топлива может затянуться на 100 и более лет. Безопасное, надежное и эффективное хранение отработавшего топлива позволяет решить проблему разрушения топлива и одновременно сохранить будущие варианты топливного цикла.
- В рамках программ управления старением применяются инженерно-технические и ремонтно-эксплуатационные меры для поддержания безопасности при хранении, будущем обращении и перевозке.
- Выбор площадки и дизайн установок и оборудования может значительно уменьшить риски и затраты, связанные с хранением отработавшего топлива в течение более длительных периодов.
- Могут выбираться различные схемы хранения отработавшего топлива — с учетом неопределенных сроков хранения, для более эффективного управления старением и для обеспечения необходимой гибкости ввиду неопределенных будущих конечных точек, таких как переработка или захоронение.
- На основе принципа неоднократного продления лицензии может быть разработана регулирующая основа, обеспечивающая безопасное хранение топлива вплоть до достижения приемлемой конечной точки.
- Безопасность может быть гарантирована за счет постоянного принятия мер по экранированию, контейменту, отводу остаточного тепловыделения и управлению критичностью. Преодоление трудностей, связанных с общественными взглядами и ценностями, а также с политическими системами, оказалось более сложной задачей в контексте обращения с отработавшим топливом, чем поддержание безопасности и физической безопасности или решение технических и экономических вопросов.
- Устойчивое обращение с отработавшим топливом требует выработки политики и стратегий, задающих ясное, последовательное и стабильное направление для будущих действий, поскольку именно они обуславливают необходимость хранения отработавшего топлива и определяют возможные пути и сроки достижения приемлемой конечной точки. Если государства не решат проблему переработки и захоронения отработавшего топлива в достаточном масштабе для того, чтобы охватить весь объем отработавшего топлива, конечной точкой де-факто станет хранение в течение все более длительных периодов, которое считается несовместимым с обязанностью защищать здоровье людей и окружающую среду.

Эффективный процесс периодического продления лицензий может обеспечить эффективное управление старением и надежный ведомственный контроль. Таким образом, отработавшее топливо может безопасно и надежно храниться столько, сколько это необходимо, до его отправки на переработку или захоронение. Однако риски и затраты, связанные с хранением растущих объемов отработавшего топлива, будут и далее возрастать, и в отсутствие конечной точки это в итоге превратится в серьезное бремя для общества.

1. ВВЕДЕНИЕ

1.1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Ядерный топливный цикл включает в себя все операции, связанные с производством ядерной энергии, — от разведки месторождений и добычи урановой руды до изготовления ядерного топлива, предназначенного для производства электроэнергии, — и завершается тогда, когда ядерное топливо или высокоактивные отходы (ВАО), полученные в результате переработки, достигают приемлемой конечной точки (см. [1–4]). Конечная точка, считающаяся допустимой в настоящее время, — это безопасное помещение отработавшего топлива и ВАО под землю в подходящее геологическое хранилище. По всему миру с атомных электростанций в 30 государствах — членах МАГАТЭ выгружается около 10 000 тТМ отработавшего топлива (см. рис. 1), и лишь считанные государства-члены перерабатывают отработавшее топливо, располагая суммарными мощностями для переработки 4800 тТМ в год (причем не все эти мощности находятся в строю) [5]. Ввиду растущего спроса на чистую и надежную энергию ряд государств обязались расширить свои ядерные мощности, тем самым еще больше увеличивая объем помещаемого на хранение отработавшего топлива, что ставит на повестку дня необходимость определения и реализации конечной точки для отработавшего топлива¹ (т.е. переработки или захоронения).

Одни государства-члены отправляют отработавшее топливо на захоронение, а другие перерабатывают его для извлечения топливного материала. Изменение политики в некоторых государствах ведет и к изменению окончательной судьбы такого топлива. Пока национальная политика не будет определена и введена в действие, находящееся на хранении отработавшее топливо не может быть отправлено на переработку или захоронение. Поскольку создание в мире достаточных мощностей по переработке и захоронению — это дело даже не ближайшего десятилетия, отработавшее топливо и ВАО будут и далее накапливаться в хранилищах, а сроки действия лицензий хранилищ отработавшего ядерного топлива будет необходимо продлевать, быть может, неоднократно. Хотя вопросы хранения ВАО выходят за рамки данной публикации, многие из описанных в ней проблем актуальны и для них.

Пунктирными линиями на рис. 1 показаны ограничения потоков, которые ведут к нарастанию объемов хранящегося топлива. Государства могут оценивать вместимость хранилищ отработавшего топлива и длительность хранения, подменяя соответствующие значения массового расхода и учитывая мощность, прогнозируемую дату начала операций по переработке и захоронению отработавшего топлива и уровень доверия к ним. Неопределенность со сроками начала операций по глубокому геологическому захоронению означает, что даже тем государствам, которые решили отказаться от ядерной энергетики, придется решать проблемы утилизации имеющихся объемов отработавшего топлива в течение периодов, которые не могут быть достоверно определены.

Конкретная конечная точка, такая как переработка или захоронение, зависит от будущего финансирования, законодательства, лицензирования и других условий, которые невозможно с уверенностью спрогнозировать. В настоящей публикации рассматривается вопрос о том, каким образом эту неопределенность можно учесть при проектировании, лицензировании, в стратегии обращения и при принятии стратегических решений.

¹ Конечная точка определяется как состояние радиоактивного материала на конечной стадии обращения с ним, на которой материал является пассивно безопасным и не нуждается в ведомственном контроле.

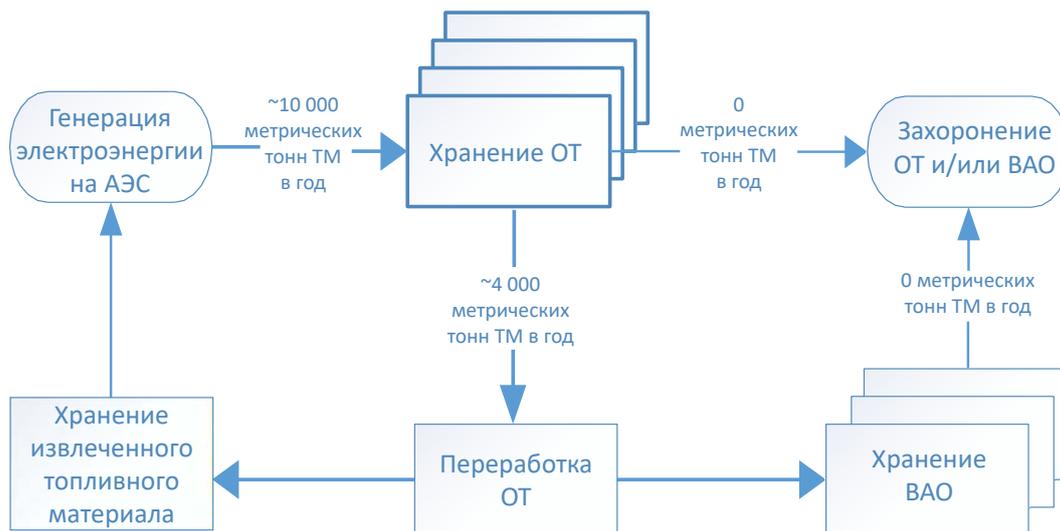


РИС. 1. Хранение отработавшего топлива

1.2. ЦЕЛЬ

В настоящей публикации приводится информация для ключевых руководителей и административных работников, ответственных за разработку стратегий и программ обращения с отработавшим топливом (ООТ), и излагаются технические и нетехнические соображения, которые требуется учитывать при продлении сроков хранения. В ней признается неопределенность, связанная с установлением длительности периодов хранения отработавшего топлива, и она помогает выбрать варианты и компромиссы, имеющие отношение к соответствующим факторам технической и нормативной неопределенности.

1.3. СФЕРА ОХВАТА

В публикации освещается ряд тем, считающихся важными с точки зрения безопасного, надежного и эффективного продления сроков хранения отработавшего топлива, и описываются возможные способы предотвращения или уменьшения ненужных рисков и затрат. Хотя настоящая публикация посвящена главным образом хранению отработавшего топлива ядерных энергетических реакторов, находящихся в промышленной эксплуатации, описанные в ней принципы применимы в равной степени и к отработавшему топливу исследовательских реакторов, материаловедческих реакторов и реакторов по производству изотопов. Вопросы хранения ВАО выходят за рамки данной публикации, но многие проблемы актуальны и для них. Данные здесь руководящие указания с описанием надлежащей практики отражают мнение экспертов и не являются рекомендациями, сформулированными на основе консенсуса государствами-членами.

1.4. СТРУКТУРА

В разделе 2 настоящей публикации содержится общий обзор вопросов безопасности хранения отработавшего топлива и устойчивости ООТ. В разделе 3 говорится о программах управления старением и ликвидации пробелов в знаниях. В разделе 4 излагаются соображения, касающиеся проектирования и размещения будущих систем хранения отработавшего

топлива, а в разделе 5 описываются схемы хранения отработавшего топлива. В разделах 6 и 7 рассматриваются соответственно нормативные и политические соображения, а заключительный раздел 8 посвящен прочим ключевым соображениям.

2. ОБЩИЙ ОБЗОР

Допущения в отношении имеющихся мощностей для переработки и захоронения отработавшего топлива, которые делались в прошлом, нередко оказывались неверными, следствием чего становились упущенные возможности для реализации политики и стратегий. Например, системы сухого хранения в контейнерах (ССХК) были первоначально задуманы для того, чтобы высвободить место в приреакторных бассейнах выдержки отработавшего топлива и обеспечить хранение отработавшего топлива в течение максимум 20 лет до тех пор, пока не появятся достаточные мощности для переработки или глубокого геологического захоронения. Сегодня в мире эксплуатируются сотни ССХК, и они будут использоваться намного дольше первоначально запланированного срока службы.

Ввиду продолжающихся общественных и политических дебатов вокруг ядерной энергетики и размещения и лицензирования глубинных геологических хранилищ периоды хранения и прогнозируемые объемы отработавшего топлива не могут быть достоверно определены. Для того чтобы преодолеть эту неопределенность, нужна уверенность в том, что отработавшее топливо может безопасно храниться до появления достаточных мощностей по переработке или глубокому геологическому захоронению отработавшего топлива. В итоге многие государства-члены вновь берутся за изучение общественных, политических, технических и нормативных вопросов, связанных с увеличением периодов хранения (см. [6–8]).

В работе мостов, плотин и других общественных сооружений и оборудования могут возникнуть сбои, имеющие серьезные последствия для жизни людей и имущества. Однако несмотря на эту неопределенность, данные риски все же принимаются в расчет. Общество осознает и ценит достоинства таких сооружений и достаточно уверено в том, что соответствующие проблемы безопасности могут быть учтены и устранены прежде, чем произойдет катастрофа. Основное оборудование проходит техническое обслуживание и в определенный момент выводится из эксплуатации и заменяется прежде, чем оно даст сбой. Аналогичным образом, вопрос состоит не в том, может ли отработавшее топливо безопасно храниться, а в том, что необходимо для обеспечения достаточной уверенности в том, что проблема деградации в результате старения будет принята во внимание и устранена для предупреждения недопустимых последствий с точки зрения безопасности независимо от длительности хранения. Основы безопасности и стратегии ООТ не должны зависеть от будущего, о котором нельзя сказать ничего определенного. Для обеспечения безопасного хранения отработавшего топлива независимо от сроков могут быть разработаны стратегии и создана соответствующая инфраструктура. Риски и факторы неопределенности, связанные с увеличением сроков хранения отработавшего топлива, никогда не могут быть полностью устранены. Их, однако, можно регулировать для обеспечения того, чтобы вероятность непредвиденного события была достаточно мала и его последствия были в достаточной степени смягчены, чтобы снизить риск до допустимого уровня.

2.1. ПОЭТАПНОЕ УВЕЛИЧЕНИЕ СРОКОВ ХРАНЕНИЯ ОТРАБОТАВШЕГО ТОПЛИВА

Традиционно со словами «хранение отработавшего топлива» использовались такие выражения, как краткосрочное хранение, временное хранение, долгосрочное хранение, увеличенные сроки хранения и сверхдлительное хранение. В каждый из этих терминов

заложена мысль о периоде хранения. Вопрос о продлении хранения отработавшего топлива на дополнительный, фиксированный лицензионный период может решаться без предварительного знания о том, сколько последующих периодов может потребоваться до тех пор, пока отработавшее топливо не будет отправлено на переработку или захоронение.

Потенциальные опасности, доступные технологии и применимые требования могут меняться с течением времени [9]. Разработав технический и нормативный подход, допускающий последовательные продления настолько, насколько это потребуется, можно избежать необходимости прогнозировать или определять конечную дату периода хранения [9]. Таким образом, сфера охвата данной публикации не ограничена никаким конкретным сроком хранения. Напротив, неопределенность с периодами хранения устраняется путем поэтапного продления хранения отработавшего топлива до тех пор, пока не станет ясна конечная точка — переработка или захоронение.

Теоретически количество продлений лицензии не должно ограничиваться, пока демонстрируется соблюдение требований. Однако на практике накопившийся объем затрат на соблюдение требований (т.е. на техническое обслуживание и модернизацию) может в конечном счете дать стимул к переходу на новые системы хранения [9].

2.2. БЕЗОПАСНОСТЬ ХРАНЕНИЯ ОТРАБОТАВШЕГО ТОПЛИВА

Отработавшее топливо безопасно хранится на протяжении более 50 лет, и необходимые принципы безопасности хорошо понимаются. Новые проблемы могут выявляться и устраняться прежде, чем они повлияют на безопасность. В документе Серии норм безопасности МАГАТЭ № SSG-15 «Storage of Spent Nuclear Fuel» («Хранение отработавшего ядерного топлива») [10] даются руководящие указания по обеспечению безопасности хранения отработавшего топлива [10]. Как указывается в пункте 1.3 документа SSG-15 [10], «безопасность хранилища отработавшего топлива и находящегося в нем отработавшего топлива обеспечивается: надлежащим контейнментом соответствующих радионуклидов, безопасностью по критичности, отводом тепловыделения, экранированием радиации и возможностью извлечения» при всех штатных и нештатных ситуациях и проектных авариях, а также учетом запроектных аварий. Хотя будущие потребности невозможно с уверенностью спрогнозировать, описанные ниже основополагающие функции безопасности хранения отработавшего топлива не изменятся с увеличением сроков хранения, и поэтому разумно предположить, что они лягут в основу любых будущих положений, регулирующих безопасность хранения отработавшего топлива [9].

2.2.1. Контейнмент

Контейнмент предупреждает выброс радиоактивного материала в окружающую среду и обеспечивается оболочкой отработавшего топлива и системой хранения (например, сварной или скрепленной болтами канистрой или контейнером). По мере удлинения сроков хранения увеличивается и вероятность деградации материалов. В результате может возникнуть необходимость передачи функций контейнмента компонентам, которые проще инспектировать и ремонтировать.

2.2.2. Подкритичность

Подкритичность исключает возможность наступления незапланированного события, вызванного критичностью. Обеспечение подкритичности часто основывается на контроле геометрии. Однако поддержание геометрии отработавшего топлива в течение более длительных сроков хранения может оказаться более сложной задачей ввиду деградации материалов, негативно влияющей на целостность конструкции отработавшего топлива и компонентов системы хранения

(например, чехла, поглотителей нейтронов, канистр или контейнеров). Функции управления критичностью могут быть переданы другим конструкциям, системам и элементам (КСЭ), которые проще гарантировать, инспектировать и обслуживать. К ним относится регулирование содержания делящихся изотопов, ограничение геометрии, включение поглотителей нейтронов и исключение замедлителей.

2.2.3. Отвод остаточного тепловыделения

Отвод остаточного тепловыделения исключает нарушение геометрии, которое может уменьшить запас безопасности других функций безопасности. Температурные пределы не допускают нарушения целостности оболочки и других КСЭ, важных с точки зрения безопасности. Целостность оболочки важна для сохранения геометрии отработавшей тепловыделяющей сборки (ОТВС), которая может повлиять на запас безопасности по подкритичности, экранирование и контеймент. Эффективный отвод остаточного тепловыделения важен по той причине, что многие явления, негативно влияющие на целостность отработавшего топлива, возникают при высоких температурах. Отвод остаточного тепловыделения при увеличенных сроках хранения может быть не столь сложной задачей, поскольку отработавшее топливо остывает с течением времени. Низкие температуры, с другой стороны, могут стать проблемой при перевозке после длительного хранения ввиду потенциального охрупчивания оболочки.

2.2.4. Экранирование

Экранирование гарантирует удержание радиационного облучения в безопасных пределах и обеспечивается системой хранения. Радиоактивный распад отработавшего топлива и вызванная этим необходимость экранирования будут уменьшаться по мере увеличения длительности хранения.

2.2.5. Возможность извлечения и перевозки

Возможность извлечения не является необходимым условием поддержания безопасности в том же смысле, что и четыре предыдущих функции безопасности. Хотя безопасность может быть достигнута и без сохранения возможности извлечения, извлечение ОТВС или компонентов системы хранения, содержащей отработавшее топливо, после его хранения может оказаться необходимым для перехода к последующим стадиям ООТ. Если будущие стадии ООТ потребуют вскрытия упаковки и манипулирования с ОТВС, их неготовность к извлечению может повлечь за собой дополнительные затраты. Таким образом, сохранение возможности извлечения важно в той мере, в какой оно может минимизировать стоимость и сложность реализации будущих вариантов ООТ.

Возможность перевозки, обычно не включаемая в число ключевых функций безопасности, тем не менее должна также сохраняться в течение всего периода хранения отработавшего топлива для того, чтобы отработавшее топливо могло быть перемещено на пункт переработки или захоронения — или даже в новое хранилище, с возможностью инспектирования и переупаковки, если это потребуется. Из-за растущей вероятности деградации материалов сохранение возможности извлечения и перевозки может стать более сложной задачей при более длительных периодах хранения.

2.2.6. Активные и пассивные системы

Функции безопасности могут выполняться активными или пассивными системами. Пассивные системы не требуют внешних ресурсов, таких как электропитание и приводные механизмы, для задействования их функций, но время от времени для проверки работоспособности

пассивных функций может потребоваться некоторое вмешательство человека (например, чтобы убедиться в отсутствии закупорки впускного/выпускного клапана теплоносителя). По мере увеличения периодов хранения отработавшего топлива пассивные системы контроля приобретают все большее значение ввиду своей повышенной надежности, более низких операционных расходов и уменьшения потребности в ведомственном контроле [9].

Хотя принципы, необходимые для обеспечения безопасного хранения отработавшего топлива в настоящее время и в течение более длительных периодов, хорошо понимаются, существующие системы хранения отработавшего топлива могли не быть рассчитаны на периоды времени, о которых сегодня идет речь, и в анализе безопасности могли не учитываться периоды времени, о которых сегодня идет речь. В настоящей публикации рассматривается вопрос о том, как сохранить актуальность этих принципов безопасности с увеличением сроков службы существующих систем хранения отработавшего топлива и как улучшить эффективность будущих систем, предусмотрев в будущей проектной документации и регулирующей основе возможность длительного хранения.

2.3. УСТОЙЧИВОСТЬ ХРАНЕНИЯ ОТРАБОТАВШЕГО ТОПЛИВА

В документе SSG-15 [10] краткосрочное хранение определяется как период, длящийся примерно 50 лет, а долгосрочное хранение — как период, превышающий 50 лет и имеющий конкретную конечную точку (переработку или захоронение). В документе SSG-15 [10] указывается, что долгосрочное хранение не должно длиться где-то более 100 лет, что считается достаточным сроком для определения будущих шагов по обращению с топливом.

