

СЕРИЯ ТЕХНИЧЕСКИХ ДОКЛАДОВ № 240

**РУКОВОДСТВО
ПО ВАРИАНТАМ И СИСТЕМАМ ХРАНЕНИЯ
ОТРАБОТАВШЕГО ТОПЛИВА**

Третье издание



IAEA

Международное агентство по атомной энергии

НОРМЫ БЕЗОПАСНОСТИ МАГАТЭ И ДРУГИЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ДАННОЙ ТЕМЕ

НОРМЫ БЕЗОПАСНОСТИ МАГАТЭ

В соответствии со статьей III своего Устава МАГАТЭ уполномочено устанавливать или принимать нормы безопасности для защиты здоровья и сведения к минимуму опасностей для жизни и имущества и обеспечивать применение этих норм.

Публикации, посредством которых МАГАТЭ устанавливает нормы, выпускаются в Серии норм безопасности МАГАТЭ. В этой серии охватываются вопросы ядерной безопасности, радиационной безопасности, безопасности перевозки и безопасности отходов. **Категории публикаций в этой серии — это Основы безопасности, Требования безопасности и Руководства по безопасности.**

Информацию о программе по нормам безопасности МАГАТЭ можно получить на сайте МАГАТЭ в Интернете

www.iaea.org/ru/resursy/normy-bezopasnosti

На этом сайте содержатся тексты опубликованных норм безопасности и проектов норм безопасности на английском языке. Тексты норм безопасности выпускаются на арабском, испанском, китайском, русском и французском языках, там также можно найти глоссарий МАГАТЭ по вопросам безопасности и доклад о ходе работы над еще не выпущенными нормами безопасности. Для получения дополнительной информации просьба обращаться в МАГАТЭ по адресу: Vienna International Centre, PO Box 100, 1400 Vienna, Austria.

Всем пользователям норм безопасности МАГАТЭ предлагается сообщать МАГАТЭ об опыте их использования (например, в качестве основы для национальных регулирующих положений, для составления обзоров безопасности и учебных курсов) в целях обеспечения того, чтобы они по-прежнему отвечали потребностям пользователей. Эта информация может быть направлена через сайт МАГАТЭ в Интернете или по почте (см. адрес выше), или по электронной почте по адресу Official.Mail@iaea.org.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ДАННОЙ ТЕМЕ

МАГАТЭ обеспечивает применение норм и в соответствии со статьями III и VIII.C своего Устава предоставляет сведения и способствует обмену информацией, касающейся мирной деятельности в ядерной области, и служит в этом посредником между своими государствами-членами.

Доклады по вопросам безопасности в ядерной деятельности выпускаются в качестве **докладов по безопасности**, в которых приводятся практические примеры и подробные описания методов, которые могут использоваться в поддержку норм безопасности.

Другие публикации МАГАТЭ по вопросам безопасности выпускаются в качестве публикаций по **аварийной готовности и реагированию, докладов по радиологическим оценкам, докладов ИНСАГ** — Международной группы по ядерной безопасности, **технических докладов** и документов серии **TECDOC**. МАГАТЭ выпускает также доклады по радиологическим авариям, учебные пособия и практические руководства, а также другие специальные публикации по вопросам безопасности.

Публикации по вопросам физической безопасности выпускаются в **Серии изданий МАГАТЭ по физической ядерной безопасности**.

Серия изданий МАГАТЭ по ядерной энергии состоит из информационных публикаций, предназначенных способствовать и содействовать научно-исследовательской работе в области ядерной энергии, а также развитию ядерной энергии и ее практическому применению в мирных целях. В ней публикуются доклады и руководства о состоянии технологий и успехах в их совершенствовании, об опыте, образцовой практике и практических примерах в области ядерной энергетики, ядерного топливного цикла, обращения с радиоактивными отходами и снятия с эксплуатации.

РУКОВОДСТВО
ПО ВАРИАНТАМ И СИСТЕМАМ ХРАНЕНИЯ
ОТРАБОТАВШЕГО ТОПЛИВА

Третье издание

Членами Международного агентства по атомной энергии являются следующие государства:

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

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 быстрого и широкого использования атомной энергии для поддержания мира, здоровья и благосостояния во всем мире».

СЕРИЯ ТЕХНИЧЕСКИХ ДОКЛАДОВ, № 240

РУКОВОДСТВО
ПО ВАРИАНТАМ И СИСТЕМАМ
ХРАНЕНИЯ ОТРАБОТАВШЕГО
ТОПЛИВА

ТРЕТЬЕ ИЗДАНИЕ

МЕЖДУНАРОДНОЕ АГЕНТСТВО ПО АТОМНОЙ ЭНЕРГИИ
ВЕНА, 2025

УВЕДОМЛЕНИЕ ОБ АВТОРСКОМ ПРАВЕ

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

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

© МАГАТЭ, 2025

Отпечатано МАГАТЭ в Австрии

Июль, 2025

STI/DOC/010/240/3

РУКОВОДСТВО ПО ВАРИАНТАМ И СИСТЕМАМ ХРАНЕНИЯ
ОТРАБОТАВШЕГО ТОПЛИВА

МАГАТЭ, ВЕНА, 2025 ГОД

STI/DOC/010/240/3

ISBN 978-92-0-436124-7 (печатный формат) | 978-92-0-436324-1 (формат pdf) | 978-92-0-436424-8 (формат epub)

ISSN 3007-5203

ПРЕДИСЛОВИЕ

Ядерная энергетика способна помочь человечеству в решении двоякой задачи: обеспечения надежных энергопоставок и ограничения выбросов парниковых газов. На действующих сегодня ядерных энергетических реакторах вырабатывается более 10% мировой электроэнергии и треть всей низкоуглеродной энергии. В ближайшие десятилетия ядерная энергия сохранит свою ключевую роль в мировой структуре низкоуглеродного энергопроизводства. С вводом в строй первых объектов ядерной энергетики начало образовываться отработавшее топливо, и необходимой составляющей всех стратегий обращения с отработавшим топливом является его хранение. С 1950-х годов отработавшее топливо безопасно и надежно хранится в разнообразных системах мокрого и сухого хранения, причем в отношении порядка 70% мирового запаса находящегося сегодня на хранении топлива должны быть приняты или реализованы решения по обращению с ним и его утилизации.

В последние десятилетия в условиях эксплуатации атомных электростанций продолжает наблюдаться тенденция к повышению эффективности топливного цикла за счет общего увеличения глубины выгорания топлива, что предъявляет более высокие требования к принятой стратегии обращения с отработавшим топливом и к системам хранения отработавшего топлива. Кроме того, в некоторых случаях продолжительность хранения отработавшего топлива на данный момент не определена, отчасти из-за длительного времени, необходимого для создания глубинного геологического хранилища, что в дальнейшем отразится на обращении с отработавшим топливом и его транспортировке в долгосрочной перспективе.

Настоящий технический доклад представляет собой третье издание «Guidebook on Spent Fuel Storage» («Руководства по хранению отработавшего топлива»); предыдущие издания были опубликованы в 1984 и 1991 годах. Его цель — дать государствам-членам справочную информацию о возможных вариантах хранения отработавшего топлива, описать историю и наблюдаемые тенденции развития технологий хранения отработавшего топлива, обобщить опыт эксплуатации и извлеченные уроки и проследить за меняющейся ситуацией в плане увеличения глубины выгорания и образования отработавшего смешанного оксидного топлива, а также увеличения сроков хранения. В нем также содержится информация о распределении текущего глобального запаса отработавшего топлива по системам хранения, а также описание и терминология доступных технологий хранения отработавшего топлива и различных мест расположения хранилищ.

Эта информация позволит государствам-членам, особенно странам, встающим на путь развития ядерной энергетики, подготовиться к решению проблем и выполнению задач, связанных с хранением отработавшего топлива, чтобы выбрать наиболее рациональные пути обращения с отработавшим топливом.

МАГАТЭ хотело бы выразить признательность всем тем, кто принимал участие в подготовке и рецензировании настоящей публикации. Сотрудником МАГАТЭ, ответственным за настоящую публикацию, являлся А. Гонсалес-Эспартеро, Отдел ядерного топливного цикла и технологии обращения с отходами.

РЕДАКЦИОННОЕ ПРИМЕЧАНИЕ

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.

В настоящем докладе не затрагиваются вопросы ответственности — юридической или иного рода — за действия или бездействие со стороны какого-либо лица.

Данные здесь руководящие указания и рекомендации в отношении выявленных примеров положительной практики отражают мнение экспертов и не являются рекомендациями, сформулированными на основе консенсуса государствами-членами.

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

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

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

СОДЕРЖАНИЕ

1.	ВВЕДЕНИЕ	1
1.1.	Общие сведения	1
1.2.	Цель	3
1.3.	Область применения	3
1.4.	Структура	4
2.	ХРАНЕНИЕ ОТРАБОТАВШЕГО ТОПЛИВА	5
2.1.	Накопленные объемы отработавшего топлива	7
2.2.	Альтернативы хранению отработавшего топлива.	7
2.3.	Критерии выбора варианта вне реакторного хранения	11
3.	ТЕХНОЛОГИИ ХРАНЕНИЯ ОТРАБОТАВШЕГО ТОПЛИВА	13
3.1.	Мокрое хранение	13
3.2.	Сухое хранение	19
4.	БЕЗОПАСНОСТЬ	44
4.1.	Общие соображения безопасности при проектировании хранилищ отработавшего топлива	48
4.2.	Особые соображения безопасности при проектировании хранилищ отработавшего топлива	53
4.3.	Оценка безопасности	56
5.	ВЛИЯНИЕ СТАРЕНИЯ НА ОТРАБОТАВШЕЕ ТОПЛИВО И СИСТЕМЫ ХРАНЕНИЯ ОТРАБОТАВШЕГО ТОПЛИВА ..	62
5.1.	Потенциальные механизмы деградации, затрагивающие системы хранения и отработавшее топливо	63
5.2.	Наблюдение	84
5.3.	Техническое обслуживание и ремонт	89
5.4.	Сохранение данных	90
6.	ТРАНСПОРТИРОВКА ОТРАБОТАВШЕГО ТОПЛИВА: СООБРАЖЕНИЯ, СВЯЗАННЫЕ С ХРАНЕНИЕМ ОТРАБОТАВШЕГО ТОПЛИВА	91

6.1.	Транспортировка систем, предназначенных только для хранения	93
6.2.	Транспортировка двухцелевых систем.	93
7.	ВОПРОСЫ ФИЗИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТИ И ГАРАНТИЙ	98
7.1.	Физическая безопасность и физическая защита	99
7.2.	Гарантии и подотчетность	100
8.	ЭКОНОМИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ХРАНЕНИЯ ОТРАБОТАВШЕГО ТОПЛИВА	107
8.1.	Категории и компоненты затрат	108
8.2.	Факторы, влияющие на затраты и экономические аспекты	110
8.3.	Финансирование	112
9.	ОЖИДАЕМЫЕ В БУДУЩЕМ ТЕНДЕНЦИИ В ОБЛАСТИ ХРАНЕНИЯ	113
Приложение I:	ПРИМЕРЫ НЕДАВНО РАЗРАБОТАННЫХ ПРОЕКТОВ ХРАНИЛИЩ	117
Приложение II:	ПРАВИЛА И РУКОВОДСТВА ПО ХРАНЕНИЮ И ТРАНСПОРТИРОВКЕ ОТРАБОТАВШЕГО ТОПЛИВА	142
Приложение III:	ПРИМЕРЫ ПРОЕКТНЫХ АВАРИЙ, СВЯЗАННЫХ С ОБРАЩЕНИЕМ С ОТРАБОТАВШИМ ТОПЛИВОМ	148
Приложение IV:	ОПУБЛИКОВАННЫЕ ДАННЫЕ О ХАРАКТЕРИСТИКАХ МАТЕРИАЛОВ	151
Приложение V:	ПУБЛИКАЦИИ МАГАТЭ ПО ВОПРОСАМ ХРАНЕНИЯ ОТРАБОТАВШЕГО ТОПЛИВА	164
	СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ	201
	ГЛОССАРИЙ	209
	СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ	219
	СОСТАВИТЕЛИ И РЕЦЕНЗЕНТЫ	221

1. ВВЕДЕНИЕ

1.1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Хранение отработавшего ядерного топлива (ОЯТ) — необходимая составляющая любой стратегии обращения с отработавшим топливом. Около 70% отработавшего топлива, образующегося на атомных электростанциях (АЭС) по всему миру, накапливается в хранилищах в ожидании принятия или осуществления решений по регенерации¹ или захоронению отработавшего топлива. Несмотря на то что в последние годы наблюдается небольшое снижение количества образующегося ОЯТ благодаря более эффективному использованию ядерного топлива в реакторах в сочетании с закрытием ряда АЭС, объем производства отработавшего топлива по-прежнему значительно превышает размер существующих и перспективных мощностей по его переработке и захоронению. Из-за спроса на экологически чистую энергию и положительного соотношения между числом новых реакторов, подключаемых к энергосети, и строящихся реакторов² и числом окончательно заглушенных реакторов тенденция к накоплению отработавшего топлива в хранилищах будет сохраняться. Возникающие неопределенности в отношении продолжительности периода хранения и объемов отработавшего топлива в хранилищах в ближайшие десятилетия ставят на повестку дня новые проблемы, которые необходимо учитывать при проектировании и эксплуатации хранилищ отработавшего топлива.

В течение первых двух десятилетий XXI века в условиях эксплуатации АЭС продолжала наблюдаться тенденция к постоянному повышению эффективности топливного цикла, в частности за счет увеличения глубины выгорания топлива и применения других подходов к повышению эффективности использования топлива, которые, как правило, требуют увеличения степени обогащения. Такие новшества ведут к снижению объема отработавшего топлива по отношению к производимой энергии, но предъявляют более строгие требования к принятой стратегии обращения с отработавшим топливом и к системам хранения отработавшего топлива.

¹ В настоящей публикации не проводится различий между переработкой и регенерацией; любое упоминание о переработке подразумевает последующие шаги по регенерации.

² В 2020 году пять новых объектов было подключено к энергосети, три АЭС начали строиться и шесть АЭС были окончательно остановлены (источник: <https://pris.iaea.org/>).

Поскольку топливо с повышенной глубиной выгорания выделяет больше тепла при распаде, недавние оценки аварий с потерей теплоносителя в некоторых странах дали стимул к сокращению объемов отработавшего топлива, хранящегося в приреакторных (ПР) хранилищах, с тем чтобы увеличить запас безопасности. Это, в сочетании с наполнением ПР хранилищ (в результате продления сроков службы АЭС, задержек с выполнением конечных стадий топливного цикла или задержек с получением разрешения на организацию хранения более высокой плотности), обусловило рост потребностей в дополнительных мощностях для хранения, предоставляемых внереакторными (ВР) хранилищами. В то же время у многих из первых действующих хранилищ подходит к концу срок действия первоначальной лицензии, и они проходят процедуру продления действия лицензии, причем некоторые такие процедуры уже завершены.

В 2020-х годах ядерное сообщество ожидает пуска ряда новых реакторов, строящихся в странах-новичках³. Для принятия наиболее рациональных решений по обращению с отработавшим топливом этим странам крайне необходим обмен опытом эксплуатации, информацией об извлеченных уроках и рекомендациями.

Ответственность за разработку и реализацию общей стратегии обращения с радиоактивными отходами АЭС возлагается на оператора [1]. В Специальном руководстве МАГАТЭ по безопасности, № SSG-15, «Storage of Spent Nuclear Fuel» («Хранение отработавшего ядерного топлива») [2] описаны эти обязанности по отношению к отработавшему топливу, включая определение общей стратегии обращения с ним. При разработке этой стратегии необходимо учитывать национальную политику обращения с радиоактивными отходами, взаимозависимость между всеми этапами обращения с отходами и доступные варианты [1]. Чтобы выполнить эти обязанности, важно располагать актуальной информацией об имеющихся возможностях для обращения с отработавшим топливом. В настоящей публикации представлен обзор имеющихся на сегодняшний день вариантов хранения отработавшего топлива и техническая информация о них.

³ В 2020 году страны-новички Объединенные Арабские Эмираты (19 августа 2020 года) и Беларусь (3 ноября 2020 года) подключили к сети свои первые энергоблоки (источник: <https://pris.iaea.org/>).

1.2. ЦЕЛЬ

Общая цель настоящей публикации — дать государствам-членам справочную информацию о возможных вариантах хранения ОЯТ. Она достигается посредством актуализации «Guidebook on Spent Fuel Storage» («Руководства по хранению отработавшего топлива») (IAEA-TRS-240), увидевшего свет в 1991 году [3], описания истории и наблюдаемых тенденций развития технологий хранения отработавшего топлива, а также обобщения опыта эксплуатации и извлеченных уроков. Кроме того, рассматриваются новые тенденции, связанные с образованием отработавшего топлива с повышенной глубиной выгорания и отработавшего смешанного оксидного топлива (МОХ), а также с увеличением сроков хранения.

Это позволит государствам-членам лучше подготовиться к решению проблем и выполнению задач, связанным с хранением отработавшего топлива.

Представленные здесь руководящие указания и рекомендации в отношении выявленных положительных практик отражают мнение экспертов и не являются рекомендациями, сформулированными на основе консенсуса всех государств-членов.

1.3. ОБЛАСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ

В настоящем Руководстве освещаются только вопросы хранения ОЯТ промышленных энергетических реакторов. Хранение ОЯТ исследовательских и прототипных реакторов здесь специально не рассматривается, хотя описанные технологии хранения могут применяться и для этих видов отработавшего топлива.

Данные о запасах в настоящей публикации были взяты из страновых докладов, представленных к седьмому Совещанию договаривающихся сторон Объединенной конвенции о безопасности обращения с отработавшим топливом и о безопасности обращения с радиоактивными отходами (Объединенная конвенция) по рассмотрению по состоянию на 31 декабря 2019 года, кроме случаев, когда в открытом доступе имелись другие данные. Значения, используемые в рисунках, были округлены, поскольку они призваны проиллюстрировать тенденции, а не отобразить точный размер запасов.

Данные о запасах представлены в разбивке по следующим регионам:

- Африка: Южная Африка;
- Азия и Тихий океан: Китай, Республика Корея, Япония;

- Восточная Европа и Центральная Азия: Армения, Болгария, Венгрия, Казахстан, Литва, Российская Федерация, Румыния, Словакия, Словения, Украина, Чешская Республика;
- Северная Америка: Канада, Соединенные Штаты Америки (США);
- Латинская Америка: Аргентина, Бразилия, Мексика;
- Западная Европа: Бельгия, Германия, Испания, Италия, Нидерланды, Соединенное Королевство Великобритании и Северной Ирландии, Финляндия, Франция, Швейцария, Швеция.

1.4. СТРУКТУРА

В разделе 2 настоящей публикации представлена общая информация о хранении отработавшего топлива, включая введение в терминологию, а также сведения о накопленных объемах отработавшего топлива и тенденциях. В разделе 3 описаны различные технологии хранения. В разделе 4 приведены соображения, касающиеся безопасности хранения отработавшего топлива. В разделе 5 описаны эффекты, вызванные старением как топлива, так и систем хранения, а также приведены основные сведения о наблюдении, техническом обслуживании и ремонте и сохранении данных. В разделе 6 освещаются вопросы транспортировки отработавшего топлива после хранения. В разделе 7 рассматриваются вопросы физической безопасности и гарантий. Раздел 8 посвящен экономическим аспектам хранения отработавшего топлива. Заключительный раздел 9 посвящен будущим тенденциям в области хранения отработавшего топлива.

В приложениях содержится более подробная информация и приводятся примеры различных систем хранения (как концептуальных, так и действующих) для разных типов топлива (приложение I), правила и руководства по хранению и транспортировке отработавшего топлива (приложение II), примеры проектных аварий (ПА) при обращении с отработавшим топливом (приложение III), опубликованные данные о характеристиках материалов (приложение IV) и публикации МАГАТЭ по вопросам хранения отработавшего топлива (приложение V).

2. ХРАНЕНИЕ ОТРАБОТАВШЕГО ТОПЛИВА

Ядерное топливо, которое больше не может эффективно поддерживать реакцию деления ядра и не может использоваться в качестве топлива в его нынешней форме, называется «отработавшим топливом» [4]. Распад присутствующих радиоизотопов сопровождается высокой радиоактивностью и выделением тепла, поэтому отработавшее топливо требует выдержки в течение некоего минимального периода времени, прежде чем будет принято решение о его дальнейшей судьбе (регенерации или захоронении). В Глоссарии МАГАТЭ по вопросам безопасности хранение отработавшего топлива определяется как «содержание... отработавшего топлива... в установке, которая обеспечивает [его] контейнмент (герметизацию), с намерением [его] последующего извлечения» [4]; хранение отработавшего топлива по определению является промежуточным этапом. Вместе с тем термин «промежуточное хранение» широко используется для обозначения промежуточного этапа хранения перед принятием решения об окончательной судьбе отработавшего топлива.

После извлечения отработавшего топлива из реактора требуется выдержать его некоторое время для первоначального распада радиоизотопов, прежде чем его можно будет загрузить в транспортно-упаковочный контейнер для перевозки — на дальнейшее хранение, на перерабатывающее предприятие для последующей регенерации либо на установку по кондиционированию с целью захоронения. Этот первоначальный распад радиоизотопов происходит преимущественно под водой в бассейнах выдержки отработавшего топлива, расположенных рядом с корпусом реактора. Бассейны выдержки отработавшего топлива способны выдерживать высокие тепловые нагрузки и обеспечивают гибкость, необходимую для будущих операций с топливом. Исключение составляют газоохлаждаемые реакторы [5], в которых первоначальный распад радиоизотопов в стрингерах топливной кассеты происходит в охлаждаемых диоксидом углерода распадных трубках, прежде чем стрингер будет разобран и перемещен в приреакторный бассейн для дальнейшего распада.

Для описания доступных вариантов размещения хранилищ отработавшего топлива используется ряд терминов. Они описаны ниже и показаны на рис. 1 [6, 7].

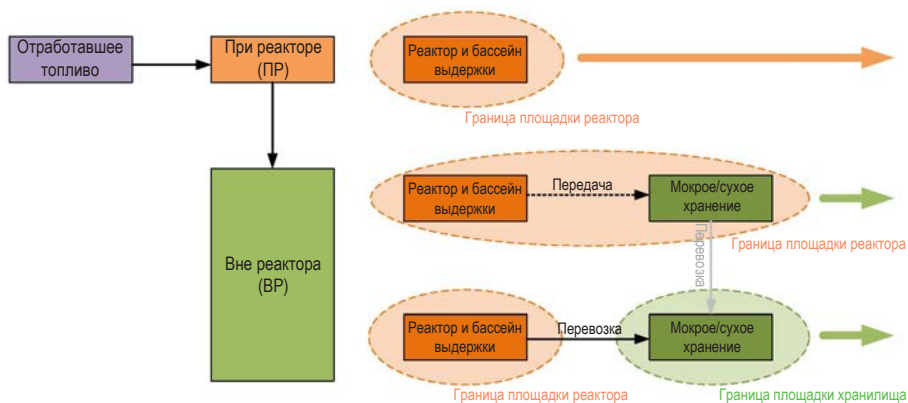


РИС. 1. Варианты обращения с отработавшим топливом с целью его захоронения в будущем.

- ПР хранение: бассейн, расположенный рядом с реактором, внутри здания гермообъема.
- ВР хранение: «мокрое» или «сухое» хранилище, которое не расположено рядом с реактором⁴. Топливо должно быть передано или перевезено⁵ в хранилище. Существует два типа ВР хранилищ: на площадке реактора (ПР) и вне площадки (ВП):
 - ВР-ПР хранение осуществляется на установке, расположенной в пределах границ площадки реактора. Отработавшее топливо передается с одной установки на другую. Для ВР-ПР хранилищ можно провести еще одно различие: между теми, которые являются автономными и могут продолжать функционирование, если реактор будет выведен из эксплуатации, и теми, которые зависят от обеспечивающих систем реактора;
 - ВР-ВП хранение осуществляется на установке, находящейся вне границ площадки реактора. В этом случае отработавшее топливо перевозится по дорогам общего пользования.

⁴ В США его часто называют «автономным хранилищем отработавшего топлива» (АХОТ).

⁵ В рамках настоящей публикации термин «передача» означает перемещение по площадке (т.е. в пределах границ площадки АЭС), а термин «перевозка» («транспортировка») — перемещение за пределы площадки (т.е. по дорогам общего пользования).



Рис. 2. Данные и прогнозы по накопленным объемам отработавшего топлива.

2.1. НАКОПЛЕННЫЕ ОБЪЕМЫ ОТРАБОТАВШЕГО ТОПЛИВА

К декабрю 2019 года из ядерных энергетических реакторов во всем мире было выгружено более 400 000 тТМ отработавшего топлива. Около двух третей этого объема остается в хранилищах, а примерно одна треть переработана [8]. Прогнозы по объемам выгрузки, переработки и хранения отработавшего топлива приведены на рис. 2.

2.2. АЛЬТЕРНАТИВЫ ХРАНЕНИЮ ОТРАБОТАВШЕГО ТОПЛИВА

Хранение отработавшего топлива в течение 50–100 лет технически возможно, что подтверждается результатами исследований и опытом эксплуатации [9]. Однако возможности хранения не могут служить предлогом для постоянного откладывания принятия или реализации принципиальных решений об обращении с отработавшим топливом [10].

В государствах-членах с ядерно-энергетическими программами были спроектированы и построены разнообразные хранилища для отработавшего топлива.

Мокрое хранение — это, безусловно, наиболее распространенная форма хранения, поскольку все энергетические реакторы имеют бассейн выдержки отработавшего топлива, связанный с эксплуатацией реактора. Это неудивительно, поскольку большинство крупных промышленных станций оснащены легководными (или тяжеловодными) реакторами, топливо которых может длительное время находиться в воде, не подвергаясь

деградации. Вода — эффективный экранирующий и охлаждающий материал, она легко доступна, легко охлаждается и очищается. Вода также создает прозрачную среду, облегчающую технологические операции с топливом и визуальное наблюдение.

Мощности для ПР хранения необходимы при реализации любой стратегии обращения с отработавшим топливом (регенерация или захоронение), поскольку тепловыделение и излучение от отработавшего топлива должны снизиться до уровней, позволяющих перейти к следующему этапу топливного цикла.

Вместимость ПР бассейнов выдержки бывает разной и зависит от страны и типа реактора. Она может варьироваться от небольшого объема, обеспечивающего краткосрочное буферное хранение перед перевозкой на пункт захоронения или в ВР хранилище, до объемов, достаточных для хранения значительной части топлива, накопившегося за весь срок службы реактора. Начальная вместимость, как правило, зависит от политики в области топливного цикла, которая действовала на момент проектирования АЭС. В дополнение к установленной вместимости хранилища потребуется зарезервировать место для выгрузки всего топлива, имеющегося в активной зоне⁶. В бассейне как часть эксплуатационных запасов станции может временно храниться новое или частично использованное топливо, что уменьшает полезную емкость, доступную для ПР хранения отработавшего топлива. В последние годы ПР хранилища в некоторых случаях использовались на полную мощность, что ставило под угрозу дальнейшую эксплуатацию электростанций. Если емкость ПР хранилища будет недостаточной для размещения отработавшего топлива, накопившегося за весь срок службы, или если объект для последующего захоронения окажется недоступен, а также если возможности увеличения вместимости бассейна будут исчерпаны, будет необходимо предусмотреть ВР хранение.

Для ВР хранилищ были разработаны две методики, основанные на использовании «мокрых» или «сухих» систем, как показано на рис. 1. При первой методике на ПР строятся дополнительные хранилища, отделенные от здания реактора и в значительной степени или полностью независимые от него. Примерами ВР-ПР объектов являются общий бассейн на многоблочной площадке АЭС «Тианж» (Бельгия) и «сухие» хранилища на АЭС «Дарлингтон» (Канада) и АЭС «Трильо» (Испания). После завершения эксплуатации реактора ВР-ПР хранилища могут продолжать использоваться для безопасного хранения отработавшего топлива до тех пор, пока топливо не будет вывезено с площадки (например, хранилище на АЭС «Троян» (США)).

⁶ Это требование относится к водоохлаждаемым реакторам.

Вторая категория ВР хранилищ — это хранилища, сооруженные в определенном месте за пределами границ площадки реактора (ВП). В этом случае может потребоваться транспортировка отработавшего топлива по дорогам общего пользования. Значительная часть ВР-ВП мощностей для мокрого хранения, например в Российской Федерации, Соединенном Королевстве и Франции⁷, устроены в виде бассейнов на перерабатывающих заводах, которые могут принимать топливо как от отечественных, так и от зарубежных энергопредприятий.

В иных случаях ВР-ВП установка может представлять собой центр по приему топлива с АЭС, работающих по всей стране, как, например, КЛАБ (Швеция). ВР-ВП хранилища, основанные на технологии сухого хранения, также эксплуатируются, к примеру, на объекте «Цвилаг» (Швейцария), в Ахаусе (Германия) и на Горно-химическом комбинате (Российская Федерация).

При помощи ВР хранения отработавшего топлива может решаться ряд задач, в зависимости от конкретного набора потребностей или ситуации. В первую очередь ВР хранение играет роль буфера между ПР хранением и следующим этапом топливного цикла: переработкой или захоронением. Расположение ВР хранилища (ПР либо ВП) зависит от многих факторов, которые более подробно рассматриваются в разделе 2.4.

По состоянию на декабрь 2019 года⁸ около⁹ половины мировых запасов отработавшего топлива остается в ПР бассейнах, а другая половина находится в ВР хранилищах. Около 33% отработавшего топлива, хранящегося в ВР хранилищах, находится в мокром состоянии, остальные 67% — в сухом (рис. 3). Первоначальные ВР хранилища основывались на использовании технологии мокрого хранения, но с

⁷ ВР бассейн выдержки продолжает работать после закрытия перерабатывающих предприятий.

⁸ Данные о запасах отработавшего топлива в настоящей публикации относятся к декабрю 2019 года (доклады к 7-му Совещанию по рассмотрению в рамках Объединенной конвенции).

⁹ Список стран каждого региона, представивших доклады к Совещанию 2019 года в рамках Объединенной конвенции:

Африка: Южная Африка;

Азия и Тихий океан: Китай, Республика Корея, Япония;

Восточная Европа и Центральная Азия: Армения, Болгария, Венгрия, Казахстан, Литва, Российская Федерация, Румыния, Словакия, Словения, Украина, Чешская Республика;

Латинская Америка и Карибский бассейн: Аргентина, Бразилия, Мексика;

Северная Америка: Канада, США;

Западная Европа: Бельгия, Германия, Испания, Италия, Нидерланды, Соединенное Королевство, Финляндия, Франция, Швейцария, Швеция.



РИС. 3. Распределение мировых запасов ОЯТ между ПР и ВР хранилищами (мокрое и сухое хранение), 2019 год.

Мировые запасы отработавшего топлива на хранении (~ 301 300 тТМ)



РИС. 4. Распределение мировых запасов ОЯТ между «мокрыми» и «сухими» хранилищами, 2019 год.

середины 1980-х годов были разработаны технологии сухого хранения различных типов, и теперь они получили широкое распространение. Задача обеспечения безопасного и эффективного хранения отработавшего топлива сегодня столь же актуальна, как и несколько десятилетий назад, однако с появлением новых технологий для решения этих задач ситуация в ядерной энергетике изменилась.

Распределение мировых запасов отработавшего топлива (как ПР, так и ВР) между «мокрыми» и «сухими» хранилищами показано на рис. 4.

Есть страны, такие как США и Канада, где предпочтительной технологией ВР хранения является сухое хранение. Хотя эта тенденция может быть не видна на рис. 5, она наблюдается примерно с 2000 года как для стран с ядерными программами малого и среднего размера, так и для стран-новичков.

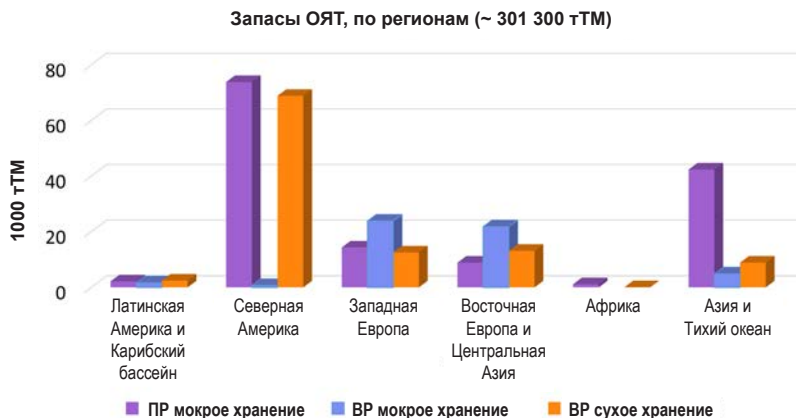


РИС. 5. Запасы отработавшего топлива, хранящегося в мокром и сухом состоянии, по регионам, 2019 год⁹.

2.3. КРИТЕРИИ ВЫБОРА ВАРИАНТА ВНЕРЕАКТОРНОГО ХРАНЕНИЯ

В данном разделе даются рекомендации в отношении критериев, которые следует учитывать при составлении списка возможных вариантов хранения отработавшего топлива и выборе предпочтительного варианта.

Задача определения требований к хранению, в том числе требований безопасности и требований технического плана, станет проблемой номер один для любого лицензиата, желающего применить технологию ВР хранения, независимо от того, намерен ли он самостоятельно управлять такими проектами или передать их на внешний подряд компаниям, оказывающим услуги по хранению. Выбор варианта(ов) хранения отработавшего топлива — это важнейший шаг, предпринимаемый на конечной стадии топливного цикла, и это решение должно приниматься с осознанием того, какими будут последующие этапы стратегии обращения с отработавшим топливом. Оно зависит от ряда технических и нетехнических факторов.

К основным нетехническим факторам, определяющим сценарий хранения отработавшего топлива, относятся:

- национальная политика и стратегия в области обращения с отработавшим топливом;
- привлечение заинтересованных сторон;
- подключение регулирующих органов на раннем этапе;

- подключение органов, ответственных за соблюдение гарантий, на раннем этапе;
- международные обязательства и региональное сотрудничество;
- экономические соображения;
- запас времени до предполагаемого ввода объекта в эксплуатацию (иначе называемый необходимостью или требованием уложиться в срок);
- наличие проекта, лицензированного для конкретного вида топлива;
- возможность лицензирования;
- объем топлива, которое будет храниться;
- неопределенность будущих требований.

Необходимо принять во внимание следующие технические факторы:

- тип и характеристики топлива, помещаемого на хранение:
 - физические характеристики, такие как тип топлива, тип оболочки, геометрия топлива, форма после облучения, состав и масса;
 - начальное обогащение топлива и глубину выгорания при выгрузке (состав, материалы, изотопы и т.д.);
 - историю облучения топлива, например время пребывания в активной зоне, номинальную линейную мощность и использование схем перестановки;
 - остаточное тепловыделение;
 - информацию о любом дефектном или негерметичном твэле с возможностью попадания в него воды (что является важным моментом с точки зрения требований долгосрочной безопасности);
 - любые необычные особенности отдельных тепловыделяющих сборок, например сборки экспериментальной конструкции, бустерные сборки, проблемы изготовления и повышенную восприимчивость к коррозии;
- выбор площадки:
 - инфраструктуру площадки и связанные с ней ограничения;
 - уязвимость перед стихийными бедствиями (например, землетрясениями, торнадо, цунами);
 - транспортные соображения (въезд и выезд);
- соображения долгосрочного плана:
 - ремонтпригодность;
 - программу управления старением (ПУС);
 - смену видов деятельности (например, переход от хранения к перевозке);
 - вывод из эксплуатации;

- требуемую емкость;
- соображения физической безопасности.

Как показал опыт, следует задуматься о выборе такого ВР хранилища, для которого будет возможно и увеличение емкости, и продление срока эксплуатации.

Дополнительные руководящие указания приведены в публикациях Серии изданий МАГАТЭ по ядерной энергии, № NF-T-3.3, «Хранение отработавшего топлива до отправки на переработку или захоронение» [10] и IAEA-TECDOC-1558 «Selection of Away-from-Reactor Facilities for Spent Fuel Storage» («Выбор вне реакторных объектов для хранения отработавшего топлива») [11]. Некоторые общие рекомендации содержатся в публикации Серии технических докладов МАГАТЭ, № 378, «Options, Experience and Trends in Spent Fuel Management» («Возможности, опыт и тенденции в области обращения с отработавшим топливом») [6].

3. ТЕХНОЛОГИИ ХРАНЕНИЯ ОТРАБОТАВШЕГО ТОПЛИВА

При первоначальной выгрузке отработавшего топлива из реактора оно перемещается в ПР бассейн. После определенного периода охлаждения отработавшее топливо может быть перемещено в «сухое» хранилище или, при необходимости, в другое «мокрое» хранилище. Во всем мире разработаны и используются разнообразные конструкции «сухих» хранилищ; основные типы описаны в разделе 3.2. Основное различие между системами сухого хранения состоит в том, что одни из них можно, а другие нельзя транспортировать после загрузки отработавшим топливом.

3.1. МОКРОЕ ХРАНЕНИЕ

Мокрое хранение осуществляется как в ПР, так и в ВР хранилищах. Период времени, в течение которого отработавшее топливо выдерживается в бассейне, варьируется в зависимости от типа и конструкции бассейна и от стратегии обращения с отработавшим топливом, принятой в конкретной стране. Как правило, бассейны выдержки имеют железобетонную конструкцию и могут быть модульными, состоящими из одного большого бассейна либо из нескольких бассейнов, соединенных между собой

перегрузочными каналами. Характеристики типичного бассейна показаны на рис. 6, а примеры приведены на рис. 7.

Большинство ПР бассейнов выдержки были построены одновременно с реактором и спроектированы так, чтобы быть полностью интегрированными с реактором, поэтому они построены на высоте, позволяющей легко соединить их с корпусом реактора. На многих реакторах

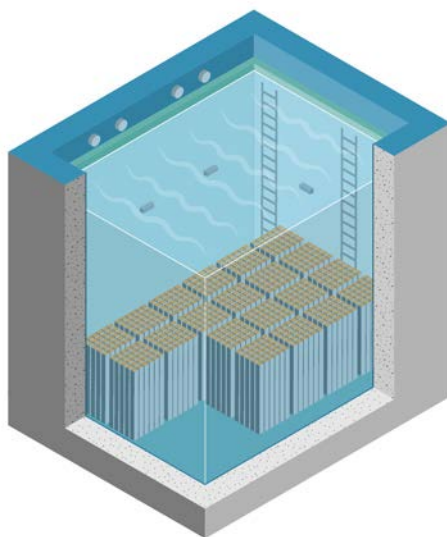


РИС. 6. Схема внутреннего устройства бассейна для мокрого хранения.