МАГАТЭ сообщает, что, поскольку в настоящее время в мире нет действующих глубинных геологических хранилищ отработавшего топлива или ВАО, объемы хранящегося отработавшего топлива растут, и значительную часть отработавшего топлива придется хранить дольше, чем предполагалось вначале, — возможно, в течение более 100 лет [11]. Комиссия по ядерному регулированию Соединенных Штатов считает 300-летний срок хранения подходящим для характеристики и прогнозирования последствий старения и проблем управления старением в контексте более длительного хранения и перевозки [7].

Дальнейшее производство и хранение отработавшего топлива без четкого видения конкретной конечной точки не может считаться устойчивой политикой. Как указывается в пункте 1.6 документа SSG-15 [10], «хранение не может считаться окончательной формой обращения с отработавшим топливом, которое требует конкретной конечной точки, такой как переработка или захоронение, в целях обеспечения безопасности». Хранение в течение все более длительных периодов не считается совместимым с обязанностью по защите людей и окружающей среды без создания чрезмерного бремени для будущих поколений [2, 3]. Хранение по определению является временной мерой, которая предполагает сохранение отработавшего топлива с намерением извлечь его в будущем для переработки, обработки или захоронения [4, 10, 12].

Одни считают, что глубокое геологическое захоронение — это единственная общеприемлемая конечная точка для отработавшего топлива или для ВАО после их переработки. Другие полагают, что глубокое геологическое захоронение может лишить будущие поколения возможности использовать эти материалы в полезных целях. Ввиду того, что периоды хранения отработавшего топлива не могут быть точно определены, для сохранения устойчивости ООТ необходима политика, обеспечивающая, чтобы дальнейшее хранение отработавшего топлива не ложилось чрезмерным бременем на будущие поколения. Это будет возможным в том случае, если в отношении всех запасов хранящегося отработавшего топлива поколениями, которые будут пользоваться этими благами, будет создана финансовая, управленческая, техническая и регулирующая инфраструктура для безопасного хранения и достижения приемлемой конечной точки.

3. ПРОГРАММЫ УПРАВЛЕНИЯ СТАРЕНИЕМ

Как указывается в публикации Серии норм безопасности МАГАТЭ № SSG-48 «Ageing Management and Development of a Programme for Long Term Operation of Nuclear Power Plants» («Управление старением и разработка программы долгосрочной эксплуатации атомных электростанций») [13], программы управления старением обеспечивают поддержание безопасности за счет своевременного обнаружения и контроля деградации в результате старения и других состояний, которые могут поставить под угрозу будущее манипулирование и перевозку. Управление старением широко практикуется на атомных электростанциях, а также в хранилищах отработавшего топлива и касается как физического старения, так и устаревания КСЭ, связанных с безопасностью [13–17]. Периодические оценки безопасности, согласованные с регулирующим органом, призваны обеспечивать сохранение актуальности планов управления старением атомных электростанций и способствовать созданию технической основы для продления лицензий. Когда предыдущий лицензионный период подходит к концу, к продлению лицензий хранилищ отработавшего топлива применяются те же принципы и подходы. Грамотно выполняемая программа управления старением исключит возникновение незапланированных или непроанализированных состояний, которые могли бы уменьшить запас безопасности или физической безопасности либо повлечь за собой излишние затраты на проведение восстановительных мероприятий в течение более длительных периодов хранения. Информация, полученная в ходе мероприятий по управлению старением, служит отправной точкой для установления приоритетности потребностей и соответствующих целей НИОКР. Она также дает общественности и политикам общую картину происходящего для того, чтобы правильно понять соответствующие риски. В программах управления старением должны также учитываться изменения в политических и нормативных требованиях, касающихся более длительных периодов хранения.

3.1. УПРАВЛЕНИЕ СТАРЕНИЕМ ПРИМЕНИТЕЛЬНО К ХРАНЕНИЮ ОТРАБОТАВШЕГО ТОПЛИВА

Оценка последствий совокупного воздействия физического старения и устаревания оборудования — это работа, ведущаяся на постоянной основе, о чем свидетельствует адаптация цикла Деминга «планирование-действие-проверка-корректировка» к управлению старением КСЭ, видоизмененного для хранилища отработавшего ядерного топлива (см. рис. 2) [13].

В пункте 2.21 документа SSG-48 [13] указывается:

«Замкнутая петля на рис. [2] указывает на продолжение и совершенствование управления старением на основе информации о соответствующем опыте эксплуатации, результатов НИОКР и результатов самооценок и независимых экспертиз с целью содействовать решению возникающих проблем старения».

Изучение старения КСЭ исключительно важно для эффективного управления старением, и оно включает в себя следующие шаги:

- a) определение КСЭ: КСЭ, которые трудно инспектировать, ремонтировать или заменять, надлежащим образом учитываются и обозначаются в проекте и при планировании программ мониторинга и технического обслуживания;
- b) определение применимых механизмов деградации: для эффективного управления старением необходимо понимание химических, термических, механических и вызванных радиацией процессов деградации и их совокупных эффектов. Для понимания последствий и определения

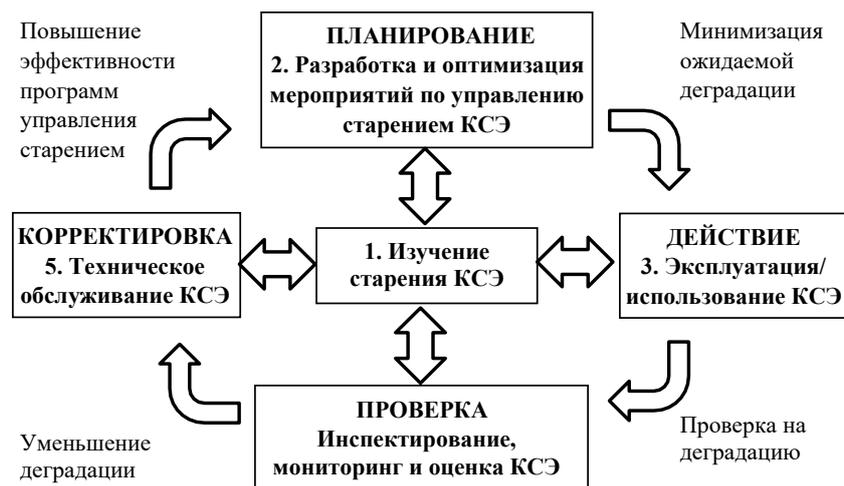


Рис. 2. Системный подход к управлению старением КСЭ для хранилища отработавшего топлива

методов для недопущения, уменьшения или смягчения процесса деградации КСЭ в течение длительной эксплуатации хранилищ отработавшего топлива могут потребоваться научные исследования, разработки и испытания;

- с) учет внешних факторов, таких как новые технологии и изменения в режиме регулирования, имеющие отношение к хранению отработавшего топлива.

3.1.1. Планирование

Деятельность под названием «планирование» на рис. 2 предполагает эффективную координацию и модификацию существующих программ, а также разработку новых программ для обеспечения того, чтобы предупреждение, обнаружение и смягчение последствий старения для КСЭ было интегрировано в планы эксплуатации, технического обслуживания, мониторинга и инспектирования хранилищ отработавшего топлива, например план осушения полости и отверстий для болтов контейнера перед загрузкой в него отработавшего топлива для уменьшения коррозии в течение более длительных периодов сухого хранения.

3.1.2. Действие

Деятельность под названием «действие» обеспечивает надлежащее функционирование КСЭ благодаря аккуратной эксплуатации в соответствии с регламентом и техническими требованиями. Эффективные программы эксплуатации и технического обслуживания обеспечивают техническое обслуживание, ремонт или замену КСЭ по мере необходимости с целью не допустить сбоя функций безопасности.

3.1.3. Проверка

Деятельность под названием «проверка» предполагает своевременное обнаружение, при помощи эффективных программ мониторинга и инспектирования, и оценку любой деградации КСЭ в течение длительных периодов хранения при условии надлежащего сохранения данных и управления ими. Для этого выполняются непрерывные измерения (мониторинг) и периодические наблюдения, измерения, испытания и осмотр (инспектирование) КСЭ. Параметры мониторинга и интервалы между инспекциями устанавливаются таким образом, чтобы деградация выявлялась

задолго до любого нарушения функции безопасности или возникновения состояния, которое могло бы поставить под угрозу будущее манипулирование и перевозку. В течение более длительных периодов хранения эти параметры и интервалы должны периодически пересматриваться с учетом, в частности, прошлых тенденций, результатов прежних инспекций и опыта работы отрасли. Периодические переоценки состояния системы хранения отработавшего топлива с учетом эволюционирующего режима регулирования и технологий также необходимы для предупреждения устаревания и обеспечения соблюдения лицензионных требований к хранению в течение всего периода хранения. Программы мониторинга включают в себя как мониторинг состояния, так и мониторинг функционирования.

При мониторинге состояния выясняется присутствие и интенсивность механизмов старения, влияющих на КСЭ. Это включает в себя проведение измерений для выяснения состояния конструкций бассейна, бедрока, бетонированных площадок и других КСЭ, таких как стеллажи, защитные покрытия, кабели и основные приборы. Некоторые КСЭ могут быть доступны для прямой инспекции только во время работы, а некоторые (например, компоненты в зоне высокой радиации) могут потребовать удаленных или других средств инспектирования и оценки [18]. В целом ОТВС и стеллажи для хранения отработавшего топлива проще осматривать, когда они находятся на мокром хранении, чем на сухом хранении.

Мониторинг функционирования необходим для проверки способности КСЭ выполнять штатные функции, например:

- a) экранирование: расхождения в динамике фактических и расчетных уровней радиации могут указывать на разрушение системы экранирования;
- b) контеймент: что касается металлических контейнеров для хранения, то проверка на утечки путем измерения давления между крышками контейнера может подтвердить, что металлическая прокладка выполняет функцию контеймента при увеличении сроков хранения. Что касается бетонных контейнеров, то функция контеймента может быть проверена путем измерения разницы в температурах между верхней и нижней частью внутренней сварной канистры с целью убедиться в присутствии газообразного гелия [19];
- c) целостность отработавшего топлива: при мокром хранении мониторинг и контроль водно-химического режима позволит обнаружить повреждение отработавшего топлива; при сухом хранении может потребоваться введение инструмента в канистру или контейнер для взятия пробы газа в полости. Мацумара и др. [20] предлагают неразрушающий метод обнаружения повреждений ОТВС путем измерения гамма-излучения от ^{85}Kr , испускаемого поврежденной ОТВС в канистре;
- d) бетонные конструкции в хранилищах отработавшего топлива: для выявления любой деградации может применяться тест при помощи молотка Шмидта.

3.1.4. Корректировка

Деятельность под названием «корректировка» предполагает оценку выявленной деградации (например, визуальный осмотр, проверку на утечки и измерение доз облучения) и разработку и осуществление надлежащего плана мер по исправлению положения или смягчению последствий с целью не допустить утраты функции безопасности. Действия могут включать в себя следующее:

- техническое обслуживание;
- ремонт компонентов;
- замену;
- модификацию дизайна;
- обновление планов эксплуатации, технического обслуживания, мониторинга и инспектирования.

На рис. 2 используется информация о соответствующем опыте эксплуатации, результаты самооценки и деятельности в сфере НИОКР, а также уроки работы отрасли для того, чтобы новые проблемы управления старением выявлялись и устранялись. Примером информационной петли на рис. 2 могут служить Соединенные Штаты Америки, где процессы старения, влияющие на ССХК, анализируются вместе с соответствующим анализом ограниченного по времени старения (АОВС), чтобы помочь лицензиатам и регулирующим органам в понимании проблем и необходимых действий, связанных с продлением лицензий на хранение отработавшего топлива в течение более длительных периодов [21]. Массив соответствующих знаний, которые могут помочь в разработке надлежащих проектов, операций и регулирующей основы, будет и далее расти и развиваться по мере старения хранилищ отработавшего топлива.

3.2. ЛИКВИДАЦИЯ ПРОБЕЛОВ В ДАННЫХ О СТАРЕНИИ МАТЕРИАЛОВ ПРИ ХРАНЕНИИ ОТРАБОТАВШЕГО ТОПЛИВА

Необходимо хорошо разбираться в процессах деградации материалов как отработавшего топлива, так и всех используемых системных компонентов, чтобы обеспечивать локализацию, экранирование, отвод остаточного тепловыделения и безопасность по критичности, а также сохранять возможность для безопасного манипулирования, извлечения и перевозки упаковок с отработавшим топливом. Что касается хранения в бассейне или сухого хранения в хранилищах камерного типа, то сюда относятся такие компоненты, как материалы облицовки бассейна и конструкции хранилища. Что касается ССХК, то главной целью является обеспечение целостности канистры или контейнера, в том числе материалов, используемых в корпусе контейнера, цапф, пробок, нейтронных экранов и чехла. Карлсен и др. [9] (см. также [15, 22–37]) указывают на следующее:

«Несмотря на существование обширной базы знаний о поведении существующих ОТВС и материалов хранилищ отработавшего топлива, можно лишь изредка встретить упоминания о периодах хранения более нескольких десятилетий... Кроме того, меняющиеся условия эксплуатации и материалы, такие как топливо с большей глубиной выгорания и новые виды топлива и оболочек, могут также потребовать проведения испытаний для изучения соответствующих процессов деградации в результате старения при длительных сроках хранения отработавшего топлива.

.....

Недавно был проведен ряд исследований для определения возможных механизмов деградации, анализа их потенциального воздействия на безопасность при увеличении сроков хранения отработавшего топлива и выявления недостающих знаний о предполагаемых технических потребностях в сравнении с существующими техническими данными... [2] Кроме того, в ряде исследований была выявлена необходимость подготовки полномасштабного проекта для демонстрации хранения и перевозки отработавшего топлива с большой глубиной выгорания как неотъемлемой части разработки технической основы».

² Выявленные пробелы были расставлены в порядке приоритетности исходя из соответствующего риска [33, 34].

Для ликвидации этих пробелов в знаниях в настоящее время предпринимается ряд национальных и международных усилий, в том числе [9]:

- проект координированных исследований МАГАТЭ по демонстрации поведения отработавшего топлива и соответствующих элементов систем хранения в условиях сверхдлительного хранения;
- программа сотрудничества в области долгосрочного хранения (ПСДХ) Научно-исследовательского электроэнергетического института;
- кампания по утилизации использованного топлива, проводимая Министерством энергетики Соединенных Штатов;
- Комитет по безопасности ядерных установок (КБЯУ) Агентства по ядерной энергии ОЭСР.

Ликвидация этих пробелов в знаниях позволит лучше моделировать и анализировать последствия старения, что создаст условия для эффективного проектирования хранилищ отработавшего топлива, эффективного управления ими и контроля над ними в течение более длительных периодов. Между тем знание этих пробелов позволяет и далее безопасно хранить отработавшее топливо благодаря учету в технических проектах соответствующих факторов неопределенности; например, нехватка знаний о поведении оболочки может быть компенсирована применением стратегий безопасности и проектных подходов, позволяющих уменьшить значение целостности оболочки или вовсе пренебречь этим фактором [38, 39].

4. ПРОЕКТИРОВАНИЕ И РАЗМЕЩЕНИЕ БУДУЩИХ СИСТЕМ ХРАНЕНИЯ ОТРАБОТАВШЕГО ТОПЛИВА

Выбор площадки и дизайн установок и оборудования может значительно уменьшить риски и затраты, связанные с хранением отработавшего топлива в течение более длительных периодов. В настоящее время отработавшее топливо хранится в: i) бассейнах; ii) сварных металлических канистрах, помещенных в бетонные бункеры, контейнеры или хранилища камерного типа; или iii) металлических контейнерах с крышками на болтах, которые обеспечивают экранирование и другие функции, необходимые для безопасности. Технологии как мокрого, так и сухого хранения используются в хранилищах, расположенных на площадке как при реакторе, так и вне его, а также в хранилищах за пределами площадки (сводную информацию см. в [40]).

При продлении периодов хранения большое внимание уделяется разработке технических основ обеспечения того, чтобы существующие элементы ОТВС и упаковки и далее выполняли свои штатные функции безопасности в период длительного хранения. Хотя это является неперенным условием для продления сроков хранения в существующих хранилищах, признание и одобрение того, что отработавшее топливо может храниться в течение нескольких лицензионных периодов, открывает возможности для установления предварительных проектных и функциональных требований, которые повысят эффективность будущих хранилищ отработавшего топлива.

Объемы отработавшего топлива, находящегося на хранении в настоящее время, — это результат работы сравнительно небольшой, но растущей отрасли на протяжении всего лишь 50 лет. С учетом сегодняшней и вероятной будущей роли ядерной энергетики нынешние объемы отработавшего топлива станут лишь малой долей тех будущих объемов, которые потребуются поместить на хранение до появления достаточных мощностей для переработки или захоронения. Таким образом, большинство хранилищ отработавшего топлива, которые потребуются, еще не спроектированы и не построены.

В будущих хранилищах отработавшего топлива могут быть реализованы проектные решения, которые облегчают продление периодов хранения и могут быть адаптированы к различным стратегиям безопасности, которые могут оказаться необходимыми в связи с изменением условий, регулирующих положений и общественных ценностей в течение длительных периодов хранения. Хотя эти проектные решения могут привести к росту первоначальных капиталовложений, расходы в течение всего жизненного цикла могут оказаться ниже тех, которые были понесены при применении более традиционных подходов, подразумевающих статичные условия в течение срока службы хранилищ отработавшего топлива. Дизайн хранилища, выбор площадки и схемы хранения отработавшего топлива могут в значительной степени повлиять на проблемы увеличения сроков хранения и связанные с этим затраты.

4.1. ОСНОВЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ СИСТЕМ

В системах хранения отработавшего топлива, предназначенных для длительного хранения, должен быть учтен более широкий круг сценариев, которые могут иметь место в течение более длительного периода. К ним относится потенциальное увеличение масштабов и вероятности возникновения проблем, вызванных природными явлениями, такими как наводнения и землетрясения, накопившиеся последствия старения и последствия изменения общественных ценностей и стратегий [9]. Таким образом, для того чтобы в проектах учитывались неопределенные периоды хранения отработавшего топлива, имеет смысл подумать об увеличении запаса безопасности ввиду потенциально более широкого круга условий, которые могут возникнуть в течение более длительного срока хранения. В проекты длительного хранения отработавшего топлива должны быть включены положения, касающиеся смягчения обусловленных старением факторов стресса для КСЭ, имеющих отношение к безопасности. Должны выбираться такие технологии упаковки и высушивания, которые уменьшили бы вероятность будущих повреждений оболочки. Схемы хранения и упаковки топлива должны облегчать работу систем инспектирования и мониторинга. Необходимо принимать в расчет такие явления, как факторы механического, термического, химического, радиационного и другого стресса, которые могут накапливаться или изменяться с течением времени. Простой и надежный дизайн систем, а также надлежащий выбор материалов и контроль качества считаются важными для долгосрочной надежности радиологических барьеров и прочих систем, от которых зависят безопасность и физическая безопасность. Должны выбираться соответствующие конструкционные материалы и обеспечиваться контроль внешних условий для того, чтобы гарантировать надлежащую устойчивость к коррозии, коррозионному растрескиванию под напряжением и другим видам деградации в результате старения. Проектные и эксплуатационные средства контроля, сокращающие частоту и масштаб переходных эксплуатационных режимов, таких как температурные циклы и ручное манипулирование, позволят еще больше уменьшить усталость и другие проблемы конструкционных материалов. В проектах сооружений для длительного хранения отработавшего топлива должны также учитываться проблемы, связанные с контролем качества и ведением необходимой учетной документации в течение более длительных периодов хранения.

Помимо обеспечения долговечности и упрощения технического обслуживания КСЭ, имеющих отношение к безопасности, в проектах хранилищ отработавшего топлива должна также учитываться важность поддержания доверия общества. В этой связи не менее важное значение

имеют территория, окраска и другие видимые признаки того, что за хранилищем обеспечивается надлежащий уход. По аналогичным причинам в будущих проектах могут быть предусмотрены элементы, облегчающие взаимодействие с населением и приносящие другие блага обществу³.

В проектах хранилищ и оборудования для хранения отработавшего ядерного топлива учитывается возможность того, что хранящееся отработавшее топливо может потребовать проведения восстановительных мероприятий для его безопасной перевозки и совместимости с будущими стадиями ООТ. В этой связи хранилища отработавшего топлива должны быть способны сохранять, подтверждать и, при необходимости, восстанавливать возможность перевозки. С увеличением длительности хранения все большую важность приобретают такие соображения, как меры, призванные облегчить возможность извлечения и стандартизировать оборудование для манипулирования с топливом. Например, помещение одной или нескольких ОТВС в стандартный чехол перед хранением может решить ряд задач. Использование такого чехла может:

- дать возможность стандартизировать манипулирование с различными видами отработавшего топлива;
- облегчить мониторинг, инспектирование и надлежащее управление данными и их сохранение;
- дать средства для обеспечения того, чтобы отработавшее топливо могло извлекаться для инспектирования или переупаковки без необходимости поддерживать целостность конструкции ОТВС;
- повысить уровень безопасности по критичности, обеспечив дополнительную структурную поддержку для контроля геометрии и средство для добавления поглотителей нейтронов или для замены замедлителей;
- создать условия для хранения отработавшего топлива по ряду схем (например, в контейнерах, бассейнах и хранилищах камерного типа) и замены одной схемы хранения другой по мере необходимости.

Теоретически хранилища отработавшего топлива могут проектироваться из таких материалов и с такими средствами инспектирования и технического обслуживания, которые позволят эксплуатировать их в течение, быть может, нескольких сотен лет. Однако, учитывая связанные с этим затраты, в некоторых случаях может быть предпочтительно закладывать в проект более скромный срок службы и целенаправленно планировать проведение капитального ремонта хранилищ и оборудования и возможную переупаковку отработавшего топлива в этот момент. Методология и средства окончательного вывода из эксплуатации — еще одно ключевое соображение при проектировании новых хранилищ отработавшего топлива и продлении срока службы существующих хранилищ.

4.1.1. Соображения, касающиеся управления старением и продления лицензий

В проектах новых систем хранения отработавшего топлива, рассчитанных на неопределенные периоды хранения, не только учитываются прошлые уроки управления старением, но и предусматриваются конструктивные особенности, облегчающие реализацию будущих планов управления старением. К ним может относиться создание систем мониторинга и инспектирования, а также средств для ремонта или замены ключевых элементов. К примерам ремонтных работ, которые могут быть необходимы при более длительных сроках хранения, относится ремонт

³ ВАО в хранилище ХАБОГ в Нидерландах будут постепенно распадаться, пока будущие поколения и правительства не определятся с методом захоронения радиоактивных отходов. Символом этого процесса распада является оранжевый цвет здания, выбранный его дизайнером Эвудом Верхоэфом по той причине, что оранжевый — это переходный цвет между красным и зеленым. Внешние стены здания будут периодически перекрашиваться во все более светлые оттенки до тех пор, пока они не станут белыми примерно через 100 лет — когда теплоотдача отходов сократится на один порядок.

бетонных конструкций (бассейнов или контейнеров), переупаковка отработавшего топлива в новые канистры для хранения или замена панелей поглотителей нейтронов в бассейнах выдержки отработавшего топлива.

Системы мониторинга и инспектирования станут более пригодными для длительного хранения, если в них будут предусмотрены современные методы осмотра и неразрушающего контроля для наблюдения за условиями хранения и содействия управлению старением при помощи превентивного и прогнозного технического обслуживания, которое обеспечивает следующее:

- доступ к ключевым элементам для периодического осмотра;
- ведение точной базовой документации и учетных документов инспекций в процессе эксплуатации, включение образцов испытываемых материалов и других элементов, которые облегчают однозначную интерпретацию результатов инспектирования;
- выявление условий эксплуатации, которые могут негативно повлиять на поведение материалов или ускорить деградацию;
- раннее обнаружение и точный анализ деградации, влияющей на КСЭ, имеющие отношение к безопасности.

С учетом возможных сроков длительного хранения в хранилищах отработавшего топлива может быть предусмотрена дополнительная инфраструктура, включая горячие камеры, бассейны и оборудование для дистанционного манипулирования, дающая возможность технического обслуживания, ремонта и восстановления или замены ключевых элементов по мере необходимости. В числе имеющихся возможностей могут быть средства для выполнения следующего:

- восстановление, переупаковка или перемещение отработавшего топлива или элементов упаковки, которые подверглись деградации во время хранения или не могут быть проверены на соответствие применимым требованиям;
- восстановление возможности перевозки, если не может быть доказано, что упаковка с отработавшим топливом соответствует требованиям после длительного хранения (т.е. состояние упаковки с отработавшим топливом или требования к перевозке могли измениться);
- обращение с потоками радиоактивных отходов.

Благодаря разработке и включению конструктивных особенностей, облегчающих управление старением, проведение материаловедческих исследований и повторное лицензирование, необходимое для дальнейшего поддержания безопасности, можно существенно снизить затраты и риски, связанные с увеличением сроков хранения отработавшего топлива.

4.1.2. Соображения, касающиеся гарантий и физической безопасности

Объекты для длительного хранения отработавшего топлива должны будут отвечать нынешним и будущим требованиям, установленным в соответствующих конвенциях и договорах о гарантиях и физической защите. С точки зрения гарантий крайне важно иметь возможность проверки хранящегося ядерного материала и непрерывного получения информации о ядерном материале. Кроме того, важно учитывать требования гарантий при проектировании [41, 42] и соблюдать национальные регулирующие положения. Необходимо принимать соответствующие меры для предупреждения несанкционированного доступа к радиоактивному материалу или его изъятия. По сути, соображения безопасности и физической безопасности должны быть неотъемлемой частью работы по проектированию и выбору площадки для хранилища.

Многие технические соображения, имеющие значение для безопасности, также применимы к гарантиям и физической безопасности. Технологии хранения отработавшего топлива призваны сохранять свои функции безопасности при экстремальных природных явлениях. Эти их свойства

также обеспечивают аналогичную защиту от переключения или гипотетических атак. Однако в конечном счете для соблюдения требований гарантий и физической безопасности при длительном хранении потребуются дополнительные барьеры и системы мониторинга ввиду сокращения радиоактивных зон по мере старения отработавшего топлива. Эта радиация является важным фактором при определении того, какие средства физической безопасности будут использоваться для защиты от хищения и переключения. Хотя сокращенное поле излучения снижает риск для безопасности, оно также ведет к ухудшению характеристики самозащиты⁴ отработавшего топлива, что может обусловить необходимость установки дополнительных физических барьеров и введения требований к мониторингу и персоналу для защиты топлива.

Помимо окончательной утраты характеристики самозащиты, со временем могут существенно измениться требования физической безопасности. Физическая безопасность, необходимая для защиты отработавшего топлива, отчасти основывается на гипотетической угрозе, которая может существенно измениться в результате внешних событий. Таким образом, разработка и периодический пересмотр рациональных и реалистичных сценариев угрозы будет служить инструментом оценки мер физической безопасности, необходимых для обеспечения надлежащей защиты отработавшего топлива во время длительного хранения.

4.2. ОТЛИЧИЯ МЕЖДУ МОКРЫМИ И СУХИМИ ХРАНИЛИЩАМИ

После выгрузки с реактора отработавшее топливо обычно хранится в бассейнах выдержки в течение как минимум 3–5 лет. Для освобождения места под новое отработавшее топливо или при окончательном выводе из эксплуатации реакторных установок отработавшее топливо в итоге извлекается из бассейна выдержки и перемещается в бассейны, сухие хранилища камерного типа или ССХК.

Водяные бассейны для хранения отработавшего топлива доказали свою надежность и безопасность при эксплуатации в течение нескольких десятилетий. Остаточное тепло отводится водой, где оно переносится в охлаждающую воду через теплообменники или в окружающий воздух. За счет контроля температуры и химического состава воды вероятность деградации и последующего выброса радиоактивных материалов поддерживается на низком уровне. Кроме того, значительная тепловая инерция крупных водных масс в бассейне дает существенную отсрочку для принятия восстановительных мер в случае нештатных ситуаций или аварий на станции. К потенциальным недостаткам бассейнов выдержки отработавшего топлива относится повышенная роль активных средств безопасности (например, поддержание уровня воды, водно-химического режима, системы охлаждения и подпитки и выявление утечек) и возможные дополнительные механизмы деградации, связанные с пребыванием в мокрой среде. Мокрое хранение отработавшего топлива требует значительно большего числа операций по манипулированию с радиоактивными отходами (например, обработка жидких отходов) и генерирует поток отходов, требующий дополнительной переработки.

Системы сухого хранения отработавшего топлива включают в себя ССХК, предназначенные для одной канистры или контейнера, и крупные хранилища камерного типа, предназначенные для хранения большого количества ОТВС. Системы сухого хранения отработавшего топлива обычно рассчитаны на использование пассивных средств безопасности. Остаточное тепло переносится на поверхность системы герметизации благодаря теплопроводности и радиации, откуда оно

⁴ Международная группа по делящимся материалам сообщает следующее [43]: «На протяжении примерно первых 100 лет отработавшее топливо LWR испускает гамма-излучение с мощностью дозы более 1 зиверта в час, которая будет смертельной примерно для 50% взрослых (LD50) через три-четыре часа. При таком облучении МАГАТЭ считает облученное отработавшее топливо достаточно радиоактивным для того, чтобы перевозиться и перерабатываться только с помощью специализированного оборудования и установок, выходящих за рамки возможностей субнациональных групп, и, таким образом, «защищающим само себя»».

переносится в окружающий воздух путем естественной конвекции. Системы сухого хранения отработавшего топлива также доказали свою надежность в эксплуатации в течение нескольких десятилетий. К потенциальным недостаткам систем сухого хранения отработавшего топлива относятся следующее:

- более высокие температуры топлива и связанные с этим ограничения на тепловую нагрузку;
- более сложное оборудование и меры радиологической защиты при манипулировании с отдельными топливными сборками в сухой среде;
- отсутствие прямого доступа к отработавшему топливу для инспектирования.

В бассейнах для мокрого хранения и большинстве сухих хранилищ камерного типа отработавшее топливо обычно хранится в виде отдельных сборок, тогда как в случае с ССХК отработавшее топливо обычно помещается на хранение в герметичные канистры или контейнеры (см. раздел 5). ССХК могут быть без труда применены, когда приреакторные бассейны выдержки полностью заполняются, и могут постепенно добавляться по мере необходимости. Такой подход по принципу «оплата по мере необходимости» позволяет снизить первоначальные капиталовложения в хранение отработавшего топлива. Ввиду увеличения роли пассивных средств безопасности и физической безопасности эксплуатационные расходы, равно как и транспортные расходы, также могут быть ниже, поскольку отпадает необходимость в манипулировании с отдельными топливными сборками в пунктах отправления и назначения. По сравнению с нынешней конструкцией ССХК конструкция бассейнов выдержки отработавшего топлива или сухих хранилищ камерного типа требует более крупных капиталовложений и может также потребовать более крупных эксплуатационных расходов, связанных с активными системами, такими как системы очистки или подогрева воды, вентиляции и кондиционирования воздуха. Эти дополнительные расходы, однако, могут быть компенсированы большей вместимостью бассейна и сухих хранилищ камерного типа, обеспечивающих экономию за счет масштаба.

4.3. ЦЕНТРАЛИЗОВАННЫЕ ХРАНИЛИЩА ОТРАБОТАВШЕГО ТОПЛИВА

Современные хранилища отработавшего топлива обычно располагаются на реакторных площадках. В итоге может возникнуть необходимость в эксплуатации хранилищ отработавшего топлива на площадке (при реакторе или вне него) в течение еще долгого времени после того, как соответствующий реактор будет выведен из эксплуатации, если процесс переработки или захоронения отработавшего топлива не будет завершен до конца лицензированного срока службы реактора. Следствием этого могут быть возросшие риски ввиду свертывания производственной инфраструктуры на площадке либо возросшие эксплуатационные расходы на хранение — до такой степени, что эта инфраструктура будет сохраняться исключительно для нужд дальнейшего хранения отработавшего топлива. Кроме того, это может также уменьшить стимулы к своевременному выводу реактора из эксплуатации по той причине, что хранилище отработавшего топлива все еще находится на площадке, что повлечет за собой еще большие проблемы и риски, а также поставит на повестку дня дополнительные проблемы ведения учетной документации и сохранения знаний. Вероятно также, что местное население, которого это касается, никогда не допускало возможность превращения этих реакторных площадок в долговременные хранилища отработавшего топлива и не давало на это согласия.

Хранение отработавшего топлива в одном или нескольких региональных хранилищах отработавшего топлива дает ряд преимуществ. Помимо того, что централизованные хранилища отработавшего топлива позволяют устранить серьезные радиоактивные риски на реакторных площадках и полностью вывести их из эксплуатации по окончании срока службы реактора, они также могут существенно снизить расходы на эксплуатацию, техническое обслуживание и обеспечение физической безопасности благодаря отсутствию необходимости нести такие

расходы одновременно во многих местах. Например, централизованное хранение отработавшего топлива упрощает лицензирование благодаря объединению информации, экспертных ресурсов, оборудования и прочей инфраструктуры в отношении:

- систем управления информацией и других средств ведомственного контроля;
- инспектирования, мониторинга и анализа отработавшего топлива и его упаковочного комплекта;
- ремонта, восстановления или замены КСЭ, имеющих отношение к безопасности, или других ключевых КСЭ;
- переупаковочного или другого оборудования, необходимого при нештатных ситуациях или других событиях;
- любых подготовительных или предварительных шагов, требующихся перед захоронением или переработкой.

Риски, связанные с устареванием оборудования, также снижаются благодаря стандартизации и обслуживанию оборудования в централизованных хранилищах отработавшего топлива. Карлсен и др. [9] отмечают, в частности, что «если возникнет необходимость в перевозке устаревших упаковок с отработавшим топливом, инфраструктура для восстановления возможности перевозки (т.е. инспектирование, переупаковка, помещение в транспортные пакеты и др.) может оказаться весьма дорогостоящей, если она будет продублирована в нескольких местах». Кроме того, экономия за счет масштаба также позволит подумать об устройстве бассейнов, хранилищ камерного типа и других альтернативных систем хранения, которые могут быть невыгодными в финансовом отношении для нескольких мелких хранилищ. Аналогичным образом, стоимость и сложность будущей перевозки и манипулирования может быть значительно снижена за счет стандартизации оборудования и методов манипулирования на централизованных объектах.

Потенциальным препятствием для централизованного хранения отработавшего топлива является сложность подбора площадки, отвечающей техническим, общественным и политическим критериям. Особенно трудной может оказаться задача заручиться поддержкой местного населения, если оно не получает никаких выгод от эксплуатации реактора, генерирующего отработавшее топливо, либо обеспокоено перспективой превращения площадки в хранилище отходов де-факто [9]. К другим препятствиям относятся: i) потенциально более серьезные последствия экстремальных событий, которые могут повлиять на весь объем хранящегося топлива; ii) дополнительные расходы и риски (пусть и небольшие) в связи с перевозкой топлива в хранилище; iii) первоначальные капиталовложения в централизованное хранение, которые могут быть больше постепенно нарастающих расходов на хранение на существующих объектах в краткосрочной перспективе, но скорее всего будут компенсированы экономией за счет масштаба, когда будет проведено сравнение суммарных расходов в течение всего жизненного цикла и учтены нештатные ситуации, влекущие за собой риск переупаковки.

4.4. СООБРАЖЕНИЯ, КАСАЮЩИЕСЯ ВЫБОРА ПЛОЩАДКИ

Большинство необходимых объектов для хранения отработавшего топлива в период до появления достаточных мощностей по переработке или захоронению, пока не спроектированы, не лицензированы и не сооружены. Это открывает возможности для существенного сокращения многих рисков и затрат, связанных с увеличением сроков хранения отработавшего топлива, благодаря разумному выбору площадок под новые хранилища отработавшего топлива. Данные возможности перечислены ниже.

- Благодаря строительству хранилищ в местах с сухим умеренным климатом можно значительно уменьшить проблему коррозии и другие проблемы, касающиеся поведения материалов.
- Выбрав место с низкой вероятностью экстремальных явлений (например, наводнений и землетрясений), можно существенно сократить влияние опасных природных факторов.
- Благодаря подбору площадок в местах, которые изолированы от промышленных и других потенциальных рисков и могут быть легко защищены от враждебных действий, можно значительно снизить антропогенные риски.
- Потенциальные последствия непредвиденного события для окружающей среды и безопасности можно существенно сократить за счет строительства хранилища там, где они будут небольшими (например, в малонаселенных местах и местах с неинтенсивным или заведомо ограниченным водо- и землепользованием).
- Поскольку и мокрые, и сухие хранилища выбрасывают остаточное тепло в окружающую среду, немаловажными являются такие факторы, как наличие воды для охлаждения и температура окружающего воздуха.
- Вопросы транспортных маршрутов и совместимости оборудования между хранилищами отработавшего топлива и пунктами переработки и захоронения проще решаются в случае совмещенных объектов, а если хранилище совмещено с пунктом захоронения, то отпадает необходимость в перевозке.

В документе Серии норм безопасности МАГАТЭ № NS-R-3 (Rev. 1) «Оценка площадок для ядерных установок» [44] описаны критерии и методы, которые могут использоваться для применения дифференцированного подхода к выбору площадок для хранилищ отработавшего топлива.

5. СХЕМЫ ХРАНЕНИЯ ОТРАБОТАВШЕГО ТОПЛИВА

Схемы хранения отработавшего топлива могут быть рассчитаны на неопределенные периоды хранения, чтобы облегчить управление старением и обеспечивать гибкость при выполнении дальнейших шагов на пути к приемлемой конечной точке. Ключевые решения при выборе схемы хранения отработавшего топлива с учетом нынешних и будущих потребностей касаются того, как будет храниться отработавшее топливо, будет ли отработавшее топливо переупаковываться для перевозки или захоронения до или после хранения, какие компоненты будут использоваться для выполнения основных функций безопасности и как будет демонстрироваться уверенная работа средств безопасности для удовлетворения нормативных требований. Каждое из этих решений повлияет на выбор будущих вариантов. Имеющиеся альтернативы оцениваются с целью выбора стратегии, которую можно будет проводить в жизнь в течение длительных периодов хранения, одновременно сохраняя гибкость и адаптивность с учетом всего спектра вероятных будущих сценариев.

В случае с геологическими хранилищами отработавшее топливо перед спуском под землю потребуется поместить в подходящие утилизационные контейнеры. Во многих государствах еще не решены такие вопросы, как дизайн (например, емкость и спецификация материала) утилизационного контейнера и критерии приемлемости формы, в которой в него будут помещаться отходы. Для хранения отработавшего топлива важное значение имеет то, как и в какой момент отработавшее топливо помещается в контейнеры.