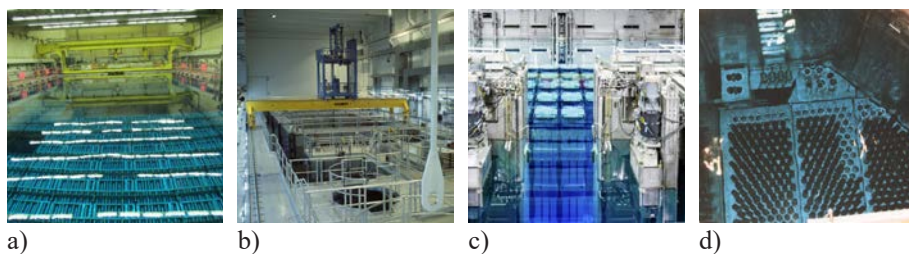


РИС. 7. Примеры бассейнов выдержки отработавшего топлива: а) бассейн выдержки отработавшего топлива CANDU, АЭС «Дарлингтон» (публикуется с разрешения ОПД); б) КР1 компании ТВО (публикуется с разрешения ТВО); в) гидрозатвор бассейна на перерабатывающем заводе в Ла-Аг компании «Орано» (публикуется с разрешения Эрика Ларрайдые); д) водо-водяные энергетические реакторы (бассейн выдержки отработавшего топлива ВВЭР на АЭС «Паки»).

первоначальная емкость ПР бассейна выдержки была увеличена с помощью таких средств, как переустановка сборок в решетку с более высокой плотностью ячеек, вставка материалов, поглощающих нейтроны, или применение аналитических средств (таких как кредит выгорания). Опыт мокрого ПР хранения сегодня превышает 60 лет, и полезную информацию можно найти в [7, 12].

Получили распространение «мокрые» ВР хранилища различных конструкций: они позволяют продолжить эксплуатацию реакторов после того, как их ПР бассейн будет заполнен, действуют как централизованное хранилище либо служат системой буферного хранения на перерабатывающем предприятии. Распределение запасов отработавшего топлива в ВР бассейнах по регионам показано на рис. 8. ВР бассейны выдержки отработавшего топлива могут быть наземными, заглубленными или подземными; централизованное хранилище КЛАБ в Швеции полностью расположено под землей. Хотя некоторые из первых ВР бассейнов сооружались так, чтобы иметь контакт с атмосферным воздухом, опыт эксплуатации и необходимость контролировать чистоту воды в бассейне привели к тому, что все новые бассейны стали устраиваться в крытых зданиях. И железобетонная конструкция бассейна, и крытое здание должны быть аттестованы на сейсмостойкость в соответствии с требованиями национального регулирующего органа. В зависимости от национальных требований безопасности могут применяться дополнительные требования относительно того, чтобы здание могло выдержать проектную аварию в результате падения самолета.

Большинство бассейнов выдержки топлива имеют схожую конструкцию: прямоугольную форму в плане и глубину от 10 до 13 м.

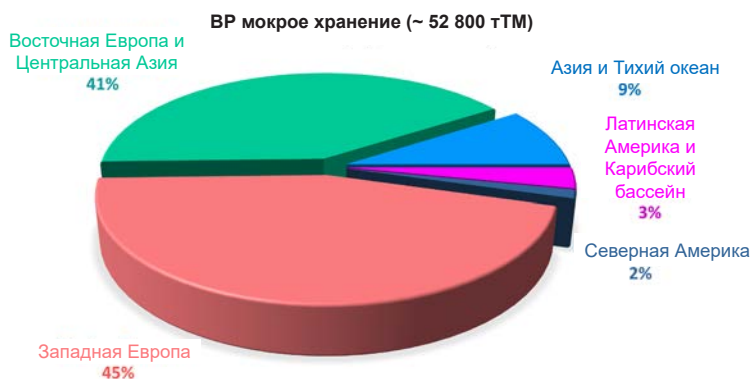


РИС. 8. Региональное распределение запасов ОЯТ в «мокрых» ВР хранилищах, 2019 год.



РИС. 9. Стеллаж для хранения топлива реакторов с водой под давлением (PWR). Публикуется с разрешения АНАВ (Ядерной ассоциации «Аско-Вандельос II»).

Поскольку отработавшее топливо содержит делящиеся изотопы, общий порядок хранения в ПР и ВР бассейнах определяется соображениями критичности и учитывает использование материалов, поглощающих нейтроны, шаг размещения тепловыделяющих сборок и (в некоторых случаях) кредит выгорания. Для поддержания шага размещения тепловыделяющих сборок они устанавливаются в стеллажи или корзины, расположенные на дне бассейна (рис. 9). В целом их можно описать следующим образом:

- стеллажи: фиксированная система ячеек хранения в основании бассейна;
- корзины: съемное приспособление, в которое помещаются несколько отработавших тепловыделяющих сборок;
- лотки (канадский дейтериево-урановый реактор (CANDU)): конструкции для хранения, вмещающие 24 пучка твэлов в два ряда по 12 в каждом.

Для вертикальной установки или извлечения сборок из стеллажей или корзин используется механическое транспортно-технологическое оборудование. Топливо CANDU хранится горизонтально в лотках, которые могут укладываться один на другой.

Типичное «мокрое» ВР хранилище включает в себя следующие элементы:

- прием транспортно-упаковочных контейнеров, дезактивацию, погрузку и разгрузку, обслуживание и отправку;
- подводное хранение отработавшего топлива (бассейн);
- работу вспомогательных служб, включая радиационный мониторинг, охлаждение и очистку воды, технологические операции с радиоактивными отходами, вентиляцию, электропитание.

Отработавшее топливо может быть перевезено во ВР хранилище при помощи транспортно-упаковочного контейнера, при этом топливо может находиться в мокром или сухом состоянии. Топливо может быть извлечено из транспортно-упаковочного контейнера как в виде отдельных сборок, так и будучи помещенным в многоместный пенал. Используются два типа методов разгрузки транспортно-упаковочных контейнеров: мокрый и сухой.

Большинство бассейнов облицованы нержавеющей сталью, однако некоторые бассейны имеют красочное покрытие на основе эпоксидной или алкидной смолы [12]. Облицовка или покрытие выполняют определенную функцию: они предотвращают вымывание химических веществ из несущих железобетонных стен в воду бассейна (которое может повлиять на целостность топлива), минимизируют или предотвращают проникновение активности в конструкцию бассейна и сводят к минимуму вероятность просачивания воды из бассейна. Облицовка из нержавеющей стали более предпочтительна из-за ее более высокой ударопрочности и лучшей поддержки общей целостности конструкции. Она оказалась наиболее эффективной с точки зрения облегчения дезактивации и предотвращения коррозии конструкции бассейна на так называемой линии ветер/вода — месте контакта воды бассейна с воздухом над бассейном [13]. В тех случаях, когда основной бассейн имеет красочное покрытие на основе смолы, в рабочих зонах, где существует более высокая вероятность загрязнения или механических повреждений, например в зонах технологических операций с транспортно-упаковочными контейнерами и топливом, используется облицовка из нержавеющей стали.

ВР бассейны заполняются деионизированной водой, а использование добавок зависит от типа помещаемого на хранение топлива и метода очистки воды. Химический состав воды может потребовать поддержания определенных параметров, таких как pH, и периодического измерения других параметров, таких как электропроводность, концентрация хлоридов, содержание растворенного железа и нефтепродуктов. Деградация топлива может быть сведена к минимуму за счет поддержания на допустимо

низких уровнях концентрации агрессивных анионов, таких как хлорид и сульфат. Поддержание постоянного химического состава воды также позволяет обеспечить прозрачность воды и не допустить появления микробиологических организмов; для борьбы с ростом микроорганизмов, если он будет происходить, могут использоваться коррекционные добавки¹⁰.

Уровень активности в воде поддерживается на разумно достижимом низком уровне (ALARA) при помощи находящихся внутри или вне бассейна ионообменных систем, а также путем ограничения выброса активности в основную массу воды бассейна.

Для контроля утечек из бассейна может использоваться встроенная система сбора протечек; вся собранная вода бассейна может быть возвращена в бассейн после очистки.

Поврежденное или дефектное топливо, как оно определено в публикации Серии изданий МАГАТЭ по ядерной энергии, № NF-T-3.6 [14], может быть изолировано от основной массы воды бассейна. Самым распространенным методом является «зачехловка» тепловыделяющей сборки или стержней. К более современным методам относится извлечение поврежденных или дефектных ТВЭЛов из сборки и их укладка в «колчан», который имеет схожие размеры и характеристики с тепловыделяющей сборкой. Оба метода обеспечивают физическую или газовую изоляцию отработавшего топлива от основной массы воды бассейна.

Первоначальные стеллажи или корзины для хранения во многих бассейнах отработавшего топлива легководных реакторов (LWR) проектировались исходя из характеристик свежего топлива как пассивное средство обеспечения подкритичности, результатом чего стала низкая плотность хранения. Ввиду необходимости хранения больших объемов топлива подкритичность при более высокой плотности хранения обеспечивается за счет использования в стеллажах и корзинах материалов, поглощающих нейтроны, а также за счет использования предположений о кредите выгорания.

При мокром хранении отработавшее топливо LWR с оболочкой из циркония и нержавеющей стали превосходно сохраняет свои характеристики; не было ни определено, ни выявлено опытным путем никакого общего механизма повреждения. Что касается отработавшего топлива усовершенствованных газоохлаждаемых реакторов (AGR) с оболочкой из нержавеющей стали, то опыт мокрого хранения такого топлива насчитывает уже более 30 лет. Результаты хранения такого

¹⁰ Необходимо тщательно продумать дозировку реагентов, используемых для борьбы с биологическим ростом и его потенциальным воздействием на хранящееся топливо, поскольку некоторые реагенты содержат высокий уровень хлорида.

топлива положительные при условии, что оно хранится в присутствии ингибитора коррозии [15].

3.2. СУХОЕ ХРАНЕНИЕ

В последние десятилетия активно велись разработки и быстрыми темпами шло внедрение различных технологий сухого хранения. Исходя из практических и экономических соображений были разработаны различные технологии сухого хранения отработавшего топлива, отвечающие специфическим требованиям различных типов реакторного топлива, таким как максимально допустимая температура оболочки и защитная газовая среда (воздух, CO_2 или гелий).

Изначально системы сухого хранения разрабатывались с единственной целью — обеспечить ВР хранение. Альтернативой узкоспециальным системам (только для хранения) стали конструкции двухцелевых контейнеров (ДЦК) (например, DSC в Канаде, TN-24 во Франции, CASTOR в Германии и NAC-STC в США), которые позволяли хранить и транспортировать тепловыделяющие сборки в одном и том же контейнере без необходимости их перегрузки. Системы сухого хранения, предназначенные, помимо хранения и транспортировки, для решения задач захоронения, называются многоцелевыми контейнерами; в настоящее время эти системы являются концептуальными, поскольку этап захоронения еще не наступил.

Загрузка и осушка топлива производятся в бассейне выдержки отработавшего топлива (в зависимости от типа системы после извлечения из бассейна могут потребоваться дополнительные действия). Что касается последующего обращения с топливом, то можно выделить два основных типа систем сухого хранения, которые описываются ниже.

- Системы хранения топлива без пеналов. Топливо хранится в едином блоке (например, в ДЦК), который обеспечивает все функции безопасности, такие как локализация и защита, и закрывается крышкой на болтах. Всю систему можно хранить и транспортировать как единую упаковку.
- Системы хранения топлива в пеналах. Топливо хранится в тонкостенном пенале, который после осушки заваривается. Пенал обеспечивает функцию локализации, но защита обеспечивается либо наружным контейнером, либо транспортным пакетом (например, транспортно-упаковочным контейнером или модулем хранения). Для последующей транспортировки пенал необходимо переместить между

защитной конструкцией хранилища и транспортным пакетом. Если пеналы используются в системах хранения топлива CANDU, их часто называют «корзинами».

В обоих типах систем для поддержания топлива в подкритическом состоянии могут использоваться внутренние корзины, которые могут содержать материалы, поглощающие нейтроны. При перемещении отработавшего топлива в систему сухого хранения очень важно исключить попадание воды и влаги, чтобы свести к минимуму любые последствия деградации отработавшего топлива и компонентов системы [16].

Последовательность типичных действий по загрузке пенала показана на рис. 10.

На рис. 11 приведена классификация существующих на сегодняшний день технологий сухого хранения вместе с примерами различных промышленных конструкций.



РИС. 10. Пример основных этапов загрузки отработавшего топлива в систему пенального типа (публикуется с разрешения «Орано федерал сервисиз»).

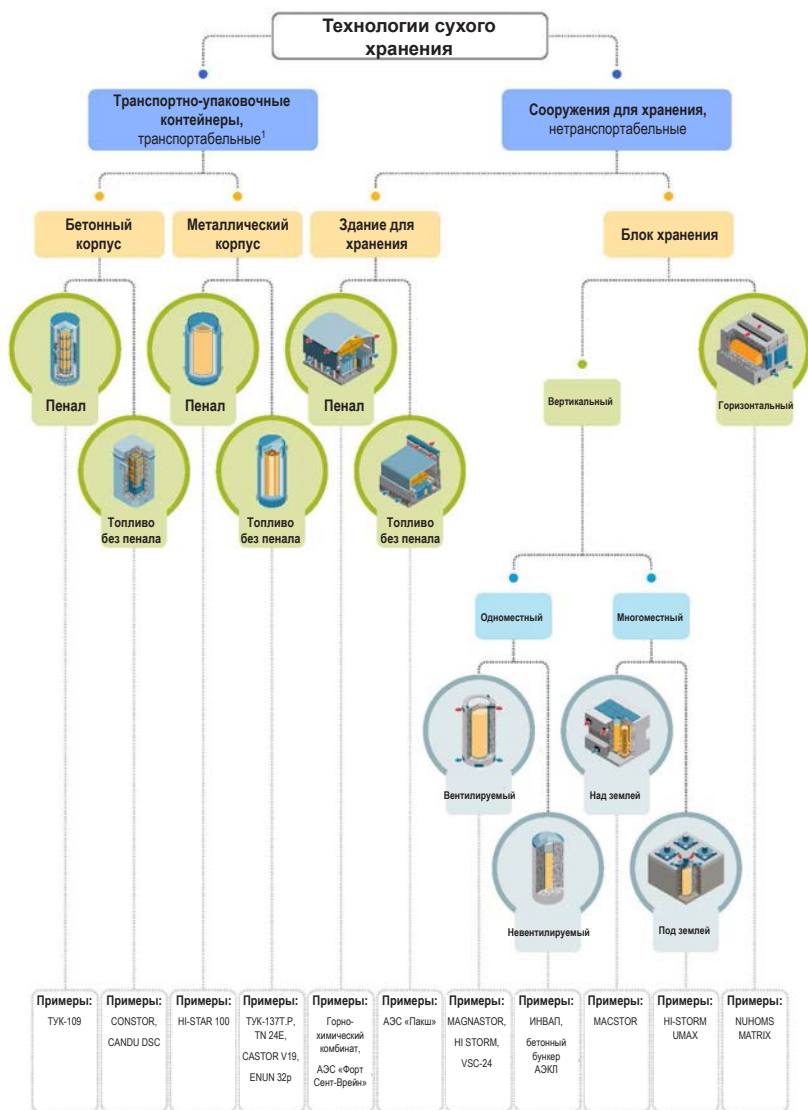


РИС. 11. Технологии сухого хранения, имевшиеся в 2023 году.

Хронология развития систем сухого хранения показана на рис. 12. Первыми «сухими» хранилищами были специальные здания для хранения (камеры), построенные около 1970 года (АЭС «Уилфа» компании «Магнокс», Соединенное Королевство), после чего в 1977 году началось использование

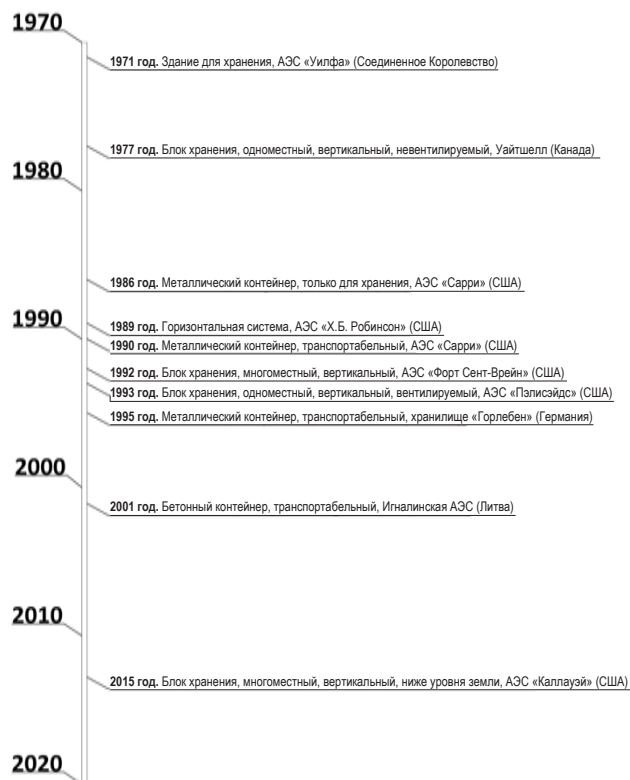


РИС. 12. Сроки первого внедрения технологий сухого хранения каждого типа.

вертикальных блоков хранения (бункеров) для хранения топлива CANDU. Горизонтальные блоки хранения и металлические контейнеры вошли в употребление примерно в середине 1980-х годов. Примерно десять лет спустя вертикальные блоки хранения были объединены для создания более крупных блоков (MACSTOR: Modular Air-Cooled STORage (модульное хранилище с воздушным охлаждением)), а на рынке появились бетонные контейнеры. Вентилируемые вертикальные блоки хранения стали применяться в 1990-х годах (в США в 1993–1996 годах), что позволило значительно повысить уровень тепловой нагрузки по сравнению с первыми конструкциями. В недавнее время, в 2015 году, начали сооружаться вертикальные блоки хранения, расположенные ниже уровня земли, которые обеспечивают дополнительную защиту от природных или антропогенных явлений.

Распределение запасов отработавшего топлива по различным типам систем сухого хранения на отчетную дату 2019 года показано на рис. 13.

Относительное распределение запасов отработавшего топлива в различных системах сухого хранения по регионам показано на рис. 14. В Латинской Америке и Азиатско-Тихоокеанском регионе для топлива CANDU используются преимущественно «сухие» хранилища, поэтому в них преобладают вертикальные блоки хранения: одноместные (бетонные бункеры) либо многоместные, такие как MACSTOR. В Японии для топлива LWR используются металлические контейнеры.

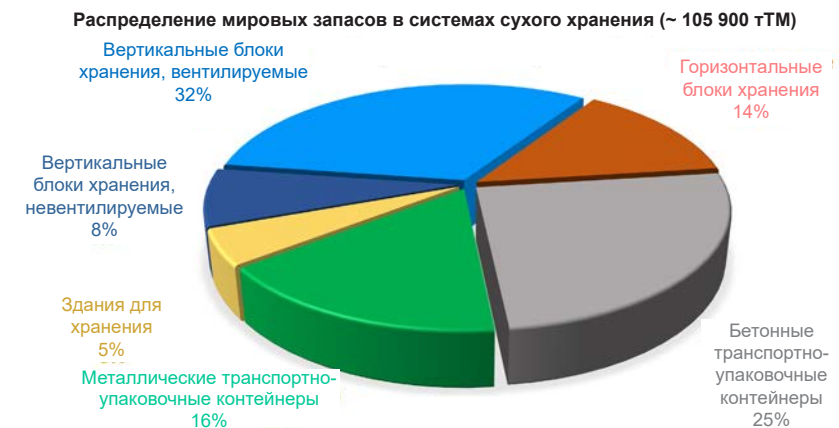


РИС. 13. Распределение мировых запасов ОЯТ в «сухих» хранилищах, 2019 год.

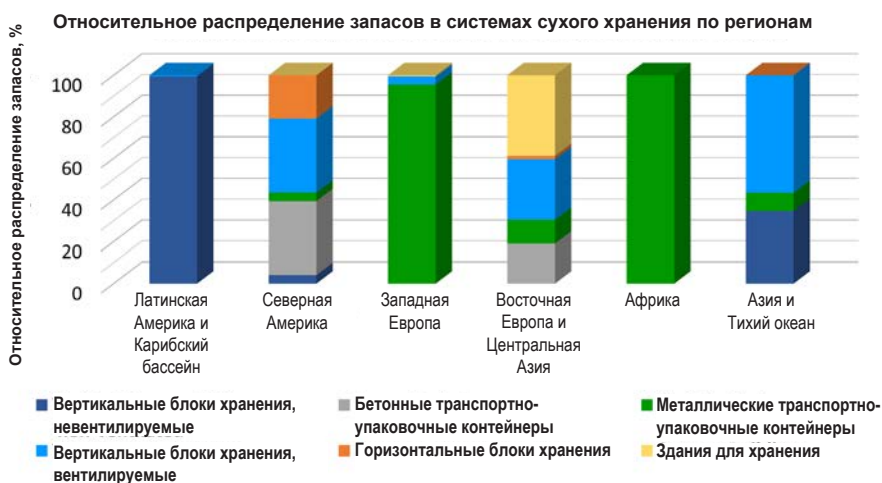


РИС. 14. Использование различных систем сухого хранения по регионам, 2019 год.

В Западной Европе предпочтительным методом является хранение в металлических ДЦК. Решение о применении металлических ДЦК обусловлено регулирующими требованиями и возможностью хранить и транспортировать топливо в одних и тех же контейнерах.

В Восточной Европе и Центральной Азии значительная часть отработавшего топлива, находящегося на сухом хранении, размещена в зданиях модульно-камерного сухого хранилища (МКСХ) АЭС «Пакш» в Венгрии и на Горно-химическом комбинате (ГХК) в Российской Федерации. В других странах Восточной Европы выбор технологии хранения зависит от ряда факторов, включая объем финансирования, политику в отношении топливного цикла и тип топлива.

В Северной Америке используется широкий спектр технологий. В США выбор системы сухого хранения, используемой на площадке той или иной АЭС, осуществляется управляющей энергетической компанией. Он зависит от многих факторов, включая тип топлива, дату строительства, условия на площадке и вопросы будущей транспортировки; часто на одной и той же площадке можно встретить конструкции нескольких типов. В Канаде для хранения топлива CANDU используются различные конструкции, включая бетонные контейнеры и вертикальные блоки хранения.

Существующие на данный момент технологии сухого хранения описаны в нижеследующих подразделах.

3.2.1. Контейнеры сухого хранения (металлические и бетонные)

Контейнер сухого хранения обеспечивает локализацию отработавшего топлива при помощи физических барьеров, которые могут включать металлический корпус либо бетонный корпус с металлической обечайкой. Несмотря на существование множества конструктивных решений, некоторые примеры которых показаны на рис. 15, все они имеют следующие общие характеристики:

- отработавшие тепловыделяющие сборки хранятся в фиксированном положении либо с помощью встроенной корзины (в случае хранения без пеналов), либо внутри отдельного металлического пенала;
- в зависимости от конструкции транспортно-упаковочный контейнер герметизируется либо с помощью крышки на болтах с уплотнениями, либо сваркой;
- остаточное тепловыделение отводится от топлива путем переноса, излучения и естественной конвекции в окружающую среду;
- радиологическая защита обеспечивается корпусом контейнера.



РИС. 15. Примеры транспортно-упаковочных контейнеров различных типов в Айдахской национальной лаборатории, США.

Помимо хранения, некоторые контейнеры могут использоваться для транспортировки отработавшего топлива и других радиоактивных материалов.

Транспортно-упаковочные контейнеры хранятся либо в здании, либо вне здания на бетонной площадке, в зависимости от национальных регулирующих положений и условий окружающей среды (например, морского, засушливого, влажного климата). Другие факторы, влияющие на размещение транспортно-упаковочных контейнеров, включают используемую технологию, требования национальной безопасности и местонахождение объекта. Хранилище транспортно-упаковочных контейнеров может иметь специальное оборудование для технологических операций с контейнерами, операций с топливом, дезактивации, контроля радиационной защиты и контроля герметичности. В зависимости от регулирующих требований транспортно-упаковочные контейнеры могут постоянно проверяться на герметичность, мощность дозы и температуру, а могут и не проверяться. В случае отсутствия постоянного мониторинга контейнеры регулярно осматриваются.

На этапах проектирования хранилища транспортно-упаковочных контейнеров необходимо продумать инфраструктуру, которая потребуется для обращения с ними в долгосрочной перспективе. В частности,

выполнение любой операции по техническому обслуживанию или ликвидации последствий непредвиденной ситуации, за которую отвечают ПР службы (например, замена уплотнений контейнера, если это необходимо), будет затруднено, если инфраструктура реактора будет сокращена или ликвидирована после вывода реактора из эксплуатации.

3.2.1.1. Металлические транспортно-упаковочные контейнеры

В металлические транспортно-упаковочные контейнеры либо загружается топливо в пеналах, либо устанавливается внутренняя корзина, облегчающая подкритическое расположение тепловыделяющих сборок и передачу остаточного тепловыделения от отработавшего топлива к корпусу контейнера, как показано на рис. 16.

Металлические транспортно-упаковочные контейнеры — это толстостенные контейнеры; конструкционные материалы или основной корпус могут быть выполнены из ковanej стали, высокопрочного чугуна с шаровидным графитом или многослойного листа из стали и свинца. Внешняя поверхность металлических транспортно-упаковочных контейнеров может иметь красочное покрытие или быть выполнена из нержавеющей стали; она позволяет отводить остаточное тепловыделение, в основном за счет теплопереноса и конвекции, но также за счет теплового излучения. Основной корпус обеспечивает экранирование гамма-излучения. Конструкции обычно предусматривают дополнительную защиту от нейтронов, и в настоящее время для этого используются две технологии: полимерные композиты или отсеки с водой, в которую в итоге добавляется пропиленгликолевая присадка. Используются разного рода полимеры:

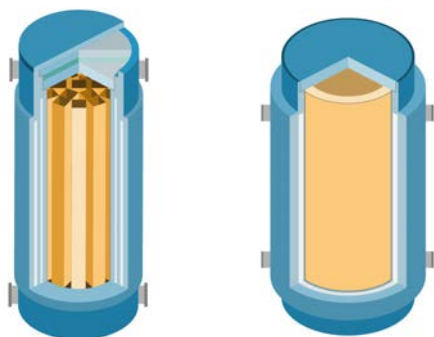


РИС. 16. Внутренняя конструкция металлических транспортно-упаковочных контейнеров для топлива без пеналов (слева) и топлива в пеналах (справа).

полиэтиленовые стержни высокой плотности или слои термореактивного материала (например, полиэфира или эпоксидной смолы).

Металлические транспортно-упаковочные контейнеры обычно закрываются двойной крышкой на болтах с металлическими уплотнениями, которые проверяются на герметичность. Составные части металлического транспортно-упаковочного контейнера схематически показаны на рис. 17.

Металлические транспортно-упаковочные контейнеры обычно перемещаются в хранилище непосредственно из зоны загрузки топлива. Некоторые металлические транспортно-упаковочные контейнеры представляют собой ДЦК, спроектированные и лицензированные как для хранения, так и для транспортировки за пределы площадки. В транспортной конфигурации транспортно-упаковочный контейнер оснащается верхними

TN 24 ВН в ТРАНСПОРТНОЙ КОНФИГУРАЦИИ

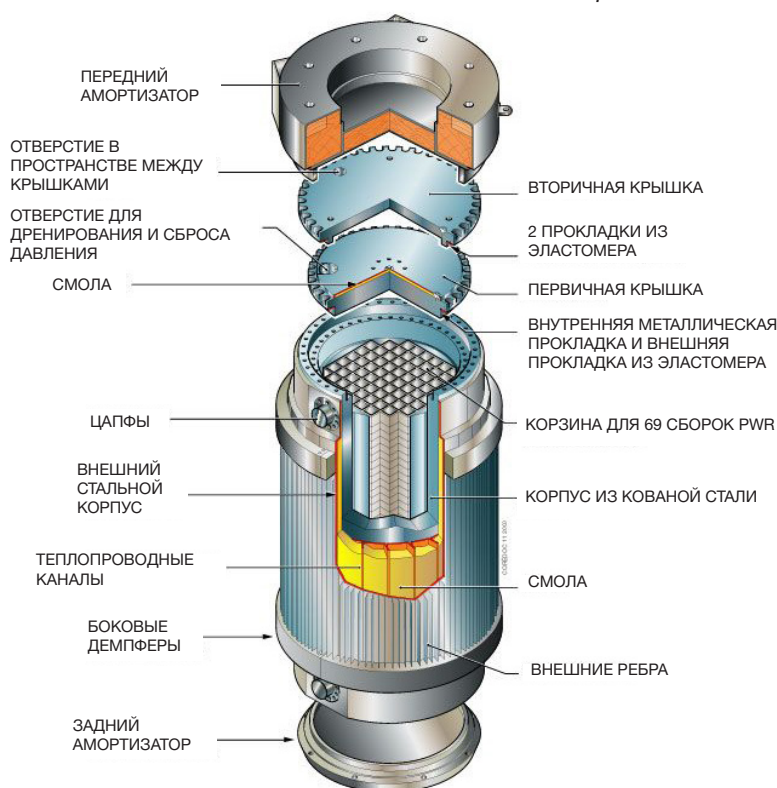


РИС. 17. Основные составные части металлического транспортно-упаковочного контейнера для сухого хранения отработавших тепловыделяющих сборок (публикуется с разрешения «Орано ТН интернэшнл»).

и нижними амортизаторами (также известными как демпферы) для соответствия требованиям безопасности в случае дорожно-транспортного происшествия; некоторые конструкции также имеют дополнительные амортизаторы вокруг корпуса контейнера. Иногда такая конфигурация используется на площадке для перемещения транспортно-упаковочного контейнера со станции загрузки топлива в хранилище. Отработавшие тепловыделяющие сборки загружаются вертикально в транспортно-упаковочные контейнеры, которые часто хранятся в вертикальном положении, но некоторые металлические контейнеры хранятся горизонтально (например, на АЭС «Фукусима-дайити», Япония, рис. 18, и АЭС «Куберг», Южная Африка, рис. 19).

Горизонтальное хранение ДЦК в бетонных модулях также использовалось в качестве временного решения во время строительства внутриобъектовых хранилищ в Германии (рис. 20).



РИС. 18. Временное «сухое» хранилище транспортно-упаковочных контейнеров на АЭС «Фукусима-дайити» Токийской электроэнергетической компании (ТЕПКО).



РИС. 19. Горизонтальное хранение на АЭС «Куберг», Южная Африка (публикуется с разрешения «Гезельшафт фюр нуклеар сервис»).



РИС. 20. Временное горизонтальное хранение в Германии (публикуется с разрешения «Гезельшафт фюр нуклеар сервис»).

Металлические транспортно-упаковочные контейнеры используются для хранения отработавшего топлива в ряде стран, таких как Бельгия, Германия, Испания, Казахстан, Литва, США, Чешская Республика, Швейцария, Южная Африка и Япония.

3.2.1.2. Бетонные транспортно-упаковочные контейнеры

Бетонные транспортно-упаковочные контейнеры используются для хранения, а в ряде случаев и для транспортировки отработавшего топлива. Структурная прочность и радиологическая защита обеспечиваются железобетоном обычной или высокой плотности. В них может использоваться металлическая обечайка с красочным покрытием снаружи и еще одна в полости контейнера для локализации отработавшего топлива. Отвод тепла может происходить исключительно за счет теплопереноса через бетонную конструкцию. Поэтому этот тип транспортно-упаковочных контейнеров имеет больше ограничений по тепловой нагрузке, чем системы с естественной конвекцией воздуха. Бетонные транспортно-упаковочные контейнеры могут быть оснащены одинарной или двойной крышкой, которая, в зависимости от конструкции, может завариваться или закрываться на болтах, а затем проверяться на герметичность. Системы бетонных транспортно-упаковочных контейнеров могут проверяться или не проверяться на герметичность, в зависимости от регулирующих требований. Бетонный транспортно-упаковочный контейнер показан на рис. 21.

Отработавшее топливо загружается в вертикальном положении непосредственно в корзину бетонного контейнера на станции загрузки

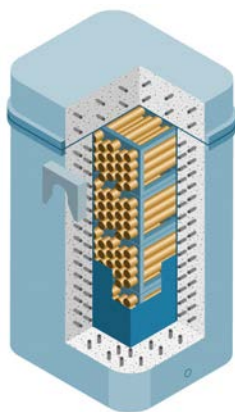


РИС. 21. Внутренняя и внешняя конструкция бетонного транспортно-упаковочного контейнера.

топлива, а затем перемещается в хранилище. Бетонные транспортно-упаковочные контейнеры хранятся в вертикальном положении.

Бетонные транспортно-упаковочные контейнеры используются в ряде стран, таких как Болгария, Канада (рис. 22) и Литва (рис. 23). Компания «Гезельшафт фюр нуклеар сервис» спроектировала бетонный транспортно-упаковочный контейнер CONSTOR, который выпускается с охлаждающими ребрами и без них и допускает транспортировку (рис. 24). Пакистан разработал контейнер собственной конструкции. Бетонный контейнер

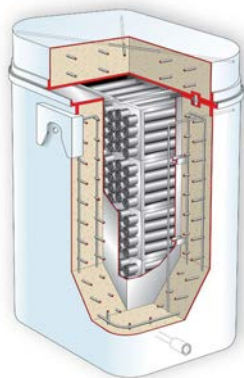


РИС. 22. Бетонный контейнер сухого хранения компании «Онтарิโอ пауэр дженерейшн», Канада.



РИС. 23. Сухое хранение в бетонных транспортно-упаковочных контейнерах CONSTOR на Игналинской АЭС, Литва (публикуется с разрешения ГП «Игналинская атомная электростанция»).



РИС. 24. Транспортно-упаковочные контейнеры CONSTOR, «Гезельшафт фюр нуклеар сервис», Германия.

для сухого хранения производства «Онтарио пауэр дженерейшн» также допускает транспортировку за пределы площадки.

Распределение мировых запасов отработавшего топлива, хранящегося в контейнерах сухого хранения (металлических и бетонных), по регионам и странам показано на рис. 25 и 26 соответственно. На конец 2019 года «сухие»



РИС. 25. Сухое хранение в металлических и бетонных транспортно-упаковочных контейнерах, в разбивке по регионам, 2019 год.



РИС. 26. Распределение мировых запасов отработавшего топлива в контейнерах сухого хранения по странам, 2019 год.

хранилища транспортно-упаковочных контейнеров различных конструкций имелись в Бельгии, Болгарии, Германии, Испании, Казахстане, Канаде, Литве, Российской Федерации, США, Чешской Республике, Швейцарии, Южной Африке и Японии. Кроме того, в настоящее время лицензируются и сооружаются новые контейнерные хранилища в Испании и Японии.

3.2.2. Блоки сухого хранения (вертикальные и горизонтальные)

Блоки сухого хранения представляют собой монолитные или модульные железобетонные конструкции. Бетон обеспечивает защиту, а локализация обеспечивается либо встроенной внутренней металлической обечайкой, которая может быть герметично закрыта после загрузки топлива, либо отдельным герметичным металлическим пеналом.

Более половины запасов отработавшего топлива в блоках хранения находится в США (рис. 27). Бразилия, Испания, Мексика, Словакия, Словения, Соединенное Королевство, Украина и Швейцария находятся на разных стадиях внедрения блоков хранения в рамках реализуемых ими стратегий хранения.

Блоки сухого хранения могут иметь как вертикальную, так и горизонтальную конфигурацию. На рис. 28 показано распределение запасов отработавшего топлива между вертикальными вентилируемыми, вертикальными невентилируемыми и горизонтальными блоками хранения по разным регионам. Горизонтальная конфигурация получила распространение в основном в Северной Америке.

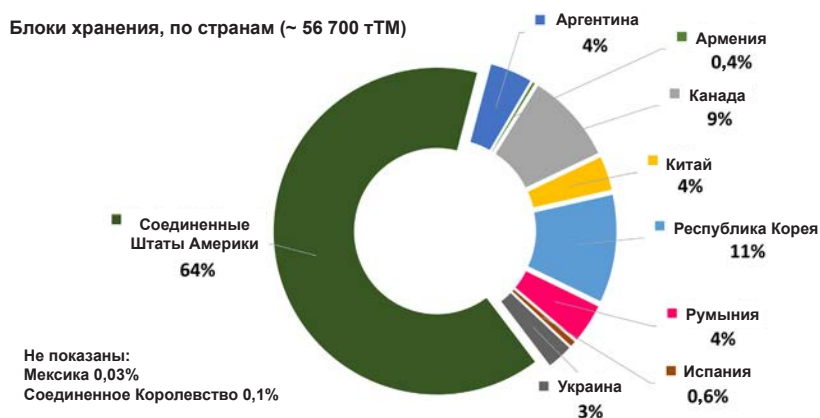


РИС. 27. Распределение мировых запасов отработавшего топлива в блоках сухого хранения по странам, 2019 год.

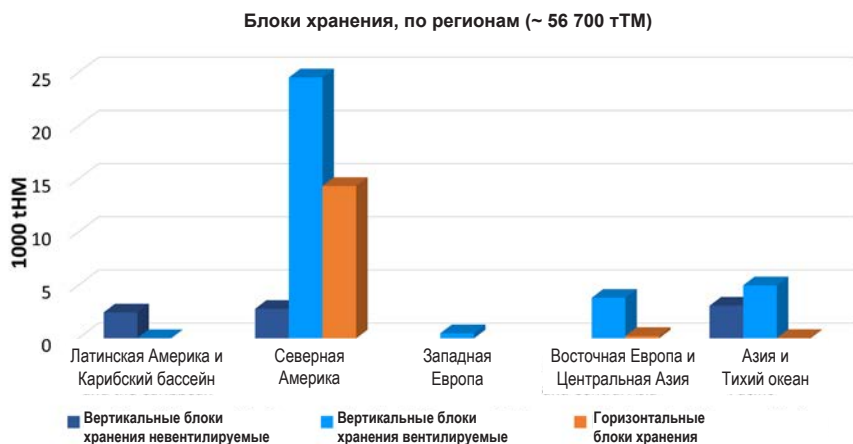


РИС. 28. Распределение отработавшего топлива в блоках сухого хранения по регионам, 2019 год.

3.2.2.1. Вертикальные блоки хранения

Типичным примером одного из первых вертикальных блоков хранения (иногда называемого бункером) является модуль CANSTOR (CANdu STORage), спроектированный компанией «Атомик энерджи оф Кэнада». Эти блоки были отлиты на месте из обычного железобетона и оснащены стальной внутренней обечайкой. Отработавшее топливо загружается в герметичные корзины и перемещается в блок хранения с помощью экранированного передаточного контейнера, а затем вертикально загружается в систему. Устанавливается закрывающая защитная пробка и приваривается к внутренней обечайке, чтобы обеспечить дополнительную герметизацию после завершения погрузочных операций. На рис. 29 показан невентилируемый вертикальный блок хранения. Эта система используется также на объекте «Вольсон» (Республика Корея), и аналогичная схема используется на АЭС «Эмбальсе» в Аргентине (рис. 30).

Модульная конструкция MACSTOR представляет собой систему цилиндров для хранения — схожую с системой CANSTOR, — собранных в единую монолитную конструкцию. MACSTOR, распространяемый компанией «Канду энерджи, инк.», был разработан для отработавшего топлива LWR, но на данный момент используется только для хранения топлива CANDU. Модуль имеет большие отверстия для входа и выхода воздуха, расположенные в виде лабиринта для экранирования, на каждой стороне конструкции, как показано на рис. 31. Охлаждающий воздух,

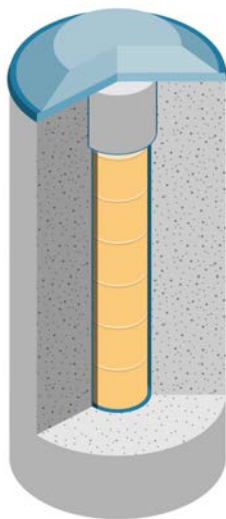


РИС. 29. Невентилируемый вертикальный блок хранения в разрезе.