5.1. КАНИСТРЫ И КОНТЕЙНЕРЫ

Помещение отработавшего топлива в надежные канистры или контейнеры перед его хранением имеет ряд преимуществ. Оболочку отработавшего твэла, которая часто выполняет функцию локализации радиологических материалов и поддержания геометрии, необходимой для экранирования и безопасности по критичности, трудно инспектировать и невозможно отремонтировать или заменить. Канистра или контейнер служат дополнительным барьером, «так как они обеспечивают локализацию радионуклидов, повышают безопасность по критичности, исключая проникновение замедлителя, и поддерживают инертную среду, исключающую присутствие кислорода, влажного воздуха и воды, способных инициировать или ускорить процессы деградации» [9]. Канистра или контейнер с отработавшим топливом также обеспечивают возможность извлечения и манипулирования в случае нарушения целостности конструкции топлива. Короче говоря, канистра или контейнер может служить поддающимся инспектированию, ремонту и/или замене компонентом, который может выполнять ключевые функции безопасности — тем самым уменьшая значение целостности отработавшего топлива и его оболочки как средства обеспечения безопасности при длительных периодах хранения [9]. К другим плюсам хранения отработавшего топлива в канистрах или контейнерах относится то, что отработавшее топливо уложено таким образом, что может легче перемещаться, а канистра может также обеспечить повышенную надежность в случае тяжелой аварии.

Однако если говорить об отработавшем топливе, запечатанном в канистры или контейнеры для хранения, то здесь ограничены возможности для мониторинга и нет возможности прямого осмотра отработавшего топлива или внутренностей канистры. Данные о состоянии и целостности конструкции отработавшего топлива и его упаковки — это неотъемлемая часть нынешних основ безопасности хранения и манипулирования, а также демонстрации соблюдения требований к перевозке после хранения и получения разрешения на переработку или захоронение. Отсутствие прямого доступа для инспектирования означает, что потребуются дополнительные затраты на разработку основ проектирования и лицензирования с учетом дополнительной неопределенности, связанной с устареванием отработавшего топлива и его упаковки. Недоступность отработавшего топлива и внутренностей канистр или контейнеров для регулярного инспектирования может также обернуться упущенными возможностями для раннего обнаружения и смягчения воздействия непредвиденных механизмов деградации.

В отсутствие возможностей для прямого инспектирования необходимо наличие умения комплексно прогнозировать механизмы деградации. Это может привести к увеличению объема научно-исследовательских, опытно конструкторских и демонстрационных работ, необходимых для разработки технических и нормативных основ для демонстрации того, что отработавшее топливо и его упаковка соответствуют применимым требованиям к хранению и перевозке после хранения. Кроме того, размер и вес дополнительных упаковочных материалов могут ограничить возможности для перевозки и манипулирования. Будущие критерии приемлемости для пунктов переработки и захоронения могут также наложить ограничения на форму и состав материалов. По этим причинам может возникнуть необходимость во вскрытии и переупаковке отработавшего топлива, которое было упаковано перед хранением. Успешная стратегия упаковки, позволяющая избежать будущей переупаковки, требует наличия подходящей канистры или контейнера на весь период хранения, последующей перевозки и окончательного захоронения (если оно является конечной точкой). К плюсам такого подхода относится следующее:

- успешные программы управления старением;
- выбор характеристик канистры или контейнера (т.е. геометрии, тепловой нагрузки, мер обеспечения безопасности по критичности и материалов), совместимых с предполагаемыми критериями приемлемости;
- стабильность применимых стратегий и регулирующих положений;

- выполнение операций по переработке или захоронению до того, как возникнет необходимость в переупаковке.

Если отработавшее топливо помещается в упаковку перед хранением, было бы разумнее исходить из того, что переупаковка в конечном итоге будет необходима, и разработать стратегии упаковывания и эксплуатации для облегчения этого процесса. Подход, предполагающий периодическую переупаковку, может:

- заложить основу для планирования расходов;
- создать условия для проведения периодических инспекций на предмет соблюдения эксплуатационных требований и для получения данных для нужд НИОКР, а также обеспечения возможности прогнозирования поведения отработавшего топлива;
- дать возможность обновления и модернизации компонентов ОТВС и упаковки и оборудования мониторинга для задействования новых технологий и соблюдения новых или изменившихся требований.

Вместе с тем переупаковка связана с дополнительными рисками, затратами и облучением персонала, а также с образованием радиоактивных отходов. Смета расходов на будущую переупаковку во многом зависит от ставок дисконтирования и других предположений, используемых в экономическом анализе. Некоторые сметы показывают, что вследствие периодической переупаковки расходы могут вырасти на порядок или более. Главное контрольно-финансовое управление Соединенных Штатов, сообщая о свертывании программы по хранилищу «Юкка Маунтин», считает, что, исходя из предположения о том, что операции по переупаковке будут повторяться примерно каждые 100 лет, стоимость ССХК может возрасти с 30–60 млн долл. США до 180–500 млн долл. США за реактор [45].

Хотя стоимость и последствия переупаковки можно уменьшить простым помещением имеющихся упаковок в транспортные пакеты, руководству следует осторожно относиться к методике простого помещения одной упаковки в другую. Как показывает опыт, это может повысить уровень сложности и неопределенности будущих операций. Каждый дополнительный упаковочный компонент усложняет инспектирование, увеличивает размер и вес упаковки и снижает теплопередачу. Эти изменения могут негативно повлиять на поведение упаковки в эксплуатационном состоянии и при авариях.

5.2. ОТДЕЛЬНЫЕ СБОРКИ

Альтернативой упаковке отработавшего топлива перед хранением является его хранение в виде отдельныхборок. Неупакованное отработавшее топливо может храниться в бассейнах или сухих хранилищах камерного типа, обеспечивающих экранирование и другие необходимые средства безопасности. Одним из главных преимуществ хранения отработавшего топлива в таком виде является простота его мониторинга и инспектирования в течение всего периода хранения. Так, можно проще обнаружить любые признаки деградации, которая могла иметь место во время длительного хранения. Это намного упрощает демонстрацию соблюдения требований гарантий при хранении и требований к перевозке после более длительных периодов хранения. Это дает дополнительную информацию для нужд проектирования оборудования для манипулирования и перевозки и снижает неопределенность и связанную с этим потребность в увеличении проектного запаса и запаса безопасности. Кроме того, поскольку тепловыделение и уровень радиации во время хранения снижаются, потребность в экранировании и отводе тепла со временем сокращается, что позволяет уменьшить размер, вес и стоимость будущих упаковок.

Другим преимуществом хранения отработавшего топлива в неупакованном виде до конца периода хранения является значительно меньший уровень неопределенности в отношении

требований к перевозке и критериев приемлемости для переработки или захоронения, снижающий вероятность того, что потребуется переупаковка. Если процесс упаковки будет отложен, это также даст возможность спроектировать будущие упаковки с использованием будущих технологий и материалов и подготовить «свежую» упаковку для перевозки и манипулирования после хранения. Это может существенно сократить технические недоработки и объем соответствующих НИОКР, необходимых для прогнозирования состояния отработавшего топлива, хранящегося в герметичных контейнерах. Так, применение инженерного подхода, делающего акцент на канистрах или отдельных емкостях, а не на целостности оболочки отработавшего топлива, может снизить нагрузку на проектировщиков контейнеров и регулирующие органы, связанную с необходимостью интенсивного изучения свойств оболочки отработавшего топлива [39]. Наконец, хранение отработавшего топлива в виде отдельных сборок, которые могут быть упакованы для перевозки и захоронения после хранения, дает возможность выбора площадки и проектирования хранилища без ограничений, налагаемых решениями относительно упаковки отработавшего топлива.

Поскольку вероятность изменений как в состоянии отработавшего топлива и его упаковочных компонентов, так и в нормативных требованиях возрастает с течением времени, разумно также предположить, что вероятная потребность в переупаковке или принятии других мер по снижению рисков может быть уверенно соотнесена с интервалом между моментом последней упаковки отработавшего топлива и моментом его перевозки. Таким образом, соблюдение будущих требований проще обеспечить при помощи стратегий, предполагающих отсрочку процесса упаковки или включающих в себя готовое средство для инспектирования отработавшего топлива и упаковочных компонентов, а также, при необходимости, для восстановления или переупаковки.

6. СООБРАЖЕНИЯ, КАСАЮЩИЕСЯ РЕГУЛИРОВАНИЯ

С учетом возможности неоднократного продления лицензий может быть разработана регулирующая основа, обеспечивающая безопасность в течение периодов хранения, которые могут потребоваться до достижения приемлемой конечной точки.

6.1. РОЛЬ РЕГУЛИРУЮЩИХ ОРГАНОВ

Регулирующий орган осуществляет надзор за деятельностью в области ООТ до достижения приемлемой конечной точки. Проверка и надзор со стороны регулирующего органа обеспечивает связь между обеспечением безопасности и поддержанием активного контроля за счет [9]:

- a) периодического обновления или переоценки основ безопасности хранилищ и связанных с ними программ управления старением;
- b) одобрения новых технологий;
- c) улучшения нынешней регулирующей основы за счет новых подходов (например, руководящие указания, основанные на знании рисков) к устранению факторов неопределенности при поддержании безопасности во время длительного хранения;
- d) обеспечения должной совместимости и интеграции с регулирующей основой переработки и захоронения (современной и будущей).

Ключевые функции регулирующих органов могут включать в себя, в частности, следующее [9]:
i) научные исследования для обоснования принципов регулирования, разработки основы для лицензирования и принятия решений; ii) совершенствование и осуществление мероприятий по лицензированию, инспектированию и надзору; iii) информационно-просветительскую работу с

общественностью. Признается, что в зависимости от государства обязанности регулирующего органа необязательно будут включать в себя каждый из этих пунктов. Например, у некоторых регулирующих органов нет обязанностей по самостоятельному проведению научных исследований. Вместо этого они могут отвечать за принятие обоснованных решений с опорой на имеющиеся исследования. В зависимости от схемы на регулирующем органе могут лежать дополнительные обязанности, связанные с увеличением периодов хранения отработавшего топлива.

6.1.1. Исследовательская деятельность регулирующих органов

К вопросам управления старением и хранения регулирующие органы, отрасль и научно-исследовательские институты должны подходить комплексно. Исследовательская деятельность регулирующих органов может включать в себя эксперименты, технические исследования и анализ, имеющие целью:

- оценку значимости потенциальных технических проблем с точки зрения безопасности;
- разработку долгосрочной основы для лицензирования;
- повышение долговечности систем хранения отработавшего топлива.

Целью научных исследований должна быть оценка новых подходов к управлению старением и проектированию, а также оценка и проверка программ управления старением (например, периодические переоценки хранилищ). Это включает в себя необходимые исследования для выполнения и проверки результатов анализа ограниченного по времени старения (см. раздел 3.1), а также мероприятия по мониторингу, техническому обслуживанию и смягчению рисков для обеспечения безопасности в лицензионный период. Для определения потребностей в исследованиях регулирующие органы, отрасль и научно-исследовательские институты проводят анализ недоработок в режиме регулирования в целях установления приоритетов. Важно определить и задать главные направления долгосрочных исследований, которые могут потребовать заблаговременного планирования для удовлетворения потребностей на несколько лет вперед.

6.1.2. Лицензирование, инспектирование и надзор

Роль регулирующих органов состоит в обеспечении адекватности регулирующих положений, инструкций и программ инспектирования для руководства разработкой и оценки осуществления программ управления старением, которые будут обеспечивать безопасность и поддерживать способность к хранению и перевозке в течение каждого последующего лицензионного периода. Регулирующие органы также следят за тем, чтобы во время хранения собиралась информация об опыте эксплуатации и чтобы существующие правила обновлялись с учетом возникающих проблем.

При продлении лицензии, или периодической переоценке, главным предметом проверки будет действительность анализа ограниченного по времени старения и адекватность программы управления старением, предлагаемой для каждого конкретного проекта хранилища (т.е. включая частоту, с которой должны инспектироваться или обновляться основные компоненты контейнеров). Главным элементом программы инспекций для целей регулирования будет проверка фактического осуществления каждой программы управления старением и выполнения надлежащих корректирующих действий лицензиатом. Кроме того, регулирующие органы могут осуществлять программы учета опыта эксплуатации для выявления общих технических проблем и тенденций в старении, а также вводить в действие другие программы и требования для ведения учетной документации, управления знаниями и поддержания другой инфраструктуры, обеспечивающей безопасное хранение и демонстрирующей соблюдение будущих критериев для перевозки, переработки или захоронения. Регулирующим органам следует также пересмотреть вероятность и тяжесть проектных аварий исходя из возможности неоднократных продлений, которые могут существенно увеличить периоды хранения [9].

При продлении лицензии регулирующий орган гарантирует сохранение достаточных финансовых ресурсов для выполнения финансовых обязательств. Хранение отработавшего топлива предполагает расходы на эксплуатацию, сотрудников охраны, мониторинг, техническое обслуживание и ремонт оборудования и помещений, возможные операции по инспектированию и переупаковке и окончательный вывод из эксплуатации. Эти текущие эксплуатационные затраты будут увеличиваться по мере роста объемов отработавшего топлива и устаревания оборудования и помещений для хранения отработавшего топлива. Таким образом, с продлением периодов хранения может существенно вырасти финансовая ответственность и, соответственно, необходимость финансовых гарантий.

В каждом государстве будут применяться свои законы и финансовые структуры для обеспечения финансовых гарантий. С учетом неопределенности с длительностью хранения регулирующие органы должны принимать в расчет ряд вероятных сценариев и периодически по мере необходимости переоценивать и корректировать сценарии для того, чтобы обеспечить наличие финансовых ресурсов для выполнения этих обязательств в течение всего периода хранения отработавшего топлива.

6.1.3. Информационная работа с общественностью

Залогом обеспечения устойчивого ООТ и, следовательно, устойчивой ядерной энергетики является доверие общества. Информационная работа с общественностью в контексте регулирования будет важным элементом хранения отработавшего топлива в течение неизвестных периодов времени, которые могут потребоваться до достижения конечной точки. Действуя инициативно, отрасль может выходить на контакт с заинтересованными сторонами, разъясняя им суть деятельности по организации длительного хранения и основы безопасности, физической безопасности и защиты населения и окружающей среды. Регулирующий орган может принимать меры по повышению осведомленности о фактических рисках и последствиях деятельности по хранению и укреплению у общества доверия к нему как к органу по обеспечению безопасности. Регулирующий орган также повышает уровень доверия общества, ведя эффективную работу по разъяснению сути текущих мероприятий и выясняя мнения (в той степени, в какой это предусмотрено законом) относительно изменений в политике и нормативных положений, касающихся продления сроков хранения.

6.2. РЕГУЛИРУЮЩАЯ ОСНОВА ПРОДЛЕНИЯ ПЕРИОДОВ ХРАНЕНИЯ

Эта регулирующая основа включает в себя национальную политику, правила, инструкции и технические стандарты, которые были установлены для обеспечения дальнейшей безопасности, физической безопасности и экологичности хранения отработавшего топлива. Политические и регулирующие органы периодически проводят переоценку регулирующей основы с целью убедиться в том, что она надлежащим образом отражает технические новшества, эволюционирующие общественные ценности и потребности, нужды отрасли и другие назревающие проблемы.

В связи с тем, что в обозримом будущем объемы выгрузки отработавшего топлива превысят объем мощностей по захоронению и переработке, средства для безопасного продления периодов хранения отработавшего топлива станут неременной частью эффективной программы ООТ. Существенный рост объемов отработавшего топлива в обозримом будущем наряду с неопределенностью относительно периодов хранения отработавшего топлива указывает на

то, что пришло время пересмотреть подходы и предположения, лежащие в основе процессов лицензирования хранения отработавшего топлива. Карлсен и др. [9] делают следующий вывод:

«Ключевые соображения при лицензировании могут включать в себя частоту повторного лицензирования, время на подготовку к повторному лицензированию, надлежащий период времени, который должен пройти для анализа программы управления старением, и частоту основных действий по управлению старением».

Истечение срока действия лицензии — это не предел для безопасного хранения отработавшего топлива. Лицензионные периоды обычно определяются нормативными или политическими соображениями и, как правило, представляют собой интервал, считающийся достаточно долгим для того, чтобы охватить предполагаемый период хранения отработавшего топлива. На рис. 3 показано, каким образом можно выстроить регулируемую основу, чтобы

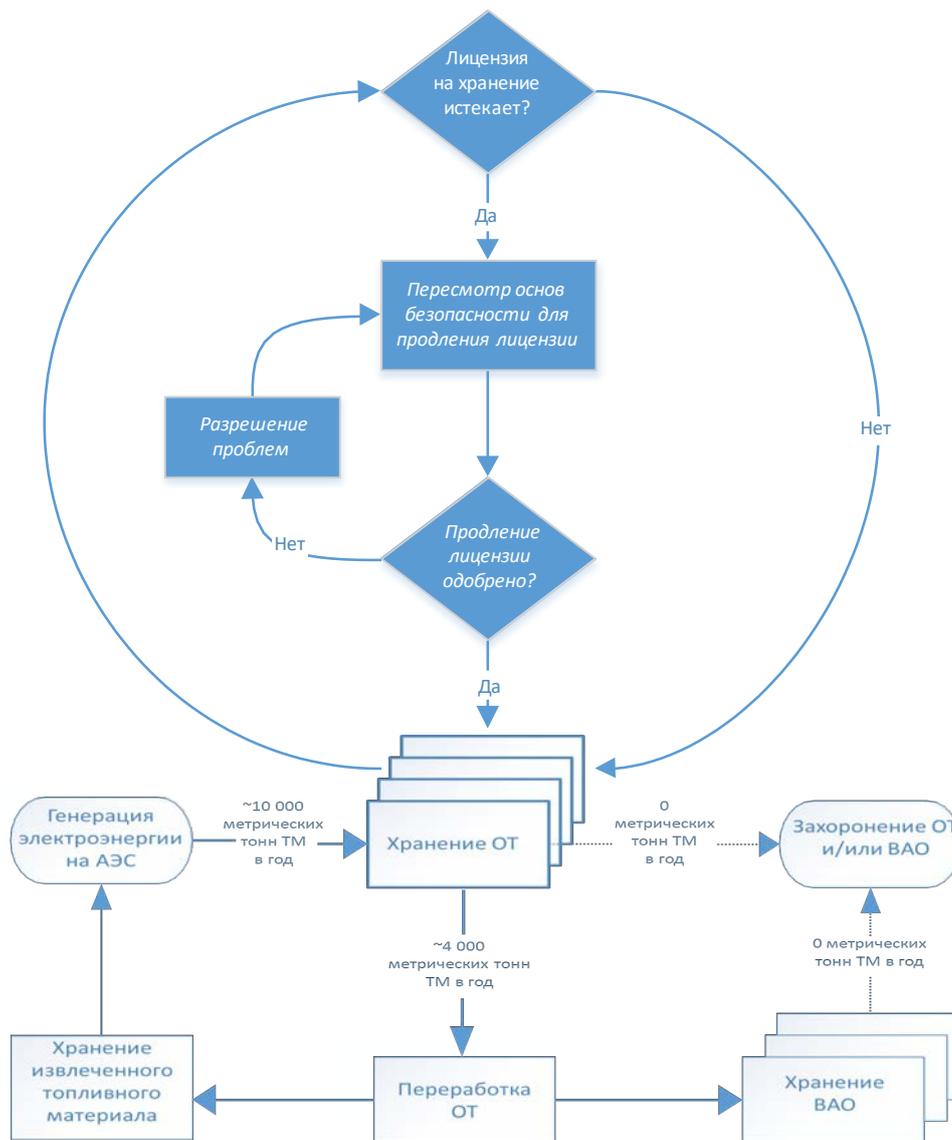


Рис. 3. Продление лицензии до момента переработки или захоронения

предусмотреть периодическое обновление лицензий с учетом текущей ситуации (т.е. неизвестных периодов хранения), обеспечив при этом безопасное хранение до тех пор, пока не будет выработана и введена в действие национальная политика в отношении конечного состояния отработавшего топлива. Процесс обновления лицензий показан в виде замкнутых кругов в верхней части рисунка. Карлсен и др. [9] сообщают:

«Успех данного подхода будет зависеть от наличия такого процесса продления лицензий, который мог бы уверенно выявлять любые уязвимости, угрожающие успешному хранению отработавшего топлива на протяжении следующего лицензионного периода, и от способности лицензиата принимать эффективные корректирующие меры, когда таковые потребуются, чтобы получить право на продление лицензии. Заявки на продление лицензии должны будут подаваться задолго до истечения ее срока действия, чтобы имелось достаточно времени на принятие всех необходимых корректирующих мер. Корректирующие меры могут охватывать широкий диапазон — от улучшения программ мониторинга или инспектирования до восстановления поврежденных контейнеров с отработавшим топливом или хранилищ, переупаковки отработавших тепловыделяющих сборок (ОТВС) или даже перебазирования в новое хранилище».

Если подход, показанный на рис. 3, будет эффективно проводиться в жизнь, число продлений лицензий можно не ограничивать, поскольку соблюдение требований будет оцениваться и подтверждаться шаг за шагом для каждого этапа по отдельности (т.е. лицензионного периода).

6.3. РИСК-ОРИЕНТИРОВАННОЕ И ОСНОВАННОЕ НА РЕЗУЛЬТАТАХ ЭКСПЛУАТАЦИИ РЕГУЛИРОВАНИЕ

Регулирующие органы могут рассмотреть преимущества риск-ориентированных и основанных на результатах эксплуатации подходов к устранению технической неопределенности, связанной с долгосрочным хранением [9]. В настоящее время некоторые регулирующие основы базируются на детерминистских подходах, при которых решение практических задач (например, связанных с пределами дозы) и выполнение вспомогательных проектировочных требований должно диктоваться конкретными наборами эксплуатационных состояний и аварийных условий. Программы управления старением также обычно носят детерминистский или регламентирующий характер, опираясь на консервативную инженерно-техническую оценку.

Комиссия по ядерному регулированию дает следующее определение [46]:

«Риск-ориентированный подход к принятию решений регулирующим органом представляет собой философию, в соответствии с которой факторы риска рассматриваются наряду с другими факторами для установления требований, которые заостряют внимание лицензиата и регулирующего органа на вопросах проектирования и эксплуатации сообразно их значению для здоровья и безопасности».

В постановление Соединенных Штатов 10 CFR 63 «Захоронение высокоактивных радиоактивных отходов в геологическом хранилище Юкка-Маунтин, штат Невада» [47] включены многие из этих принципов (например, пределы дозы для нештатных и аварийных условий во время операций, предшествующих закрытию, были соотнесены с вероятностью соответствующего сценария). Аналогичные принципы могут применяться для регулирования рисков, связанных с продлением периодов хранения отработавшего топлива.

Риск-ориентированные подходы могут также привести к усилению традиционных требований к управлению старением и проектированию благодаря прямому учету более широкого круга потенциальных проблем безопасности и созданию логического средства для приоритизации

проблем на основе значимости рисков, опыта эксплуатации и инженерно-технических оценок. Проведение риск-ориентированного анализа также поможет получить лучшее представление об уровне защиты, обеспечиваемом традиционными детерминистскими подходами.

Анализ рисков дает лучшую картину вероятности возникновения и последствий конкретных проблем деградации в результате старения, что может стать источником идей и альтернативных подходов к обеспечению безопасности. Например, некоторые функции безопасности хранения отработавшего топлива нередко выполняются оболочкой отработавшего топлива, которая помогает локализовать радиологические материалы и сохранить геометрию ОТВС. Целостность оболочки трудно инспектировать, и оболочка не подлежит ремонту или замене. Для длительных периодов хранения было бы, возможно, разумным рассмотреть стратегии безопасности, которые предусматривают перенос функций безопасности на компоненты упаковки отработавшего топлива или на элементы хранилища отработавшего топлива, которые проще контролировать и инспектировать и которые при необходимости можно отремонтировать или заменить. Это похоже на нынешнюю практику «консервирования» с целью создания дополнительного барьера и средства манипулирования подозрительными ОТВС. К другим способам уменьшения рисков, связанных с нарушением целостности оболочки, относится использование технологий упаковывания и высушивания для предотвращения будущих повреждений оболочки и проектов, облегчающих работу систем инспектирования и мониторинга по периодической оценке внутренних условий в хранилищах отработавшего топлива и состояния оболочки топлива.

В подходах, основанных на результатах эксплуатации, устанавливаются требования, направленные на удовлетворение оговоренных эксплуатационных критериев, и не предписываются конкретные методы для соблюдения этих критериев. Ввиду неопределенности, касающейся возможности многократного продления лицензий на хранение отработавшего топлива, риск-ориентированные и основанные на результатах эксплуатации подходы могут дать толчок разработке новых технологий и более эффективных подходов к обеспечению долгосрочной безопасности [9].

В нормативные и эксплуатационные принципы иногда имплицитно включаются предположения о следующем: длительность хранения; состояние топлива, упаковки и оборудования, используемого во время перевозки; последующие стадии ООТ. Эти имплицитные предположения могут повлиять на потенциальные решения либо излишне ограничить их.

Подход к регулированию, основанный на результатах эксплуатации, также не зависит от предположений о том, чего можно ожидать в будущем. Он нацелен на обеспечение безопасных условий и при этом дает лицензиату гибкость в выборе средств для удовлетворения установленных критериев безопасности. Таким образом, регулирование на основе результатов эксплуатации может обеспечить гибкость с точки зрения учета эволюционирующих технологий и политики. При обеспечении такой гибкости регулирующему органу также рекомендуется учитывать потребность лицензиата в ясно определенных и объективных требованиях.

Совершенствование регулирующих основ хранения, перевозки и захоронения на базе как риск-информированного, так и основанного на результатах эксплуатации подхода позволяет заострить внимание на наиболее важных видах деятельности и установить объективные критерии, основанные на учете риска при оценке эксплуатационных параметров. Главные задачи при применении новых подходов к хранению и перевозке таким образом включают: i) определение уровня приемлемого риска при хранении отработавшего топлива; ii) выделение первоначальных ресурсов на сбор и анализ необходимых данных для оценки рисков; iii) установление надлежащих параметров риска и эксплуатационных требований, которые давали бы ясную и объективную картину лицензиатам; iv) поддержание соответствующего уровня глубокоэшелонированной защиты. Дополнительные задачи включают интеграцию риск-ориентированных принципов во все этапы конечной стадии топливного цикла.

7. СООБРАЖЕНИЯ, КАСАЮЩИЕСЯ ПОЛИТИКИ

Устойчивое ООТ требует выработки политики и стратегий, задающих ясное, последовательное и стабильное направление для действий, поскольку именно они диктуют необходимость хранения отработавшего топлива и определяют возможные пути и сроки достижения приемлемой конечной точки, такой как переработка или захоронение. До тех пор пока в государствах не будут созданы достаточные мощности по переработке или захоронению отработавшего топлива, выгружаемого с реакторов, такое топливо будет необходимо хранить в течение еще более длительных периодов. Подобное хранение не считается совместимым с обязанностью по защите здоровья людей и окружающей среды без создания чрезмерного бремени для будущих поколений [2, 3].

Разработка политики ООТ — это комплексный процесс, охватывающий политику, экономику, ресурсосбережение, охрану окружающей среды и проблему социальной приемлемости, последняя из которых стала доминирующим фактором во многих государствах [48]. Политические решения серьезно влияют на путь развития ядерной энергетики и создают тот фон, на котором осуществляется весь ядерный топливный цикл.

При росте мирового спроса на энергоресурсы прогнозы спроса на ядерную энергию широко варьируются, в основном в силу непостоянных политических факторов. Национальные энергетические стратегии и политика оказывают влияние на предпочтения, субсидии и мандаты, которые, в свою очередь, определяют экономический фон для принятия энергетических решений. Спрос на ядерную энергию обычно прогнозируется на значительно более высоком уровне в тех моделях, где политики отдают предпочтение сокращению выбросов углерода либо не делают выбор в пользу конкретных классов энергоносителей [49].

С учетом колебаний, а также политических изменений, ставших результатом аварии на АЭС «Фукусима-дайити», к 2030 году ядерные генерирующие мощности, по оценкам, вырастут на 35–100% — с 370 ГВт (эл.) в 2010 году до 500–750 ГВт (эл.) [11]. Кроме того, требования экологов и общества сократить выбросы парниковых газов и потенциальные новые рынки ядерной энергетики (например, производство водорода и очистка воды) являются важными будущими факторами спроса.

Поскольку выгрузка отработавшего топлива будет расти пропорционально производству ядерной энергии⁵, важное значение имеет проведение разумной политики, поощряющей эффективные долгосрочные решения в области ООТ. Политические решения напрямую влияют на объемы отработавшего топлива и периоды, в течение которых его потребуется хранить. Они также влияют на технические соображения, такие как технологии хранения и методы проектирования, и существенно сказываются на общем уровне доверия к ядерному топливному циклу. Необходимо признать взаимосвязанность вопросов ООТ и рассматривать их в комплексе при разработке политики, касающейся ООТ.

7.1. ЯСНО ОПРЕДЕЛЕННАЯ КОНЕЧНАЯ ТОЧКА

В национальной политике определяется конечная точка для отработавшего топлива — переработка или захоронение. Аналогичным образом, предметом национальной политики являются

⁵ АЭС следующего поколения, работающие на быстрых реакторах, могут снизить объем выгрузки отработавшего топлива на единицу произведенной электроэнергии примерно в 100 раз, а также принести другие выгоды с точки зрения улучшенных внутренних характеристик безопасности и физической безопасности. Однако для разработки и внедрения этих технологий в промышленном масштабе потребуются многие десятилетия. Для привлечения инвестиций и проведения устойчивого курса на разработку, лицензирование и внедрение усовершенствованных ядерных топливных циклов требуется ясная и заслуживающая доверия политика в области разработки и использования этих реакторных технологий.

также ключевые решения, например о создании централизованных или региональных хранилищ отработавшего топлива на площадке либо вне ее. В этой связи ясная политика, цели и стратегии крайне важны для безопасности и устойчивости ООТ и для выделения достаточных финансовых и людских ресурсов на протяжении периодов, охватывающих жизнь многих поколений [50].

Ясно определенная и заслуживающая доверия конечная точка для отработавшего топлива необходима для эффективного принятия решений и планирования. Хотя хранение отработавшего топлива служит нескольким полезным целям на конечной стадии топливного цикла (например, снижение радиоактивности и тепловой нагрузки и появление достаточного времени на разработку технологий), эти выгоды могут быть в полной мере реализованы только при наличии ясно определенной конечной точки и стратегии ее достижения. Без ясно определенной конечной точки как одной из целей ООТ будет строиться не иначе как по принципам «поживем — увидим» или «нашел неполадку — устранил». И то, и другое может оказаться весьма дорогостоящим в том случае, если потребуются внести изменения в схемы хранения или устройство хранилищ, например в результате непредвиденной деградации отработавшего топлива или компонентов упаковки, либо изменения в политику или требования в отношении отработавшего топлива.

7.2. ЯСНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ И ПОДОТЧЕТНОСТЬ ЗА ОТРАБОТАВШЕЕ ТОПЛИВО

В национальной политике устанавливается ответственность, подотчетность и обязанности учреждений, отвечающих за каждую часть ядерного топливного цикла и за каждый вид деятельности в рамках ООТ. За принятие решений, касающихся характеристик отработавшего топлива и схемы и условий его хранения, нередко отвечают разные учреждения. Это решения о конструкции твэлов (например, выбор материалов для топлива и оболочки и методы изготовления), эксплуатации реактора (например, глубина выгорания) и ООТ (например, схема упаковки и условия хранения).

Как правило, каждое учреждение принимает решения, оптимизирующие работу, имеющую отношение к его обязанностям. Так, проектировщики твэлов и операторы реакторов, скорее всего, оптимизируют конструкцию твэлов и эксплуатационные параметры для наиболее эффективного производства энергии. Эта тенденция к локальной оптимизации может ограничить круг вариантов хранения и захоронения либо привести к излишнему росту стоимости и сложности.

Политика, устанавливающая ответственность, подотчетность и обязанности, влияет на временные рамки ООТ и принимаемые в этой связи решения. Как отмечается в разделе 5, принимаемые в рамках ООТ решения о том, когда и каким образом упаковывать отработавшее топливо, могут существенно повлиять на стоимость и варианты будущего хранения, перевозки и захоронения. Существует ряд стратегий, и соответствующая стоимость и преимущества каждой зависят от длительности хранения отработавшего топлива и от того, кто за него платит, кто платит за упаковку и, при необходимости, переупаковку и кто платит за захоронение. Кроме того, если хранение может быть централизованным, то существуют различные варианты хранения и упаковки. Каждое из этих соображений является в первую очередь вопросом политики.

Как отмечается в разделе 8.1, важно разрабатывать и проводить в жизнь такую политику в отношении отработавшего топлива, которая побуждала бы всех участников ядерного топливного цикла применять комплексный подход и принимать такие решения, в которых надлежащим образом учитывались бы другие стадии топливного цикла, а также влияние на эффективное достижение конечной точки. Поскольку ответственность за обращение с топливом в долгосрочной перспективе в конечном счете возьмет на себя правительство, в политике должны учитываться преимущества создания инфраструктуры, облегчающей централизованное обращение и хранение на соответствующей стадии ООТ.

7.3. УСТОЙЧИВОЕ ОБРАЩЕНИЕ С ОТРАБОТАВШИМ ТОПЛИВОМ

Как отмечается в разделе 2.2, продление периодов хранения отработавшего топлива не следует рассматривать как перенос ненужного бремени на будущие поколения, если вместе с ним также передаются средства для достижения приемлемой конечной точки. Это будет включать в себя, среди прочего, необходимые финансовые ресурсы, инфраструктуру управления и регулирования, технические средства, а также учетную документацию и информацию [10].

Для государств с небольшими ядерными программами, которым могут потребоваться десятилетия ядерной электрогенерации для того, чтобы накопить необходимый капитал для достижения конечной точки, этот подход может оказаться привлекательным или даже необходимым. Например, в Нидерландах было спроектировано и построено хранилище, предназначенное для хранения ВАО в течение как минимум 100 лет в целях завершения разработок и накопления за этот 100-летний период средств, позволяющих будущему поколению решить, стоит ли ему двигаться к конечной точке, продолжать хранение (с соответствующим обновлением и повторным лицензированием) или рассмотреть другие альтернативы, которые могут появиться в тот момент.

Этот подход можно рассматривать как средство, дающее возможность будущим поколениям принять свои собственные решения в отношении дальнейшего хранения, полезного повторного использования или достижения конечной точки в контексте гипотетических рисков, общественных потребностей и ценностей, а также технологий, которые появятся в будущем. Однако предоставление права выбора будущим поколениям чревато определенными рисками. Создание надлежащей инфраструктуры и финансовых резервов гарантирует устойчивость только в условиях экономической и политической стабильности. Кроме того, государства могут неверно оценить объем необходимых ресурсов или свою способность сохранить их. Будущие поколения могут потерять или растратить эти ресурсы, тем самым лишив другие будущие поколения тех же возможностей. Это вполне резонные соображения, которые должны будут взвесить политики. Однако если отработавшее топливо считается ценным ресурсом, маловероятно, чтобы хранение отработавшего топлива стало бременем для будущих поколений.

7.4. МНОГОНАЦИОНАЛЬНЫЕ ПОДХОДЫ

С централизацией хранения отработавшего топлива (см. раздел 4.3) в одном или нескольких региональных хранилищах связан ряд преимуществ. Многонациональные хранилища отработавшего топлива, принимающие топливо от ряда стран, могут дать аналогичные преимущества в более крупном масштабе. Экономическая сторона работы многонационального хранилища отработавшего топлива может быть особенно благоприятной для стран, находящихся в непосредственной близости друг к другу или имеющих сравнительно небольшие ядерные программы. Вместе с тем такое хранилище может создать дополнительные проблемы в плане учета уникальных ценностей нескольких стран и решения более сложных политических, правовых и финансовых задач.

7.5. СТАБИЛЬНАЯ ДОЛГОСРОЧНАЯ ПОЛИТИКА

Как оказалось, выбор площадок под ядерные установки, их проектирование и лицензирование может занимать многие десятилетия и иметь относительно невысокие гарантии успеха — главным образом из-за проблем с социальной приемлемостью и изменений в поддержке на политическом уровне, которые происходят в течение этих сроков. Как показал опыт, политика, основанная на попытках прогнозировать будущие результаты или выстраивать законодательство на этой базе, не дает особого эффекта.

Проведение стабильной политики в области ООТ оказалось непростым делом для многих государств. Отношение общества к ядерной энергетике менялось от безудержного оптимизма в 1950-е годы к неоправданному страху в 1980-е годы и вновь к осторожному оптимизму. Эти циклы были несколько разными в каждой отдельной стране, и на них оказывали влияние ядерные аварии, в том числе на АЭС «Три Майл Айленд», Чернобыльской АЭС и АЭС «Фукусима-дайти», а также стоимость и доступность других источников энергии. На отношение к ядерной энергетике по-прежнему сильно влияет общественное мнение и другие факторы, которые не способствуют долгосрочной стабильности ядерной политики. Таким образом, эффективная политика в области ООТ должна быть защищена от кратковременных или спровоцированных разного рода событиями политических реакций и колебаний общественного мнения, но при этом оставаться восприимчивой к долгосрочным изменениям в базовых общественных ценностях⁶.

Недавние прогнозы роста ядерной энергетики базировались главным образом на росте спроса на энергоресурсы, обусловленном все более широким признанием необходимости сократить выбросы диоксида углерода и других парниковых газов наряду с признанием ограниченной доступности органического топлива, высокой стоимости и низкой масштабируемости возобновляемых источников энергии. Сравнение долгосрочных рисков ядерной энергетике с долгосрочными рисками будущих энергосистем, не включающих в себя энергию атома, похоже, открывает благоприятные перспективы для увеличения производства энергии на АЭС. Важно, чтобы эта долгосрочная перспектива внимательно учитывалась и включалась в политику в области ООТ.

В прошлом делались попытки спрогнозировать вполне определенное будущее для обращения с отработавшим топливом и его побочными продуктами. Однако из-за неспособности учесть последствия непредвиденных событий и изменений в политике это было нередко сопряжено со значительными затратами и задержками. Признав непредсказуемость будущей политики, многие государства взяли теперь за разработку поэтапных, адаптивных стратегий, предполагающих движение к конечной точке медленными, выверенными шагами. Этот подход дает время обществу и политикам ознакомиться с проблемами, технологиями, затратами и выгодами и выработать взаимоприемлемые договоренности, прежде чем давать согласие на дальнейшие действия. Стабильная, долгосрочная политика скорее станет реальностью, если в нее будут включены тщательно продуманные положения, открывающие путь к медленной эволюции и адаптации по мере прояснения будущих перспектив.

ООТ — это программа на длительную перспективу. Условия, информация, имеющиеся ресурсы и технологии, политика и общественные ценности меняются с течением времени. Таким образом, необходимы периодические переоценки политики и ее воздействия на ООТ для обеспечения того, чтобы она поощряла применение объективного, вдумчивого и комплексного подхода к ООТ и гарантировала поступательное движение к конечной точке. В эффективных оценках будут учитываться реалистичные сроки и сценарии для переработки или захоронения отработавшего топлива наряду с соответствующими экологическими, финансовыми и общественными рисками и компромиссами. Наконец, такие оценки дают обществу уверенность в том, что волнующие его проблемы услышаны и надлежащим образом учтены.