РИС. 30. Сухое хранение на АЭС «Эмбальсе», Аргентина (публикуется с разрешения Национальной комиссии по атомной энергии (НКАЭ)).

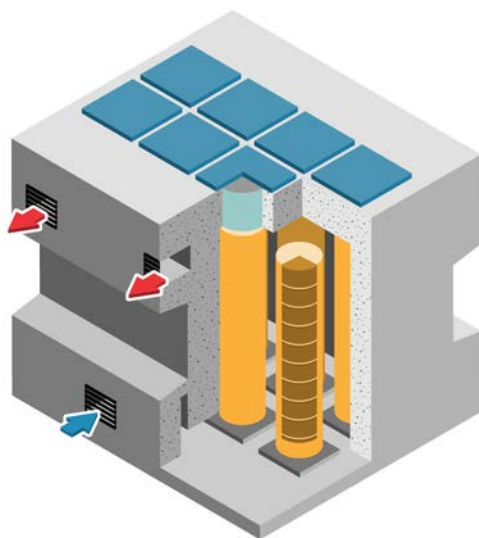


РИС. 31. Вид в разрезе вертикального многоместного блока хранения.

приводимый в движение естественной конвекцией, поступает через нижние впускные отверстия и выходит через верхние. Цилиндры для хранения проходят сквозь верхнюю плиту модуля и устанавливаются в подвешенном состоянии внутри модуля. В боковом направлении они удерживаются у основания двумя сейсмическими демпферами, закрепленными в полу модуля. В зависимости от типа топлива и конкретной системы хранения топливо может загружаться в цилиндры для хранения в герметичных металлических корзинах (см. схему на рис. 32). Герметичные металлические корзины могут быть лицензированы для транспортировки в составе транспортного пакета. Эти модули используются на АЭС «Жантийи-2» (Канада), АЭС «Циньшань» (Китай), объекте «Вольсон» (Республика Корея) и АЭС «Чернаводэ» (Румыния).

В вентилируемые вертикальные блоки хранения может помещаться топливо LWR и/или высокоактивные отходы (BAO) в герметично заваренном пенале двойного назначения (рис. 33). Примерами вентилируемых вертикальных блоков хранения являются вертикальный контейнер хранения (ВКХ), спроектированный «Сьерра ньюклар», MAGNASTOR («Ньюклар эшюаранс корпорейшн (НАК) интернэшнл») (рис. 34) и HI-STORM (модуль хранения «Холтек интернэшнл»). Впускные отверстия для воздуха в нижней части блока и выпускное отверстие в верхней части



РИС. 32. MACSTOR 400 в разрезе (публикуется с разрешения Корейской компании по гидро- и ядерной энергетике, Республика Корея).

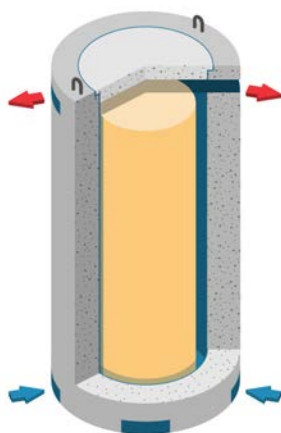


РИС. 33. Вид в разрезе вентилируемого вертикального блока хранения.

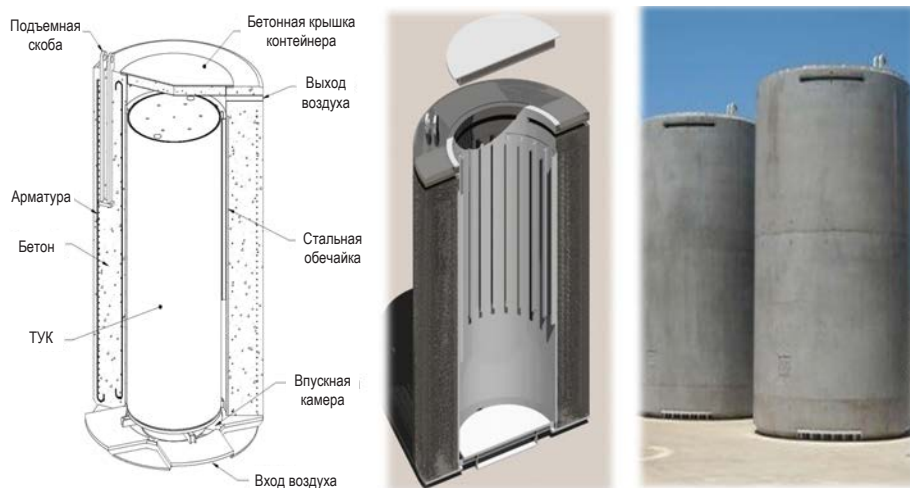


РИС. 34. Вертикальный блок хранения (MAGNASTOR, HAK) с пеналом внутри.

обеспечивают достаточное охлаждение за счет естественной конвекции. Блоки хранения этих типов используются в основном в США и на Украине.

Другой пример хранилища бункерного типа — подземное хранилище компании «Холтек интернэшнл» (HI-STORM UMAX), описанное в приложении I.

3.2.2.2. Горизонтальные блоки хранения

Горизонтальные блоки основаны на той же концепции, что и вертикальные монолитные блоки, но имеют другую ориентацию. Эти блоки хранения могут располагаться на одном или двух уровнях и могут проверяться на мощность дозы и герметичность. Схематическое изображение системы показано на рис. 35. Матричный горизонтальный модуль хранения «Орано ТН» (рис. 36) — пример двухуровневого блока, разработанного для того, чтобы уменьшить занимаемую площадь.

Отработавшее топливо вертикально загружается в металлические пеналы, которые завариваются и доставляются в зону хранения в передаточном контейнере. Пенал выдвигается из передаточного контейнера в горизонтальном положении и помещается в бетонный модуль хранения (рис. 37).

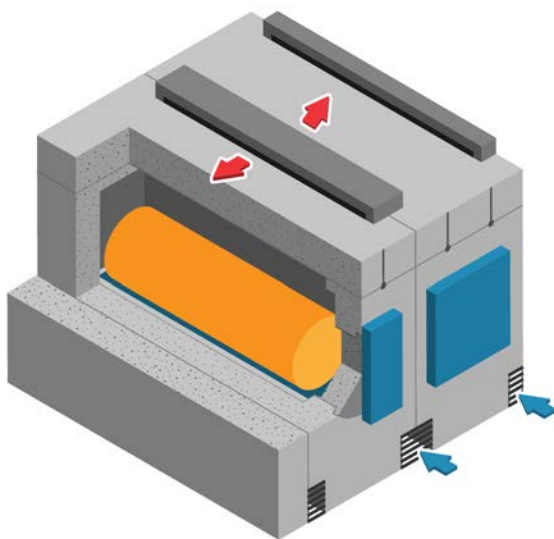


РИС. 35. Вид в разрезе горизонтального многоместного блока хранения.



РИС. 36. Матричная система на АЭС «Вулф Крик» (публикуется с разрешения «Орано»).



РИС. 37. Загрузка пенала в горизонтальный бетонный модуль (система NUClear HOriZontal Modular Storage компании «Орано», известная как NUHOMS, «ТН Америкас»).

3.2.3. Здания для хранения

Здания для хранения ОЯТ (иногда называемые камерами) обычно представляют собой наземные или подземные железобетонные сооружения с системами гнезд для хранения, пригодных для размещения одной или нескольких тепловыделяющих сборок. Экранирование обеспечивается внешней конструкцией. Отвод тепловыделения обычно происходит за счет естественной конвекции воздуха или газа на внешней поверхности гнезд и последующего выпуска этого воздуха после контрольной проверки.

Камеры также являются модульными, что позволяет постепенно увеличивать емкость, разделять функции защиты и локализации, а также осуществлять мониторинг герметичности. Они размещаются в здании с соответствующей инфраструктурой (краны, вентиляция и т.д.), как показано на рис. 38.

Отработавшее топливо поступает (в сухом или мокром виде) в хранилище в передаточных или транспортных контейнерах — в зависимости от того, находится ли хранилище на площадке реактора или нет. Затем топливо извлекается из транспортных контейнеров, подготавливается к хранению (например, путем осушки), если это необходимо, и помещается в металлическую направляющую трубку для хранения (единичный твэл) или цилиндр для хранения (одноместный или многоместный пенал), которые имеют вертикальную ориентацию и размещаются внутри бетонного

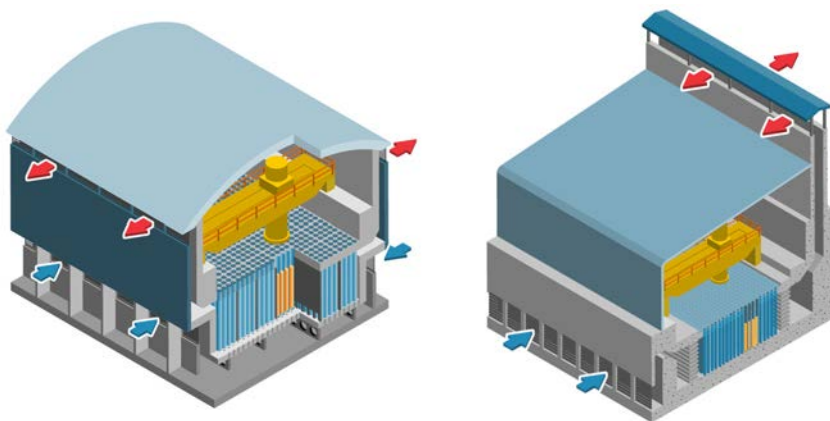


РИС. 38. Вид в разрезе здания для хранения с топливом в пеналах (слева) и с топливом без пеналов (справа).

гнезда хранения, предусмотренного конструкцией камеры. Трубки или цилиндры для хранения герметизируются и заполняются инертным газом для улучшения теплопередачи и предотвращения окисления отработавшего топлива во время хранения. Некоторые конструкции оснащаются соединениями, позволяющими осуществлять непрерывный или периодический мониторинг состояния и/или локализации топлива.

Типичными компонентами хранилища такого типа являются модули хранения, машина для перегрузки топлива, зона приема транспортных контейнеров и вспомогательные помещения (зоны управления установкой, технического обслуживания, общие службы, офисы и т.д.). Примером может служить МКСХ на АЭС «Пакш» (Венгрия), показанное на рис. 39–41.

В камерных хранилищах, где используются цилиндры для хранения, топливо может поступать на хранение уже внутри герметичного пенала, как на МКСХ АЭС «Форт Сент-Врейн» (США), либо загружаться в пеналы в горячей камере в хранилище, как это делается в централизованном «сухом» хранилище на ГХК (Российская Федерация), показанном на рис. 42. В этих хранилищах камерного типа используется перегрузочная машина. Перемещение заполненного пенала в гнездо хранения осуществляется либо дистанционно (ГХК), либо с помощью оператора (АЭС «Форт Сент-Врейн»).

Около 8% запасов отработавшего топлива, хранящегося в сухих системах, находится в зданиях для хранения, преимущественно на ГХК (Российская Федерация), как показано на рис. 43. Одно хранилище такого типа в настоящее время сооружается в Словакии.

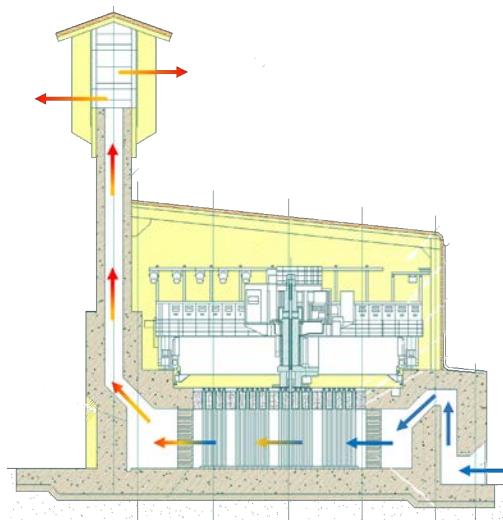


РИС. 39. Конструкция МКСХ на АЭС «Паки», Венгрия.

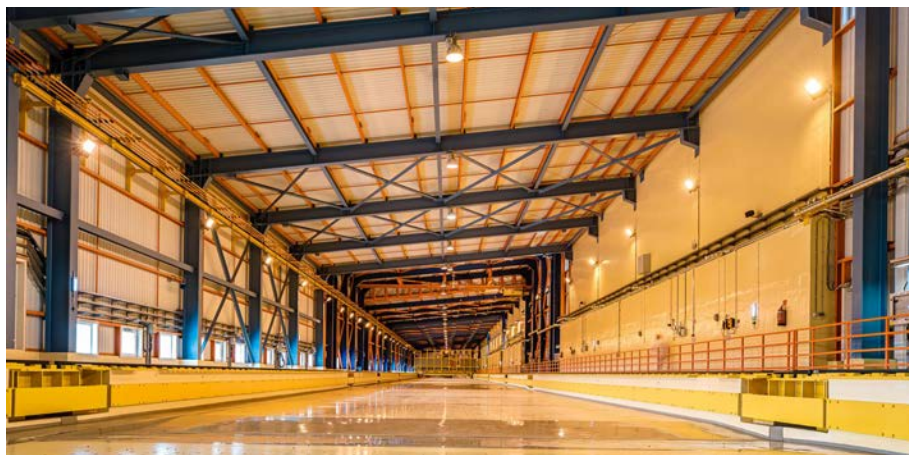


РИС. 40. Зал хранения МКСХ на АЭС «Паки», Венгрия.



РИС. 41. Вид крупным планом верхней части направляющих трубок для хранения на АЭС «Паки», Венгрия.



РИС. 42. «Сухое» хранилище в Железногорске, Горно-химический комбинат Росатома, Российская Федерация.

Здания для хранения, по странам (~ 5 200 тТМ)

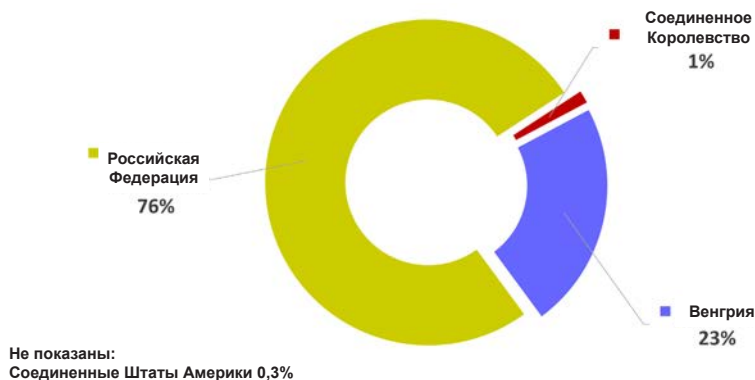


РИС. 43. Распределение мировых запасов отработавшего топлива в зданиях для хранения по странам, 2019 год.

4. БЕЗОПАСНОСТЬ

Хранилища отработавшего топлива («мокрые» или «сухие») содержат большое количество радиоактивных материалов, и их работа регулируется компетентным национальным органом. Вопросы безопасности всех операций по хранению отработавшего топлива рассматриваются в серии международных руководств по безопасности, выпущенных МАГАТЭ и рядом других международных организаций и используемых в качестве основы для соответствующих национальных нормативных документов; некоторые из них перечислены в приложении II. Каждое государство-член может вводить собственные национальные правила ядерной безопасности на основе указанных нормативных документов. В своей совокупности они образуют свод строгих критериев и правил ядерной безопасности и радиационной защиты для достижения главной цели безопасности — защиты людей и окружающей среды от вредного воздействия ионизирующих излучений.

Нормы безопасности МАГАТЭ содержат основополагающие принципы, требования и рекомендации по обеспечению ядерной безопасности. Выпускаются публикации трех категорий:

- в публикациях категории «Основы безопасности» устанавливаются основополагающая цель безопасности и принципы защиты и безопасности;
- в публикациях категории «Требования безопасности» устанавливаются требования, которые должны выполняться с целью обеспечения защиты людей и охраны окружающей среды в настоящее время и в будущем;
- в руководствах по безопасности содержатся рекомендации и руководящие указания по соблюдению требований.

Как указано в требовании 32 публикации GSR Part 1 [17], регулирующие положения и руководства по безопасности, определяющие принципы, требования и соответствующие критерии безопасности, должны устанавливаться или приниматься национальным регулирующим органом.

Согласно требованию 2 публикации МАГАТЭ категории конкретных требований безопасности, № SSR-4, «Безопасность установок ядерного топливного цикла» [18], главная ответственность за безопасность установки ядерного топливного цикла в течение всего ее жизненного цикла лежит на эксплуатирующей организации. Эта ответственность включает в себя обеспечение того, чтобы проект отвечал всем применимым требованиям безопасности.

В публикации МАГАТЭ № SSR-4 [18] приведены основные функции безопасности, которые обеспечивают безопасное проектирование и эксплуатацию любой установки ядерного топливного цикла. Эти функции безопасности также создают условия «для поддержания на разумно достижимом низком уровне воздействия на людей и окружающую среду» [18]. Применительно к хранению ОЯТ эти функции более подробно определены в специальном руководстве МАГАТЭ по безопасности, № SSG-15, «Storage of Spent Nuclear Fuel» («Хранение отработавшего ядерного топлива») [2] следующим образом:

- a) локализация радионуклидов;
- b) обеспечение безопасности по критичности;

- с) отвод тепловыделения¹¹;
- д) защита от излучения;
- е) извлекаемость.

Пример обеспечения функций безопасности конструкцией металлического контейнера сухого хранения показан на рис. 44.

Извлекаемость, о которой конкретно не говорится в публикации МАГАТЭ № SSR-4 [18], предусмотрена в публикации МАГАТЭ № SSG-15 (Rev. 1) [2], где четко указывается, что «суть намерения хранить отработавшее топливо состоит в том, чтобы в более позднее время его можно было извлечь для переработки или обработки и/или захоронения». Для топлива, хранящегося в виде сборок без пеналов, функция извлекаемости обеспечивается поддержанием структурной целостности топлива и оболочки. Следует также уделить внимание реализации функции извлекаемости за счет обеспечения извлекаемости упаковки. Когда



РИС. 44. Принципиальная схема металлического транспортно-упаковочного контейнера и функции безопасности при хранении отработавшего топлива (воспроизводится с разрешения из издания Saegusa, T. (2015). *Basis of Spent Nuclear Fuel Storage*, ERC Publishing Co., Ltd.).

¹¹ Отвод тепловыделения важен по той причине, что тепло влияет на коррозию и другие механические свойства, без которых невозможно сохранить геометрию топлива, что необходимо для обеспечения защиты и подкритичности.

необходимые функции безопасности обеспечиваются упаковкой, такой подход может гарантировать сохранение функций безопасности в случае некоторой деградации топлива.

В качестве примера различных методов, которые могут быть допустимы для обеспечения извлекаемости, можно привести Стандартный план Комиссии по ядерному регулированию Соединенных Штатов по оценке систем и объектов сухого хранения отработавшего топлива [19], в котором рассматривается возможность извлечения отработавшего топлива из хранилищ и допускается обеспечение извлекаемости любым из трех приведенных ниже способов (как по отдельности, так и в комбинации, в зависимости от обстоятельств):

- «извлечение отдельных или зачехлованных¹² сборок ОЯТ из «мокрого» или «сухого» хранилища;
- извлечение паллета, загруженного сборками ОЯТ, из контейнера для хранения или транспортного пакета;
- извлечение транспортно-упаковочного контейнера, загруженного сборками ОЯТ, из хранилища» [19].

Это позволяет сохранить возможность извлечения, а также ограничить топливные материалы известной геометрической формой для выполнения расчетов экранирования и критичности, даже если целостность топлива или оболочки будет нарушена. Это также дает возможность перенести функции безопасности с топлива и оболочки на компоненты, которые легче контролировать, осматривать, а при необходимости ремонтировать или заменять.

Безопасная эксплуатация и техническое обслуживание хранилищ отработавшего топлива, как и других инженерных систем, отчасти зависят от надлежащего проектирования и строительства. В пункте 1.3 SSG-15 [2] говорится, что «безопасность хранилища отработавшего топлива и хранящегося в нем отработавшего топлива обеспечивается надлежащей локализацией соответствующих радионуклидов, поддержанием подкритичности, отводом тепла, радиационной защитой и возможностью извлечения отработавшего топлива или упаковок отработавшего топлива». Для достижения этих целей в конструкции хранилищ отработавшего топлива должны быть предусмотрены функции поддержания подкритичности

¹² «Зачехлованные» — это термин, используемый в основном в США для топлива, помещенного в «чехол для поврежденного отработавшего топлива», функция которого заключается в том, чтобы дать возможность обращения с поврежденным топливом. «Чехол с поврежденным отработавшим топливом» обеспечивает сохранение геометрии.

топлива, отвода остаточного тепловыделения от отработавшего топлива, обеспечения радиационной защиты и локализации в течение предполагаемого срока службы хранилищ, указанного в спецификациях проекта. Эти цели должны достигаться при всех ожидаемых при эксплуатации событиях и ПА согласно проектным основам, утвержденным регулирующим органом. Отчет по обоснованию безопасности хранилища отработавшего топлива составляется для документальной фиксации того, как выполняются эти требования.

Как указывается в требовании 4 GSR Part 5, «[о]ператор выполняет оценки безопасности и разрабатывает обоснование безопасности, а также обеспечивает, чтобы вся необходимая деятельность по выбору площадки, проектированию, строительству, вводу в эксплуатацию, эксплуатации, останову и снятию с эксплуатации велась в соответствии с юридическими и регулирующими требованиями» [1]. Согласно пункту 4.3 SSR-4 [18], эксплуатирующая организация хранилища отработавшего топлива «...должна подготовить детальную демонстрацию безопасности, которая должна включать соответствующий анализ безопасности, на каждом этапе жизненного цикла установки. Анализ безопасности на каждом этапе должен включать надлежащую демонстрацию того, как эксплуатирующая организация намеревается выполнять свои обязанности по обеспечению безопасности на всех последующих этапах жизненного цикла установки ядерного топливного цикла» [18].

4.1. ОБЩИЕ СООБРАЖЕНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ ХРАНИЛИЩ ОТРАБОТАВШЕГО ТОПЛИВА

Требования безопасности, связанные с проектированием хранилищ отработавшего топлива, установлены в разделе 6 SSR-4 [18]. Рекомендации по выполнению применимых к этим объектам требований приведены в публикации МАГАТЭ № SSG-15 (Rev. 1) [2], а конкретные примеры уроков, извлеченных из эксплуатации хранилищ отработавшего топлива, — в документе IAEA-TECDOC-1725 [13].

Как правило, в основополагающих требованиях к конструкции учитываются такие моменты, как необходимость обеспечить надлежащую степень резервирования, неодинаковости и надежности, а также необходимость гарантировать, что любые сбои, которые могут произойти, будут, насколько это возможно, ограничены по масштабу.

Ниже приводятся типичные соображения, связанные с отработавшим топливом, которые должны быть учтены в отчете по обоснованию безопасности хранилища.

- Проектные тепловыделяющие сборки:
 - физическое описание (форма, состав, материалы, масса и т.д.);
 - начальное обогащение;
 - глубина выгорания и история выгорания;
 - минимальный период охлаждения;
 - изотопный состав на момент помещения в хранилище;
 - радиационные поля на момент помещения в хранилище;
 - реактивность на момент помещения в хранилище;
 - остаточное тепловыделение.
- Порядок обращения с поврежденным или некондиционным топливом.
- Запасы топлива:
 - количество сборок на блок хранения;
 - общее количество сборок.
- Предполагаемая максимальная продолжительность хранения.

Для точного определения радиологического состояния и остаточного тепловыделения отдельных сборок необходима их изотопная характеристика, и для такой характеристики существует несколько проверенных и прошедших валидацию компьютерных кодов.

Решение о внедрении топлива с повышенной глубиной выгорания¹³ и/или МОХ-топлива влияет на весь топливный цикл, в том числе на его начальную стадию и на эксплуатацию реактора. Повышенная глубина выгорания и МОХ-топливо оказывают значительное влияние на системы хранения и транспортировки отработавшего топлива ввиду необходимости дополнительного теплоотвода и экранирования. Для топлива с повышенной глубиной выгорания это частично компенсируется уменьшением объема образующегося отработавшего топлива.

Повышенное тепловое и гамма-излучение этих типов топлива может быть компенсировано дополнительным временем охлаждения. МОХ-топливо также обладает более высокой нейтронной активностью ввиду

¹³ Увеличение глубины выгорания топлива — это способ уменьшить количество остановов для перегрузки топлива при том же объеме электрогенерации. В последние годы показатели глубины выгорания топлива растут. В разных странах под общим термином «топливо глубокого выгорания» понимаются разные численные значения; в настоящей публикации термин «повышенная глубина выгорания» носит обобщенный характер.

присутствия младших актинидов; повышенное нейтронное излучение требует учета вклада нейтронов и гамма-излучения в общую мощность дозы при выборе транспортного или упаковочного контейнера.

Топливо с повышенной глубиной выгорания, как правило, имеет более высокое начальное обогащение, что необходимо учитывать при проектировании и анализе безопасности по критичности. Управление критичностью при использовании топлива с повышенной глубиной выгорания и МОХ-топлива может быть обеспечено за счет ряда проектных параметров¹⁴, при этом кредит выгорания (там, где это допустимо) будет, вероятно, наиболее эффективным средством демонстрации безопасности по критичности при лицензировании. Предположения о кредите выгорания все чаще используются в анализе критичности, но для этого может потребоваться физическое измерение тепловыделяющих сборок, выполнение расчетов или комбинация из нескольких методов.

При увеличении глубины выгорания происходят изменения в характеристиках ядерных топливных стержней (описанные в разделе 5.1.2.), которые могут повлиять на их поведение, а также на их хранение, транспортировку и захоронение.

Ввиду этих неопределенностей в рамках ряда национальных и международных программ НИОКР были изучены соответствующие технические проблемы и получены данные, которые используются для обоснования разработки специальных рекомендаций регулирующих органов [20–22]. Некоторые страны применяют другой подход: например, они ограничивают максимальные температуры оболочки, что может накладывать эксплуатационные ограничения, такие как ограничения на загрузку транспортно-упаковочных контейнеров и более длительные периоды мокрого хранения [23].

Ожидается, что большая часть ОЯТ LWR, которое образуется в будущем, будет представлять собой топливо с повышенной глубиной выгорания. Некоторое количество отработавшего топлива с повышенной глубиной выгорания уже находится на сухом хранении, и в ближайшей перспективе его количество будет и далее расти.

При загрузке отработавшего МОХ-топлива в подходящие транспортно-упаковочные контейнеры каких-либо трудностей отмечено не было. Однако ввиду более длительного времени, требующегося для отвода остаточного тепловыделения (в 3–6 раз больше), энергопредприятия обычно оставляют отработавшие МОХ-сборки в бассейне и первым переносят в «сухое» хранилище оксидное урановое (UOX) топливо.

¹⁴ В качестве примеров можно привести добавление поглотителей нейтронов, исключение замедлителя, смещение замедлителя и контроль геометрии.

При проектировании хранилища отработавшего топлива должна применяться концепция глубокоэшелонированной защиты (требование 10 SSR-4 [18]). Согласно пункту 6.3 SSG-15 [2], где указывается, что «конструкции хранилищ отработавшего топлива... должны состоять из относительно простых, желательно пассивных, систем естественной безопасности... [и] содержать элементы, обеспечивающие относительную простоту операций по погрузке, разгрузке и хранению», реализация принципов глубокоэшелонированной защиты обычно означает использование нескольких барьеров для предотвращения или уменьшения рисков. Эти барьеры могут включать топливную матрицу и оболочку, при этом следует надлежащим образом учитывать возможные повреждения оболочки и тот факт, что удержание летучих материалов и твердых частиц топливной матрицей зависит от температуры и окружающей среды. Дополнительные локализирующие барьеры могут включать границу бассейна с его вспомогательными системами, контейнер или трубу для хранения в хранилище камерного типа, а также обечайки, уплотнения и другие компоненты транспортно-упаковочных контейнеров и бункеров.

Ниже приводятся некоторые детали, иллюстрирующие общие соображения в отношении проектирования.

- Физическая компоновка и размещение хранилища отработавшего топлива должны обеспечивать поддержание подкритичности в эксплуатационных состояниях и в аварийных условиях за счет геометрически безопасных конфигураций (например, топливных корзин, стеллажей для хранения и пеналов). В проекте должны быть указаны все дополнительные средства, необходимые для обеспечения подкритичности, такие как стационарные поглотители нейтронов или использование кредита выгорания в той степени, в какой это допускается регулирующим органом.
- Хранилища отработавшего топлива должны проектироваться с системами теплоотвода, способными охлаждать хранящееся топливо с момента загрузки первой тепловыделяющей сборки, и должны проектироваться с учетом тепловой нагрузки предполагаемого максимального объема отработавшего топлива.
- Способность к теплоотводу должна быть такой, чтобы температура всего топлива (и оболочек ТВЭЛов) в хранилище не превышала максимального значения температуры, рекомендованного или одобренного регулирующим органом для данного типа и состояния помещаемого на хранение топлива.
- При проектировании систем теплоотвода хранилищ отработавшего топлива должны учитываться все соответствующие моменты,

связанные с поддержанием температуры конструкций, систем и элементов (КСЭ) в допустимых пределах.

- При проектировании хранилищ отработавшего топлива необходимо учитывать принципы ALARA и обеспечивать радиационную защиту работников и населения в соответствии с принципами и требованиями, описанными в «Основных нормах безопасности МАГАТЭ для радиационной защиты» [24] и соответствующем руководстве к ним [25].
- Проектами систем хранения и обращения с отработавшим топливом должны быть предусмотрены адекватные и надлежащие меры по локализации радиоактивных материалов для предотвращения неконтролируемого выброса в окружающую среду. Например, проектами зданий для хранения должно быть предусмотрено поддержание субатмосферного давления с целью предотвратить распространение радионуклидов, находящихся в воздухе, в другие зоны хранилища. Такие зоны могут быть оборудованы системами вентиляции и фильтрации, чтобы поддерживать концентрацию радионуклидов в воздухе на приемлемом уровне.
- Необходимо применять принципы управления старением для сохранения целостности оболочек отработавших твэлов и других значимых для безопасности КСЭ и предотвращения их деградации, а также для обеспечения возможности их ремонта или замены по мере необходимости для обеспечения безопасности в течение всего периода хранения.
- Хранилище должно быть рассчитано на работу в автономном режиме после закрытия АЭС с возможностью разгрузки, технического обслуживания и/или ремонта системы хранения.
- Проектом должна быть предусмотрена возможность наблюдения за локализацией отработавшего топлива и обнаружения повреждений в системе локализации. Если непрерывный мониторинг не предусмотрен, может проводиться периодическая проверка путем наблюдения или измерения.
- Конструкция систем хранения отработавшего топлива должна включать в себя независимые локализирующие барьеры, как того требует регулирующий орган.
- Проектом должны быть предусмотрены надлежащий сбор, мониторинг и очистка поверхностных стоков.

4.2. ОСОБЫЕ СООБРАЖЕНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ ХРАНИЛИЩ ОТРАБОТАВШЕГО ТОПЛИВА

Многие соображения безопасности применимы ко всем типам хранилищ отработавшего топлива, но есть некоторые особые соображения безопасности, применимые только к проектам «мокрых» или «сухих» хранилищ; они приведены в приложении I к SSG-15 (Rev. 1) [2]. Ниже рассматриваются некоторые ключевые моменты.

4.2.1. Мокрое хранение

Как указывается в пункте 6.68 публикации МАГАТЭ № SSR-4 [18], для бассейнов выдержки отработавшего топлива проектная мера по обеспечению подкритичности, основанная на использовании пассивных средств (например, заданного шага размещения сборок в стеллажах), предпочтительнее, чем мера, основанная на использовании активных средств (например, растворимых поглотителей нейтронов). Растворимым поглотителям нейтронов может быть отдано предпочтение в тех случаях, когда существует требование проверки с надлежащим образом обоснованной частотой, если это приемлемо для регулирующего органа.

В «мокрых» хранилищах в аварийных ситуациях может быть рассмотрена возможность кипячения воды в бассейне, но даже в этих случаях необходимо сделать специальные поправки на изменение плотности воды/замедлителя.

Ниже приводятся некоторые особые соображения, основанные на наилучшей практике планировки и проектирования конструкции бассейна [2].

- Границы, в которых удерживается охлаждающая вода, включая конструкцию бассейна, должны быть рассчитаны на то, чтобы выдерживать эксплуатационные состояния и аварийные условия — в частности удары при столкновениях или падении грузов — без значительной утечки воды из бассейна.
- Должен поддерживаться такой уровень воды, чтобы обеспечивать необходимую степень экранирования. Необходимо предотвратить чрезмерный подъем топлива или других компонентов.
- Конструкция должна предусматривать обнаружение течей и проведение соответствующего ремонта.
- Бассейны должны быть спроектированы таким образом, чтобы в них не имелось трубопроводов, проходок или другого оборудования или

элементов, которые могли бы случайно понизить уровень воды в бассейне ниже минимального рабочего уровня (например, проходок ниже минимального уровня воды, трубопроводов и оборудования, которые могли бы действовать как сифон).

- Системы подпитки воды в бассейне должны быть способны компенсировать все возможные потери, чтобы поддерживать уровень воды в заданных пределах.
- Если для соединения бассейнов используются шлюзы, их конструкция должна обеспечивать удержание воды, а также обнаружение, сбор и устранение течей. Гидрозатворы должны быть спроектированы таким образом, чтобы выдерживать предполагаемое давление воды.
- Должна быть предусмотрена защита от переполнения водой бассейна выдержки.
- При проектировании оборудования и инструментов должны учитываться соображения плавучести и защиты: например, полые инструменты для работы под водой должны заполняться водой при погружении и опорожняться при извлечении.
- Бассейны должны быть оснащены необходимым осветительным оборудованием, а также подводным освещением с возможностью его замены. Материалы, используемые для подводного освещения, должны быть совместимы со средой бассейна и не должны привносить примесей в воду бассейна.
- Системы теплоотвода должны обеспечивать, чтобы ни один температурный предел не превышался и чтобы во время нормальной эксплуатации и ожидаемых при эксплуатации событий общая температура воды в бассейне оставалась в заданных пределах.
- Конструкционные материалы должны быть совместимы с водой бассейна или должны быть эффективно защищены от чрезмерной деградации или коррозии. Конструкции и контейнеры для хранения не должны привносить примесей в воду бассейна.
- Любое оборудование, подвергающееся воздействию воды бассейна или контактирующее с ней, должно легко поддаваться дезактивации, и требования дезактивации должны быть учтены на этапе определения характеристик материалов для оборудования.

Необходимо поддерживать прозрачность воды, требующуюся для проведения технологических операций с топливом ниже уровня воды, а также поддерживать химический состав воды в пределах параметров, требующихся для защиты оболочек твэлов, конструкций бассейна и оборудования. В тех случаях, когда для транспортно-технологических

систем и оборудования требуется применять смазочные материалы, необходимо исключить возможность их утечки в воду бассейна.

Хотя в SSG-15 (Rev. 1) [2] прямо не указывается, что все новые бассейны выдержки отработавшего топлива должны размещаться в крытом помещении, рекомендация на этот счет может быть уверенно выведена из проектных соображений, которые должны учитываться.

Радиоактивность воды должна поддерживаться на уровне ALARA, чтобы можно было своевременно обнаружить поврежденное топливо, ограничить загрязнение оборудования и защитить операторов.

4.2.2. Сухое хранение

Системы сухого хранения обеспечивают те же функции безопасности, что и системы мокрого хранения, но без использования воды для целей охлаждения и защиты. Защита обеспечивается корпусом транспортно-упаковочного контейнера или транспортного пакета, а в некоторых случаях — экранированной камерой или гнездом хранения. Локализация радионуклидов обеспечивается границей системы сухого хранения. Граница системы также может играть определенную роль в обеспечении безопасности по критичности, поскольку она исключает возможность введения замедлителя.

Ниже приводятся некоторые особые соображения в отношении систем сухого хранения.

- Для бетонных наружных контейнеров с металлическими обечайками внутри конструкция должна предотвращать скопление воды между обечайкой и бетонным контейнером. Конструкция должна быть оснащена системой дренажа.
- Если предполагается укладывать топливные корзины в штабели (см. рис. 32, MACSTOR), механическая конструкция должна быть рассчитана на то, чтобы выдерживать массу других полностью загруженных корзин без структурной деформации. Необходимо учитывать статические, ударные и сейсмические нагрузки.
- Фундамент в зоне, где находятся блоки хранения, должен выдерживать полную нагрузку системы хранения и транспортно-технологического оборудования без чрезмерной просадки.
- Необходимо предусмотреть контроль доступа, чтобы ограничить облучение в соответствии с принципами ALARA (включая излучение от рассеяния в воздухе и отраженное излучение).
- Насколько это возможно с практической точки зрения, системы охлаждения отработавшего топлива должны быть пассивными и

требовать минимального технического обслуживания. Система должна обеспечивать достаточную передачу остаточного тепловыделения в окружающее пространство даже при неблагоприятных погодных условиях.

- Тепловыделяющие сборки и полости транспортно-упаковочного контейнера или пенала должны быть адекватно высушены и обработаны инертными веществами, чтобы защитить целостность топлива [12] и уменьшить деградацию оболочки твэлов и внутренних частей контейнера или пенала в долгосрочной перспективе. В конструкции системы хранения должны быть предусмотрены средства для контроля и поддержания газовой среды, необходимой для обеспечения целостности хранящегося отработавшего топлива.
- При проектировании «сухих» хранилищ следует учитывать риск, связанный с введением замедлителя. Этого можно достичь, продемонстрировав в допустимой для регулирующего органа форме, что последствия этого приемлемы, и/или предотвратив его введение.
- Конструкция транспортно-упаковочных контейнеров должна предусматривать возможность подъема и перемещения и быть способна выдерживать потенциальные нагрузки в течение всего срока службы.
- Системы сухого хранения должны быть спроектированы таким образом, чтобы облегчать проведение необходимых инспекций и мониторинга, предусмотренных ПУС.
- По окончании периода хранения транспортировка всех транспортабельных компонентов системы должна производиться в соответствии с действующими на текущий момент правилами.

4.3. ОЦЕНКА БЕЗОПАСНОСТИ

Вообще говоря, «оценка безопасности» представляет собой оценку всех аспектов практической деятельности, которые связаны с защитой и безопасностью [26]. Оценка безопасности — это «[о]ценка всех аспектов практической деятельности, которые связаны с защитой и безопасностью; в случае имеющей официальное разрешение установки она включает выбор площадки (размещения), проектирование и эксплуатацию установки» [4]. Она систематически проводится на протяжении всего жизненного цикла установки или в течение всего периода осуществления деятельности с целью обеспечения соблюдения всех соответствующих требований безопасности в предлагаемой (или фактической) конструкции [1].

Как указывается в пункте 1.2 GSR Part 4 (Rev. 1) [26] и устанавливается в GSR Part 5, требование 4 [1], оценки безопасности проводятся и документируются организацией, ответственной за эксплуатацию установки или осуществление деятельности, подлежат независимой проверке, а полученные результаты представляются регулирующему органу в рамках процесса лицензирования или выдачи официального разрешения.