⁶ Например, в связи с растущей озабоченностью террористическими угрозами, а также аварией на АЭС «Фукусима-дайти» политики в некоторых странах сочли, что мокрое хранение сопряжено с более высокими рисками, и ввели в действие правила, которые могут излишне ограничить возможные варианты хранения или повлечь за собой дополнительные затраты и облучение персонала без сопоставимых выгод с точки зрения безопасности [51].

7.6. СТАВКА НА КРАТКОСРОЧНЫЕ РЕШЕНИЯ

Создание достаточных мощностей по переработке или захоронению отработавшего топлива для достижения конечной точки для отработавшего топлива требует значительных капиталовложений в течение нескольких десятилетий. Кроме того, выбор площадки для пункта захоронения и его лицензирование сопряжены с большими техническими сложностями, не говоря уже о многих препятствиях социально-политического плана. С другой стороны, технологии хранения отработавшего топлива доказали свою безопасность и относительную экономичность. Следствием этого являются трудности с мобилизацией политической воли на выделение финансового и политического капитала, необходимого для достижения приемлемой конечной точки. Тем не менее затраты и риски, связанные с дальнейшим хранением отработавшего топлива, будут и далее возрастать по мере увеличения объемов и сроков хранения отработавшего топлива, и если их не сдерживать, то в конечном счете они превратятся в большую обузу для общества.

Накопление объемов хранящегося отработавшего топлива может считаться симптомом проблемы, для решения которой есть два пути — краткосрочный паллиатив и кардинальное решение. Кардинальное решение состоит в создании достаточных мощностей по переработке и захоронению. Оно капиталоемкое и требует проведения устойчивого, долгосрочного курса, прежде чем оно принесет выгоду. Таким образом, дальнейшая ставка на краткосрочное паллиативное решение о простом увеличении мощностей для хранения или продлении сроков хранения представляется весьма привлекательной. Однако несмотря на то, что это «симптоматическое лечение» дает немедленный эффект, оно, как правило, ведет к дальнейшему ослаблению политической воли, а со временем также и общественных ресурсов, необходимых для кардинального решения проблемы.

В динамике систем эту хорошо известную закономерность обычно называют «перекладыванием бремени»⁷. Хотя и признается, что симптоматические методы иногда бывают необходимыми в качестве временного решения для стабилизации системы или взятия «тайм-аута» до тех пор, пока не будет реализовано кардинальное решение, важно понимать и учитывать эту закономерность в поведении, поскольку обычно она ведет к неоднократному применению симптоматического метода, не являющегося устойчивым, подрывая способность к достижению окончательного решения.

В случае с ООТ профессиональный и этический долг состоит в том, чтобы обеспечить безопасное и эффективное хранение отработавшего топлива столько, сколько это необходимо. Однако создание мощностей для безопасного продления периодов хранения не должно использоваться как предлог для того, чтобы откладывать выполнение процедур, необходимых для достижения приемлемой конечной точки. Если кардинальное решение будет отложено, это приведет к резкому росту объемов отработавшего топлива и расходов на ООТ, что будет постепенно усложнять задачу обращения с отработавшим топливом. В зависимости от восприятия обществом рисков, связанным с глубоким геологическим захоронением, по сравнению с рисками, связанными с дальнейшим хранением отработавшего топлива, задержки с достижением конечной точки и растущие объемы отработавшего топлива могут также негативно отразиться на доверии общества, необходимом для движения вперед по направлению к окончательному решению. В этой связи следует сделать серьезное предупреждение о том, что политика, основанная на дальнейшем хранении отработавшего топлива, будучи сегодня необходимой, все же нуждается в регулировании таким образом, чтобы обеспечить твердый настрой на выработку устойчивого курса в области ООТ.

⁷ См. www.systems-thinking.org/theWay/ssb/sb.htm

8. ДРУГИЕ КЛЮЧЕВЫЕ СООБРАЖЕНИЯ

8.1. УПРАВЛЕНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯМИ НА ПРОТЯЖЕНИИ ТОПЛИВНОГО ЦИКЛА

Ядерный топливный цикл включает в себя три основных стадии: начальную стадию, эксплуатацию реактора и конечную стадию. Эти стадии подразделяются на тесно связанные между собой дискретные этапы (например, хранение, перевозку и переработку или захоронение на конечной стадии). Решения, соображения и имеющиеся варианты на каждой стадии могут не только ограничиваться теми, которые были приняты на предыдущих стадиях, но и влиять на те, которые будут приняты на последующих стадиях. В знак признания этого в статье 5 директивы Совета ЕС 2011/70/Euratom от 19 июля 2011 года, устанавливающей основные положения Сообщества по ответственному и безопасному обращению с отработавшим топливом и радиоактивными отходами [52], говорится следующее:

«1. Государства-члены создают и актуализируют национальную законодательную, регулируемую и организационную основу («национальную основу») обращения с отработавшим топливом и радиоактивными отходами, которая наделяет ответственностью соответствующие компетентные органы и обеспечивает координацию между ними».

В статье 4(3) [52] говорится: «Национальная политика должна основываться на следующих принципах: ... б) должна учитываться взаимозависимость между всеми этапами генерации отработавшего топлива и радиоактивных отходов и обращения с ними». Некоторые регулирующие основы или неодинаковые подходы и методы обеспечения безопасности при перевозке, хранении и переработке или захоронении отработавшего топлива могут породить проблемы совместимости, вследствие которых могут вырасти затраты или риски при продлении периодов хранения отработавшего топлива. Например, в решениях, касающихся проектирования, эксплуатации и регулирования, могут не всегда учитываться сценарии, при которых отработавшее топливо хранится в опечатанных канистрах в течение длительного времени. Вследствие этого может возникнуть необходимость в инспектировании упаковок и ОТВС, а, возможно, и в переупаковке в целях соблюдения будущих требований к хранению, перевозке или захоронению.

Одна из главных сложностей с принятием грамотных решений в отношении безопасного, надежного, эффективного и устойчивого ООТ связана с тем, что необходимо четко прояснить общую ответственность, подотчетность и подконтрольность на всех стадиях, включая переработку или захоронение отработавшего топлива. Если разделить эту ответственность между разными стадиями топливного цикла без достаточного взаимодействия между заинтересованными сторонами, это будет способствовать принятию разрозненных решений, которые могут ограничить круг будущих вариантов и увеличить затраты в течение всего жизненного цикла. По мере увеличения периодов хранения отработавшего топлива все более важное значение будет приобретать комплексный подход к управлению всем топливным циклом. Он позволяет принимать решения, в которых учитывается весь жизненный цикл, и не поощряет локальной оптимизации, достигаемой ценой общего ухудшения функционирования системы.

Интеграция таких аспектов управления жизненным циклом, как проектирование, эксплуатация, регулирование и политика, дает возможность принимать решения, обеспечивающие совместимость материалов, операций, оборудования, упаковки и форм отходов с будущими шагами в области ООТ, что ведет к снижению рисков и затрат в течение жизненного цикла. Например, решения, касающиеся предполагаемых сроков и требований приемлемости пунктов геологического захоронения, повлияют на соответствующие преимущества и недостатки различных схем хранения. Эти технологические решения в отношении хранения, в свою очередь, существенно повлияют на объем затрат на продление сроков хранения и его последствия. Решения по технологии

хранения могут также повлиять на критерии проектирования, возможные варианты и затраты на проектирование и размещение будущих пунктов захоронения. Такая взаимозависимость в рамках ядерного топливного цикла актуальна для всех стадий ядерного топливного цикла. Воздействие на различные стадии топливного цикла можно проиллюстрировать, в частности, следующими примерами.

- a) Изготовление топлива и регулирование режима и эксплуатация активной зоны реактора: энергопредприятия регулируют эксплуатационные расходы, поддерживая при этом высокие стандарты надежности и безопасности. Краткосрочные соображения стоимости подталкивают к применению таких конструкций и параметров эксплуатации твэлов, которые позволяют добиться большей глубины выгорания и минимизировать повреждения топлива. Это дает толчок дальнейшей разработке и использованию новых конструкций и усовершенствованных материалов топлива, оболочки и конструкций сборок, а также водно-химических режимов теплоносителя реактора. Изменения в этих параметрах могут повлиять на структурные и коррозионные свойства материала отработавшего топлива и оболочки и тем самым — на имеющиеся варианты и стоимость длительного хранения и последующей перевозки.
- b) Хранение отработавшего топлива: взаимозависимость между хранением и последующей отправкой на переработку или захоронение существенно влияет на решения о том, как и в какой момент помещать отработавшее топливо в упаковки. Например, существуют два принципиально разных подхода к проектированию и размещению пункта геологического захоронения. Один подход предполагает устройство оптимальной системы захоронения без ограничений, налагаемых существующими упаковками. Другой предполагает создание такой системы захоронения, в которую можно было бы помещать существующие упаковки с отработавшим топливом. Очевидно, что ведомство, отвечающее за работу пункта захоронения, предпочтет первый подход, а ведомство, отвечающее за хранение, — второй (т.е. помещение топлива в оптимальные упаковки с точки зрения хранения). Таким образом, если одно ведомство (например, энергопредприятие) отвечает за принятие решений о хранении отработавшего топлива, а другое (например, правительство) — за перевозку или захоронение, принимаемые решения относительно ООТ во время хранения вряд ли будут полностью учитывать последствия, которые наступят после хранения отработавшего топлива, и могут ограничить будущие расходы на перевозку и захоронение или сильно повлиять на них.
- c) Перевозка отработавшего топлива: лицензии на перевозку могут истечь, пока топливо находится на хранении, а требования к лицензиям на хранение и лицензиям на перевозку могут быть не полностью совместимыми. Таким образом, пока топливо находится на хранении, необходимо сохранять в силе лицензии как на перевозку, так и на хранение, что является обязательным требованием в некоторых государствах. В Японии, к примеру, был взят на вооружение комплексный подход с установлением 50-летнего срока действия лицензии на хранение и перевозку. Тот же принцип может применяться при продлении периодов хранения.
- d) Переработка отработавшего топлива: в операциях по переработке обычно используется неповрежденное топливо в целях уменьшения загрязнения при разгрузке транспортных упаковочных комплектов. В случае получения отработавшего топлива, которое могло повредиться во время хранения, в конструкцию и эксплуатацию пункта переработки может потребоваться внести изменения для предупреждения потенциального загрязнения. Кроме того, значительная деградация во время хранения может повлиять на переработку, если характеристика отработавшего топлива окажется сложной или дорогостоящей задачей.
- e) Захоронение отработавшего топлива: в современных проектах искусственно устроенных глубинных геологических хранилищ обычно используются утилизационные упаковки с меньшей тепловой нагрузкой, весом и устойчивостью к воздействию делящегося материала, чем у многих ныне используемых контейнеров двойного назначения. Тем не менее имеет

место тенденция к использованию контейнеров, которые позволяют сократить расходы на изготовление и эксплуатацию за счет максимального увеличения полезной нагрузки (т.е. увеличения размера и пределов термостойкости и стойкости к воздействию делящегося материала). Кроме того, пока не определены требования к материалам и конструкции, необходимые для удовлетворения критериев приемлемости пункта захоронения. В этой связи не исключено, что отработавшее топливо, ныне находящееся на хранении, потребует переупаковать перед захоронением⁸. Необходимость приема и переупаковки существующих канистр или утилизации канистр существующих конструкций может создать для оператора будущего глубинного геологического хранилища серьезные дополнительные трудности с точки зрения выбора площадки и проектирования.

8.2. ДОВЕРИЕ ОБЩЕСТВА

Доверие общества к ООТ — ключевой фактор при выборе площадок для пунктов хранения и захоронения и их лицензировании. Факторы, влияющие на доверие общества, широко изучались, и существует ряд ресурсов, призванных помочь в понимании и исследовании этой темы (см. [53]). Несмотря на это, обеспечение социальной приемлемости и, соответственно, одобрения на политическом уровне оказалось более сложной задачей, чем поддержание безопасности и физической безопасности. Сиборн [54] делает следующий вывод:

«обеспокоенность и дискомфорт у общества по поводу отработавшего ядерного топлива и ядерной энергетики в целом проистекают, в частности, из следующего:

- ассоциации с ядерным оружием и прошлыми катастрофами, такими как чернобыльская;
- таинственности, которой для большинства людей окружена реакция деления ядра, и долговечности радиации;
- боязни катастрофических последствий, если «что-то пойдет не так», хотя это «что-то» имеет малую статистическую вероятность;
- дискомфорта в отношении системы обращения с отходами, которая не предполагает бесконечно долгого наблюдения за тем, что происходит внутри пункта захоронения и в окружающей геосфере;
- неверия в способность ученых предсказать, что может произойти спустя десять тысяч лет;
- трудностей с определением того, как лучше всего защитить интересы будущих поколений при принятии нами сегодня решений по поводу произведенных нами ядерных отходов;
- ощущения, что должен существовать некий лучший и менее опасный способ генерации электроэнергии, в которой мы нуждаемся.

Часть этих страхов и скепсиса можно развеять на одном уровне при помощи научных аргументов. Однако озабоченность сохраняется, и она вполне реальна. Ей следует уделять серьезное внимание при выработке публичной политики в демократическом обществе».

8.2.1. Дилемма в связи с доверием общества

На доверие общества к обращению с отработавшим топливом и ВАО серьезно влияют гипотетические риски, а также отсутствие доверия к ООТ или непонимание этого процесса. Было

⁸ Было отмечено, что упаковка в меньшие по размеру канистры или контейнеры повысят шансы на совместимость с будущими схемами хранения, перевозки и захоронения. Использование меньших по размеру упаковок дает больше гибкости, но также ведет к росту затрат и эксплуатационных последствий без гарантии того, что такое вложение средств исключит необходимость будущей переупаковки.



Рис. 4. Доверие и реакция общества

сделано многое для передачи информации, обеспечения гарантий и демонстрации безопасности, чтобы напрямую отреагировать на эту озабоченность, но с точки зрения формирования доверия у общества мало что изменилось.

Неспособность заручиться достаточной поддержкой общества — постоянный источник трудностей, задержек и проблем с сохранением политической воли, необходимой для успешного размещения и лицензирования глубинного геологического хранилища для захоронения отработавшего топлива или ВАО. Невыполненные обязательства и сохраняющиеся трудности с осуществлением реальных шагов вперед укореняют существующие представления о рисках и еще больше подрывают веру общества в возможность устойчивого обращения с отработавшим топливом и ВАО, что ведет как к нарастанию объемов отработавшего топлива, так и к увеличению длительности хранения отработавшего топлива, усугубляя проблемы, связанные с размещением и лицензированием хранилищ отработавшего топлива. Этот круговой эффект показан на рис. 4. Парадоксален тот факт, что отсутствие доверия общества и политической воли для решения проблем ООТ может пройти полный круг и в конечном счете еще больше обострит ситуацию, помешав выработке долгосрочного решения. Вместе с тем на доверие общества влияют не только гипотетические риски, но и гипотетические выгоды, что означает, что обе эти области открывают возможности для укрепления доверия общества.

8.2.2. Гипотетические риски в противовес гипотетическим выгодам

Одно из главных наблюдений, которые можно сделать, глядя на рис. 4, состоит в том, что доверие общества есть по сути часть уравнения, в котором учитываются как риски, так и выгоды. Таким образом, хотя надлежащее функционирование систем безопасности и необходимо, одного лишь сокращения рисков и гипотетических рисков вряд ли будет достаточно для обращения вспять этого цикла. Для этого потребуются также признать и оценить выгоды⁹. Для формирования доверия

⁹ На гипотетические риски и выгоды влияет множество факторов; например, на восприятие риска влияет уровень знаний о ядерных явлениях, доверие к ведомствам, занимающимся ядерными вопросами, и репутация с точки зрения ядерной безопасности, а также многое другое. На восприятие выгод от ядерной энергии влияют потребности в энергии и затраты на нее.

у общества необходимо, чтобы общество, в зависимости от его ценностей, признало возможность для извлечения реальных выгод либо для предотвращения реальных затрат. Без подобного стимула у него не будет побудительного мотива занять ту или иную позицию.

Хотя доверие общества оказалось относительно слабо восприимчивым к прошлым попыткам отстоять или улучшить репутацию в плане поддержания ядерной безопасности, оно также доказало свою восприимчивость к выгодам от ядерной энергетики, о чем говорит рост уровня общественной поддержки во многих странах¹⁰. Дело обстоит именно так даже после осознания последствий цунами и последующих повреждений, причиненных АЭС «Фукусима-дайити». Недавние изменения в отношении общества к ядерной энергии обусловлены в основном признанием выгод от ядерной энергетики в сравнении с другими технологиями крупномасштабного производства энергии (например, крайне низкий уровень выбросов углерода в течение жизненного цикла и повышенная энергетическая безопасность).

Отработавшее топливо может и должно быть предметом безопасного обращения. Однако доверие общества определяется не только гипотетическими рисками, но и гипотетическими выгодами. Как показывает опыт, одной лишь высокой репутации в плане поддержания ядерной безопасности недостаточно для того, чтобы завоевать доверие общества. Необходимо также учитывать выгоды, соизмеримые с гипотетическими рисками. Для формирования доверия общества, необходимого для эффективного размещения и эксплуатации хранилищ отработавшего топлива, выгоды от ядерной энергетики должны также признаваться и оцениваться обществом. Население, оказывающее необходимые услуги, должно получать и соответствующие выгоды. Эффективные процессы выбора площадки основываются на использовании выгод, чтобы жители населенных пунктов, выбранных для размещения пунктов ООТ, могли чувствовать себя победителями, а не проигравшими.

К преимуществам ядерной энергетики относится надежность, низкий уровень выбросов углерода, стабильные долгосрочные поставки топлива, географическая гибкость и превосходная репутация с точки зрения защиты экологии и безопасности. Выгоды для жителей населенных пунктов, где размещаются хранилища отработавшего топлива, которые могут сохраняться еще долгое время после создания хранилища, включают в себя прочное экономическое положение благодаря росту занятости, инфраструктуре и другим стимулам, связанным с размещением хранилища. Однако для того, чтобы реализовать эти выгоды и завоевать необходимое доверие для осуществления дальнейших шагов, потребуются дальнейшие усилия по более основательному изучению и более эффективному разъяснению соответствующих проблем, получению таких выгод, которые были бы стабильными и не зависели от неопределенных экономических и политических условий, и политическая воля к осуществлению долгосрочных инвестиций и принятию долгосрочных обязательств, необходимых для уверенного следования выбранному курсу.

8.2.3. Социальная приемлемость и продление периодов хранения отработавшего топлива

Решение о генерации и использовании ядерной энергии означает, что общество берет на себя долгосрочную ответственность за генерируемое отработавшее топливо (т.е. за безопасное хранение, переработку или захоронение). Даже в тех государствах, которые решили отказаться от ядерной энергетики, накоплены запасы отработавшего топлива и ВАО вследствие прошлого использования, а во всем мире продолжают производиться большие объемы отработавшего топлива.

Хранение отработавшего топлива является важной частью ядерного топливного цикла, и продление периодов такого хранения может принести ряд выгод с точки зрения ООТ в целом. Дополнительное время на охлаждение позволит снизить уровень тепла и радиации и уменьшить связанные с этим ограничения в плане безопасности и проектирования. Это также полезно с точки зрения разработки и введения в действие политики в области ООТ и соответствующих технологий.

¹⁰ См. www.foratom.org/publications/#topical_publications

Несмотря на эти потенциальные выгоды, продление периодов хранения отработавшего топлива может также рассматриваться как первый шаг по пути к дальнейшему откладыванию решений, которое, по сути, превращает хранилище в пункт захоронения. Чиновникам нелегко противопоставить что-либо такой точке зрения в том случае, если у них нет твердых планов создания глубинного геологического хранилища или если страна ранее уже не выполняла прошлых обещаний утилизировать отработавшее топливо.

Те же факторы, которые обуславливают необходимость дальнейшего хранения (т.е. отсутствие ясно определенной конечной точки либо задержки с ее достижением), также порождают проблемы с получением одобрения общества как на размещение новых хранилищ отработавшего топлива, так и на продление лицензий существующих хранилищ. В отсутствие инициативных мер по организации обращения с отработавшим топливом, нацеленного на достижение ясной и заслуживающей доверия конечной точки, такой как переработка или захоронение, дальнейшее хранение отработавшего топлива будет, скорее всего, расценено как результат неадекватной или неудачной политики. Общество вряд ли поверит в необходимость и выгодность продления сроков хранения отработавшего топлива, если это будет рассматриваться как нежелательный, но необходимый временный шаг, вызванный отсрочкой с принятием решений или отсутствием альтернатив.

Хотя за размещение у себя глубинных геологических хранилищ борются многие государства, между государствами, которым удалось добиться более высокой степени общественной и политической поддержки, прослеживается много общего. Эти уроки могут быть также учтены при выборе площадок для новых хранилищ отработавшего топлива и продлении лицензий у существующих. Тех, кто успешно продвигается вперед, объединяет то, что процесс выбора площадки не был принудительным и не навязывался обществу; напротив, общество само участвовало в этом выборе на основе открытого диалога, учитывающего как риски, так и выгоды (см. [55]). Другие факторы включают:

- a) заблаговременную и регулярную передачу организациями, ответственными за ООТ, а также регулирующими органами объективной информации в ответ на озабоченность общества и недоверие с его стороны;
- b) последовательный процесс, в ходе которого местное население получает знания и представления о рисках, а также осознает и начинает извлекать выгоды еще до того, как полностью согласится с предложенным курсом.

В центре внимания находятся жители мест, где уже размещены ядерные установки. Они рискуют больше других, и они лучше знакомы с ядерной энергетикой и связанными с ней рисками. Как показывает мировой опыт, процесс выбора площадки идет наиболее динамично именно в таких местах.

Внимательно изучив международные программы создания пунктов захоронения, Комиссия независимых экспертов (Соединенные Штаты Америки) «рекомендует выбирать площадки таким образом, чтобы этот процесс основывался на согласии, был прозрачным, поэтапным, адаптивным, научно обоснованным и опирался на стандарты, а также регулировался юридически обязательными соглашениями между федеральным правительством и органами власти тех мест, где будут сооружаться объекты» [8].

8.3. ВЕДОМСТВЕННЫЙ КОНТРОЛЬ.

В отличие от пункта захоронения, хранилище отработавшего топлива будет по определению оставаться предметом ведомственного контроля до достижения приемлемой конечной точки. К применимым средствам ведомственного контроля относится весь спектр регулирующих требований, рассмотренных в разделе 6. Как отмечается в разделе 6.2, регулирующая основа,

базирующаяся на периодическом обновлении лицензий, не должна предопределять, сколько времени может продлиться период хранения. Каждое обновление предполагает независимое подтверждение того, что организационные, финансовые, технические и материальные требования, необходимые для обеспечения безопасности в течение всего лицензионного периода, соблюдены. Это несколько напоминает то, как лицензируются самолеты и автотранспортные средства. Они не снимаются с эксплуатации принудительно только на основании истекшего срока службы, а продолжают эксплуатироваться до тех пор, пока соблюдаются применимые требования. Кроме того, процесс периодического продления лицензий дает возможность для развития средств ведомственного контроля сообразно изменению общественных потребностей и ценностей, а также для учета новых технологий и альтернатив, которые могут появиться.

Потенциальная проблема, связанная с необходимостью повторного лицензирования для оценки и подтверждения того, что хранение отработавшего топлива продолжает отвечать применимым требованиям, состоит в том, что, если требования не соблюдаются, невыдача лицензии на хранение сама по себе не устранит риска. Если лицензиат по той или иной причине оказывается неспособен к дальнейшей надлежащей работе по лицензии, ответственность за соблюдение требований и обеспечение безопасности в конечном счете ложится на правительство. В этой связи еще более важной становится необходимость четкого определения границ ответственности и обязанностей, а также предоставления соответствующих финансовых гарантий. В обществе имеется ряд аналогов, где ведомственный контроль сохранялся на протяжении столетий. Тюремь, учреждения образования и здравоохранения, искусство, религия и культурные традиции существуют на протяжении многих поколений¹¹. Общество уделяет внимание вопросам, считающимся важными, и поэтому можно ожидать, что отработавшее топливо будет оставаться предметом ведомственного контроля до тех пор, пока оно будет считаться представляющим опасность. Отработавшее топливо будет представлять опасность на протяжении многих столетий, и поэтому вопрос о ведомственном контроле становится по большей части вопросом надлежащего применения принципов этики и устойчивости — для целенаправленного обеспечения того, чтобы это бремя не было передано будущим поколениям. Что касается продления сроков хранения отработавшего топлива, то надлежащая организация ведомственного контроля — это по большей части вопрос изыскания необходимых финансовых, кадровых и технических ресурсов для безопасного и эффективного хранения и захоронения или переработки отработавшего топлива и утилизации всех связанных с ним отходов. Таким образом, в процессе повторного лицензирования для продления периодов хранения отработавшего топлива необходимо периодически оценивать состояние этих ресурсов и инфраструктуру для поддержания их на достаточном уровне.

Ввиду долговременного характера этой опасности, неизвестной продолжительности хранения и неопределенности по поводу последующих стадий ООТ особый интерес представляет сохранение документов, знаний и памяти. Агентство по ядерной энергии ОЭСР развернуло многодисциплинарную работу, нацеленную на усиление взаимодействия и выявление передовых наработок в деле составления и реализации планов сохранения документов, знаний и памяти¹². Хотя она посвящена главным образом процессам, связанным с созданием и функционированием пункта геологического захоронения, многие принципы и извлеченные уроки могут быть применены и к длительному хранению отработавшего топлива.

¹¹ В качестве примеров можно привести: Компанию Гудзонова залива, образованную в 1670 году (Канада); постоянный уход за подземными горными выработками в Париже с 1400-х годов в целях обеспечения безопасности (Франция); церемонию Сикинен-Сенгу в святилище Исэ-Дзингу, которое перестраивается каждые 20 лет начиная с 700-х годов (Япония).

¹² См. www.oecd-nea.org/rwm/rkm

СПРАВОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

- [1] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Nuclear Fuel Cycle Objectives, IAEA Nuclear Energy Series No. NF-O, IAEA, Vienna (2013).
- [2] ЕВРОПЕЙСКОЕ СООБЩЕСТВО ПО АТОМНОЙ ЭНЕРГИИ, ПРОДОВОЛЬСТВЕННАЯ И СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННАЯ ОРГАНИЗАЦИЯ ОБЪЕДИНЕННЫХ НАЦИЙ, МЕЖДУНАРОДНОЕ АГЕНТСТВО ПО АТОМНОЙ ЭНЕРГИИ, МЕЖДУНАРОДНАЯ ОРГАНИЗАЦИЯ ТРУДА, МЕЖДУНАРОДНАЯ МОРСКАЯ ОРГАНИЗАЦИЯ, АГЕНТСТВО ПО ЯДЕРНОЙ ЭНЕРГИИ ОЭСР, ПАНАМЕРИКАНСКАЯ ОРГАНИЗАЦИЯ ЗДРАВООХРАНЕНИЯ, ПРОГРАММА ОРГАНИЗАЦИИ ОБЪЕДИНЕННЫХ НАЦИЙ ПО ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЕ, ВСЕМИРНАЯ ОРГАНИЗАЦИЯ ЗДРАВООХРАНЕНИЯ, основополагающие принципы безопасности, Серия норм безопасности МАГАТЭ, № SF-1, МАГАТЭ, Вена (2007).
- [3] OECD NUCLEAR ENERGY AGENCY, The Roles of Storage in the Management of Long-lived Radioactive Waste: Practices and Potentialities in OECD Countries, OECD, Paris (2006).
- [4] МЕЖДУНАРОДНОЕ АГЕНТСТВО ПО АТОМНОЙ ЭНЕРГИИ, Глоссарий МАГАТЭ по вопросам безопасности: терминология, используемая в области ядерной безопасности и радиационной защиты, издание 2007 года, МАГАТЭ, Вена (2008).
- [5] МЕЖДУНАРОДНОЕ АГЕНТСТВО ПО АТОМНОЙ ЭНЕРГИИ, Обзор ядерных технологий — 2015, МАГАТЭ, Вена (2015).
- [6] ELECTRIC POWER RESEARCH INSTITUTE, Nuclear Sector Roadmaps: Used Fuel and High-Level Waste Management, EPRI, Palo Alto, CA (2013).
- [7] NUCLEAR REGULATORY COMMISSION, Plan for the Long-term Update to the Waste Confidence Rule and Integration with the Extended Storage and Transportation Initiative, Rep. SECY-11-0029, Office of Nuclear Material Safety and Safeguards, Washington, DC (2011).
- [8] UNITED STATES DEPARTMENT OF ENERGY, Strategy for the Management and Disposal of Used Nuclear Fuel and High-Level Radioactive Waste, USDOE, Washington, DC (2013).
- [9] CARLSEN, B., et al., “Challenges Associated with Extending Spent Fuel Storage until Reprocessing or Disposal”, Safety of Long-term Interim Storage Facilities (Proc. Workshop, Munich, 2013), OECD, Paris (2013) 43–60.
- [10] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Storage of Spent Nuclear Fuel, IAEA Safety Standards Series No. SSG-15, IAEA, Vienna (2012).
- [11] Международное состояние и перспективы ядерной энергетики – 2012: доклад Генерального директора, GOV/INF/2012/12-GC(56)/INF/6, МАГАТЭ, Вена (2012).
- [12] Объединенная конвенция о безопасности обращения с отработавшим топливом и о безопасности обращения с радиоактивными отходами, INFCIRC/546, МАГАТЭ, Вена (1997).
- [13] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Ageing Management and Development of a Programme for Long Term Operation of Nuclear Power Plants, IAEA Safety Standards Series No. SSG-48, IAEA, Vienna (2018).
- [14] NUCLEAR REGULATORY COMMISSION, Standard Review Plan for Review of License Renewal Applications for Nuclear Power Plants, Rep. NUREG-1800, Rev. 2, Office of Nuclear Reactor Regulation, Washington, DC (2010).
- [15] NUCLEAR REGULATORY COMMISSION, Generic Aging Lessons Learned (GALL) Report, Rep. NUREG-1801, Rev. 2, Office of Nuclear Reactor Regulation, Washington, DC (2010).
- [16] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Plant Life Management for Long Term Operation of Light Water Reactors: Principles and Guidelines, Technical Reports Series No. 448, IAEA, Vienna (2006).
- [17] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Plant Life Management Models for Long Term Operation of Nuclear Power Plants, IAEA Nuclear Energy Series No. NP-T-3.18, IAEA, Vienna (2015).
- [18] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Understanding and Managing Ageing of Material in Spent Fuel Storage Facilities, Technical Reports Series No. 443, IAEA, Vienna (2006).
- [19] TAKEDA, H., WATARU, M., SHIRAI, K., SAEGUSA, T., Development of the detecting method of helium gas leak from canister, Nucl. Eng. Des. 238 (2008) 1220–1226.
- [20] MATSUMURA, T., SASAHARA, A., NAUCHI, Y., SAEGUSA, T., Development of monitoring technique for the confirmation of spent fuel integrity during storage, Nucl. Eng. Des. 238 (2008) 1260–1263.
- [21] ARGONNE NATIONAL LABORATORY, Managing Aging Effects on Dry Cask Storage Systems for Extended Long-term Storage and Transportation of Used Fuel, Rev. 0, ANL (2012).
- [22] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, Standard Guide for Evaluation of Materials Used in Extended Service of Interim Spent Nuclear Fuel Dry Storage Systems, ASTM C1562-10(2018), ASTM, West Conshohocken, PA (2010).

- [23] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, Standard Practice for Evaluation of the Long-Term Behavior of Materials Used in Engineered Barrier Systems (EBS) for Geological Disposal of High-level Radioactive Waste, ASTM C1174-17, ASTM, West Conshohocken, PA (2017).
- [24] NUCLEAR REGULATORY COMMISSION, Standard Review Plan for Renewal of Spent Fuel Dry Cask Storage System Licenses and Certificates of Compliance, Rep. NUREG-1927, Office of Nuclear Material Safety and Safeguards, Washington, DC (2011).
- [25] NUCLEAR REGULATORY COMMISSION, Dry Cask Storage Characterization Project — Phase 1: CASTOR V/21 Cask Opening and Examination, Rep. NUREG/CR-6745, Office of Nuclear Regulatory Research, Washington, DC (2001).
- [26] NUCLEAR REGULATORY COMMISSION, Examination of Spent PWR Fuel Rods after 15 Years in Dry Storage, Rep. NUREG/CR-6831, Office of Nuclear Regulatory Research, Washington, DC (2003).
- [27] ELECTRIC POWER RESEARCH INSTITUTE, Dry Cask Storage Characterization Project, Rep. 1002882, EPRI, Palo Alto, CA (2002).
- [28] HANSON, B., et al., Gap Analysis to Support Extended Storage of Used Nuclear Fuel, Rev. 0 (2012).
- [29] UNITED STATES NUCLEAR WASTE TECHNICAL REVIEW BOARD, Evaluation of the Technical Basis for Extended Dry Storage and Transportation of Used Nuclear Fuel, NWTRB, Arlington, VA (2010).
- [30] NUCLEAR REGULATORY COMMISSION, Materials Aging Issues and Aging Management for Extended Storage and Transportation of Spent Nuclear Fuel, Rep. NUREG/CR-7116, Office of Nuclear Material Safety and Safeguards, Washington, DC (2011).
- [31] ELECTRIC POWER RESEARCH INSTITUTE, Extended Storage Collaboration Program (ESCP): Progress Report and Review of Gap Analyses, Technical Report 1022914, EPRI, Palo Alto, CA (2011).
- [32] ELECTRIC POWER RESEARCH INSTITUTE, Extended Storage Collaboration Program: International Subcommittee Report — International Perspectives on Technical Data Gaps Associated with Extended Storage and Transportation of Used Nuclear Fuel, Technical Report 1026481, EPRI, Palo Alto, CA (2012).
- [33] NUCLEAR REGULATORY COMMISSION, Identification and Prioritization of the Technical Information Needs Affecting Potential Regulation of Extended Storage and Transportation of Spent Nuclear Fuel, NRC, Washington, DC (2012).
- [34] STOCKMAN, C.T., HANSON, B.D., ALSAED, A.A., “Used nuclear fuel storage and transportation data gap prioritization”, Integrating Storage, Transportation, and Disposal (Proc. 14th Int. High-level Radioactive Waste Management Conf. Albuquerque, 2013), Vol. 1, Curran Associates, Red Hook, NY (2013) 503–508.
- [35] BLUE RIBBON COMMISSION ON AMERICA’S NUCLEAR FUTURE, Report to the Secretary of Energy, United States Department of Energy, Washington, DC (2012).
- [36] XIHUA HE, et al., Development and Evaluation of Cask Demonstration Programs (2011).
- [37] NICHOL, M., et al., “Concept plan for a high burn-up fuel storage and transportation confirmatory data project”, Integrating Storage, Transportation, and Disposal (Proc. 14th Int. High-level Radioactive Waste Management Conf. Albuquerque, 2013), Vol. 1, Curran Associates, Red Hook, NY (2013) 94–103.
- [38] WEAVER, D., “Future licensing strategies for the storage and transportation of spent fuel”, presentation at the 27th Spent Fuel Management Sem. Arlington, 2012.
- [39] EASTON, E.P., BAJWA, C.S., ZHIAN LI, GORDON, M., “Licensing strategies for the future transportation of high burnup spent nuclear fuel”, presentation at the ASME 2012 Pressure Vessels and Piping Division Conf. Toronto, 2012.
- [40] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Survey of Wet and Dry Spent Fuel Storage, IAEA-TECDOC-1100, IAEA, Vienna (1999).
- [41] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Facility Design and Plant Operations Features that Facilitate the Implementation of IAEA Safeguards, STR-360, IAEA, Vienna (2009).
- [42] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, International Safeguards in Nuclear Facility Design and Construction, IAEA Nuclear Energy Series No. NP-T-2.8, IAEA, Vienna (2013).
- [43] INTERNATIONAL PANEL ON FISSILE MATERIALS, Managing Spent Fuel from Nuclear Power Reactors: Experience and Lessons from Around the World, IPFM (2011).
- [44] МЕЖДУНАРОДНОЕ АГЕНТСТВО ПО АТОМНОЙ ЭНЕРГИИ, Оценка площадок для ядерных установок, Серия норм безопасности МАГАТЭ, № NS-R-3 (Rev. 1), МАГАТЭ, Вена (2016).
- [45] UNITED STATES GOVERNMENT ACCOUNTABILITY OFFICE, Commercial Nuclear Waste: Effects of a Termination of the Yucca Mountain Repository Program and Lessons Learned, GAO-11-229, GAO, Washington, DC (2011).
- [46] NUCLEAR REGULATORY COMMISSION, White Paper on Risk-informed and Performance-based Regulation, SECY-98-144, NRC, Washington, DC (1999).

- [47] NUCLEAR REGULATORY COMMISSION, Disposal of High-level Radioactive Wastes in a Geologic Repository at Yucca Mountain, Nevada, 10 CFR 63.
- [48] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Status and Trends in Spent Fuel Reprocessing, IAEA-TECDOC-1467, IAEA, Vienna (2005).
- [49] SON H. KIM, WADA, K., KUROSAWA, A., ROBERTS, M., Nuclear energy response in the EMF27 study, *Clim. Change* 123 (2014) 443–460.
- [50] МЕЖДУНАРОДНОЕ АГЕНТСТВО ПО АТОМНОЙ ЭНЕРГИИ, Политика и стратегии обращения с радиоактивными отходами, МАГАТЭ, Серия изданий МАГАТЭ по ядерной энергии, № NW-G-1.1, МАГАТЭ, Вена (2012).
- [51] “Risks and benefits of accelerated fuel transfer examined”, *Nucl. News* 55 (2012) 38–41.
- [52] Council Directive 2011/70/Euratom of 19 July 2011 establishing a Community framework for the responsible and safe management of spent fuel and radioactive waste, *Official Journal of the European Union* No. L 199, Publications Office of the European Union, Luxembourg (2011).
- [53] OECD NUCLEAR ENERGY AGENCY, Stakeholder Confidence in Radioactive Waste Management: An Annotated Glossary of Key Terms, OECD, Paris (2013).
- [54] SEABORN, B., “Criteria for public support for a waste management concept: The Environmental Assessment Panel’s recommendations”, *Public Confidence in the Management of Radioactive Waste: The Canadian Context (Workshop Proc. Ottawa, 2002)*, OECD, Paris (2003) 71–74.
- [55] OECD NUCLEAR ENERGY AGENCY SECRETARIAT, “International perspective”, *Ibid.*, pp. 31–33.

БИБЛИОГРАФИЯ

Программы управления старением

BENDERESKAYA, O.S., et al., “Corrosion of research reactor Al-clad spent fuel in water, reduced enrichment for research and test reactors” (Proc. Int. Mtg San Carlos de Bariloche, 2002).

BERNSTEIN, R., GILLEN K.T., Fluorosilicone and Silicone O-ring Aging Study, Sandia Report SAND2007-6781, Sandia National Laboratories, Albuquerque, NM (2007).