В GSR Part 4 (Rev. 1) [26] установлены 24 требования к оценке безопасности, которые должны быть выполнены. Рекомендуемый общий подход к оценке безопасности приведен в GSG-3 [27], и в него входят следующие ключевые компоненты:

- «определение контекста оценки;
- описание установки или деятельности по обращению с отходами перед захоронением и отходов;
- разработка и обоснование сценариев;
- составление моделей и определение потребностей в данных;
- выполнение расчетов и анализ результатов;
- анализ мер безопасности и инженерных аспектов, а также сравнение с критериями безопасности;
- независимая проверка результатов;
- рассмотрение и, по мере необходимости, модификация оценки (т.е. итерация)» [27].

Дополнительные руководящие указания по оценке безопасности и обоснованию безопасности хранения отработавшего топлива приведены в [2], глава 5.

Оценка безопасности — это сложный и итеративный процесс, который включает в себя, среди прочего, анализ безопасности как один из основных элементов этого процесса. Как указывается в [28], «[а]нализ безопасности — это аналитическое исследование, проводимое с целью продемонстрировать, что проект установки соответствует требованиям безопасности и требованиям регулирующего органа и что проект основан на применении разумной инженерной практики, результатов научных исследований и учете опыта эксплуатации... Для установок ядерного топливного цикла необходимо использовать системные и общепризнанные методы детерминистического анализа, дополненные, когда это необходимо, вероятностными оценками, в соответствии с дифференцированным подходом».

Проектные основы хранилища ОЯТ определяются диапазоном условий, для которых проектируется хранилище ОЯТ, на основании заданных критериев проектирования. В рамках анализа безопасности рассматриваются различные события и состояния установки, вызванные



РИС. 45. Состояния установки, учитываемые при проектировании. Воспроизведено из [18].

вероятными техническими сбоями, и оцениваются их потенциальные последствия для безопасности. С этой целью разрабатывается спектр постулируемых исходных событий, охватывающих все состояния установки и их сочетания. Примеры отдельных постулируемых исходных событий для хранилища отработавшего топлива можно найти в приложении к SSR-4 [18]. Полный перечень постулируемых исходных событий (внутренних явлений), требующих рассмотрения при оценке безопасности, приведен в приложении VI к публикации МАГАТЭ № SSG-15 [2].

В число состояний установки, учитываемых при проектировании, входят эксплуатационные состояния (нормальная эксплуатация и ожидаемые при эксплуатации события) и аварийные условия (ПА и запроектные условия (ЗУ)), как показано на рис. 45.

Анализ проектных основ выполняется системными и общепризнанными детерминистическими методами и может быть при необходимости дополнен вероятностными оценками в соответствии с национальными регулирующими требованиями.

4.3.1. Ожидаемые при эксплуатации события

Ожидаемые при эксплуатации события определяются как «[о]тклонение эксплуатационного процесса от нормальной эксплуатации, которое предположительно может произойти как минимум один раз в течение срока эксплуатации (эксплуатационного ресурса) установки, но которое благодаря соответствующим предусмотренным в проекте мерам не нанесет значительного повреждения узлам, важным для безопасности, и не приведет к аварийным условиям» [4].

В хранилище отработавшего топлива ожидаемые при эксплуатации события могут произойти, к примеру, во время доставки и размещения отработавшего топлива или выполнения необходимых операций с топливом во время технического обслуживания. К примерам событий, классифицируемых как ожидаемые при эксплуатации события в связи с хранением отработавшего топлива, которые могут быть проанализированы¹⁵, относятся:

- прием и хранение дефектного или некондиционного топлива;
- неправильная загрузка топлива;
- неисправность систем отопления и вентиляции;
- отказ электропитания;
- неисправность системы теплоотвода;
- блокировка потока;
- неисправности в системах циркуляции охлаждающей воды или воды бассейна;
- несоответствие состава охлаждающей воды, воды бассейна или газовой среды спецификациям;
- утечка охлаждающей воды или воды бассейна;
- утрата герметичности;
- неисправности конструкций (например, корзин или стеллажей);
- деградация КСЭ.

4.3.2. Проектные аварии

ПА — это аварии, вероятность возникновения которых в течение срока службы установки невелика, если они вообще произойдут. В разных странах действуют разные правила, определяющие порядок отнесения аварии к ПА.

Примеры ПА вкратце перечислены в приложении III. Следует отметить, что этот перечень не претендует на полноту; анализ опасностей может выявить и другие вероятные аварии, например аварии в результате ошибок оператора, неисправностей приборов, удара молнии и других происшествий. Для восстановления или извлечения топлива, в том числе поврежденного, после аварии могут потребоваться такие специальные средства, как транспортные пакеты или системы сухой перегрузки, в которых может возникнуть необходимость, если с отработавшим топливом нельзя будет работать при помощи обычных средств. Если в силу конструктивных

¹⁵ Дополнительную информацию об ожидаемых при эксплуатации событиях см. в SSG-15 «Storage of Spent Nuclear Fuel» («Хранение отработавшего ядерного топлива») [2].

особенностей или по другим причинам та или иная конкретная аварийная ситуация оценивается как маловероятная, это должно быть зафиксировано в проектной документации с соответствующим обоснованием.

Для всех ядерных установок при проектировании хранилища отработавшего топлива («мокрого» или «сухого») следует принимать в расчет внешние опасности. Эти внешние опасности можно разделить на две разные группы:

- внешние опасности природного происхождения: землетрясение, наводнение, торнадо, экстремальные атмосферные условия, песчаная буря, извержение вулкана;
- внешние опасности антропогенного происхождения: опасности, связанные с работой транспортных сетей (воздушных, железнодорожных, автомобильных, морских) и с промышленной деятельностью вблизи объекта.

Перечни условий, процессов и событий на площадке, связанных с внешними природными явлениями и внешними антропогенными явлениями, которые следует учитывать при оценке безопасности, приведены в приложении IV и приложении V к публикации МАГАТЭ № SSG-15 [2]. Из этих перечней явствует, что на потенциальные внешние опасности, которые необходимо учитывать, будет влиять местонахождение объекта. Ввиду ожидаемых климатических изменений необходимо предусмотреть дополнительные запасы безопасности для объектов, которые будут работать в отдаленном будущем, поскольку температура окружающей среды играет важную роль, если для охлаждения объекта используется естественная конвекция. Повышение уровня моря повлияет на меры по предотвращению наводнений и защите от цунами на площадках, расположенных непосредственно на побережье. Прибрежные площадки могут быть более восприимчивы к механизмам коррозии, вызываемой хлоридами. Таким образом, выбор площадки для хранения отработавшего топлива повлияет на потенциальные опасности, которые необходимо учитывать. Разные концептуальные проекты хранилищ имеют неодинаковый уровень чувствительности к различным внешним опасностям; каждый из них должен быть оценен с помощью специального анализа безопасности.

4.3.3. Запроектные условия

Концепция ЗУ была введена в употребление после аварии на АЭС «Фукусима-дайити» в 2011 году. ЗУ используются для выявления дополнительных сценариев аварий, которые либо являются более тяжелыми,

чем ПА, либо связаны с дополнительными отказами, чтобы их можно было учесть при проектировании, а также для планирования практически осуществимых мер по предотвращению таких аварий или смягчению их последствий (публикация МАГАТЭ № SSR-4 [18], требование 21).

ЗУ для хранилищ отработавшего топлива охватывают аварийные ситуации со значительной деградацией топлива или без таковой. К учитываемым исходным событиям могут относиться экстремальные землетрясения, экстремальные наводнения и другие экстремальные природные явления, а также потеря электроснабжения, потеря охлаждения на длительное время и сочетание того и другого. Список учитываемых ЗУ должен быть определен конкретно для каждого хранилища отработавшего топлива. Анализ ЗУ используется для определения дополнительных сценариев аварий и разработки дополнительных мер безопасности (проектные средства, организационные положения или готовность оборудования) для предотвращения или ограничения последствий аварийных ситуаций или для оказания помощи в аварийном реагировании.

В некоторых случаях, например на уровне компании, имело бы смысл сформировать целевую группу, которая могла бы задействовать специальные средства на различных ядерных объектах для помощи местным операторам. В любом случае, на каждом ядерном объекте должно иметься здание, в котором будут размещаться группа по ликвидации аварийных ситуаций, группы по проведению работ и вся необходимая инфраструктура (в зависимости от используемой технологии хранения; например, для «мокрых» хранилищ это электрогенераторы, насосы, запасы воды и т.д.). Это здание должно выдерживать воздействие опасностей, превышающих или равных по силе тем, которые принимаются в расчет для объектов на площадке. В новой редакции руководства по безопасности № SSG-15 учтены уроки аварии на АЭС «Фукусима-дайити», которые «касаются следующих основных областей: а) совершенствование управления авариями; б) защита от внутренних и внешних опасностей; в) практическое устранение возможности возникновения условий, которые могут привести к раннему выбросу радиоактивного материала или к крупному выбросу радиоактивного материала» [2].

Как указывается в публикации МАГАТЭ № SRS-102 [28], примеры причин, которые могут привести к ЗУ для установок ядерного топливного цикла, в том числе хранилища ОЯТ, включают следующее:

- «сочетание ожидаемых при эксплуатации событий или ПА с отказом по общей причине КСЭ, важных для безопасности;
- сочетание отказов КСЭ и ошибок персонала, которое считается значимым для целей анализа ПА;

— множественные отказы КСЭ, важных для безопасности, вызванные редкими экстремальными природными явлениями, которые маловероятны (но считаются возможными)» [28].

Другие примеры можно найти в приложении IV к [28].

В соответствии с подходом к оценке безопасности [27], при разработке и обосновании сценариев для целей оценки безопасности и подготовки обоснования безопасности хранения отработавшего топлива, помимо режима нормальной эксплуатации, должны быть учтены все идентифицированные ожидаемые при эксплуатации события, ПА и ЗУ.

5. ВЛИЯНИЕ СТАРЕНИЯ НА ОТРАБОТАВШЕЕ ТОПЛИВО И СИСТЕМЫ ХРАНЕНИЯ ОТРАБОТАВШЕГО ТОПЛИВА

ПУС гарантируют, что функции безопасности будут выполняться на протяжении всего периода хранения. В большинстве стран наличие ПУС для систем хранения отработавшего топлива, обеспечивающих надлежащий мониторинг и смягчение последствий старения, является обязательным требованием¹⁶. Любое отклонение в поведении материала от того, которое было предусмотрено при проектировании системы, должно быть своевременно выявлено и устранено, чтобы оно не затронуло функции безопасности.

Поскольку длительность эксплуатации многих АЭС превысила первоначально запланированный срок, были введены ПУС для внимательного контроля за их состоянием и обеспечения дальнейшего штатного функционирования КСЭ. Разработка и реализация таких планов — неременное условие продления срока эксплуатации реакторов. Как следствие, при реализации ПУС на АЭС был накоплен богатый опыт и большой массив данных, которые могут быть применены при разработке ПУС для систем хранения отработавшего топлива [29].

¹⁶ «Управление старением» определяется в Глоссарии МАГАТЭ по вопросам безопасности как «инженерно-технические, эксплуатационные меры и меры по техническому обслуживанию, предназначенные для удерживания в приемлемых (допустимых) пределах деградации вследствие старения конструкций, систем и элементов» [4].

Аналогичным образом, поскольку отработавшее топливо должно храниться до тех пор, пока не будет принято решение о его дальнейшей судьбе, может возникнуть необходимость продолжать хранить топливо дольше первоначально намеченного срока. Таким образом, при анализе безопасности и выдаче соответствующих разрешений должны учитываться методы прогнозирования, обнаружения и смягчения условий, которые могут привести к ухудшению характеристик отработавшего топлива и системы хранения. Такой подход обеспечит эффективное продление срока службы этих компонентов, если это необходимо, или позволит выделить достаточное время на реализацию других вариантов, таких как переупаковка и перемещение, если компоненты не могут быть эффективно отремонтированы или заменены.

Первым шагом в разработке ПУС является определение КСЭ, подверженных деградации. Второй шаг — это установление того, насколько эти КСЭ важны для безопасности. Важно помнить о том, что, хотя та или иная КСЭ может не иметь прямого отношения к безопасности, ее отказ может повлиять на штатное функционирование другой КСЭ.

В основе любой ПУС лежит понимание механизмов деградации, вызванной старением, которые могут потенциально затронуть КСЭ системы хранения отработавшего топлива. Оно позволяет реализовать технические решения, направленные на борьбу со старением, принять корректирующие меры, выполнить ремонт и возможную замену компонентов. Кроме того, важно проанализировать более широкий опыт эксплуатации в целях приобретения новых научных и инженерных знаний, чтобы убедиться, что запланированные мероприятия оптимальны для обеспечения необходимого уровня наблюдения и уверенности в безотказной работе. Дополнительная информация по управлению старением ядерного топлива, «сухих» хранилищ и т.д. содержится в [27–30].

Общий принцип управления старением проиллюстрирован на рис. 46 и может быть применен к любому процессу, где выполнение функций безопасности КСЭ может оказаться под угрозой вследствие старения.

5.1. ПОТЕНЦИАЛЬНЫЕ МЕХАНИЗМЫ ДЕГРАДАЦИИ, ЗАТРАГИВАЮЩИЕ СИСТЕМЫ ХРАНЕНИЯ И ОТРАБОТАВШЕЕ ТОПЛИВО

Поведение систем хранения отработавшего топлива и самого отработавшего топлива при хранении [30] зависит от состава материала, производственных процессов (например, окончательной обработки, такой как термическая обработка и нанесение покрытий), состояния на момент

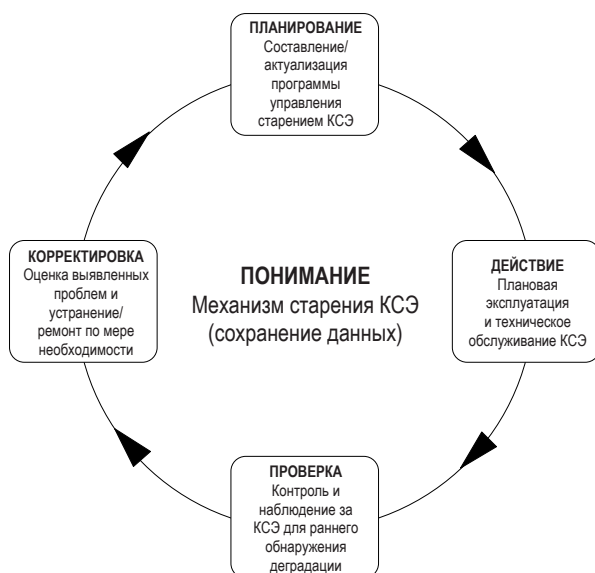


РИС. 46. Процесс управления старением хранилища отработавшего топлива.

начала хранения или пуска в эксплуатацию (примеры включают остаточное напряжение, трещины и коррозию) и условий эксплуатации (напряжение от приложенной нагрузки, температура, атмосфера и т.д.). Выбор материалов, используемых в качестве оболочки для твэлов, систем хранения (стеллажи, пеналы, краны и т.д.) и материалов для строительства зданий, бассейнов и т.д. диктуется следующими соображениями:

- условия эксплуатации (рабочая температура, радиационные поля, продолжительность, химический состав и т.д.);
- знание механизмов деградации, которые могут влиять на отдельные материалы или общее ухудшение состояния с течением времени;
- опыт эксплуатации (как такие материалы показали себя в прошлом).

5.1.1. Потенциальные механизмы деградации конструкций, систем и элементов хранения

В нижеследующем разделе описываются механизмы деградации, которые могут затронуть системы хранения отработавшего топлива. В нем рассматривается возможное влияние этих механизмов на характеристики материалов на примере материалов, широко используемых в системах хранения отработавшего топлива. Взятые из литературы данные о

характеристиках отдельных материалов, используемых в системах хранения обработавшего топлива, приведены в приложении IV.

5.1.1.1. Радиационное повреждение

Материалы, находящиеся в прямом контакте с отработавшим топливом или в непосредственной близости от него, со временем подвергнутся радиационному повреждению. Итоговый эффект заключается в том, что после достижения пороговой дозы радиации (иногда называемой радиационной толерантностью) механические свойства материала изменятся и он станет более склонным к разрушению. Что касается металлов, то они могут поглотить большие дозы нейтронного излучения, в размере 10^{19} Н/см², прежде чем подвергнутся серьезному воздействию. Что касается других материалов, таких как поливинилхлорид, то доза гамма-излучения в 2×10^4 Гр, скорее всего, приведет к ухудшению их свойств. Хотя большинство металлов в течение срока службы не получают суммарной дозы, достаточной для того, чтобы испытать на себе негативное воздействие (см. приложение IV), необходимо учитывать влияние накопленной дозы на материалы при продлении срока службы или в новых условиях эксплуатации. Камеры и электроника обычно более чувствительны к излучению. Что касается камер, то цифровые камеры высокого разрешения теперь доступны по относительно низкой цене. В зависимости от характера применения и легкости доступа с целью замены, в экономическом отношении может оказаться более выгодным использовать и утилизировать электронику, а не применять специализированные устройства с защитой от радиации.

5.1.1.2. Температурные эффекты

Быстрое повышение или понижение температуры внешней среды может повлиять на свойства и старение материалов. Иногда этого трудно избежать, и такие эффекты должны быть учтены при проектировании. Однако следует избегать циклического температурного воздействия и повторных тепловых ударов, особенно в отношении бетонных конструкций. Остывание — это еще один период, в течение которого могут возникнуть неблагоприятные условия, такие как образование конденсата, который может действовать как электролит, формируя коррозионный элемент; это создает особую проблему в сочетании с загрязнителями воздуха, солью в прибрежных районах, нагрузкой или сенсibilизацией. Когда выделение остаточного тепла в системе прекратится, температура должна поддерживаться. Слишком низкие температуры также могут иметь негативный эффект, поскольку некоторые свойства материалов зависят

от температуры, а некоторые стали могут подвергнуться хрупкому разрушению. Поэтому низкие температуры могут накладывать ограничения на операции с топливом.

5.1.1.3. Условия эксплуатации

На выбор материалов при проектировании влияют условия эксплуатации, в которых они будут использоваться. Как показывает опыт, условия эксплуатации могут оказаться более суровыми, чем предполагалось вначале, и выбранный материал или узел установки может потребовать замены прежде, чем планировалось (примеры приведены в [8, 13]). Такой опыт говорит о необходимости регулярного контроля и технического обслуживания.

5.1.1.4. Потенциальные механизмы деградации металлов

В хранилищах и системах хранения отработавшего топлива металлы широко используются как строительные материалы, в конструкциях стеллажей для хранения, погрузочно-разгрузочных машин, инструментов, транспортно-упаковочных контейнеров, пеналов, оборудования для подъема контейнеров, кранов и т.д. Об их применении и механизмах, которые могут повлиять на их характеристики, подробно говорится в [12, 31–35]. В публикации МАГАТЭ, посвященной урокам эксплуатации хранилищ отработавшего топлива [13], приводятся дополнительные соображения относительно изучения имеющегося опыта и того, как изменился выбор металлов для систем хранения отработавшего топлива. Например, некоторые металлы обладают большей склонностью к адсорбции загрязнений, особенно ржавчины. Это стало причиной повсеместного перехода на нержавеющую сталь, которая легче поддается дезактивации по сравнению с другими металлами, такими как окрашенная низкоуглеродистая сталь или чугун. Для крупногабаритных узлов, таких как грузоподъемные траверсы для контейнеров, выбор между использованием нержавеющей стали и окрашенного чугуна — это компромисс между стоимостью и количеством раз, когда они будут использоваться, с одной стороны, и дозой, поглощаемой при дезактивации, с другой.

Ниже кратко описываются общие механизмы деградации металлов.

а) Коррозионное растрескивание под напряжением

Коррозионное растрескивание под напряжением (КРН) может произойти только при одновременном возникновении нескольких

условий [36]: металл должен быть сенсibilизирован, должно иметься приложенное или остаточное напряжение и должна присутствовать агрессивная среда, например хлорид-ионы. Тем не менее известно, что такие сочетания условий возникают в оболочках некоторых твэлов и компонентах систем сухого хранения.

b) Электрохимическая коррозия

При определенном наборе условий (температура, агрессивные химические вещества, примеси и т.д.) все металлы подвержены электрохимической коррозии в одной или нескольких формах: общая/равномерная, точечная, щелевая или коррозия разнородных металлов (гальваническая).

c) Хрупкое разрушение

Потенциальной опасности хрупкого разрушения подвергаются в основном старые крупногабаритные узлы из чугуна или сталей с низким содержанием углерода ($< 0,5\%$), которые функционируют на открытом воздухе при возможных температурах ниже 0°C . Когда металл переходит из вязкого состояния в хрупкое, разрушение может произойти при воздействии достаточной силы без предварительной деформации. Компоненты, считающиеся проблемными, обычно имеют высокую прочность и большую толщину: это, например, балки, рельсы и крупные подшипники.

d) Микробиологическая коррозия

Как следует из названия, микробиологическая коррозия (МБК) — это коррозия, возникающая в результате активности микробов (т.е. нарастания биопленки и образования локальной среды, губительной для металла, который они покрывают). Существует множество видов бактерий, которые восстанавливают или окисляют элементы и размножаются в определенных температурных диапазонах и условиях. Периодический отбор проб может указывать на тип присутствующих бактерий, но рекомендуется избегать их роста; этого можно добиться, ограничив воздействие на бактерии света, углерода, кислорода, нитратов, сульфатов и фосфатов.

e) Усталость

При проектировании хранилищ и систем для отработавшего топлива учитывается количество предполагаемых рабочих циклов, которые

конкретный узел установки может выдержать в течение расчетного срока службы. Например, строительный кран может быть рассчитан на определенное количество циклов в зависимости от предполагаемой нагрузки. Увеличение продолжительности работы может привести к повреждению материалов, если возможность продления срока службы оборудования и материалов не закладывается в первоначальный проект.

f) Износ

Износ возникает в результате взаимодействия одного материала с другим и под воздействием внешних источников напряжения, таких как вибрация и нарушение соосности. Износ обнаруживается с помощью плановых проверок установки и использования баз данных по техническому обслуживанию для регистрации полученного опыта и отслеживания тенденций.

5.1.1.5. Механизмы деградации бетона

Бетон используется в основном для экранирования, а в сочетании со стальной арматурой — для строительства зданий, бассейнов, площадок, транспортных пакетов и т.д.

Хорошее качество бетона — залог того, что он не подвергнется деградации во время применения. В большинстве случаев идеальными свойствами являются высокая прочность, устойчивость к атмосферным воздействиям или изменению объема и низкая проницаемость (чтобы избежать коррозии арматурных стержней). На основе полученного опыта стало практиковаться использование низкого соотношения воды и цемента, специальных заполнителей (например, не имеющих в своем составе хлоридов), таких методов, как оставление покрытий на более длительное время для увеличения продолжительности выдержки бетона во влажных условиях, увеличение количества арматуры, обеспечение уплотнения бетона вокруг арматуры во избежание воздушных зазоров и увеличение глубины бетона между арматурным стержнем и поверхностью, контактирующей с воздухом.

Если исходить из того, что бетон был подготовлен надлежащим образом и не имеет трещин, то основные механизмы деградации связаны с атмосферным воздействием. В частности, чередование морозов и оттепелей может привести к отслаиванию бетона, циклическому температурному воздействию, карбонизации и адсорбции загрязнителей или солей. Карбонизация за счет медленной диффузии диоксида углерода в бетон снижает щелочность бетона и в конечном итоге приводит к разрушению

арматурного стержня (обычно это проявляется в виде коричневых пятен на поверхности бетона). Потеря щелочности или воздействие загрязняющих веществ не считаются проблемой для бетонных транспортно-упаковочных контейнеров, где бетон служит наполнителем между металлическими листами [9]. Попадание загрязняющих веществ или соли также со временем приведет к разрушению арматурного стержня. Список методов оценки текущих свойств бетона приведен в [37].

5.1.1.6. Механизмы деградации полимеров

Полимеры в основном находят применение в качестве изоляторов для проводов, материалов для защиты от нейтронов, компенсаторов и наполнителей. Характеристики полимеров во многом определяются их фундаментальными составляющими (исходными мономерами). Полимеры разрушаются в результате радиационного повреждения в сочетании с термической деструкцией, что приводит к расщеплению, образованию поперечных связей и выделению небольших соединений (в основном, водорода в случае материалов, поглощающих нейтроны). Это ведет к изменению физических свойств полимеров: например, они становятся хрупкими (с пониженной способностью поглощать нейтроны). Также могут образовываться и другие, менее желательные соединения, такие как кремниевая и соляная кислота [13], что может иметь последствия для установки и оборудования. В случае с виниловыми смолами, которые имеют прочные поперечные связи, доминирующим механизмом деградации является термическое окисление.

5.1.1.7. Механизмы деградации композитов

Композиты находят широкое применение как материалы, поглощающие нейтроны. На регулярной основе используются два типа композитных материалов:

- слоистый композит: B_4C заключен между двумя листами алюминия;
- композиты с металлической матрицей: B_4C рассеян в металлической матрице.

По имеющимся данным, при некоторых условиях поглотители из слоистого композита разбухают (особенно при высоких температурах во время сухого хранения) и подвергаются коррозии на концах слоя (при мокром хранении). Коррозия на концах слоя считается нежелательной, но полезна с точки зрения контроля радиолиза.

5.1.2. Потенциальные механизмы деградации отработавшего топлива (мокрое и сухое хранение)

Во время облучения отработавшее топливо претерпевает ряд изменений по сравнению с тем состоянием, в котором оно было произведено. Эти изменения могут быть вызваны следующими причинами¹⁷:

- эффекты облучения, которые вызывают изменения микроструктуры или химического состава оболочки ТВЭЛов и таблеток;
- образование газообразных продуктов деления;
- тепловые эффекты;
- механические взаимодействия между таблеткой и оболочкой или оболочкой и элементами конструкции;
- внутреннее воздействие агрессивных продуктов деления на оболочку ТВЭЛов;
- коррозия или захват химических элементов из теплоносителя реактора;
- вибрация и т.д.

Некоторые изменения для топлива LWR показаны на рис. 47. Эти начальные свойства хранения могут повлиять на то, как топливо будет вести себя при последующих операциях по его погрузке и разгрузке, хранению и транспортировке. Поэтому важно хорошо понимать, могут ли эти свойства отразиться на целостности отработавшего топлива и как они меняются со временем, для минимизации процесса деградации как топлива, так и оболочки или при необходимости сохранения функций безопасности. Это особенно актуально для топлива, которое подверглось деградации.

В контексте хранения отработавшего топлива были определены следующие механизмы деградации:

- равномерная коррозия под действием среды хранения;
- локальная коррозия;
- тепловая деформация ползучести;
- КРН;
- замедленное гидридное растрескивание (ЗГР);

¹⁷ Помимо указанных выше изменений, в результате радиолитического разложения под действием альфа-излучения в топливной матрице будет накапливаться гелий. Эффект от такого накопления гелия проявится вне обычных сроков хранения отработавшего топлива, составляющих менее 100 лет.

- охрупчивание (переориентация гидридов, миграция и перераспределение водорода);
- окисление (при повреждении).

Значимость отдельного механизма деградации зависит от того, находится ли отработавшее топливо в «мокрое» или «сухом» хранилище, поскольку некоторые механизмы деградации способны воздействовать на топливо только в системах сухого хранения. Каждый из этих механизмов и лежащие в их основе исследования более подробно описаны в заключительных докладах по проектам координированных исследований МАГАТЭ (ПКИ) «Поведение отработавшего топлива ядерных энергетических реакторов при хранении» (БЕФАСТ-I, II и III) [31–33] и «Оценка и исследования характеристик отработавшего топлива» (СПАР-I, II и III) [12, 34, 35]; краткое описание проделанной работы можно также найти в [9]. В сферу охвата этих ПКИ входили все виды топлива энергетических реакторов на тепловых нейтронах: твэлы с циркониевой оболочкой, используемые в кипящих реакторах (BWR), CANDU, тяжеловодных реакторах (известных как HWR), PWR, реакторах большой мощности канального типа (РБМК) и водо-водяных энергетических реакторах (ВВЭР); твэлы с оболочкой из нержавеющей стали, используемые в газовых реакторах; а в сферу охвата более ранних исследований — прежние виды топлива реакторов на тепловых нейтронах, которые сняты с производства, например топливо с оболочкой из нержавеющей стали LWR и топливо MAGNOX. В таблице 1 и нижеследующих разделах приводится обобщенное резюме результатов этих исследований.

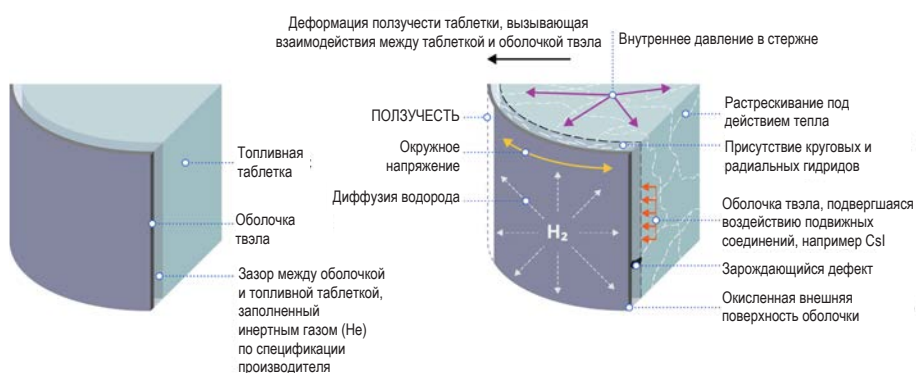


РИС. 47. Топливная таблетка LWR в разрезе и сравнение свойств до (слева) и после (справа) облучения.

ТАБЛИЦА 1. КРАТКОЕ ОПИСАНИЕ ПОТЕНЦИАЛЬНЫХ МЕХАНИЗМОВ ДЕГРАДАЦИИ ОТРАБОТАВШЕГО ТОПЛИВА В СИСТЕМАХ МОКРОГО И СУХОГО ХРАНЕНИЯ И ИХ СПОСОБНОСТИ ВЫЗВАТЬ ПОТЕРЮ ЦЕЛОСТНОСТИ ОБОЛОЧКИ ТВЭЛОВ

Механизм деградации	Хранение			Перевозка после хранения
	Мокрое/сухое	Нормальные условия эксплуатации	Ожидаемые при эксплуатации события	
Равномерная коррозия	Мокрое	Нет	Да	Нет
Локальная коррозия	Мокрое	Нет	Да	Нет
Тепловая деформация ползучести	Сухое	Нет	Да	Нет
Коррозионное растрескивание под напряжением	Мокрое/сухое	Нет (кроме AGR)	Да	Нет
Замедленное гидридное растрескивание	Сухое	Нет (кроме CANDU)	Нет	Нет
Охрупчивание оболочки	Мокрое/сухое	Нет	Нет	Да
Окисление	Мокрое/сухое	Нет	Да	Нет

5.1.2.1. Мокрое хранение

Смена температурных условий, в которых находится отработавшее топливо, от $> 300^{\circ}\text{C}$ в активной зоне реактора до $< 50^{\circ}\text{C}$ в бассейне приводит к значительному снижению таких факторов стресса, как остаточное внутреннее давление, окружное напряжение и скорость коррозии.

Механизмы деградации, которые могут повлиять на целостность циркониевой оболочки твэла при мокром хранении, показаны на рис. 48, а механизмы, которые могут повлиять на твэлы с оболочкой из нержавеющей стали газоохлаждаемых реакторов, — на рис. 49.

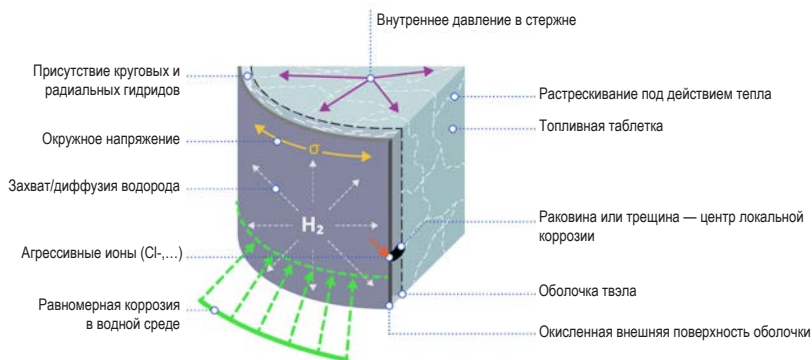


РИС. 48. Схематическое изображение явлений, которые могут повлиять на состояние циркониевой оболочки отработавшего твэла при мокром хранении.

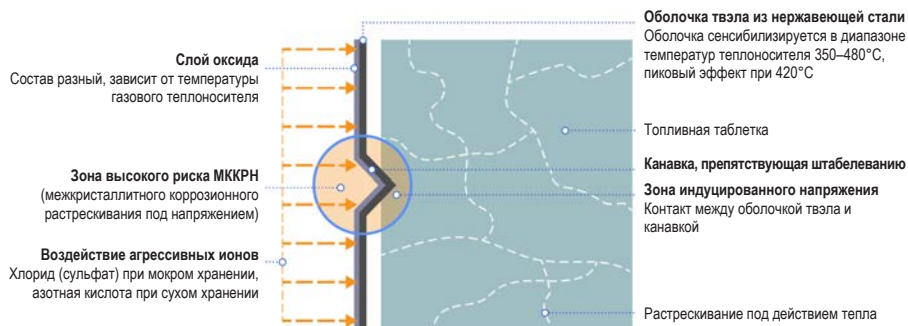


РИС. 49. Схематическое изображение явлений, которые могут повлиять на состояние оболочки из нержавеющей стали отработавшего твэла газоохлаждаемых реакторов при мокром хранении и сухом хранении.

Основными механизмами деградации, которые теоретически могут повлиять на целостность оболочки отработавшего твэла и элементов конструкции во время мокрого хранения, являются равномерная коррозия, локальная коррозия, КРН, охрупчивание оболочки и окисление. Ниже приводится краткое описание этих механизмов.

а) Равномерная коррозия

При хранении в воде бассейна хорошего качества скорость равномерной коррозии сплавов на основе циркония при температурах $< 50^\circ\text{C}$ находится ниже предела обнаружения стандартных измерительных

инструментов. Поэтому равномерная коррозия не считается фактором, ограничивающим длительное хранение твэлов с оболочкой из циркониевых сплавов, при условии, что химический состав бассейна контролируется в соответствии с требованиями производителя топлива.

В таблице 2 приведены опубликованные данные по материалам оболочки на основе циркония и нержавеющей стали, а также материалам, используемым в конструкциях тепловыделяющих сборок или пучках твэлов, — нержавеющей стали (304L) и инконелю (625, 718 и X-750).

б) Локальная коррозия (гальваническая, точечная и МБК)

При мокром хранении, когда вода бассейна действует как электролит, гальваническая коррозия является главным типом коррозионного поражения одного или нескольких несхожих по электропроводности металлов, которые вступают между собой в электрический контакт. Гальваническая коррозия — это потенциальная проблема для материалов тепловыделяющих сборок, вступающих в контакт со стеллажами для хранения, контейнерами и т.д.

В стеллажах и контейнерах обычно применяется нержавеющая сталь, поскольку она, как и циркониевые сплавы, находится почти на положительном конце электрохимического ряда и поэтому не подвержена электрохимическому поражению. Данные на сегодняшний день подтверждают правоту этого утверждения. Другим материалом, который нашел применение в системах хранения, является алюминий. Алюминиевые сплавы, которые находятся ближе к активному концу ряда, вступая в электрохимический контакт с циркониевыми сплавами, могут теоретически генерировать достаточный потенциал для окисления алюминия и гидрирования циркония. На деле этого не происходит, поскольку оба материала легко формируют пассивирующие оксидные пленки, действующие как барьер, не позволяющий материалам вступить в прямой электрический контакт между собой [34].

Циркониевые сплавы и материалы из нержавеющей стали не подвержены точечной коррозии при нормальном водно-химическом режиме, который поддерживается в бассейнах выдержки отработавшего топлива, то есть при концентрации примесей менее 2 частей на миллион. МБК — это результат метаболической активности некоторых видов бактерий, особенно сульфатредуцирующих бактерий в стоячей воде. Хотя некоторые признаки МБК в охлаждающих сооружениях и были обнаружены, МБК циркониевых сплавов и оборудования бассейнов выдержки зафиксирована не была. В качестве профилактической меры можно организовать периодический

ТАБЛИЦА 2. ДАННЫЕ О РАВНОМЕРНОЙ КОРРОЗИИ ОБОЛОЧКИ И МАТЕРИАЛОВ КОНСТРУКЦИИ ТЕПЛО ВЫДЕЛЯЮЩИХ СБОРОК, ХРАНЯЩИХСЯ В ВОДЕ

Материал	Скорость равномерной коррозии	Примечание	Ссылка
Zry-1	3–5 мкм/год	Топливо РБМК в канистрах со стоячей водой, в противном случае коррозия будет ниже предела обнаружения.	[16]
Zry-2	< 0,01 мкм/год	Экстраполированные данные скорости коррозии при 90°C. Измеренные данные показывают первоначальный рост оксидного слоя на ~3,7 мкм за 2 года мокрого хранения, после чего дальнейший рост не поддается измерению.	[38] [16]
Образцы циркалоя	< 0,007 мкм/год	Пребывание в воде бассейна в течение 3 лет.	[37]
Оболочка из нержавеющей стали (20Cr:25Ni:Nb)	< 0,1 мкм/год	Необлученная оболочка в деминерализованной воде с pH 11,5 + гидроксид натрия, тест на погружение и тест методом расчета электрических полей.	[34]
Сплавы инконель (625, 718 и X-750)	0,05 мкм/год	Минерализованная вода из скважины с содержанием хлорида ~72 частей на миллион.	[39]
Zry-4	50 нм/г (предел обнаружения)	Облученный Zry-4 в деминерализованной воде, деминерализованная вода + гидроксид натрия с pH до 11,4, деминерализованная вода + нитрат натрия, 50 частей на миллион. Все испытания проводились при 323 К.	[35]
Нержавеющая сталь (304L)	0,25 мкм/год	Образцы в воде бассейна.	[37]

отбор и анализ проб на присутствие вредных видов бактерий, особенно в хранилищах, находящихся на открытом воздухе.

- с) Коррозионное растрескивание под напряжением (только для твэлов с оболочками из нержавеющей стали)

Если топливо газоохлаждаемого реактора, имеющее оболочку из нержавеющей стали, было облучено в диапазоне температур 350–480°C, оно остается сенсibilизированным в начале хранения (рис. 49). В сочетании с областями остаточного напряжения (концевые пробки или канавки, препятствующие штабелеванию) такая оболочка подвержена разрушению в результате межкристаллитного КРН в присутствии агрессивных ионов (например, хлорида). Как показывает опыт, коррозия может начаться при очень низкой концентрации хлорида, $< 0,5$ частей на миллион [35].

- d) Охрупчивание оболочки — миграция и перераспределение водорода в тепловыделяющих сборках, содержащих цирконий

Когда твэл с циркониевой оболочкой остывает до температуры хранения в бассейне, основная часть водорода, находящегося в твердом растворе в сплаве, выпадает в осадок в виде гидридных пластинок. При температурах воды бассейна, представляющих практический интерес, перераспределение водорода путем тепловой диффузии и формирование так называемых «раковин» в результате Оствальдовского созревания может быть исключено из-за характеристик теплопередачи воды.

- e) Окисление поврежденных твэлов

Главным источником кислорода в воде бассейна является растворенный кислород. Поскольку большинство систем хранения, используемых для хранения отработавшего топлива, являются открытыми или вентилируемыми, вероятность накопления кислорода в результате радиолитического распада ничтожно мала. Уровни концентрации растворенного кислорода в воде бассейна наиболее высоки при низкой температуре бассейна: 10 частей на миллион при 15°C, а при 45°C они снижаются до 7–8 частей на миллион. При таких уровнях они не представляют особой проблемы для неповрежденных оболочек твэлов и материалов конструкций в воде бассейна. Если топливо обнажается из-за повреждения оболочки, то существует вероятность того, что произойдет реакция его преобразования в высшие оксиды. Для преобразования с достаточно высокой скоростью

требуется повышенная температура, которой нет в среде бассейна. Поэтому любое преобразование происходит относительно медленно.

В случае с поврежденными твэлами исследования и опыт эксплуатации показали, что результаты зависят от размера дефекта. Для дефектов размером < 1 мм существует мало доказательств преобразования в высшие оксиды. По имеющимся данным, при крупных дефектах оболочка может разорваться из-за образования высших оксидов. Для топлива, хранящегося в течение длительного времени, о преобразовании в высшие оксиды свидетельствует формирование желтых кристаллов или порошка на поверхности таблеток диоксида.

5.1.2.2. Сухое хранение

После первоначального охлаждения в бассейне реактора топливо может быть отправлено на сухое хранение. В процессах осушки топлива и последующей передачи и хранения в сухом виде топливо может подвергнуться воздействию более высоких температур, чем в бассейне, и потенциально более высоких, чем во время облучения. При использовании технологии вакуумной осушки топливо также испытывает на себе относительно быстрые перепады давления.

Переход от температуры хранения в бассейне менее 50°C к температуре до 400°C [20] во время осушки и $350\text{--}410^{\circ}\text{C}$ при сухом хранении, в зависимости от национальных норм, приведет к увеличению таких факторов стресса, как внутреннее давление и окружное напряжение. Условия, возникающие после облучения в стержневой части твэла LWR, которые могут повлиять на целостность оболочки твэла (на основе циркония) при сухом хранении, показаны на рис. 47 (справа); условия для твэлов газоохлаждаемых реакторов с оболочкой из нержавеющей стали — на рис. 49.

Потенциальными механизмами деградации, которые могут повлиять на целостность оболочек твэлов во время сухого хранения и последующих транспортно-технологических операций, являются тепловая деформация ползучести, КРН, замедленное гидридное растрескивание (ЗГР), охрупчивание оболочки и окисление воздухом. Они кратко описываются ниже.

а) Тепловая деформация ползучести

Ползучесть оболочки твэла — это процесс, при котором длина или диаметр материала увеличиваются со временем в результате одного или нескольких приложенных напряжений. По мере расширения

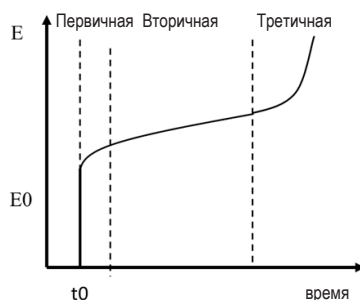


РИС. 50. Характеристики тепловой деформации ползучести.

материала он будет становиться все тоньше, пока не разорвется, что, как предполагается, приведет к «точечному» разрыву (или разрыву типа узкой трещины). Процесс деформации ползучести характеризуется тремя фазами: первоначальное быстрое увеличение длины или диаметра, которое со временем замедляется, период равномерного увеличения, а затем экспоненциальное увеличение, пока материал не разорвется. Эти фазы принято называть первичной, вторичной и третичной ползучестью (рис. 50). С точки зрения ядерной безопасности главная цель — не допустить возникновения условий, которые могут привести к третичной ползучести. Для оболочки твэла факторами стресса являются внутреннее давление в топливном стержне и температура оболочки. Ползучесть также зависит от состава и состояния материала и от влияния отжига во время хранения [40].

Считается, что во время длительного хранения объем газа внутри топливного стержня после первоначального охлаждения в реакторе остается постоянным¹⁸, и поэтому основным фактором, который будет влиять на скорость деформации ползучести, будет температура оболочки твэла.

Что касается топлива водяного реактора, то если отработавшее топливо в дальнейшем транспортируется или передается в систему сухого хранения, то существует вероятность того, что температура оболочки твэлов поднимется выше значений, зафиксированных во время работы реактора. Таким образом, тепловая деформация ползучести считалась одним из наиболее проблемных механизмов деградации при

¹⁸ После первоначального охлаждения дальнейшего выделения газа из топливной матрицы не ожидается, но в более долгосрочной перспективе (> 100 лет) накопление гелия в результате альфа-распада может привести к выделению дополнительных объемов газа из топливной матрицы и/или разрушению таблеток, что создаст дополнительную нагрузку на оболочку твэла [35].

сухом хранении, но впоследствии было доказано, что этот механизм имеет свойство самоограничения. Дополнительную информацию можно найти в [9, 40].

b) Коррозионное растрескивание под напряжением

КРН оболочек твэлов при сухом хранении может происходить в результате внутреннего воздействия в форме иод-индуцированного КРН либо внешнего воздействия, как в случае с твэлами газоохлаждаемых реакторов с оболочкой из нержавеющей стали, в форме межкристаллитного КРН (см. рис. 49 и раздел 5.1.2.1. (с)). Межкристаллитное КРН при сухом хранении возникает под воздействием азотной кислоты, образующейся при радиоллизе в условиях застоя или слабого движения воздуха, а также в герметичных системах, заполненных инертным газом, со следовыми количествами воздуха и остаточной влагой [41].

Что касается иод-индуцированного КРН (когда агрессивную среду создает иод), то оно возникнет только в присутствии химически активного иода, достаточного напряжения и определенного диапазона высоких температур. При температурах, характерных для режимов сухого хранения, продукты деления, которые образуются в УОХ-топливе во время эксплуатации реактора, практически неподвижны в кристаллической решетке топлива, и иод не присутствует в форме, которая могла бы вызвать КРН.

Можно заключить, что поскольку сочетание агента КРН и напряжений, требующихся для развития трещин, обычно отсутствует, то повреждения оболочки под действием этого механизма ожидать не следует. Таким образом, КРН, равномерная коррозия оболочки внутренними продуктами деления топливного стержня, локальная коррозия оболочки внутренними продуктами деления топливного стержня и другие механизмы повреждения по действием продуктов деления также не ожидаются. Дополнительную информацию об этом можно найти в [15].

с) Замедленное гидридное растрескивание

ЗГР — это один из многих способов, посредством которых может происходить водородное растрескивание циркониевых сплавов. ЗГР — это очень специфический механический процесс, требующий напряжения циркония по трем осям для того, чтобы расширить кристаллическую решетку. Под действием этих трехосных напряжений расширяются тетраэдрические участки кристаллической решетки циркония, занятые атомами водорода в растворе. В результате этого атомы водорода могут

рассеяться по градиенту напряжения и осесть в области пикового напряжения. Хотя действие механизма ЗГР было отмечено в образцах циркалоя большей толщины, не следует ожидать, что он будет активным механизмом деградации в трубчатых оболочках, поскольку толщины стенок недостаточно для создания большого трехосного напряжения.

Для определенной совокупности пучков твэлов CANDU наиболее значимым механизмом, который может повлиять на их целостность во время сухого хранения, считается ЗГР сварных швов концевой пробки и концевой пластины; известно, что у этой совокупности пучков нарушена сплошность сварных швов концевой пластины. Основания для беспокойства дает возможность возникновения повышенных напряжений в области сварного шва от пучка твэлов до концевой пластины в результате изгиба. Моделирование методом конечных элементов, подкрепленное экспериментальными исследованиями, показывает, что расчетный коэффициент интенсивности напряжений в концевой пластине составляет примерно половину критического значения коэффициента интенсивности напряжений, вызывающего развитие трещины [42].

d) Охрупчивание оболочки

Охрупчивание оболочки, или потеря пластичности оболочки, усиливается во время облучения быстрыми и тепловыми нейтронами при повышенных температурах в результате радиационно-индуцированного повреждения. Для твэлов, облученных при температуре $< 500^{\circ}\text{C}$, потеря пластичности бывает вызвана в основном повреждением быстрыми нейтронами в виде скоплений точечных дефектов (дислокационных петель и пустот). Эти скопления действуют как смещение, ограничивая способность твэлов скользить под нагрузкой.

В случае с твэлами газоохлаждаемых реакторов с оболочкой из нержавеющей стали, в которых большая часть стрингера топливной кассеты облучается при температуре $> 500^{\circ}\text{C}$, кластеры точечных дефектов отжигаются слишком быстро, чтобы оказать значительное влияние на пластичность оболочки. Нержавеющая сталь была выбрана, среди прочего, по той причине, что она сохраняет высокую степень пластичности при высоких температурах. Однако нержавеющая сталь теряет пластичность во время облучения в результате образования гелия. Существует три источника гелия:

- трансмутация бора;
- трансмутация никеля;
- реакция быстрых нейтронов с атомами металлов.

При высоких уровнях облучения преобладает (n,α) трансмутация никеля (^{58}Ni или ^{60}Ni) в железо (^{55}Fe или ^{57}Fe).

В случае использования твэлов с циркониевой оболочкой в водяных реакторах оболочка также теряет пластичность в результате захвата водорода из водного теплоносителя и его последующей реакции с цирконием в структуре оболочки. В результате этой реакции образуются пластинки гидрида циркония, которые выпадают в осадок, когда оболочка твэла остывает. Существует два механизма деградации, связанных с охрупчиванием, которые могут потенциально повлиять на целостность топлива во время хранения и последующих транспортно-технологических операций: i) переориентация гидридов и ii) миграция и перераспределение водорода.

i) Переориентация гидридов

Переориентация гидридов — это процесс, при котором осажденные гидриды циркония растворяются в твердой металлической матрице до точки насыщения водородом и могут переориентироваться в другом направлении во время охлаждения под влиянием внутреннего давления в стержне. Если гидрид переориентируется с кругового на радиальное направление, это может повлиять на механические свойства оболочки твэла. Это не влияет на характеристики отработавшего топлива при хранении, но может повлиять на последующие технологические операции с отработавшим топливом, особенно при более низких температурах, если твэл упадет или испытает ударное воздействие во время транспортировки. Восприимчивость к переориентации гидридов увеличивается с ростом температуры и напряжения; наиболее подвержено этому топливо с коротким периодом охлаждения, с повышенной глубиной выгорания и МОХ-топливо.

Было проведено значительное количество исследований по изучению свойств, которые влияют на переориентацию гидридов циркония во время осушки, хранения или транспортировки топлива. Предметами исследований были:

- влияние температуры на переориентацию гидридов;
- влияние напряжения на переориентацию гидридов;
- влияние условий радиальной термической обработки на пластичность оболочки;
- влияние облучения в энергетическом реакторе на пластичность;
- влияние скорости охлаждения;
- критическая температура хрупкости (иногда называемая КТХ).

Подробные данные об этих исследованиях приведены в [35]. Ниже кратко излагаются их основные результаты.

То, какой объем водорода переходит обратно в состояние твердого раствора в решетке циркониевого сплава, определяется максимальной температурой оболочки после или по завершении охлаждения. Обычно осажденные гидриды растворяются при температуре, отличной от той, при которой происходит их повторное осаждение (т.е. демонстрируют гистерезис), и именно во время этого повторного осаждения уровень напряжения в оболочке наиболее важен для оценки возможности переориентации гидридов. Переориентация будет усиливаться при более высоком уровне приложенного напряжения; взаимодействие между таблеткой и оболочкой, вероятно, приведет к значительному снижению напряжения по сравнению с теми случаями, когда такая связь отсутствует.

Было доказано, что на восприимчивость оболочки, к которой прилагается растягивающее окружное напряжение, к выпадению радиальных гидридов во время охлаждения существенно влияет текстура. При интерпретации результатов необходимо учитывать влияние термической обработки на свойства материала (включая размер зерна, внутренние напряжения/деформации и т.д.).

Есть некоторые свидетельства того, что быстрое охлаждение приводит к образованию более коротких гидридов (особенно в случае топлива PWR). Однако в случае топлива BWR, имеющего оболочку из циркония, эта оболочка действует как поглотитель водорода, поэтому более длительный период охлаждения снижает количество водорода, доступного для переориентации, так как в основном он поглощается оболочкой.

ii) Миграция и перераспределение водорода

Существование осевых температурных профилей в системе хранения может стать причиной миграции водорода в твердом растворе из высокотемпературной в низкотемпературную область оболочки [43–45]. Осаждение водорода в более холодных областях в форме гидридов будет происходить в том — и только в том — случае, если возникнет достаточно высокое перенасыщение. Если оно возникает, то осаждение гидридов ведет к усилению хрупкости, которое может негативно повлиять на целостность топлива.

Поскольку коэффициент диффузии водорода низок, после 40 лет хранения в гелиевой атмосфере любая осевая миграция водорода, за исключением концов топливных стержней, будет незначительной. Поскольку изменения между начальным профилем водорода и профилем водорода после хранения были незначительными, был сделан вывод, что

миграция водорода не оказывает существенного влияния на целостность оболочек ТВЭЛов во время сухого хранения.

е) Окисление воздухом

Присутствие значительного количества воздуха в контакте с хранящимся отработавшим топливом можно исключить путем соответствующей осушки и инертизации систем, чтобы создать условия инертной атмосферы во время сухого хранения. При хранении в нормальных условиях более интенсивного окисления, чем то, которое происходит во время работы реактора, не ожидается. Поэтому при нормальных инертных условиях хранения окисление не считается активным механизмом деградации. В случае аномальных или аварийных условий, когда происходит нарушение герметичности системы хранения, окисление воздухом может рассматриваться как механизм деградации.

При возникновении таких аномальных или аварийных условий можно рассмотреть два сценария для топливных стержней: i) отсутствие сквозных дефектов и окисление оболочки; ii) наличие сквозных дефектов, приводящее к окислению топливной матрицы.

i) Окисление воздухом оболочки

При типичных температурах и условиях сухого хранения¹⁹ скорость окисления циркониевой оболочки воздухом относительно низка [46]. В итоге потеря толщины стенок оболочки ограничивается несколькими процентами, даже при длительном контакте с воздухом. Благодаря этому ограничению оболочка остается эффективным локализирующим барьером, и, если в оболочке нет сквозных дефектов, топливные таблетки остаются защищенными от контакта с воздухом.

ii) Окисление воздухом топливной матрицы

Если в оболочке имеются сквозные дефекты, это может стать причиной контакта воздуха с топливной таблеткой. При температурах ниже ~250°C скорость окисления UOX остается очень низкой. Однако если температура

¹⁹ Используя уравнение, предложенное Hillner et al. [46], можно предположить, что для топлива, выдерживаемого при температуре 400°C в течение 100 дней, дополнительная потеря толщины оболочки составит всего 20 мкм. Хотя это уравнение было составлено для паровой коррозии, скорости коррозии в паре и воздухе достаточно схожи, чтобы получить репрезентативный результат.

превышает 250°C, то становится возможным образование U_3O_8 из UO_2 посредством двухступенчатого процесса $UO_2 \rightarrow U_4O_9 \rightarrow U_3O_8$.

Это преобразование в U_3O_8 зависит от температуры и глубины выгорания топлива (дополнительную информацию см. в [47]). Оно приводит к увеличению объема более чем на 36%. Увеличение объема при окислении топлива до U_3O_8 ведет к росту уровней нагрузки на оболочку: может произойти серьезный разрыв или «расползание» оболочки.

5.2. НАБЛЮДЕНИЕ

Как показано на рис. 46, наблюдение — это один из основных процессов в цикле «планирование — действие — проверка — корректировка» управления старением отработавшего топлива и хранилищ. Функции безопасности как отработавшего топлива, так и хранилищ должны оцениваться на предмет возможной деградации компонентов в результате старения [48, 49]. Поэтому связанные с безопасностью КСЭ хранилищ отработавшего топлива нуждаются в мониторинге и инспекциях. Ресурсы необходимо направлять на решение первоочередных проблем, вызванных старением.

Мониторинг определяется как «постоянное или периодическое измерение» [4]. Инспекция определяется как «исследования, обследования, надзор, измерения или испытания, проводимые с целью оценки конструкций, систем и элементов» [4]. В хранилищах требуется проведение постоянной проверки с целью убедиться в том, что характеристики критически важных КСЭ остаются адекватными для выполнения предъявляемых к ним требований. Эффективное управление старением — залог того, что любое снижение характеристик будет обнаружено на ранней стадии и прежде, чем произойдет потеря какой-либо функции безопасности.

Мониторинг может осуществляться как в форме мониторинга состояния, так и в форме мониторинга характеристик. Мониторинг состояния используется для определения наличия эффектов старения или каких-либо повреждений, а также для количественной оценки их размера. Он включает в себя осмотр отработавшего топлива, стеллажей для хранения топлива и бетонных конструкций на предмет деградации. Мониторинг характеристик используется для проверки того, способны ли КСЭ выполнять заданные функции.

Программа инспекций гарантирует, что КСЭ отвечают всем применимым требованиям к хранению (и требованиям к транспортировке в случае ДЦК), и включает в себя:

- периодический осмотр системы хранения с составлением акта;
- возможное проведение инспекций системы хранения на случайной основе;
- оценку результатов повторных инспекций.

Поскольку нормативная база и технологии постоянно развиваются, периодические переоценки состояния системы хранения дают гарантию того, что основа для лицензирования системы хранения будет соответствовать требованиям в течение всего периода хранения. Правила перевозки, применяемые к ДЦК, описаны в публикации МАГАТЭ № SSR-6 [50], как указано в разделе 6.2.1.²⁰

Для оценки текущего состояния КСЭ требуется информация из нескольких источников, таких как история эксплуатации, включая сведения о корректирующих мерах и модификациях конструкции. Опыт, полученный на конкретном объекте, в дополнение к соответствующему опыту отрасли в целом, также может рассматриваться как часть общей оценки состояния КСЭ. Наилучшей практикой для общепромышленных и общенациональных систем считается сбор и анализ информации о тенденциях в области мониторинга, результатах инспекций и принятых корректирующих мерах.

5.2.1. Мокрое хранение

Как правило, при мокром хранении за состоянием отработавшего топлива и стеллажей для хранения топлива можно легко наблюдать через воду. Некоторые КСЭ доступны для прямого осмотра во время обслуживания. Существуют другие КСЭ, которые недоступны либо находятся в полях повышенной радиации и поэтому не могут быть осмотрены с близкого расстояния. К методам оценки состояния материала при мокром хранении могут относиться [37]:

- неразрушающая оценка;

²⁰ Пункты 809 (f) и (k) Правил безопасной перевозки радиоактивных материалов, публикация МАГАТЭ № SSR-6 (Rev. 1, издание 2018 года) [50], требуют учета механизмов старения и разработки программы периодической оценки изменений в нормативных положениях, изменений в технических знаниях и изменений в состоянии конструкции ДЦК во время хранения.

- разрушающее исследование фактических и/или репрезентативных материалов;
- подводная фото- и видеосъемка;
- осмотр любых компонентов, не находящихся в работе, будь то при техническом обслуживании или выводе из эксплуатации;
- мониторинг водно-химического режима воды и радионуклидов.

Могут быть введены программы наблюдения за отработавшим топливом. Примером служат французские ПР бассейны, где осуществляется программа мониторинга десяти отработавших тепловыделяющих сборок: шести UO_2 (с разными уровнями обогащения и глубиной выгорания) и четырех отработавших тепловыделяющих сборок с МОХ-топливом. Последние осмотры проводились по прошествии 25-летнего периода хранения. Результаты показали, что не произошло ни потери герметичности, ни геометрической деформации, ни изменения толщины оксидного слоя. В намеченном к строительству централизованном «мокром» хранилище эта программа наблюдения будет продолжена с охватом большего количества отработавших тепловыделяющих сборок разных типов. Может быть предусмотрено извлечение одного стержня из отработавшей тепловыделяющей сборки для проведения разрушающего исследования в специальной лаборатории.

5.2.2. Сухое хранение

В «сухом» хранилище прямой визуальный осмотр отработавшего топлива невозможен без вскрытия системы или блока хранения, что может привести к попаданию в систему или блок влаги или воздуха с потенциальным риском для целостности топлива. Это также увеличит радиационное облучение работников, поэтому предпочтительнее использовать методы, поддерживающие радиационное облучение на уровне ALARA. В большинстве систем также невозможно взять на анализ пробы газа из гнезда хранения. К альтернативным методам, используемым для оценки состояния систем сухого хранения, относятся:

- измерение мощности дозы;
- обнаружение течей, например путем измерения давления во внутренней крышке;
- измерения температуры в воздуховодах или на внешней поверхности системы хранения.

Кроме того, могут проводиться периодические инспекции, которые являются обязательными в некоторых странах. Например, можно провести более детальную инспекцию определенного процента пеналов, блоков хранения или транспортно-упаковочных контейнеров (как минимум одного), уже находящихся на хранении, например визуальный осмотр на предмет деградации, измерение мощности дозы или температуры. Эти инспекции могут быть частью обоснования безопасности при продлении срока действия лицензии хранилища.

В 2000 и 2010 годах Токийская электроэнергетическая компания (ТЕПКО) провела исследование транспортно-упаковочных контейнеров, хранившихся в течение пяти и десяти лет. После аварии на АЭС «Фукусима-дайити», которая произошла в 2011 году, в 2013 году было проведено дополнительное исследование контейнеров, хранившихся на станции в течение 17 лет. Во время цунами 2011 года морская вода, песок и обломки попали в хранилище транспортно-упаковочных контейнеров и осели в здании. После подтверждения безопасности визуальным осмотром девять контейнеров для хранения были перемещены в общий стационарный бассейн. Были проведены дополнительные осмотры для подтверждения локализации, подкритичности и целостности топлива. Первый из девяти контейнеров был погружен в бассейн, и с него была снята первичная крышка, чтобы исследовать содержимое. Исследование подтвердило отсутствие аномалий на корпусах контейнеров и аномалий во внешнем виде трех репрезентативных отработавших тепловыделяющих сборок, которые были взяты на инспекцию. Снять первичную крышку с восьми других контейнеров планировалось лишь в том случае, если уплотнение первичной крышки будет признано негерметичным или если будет обнаружено присутствие 85 Кг. Проблем обнаружено не было, поэтому исследования остальных восьми контейнеров были проведены в воздушной атмосфере здания общего бассейна. Во всех случаях уплотнение вторичной крышки было заменено ввиду коррозии от контакта с морской водой.

В 2009 году Японская ядерно-энергетическая компания (ДЖАПК) провела исследования герметичности и целостности оболочек отработавших твэлов в транспортно-упаковочных контейнерах, находившихся на хранении в течение семи лет. Для подтверждения герметичности контейнеров был проведен внешний осмотр металлического уплотнения первичной крышки и фланцевого уплотнения, чтобы убедиться в отсутствии утечки газа. Для подтверждения целостности оболочки отработавшего топлива были отобраны и проанализированы пробы газа из полости, а также проведен визуальный осмотр отработавшей тепловыделяющей сборки. Аналогичное исследование вскрытого транспортно-упаковочного контейнера после 15 лет хранения было проведено в США [51, 52].

Благодаря этим исследованиям ТЕПКО и ДЖАПК доказали герметичность контейнеров и целостность оболочек отработавших твэлов после 17 лет хранения. Подобного рода исследования важны для демонстрации того, что функции безопасности не нарушены, и для обоснования возможности перевозки после хранения.

Некоторые дополнительные примеры наблюдения за конкретными особенностями транспортно-упаковочных контейнеров описаны в [53].

5.2.2.1. Защита

Отклонения от ожидаемых уровней радиации могут указывать на ухудшение качества защиты. Например, полимерные материалы для защиты от нейтронов в контейнерах сухого хранения подвержены деградации под действием тепла и радиации.

5.2.2.2. Локализация

При хранении в металлических транспортно-упаковочных контейнерах утечку инертного газа можно проверять посредством мониторинга давления между крышками контейнера. Пример системы мониторинга давления показан на рис. 51. В некоторых системах пеналов, герметизированных

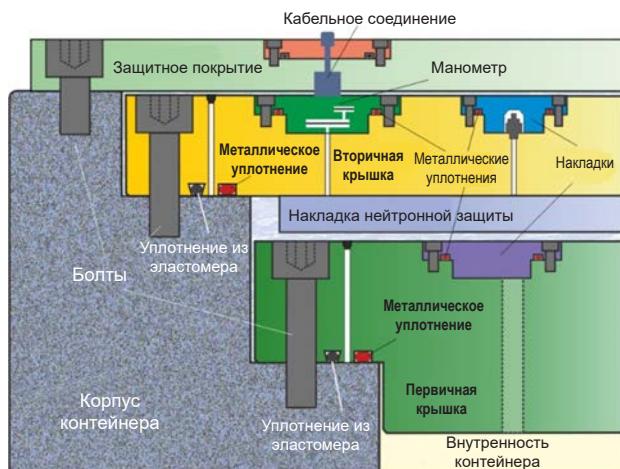


РИС. 51. Типичная система закрытия на болтах транспортно-упаковочных контейнеров типа CASTOR по принципу двойного барьера (воспроизведено с разрешения Федерального института исследований и испытаний материалов (BAM)).

сваркой, утечку инертного газа можно проверить путем измерения разницы температур между верхней и нижней частями пенала [54].

При продлении срока действия лицензии на системы хранения пеналов в бетонных транспортно-упаковочных контейнерах демонстрация того, что пеналы не подверглись непредвиденной деградации, — это необходимый этап для обеспечения того, чтобы пенал сохранял свою функцию локализации. По сведениям Комиссии по ядерному регулированию, дистанционный визуальный осмотр одного или нескольких «контрольных» пеналов — это принятый в США метод проверки состояния пеналов в автономном хранилище отработавшего топлива [55]. Контрольный пенал выбирается подателем заявки, который должен обосновать выбор пенала для исследования.

5.2.2.3. Охлаждение

Для системы хранения с внутренними воздуховодами (например, бетонных транспортно-упаковочных контейнеров) можно предусмотреть график осмотра через соответствующие промежутки времени и/или системы мониторинга температуры воздуха и включить их в эксплуатационные регламенты или проект системы.

Может быть разработана система мониторинга температуры воздуха для проверки возможностей рассеивания тепла (т.е. для измерения температуры воздуха на выходе из бетонных транспортно-упаковочных контейнеров, находящихся на длительном хранении), которая будет предусматривать дистанционное или локальное считывание данных. Система мониторинга температуры может быть установлена на всех бетонных контейнерах или на некоторой их части.

Для систем хранения в пеналах одним из возможных методов обнаружения утечки является мониторинг распределения температур на поверхности пенала. Если пеналы были заполнены гелием для улучшения теплопроводности, распределение температур изменится в случае образования трещины и последующей утечки инертного газа [9, 35].

5.3. ТЕХНИЧЕСКОЕ ОБСЛУЖИВАНИЕ И РЕМОНТ

Чтобы обеспечить работоспособность и надлежащее состояние системы сухого хранения после длительного хранения и перед транспортировкой, необходимо ввести программы или регламенты технического обслуживания и ремонта как часть ПУС, основанных на эксплуатации.

В «мокром» хранилище большинство функций безопасности выполняются, по крайней мере частично, активными системами (охлаждения, очистки воды бассейна, вентиляции здания). Во время эксплуатации таких хранилищ необходимо проводить плановое и внеплановое техническое обслуживание по результатам мониторинга и осмотров, периодических посещений и инспекций. Эта деятельность должна быть изначально предусмотрена в проекте.

Системы сухого хранения обычно проектируются как пассивные блоки, требующие минимального технического обслуживания. По этой причине активных элементов или систем, которые были бы необходимы для обеспечения непрерывного выполнения функций безопасности во время хранения, не существует. Однако внеплановое техническое обслуживание все же потребуется в том случае, если при проверке выполнения функций, например локализации или охлаждения, будут обнаружены аномальные признаки. Следует разработать и предоставить оператору регламенты планового технического обслуживания на весь срок службы оборудования, охватывающие такие операции по техническому обслуживанию, как смазка движущихся частей и повторное нанесение антикоррозионных материалов в случае появления царапин. Некоторые материалы и узлы установки имеют ограниченный срок службы и будут нуждаться в замене. Узлы, требующие периодической замены, обычно определяются во время проектирования, и в систему технического обслуживания установки включается программа их модернизации. В регулярном мониторинге также нуждаются другие факторы, которые могут быть неподконтрольны оператору, но если они известны, то можно предусмотреть соответствующие меры. К таким факторам относится доступность запасных частей и разнообразие ассортимента на рынке. Одной из важных категорий являются системы управления и компьютерные системы, которые могут устареть и больше не поддерживаться производителем.

5.4. СОХРАНЕНИЕ ДАННЫХ

Документы о ядерном топливе, содержащие данные, информацию и знания, многообразны по характеру (бумажные документы, электронные таблицы, электронная почта, материалы на веб-сайтах и т.д.), сложны и объемны. При планировании любой деятельности на конечной стадии топливного цикла необходимо обладать как можно более полными знаниями.

Цель ведения учетной документации — сбор и сохранение информации и актуальных чертежей для того, чтобы эту информацию

можно было использовать, когда начнется детальное планирование дальнейшей деятельности.

При подготовке к любой будущей деятельности одной из первых задач является выяснение того, какого рода информация необходима, определение надлежащих источников этой информации и установление эффективного контроля над ней.

Одним из важных элементов планирования является определение и хранение соответствующих проектных и эксплуатационных документов до окончательного закрытия ядерной установки, чтобы не допустить потери опыта эксплуатации.

Важнейшие решения, принимаемые при ведении учетной документации, касаются следующих моментов:

- какой тип информации будет храниться;
- в какой форме он будет храниться;
- качество информации с точки зрения формы и содержания;
- простота поиска информации в будущем, даже по истечении очень длительного времени.

В некоторых государствах-членах должна быть создана система управления архивами — или система управления документооборотом, — и она должна применяться ответственной организацией по мере того, как учетные документы составляются или получают и передаются в пользование. Это позволяет организации создавать, индексировать, искать, сохранять и находить документы, содержащие проектную информацию, которая хранится в электронном виде. Более подробную информацию по вопросам сохранения данных можно найти в [56].

6. ТРАНСПОРТИРОВКА ОТРАБОТАВШЕГО ТОПЛИВА: СООБРАЖЕНИЯ, СВЯЗАННЫЕ С ХРАНЕНИЕМ ОТРАБОТАВШЕГО ТОПЛИВА

В определенный момент времени отработавшее топливо потребует вывезти с площадки реактора на дальнейшее хранение, переработку или кондиционирование для последующего захоронения. Внутриобъектовые

перевозки отработавшего топлива регулируются местными требованиями и в настоящей главе не рассматриваются.

Транспортно-упаковочный контейнер для отработавшего топлива состоит из основного корпуса, корзины (в случае размещения топлива без пеналов) или пенала и системы закрытия. Эти компоненты гарантируют выполнение функций безопасности, связанных с транспортировкой, таких как локализация, подкритичность, теплоотвод и радиологическая защита, которые обеспечиваются за счет структурной целостности в обычных, нормальных и аварийных условиях (публикация МАГАТЭ № SSR-6) [50].

Для выполнения операций по подъему или повороту в конструкцию обычно включаются цапфы, расположенные в нижней и верхней части контейнера. Они также используются как часть системы крепления на опорных рамах или транспортных платформах. В соответствии с нормами МАГАТЭ и большинства стран транспортно-упаковочные контейнеры для отработавшего топлива классифицируются как упаковки типа В (U или M), при этом также учитываются требования к упаковкам, содержащим делящийся материал. Один из примеров приведен на рис. 52.

Сертификат об утверждении конструкции транспортной упаковки обычно выдается на определенный срок (типичный срок составляет пять лет), и для его продления на следующий период потребуется демонстрация соответствия требованиям безопасности перевозки, установленным в правилах перевозки на момент проведения повторной сертификации. Лицензия на хранение, напротив, обычно выдается на несколько десятилетий.



РИС. 52. Транспортно-упаковочный контейнер NAC-STC, перевозимый грузовым автотранспортом по шоссе (публикуется с разрешения НАК).

6.1. ТРАНСПОРТИРОВКА СИСТЕМ, ПРЕДНАЗНАЧЕННЫХ ТОЛЬКО ДЛЯ ХРАНЕНИЯ

Для вывоза отработавшего топлива за пределы площадки (по дорогам общего пользования) используется транспортно-упаковочный контейнер, образующий полный транспортно-упаковочный комплект, который утверждается компетентным органом. На объектах, предназначенных только для хранения, важно иметь в наличии средства для перегрузки топлива в транспортно-упаковочный контейнер, с тем чтобы перейти к следующему этапу процесса обращения с ним (переправке в другое хранилище, на перерабатывающий завод либо на пункт захоронения). Этими средствами могут быть горячая камера или система мокрой или сухой перегрузки для загрузки топлива без пеналов или в пеналах.

В случае горизонтальной системы хранения герметичный металлический пенал извлекается из горизонтальной системы хранения и помещается в металлический передаточный контейнер. Затем этот контейнер перевозится в здание реактора или на перегрузочную станцию для перемещения топлива в транспортно-упаковочный контейнер или ДЦК. В случае бункеров (вертикальной системы хранения) на хранилище может потребоваться временно доставить кран, чтобы выполнить вертикальный подъем для переноса пенала в металлический передаточный контейнер. Затем этот контейнер в горизонтальном положении перевозится в здание реактора или на перегрузочную станцию для перемещения топлива в транспортно-упаковочный контейнер или ДЦК.

Если здание реактора выведено из эксплуатации, на месте хранения должна находиться автономная перегрузочная станция (горячая камера, контейнерно-трейлерный терминал) для перемещения топлива в транспортно-упаковочный контейнер или ДЦК.

6.2. ТРАНСПОРТИРОВКА ДВУХЦЕЛЕВЫХ СИСТЕМ

6.2.1. Общие соображения

Смысл использования ДЦК состоит в том, что они являются средством безопасного хранения отработавшего топлива в контейнере и что вместе с отработавшим топливом они представляют собой упаковку, которую также можно транспортировать [57].

Этот стратегический подход предполагает решение таких вопросов, как демонстрация соответствия правилам безопасности перевозки на момент отгрузки. Как уже говорилось, сертификаты на конструкцию упаковки и

лицензии на хранение действуют в течение разных сроков, и актуализация обоих документов важна для обеспечения возможности транспортировки в будущем. Получить одобрение конструкции упаковки для старого и уже загруженного транспортно-упаковочного контейнера в более позднее время может быть очень сложно из-за необходимости проведения инспекций в труднодоступных или недоступных местах.

В публикации МАГАТЭ № SSR-6 (Rev. 1) [50] указаны следующие моменты, которые должны учитываться при «перевозке после хранения» ДЦК:

503 (e): «для упаковок, предназначенных для перевозки после хранения, должно обеспечиваться, чтобы все компоненты упаковочного комплекта и радиоактивное содержимое поддерживались во время хранения в таком состоянии, чтобы это соответствовало всем требованиям, установленным в соответствующих положениях настоящих Правил и в применимых сертификатах об утверждении»;

809 (f): «если упаковка будет использоваться для перевозки после хранения, [заявка на утверждение должна включать] обоснование соображений по поводу механизмов старения в анализе безопасности и в рамках предлагаемых инструкций по эксплуатации и обслуживанию»;

809 (k): «для упаковок, которые будут использоваться для перевозки после хранения, [заявка на утверждение должна включать] программу сравнительного анализа, в которой описывается систематическая процедура периодической оценки изменений в нормативных положениях, изменений в технических знаниях и изменений в состоянии конструкции упаковки во время хранения».

В большинстве случаев фактором, ограничивающим загрузку ДЦК, является тепловая нагрузка системы, а не количество тепловыделяющих сборок. Это означает, что одно только количество размещаемых тепловыделяющих сборок не является показателем наиболее экономичного варианта ДЦК для данного запаса; необходимо найти правильное сочетание допустимой тепловой нагрузки с количеством размещаемых сборок. Как показано в таблице 3, транспортно-упаковочные контейнеры часто выпускаются в различных конфигурациях в зависимости от конкретного топлива, которое требуется загрузить. Используя разные корзины для хранения, существующие для многих конструкций, можно регулировать емкость с учетом фактических потребностей. На рис. 53 показан пример ДЦК в конфигурации на этапе транспортировки а) и на этапе хранения б).

ТАБЛИЦА 3. ПРИМЕРЫ ЕМКОСТИ ДЦК ДЛЯ РАЗНЫХ ТИПОВ ТОПЛИВА

Контейнер	Тип топлива	Кол-во тепловыделяющих сборок	Допустимая тепловая нагрузка (кВт)
CASTOR V/52	BWR	52	40
ENUN 52B	BWR	52	13 ^a
HI-STAR 80	BWR	32	54
HTZ 52B	BWR	52	12,8 ^a
TN 24BH	BWR	69	35
HI-STAR 63	CANDU	120	0,75
OPG DSC ^b	CANDU	384	2,5
CASTOR GEO	PWR	32	40
ENUN 32P	PWR	32	36
HI-STAR 180	PWR	37	32
TN 24G	PWR	37	30
ТУК-109	РБМК	144 ^c	7,8/5 ^c
ТУК-137T.A1	ВВЭР	18	21,6
ТУК-137T.E	ВВЭР	18	30
ТУК-151	ВВЭР	18	36
CASTOR 440/84	ВВЭР	84	22,6 ^a

^a Рассчитан на низкую тепловую нагрузку согласно требованию клиента.

^b Контейнер сухого хранения.

^c Стандартные/нестандартные пучки твэлов.

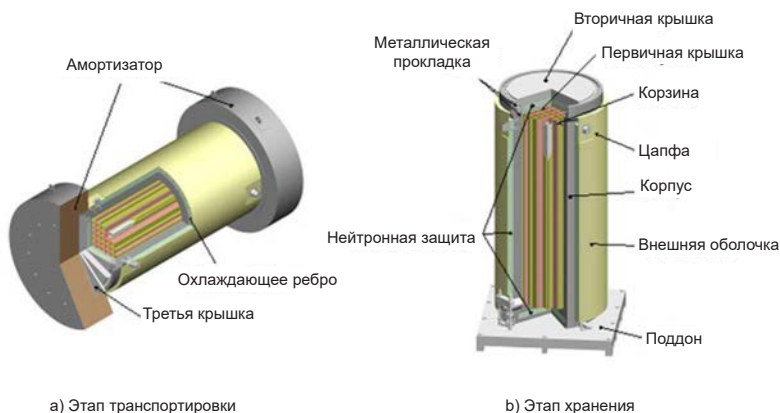


РИС. 53. Пример ДЦК в конфигурации на а) этапе транспортировки (~130 т) и б) этапе хранения (~120 т). Длина ДЦК («Хитати-Дженерал электрик») составляет около 5,4 м, внешний диаметр — около 2,5 м. Допускается загрузка 69 тепловыделяющих сборок BWR.

6.2.2. Эксплуатационные аспекты перевозки после хранения

Одна из основных функций ДЦК — обеспечение транспортабельности после хранения. В нижеследующих подразделах подробно описаны примеры инспекций перед перевозкой, последовательность процедуры лицензирования и т.д.