BILLINGTON, D.S., CRAWFORD, J.H., Radiation Damage in Solids, Princeton University Press, Princeton, NJ (1961).

BOLTON, G., “Innovative technologies for condition monitoring of waste containers”, paper presented at Nuclear Interim Storage 2011, London, 2011.

CALVERT CLIFFS NUCLEAR POWER PLANT, Calvert Cliffs Independent Spent Fuel Storage Installation Lead and Supplemental Canister Inspection Report, CCNPP (2012).

ELECTRIC POWER RESEARCH INSTITUTE (Palo Alto, CA)

Class I Structures License Renewal Industry Report, Rev. 1, TR-103842 (1994).

Technical Basis for Extended Dry Storage of Spent Nuclear Fuel, Rep. 1003416 (2002).

Effects of Marine Environments on Stress Corrosion Cracking of Austenitic Stainless Steels, Rep. 1011820 (2005).

Climatic Corrosion Considerations for Independent Spent Fuel Storage Installations in Marine Environments, Rep. 1013524 (2006).

ERHARD, A., VÖLZKE, H., WOLFF, D., “Ageing management”, paper presented at IAEA Tech. Mtg on Very Long Term Storage of Used Nuclear Fuel, Vienna, 2011.

NUCLEAR WASTE MANAGEMENT COMMISSION ESK (Bonn)

ESK Recommendations for Guides to the Performance of Periodic Safety Reviews for Interim Storage Facilities for Spent Fuel and Heat-generating Radioactive Waste (PSÜ-ZL) (2010).

Recommendation of the Nuclear Waste Management Commission (ESK): Guidelines for Dry Cask Storage of Spent Fuel and Heat-generating Waste (2013).

GILBERT, E., et al., Advances in technology for storing light water reactor spent fuel, Nucl. Technol. 89 (1990) 141–161.

HOFFMAN, E.N., SKIDMORE, T.E., DAUGHERTY, W.L., DUNN, K.A., Long Term Aging and Surveillance of 9975 Package Components, SRNL-STI-2009-00733, Savannah River National Laboratory, Aiken, SC (2009).

INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY (Vienna)

Storage of Water Reactor Spent Fuel in Water Pools: Survey of World Experience, Technical Reports Series No. 218 (1982).

Impact of Extended Burnup on the Nuclear Fuel Cycle, IAEA-TECDOC-699 (1993).

Spent Fuel Performance Assessment and Research, IAEA-TECDOC-1343 (2003).

Optimization Strategies for Cask Design and Container Loading in Long Term Spent Fuel Storage, IAEA-TECDOC-1523 (2006).

JOHNSON, A.B., Jr., BURKE, S.P., K Basin Corrosion Program Report, Rep. WHC-EP-0877, Westinghouse Hanford, Richland, WA (1995).

KESSLER, J., “Used fuel extended storage: What the US industry wants from DOE”, paper presented at the NEI Used Fuel Management Conf. Baltimore, 2011.

KOIZUMI, S., SHIRAI, K., “Demonstration program of long-term storage (FY2004–2008): SCC of MPC under the condition of sea salt deposition”, presentation to the Nuclear Regulatory Commission, 2004.

KOJIMA, S., “The new approach to regulating long-term storage of spent fuel”, paper presented at the NRC Regulatory Information Conf. 2011.

KOWALEWSKY, H., et al., “Safety assessment of leak tightness criteria for radioactive materials transport packages” (Proc. 12th Int. Conf. on the Packaging and Transportation of Radioactive Materials, 1998).

KUMAR MEHTA, P., Concrete: Structure, Properties, and Materials, Prentice-Hall, Upper Saddle River, NJ (1986).

KUSTAS, F.M., et al., Investigation of the Condition of Spent Fuel Pool Components, Rep. PNL-3513, Pacific Northwest Laboratory, Richland, WA (1981).

NUCLEAR REGULATORY COMMISSION (Washington, DC)

Standard Review Plan for Spent Fuel Dry Storage Facilities, NUREG-1567 (2000).

Standard Review Plan for Transportation Packages for Spent Nuclear Fuel, NUREG-1617 (2000).

Standard Review Plan for Spent Fuel Dry Storage Systems at a General License Facility: Final Report, NUREG-1536, Revision 1 (2010).

PALMQUIST, C.A., 105-C Reactor Interim Safe Storage Project Final Report, Rep. BHI-01231, Bechtel Hanford, Richland, WA (1998).

PESCATORE, C., COWGILL, M., Temperature Limit Determination for the Inert Dry Storage of Spent Nuclear Fuel, EPRI TR-103949, Electric Power Research Institute, Palo Alto, CA (1994).

PROBST, U., et al., Investigation of seal effects according to axial compression variation of metal seals for transport and storage casks, Packag. Transp. Storage Secur. Radioact. Mater. 19 (2008) 47–52.

SASSOULAS, et al., Ageing of metallic gaskets for spent fuel casks: Century-long life forecast from 25 000-h-long experiments, Nucl. Eng. Des. 236 (2006) 2411–2417.

SELWYN, H., FINLAY, R., BULL, P., IRWIN, A., “Storage, inspection and sip testing of spent nuclear fuel from the HIFAR materials test reactor”, ENS RRFM 2002 (Trans. Int. Top. Mtg on Research Reactor Fuel Management, Ghent), European Nuclear Society, Berne (2002) 114–118.

SHIRAI, K., WATARU, M., SAEGUSA, T., ITO, C., “Long-term containment performance test of metal cask” (Proc. 13th Int. High-Level Radioactive Waste Management Conf. Albuquerque, 2011).

SKIDMORE, E., Performance Evaluation of O-ring Seals in the SAFKEG 3940A Package in KAMS (U), Rep. WSRC-TR-2003-00198, Rev. 0, Savannah River Technology Center, Aiken, SC (2003).

STEELE, L.E., et al., “Neutron irradiation embrittlement of several higher strength steels”, Effects of Radiation on Structural Materials (Proc. Symp. ASTM STP-426, Atlantic City, 1966), American Society for Testing and Materials, Philadelphia, PA (1967) 346–368.

VIVEKANAND KAIN, AGARWAL, K., DE, P.K., SEETHARAMAIIH, P., Environmental degradation of materials during wet storage of spent nuclear fuels, J. Mater. Eng. Perfor. **9** (2000) 317–323.

VÖLZKE, H., PROBST, U., WOLFF, D., NAGELSCHMIDT, S., SCHULZ, S., “Investigations on the long-term behavior of metal seals for spent fuel storage casks” (Proc. 52nd INMM Annual Mtg, 2011).

— “Seal and closure performance in long term storage” (Proc. PSAM11 & ESREL 2012, Helsinki, 2012).

VON DER EHE, K., JAUNICH, M., WOLFF, D., BÖHNING, M., GOERING, H., “Radiation induced structural changes of (U)HMW polyethylene with regard to its application for radiation shielding” (Proc. PATRAM 2010: 16th Int. Symp. on the Packaging and Transportation of Radioactive Materials, London, 2010).

WATARU, M., SHIRAI, K., SAEGUSA, T., ITO, C., “Long-term containment test using two full-scale lid models of DPC with metal gaskets for interim storage”, paper presented at 3rd East Asia Forum on Radwaste Management: 2010EAFORM, 2010.

WOLFF, D., VON DER EHE, K., JAUNICH, M., BÖHNING, M., “Performance of neutron radiation shielding material (U)HMW-PE influenced by gamma radiation” (Proc. PSAM11 & ESREL 2012, Helsinki, 2012).

Проектирование и размещение будущих систем хранения отработавшего топлива

BLUE RIBBON COMMISSION ON AMERICA’S NUCLEAR FUTURE, Transportation and Storage Subcommittee Report to the Full Commission: Updated Report, BRC, Washington, DC (2012).

CODÉE, H., “Long-term storage in the Netherlands”, paper presented at IAEA Tech. Mtg on Very Long Term Storage of Used Nuclear Fuel, IAEA, Vienna, 2011.

ELECTRIC POWER RESEARCH INSTITUTE, Industry Spent Fuel Storage Handbook, Rep. 1021048, EPRI, Palo Alto, CA (2010).

REACTOR SAFETY COMMISSION RSK, Recommendation of the Reactor Safety Commission (RSK): Safety Guidelines for Dry Interim Storage of Irradiated Fuel Assemblies in Storage Casks, RSK, Bonn (2001).

WASINGER, K., HUMMELSHEIM, K., GMAL, B., SPANN, H., FABER, W., “Present status and trends of spent fuel management in Germany”, paper presented at IAEA Tech. Working Group on Nuclear Fuel Cycle Options Mtg, Vienna, 2007.

Схемы хранения отработавшего топлива

INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Management of Damaged Spent Nuclear Fuel, IAEA Nuclear Energy Series No. NF-T-3.6, IAEA, Vienna (2009).

KESSLER, J., WALDROP, K., “Extended used fuel storage: EPRI perspective and collaboration initiatives”, Safety of Long-term Interim Storage Facilities (Proc. Workshop, Munich, 2013), OECD, Paris (2013) 63–82.

LEVIN, A., “Technical and regulatory paths forward for accelerating implementation of the Blue Ribbon Commission recommendations”, paper presented at American Nuclear Society Summer Mtg, Chicago, 2012.

NICHOL, M., “Operational challenges of extended dry storage of spent nuclear fuel” (Proc. WM2012 Conf. Phoenix, 2012).

Соображения, касающиеся регулирования

INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Costing of Spent Nuclear Fuel Storage, IAEA Nuclear Energy Series No. NF-T-3.5, IAEA, Vienna (2009).

ROJAS DE DIEGO, J., Economics of spent-fuel storage: A description of the methodology developed by IAEA for analysing costs, Int. At. Energy Agency Bull. 3 (1990) 34–38.

Соображения, касающиеся политики

APARICIO, L. (Ed.), Making Nuclear Waste Governable: Deep Underground Disposal and the Challenge of Reversibility, Andra, Chatenay-Malabry (2010).

INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, The Long Term Storage of Radioactive Waste: Safety and Sustainability, IAEA, Vienna (2003).

LATOURRETTE, T., LIGHT, T., KNOPMAN, D., BARTIS, J.T., Managing Spent Nuclear Fuel: Strategy Alternatives and Policy Implications, RAND Corporation, Santa Monica, CA (2010).

NATIONAL ACADEMY OF SCIENCES, Disposition of High-level Waste and Spent Nuclear Fuel: The Continuing Societal and Technical Challenges, National Academy Press, Washington, DC (2001).

OECD NUCLEAR ENERGY AGENCY (Paris)

Geological Disposal of Radioactive Waste: Review of the Development in the Last Decade (1999).

Stepwise Approach to Decision Making for Long-term Radioactive Waste Management: Experience, Issues and Guiding Principles (2004).

Другие ключевые соображения

МЕЖДУНАРОДНОЕ АГЕНТСТВО ПО АТОМНОЙ ЭНЕРГИИ (Вена)

Technical, Economic and Institutional Aspects of Regional Spent Fuel Storage Facilities, IAEA-TECDOC-1482 (2005).

Управление рисками, связанными с потерей знаний в организациях ядерной промышленности (2012).

Введение в использование методологии ИНПРО для оценки ядерно-энергетических систем, Серия изданий МАГАТЭ по ядерной энергии, № NP-T-1.12 (2011).

Comparative Analysis of Methods and Tools for Nuclear Knowledge Preservation, IAEA Nuclear Energy Series No. NG-T-6.7 (2011).

IZURU, H., “Interface issues arising between storage and transport for storage facilities using storage/transport dual purpose dry metal casks”, Management of Spent Fuel from Nuclear Power Reactors (Proc. Int. Conf. Vienna, 2010), IAEA, Vienna (2015) CD-ROM.

NATIONAL RADIOACTIVE WASTE MANAGEMENT AGENCY, 2009 Sustainable Development Report, Andra, Chatenay-Malabry (2010).

PESCATORE, C., “Preserving records, knowledge and memory over decades and more, lessons from the NEA RK&M Project”, Safety of Long-term Interim Storage Facilities (Proc. Workshop, Munich, 2013), OECD, Paris (2013) 285–297.

VERHEUL, I., Networking for Digital Preservation: Current Practice in 15 National Libraries, K.G. Saur, Munich (2006).

СОКРАЩЕНИЯ

ВАО	высокоактивные отходы
КСЭ	конструкции, системы и элементы
ООТ	обращение с отработавшим топливом
ОТВС	отработавшая тепловыделяющая сборка
ОЭСР	Организация экономического сотрудничества и развития
ССХК	система сухого хранения в контейнерах
ХОТ	хранение отработавшего топлива

СОСТАВИТЕЛИ И РЕЦЕНЗЕНТЫ

Bevilacqua, A.	Международное агентство по атомной энергии
Carlsen, B.	Айдахская национальная лаборатория, Соединенные Штаты Америки
Chiguer, M.	«АРЕВА», Франция
González-Espartero, A.	Международное агентство по атомной энергии
Grahn, P.	Svensk Kärnbränslehantering AB, Sweden
Saegusa, T.	Центральный научно-исследовательский институт электроэнергетической промышленности, Япония
Sampson, M.	Комиссия по ядерному регулированию, Соединенные Штаты Америки
Сеелев, И.	Росатом, Российская Федерация
Wasinger, K.	«АРЕВА», Германия
Waters, M.	Комиссия по ядерному регулированию, Соединенные Штаты Америки
Wolff, D.	Федеральный институт исследований и испытаний материалов, Германия

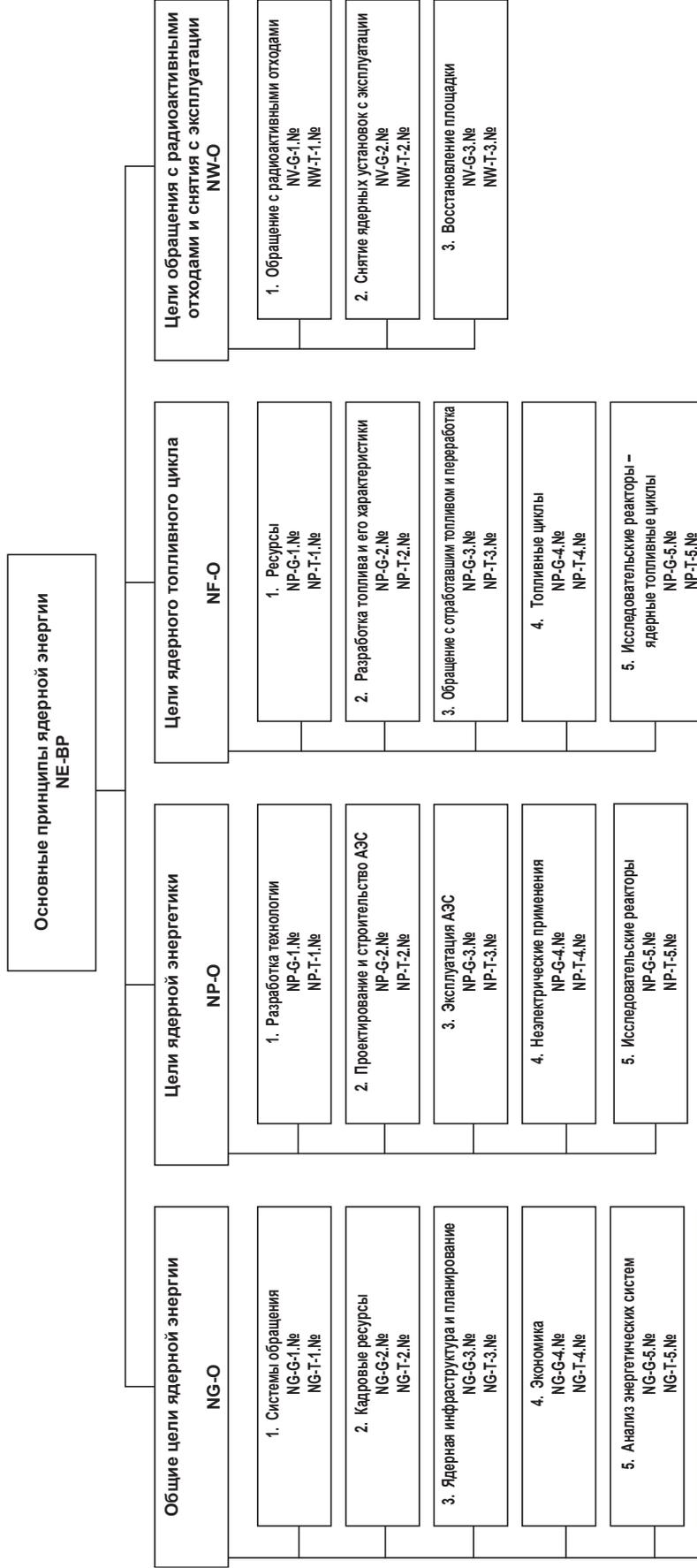
Технические совещания

Вена, Австрия: 26–28 апреля 2011 года, 22–24 октября 2012 года

Совещания консультантов

Вена, Австрия: 11–13 октября 2010 года, 26–29 апреля 2011 года,
16–19 июля 2012 года, 22–25 октября 2012 года, 27–29 мая 2013 года

Структура Серии Документов МАГАТЭ по ядерной энергии



Код

BP: Основные принципы
O: Цели
G: Руководства
T: Технические доклады

Номера 1-6: Обозначение тем

№: Руководства или доклада (1, 2, 3 и т.д.)

Примеры

NG-G-3.1: Общие цели ядерной энергии (NG) Руководство, Ядерная Инфраструктура и планирование (тема 3), **№1**

NP-T-5.4: Ядерная энергетика (NP), Доклад (T), Исследовательские реакторы (тема 5), **№4**

NF-T-3.6: Ядерное топливо (NF), Доклад (T), Обращение с отработавшим топливом и переработка, **№6**

NW-G-1.1: Обращение с радиоактивными отходами и снятие с эксплуатации (NW),

Руководство, Радиоактивные (тема 1), **№1**



IAEA

Международное агентство по атомной энергии

№ 26

ЗАКАЗ В СТРАНАХ

Платные публикации МАГАТЭ могут быть приобретены у перечисленных ниже поставщиков или в крупных книжных магазинах.

Заказы на бесплатные публикации следует направлять непосредственно в МАГАТЭ. Контактная информация приводится в конце настоящего перечня.

СЕВЕРНАЯ АМЕРИКА

Bernan / Rowman & Littlefield

15250 NBN Way, Blue Ridge Summit, PA 17214, USA

Тел.: +1 800 462 6420 • Факс: +1 800 338 4550

Эл.почта: orders@rowman.com • Сайт: <http://www.rowman.com/bernan>

ОСТАЛЬНЫЕ СТРАНЫ

Просьба связаться с местным поставщиком по вашему выбору или с вашим основным дистрибьютером:

Eurospan Group

Gray's Inn House

127 Clerkenwell Road

London EC1R 5DB

United Kingdom

Торговые заказы и справочная информация:

Тел: +44 (0) 1767604972 • Факс: +44 (0) 1767601640

Эл.почта: eurospan@turpin-distribution.com

Индивидуальные заказы:

www.eurospanbookstore.com/iaea

Дополнительная информация:

Тел: +44 (0) 2072400856 • Факс: +44 (0) 2073790609

Эл.почта: info@eurospangroup.com • Сайт: www.eurospangroup.com

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

Группа маркетинга и сбыта (Marketing and Sales Unit)

Международное агентство по атомной энергии

Vienna International Centre, PO Box 100, 1400 Vienna, Austria

Телефон: +43 1 2600 22529 или 22530 • Факс: +43 1 26007 22529

Эл.почта: sales.publications@iaea.org • Сайт: <https://www.iaea.org/ru/publikacii>