6.2.2.1. Инспекция перед перевозкой после периода хранения

Транспортировка после хранения требует комбинации инспекции и оценки упаковки ДЦК, которая часто включает в себя, среди прочего:

- внешний вид (проверку на коррозию, разрушение уплотнительного материала);
- герметичность с учетом регулирующих требований к транспортировке (подлежит измерению);
- мощность дозы с учетом пределов, установленных в регулирующих требованиях к транспортировке (подлежит измерению);
- подкритичность (проверку документации и отчетов ПУС);
- температуру внешней поверхности (подлежит измерению);
- подъемную способность (проверку цапф и точек крепления);
- состояние содержимого (проверку документации и отчетов ПУС);

- загрязнение поверхности с учетом пределов, установленных в регулирующих требованиях к транспортировке (подлежит измерению);
- данные об условиях хранения, подтверждающие соблюдение условий хранения (проверку документации).

Разрешение на транспортную упаковку ДЦК обычно обновляется каждые пять лет во время хранения. Поскольку провести инспекцию после загрузки затруднительно, в документации по безопасности конструкции упаковки (ДБКУ) обосновываются приемлемые характеристики упаковки без необходимости вскрывать контейнер²¹. ДЦК, одобренный компетентным органом, должен иметь действующий сертификат об утверждении конструкции транспортной упаковки, чтобы его можно было перевозить по дорогам общего пользования по окончании срока хранения. Время, отведенное на выполнение любого требуемого анализа и процедуры утверждения, должно включать в себя время, необходимое для извлечения ДЦК из хранилища, если заявка на продление разрешенного срока хранения не будет одобрена.

Важно наладить процесс, который будет служить постоянным механизмом, гарантирующим учет всех аспектов, а именно:

- количества ДЦК в хранилище;
- времени, необходимого для закупки амортизаторов и средств для транспортировки, таких как подъемное оборудование, транспортные рамы, трейлеры, железнодорожные вагоны и инспекционное оборудование, с учетом того, что некоторые из этих средств могут изготавливаться на заказ;
- необходимого обучения персонала;
- времени, необходимого для перемещения всех ДЦК в другое место;
- ограничений, связанных с пропускной способностью транспортной инфраструктуры, маршрутами или принимающим объектом;
- необходимых консультаций с заинтересованными сторонами.

6.2.2.2. Пример концепции альтернативных инспекций

В Японии консультативные рабочие группы при правительстве выступили с предложением о проведении альтернативных инспекций для подтверждения транспортабельности после хранения без необходимости

²¹ Этот подход также дает возможность поддерживать радиационное облучение работников на уровне ALARA вместо того облучения, которое они получили бы при вскрытии ДЦК для проверки.

открывать крышку транспортно-упаковочного контейнера, которые могут быть включены в процедуру утверждения транспортной упаковки ДЦК [58]. В сочетании с оценкой управления старением они призваны дать гарантию того, что упаковка ДЦК может безопасно транспортироваться без инспекции внутренней части контейнера, которую невозможно провести на загруженном контейнере без специальной горячей камеры. Все это будет частью ДБКУ, представляемой для получения сертификата об утверждении конструкции упаковки для транспортировки и хранения.

Описанная ниже инспекция на предмет подкритичности может служить альтернативой интрузивному методу инспекции во время проверок перед отгрузкой при условии, если компетентный орган примет и одобрит эту процедуру и если будут приняты во внимание механизмы старения и деградации, о которых говорится в разделе 5.

Есть достаточно веские основания утверждать, что не произошло значительного ухудшения функции безопасности по критичности, если может быть подтверждено следующее:

- корзина изготовлена по спецификациям, указанным в ДБКУ;
- по окончании загрузки из контейнера была удалена влага и он был заполнен инертным газом в соответствии с требованиями ДБКУ;
- упаковки ДЦК соответствуют ДБКУ, указанной в сертификате об утверждении конструкции упаковки;
- было обеспечено сохранение материала, поглощающего нейтроны, в инертной атмосфере во время хранения;
- в течение всего периода хранения состояние хранилища и соответствующая среда и условия хранения ДЦК поддерживались в пределах, указанных в отчете по обоснованию безопасности.

В некоторых случаях компетентный орган может утвердить документы, подтверждающие справедливость вышеуказанных утверждений.

7. ВОПРОСЫ ФИЗИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТИ И ГАРАНТИЙ

МАГАТЭ опубликовало большой свод руководящих материалов по вопросам физической безопасности хранения отработавшего топлива и применения гарантий в этой области. В нижеследующем разделе резюмируется наиболее важная информация. Для получения более

подробных сведений просьба обращаться к справочным материалам, упоминаемым в тексте.

7.1. ФИЗИЧЕСКАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ И ФИЗИЧЕСКАЯ ЗАЩИТА

В силу своего радиоактивного характера и проблем с возникновением критичности ОЯТ считается мишенью для возможных сценариев посягательства, которые включают как несанкционированное изъятие, так и диверсии. Такие сценарии посягательства могут воплощаться в жизнь различными источниками угроз, имеющими разные мотивы, намерения и возможности, что приводит к целому ряду потенциальных последствий, зависящих от характеристик хранилища, а также от любых действий по ликвидации последствий такого посягательства.

Сценарии, предполагающие несанкционированное изъятие ОЯТ, связаны в первую очередь с его использованием для создания ядерного взрывного устройства или радиологического диспергирующего устройства. Сценарии диверсии в отношении отработавшего топлива в «мокрое» хранилище связаны с потерей воды бассейна, выполняющей функции охлаждения и защиты. Диверсии в отношении бассейнов выдержки отработавшего топлива, содержащих недавно выгруженное топливо, могут повлечь за собой тяжелые радиологические последствия и иметь серьезный детерминированный эффект для здоровья людей за пределами площадки. Спустя некоторое время остаточное тепловыделение может значительно снизиться за счет распада очень короткоживущих радионуклидов, но отработавшее топливо будет по-прежнему нуждаться в активном охлаждении, и диверсионные действия с ним могут привести к получению людьми за пределами площадки таких доз облучения, которые потребуют принятия срочных защитных мер.

Объекты, используемые для хранения, переработки, захоронения ОЯТ и обращения с ним, нуждаются в соответствующем уровне физической защиты, поскольку возможные сценарии посягательства на хранилища ОЯТ (несанкционированное изъятие, а также диверсия) могут иметь недопустимо высокие радиологические последствия и серьезный детерминированный эффект для здоровья людей как на площадке, так и за ее пределами.

Введение систем и мер физической безопасности требует применения дифференцированного подхода, учитывающего общий объем радиоактивного материала, легкость, с которой этот материал может быть рассеян, изначальный риск возникновения критичности и историю облучения топлива на объекте.

Как указывается в публикациях Серии изданий по физической ядерной безопасности [59–61], система физической безопасности должна представлять собой тщательно выверенное сочетание оборудования, персонала, процедур и политики. Среди прочего, системы физической безопасности могут включать в себя следующее:

- технологические меры, такие как центральные станции тревожной сигнализации, системы обнаружения и оценки проникновения, барьеры, системы связи и поисковые системы;
- меры физической безопасности, имеющие отношение к персоналу, которые связаны с контролем доступа к различным зонам безопасности и чувствительной информации, а также программы уменьшения инсайдерских угроз.

Меры физической безопасности должны применяться на основе дифференцированного подхода, следующего принципам глубокоэшелонированной защиты и сбалансированной защиты, как это рекомендовано в публикациях Серии изданий по физической ядерной безопасности [59–61].

7.2. ГАРАНТИИ И ПОДОТЧЕТНОСТЬ

В настоящем разделе представлен обзор подходов МАГАТЭ к применению гарантий и примеры практического опыта государств-членов в области осуществления гарантий.

7.2.1. Учет гарантий при проектировании и эксплуатации хранилища

МАГАТЭ применяет комплекс технических мер, или «гарантий», для независимой проверки выполнения юридического обязательства государства не переключать ядерный материал с мирной ядерной деятельности. Гарантии служат важной мерой укрепления доверия, при помощи которой государство-член может продемонстрировать, а другие государства-члены могут удостовериться в том, что ядерные материалы и технологии по-прежнему используются в мирных целях [62].

Если говорить в целом, то деятельность по гарантиям имеет целью проверку заявлений государства-члена в соответствии с соглашением о

гарантиях, заключенным этим государством-членом с МАГАТЭ. Существует три типа соглашений [62]:

- соглашения о всеобъемлющих гарантиях, заключенные с государствами — участниками Договора о нераспространении ядерного оружия, не обладающими ядерным оружием, и государствами — участниками региональных договоров о зонах, свободных от ядерного оружия;
- соглашения о гарантиях в отношении конкретных предметов, в настоящее время осуществляемые в трех государствах, которые не являются участниками Договора о нераспространении ядерного оружия, но взяли на себя обязательство не использовать ядерные материалы, установки или другие предметы, подпадающие под действие соглашения, для производства ядерного оружия;
- соглашения о добровольной постановке под гарантии с пятью государствами, обладающими ядерным оружием.

Ниже приводятся некоторые примеры деятельности по проверке гарантий.

- Проверка информации о конструкции. МАГАТЭ может проверить информацию о конструкции до начала строительства установки, а также проводить физический осмотр на месте на протяжении всего строительства и последующих этапов жизненного цикла установки.
- Проверка инвентарных количеств и движения ядерного материала. МАГАТЭ оценивает архивы и документацию установки на предмет соответствия данным в докладах, представленных государством. После проведения оператором инвентаризации на установке МАГАТЭ проводит проверку фактически наличного количества, чтобы сравнить результаты с данными учета. Деятельность по проверке данных учета дополняется деятельностью в области наблюдения, сохранения и мониторинга; она служит дополнительным средством обнаружения доступа к ядерному материалу или его незаявленного перемещения.

Независимо от того, рассматривается ли отработавшее топливо как сырье для регенерации или как отходы для захоронения, с точки зрения гарантий оно считается «материалом прямого использования», которому уделяется больше внимания, чем свежему топливу.

Поскольку отработавшее топливо относительно сложно и дорого в обращении по сравнению со свежим топливом, переход между этапами обращения с отработавшим топливом можно рассматривать как

одностороннее движение материала. С точки зрения гарантий МАГАТЭ каждый из различных этапов обращения с отработавшим топливом рассматривается как разная зона баланса материала, чтобы можно было поддерживать непрерывность поступления информации. Из-за возможности разборки и, следовательно, более легкого переключения места, используемые для переупаковки и сопутствующих работ (например, горячие камеры), вызывают больше опасений в плане соблюдения гарантий, чем места хранения и залы перегрузки.

Проблемы с выработкой подхода к применению гарантий в отношении отработавшего топлива включают:

- составление планов отбора статистически значимых проб;
- выполнение измерений методом неразрушающего анализа;
- проектирование автономных систем контроля за соблюдением гарантий.

В этих подходах может учитываться намерение оператора свести к минимуму операции с отработавшим топливом и его перемещение. В гарантиях есть ряд элементов, которые представляют особый интерес для обращения с отработавшим топливом, в том числе перечисленные ниже.

- Непрерывное инспектирование: поддержание непрерывности поступления информации об инвентарном количестве и движении материала путем наблюдения за ключевыми операциями, регистрации и проверки данных.
- Одиночная система сохранения и наблюдения: конфигурация, в которой возможные пути переключения перекрыты с использованием устройства, официально разрешенного МАГАТЭ, с установленными процедурами оценки результатов, полученных с помощью этого устройства.
- Двойная система сохранения и наблюдения: конфигурация, описанная выше, но имеющая как минимум две системы, функционирующие на основе разных технологий.
- Труднодоступность: определение, выносимое заместителем Генерального директора МАГАТЭ по гарантиям. Оно может быть запрошено для мест хранения, устроенных таким образом, чтобы было трудно получить доступ к содержимому и в то же время легко обнаружить попытки доступа. Для вынесения такого определения важно, чтобы проверка МАГАТЭ была проведена уже на начальных этапах строительства.

- Учет в режиме времени, близком к реальному: форма учета ядерного материала, при которой данные собираются оператором установки и предоставляются МАГАТЭ в режиме времени, близком к реальному.
- Почтовый ящик для информирования об инвентарном количестве: место, где оператор установки может делать заявления об инвентарном количестве или изменениях в нем, которые не могут быть отозваны и которые регулярно регистрируются по дате и времени поступления; это средство часто используется в сочетании с учетом в режиме времени, близком к реальному.
- Инспекция на случайной основе с краткосрочным уведомлением: проверки, проводимые с краткосрочным уведомлением и в случайно выбранный момент времени.
- Совместное использование оборудования: оборудование для целей гарантий, которое может использоваться как МАГАТЭ, так и государственной структурой, если может быть обеспечена независимость измерений. Такой порядок имеет целью сокращение объема ресурсов, необходимых для обеспечения деятельности по проверке.

Гарантии МАГАТЭ будут и далее развиваться для решения задач, связанных с проверкой. В настоящее время ведутся активные исследования и разработки, направленные на совершенствование методов проверки ядерного материала в отработавшем топливе.

Один из способов решения этих задач состоит в том, чтобы принять во внимание требования к соблюдению гарантий на этапе проектирования нового объекта при помощи такого механизма, как учет требований гарантий при проектировании [63]. При проектировании нового хранилища благодаря учету требований гарантий на ранней стадии процесса можно минимизировать риски отхода от первоначальных планов выполнения работ, графика и бюджета и облегчить интеграцию с другими аспектами проектирования, такими как эксплуатация, ядерная и физическая безопасность. Учет требований гарантий при проектировании — это добровольный процесс, который побуждает к тому, чтобы принять в расчет соображения гарантий уже на ранних стадиях проектирования и строительства новых объектов. Благодаря такому подходу инфраструктура объекта может быть сделана достаточно гибкой, для того чтобы не только обеспечивать соблюдение текущих требований гарантий, но и учитывать нововведения с течением времени. Подход, который способен учитывать изменения, позволяет использовать новые альтернативы по мере их появления или по мере устаревания прежних систем.

7.2.2. Практический опыт применения гарантий

В данном разделе описывается некоторый опыт операторов в области применения гарантий на разнотипных хранилищах отработавшего топлива в различных государствах-членах.

7.2.2.1. Япония (системы сухого хранения)

В Японии «сухие» контейнерные хранилища работают на АЭС «Фукусима-дайити» (ТЕПКО) и на энергоблоке № 2 АЭС «Токай» (ДЖАПК). Ниже описывается опыт применения гарантий на этих станциях.

а) ТЕПКО

На АЭС «Фукусима-дайити» имелось шесть энергетических реакторов BWR, которые были остановлены после землетрясения и вызванного им цунами в 2011 году. Отработавшее топливо в общем хранилище отработавшего топлива, первоначально поступавшее из приреакторных бассейнов, с 2013 года постепенно переправлялось в зону временного хранения в контейнерах на площадке. По состоянию на июнь 2018 года в зоне временного хранения контейнеров находилось 33 металлических контейнера.

Инспекции МАГАТЭ по гарантиям проводились дважды для каждого контейнера при перемещении отработавшего топлива из бассейна в зону временного хранения контейнеров. Во время первой инспекции на общем хранилище отработавшего топлива с помощью подводной камеры были подтверждены количество и тип отработавших тепловыделяющих сборок в контейнерах. После подтверждения отработавшие тепловыделяющие сборки были на случайной основе проверены цифровым устройством для наблюдения излучения Черенкова. Вторая инспекция включала в себя установку пломб на вторичную крышку контейнеров. Кроме того, раз в год проводятся инспекции МАГАТЭ по проверке инвентарного количества с целью подтверждения количества контейнеров, подтверждения наличия пломб, выбранных на случайной основе, замены пломб, выбранных на случайной основе, и проверки информации о конструкции в зоне временного хранения контейнеров.

б) ДЖАПК

BWR на энергоблоке № 2 АЭС «Токай» был остановлен после землетрясения в 2011 году. Внутриобъектовое «сухое» хранилище

контейнерного типа продолжает функционировать, и по состоянию на июнь 2018 года в нем находился 21 контейнер сухого хранения.

Раз в год в хранилище проводятся инспекции МАГАТЭ по гарантиям. Ключевой момент этих инспекций — подтверждение неподвижности хранящихся контейнеров. МАГАТЭ установило на контейнеры пломбы с индикацией вмешательства; контейнеры сухого хранения невозможно передвинуть или открыть, не сорвав пломбу. Пломбам было уделено особое внимание при очистке зоны хранения контейнеров от пыли во время эксплуатации. Некоторые пломбы были на случайной основе проверены и заменены МАГАТЭ.

7.2.2.2. Испания (системы сухого хранения)

На PWR АЭС «Хосе Кабрера» устроено ВР-ПР хранилище, в котором находятся 12 систем HI-STORM, содержащих в общей сложности 377 тепловыделяющих сборок (26 из них классифицируются как поврежденные), что эквивалентно инвентарному количеству отработавшего топлива, произведенного на данной электростанции, в 100 тТМ. Каждая система HI-STORM состоит из наружного контейнера из бетона со стальной обечайкой, в который помещен герметизированный сваркой пенал для хранения до 32 тепловыделяющих сборок с выгоранием до 45 ГВт·сут/тТМ и охлаждением в течение минимум трех лет.

С целью соблюдения регулирующих положений раз в год проводится инспекция Евратома²²/МАГАТЭ для проверки инвентарного количества материала и подтверждения количества контейнеров. Во время этих инспекций на случайной основе проводится проверка пломб на контейнерах и некоторые случайно выбранные металлические пломбы заменяются. Также могут быть заменены оптические пломбы, если будет обнаружено их повреждение. На контейнерах имеются два типа гарантийных пломб, установленных Евратомом и МАГАТЭ:

- пломбы, гарантирующие неподвижность хранящихся контейнеров;
- пломбы, подтверждающие содержимое контейнеров.

МАГАТЭ также проводит инспекции пунктов промежуточного хранения отработавшего топлива на случайной основе с краткосрочным уведомлением (48 часов), чтобы удостовериться в отсутствии

²² Евратом, Европейское сообщество по атомной энергии, — это региональный орган по гарантиям, который выполняет роль национального органа по гарантиям для стран ЕС, подписавших Договор о Евратоме.

изменений на объектах или в учетных документах. К концу 2019 года на АЭС «Хосе Кабрера» было проведено три инспекции такого типа (2014, 2015, 2019 годы).

Наряду с системами хранения отработавшего топлива, в ВР-ПП хранилище АЭС «Хосе Кабрера» имеются четыре системы HI-SAFE, в которых хранятся высокоактивные отходы, полученные из демонтированных внутрикорпусных устройств реактора (в испанских нормативных положениях они определяются как «специальные отходы», аналогичные отходам выше класса С (GTCC) по классификации радиоактивных отходов США). Эти системы HI-SAFE являются разновидностью систем HI-STORM, адаптированной для этого типа отходов, и в данном случае они не подпадают под действие гарантий.

В отношении централизованного хранилища (ЦХ) отработавшего топлива и высокоактивных отходов, которое проектируется в настоящее время, испанская Национальная компания по обращению с радиоактивными отходами («Энреса») реализует концепцию учета требований гарантий при проектировании, следуя международным рекомендациям МАГАТЭ и Евратома. В основе этого подхода лежит принцип, согласно которому требования и цели гарантий полностью интегрируются в процесс проектирования хранилища. В связи с этим в июле 2014 года «Энреса» представила в Евратом основные технические характеристики объекта.

7.2.2.3. Швеция (система мокрого хранения)

В системе контроля гарантий в шведском хранилище КЛАБ (WS1M) предусмотрены ключевые точки измерения (КТИ) для определения движения ядерных материалов и инвентарного количества. Для мониторинга движения ядерного материала применяются две КТИ:

- КТИ 1 — прием, для ввоза на объект;
- КТИ 2 — отправление, для вывоза с объекта.

Для определения фактически наличного количества используются четыре КТИ:

- КТИ А — топливо или остатки топлива в бассейнах выдержки;
- КТИ В — топливо или остатки топлива в приемных бассейнах;
- КТИ С — «сухие» зоны приема;
- КТИ D — другие места расположения ядерного материала на установке.

Ядерный материал, хранящийся в КЛАБ, представлен твэлами и остатками топлива, которые после ввоза помещаются в стеллажи для хранения. После заполнения стеллажи перемещаются в зал хранения.

В КЛАБ проводятся физические инспекции в соответствии с режимом гарантий МАГАТЭ, и эти инспекции бывают двух типов. Первый тип — это проверка фактически наличного количества, которая проводится каждый календарный год с максимальным интервалом в 14 месяцев между инспекциями. Кроме того, каждый год проводится как минимум одна необъявленная инспекция. Во время инспекции КЛАБ, среди прочего, демонстрирует:

- изменения инвентарного количества со времени последней инспекции;
- места размещения запасов — в виде списка и на картах бассейна;
- вес ядерного вещества в разбивке по происхождению.

Что касается отчетности, то в КЛАБ существует несколько форм отчетности с разными требованиями к срокам представления каждой из них:

- все изменения инвентарного количества в течение трех рабочих дней, представляется в Шведское управление по радиационной безопасности;
- все изменения инвентарного количества на ежемесячной основе, представляется в Евратом;
- общее инвентарное количество и изменения в нем в течение года после завершения проверки фактически наличного количества, представляется в Евратом;
- составляемый в ноябре каждого года план на предстоящий год, представляется в Евратом;
- составляемый в январе каждого года отчет о состоянии японских стальных топливных ящиков, представляется в Евратом;
- составляемая в феврале каждого года сводка информации о проекте строительства и обо всех новых или снесенных зданиях, представляется в Шведское управление по радиационной безопасности.

8. ЭКОНОМИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ХРАНЕНИЯ ОТРАБОТАВШЕГО ТОПЛИВА

Нижеследующий раздел представляет собой краткое изложение информации, которую можно найти в руководстве Серии изданий по ядерной энергии «Costing of Spent Fuel Storage» («Расчет стоимости

хранения отработавшего топлива» [64]. Другие исследования по тематике оценки затрат, проведенные Агентством по ядерной энергии Организации экономического сотрудничества и развития (АЯЭ), описаны в [65, 66].

8.1. КАТЕГОРИИ И КОМПОНЕНТЫ ЗАТРАТ

Создание хранилища отработавшего топлива осуществляется в несколько этапов, охватывающих жизненный цикл проекта, как показано на рис. 54.

Для хранилища отработавшего топлива основными категориями связанных с ним затрат, которые будут понесены в течение жизненного цикла, являются капитальные затраты, затраты на эксплуатацию и техническое обслуживание, затраты на дезактивацию и вывод из эксплуатации, затраты на перевозку отработавшего топлива на хранение и/или захоронение и затраты на непредвиденные эксплуатационные ситуации.

8.1.1. Капитальные затраты

Капитальные затраты — это расходы, понесенные во время проектирования, строительства и лицензирования хранилища. Они будут варьироваться в зависимости от различных факторов, таких как выбранная технология, график выполнения проекта и чувствительные социальные или политические моменты, возникающие в процессе лицензирования. Предполагается, что капитальные затраты будут произведены до начала использования хранилища.

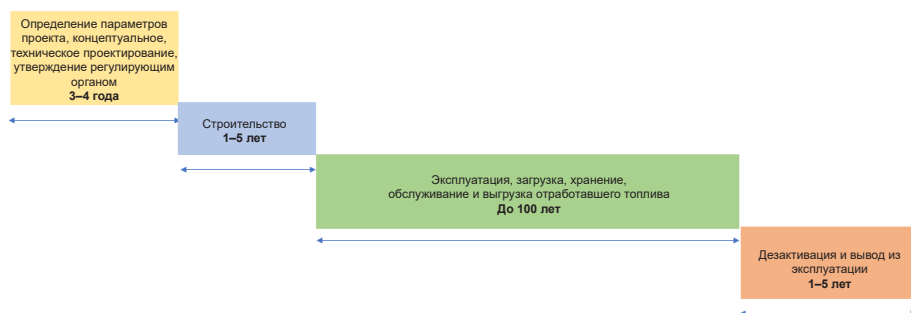


РИС. 54. Этапы жизненного цикла хранилища отработавшего топлива.

8.1.2. Затраты на эксплуатацию и техническое обслуживание

Затраты на эксплуатацию и техническое обслуживание производятся в течение всего срока службы хранилища. Они зависят от выбранной технологии и могут сильно различаться в зависимости от того, управляются ли системы хранения при помощи пассивных или активных средств.

8.1.3. Затраты на дезактивацию и вывод из эксплуатации

Необходимо оценить затраты на дезактивацию и вывод из эксплуатации хранилища по окончании срока его службы. Опять же, эти затраты могут сильно варьироваться в зависимости от применяемой технологии хранения. Конструктивные особенности конкретной системы хранения должны предусматривать возможность простого вывода из эксплуатации. Поскольку определить стоимость работ, которые будут проводиться спустя 50 или более лет в будущем, может быть практически невозможно, большинство регулирующих органов требуют периодического обновления (каждые 3–5 лет) плана вывода из эксплуатации и соответствующей сметы расходов, чтобы убедиться, что финансовых ресурсов будет достаточно.

8.1.4. Затраты на перевозку отработавшего топлива на хранение и/или захоронение

В определенный момент времени отработавшее топливо потребуется вывезти с площадки для захоронения. Поэтому стоимость вывоза с площадки может повлиять на тип выбираемого объекта за пределами площадки, а также на его местоположение и инфраструктуру. Опять же, эти затраты трудно рассчитать с большей или меньшей точностью, если они оцениваются более чем на 50 лет вперед.

8.1.5. Затраты, связанные с непредвиденными эксплуатационными ситуациями

Можно оценить затраты, связанные с возможными задержками в графике и задержками с увеличением емкости хранилища, изменениями в регулирующих положениях, требованиями физической безопасности или внедрением технологических новшеств в области топливного цикла (например, инновационных видов топлива). Чтобы учесть эти неопределенности, можно применить модульный подход, позволяющий удовлетворить насущные потребности и обеспечивающий гибкость на будущее. Кроме того, могут существовать неопределенности в отношении

будущих работ по техническому обслуживанию или ремонту. Хотя спрогнозировать эти затраты, когда неясны ни сроки, ни объемы работ, может быть сложно, планирование на случай непредвиденных ситуаций может стать фактором, позволяющим сделать выбор между конкретными технологиями, поэтому оценка должна выполняться как часть процесса принятия решений.

8.2. ФАКТОРЫ, ВЛИЯЮЩИЕ НА ЗАТРАТЫ И ЭКОНОМИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ

Требования и спецификации хранилища отработавшего топлива повлияют на выбор технологии и сопутствующие расходы.

8.2.1. Технические факторы

Ниже перечислены параметры, которые оказывают наиболее существенное влияние на стоимость хранилищ отработавшего топлива.

8.2.1.1. Характеристики отработавшего топлива

Нижеследующие характеристики отработавшего топлива являются ключевыми факторами, определяющими безопасность хранения, и оказывают наиболее значительное влияние на стоимость проектирования и эксплуатации хранилища:

- тип топлива;
- начальное обогащение (содержание делящегося материала);
- глубина выгорания;
- тепловая нагрузка;
- набор радионуклидов;
- физическая целостность.

8.2.1.2. Функциональные факторы

Помимо факторов, напрямую связанных с характеристиками отработавшего топлива, которое помещается в хранилище, существуют функциональные факторы, которые необходимо принимать во внимание.

Одним из таких факторов является эффект масштаба. Распределение фиксированных затрат по проекту на большое количество единиц приводит к снижению фиксированных затрат в расчете на одну единицу, в то время

как периодические затраты, связанные с каждой единицей, остаются неизменными. Существует ряд соображений, которые необходимо учитывать при определении влияния эффекта масштаба на общую стоимость системы хранения. Как правило, наибольшую выгоду эффект масштаба приносит системам с более высокими фиксированными капитальными затратами. Можно обобщенно сказать, что системы с высокими фиксированными капитальными затратами (такие как бассейны и здания «сухих» хранилищ), как правило, должны хранить большие объемы отработавшего топлива (например, > 600 тТМ), чтобы быть экономически рентабельными, при отсутствии других технических ограничений.

Родственным фактором является модульность: меньшие по размеру модульные системы, такие как транспортно-упаковочные контейнеры, позволяют распределить капитальные затраты во времени, тогда как строительство бассейна требует больших начальных капиталовложений, что выгодно, если объемы финансирования ограничены. Модульный подход также может обеспечить гибкость в будущем.

Еще одним фактором является транспортабельность системы. Двухцелевые и многоцелевые системы дают преимущества в плане сокращения объема операций с отработавшим топливом, минимизации связанного с ними риска для безопасности и уменьшения проблем с переходом от одного вида деятельности к другому в рамках системы обращения с отработавшим топливом. С финансовой точки зрения эти системы зачастую дороже, чем узкоспециальные контейнеры для хранения, и их может быть сложнее проектировать и лицензировать. Может возникнуть риск, связанный с возможностью транспортировки таких упаковок после длительного хранения, для чего потребуются длительный мониторинг и техническое обслуживание, а также возможная переупаковка на более позднем этапе, что приведет к потере операционных преимуществ и неоправданному росту расходов.

8.2.1.3. Условные факторы

Нижеследующие факторы имеют отношение к предполагаемой(ым) площадке(ам) для хранения, а также к условиям и требованиям, которые необходимо оценить:

- стоимость площадки, ее подготовка и обустройство;
- экологические условия;
- воздействие на окружающую среду;
- инфраструктура для доступа на площадку;
- последствия с точки зрения физической безопасности.

Последствия с точки зрения затрат будут неодинаковыми для ВР-ПР хранилищ отработавшего топлива и ВР-ВП хранилищ, которые являются полностью автономными.

8.2.1.4. Программа и сроки реализации проекта

С учетом времени, необходимого для проектирования и лицензирования нового хранилища, сроки реализации проекта могут частично повлиять на выбор технологии. Создание хранилища такого типа, который уже существует в стране и, следовательно, уже знаком регулирующему органу, обычно сопровождается меньшими задержками, чем разработка совершенно нового проекта. Процесс лицензирования обычно бывает более длительным, чем строительство, и связанные с ним расходы могут быть значительными, поэтому о его финансировании следует позаботиться заранее.

8.2.2. Другие факторы

Помимо технических факторов, существуют и другие факторы, влияющие на стоимость и экономические аспекты хранения отработавшего топлива:

- технические знания, то, является ли система первой в своем роде или широко распространена;
- стратегия закупок и заключения контрактов;
- социальные и политические факторы;
- институциональные проблемы долгосрочного плана;
- риски и неопределенности;
- доступность строительной и производственной базы;
- будущая инфляция и обменный курс;
- аспекты физической безопасности;
- стратегия и время принятия окончательного решения об отработавшем топливе.

8.3. ФИНАНСИРОВАНИЕ

Средства для финансирования хранения отработавшего топлива, а также демонтажа и вывода из эксплуатации АЭС, захоронения отработавшего топлива и ВАО должны собираться в то время, пока реакторы приносят доход. Обычно это делается путем взимания налога с тарифов на

электроэнергию, который собирается и инвестируется в эти конкретные виды деятельности. Этот механизм должен быть создан как можно скорее, чтобы облегчить сбор средств, как только реактор будет подключен к сети. Точный метод сбора средств зависит от энергопредприятия или страны и их конкретной бизнес-модели. Существует три метода финансирования:

- финансирование энергопредприятием: энергопредприятие собирает средства в течение всего периода эксплуатации;
- государственное финансирование: средства могут быть получены либо от энергопредприятий, либо за счет налоговых поступлений;
- коммерческое финансирование: иная компания, помимо энергопредприятия, может финансировать работу хранилища за счет собственных или заемных средств и взимать плату с энергопредприятий за свои услуги; энергопредприятия могут взимать эту плату с потребителя.

Поскольку обращение с отработавшим топливом вплоть до момента его захоронения — это задача на длительную перспективу, важно принять меры к тому, чтобы стоимость собранных средств не обесценилась со временем (100-летний срок); существуют различные варианты сохранения реальной стоимости средств.

9. ОЖИДАЕМЫЕ В БУДУЩЕМ ТЕНДЕНЦИИ В ОБЛАСТИ ХРАНЕНИЯ

При планировании и проектировании будущих систем и оборудования для хранения необходимо учитывать эволюционные процессы в области хранения отработавшего топлива. Речь идет о тенденциях к увеличению глубины выгорания, интеграции в проекты систем хранения требований к хранению, транспортировке и захоронению (если они уже имеются на стадии проектирования), непосредственному учету требований гарантий в проектах хранилищ отработавшего топлива, системах хранения и упаковке, использованию кредита выгорания или исключению замедлителя при демонстрации соблюдения требований подкритичности и признанию необходимости сохранять транспортабельность в течение продолжительных периодов хранения. Необходимо также принимать во внимание внедрение инновационных видов топлива и других новых видов топлива, связанных с созданием парка малых модульных реакторов.

До тех пор пока не будет найден способ утилизации отработавшего топлива с достаточными мощностями как для нынешних, так и для прогнозируемых запасов отработавшего топлива, будет невозможно определить объемы отработавшего топлива, нуждающегося в хранении, и продолжительность такого хранения. Будущие технологии, политика, требования и другие факторы, которые в настоящее время неизвестны, также повлияют на будущие проблемы и возможности в области обращения с отработавшим топливом²³.

С учетом вышеизложенного трудно сказать, к какому будущему следует готовиться. Кроме того, один из главных уроков прошлого состоит в том, что предположения относительно сроков, способов обращения и конечного состояния отработавшего топлива не стали реальностью. Это привело к необходимости переоценки и корректировки правил, лицензий и проектов. Таким образом, признание, принятие и прямой учет неопределенности в отношении будущей политики и наличия инфраструктуры является важной составляющей эффективного планирования, проектирования и регулирования будущих систем хранения отработавшего топлива. При планировании следует учитывать спектр возможных будущих сценариев. В публикации Серии изданий МАГАТЭ по ядерной энергии, № NF-T-3.3, «Хранение отработавшего топлива до отправки на переработку или захоронение» [10] приводится ряд замечаний и предложений по обеспечению безопасного, надежного и эффективного хранения в долгосрочной перспективе, например:

- безопасное, надежное и эффективное хранение отработавшего топлива позволяет свести к минимуму деградацию топлива и одновременно сохранить будущие варианты топливного цикла;
- за счет выбора площадки для хранения, типа хранилища и конструкции оборудования могут быть значительно уменьшены затраты и риски в долгосрочной перспективе;
- могут выбираться и разрабатываться различные схемы хранения отработавшего топлива с учетом неопределенных сроков хранения, что облегчит деятельность по управлению старением и обеспечит гибкость ввиду неопределенности будущих конечных точек, таких как переработка или захоронение;

²³ Будущие стратегии обращения с отработавшим топливом и его утилизации могут включать в себя внедрение новых схем регенерации или возможное создание хранилищ различных типов (например, пунктов скважинного захоронения или многонациональных хранилищ).

- создание нормативной базы регулирования облегчит продление сроков действия лицензий в интересах обеспечения безопасности в течение периодов хранения;
- преодоление трудностей, связанных с политическими системами и общественными взглядами и ценностями, оказалось сложной задачей;
- важным условием устойчивого обращения с отработавшим топливом является выработка ясной, последовательной и стабильной национальной политики и стратегий.

Приложение I

ПРИМЕРЫ НЕДАВНО РАЗРАБОТАННЫХ ПРОЕКТОВ ХРАНИЛИЩ

В первые два десятилетия XXI века было спроектировано, построено и введено в эксплуатацию большое количество новых хранилищ отработавшего топлива. В данном приложении описаны принципы, обоснование и конструктивные особенности семи хранилищ, которые на момент подготовки настоящей публикации находились на разных этапах создания в разных странах мира²⁴.

1.1. ЦЕНТРАЛИЗОВАННЫЙ ПУНКТ ПРОМЕЖУТОЧНОГО МОКРОГО ХРАНЕНИЯ ОТРАБОТАВШЕГО ТОПЛИВА, ФРАНЦИЯ

В Ла-Аг планируется создание централизованного пункта мокрого хранения отработавшего топлива в качестве промежуточного этапа между мокрым ПР хранением и переработкой.

Стратегия Франции в отношении отработавшего МОХ-топлива и обогащенного переработанного уранового топлива заключается в организации их безопасного хранения в ожидании будущей переработки и возможного использования в будущих реакторах, таких как реакторы поколения IV. Существует необходимость расширения мощностей для промежуточного хранения в связи с тем, что количество непереработанного отработавшего топлива с каждым годом немного увеличивается.

Чтобы разместить эти накопившиеся запасы, французская ядерно-энергетическая компания «Электрисите де Франс» (ЭДФ) в апреле 2017 года представила в Управление по ядерной безопасности комплект документации с вариантами обеспечения безопасности нового пункта мокрого хранения — централизованного промежуточного хранилища ЭДФ. Эта документация была оценена Управлением и его организацией научно-технической поддержки — Институтом радиационной защиты и ядерной безопасности (ИРСН). Французский консультативный комитет, отвечающий за безопасность установок топливного цикла, выпустил свои рекомендации и руководящие указания в январе 2019 года.

²⁴ Информация об этих хранилищах была предоставлена государствами-членами в период 2019–2021 годов.

1.1.1. Описание проекта

В соответствии с французской политикой в отношении топливного цикла был выбран вариант мокрого хранения. Сухое хранение было рассмотрено в качестве запасного варианта, чтобы компенсировать любые трудности, которые могут возникнуть до ввода бассейна в эксплуатацию.

Общая расчетная вместимость хранилища составляет 10 000 тМ, что эквивалентно примерно 21 000 отработавших тепловыделяющих сборок, в основном МОХ-топлива и обогащенного переработанного уранового топлива. Это хранилище — эскизный проект которого показан на рис. 55 — планируется эксплуатировать в течение примерно 100 лет, начиная с 2034 года.

Хранилище будет состоять из двух бассейнов с толщиной водного слоя, более чем в два раза превышающей длину отработавших тепловыделяющих сборок. Здание будет заглубленным, а строительство может носить модульный характер. Это хранилище должно выполнять четыре основные функции:

- прием упаковок с отработавшим топливом;
- подготовка контейнеров для отработавшего топлива и сухая разгрузка;
- хранение отработавшего топлива и извлечение из хранилища;
- охлаждение и очистка воды.

Основными конструктивными элементами являются два статических локализирующих барьера, дополненных динамической локализацией, которая обеспечивается системой ядерной вентиляции. Бетонная конструкция бассейна будет покрыта металлической облицовкой, и ниже уровня воды в ней не будет никаких отверстий. Подкритичность будет поддерживаться за счет контроля геометрии корзины и использования поглотителей нейтронов.

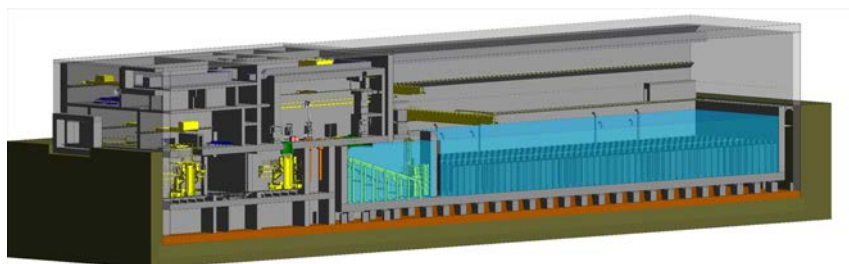


РИС. 55. Централизованный пункт промежуточного мокрого хранения отработавшего топлива во Франции (публикуется с разрешения «Электрисите де Франс»).

Отвод остаточного тепловыделения будет осуществляться системой охлаждения, в которой будут предусмотрены средства резервирования. Внешний локализирующий барьер будет спроектирован таким образом, чтобы обеспечить устойчивость к внешним воздействиям, землетрясениям, наводнению, изменениям климата, падению самолета и торнадо. Экстремальные внешние воздействия учтены в ЗУ.

I.1.2. Состояние хранилища

По состоянию на 2019 год это хранилище находилось на стадии проектирования, а ввод в эксплуатацию прогнозируется на 2034 год.

I.2. ПРОМЕЖУТОЧНОЕ ХРАНИЛИЩЕ ОТРАБОТАВШЕГО ТОПЛИВА В МУЦУ, ЯПОНИЯ

Промежуточное хранилище в Муцу, префектура Аомори, расположено в северной части главного острова Японии, управляется «Рисайклабл фьюэл сторидж компани» (РФС) и предназначено для хранения отработавшего топлива с АЭС, эксплуатируемых ТЕПКО и ДЖАПК. Расчетная вместимость хранилища составляет ~5000 т U отработавшего топлива с ежегодным размещением около 200–300 т U. После определенного периода хранения отработавшее топливо будет переправляться на перерабатывающий завод. Период хранения составляет 50 лет для каждого здания хранилища и 50 лет для каждого контейнера.

Национальная политика Японии предусматривает переработку отработавшего топлива для максимального использования ресурсов (с точки зрения регенерированного плутония) и уменьшения объема и радиотоксичности ВАО [67]. Увеличение вместимости хранилища отработавшего топлива позволяет гибко подходить к реализации этой политики при одновременном обеспечении безопасности.

I.2.1. Описание проекта

В конечном итоге «сухое» хранилище будет состоять из двух зданий, в которых будут храниться металлические ДЦК (рис. 56). Первое из этих зданий было рассчитано на 3000 т U (максимум 288 металлических контейнеров) и было построено так, как показано на рис. 56. Здание занимает площадь 131 м × 62 м и имеет высоту 28 м. После этого начнется строительство второго здания. Вместо того, чтобы перемещать ДЦК мостовым краном, они переправляются в зону хранения при помощи

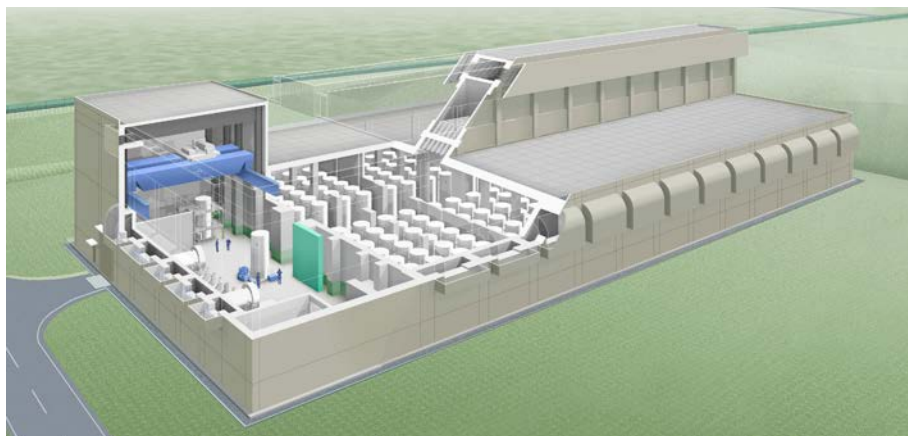


РИС. 56. Изображение хранилища контейнеров в Муцу (авторские права принадлежат РФС, 2019 год. Несанкционированное использование или воспроизведение этого изображения запрещено).

пневматического транспортера поддонов. Если говорить в целом, то к числу основных сооружений и оборудования в Муцу относятся:

- сооружения для приема, хранения и отправки отработавшего топлива;
- металлические контейнеры (ДЦК, вмещающие 69 тепловыделяющих сборок ВWR, диаметром 2,5 м и длиной 5,4 м);
- здание для хранения;
- транспортно-технологическое оборудование для контейнеров;
- дорога для транспортировки;
- административное здание.

Характеристики отработавшего топлива, которое будет храниться в Муцу, приведены в таблице 4. Обращение с контейнером с использованием макета показано на рис. 57.

1.2.2. Состояние хранилища

РФС подала заявку на получение разрешения на эксплуатацию центра РФС в марте 2007 года, и оно было выдано в мае 2010 года [68]. После этого, в июне 2010 года, была подана заявка на утверждение конструкции и методов строительства [69].

В декабре 2013 года для всех предприятий ядерного топливного цикла были введены в действие новые стандарты регулирования, учитывающие

ТАБЛИЦА 4. ХАРАКТЕРИСТИКИ ОТРАБОТАВШЕГО ТОПЛИВА, КОТОРОЕ БУДЕТ ХРАНИТЬСЯ В МУЦУ (ПУБЛИКУЕТСЯ С РАЗРЕШЕНИЯ ТЕПКО)

Тип топлива		Новый тип твэла 8 × 8	Новый тип твэла с циркониевой оболочкой 8 × 8	Твэл глубокого выгорания 8 × 8
Начальное обогащение		~3,1% по массе	~3,1% по массе	~3,7% по массе
Глубина выгорания	Средняя	—	34 ГВт·сут/т	34 ГВт·сут/т
	Максимальная	34 ГВт·сут/т	40 ГВт·су/т	40 ГВт·сут/т



РИС. 57. Обучение обращению с контейнерами на макете (авторские права принадлежат РФС, 2019 год. Несанкционированное использование или воспроизведение этого изображения запрещено).

уроки аварии на АЭС «Фукусима-дайити». В январе 2014 года РФС подала в Управление по ядерному регулированию (УЯР) заявку на продление разрешения на эксплуатацию центра РФС. РФС проходила экспертизу УЯР в соответствии с новыми стандартами регулирования.

В августе 2010 года РФС начала строительство здания для хранения и изготовление металлических контейнеров. Строительство здания было завершено в августе 2013 года, несмотря на перерыв в работе, продлившийся около года после Великого восточнояпонского землетрясения в марте 2011 года. Несколько металлических контейнеров также

изготавливаются с проведением различных инспекций как транспортно-упаковочные контейнеры.

1.2.3. Опыт эксплуатации

В порядке подготовки к началу эксплуатации РФС проводит тренинги по обращению с контейнерами, используя макет контейнера, пневматический транспортер поддонов, транспортно-технологическое оборудование и транспортное средство.

1.3. ЦЕНТРАЛИЗОВАННОЕ «СУХОЕ» ХРАНИЛИЩЕ ОТРАБОТАВШЕГО ТОПЛИВА НА ГОРНО-ХИМИЧЕСКОМ КОМБИНАТЕ, РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

На ГХК в Российской Федерации построены и эксплуатируются два «сухих» хранилища отработавшего топлива камерного типа: одно для хранения отработавшего топлива РБМК, другое — для топлива ВВЭР-1000. В каждом хранилище планируется хранить топливо в течение 50 лет, а общая вместимость комплекса составляет более 30 000 тТМ.

Политика обращения с отработавшим топливом в Российской Федерации основана на замкнутом цикле. Она предполагает минимизацию запасов отработавшего топлива за счет переработки и регенерации делящегося материала для максимального использования ресурсов и снижения спроса на уран, а также для минимизации объема радиоактивных отходов (продуктов деления и младших актинидов). Изначально предполагалось, что после короткого (1–3 года) периода ПР хранения отработавшее топливо будет переправляться на перерабатывающий завод. Отсутствие крупных мощностей для переработки отработавшего топлива ВВЭР-1000 и РБМК в начале 2000-х годов привело к увеличению запасов хранящегося отработавшего топлива, в связи с чем на ГХК был создан централизованный объект. На практике обычно применяется комбинация мокрой и сухой технологий. Первоначально только что выгруженное из реактора отработавшее топливо помещается в бассейны выдержки для хранения, а затем, по истечении определенного времени хранения, переправляется в «сухое» хранилище. После определенного периода хранения отработавшее топливо с ВВЭР и РБМК будет отправлено на

переработку, которая будет осуществляться на базе интегрированного комплекса на ГХК²⁵.

1.3.1. Описание проекта

В хранилище используются технологии сухого хранения. Имеется три хранилища: два хранилища, рассчитанные на более чем 20 000 тТМ отработавшего топлива РБМК-1000, и одно хранилище, рассчитанное на более чем 10 000 тТМ отработавшего топлива ВВЭР-1000. Каждое здание занимает площадь 250 м × 33 м. Топливо хранится в герметичных канистрах (пеналах), установленных в два яруса в ячейки хранения (гнезда хранения), устроенные в бетонных камерах. Каждый пенал содержит:

- 31 ампулу, содержащую пучки твэлов РБМК-1000. Поступающие с АЭС негазонепроницаемые ампулы из нержавеющей стали содержат разрезанные тепловыделяющие сборки РБМК²⁶, либо
- 4 тепловыделяющие сборки ВВЭР-1000.

Отвод остаточного тепловыделения от отработавшего топлива во время хранения обеспечивается за счет естественной циркуляции воздуха в камерах для хранения. Подкритичность как в нормальных условиях, так и в аварийных ситуациях обеспечивается за счет контроля массы, обогащения и геометрии; за счет геометрически благоприятной конструкции расположение отработавшего топлива в зоне хранения поддерживается в строгом порядке. Во время длительного хранения проводится периодический выборочный контроль состояния пеналов и ампул с отработавшим топливом. Дефектное отработавшее топливо (с поврежденной оболочкой стержневых твэлов и

²⁵ В настоящее время на ГХК создается комплекс установок ядерного топливного цикла, объединяющий деятельность по хранению, переработке и регенерации, что в конечном итоге позволит сократить объемы транспортировки ядерных материалов и сфокусировать принимаемые меры ядерной и физической безопасности на одном объекте. На площадке уже существуют объекты для хранения ОЯТ, изготовления топлива для реакторов на быстрых нейтронах и переработки ОЯТ. К будущим объектам ГХК относятся завод по изготовлению топлива из регенерированной смеси (известного как РЕМИКС) и объект по разработке жидкосолевых реакторов. Кроме того, на площадке строится подземная исследовательская лаборатория для проведения НИОКР по программе глубокого геологического захоронения.

²⁶ Тепловыделяющие сборки РБМК состоят из двух элементов, соединенных между собой опорным стержнем. При «разрезании» опорного стержня цельная сборка разделяется на два отдельных элемента.

сильно измененной геометрией) может приниматься только в отдельных тонкостенных канистрах, герметизированных сваркой.

Технология сухого хранения, используемая на ГХК, основана на пассивном принципе защиты; в случае потери электроснабжения безопасные условия будут поддерживаться за счет охлаждения воздуха естественной конвекцией. Все операции по перемещению и хранению отработавшего топлива полностью автоматизированы, чтобы исключить влияние человеческого фактора на безопасность. Проект системы хранения ОЯТ и обращения с ним основан на следующих основных критериях и технических решениях:

- обеспечение того, чтобы доза облучения работников и населения оставалась ниже предельных значений как во время нормальной эксплуатации, так и при ПА;
- принцип многобарьерной системы для минимизации вероятности выброса в окружающую среду (топливная таблетка, оболочка ТВЭЛ, ампула или герметичный пенал, герметичная ячейка хранения, строительные конструкции хранилища);
- использование технических средств, направленных на предотвращение ПА, и мер, ограничивающих последствия ЗУ;
- проектирование оборудования и зданий с учетом возможных сценариев ПА;
- хранение отработавшего топлива в герметичных пеналах, которые устанавливаются в два яруса и после установки герметизируются в ячейках с помощью сварки;
- обеспечение подкритичности в нормальных условиях и в аварийной ситуации за счет геометрически безопасного расположения ячеек (диаметр 720 мм с шагом 1000 мм × 1000 мм);
- обеспечение герметичности ячейки хранения и обнаружение любого выброса радиоактивности в ячейку хранения в случае разгерметизации системы пеналов путем контроля герметичности ячейки хранения и содержащихся в ней пеналов;
- обеспечение возможности проведения испытаний, технического обслуживания, дозиметрического контроля и проверок на предмет радиоактивного загрязнения оборудования, используемого в процессе хранения отработавшего топлива и обращения с ним;
- учет и контроль местонахождения, количества и перемещения тепловыделяющих сборок, задействованных в процессах загрузки, хранения и транспортировки отработавшего топлива.

Внешний вид хранилища показан на рис. 58, внутренний вид в разрезе — на рис. 59.

После первоначальной проверки контейнер помещается (с помощью перегрузочных платформ) под раструб приемника и после стыковки герметизируется. В горячей камере пеналы загружаются ампулами, содержащими пучки ТВЭЛОВ. По окончании загрузки пенал закрывается, и к его корпусу приваривается крышка. Из горячей камеры герметичные пеналы попадают в перегрузочную машину. Эта машина перемещает пеналы в ячейку хранения в соответствии с заданными координатами, извлекает



РИС. 58. Общий внешний вид «сухого» хранилища отработавшего топлива РБМК.

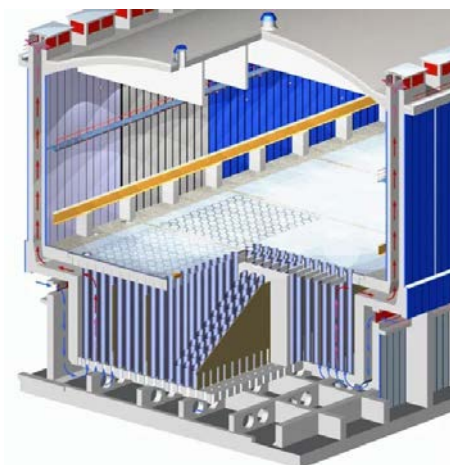


РИС. 59. Здание «сухого» хранилища камерного типа для хранения отработавшего топлива на ГХК в разрезе.

пробку и вставляет пенал в ячейку. Ячейка хранения закрывается пробкой и заваривается, при этом сварной шов проверяется на герметичность. По окончании загрузки пеналов перегрузочная машина устанавливает пробку и отсоединяется от ячейки хранения. Периодический контроль состава газа в ячейках и герметичности ячеек с пеналами осуществляется по установленному графику и проводится с помощью самодвижущихся тележек, установленных в сборочном цехе. Если в ячейке обнаруживается какое-либо нарушение контролируемых параметров, она вскрывается и пеналы перегружаются в другую ячейку. Этот процесс показан на рис. 60.

Если говорить в целом, то к числу основных сооружений и оборудования, связанных с хранилищем на ГХК, относятся:

- зона загрузки транспортных контейнеров и траверсная передвижная платформа;
- горячая камера («приемник»);
- передача пеналов в зону хранения;
- зона хранения отработавшего топлива (раздельное хранение топлива РБМК и топлива ВВЭР);
- дорога для транспортировки;
- административное здание;
- другая необходимая инфраструктура.

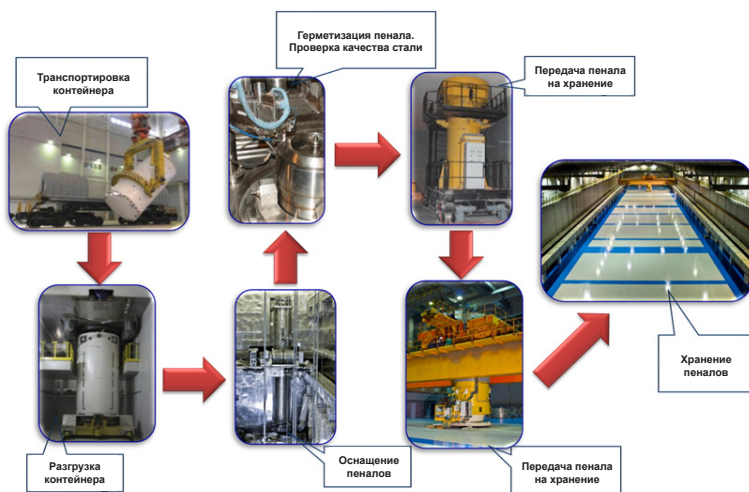


РИС. 60. Этапы передачи отработавшего топлива на сухое хранение в централизованное «сухое» хранилище на ГХК.

ТАБЛИЦА 5. ХАРАКТЕРИСТИКИ ОТРАБОТАВШЕГО ТОПЛИВА, ХРАНЯЩЕГОСЯ В ЦЕНТРАЛИЗОВАННОМ «СУХОМ» ХРАНИЛИЩЕ НА ГХК

Тип топлива	РБМК	ВВЭР-1000
Начальное обогащение	~2,4% по массе (3,2% для U-Er топлива) ^a	До ~4,4% ^b
Глубина выгорания	До 30 ГВт·сут/т	До 50 ГВт·сут/т

^a Уран-эрбиевое топливо, в котором эрбий является выгорающим поглотителем.

^b Среднее обогащение.

В таблице 5 показаны характеристики отработавшего топлива, хранящегося на ГХК.

1.3.2. Состояние хранилища

Хранилище находится в эксплуатации с 2012 года.

1.4. ЦЕНТРАЛИЗОВАННОЕ ХРАНИЛИЩЕ, ИСПАНИЯ

Испанское ЦХ предназначено для безопасного промежуточного хранения ВАО, отработавшего топлива и «специальных отходов»²⁷, образующихся в ходе реализации испанской ядерной программы.

В Испании обращение с отработавшим топливом АЭС основано на сценарии открытого цикла, и на будущее запланировано строительство национального глубинного геологического хранилища. В настоящее время отработавшее топливо хранится либо в ПР хранилищах, либо в ВР-ПР хранилищах. В национальной политике в области обращения с радиоактивными отходами, установленной в ряде последовательно принимавшихся генеральных планов деятельности по обращению с радиоактивными отходами, централизованное хранение отработавшего топлива, ВАО и специальных отходов рассматривается как предпочтительный

²⁷ «Специальные отходы» — это термин, используемый для обозначения активированных компонентов и отходов деятельности по выводу из эксплуатации, непригодных для утилизации по принятым в Испании схемам для отходов низкого и среднего уровня активности.

вариант исходя из стратегических, технических, экономических факторов, а также соображений ядерной и физической безопасности.

ЦХ считается наиболее подходящим решением для того, чтобы сделать временное обращение с отработавшим топливом, ВАО и специальными отходами и захоронение двумя независимыми видами деятельности. Сокращение количества хранилищ радиоактивных отходов и, таким образом, количества ядерных объектов приведет к соответствующему снижению риска и проблем, связанных с этим типом установок. Это также позволит рационализировать и оптимизировать будущую эксплуатацию и необходимое вспомогательное обслуживание объектов по обращению с радиоактивными отходами. Кроме того, может быть получена экономическая выгода за счет снижения общих затрат на обращение с радиоактивными отходами.

В любом случае, создание ЦХ представляет собой промежуточный этап в обращении с отработавшим топливом, за которым последует строительство пункта глубокого геологического захоронения.

I.4.1. Описание проекта

ЦХ предназначено для приема, обработки и временного хранения предполагаемого национального запаса в объеме ~22 000 отработавших твэлов (таблица 6); ВАО от деятельности по переработке за рубежом (канистры с остеклованными отходами) и специальных отходов (остеклованные и металлические компактированные отходы деятельности по переработке, отходы деятельности по выводу АЭС из эксплуатации и герметизированные радиоактивные источники) (таблица 7). Проектный срок службы составляет 100 лет, предполагаемый срок эксплуатации — 60 лет.

ЦХ будет представлять собой модульное хранилище камерного типа, в котором отработавшее топливо и отходы поступают в сухом виде в горячую камеру для кондиционирования. Схема основного технологического процесса показана на рис. 61.

ТАБЛИЦА 6. ЗАПАС ОТРАБОТАВШЕГО ТОПЛИВА

Тип отработавшего топлива	Оценка общего числа тепловыделяющих сборок (т U)
PWR	12 811 (5 846)
BWR	9 125 (1 641)
ВСЕГО	21 936 (7 487)

ТАБЛИЦА 7. ЗАПАС ВАО И СПЕЦИАЛЬНЫХ ОТХОДОВ

	Тип	Всего
ВАО	Канистра CSD-V	68
Специальные отходы ^а	Канистра CSD-B	12
	Канистра CSD-C	12
Отходы деятельности по дезактивации и выводу из эксплуатации реакторов		458 м ³

^а Отходы оборудования, не связанного с топливом, и отходы от эксплуатации АЭС не учитываются.

Объект будет выполнять двойную функцию — хранилища и научно-технологического центра по вопросам обращения с радиоактивными отходами. Хранилище будет устроено в виде нескольких зданий (рис. 62). Оно включает в себя буферное хранилище для приема и временного хранения до 78 контейнеров с целью эффективного управления входящим потоком контейнеров. Будут также построены здания, предназначенные для хранения герметизированных радиоактивных источников и эксплуатационных отходов, центр технического обслуживания контейнеров и автостоянка.

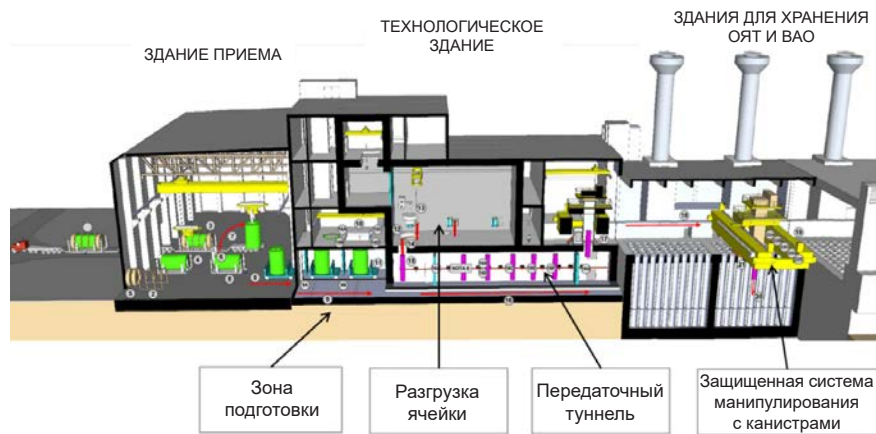


РИС. 61. Основной технологический процесс в ЦХ.

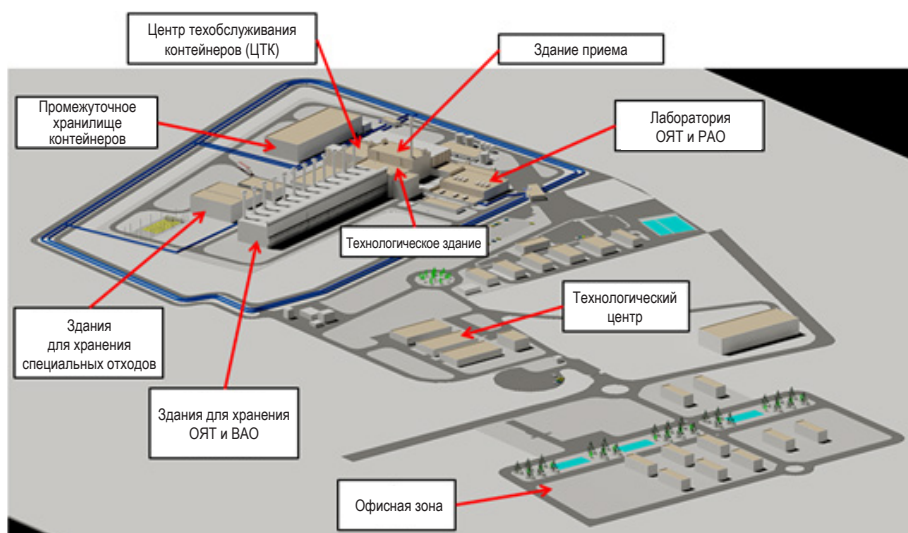


РИС. 62. Общая компоновка ЦХ.

Лаборатория отработавшего топлива и высокоактивных отходов займется изучением их поведения в средне- и долгосрочной перспективе.

Ядерная установка предназначена для выполнения следующих функций безопасности в нормальных, аномальных и аварийных условиях:

- локализация: двойной барьер (канистра, контейнеры);
- теплоотвод: пассивный за счет естественной конвекции;
- подкритичность: геометрически выверенное расположение отработавших твэлов внутри канистр/контейнеров;
- защита: мощные стены из железобетона и контейнеры;
- извлекаемость: возможность извлечения контейнеров и канистр.

I.4.2. Процесс лицензирования

Лицензирование ЦХ началось в 2014 году, но было приостановлено в 2018 году, после того как государственный секретарь по энергетике обратился в Совет по ядерной безопасности с просьбой временно приостановить выпуск обязательного отчета, касающегося запроса о выдаче разрешения на строительство. Цель этого приостановления заключалась в том, чтобы дать возможность новому испанскому правительству провести переоценку проекта с учетом последних данных о запасах радиоактивных отходов. Генеральный план деятельности по обращению с радиоактивными

отходами будет актуализирован, чтобы отразить все изменения в планировании сценариев [70].

1.5. ВНЕШНЕЕ ХРАНИЛИЩЕ ОТРАБОТАВШЕГО ТОПЛИВА НА АЭС «ГЁСГЕН», ШВЕЙЦАРИЯ

ПР бассейн выдержки отработавшего топлива на АЭС «Гёсген» (ККГ) рассчитан на 656 тепловыделяющих сборок. Поскольку переработка топлива запрещена правительством Швейцарии, стратегия хранения предусматривает приреакторное мокрое хранение и промежуточное сухое хранение.

Отработавшее топливо может перемещаться из бассейна после двух лет первоначального охлаждения. Внешнее «мокрое» хранилище на ККГ, представляющее собой ВР-ПР бассейн, было построено для того, чтобы обеспечить дополнительную емкость для топлива с более длительным временем первоначального охлаждения и, следовательно, большую гибкость для оптимизации загрузки транспортно-упаковочных контейнеров²⁸. В конечном итоге отработавшее топливо будет переправлено в централизованное «сухое» хранилище, известное как ЦВИЛАГ.

1.5.1. Описание хранилища

Проект соответствует нормативным требованиям для нормальной эксплуатации, аномальных ситуаций и аварийных условий (таких как землетрясение и падение самолета).

Бассейн высотой 12,5 м и площадью 13,2 м × 8,2 м облицован нержавеющей сталью и заполнен деминерализованной водой с уровнем воды 12 м. Подкритичность обеспечивается за счет использования стеллажей для хранения с каналами для поглотителя из боросодержащей нержавеющей стали.

Охлаждение бассейна обеспечивается как пассивными, так и активными системами. В нем предусмотрено четыре контура охлаждения и используется естественная циркуляция. Обеспечивается естественная и принудительная конвекция, последняя — с помощью вентиляторов.

Хранилище было построено с расчетной вместимостью 1008 отработавших тепловыделяющих сборок. Основные характеристики приведены в таблице 8.

²⁸ В Швейцарии ДЦК обычно называют транспортно-упаковочными контейнерами, или ТУК.

Внутренний вид внешнего бассейна выдержки отработавшего топлива на ККГ показан на рис. 63, изображение «мокрого» хранилища в законченном виде — на рис. 64.

Требования к охлаждению взяты из разработанных Германией руководящих указаний (требований), приведенных в стандарте КТА 3303 [71]. При нормальной эксплуатации хранилища охлаждение тепловыделяющих сборок осуществляется исключительно за счет пассивной системы естественной циркуляции. Система оснащена внешними охлаждающими вентиляторами, которые могут быть задействованы в случае необходимости.

При управлении тяжелой аварией охлаждение за счет естественной циркуляции поддерживается дополнительным автономным передвижным насосом, соединенным с системой охлаждения.

ТАБЛИЦА 8. ПРЕДЕЛЫ ПАРАМЕТРОВ ОТРАБОТАВШЕГО ТОПЛИВА

Топливо	Минимальный период охлаждения (годы)	Начальное обогащение	Максимальное выгорание (ГВт·сут/тТМ)
UO ₂	3	5% ²³⁵ U	70
MOX	5	4,8% Pu _{fiss}	60



РИС. 63. Внутренний вид бассейна выдержки ОЯТ на ККГ, Швейцария.



РИС. 64. «Мокрое» хранилище на ККГ, Швейцария, в законченном виде.

I.5.2. Состояние хранилища: выбор площадки, лицензирование и строительство

5 июля 2002 года был подписан контракт на условиях «под ключ» с «АРЕВА НП» (Германия) на:

- базовое и техническое проектирование механического и электрического оборудования;
- оформление лицензионной документации (ответственность за прохождение процедуры лицензирования по-прежнему лежит на ККГ);
- ввод в эксплуатацию;
- приблизительно 40% объема работ выполнялось по договорам субподряда местными швейцарскими компаниями;
- общие расходы распределялись примерно следующим образом: 75% — оборудование и 25% — инженерно-технические работы.

I.5.3. Опыт эксплуатации

Базовые условия хранения таковы, что ОЯТ погружают в чистую воду при «комнатной» температуре (до 45°C) и давлении (атмосферное плюс водяной столб в несколько метров), что гарантирует низкое давление внутри топливных стержней и одновременно предупреждает развитие возможных механизмов деградации, таких как деформация ползучести или ЗГР.

Возможные дефекты в тепловыделяющих сборках, приводящие к выбросу активности, будут обнаруживаться установленной системой мониторинга (мониторинг воздуха в помещении и воздуха на выходе с помощью гамма-детекторов и мониторинг аэрозолей, содержащих альфа- и бета-излучающие радионуклиды). Вода бассейна проверяется ежемесячно, и любое увеличение концентрации цезия или йода может быть обнаружено.

1.6. ПРОМЕЖУТОЧНОЕ ХРАНИЛИЩЕ ОТРАБОТАВШЕГО ЯДЕРНОГО ТОПЛИВА СУХОГО ТИПА, УКРАИНА

Промежуточное хранилище ОЯТ сухого типа (ХОЯТ-2) было создано для организации долгосрочного хранения отработавшего топлива, образовавшегося в результате аварии на Чернобыльской АЭС (ЧАЭС). Строительство и пуск в строй ХОЯТ-2 были необходимы для того, чтобы вывести из эксплуатации первоначальное промежуточное хранилище мокрого типа ХОЯТ-1, а также для нужд вывода из эксплуатации энергоблоков №№ 1, 2 и 3 ЧАЭС. Для целей планирования считается, что продолжительность хранения будет составлять 100 лет. В 2016 году из энергоблоков №№ 1, 2 и 3 ЧАЭС было выгружено топливо, и запасы отработавшего топлива хранятся в ХОЯТ-1 на площадке ЧАЭС; они составляют 21 284 отработавшие тепловыделяющие сборки типа РБМК-1000.

Первоначальный проект ХОЯТ-2 был разработан в 1999 году компанией «Фраматом» в рамках международной финансовой и технической помощи, предоставленной Украине на основании меморандума о взаимопонимании от 20 декабря 1995 года между правительствами стран Группы семи, Европейской комиссией и правительством Украины о закрытии Чернобыльской АЭС, а также соглашения о гранте, подписанного 12 ноября 1996 года между Европейским банком реконструкции и развития, правительством Украины и ЧАЭС в рамках проекта по обеспечению ядерной безопасности ЧАЭС.

Проектом хранилища было предусмотрено, что отработавшее топливо ЧАЭС будет храниться в сухой среде в герметичных пеналах, размещенных внутри вентилируемых бетонных модулей типа NUHOMS. «Фраматом» начала строительство ХОЯТ-2 в 2000 году, и ввод в эксплуатацию был намечен на третий квартал 2004 года. Однако в 2003 году в проекте были выявлены существенные недостатки, влияющие на надежность и безопасность, что привело к приостановке строительства на время реализации проектных решений. По оценкам экспертов, строительство было завершено на 70%. Поскольку стороны договора не смогли найти

приемлемых решений проблем, в апреле 2007 года ГСП ЧАЭС расторгло договор с французским консорциумом «АРЕВА НП» («Фраматом»). Ответственность за модификацию проекта и завершение строительства взяла на себя компания «Холтек интернэшнл», которая в течение двух лет принимала участие в обсуждении технических подходов к решению проблем ХОЯТ-2. Также было признано, что уже возведенные сооружения имеют достаточно высокий уровень качества и могут быть совместимы с технологией, предложенной «Холтек интернэшнл» для завершения строительства.

Хотя при приеме проектных предложений не устанавливалось ограничений на технологию хранения, было выбрано сухое хранение, поскольку оно составляло основу всех успешных предложений на первом этапе тендера. Как показали оценки, оно наилучшим образом отвечает требованиям обеспечения безопасной и экономичной эксплуатации в течение 100 лет хранения. В предложении «Холтек интернэшнл» по завершению строительства ХОЯТ-2 используются двустенные пеналы.

I.6.1. Описание проекта

ХОЯТ-2 — это «сухое» хранилище отработавшего топлива на площадке ЧАЭС. ХОЯТ-2 предназначено для подготовки к хранению и промежуточного хранения ОЯТ РБМК-1000 ЧАЭС, перевезенного из ХОЯТ-1. Оно состоит из двух основных частей: установки по подготовке отработавшего топлива к хранению и зоны хранения ОЯТ. Общая схема объекта показана на рис. 65.

Общая вместимость ХОЯТ-2 составит 21 297 тепловыделяющих сборок РБМК-1000, за год будет приниматься и подготавливаться к хранению по 2500 тепловыделяющих сборок. Зона хранения будет работать по системе промежуточного сухого хранения NUHOMS.

Установка по подготовке отработавшего топлива к хранению предназначена для приема, «резки» и загрузки поврежденных и неповрежденных тепловыделяющих сборок в двустенные пеналы, что включает в себя операции осушки и инертизации гелием. Осушка отработавших тепловыделяющих сборок имеет важное значение, поскольку повышенное содержание воды в герметичных пеналах может стать причиной увеличения концентрации воды в пенале, что приведет к превышению предельного внутреннего давления и создаст риск разрыва корпуса пенала. Кроме того, присутствие водяных паров в среде хранения топлива увеличивает риск коррозии и образования взрывоопасных смесей в результате процесса радиолитического распада. На установке по подготовке отработавшего

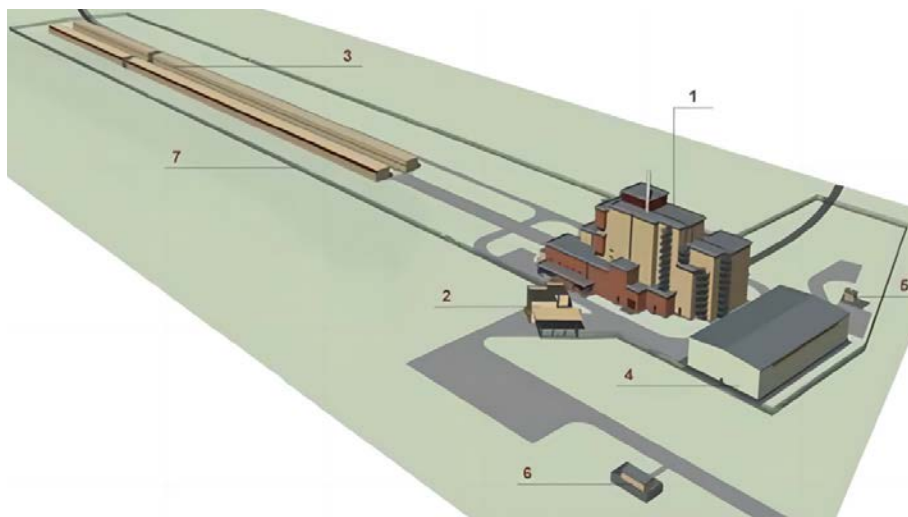


РИС. 65. ХОЯТ-2. 1) Установка по подготовке отработавшего топлива к хранению; 2) контрольно-пропускной пункт; 3) бетонный модуль хранения; 4) склад патронов и чехлов; 5) канализационная насосная станция; 6) пост АСКРО; 7) ограда. (Источник изображения: технический доклад «Обзор украинской нормативно-правовой базы и практики обращения с отработавшим топливом». ГНТЦ ЯРБ. Киев, 2018 год.)

топлива к хранению также будет осуществляться прием, упаковка и хранение поглощающих стержней и удлиняющих стержней.

Зона хранения состоит из транспортно-технологического оборудования, используемого для операций с пенами, и 58 горизонтальных бетонных модулей хранения. Модули построены в два ряда по 29 модулей — А и В, — разделенных центральным проходом шириной ~9,5 м. Каждый модуль содержит четыре ячейки хранения, в каждую из которых помещается один пенал с отработавшим топливом. Пеналы представляют собой герметичный сосуд из двух заваренных пеналов, которые образуют две отдельные зоны локализации для предотвращения распространения радиоактивных материалов, и внутрипенальной корзины. Отвод остаточного тепловыделения будет осуществляться за счет естественной конвекции через бетонный модуль.

На рис. 66 показаны сооружения и пеналы, используемые в процессе упаковки и хранения.



a)



b)



c)



d)

РИС. 66. а) Установка ХОЯТ-2 по подготовке отработавшего топлива к хранению, б) зона хранения отработавшего топлива, с) горячая камера, д) двустенный пенал, содержащий отработавшие тепловыделяющие сборки.

1.6.2. Состояние хранилища

«Холодные» испытания хранилища проходили в три этапа. На первом этапе были испытаны основные технологические системы с использованием имитаторов тепловыделяющих сборок. На втором этапе были испытаны вспомогательные системы, а на третьем этапе главное внимание было уделено ремонтпригодности оборудования ХОЯТ-2 (т.е. возможности удаленного ремонта компонентов в случае повреждения).

10 сентября 2020 года ГСП ЧАЭС начало работы и операции в рамках «горячих» испытаний ХОЯТ-2. Согласно программе, в ходе «горячих» испытаний из действующего ХОЯТ-1 в ХОЯТ-2 будут переданы 186 отработавших тепловыделяющих сборок. После завершения необходимых технологических операций пеналы с отработавшими тепловыделяющими сборками будут помещены в бетонные модули хранения ХОЯТ-2.

1.7. ПОДЗЕМНАЯ СИСТЕМА СУХОГО ХРАНЕНИЯ ОТРАБОТАВШЕГО ТОПЛИВА, САН-ОНОФРЕ, США

АЭС «Сан-Онофре» (СОНГС) расположена на калифорнийском побережье, а это означает, что при выборе проекта ВР хранилища было необходимо учитывать как фактор морской среды, так и сейсмическую активность этого района. Для второго автономного хранилища отработавшего топлива (иногда сокращенно называемого АХОТ) на площадке была выбрана система UMAX²⁹. Подземная система HI-STORM UMAX была спроектирована с учетом требования высокой сейсмостойкости. Результатом совместных разработок энергопредприятия и поставщика стало использование метода лазерного упрочнения пеналов хранения из нержавеющей стали, с тем чтобы дополнительно защитить их от коррозии под воздействием морского воздуха.

Конструкция системы UMAX обеспечивает экранирование и физическую защиту для снижения облучения работников, поэтому для доступа в автономное хранилище отработавшего топлива UMAX на СОНГС нет необходимости проводить дозиметрический контроль. Площадка АЭС имеет относительно небольшую площадь и находится в непосредственной близости от открытой для населения пешеходной тропы, что делает такой уровень экранирования весьма желательным. Систему UMAX можно видеть на рис. 67 вместе с первоначальной системой TN NUHOMS. На рис. 68 показана схема расположения пеналов внутри системы.

Многоцелевая канистра (МЦК) MPC-37, лицензированная для хранения в системе UMAX, была одобрена Комиссией по ядерному регулированию для транспортировки в транспортно-упаковочном контейнере HI-STAR 190; это одобрение распространяется на транспортировку топлива глубокого выгорания.

1.7.1. Описание хранилища

В системе UMAX на СОНГС хранится топливо PWR 16 × 16 производства «Комбасчен инжиниринг». Максимальное выгорание топлива составляет 55,1 ГВт·сут/т U, максимальное обогащение — 4,64% по массе. МЦК лицензированы для целей хранения поврежденного топлива, согласно сертификату соответствия 72-1040.

²⁹ Система TN NUHOMS использовалась для хранения топлива с энергоблоков № 1, 2 и 3 СОНГС.



РИС. 67. Системы хранения отработавшего топлива СОНГС: TN NUHOMS (слева) и Holtec UMAX (справа). (Публикуется с разрешения SCE.)

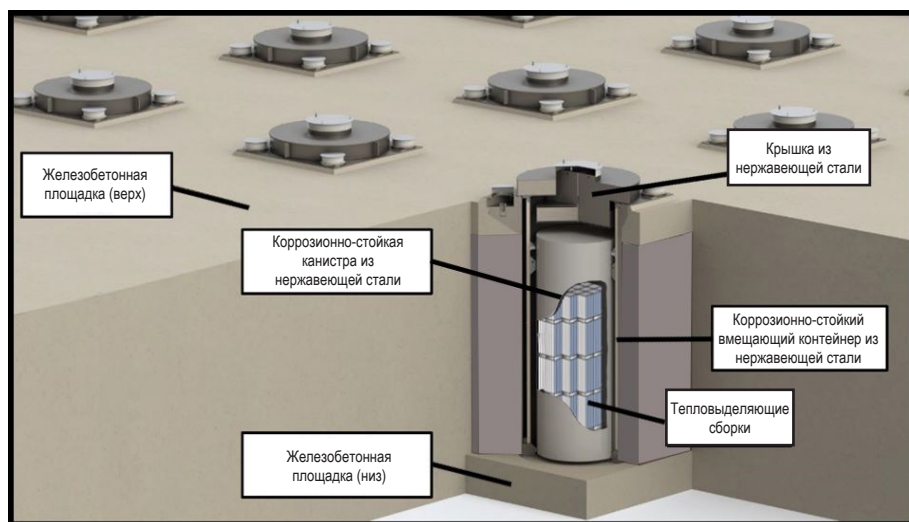


РИС. 68. Внутренняя и внешняя конструкция системы UMAX. (Публикуется с разрешения SCE.)

1.7.2. Состояние хранилища: выбор площадки, лицензирование и строительство

На площадке СОНГС находились три действующих реактора, описанных ниже.

- Энергоблок № 1: PWR конструкции «Вестингауз», эксплуатировавшийся в 1968–1992 годах. Реактор выведен из эксплуатации, все наземные сооружения демонтированы, а отработавшее топливо помещено на сухое хранение в систему NUHOMS.
- Энергоблоки № 2 и № 3: PWR конструкции «Комбасчен инжиниринг», эксплуатировавшийся в 1983–2012 годах. Отработавшее топливо с этих энергоблоков хранится в системах NUHOMS и UMAX.

Система UMAX расположена на площадке СОНГС. Строительство началось в 2016 году, операции по загрузке — в 2018 году. В августе 2020 года была произведена окончательная передача топлива, чтобы можно было начать вывод из эксплуатации энергоблоков № 2 и № 3.

1.7.3. Опыт эксплуатации

В период 2018–2020 годов была проведена перегрузка топлива из ПР бассейнов энергоблоков № 2 и № 3 в систему UMAX.

3 августа 2018 года одну МЦК заклинило на защитном кольце внутри модуля хранения во время ее установки в модуль хранения UMAX. Бригада, проводившая загрузку, не заметила этого и продолжала опускать механизм вертикального подъема контейнеров в максимально нижнее положение. Это привело к тому, что грузоподъемные стропы полностью провисли, что создало опасность падения МЦК с высоты примерно 5,5 м (18 футов) на дно модуля хранения. Эта ситуация была быстро обнаружена и исправлена бригадой. По итогам последующей оценки причин были улучшены рабочие регламенты и надзор, усовершенствованы программы корректирующих мер и обучения и модернизировано оборудование. Загрузка канистр была возобновлена в июле 2019 года. На рис. 69 схематично изображен этот инцидент.

В марте и апреле 2019 года восемь МЦК были визуально проинспектированы для выявления несоответствия между отчетом по обоснованию безопасности UMAX и данными наблюдения на месте. В отчете по обоснованию безопасности говорилось, что благодаря достаточно большим зазорам риск нанесения царапин на МЦК отсутствует, что

противоречило данным фактического наблюдения за контактом МЦК с модулем хранения. В ходе проверок было обнаружено минимальное истирание оболочки канистры вследствие контакта с внутренними компонентами модуля хранения, значительно ниже уровня, разрешенного кодексом Американского общества инженеров-механиков (АОИМ). Когда крышка модуля хранения была снята, робот и камера получили доступ ко всему корпусу канистры, за исключением нижних 2,5 см (1 дюйма), которые были закрыты пьедесталом, на котором установлена МЦК. На рис. 70 показаны работы, проводившиеся во время инспекций.

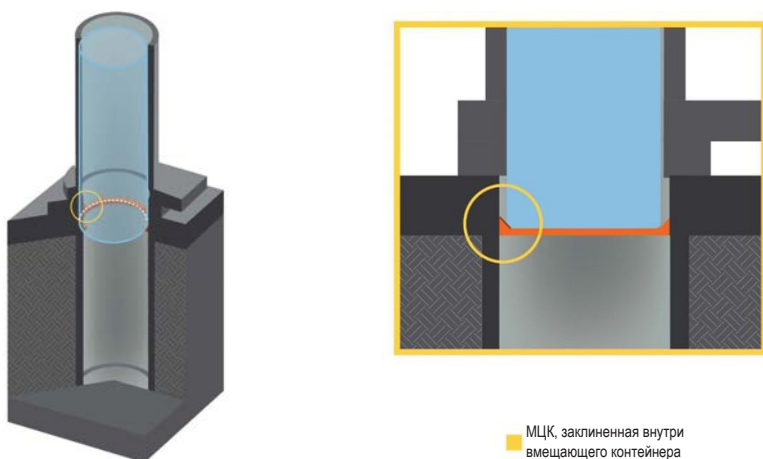


РИС. 69. МЦК, заклиненная на защитном кольце внутри вмещающего контейнера. (Публикуется с разрешения SCE.)



РИС. 70. Инспекция системы МЦК UMAX на СОНГС: рабочая зона инспекционной бригады (слева) и робот с камерой высокого разрешения, установленный внутри модуля хранения UMAX (справа). (Публикуется с разрешения SCE.)

Приложение II

ПРАВИЛА И РУКОВОДСТВА ПО ХРАНЕНИЮ И ТРАНСПОРТИРОВКЕ ОТРАБОТАВШЕГО ТОПЛИВА

Правила и руководства составляются как на международном, так и на национальном уровне. В нижеследующих разделах вкратце описываются соответствующие правила и руководства МАГАТЭ, а также правила и руководства других международных организаций и национальных регулирующих органов.

II.1. ПРАВИЛА И РУКОВОДСТВА МАГАТЭ В ОТНОШЕНИИ ХРАНЕНИЯ ОТРАБОТАВШЕГО ТОПЛИВА

Как показано на рис. 71, основополагающие принципы, требования и рекомендации по обеспечению ядерной безопасности установлены в нормах безопасности МАГАТЭ (о тех, которые относятся к хранению отработавшего топлива, говорится в приложении V). Выпускаются публикации трех категорий:

Иерархия норм безопасности МАГАТЭ



РИС. 71. Иерархия норм безопасности МАГАТЭ.

- «Основы безопасности»: в них устанавливается основополагающая цель безопасности и принципы защиты и безопасности;
- «Требования безопасности»: в них устанавливаются требования, которые должны выполняться с целью обеспечения защиты людей и охраны окружающей среды в настоящее время и в будущем;
- «Руководства по безопасности»: в них содержатся рекомендации и руководящие указания по соблюдению требований.

II.2. СООТВЕТСТВУЮЩИЕ ПРАВИЛА ИЛИ РУКОВОДСТВА ДРУГИХ МЕЖДУНАРОДНЫХ ОРГАНИЗАЦИЙ

II.2.1. Рекомендации Международной комиссии по радиологической защите

Международная комиссия по радиологической защите — это независимая международная неправительственная организация, задача которой заключается в предоставлении рекомендаций и руководящих указаний по радиологической защите от ионизирующих излучений. МАГАТЭ учитывает эти рекомендации при разработке норм безопасности.

II.2.2. Директивы и доклады ЕС

В директиве Совета 2011/70/Euratom по вопросам обращения с ОЯТ и радиоактивными отходами [72] устанавливаются базовые принципы Сообщества по обеспечению ответственного и безопасного обращения с отработавшим топливом, с тем чтобы эта проблема не легла чрезмерным бременем на будущие поколения.

II.2.3. Западноевропейская ассоциация ядерных регулирующих органов

Западноевропейская ассоциация ядерных регулирующих органов устанавливает референтные уровни безопасности для многих областей, включая хранение радиоактивных отходов и ОЯТ [73]. Референтные уровни безопасности опираются на базовые принципы безопасности, заложенные в нормах безопасности МАГАТЭ, и определяют уточненные требования к конкретным установкам для разработки национальных норм. Эти уровни установлены в четырех различных областях безопасности: управление безопасностью, проектирование, эксплуатация и проверка безопасности.

II.3. НАЦИОНАЛЬНЫЕ ПРАВИЛА И РУКОВОДСТВА ПО ХРАНЕНИЮ И ТРАНСПОРТИРОВКЕ ОТРАБОТАВШЕГО ТОПЛИВА

Во всех странах действуют национальные правила и руководства. Примеры приведены в таблице 9.

ТАБЛИЦА 9. ПРИМЕРЫ НАЦИОНАЛЬНЫХ ПРАВИЛ И РУКОВОДСТВ ГОСУДАРСТВ-ЧЛЕНОВ

Государство-член	Правила/руководства	Ссылка
Франция	IRSN 2019-00181 Хранение отработавшего ядерного топлива: концепции и вопросы безопасности (июнь 2018 года)	[74]
	IRSN 2019-00903 Оценка возможностей сухого хранения отработавшего МОХ-топлива или топлива из обогащенного переработанного урана (апрель 2019 года)	[75]
Германия	Руководство ESK по сухому контейнерному хранению отработавшего топлива и тепловыделяющих отходов (новая редакция от 10 июня 2013 года)	[76]
Япония	Постановление о деятельности по промежуточному хранению отработавшего топлива, Министерство торговли, экономики и промышленности, с изменениями, внесенными Управлением по ядерному регулированию (2014 год)	
	Заявление о сухом пристанционном хранении отработавшего топлива в контейнерах, Комиссия по ядерной безопасности Японии (1992 год, с изменениями от 2006 года)	
Соединенное Королевство	NS-TAST-GD-081 (Rev. 3) Вопросы безопасности, относящиеся к хранению отработавшего ядерного топлива, УЯР, Бутл (июнь 2019 год)	
США	NUREG-2215 — Стандартный план по оценке систем и объектов сухого хранения отработавшего топлива (2020 год)	[19]
	NUREG-2214 — Доклад об управлении процессами старения в хранилищах (MAPS) (2019 год)	[77]

ТАБЛИЦА 9. ПРИМЕРЫ НАЦИОНАЛЬНЫХ ПРАВИЛ И РУКОВОДСТВ ГОСУДАРСТВ-ЧЛЕНОВ (продолжение)

Государство-член	Правила/руководства	Ссылка
	NUREG-1927 — Стандартный план по оценке продления специальных лицензий и сертификатов соответствия для систем сухого хранения отработавшего ядерного топлива (Rev. 1, 2016 год)	[55]
	Временное руководство для персонала по хранению и транспортировке отработавшего топлива, Комиссия по ядерному регулированию (веб-сайт)	[78]

II.4. ПРАВИЛА ТРАНСПОРТИРОВКИ ОТРАБОТАВШЕГО ТОПЛИВА

Перевозка ОЯТ на повседневной основе и в безопасных условиях осуществляется уже более 60 лет, при этом груз преодолевает расстояния в миллионы километров без каких бы то ни было серьезных инцидентов. Транспортировка отработавшего топлива регулируется международной нормативной базой, основу которой составляют Правила безопасной перевозки радиоактивных материалов МАГАТЭ, впервые изданные в 1961 году и пересматриваемые на периодической основе. Эти правила обеспечивают безопасность и защиту людей, имущества и окружающей среды от вредного воздействия ионизирующего излучения во время перевозки радиоактивного материала. Текущее издание было опубликовано в 2018 году и имеет условное обозначение SSR-6 (Rev. 1), издание 2018 года [50]. На рис. 72 показана международная нормативная база регулирования безопасности перевозки.

Для радиоактивного материала требования, регулирующие безопасность перевозки, изложены в Правилах безопасной перевозки радиоактивных материалов МАГАТЭ, SSR-6 [50], которые приняты в качестве элемента Типовых правил Организации Объединенных Наций [79] применительно к радиоактивным материалам, классифицируемым как опасные грузы класса 7.

Впоследствии Типовые правила Организации Объединенных Наций были сделаны элементом глобальных правил перевозки — Международного кодекса морской перевозки опасных грузов [80] для перевозки радиоактивного материала морским транспортом и Технических



РИС. 72. Взаимосвязи между элементами международной нормативной базы регулирования безопасности перевозки.

инструкций Международной организации гражданской авиации [81] для перевозки воздушным транспортом. Эти два документа являются обязательными для выполнения всеми государствами.

Однако глобальных правил перевозки наземным транспортом не существует. Чтобы сформировать единый для всего мира набор нормативных требований по безопасности перевозки, государства создают и вводят в действие национальные правила перевозки наземным транспортом, отражающие требования SSR-6, а небольшое число государств принимают SSR-6 напрямую.

Также заключаются региональные соглашения, основанные на Типовых правилах Организации Объединенных Наций, например европейские соглашения о перевозках автомобильным [82], железнодорожным [83] и внутренним водным [84] транспортом, которые являются обязательными для государств, подписавших эти соглашения.

В правилах перевозки радиоактивных материалов морским транспортом проводится различие между требованиями к ОЯТ и к другому радиоактивному материалу, как показано на рис. 73.

В правиле 3 части А главы VII Международной конвенции по охране человеческой жизни на море (Конвенция СОЛАС) [85] говорится, что перевозка опасных грузов в упаковке должна отвечать положениям Международного кодекса морской перевозки опасных грузов. Код радиоактивного материала, «опасные грузы класса 7», отражает требования



РИС. 73. Международная нормативная база регулирования безопасности перевозки морским транспортом.

SSR-6 о том, что отработавшее топливо ядерных реакторов должно перевозиться в упаковке типа В для делящегося материала, отвечающей установленным требованиям и критерию проверки работоспособности. Кроме того, в части D главы VII Конвенции СОЛАС установлены другие требования к отработавшему ядерному топливу:

- в правиле 14 отработавшее ядерное топливо определено как «груз ОЯТ» (облученного ядерного топлива). Груз ОЯТ означает облученное ядерное топливо, плутоний и радиоактивные отходы высокого уровня активности;
- правило 16 гласит, что судно, перевозящее «груз ОЯТ», должно соответствовать требованиям Кодекса ОЯТ³⁰, принятого Комитетом по безопасности на море Международной морской организации на основании резолюции MSC.88 (71) [86].

³⁰ Термин «Кодекс ОЯТ» означает международный Кодекс безопасной перевозки облученного ядерного топлива, плутония и радиоактивных отходов высокого уровня активности в контейнерах на борту судов. Согласно правилу 15, Кодекс ОЯТ не применяется к военным кораблям, военно-вспомогательным или другим судам, принадлежащим договаривающемуся правительству и используемым на правительственной некоммерческой службе.

Приложение III

ПРИМЕРЫ ПРОЕКТНЫХ АВАРИЙ, СВЯЗАННЫХ С ОБРАЩЕНИЕМ С ОТРАБОТАВШИМ ТОПЛИВОМ

Ниже приведены некоторые примеры возможных аварий, связанных с обращением с отработавшим топливом, при эксплуатации хранилища. Аварийные ситуации при обращении с отработавшим топливом не исчерпываются приведенными ниже примерами, но отражают все вероятные и требуемые сценарии аварий.

III.1 ПРИМЕРЫ ПОСТУЛИРУЕМЫХ АВАРИЙ ПРИ ОБРАЩЕНИИ С ТОПЛИВОМ ПРИ МОКРОМ ХРАНЕНИИ

При обращении с отработавшим топливом в бассейне традиционно оцениваются следующие потенциальные инциденты, связанные с падением:

- падение твэла может привести к его повреждению;
- падение твэла рядом со стеллажами для хранения отработавшего топлива также может повлиять на эффективные коэффициенты размножения нейтронов³¹ (K_{eff}) соседних стеллажей;
- падение твэла на стеллаж для хранения отработавшего топлива может также повредить стеллаж.

Для каждого из этих случаев необходимо рассмотреть и оценить самую неблагоприятную конфигурацию реактивности, возникновение которой можно допустить, и сравнить ее с приемлемыми пределами K_{eff} . Необходимо также рассмотреть возможность извлечения топлива при сценариях падения.

³¹ Величина K_{eff} меньше единицы означает, что система не может поддерживать нейтронную цепную реакцию и поэтому остается подкритичной.

III.2 ПРИМЕРЫ ПОСТУЛИРУЕМЫХ АВАРИЙ ПРИ ОБРАЩЕНИИ С ТОПЛИВОМ ПРИ СУХОМ ХРАНЕНИИ В КОНТЕЙНЕРАХ

При проектировании контейнеров для отработавшего топлива обычно учитываются такие аварийные ситуации при обращении с ними, как падение и опрокидывание контейнера. Они описываются ниже.

III.2.1. Падение контейнера

В проектной документации должен определяться не только тип падения, которое может произойти (например, вертикальное, горизонтальное или на угол, как показано на рис. 74), но и условия эксплуатации, в которых будет находиться контейнер. Для определения проектной основы обычно используется либо максимальная высота подъема контейнера, либо максимальное ускорение, которое может возникнуть при падении [87].

III.2.3. Опрокидывание контейнера

Большинство регулирующих органов считают инциденты с опрокидыванием контейнера заслуживающими анализа, несмотря на то что опорные конструкции контейнерной системы определены как важные для безопасности и рассчитаны на то, чтобы предотвращать такие инциденты. В некоторых случаях опрокидывание контейнера может быть определено как вероятная опасность, поэтому в анализе необходимо учитывать параметры, связанные с опрокидыванием, такие как высота и ускорение. Этот анализ может быть проведен при помощи аналитических средств и/или испытаний на прототипе или уменьшенной модели, при этом обычно делается допущение относительно твердой поверхности [87].

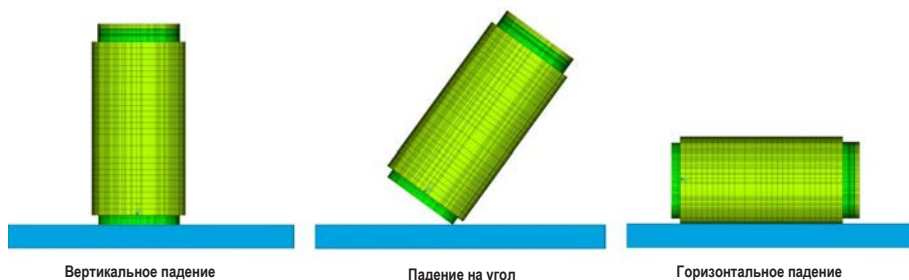


РИС. 74. Три типа падения контейнера. (Публикуется с разрешения Дэвида Гарридо.)

Как правило, эти аварии оцениваются посредством анализа методами конечных элементов с явными алгоритмами. Предельные значения напряжений и деформаций базируются на общепризнанных нормах и правилах проектирования (например, нормах АОИМ (США), RCC-M (Франция), KTA (Германия), Японского общества инженеров-механиков (Япония)). Функции контейнеров, связанные с безопасностью, такие как структурная целостность, локализация, подкритичность и целостность топлива, определяются предельными значениями, установленными в нормах и правилах проектирования.

Эти проектные условия определяют область эксплуатационных режимов, которая гарантирует поддержание безопасности при всех возможных условиях. Например, установление расчетной высоты падения позволяет заявителю определить максимальную высоту подъема контейнера в проектной и лицензионной документации, тем самым установив область эксплуатационных режимов, в которой не потребуются дополнительного анализа безопасности или изменения конструкции (например, добавления демпферов) [87].

Приложение IV

ОПУБЛИКОВАННЫЕ ДАННЫЕ О ХАРАКТЕРИСТИКАХ МАТЕРИАЛОВ

Существует большой массив данных о результатах проведенных исследований и данных об эксплуатационных характеристиках материалов, используемых в системах хранения. Эта информация была собрана из многочисленных источников и сведена в таблицу 10.

ТАБЛИЦА 10. ОПУБЛИКОВАННЫЕ ДАННЫЕ О ХАРАКТЕРИСТИКАХ МАТЕРИАЛОВ, ИСПОЛЪЗУЕМЫХ В СИСТЕМАХ ХРАНЕНИЯ ОТРАБОТАВШЕГО ТОПЛИВА

Материал	Измеренное/ рассчитанное свойство	Условия испытания	Измеряемый механизм деградации	Примечание	Ссылка
Углеродистая сталь	A. 5 мкм/год (потеря металла)	Вода бассейна (А, В в открытых бассейнах)	Общая или равномерная коррозия	A. Типичная деминерализованная вода бассейна pH 5–7 (вода хорошего качества)	[38]
	B. 200 мкм/год (потеря металла)			B. В воде бассейна с высоким содержанием хлорида (760 частей на миллион)	
	C. 100 мкм/год (потеря металла)			C. Для углеродистой стали с цинковым покрытием в воде бассейна (с содержанием хлорида 760 частей на миллион)	

ТАБЛИЦА 10. ОПУБЛИКОВАННЫЕ ДАННЫЕ О ХАРАКТЕРИСТИКАХ МАТЕРИАЛОВ, ИСПОЛЬЗУЕМЫХ В СИСТЕМАХ ХРАНЕНИЯ ОТРАБОТАВШЕГО ТОПЛИВА (продолжение)

Материал	Измеренное/ рассчитанное свойство	Условия испытания	Изменяемый механизм деградации	Примечание	Ссылка
Сталь (углеродистая, низколегированная, высокопрочная легированная)	0,2 мм/год (потеря металла)	Атмосферные условия	Общая или равномерная коррозия	Скорость коррозии для необработанных сталей, контактирующих с внешней атмосферой (скорость коррозии в сильно загрязненной атмосфере выше)	[77]
Сталь (углеродистая, низколегированная, высокопрочная легированная)	До 0,2 мм/год (0,01 мм/год) (потеря металла)	Подземные воды/грунт, аэробные условия (анаэробные условия)	Микробиологическая коррозия	Подземный трубопровод	[77]

ТАБЛИЦА 10. ОПУБЛИКОВАННЫЕ ДАННЫЕ О ХАРАКТЕРИСТИКАХ МАТЕРИАЛОВ, ИСПОЛЬЗУЕМЫХ В СИСТЕМАХ ХРАНЕНИЯ ОТРАБОТАВШЕГО ТОПЛИВА (продолжение)

Материал	Измеренное/ рассчитанное свойство	Условия испытания	Изменяемый механизм деградации	Примечание	Ссылка
Нержавеющая сталь (304, 304L, 316L)	A. 0,01–0,1 мкм/год (потеря металла)	A. Деминерализованная вода бассейна	Общая/равномерная коррозия	A. Вода бассейна в испытательном комплексе тестировалась в течение 18 месяцев	[16, 31, 32, 38]
	B. 0,3 мкм/год (потеря металла)	B. Вода бассейна выдержки, деминерализованная вода с содержанием хлорида до 7,5 частей на миллион		B. Открытый бассейн выдержки	
	C. < 0,1 мкм/год (потеря металла)	C. Вода бассейна выдержки, деминерализованная гидроксидом натрия до pH 11,4		C. Бассейн выдержки топлива газоохлаждаемого реактора	
Облицовка бассейна из нержавеющей стали	A. 0,03 мкм/год (потеря металла)	Вода бассейна, деминерализованная вода	Общая	A. Сталь 304L, определялся посредством анализа воды	[31]

ТАБЛИЦА 10. ОПУБЛИКОВАННЫЕ ДАННЫЕ О ХАРАКТЕРИСТИКАХ МАТЕРИАЛОВ, ИСПОЛЪЗУЕМЫХ В СИСТЕМАХ ХРАНЕНИЯ ОТРАБОТАВШЕГО ТОПЛИВА (продолжение)

Материал	Измеренное/ рассчитанное свойство	Условия испытания	Измеряемый механизм деградации	Примечание	Ссылка
	$B < 0,05$ мм/год (потеря металла)	20–30°C, pH 5–6, < 300 мкСм/м		В. Коррозионные образцы стандарта ANSI 321, измеренные в течение 15 лет	[9]
Пенал из нержавеющей стали	Скорость роста трещин от 0,1 мм/год до 0,67 мм/год	Морской воздух	Коррозионное растрескивание под напряжением	Сквозная коррозия стенки в течение 60 лет	[77]
Железо	А. 0,1 мм/год (потеря металла) В. 10 мм/год (потеря металла)	А. Стоячая пресная вода В. Зарыто в грунт	Общая/равномерная		[77]
Чугун с шаровидным графитом	0,1 мм/год (потеря металла)	Соленая вода	Общая	Без защиты, равновесная скорость коррозии	[16]

ТАБЛИЦА 10. ОПУБЛИКОВАННЫЕ ДАННЫЕ О ХАРАКТЕРИСТИКАХ МАТЕРИАЛОВ, ИСПОЛЪЗУЕМЫХ В СИСТЕМАХ ХРАНЕНИЯ ОТРАБОТАВШЕГО ТОПЛИВА (продолжение)

Материал	Измеренное/ рассчитанное свойство	Условия испытания	Изменяемый механизм деградации	Примечание	Ссылка
Алюминий	20–2 мкм (общая потеря металла при площади поверхности 100–1000 см ²)	Остаточная влажность в инертной атмосфере при T > 230°C (хранение в контейнерах)	Общая/равномерная	Расчет граничных условий. N.B. Приведенная цифра — это общая потеря металла при наличии воды в объеме 1 л.	[77]
	0,25 мкм/год	Бассейны выдержки топлива (< 50°C)	Общая/равномерная	Вода с низкой электропроводностью (< 5 мкСм/см)	[38]
	25 мкм/год (потеря металла под воздействием морского воздуха)	Сухое хранение, среда с высоким содержанием соли (например, прибрежная)	Точечная коррозия	Потенциал повреждения алюминиевого теплового экрана при охлаждении (вентилируемые системы сухого хранения)	[77]

ТАБЛИЦА 10. ОПУБЛИКОВАННЫЕ ДАННЫЕ О ХАРАКТЕРИСТИКАХ МАТЕРИАЛОВ, ИСПОЛЪЗУЕМЫХ В СИСТЕМАХ ХРАНЕНИЯ ОТРАБОТАВШЕГО ТОПЛИВА (продолжение)

Материал	Измеренное/ рассчитанное свойство	Условия испытания	Изменяемый механизм деградации	Примечание	Ссылка
	1,3 мм/год (потеря металла в 1M NaCl)	Среда с высоким содержанием соли (например, прибрежная)	Щелевая коррозия	Потенциал повреждения алюминиевого теплового экрана при охлаждении (вентилируемые системы сухого хранения)	[77]
	0,2 мм/год (потеря металла для алюминия в контакте с углеродистой сталью; для нержавеющей стали ожидается более высокая потеря)	Среда с высоким содержанием соли (например, прибрежная)	Электрохимическая коррозия	Алюминиевые листы/ уплотнения в контакте с нержавеющей сталью	[77]

ТАБЛИЦА 10. ОПУБЛИКОВАННЫЕ ДАННЫЕ О ХАРАКТЕРИСТИКАХ МАТЕРИАЛОВ, ИСПОЛЬЗУЕМЫХ В СИСТЕМАХ ХРАНЕНИЯ ОТРАБОТАВШЕГО ТОПЛИВА (продолжение)

Материал	Измеренное/ рассчитанное свойство	Условия испытания	Изменяемый механизм деградации	Примечание	Ссылка
	T > 200°C (начальная температура для закаленных алюминиевых сплавов; серия 6000)	Высокие температуры и нагрузки	Деформация ползучести/старение под действием тепла	Потенциальная возможность развития условий, когда алюминий используется в конструктивных элементах, находящихся вблизи отработавших твэлов. По оценкам, такие условия могут сохраняться до 30 лет, и этот момент необходимо учитывать при проектировании.	[77]

ТАБЛИЦА 10. ОПУБЛИКОВАННЫЕ ДАННЫЕ О ХАРАКТЕРИСТИКАХ МАТЕРИАЛОВ, ИСПОЛЬЗУЕМЫХ В СИСТЕМАХ ХРАНЕНИЯ ОТРАБОТАВШЕГО ТОПЛИВА (продолжение)

Материал	Измеренное/ рассчитанное свойство	Условия испытания	Изменяемый механизм деградации	Примечание	Ссылка
Металлы	Углеродистая сталь > 10 ¹⁹ Н/см ² ; нержавеющая сталь > 10 ²⁰ Н/см ² ; борированная нержавеющая сталь > 10 ¹⁷ Н/см ² ; Al > 10 ²¹ Н/см ² ; сплавы Ni > 10 ²⁰ Н/см ² ; Cu > 10 ¹⁸ Н/см ² .	Повреждение нейтронами компонентов контейнера до потери механических свойств	Радиационная деструкция	N.B. Для сравнения: накопленный результат воздействия источника нейтронов на 17 × 17 тепловыделяющих сборок PWR с выгоранием 40, 70 ГВт·сут/гТМ, обогащением 4% по ²³⁵ U в контейнере сухого хранения в течение 100 лет составляет 2,63 × 10 ¹⁶ Н/см ² .	[77]

ТАБЛИЦА 10. ОПУБЛИКОВАННЫЕ ДАННЫЕ О ХАРАКТЕРИСТИКАХ МАТЕРИАЛОВ, ИСПОЛЪЗУЕМЫХ В СИСТЕМАХ ХРАНЕНИЯ ОТРАБОТАВШЕГО ТОПЛИВА (продолжение)

Материал	Измеренное/ рассчитанное свойство	Условия испытания	Изменяемый механизм деградации	Примечание	Ссылка
Бетон	$< 10^{19} \text{ Н/см}^2$	Повреждение нейтронами до потери механических свойств	Радиационная деструкция	N.B. Для сравнения: накопленный результат воздействия источника нейтронов на 17×17 тепловыделяющих сборок PWR с выгоранием 40, 70 ГВт·сут/гТМ, обогащением 4% по ^{235}U в контейнере сухого хранения в течение 100 лет составляет $2,63 \times 10^{16} \text{ Н/см}^2$.	[77]
Покрытие из эпоксидной смолы	Максимальный эксплуатационный предел дозы $1 \times 10^6 \text{ Гр}$	Вода бассейна (до 32°C)	Радиационная деструкция	Опыт CANDU	[12]
Полимер «Вайял»	~2,5% (потеря веса)	Нагрев при 160°C в течение 10 000 часов	Термическая деструкция	Материалы для защиты от нейтронов	[9]

ТАБЛИЦА 10. ОПУБЛИКОВАННЫЕ ДАННЫЕ О ХАРАКТЕРИСТИКАХ МАТЕРИАЛОВ, ИСПОЛЬЗУЕМЫХ В СИСТЕМАХ ХРАНЕНИЯ ОТРАБОТАВШЕГО ТОПЛИВА (продолжение)

Материал	Измеренное/ рассчитанное свойство	Условия испытания	Изменяемый механизм деградации	Примечание	Ссылка
Полиэфир	~4% (потеря веса)	Нагрев при 160°C в течение 10 000 часов	Термическая деструкция	Материалы для защиты от нейтронов	[9]
Этиленовый каучук	~3% (потеря веса)	Нагрев при 160°C в течение 10 000 часов	Термическая деструкция	Материалы для защиты от нейтронов	[9]

ТАБЛИЦА 10. ОПУБЛИКОВАННЫЕ ДАННЫЕ О ХАРАКТЕРИСТИКАХ МАТЕРИАЛОВ, ИСПОЛЬЗУЕМЫХ В СИСТЕМАХ ХРАНЕНИЯ ОТРАБОТАВШЕГО ТОПЛИВА (продолжение)

Материал	Измеренное/ рассчитанное свойство	Условия испытания	Изменяемый механизм деградации	Примечание	Ссылка
Поливинил-хлорид	Максимальный эксплуатационный предел дозы 2×10^4 Гр	Деминерализованная вода при 35°C (имитация воды бассейна)	Радиационное повреждение	Потеря механической прочности, результаты испытаний при 1×10^6 Гр (умеренное или сильное повреждение), 5×10^6 Гр (деструкция). Эксплуатационный предел установлен на основе запаса безопасности на порядок больше, чтобы учесть влияние малых доз.	[9]

ТАБЛИЦА 10. ОПУБЛИКОВАННЫЕ ДАННЫЕ О ХАРАКТЕРИСТИКАХ МАТЕРИАЛОВ, ИСПОЛЪЗУЕМЫХ В СИСТЕМАХ ХРАНЕНИЯ ОТРАБОТАВШЕГО ТОПЛИВА (продолжение)

Материал	Измеренное/ рассчитанное свойство	Условия испытания	Измеряемый механизм деградации	Примечание	Ссылка
Уплотнения, например витон, нитрил, неопрен, этиленпропиленовый каучук	Максимальный эксплуатационный предел дозы $0,5-1 \times 10^6$ Гр	Материалы, прослужившие срок до 31 года	Радиационное повреждение	Результаты измерений прочности на растяжение, удлинения и модуля Юнга приведены в справочном документе	[41]
Бетон	$\sim 1,2$ кг/м ³ (концентрация хлорида, необходимая для коррозионного поражения арматурного стержня)	Лабораторное испытание образцов бетона в 10%-ном растворе хлорида натрия	Общая/равномерная/ точечная коррозия арматурного стержня в бетонной матрице	Коэффициент диффузии зависит от температуры и соотношения воды и цемента	[9]

Примечание. Данная таблица представляет собой подборку данных о характеристиках, опубликованных в литературе. За более подробной информацией или в случае любых несоответствий или вопросов следует обратиться к источникам, указанным в ссылках.

Приложение V

ПУБЛИКАЦИИ МАГАТЭ ПО ВОПРОСАМ ХРАНЕНИЯ ОТРАБОТАВШЕГО ТОПЛИВА

В настоящем приложении приведена сводная информация о подготовленных МАГАТЭ публикациях по вопросам хранения отработавшего топлива (таблица 11).

ТАБЛИЦА 11. ПЕРЕЧЕНЬ ПУБЛИКАЦИЙ МАГАТЭ ПО ВОПРОСАМ
ХРАНЕНИЯ ОТРАБОТАВШЕГО ТОПЛИВА

Тема/ссылка	Область применения
Хранение отработавшего топлива	
INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Storage, Handling and Movement of Fuel and Related Components at Nuclear Power Plants (Хранение, обращение и перемещение топлива и сопутствующих компонентов на атомных электростанциях), Technical Reports Series No. 189, IAEA, Vienna (1979).	В этом техническом докладе в общих чертах описываются различные операции, связанные с обращением со свежим топливом, облученным топливом и компонентами активной зоны, такими как управляющие стержни, источники нейтронов, выгорающие отравляющие поглотители и съемные приборы. В нем сделана попытка описать главные проблемы безопасности при выполнении этих операций и приведены общие критерии безопасности, которые должны соблюдаться при проектировании, эксплуатации и техническом обслуживании оборудования и сооружений для обращения, передачи и хранения ядерного топлива и компонентов активной зоны на площадках ядерных реакторов.
INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Storage of Water Reactor Spent Fuel in Water Pools (Хранение отработавшего топлива водяных реакторов в водяных бассейнах), Technical Reports Series No. 218, IAEA, Vienna (1982).	В этой публикации обобщены результаты опроса, посвященного опыту мокрого хранения топлива водяных реакторов, который был проведен МАГАТЭ и АЯЭ среди стран, реализующих ядерно-энергетические программы. В ответах был отражен опыт эксплуатации более 85% бассейнов водоохлаждаемых энергетических реакторов и ВР бассейнов, которые работали в течение 5 или более лет. В публикацию были также включены ответы, касающиеся бассейнов исследовательских реакторов и мест хранения топлива газоохлаждаемых реакторов.

ТАБЛИЦА 11. ПЕРЕЧЕНЬ ПУБЛИКАЦИЙ МАГАТЭ ПО ВОПРОСАМ
ХРАНЕНИЯ ОТРАБОТАВШЕГО ТОПЛИВА (продолжение)

Тема/ссылка	Область применения
INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Status of Spent Fuel Dry Storage Concepts: Concerns, Issues and Developments (Концепции сухого хранения отработавшего топлива: проблемы, вопросы и разработки), IAEA-TECDOC-359, IAEA, Vienna (1985).	Эта публикация дает читателю общее представление о различных концепциях сухого хранения и оборудовании, необходимом для его организации. В общих чертах описаны нерешенные технические проблемы, связанные с «сухими» хранилищами, а также демонстрационные программы. Также рассказывается о других видах деятельности, таких как разработка и утверждение стандарта критериев проектирования. Дается обзор стоимости реализации различных концепций.
INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Long Term Wet Spent Nuclear Fuel Storage (Proc of a Technical Committee Meeting, Leningrad, 26–30 May 1986) (Долгосрочное мокрое хранение отработавшего ядерного топлива (материалы совещания технического комитета, Ленинград, 26-30 мая 1986 года)), IAEA-TECDOC-418, IAEA, Vienna (1987).	В этой публикации рассматривается положительный опыт мокрого хранения отработавшего топлива, модернизации существующих бассейнов и применения технологий с целью анализа имеющейся информации о поведении отработавших тепловыделяющих сборок в различных условиях, надежности конструкционных материалов, системах очистки и отвода тепла, методах мониторинга и контроля окружающей среды.
INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Behaviour of Spent Fuel Assemblies During Extended Storage (Final Report of a Co-ordinated Research Programme on BEFAST, Phase 1, 1981–1986) (Поведение отработавших тепловыделяющих сборок при длительном хранении (заключительный доклад по программе координированных исследований БЕФАСТ, этап 1, 1981-1986 годы)), IAEA-TECDOC-414, IAEA, Vienna (1987).	Эта публикация является заключительным докладом по программе координированных исследований МАГАТЭ, посвященной поведению отработавших тепловыделяющих сборок при длительном хранении (БЕФАСТ, этап I, 1981–1986 годы). В ней приведены результаты по технологиям мокрого и сухого хранения отработавшего топлива, полученные от 11 институтов из 10 стран, участвовавших в проекте координированных исследований БЕФАСТ.

ТАБЛИЦА 11. ПЕРЕЧЕНЬ ПУБЛИКАЦИЙ МАГАТЭ ПО ВОПРОСАМ
ХРАНЕНИЯ ОТРАБОТАВШЕГО ТОПЛИВА (продолжение)

Тема/ссылка	Область применения
INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Survey of Experience with Dry Storage of Spent Nuclear Fuel and Update of Wet Storage Experience (Обзор опыта сухого хранения отработавшего ядерного топлива и последняя информация об опыте мокрого хранения), Technical Reports Series No. 290, IAEA, Vienna (1988).	В этом докладе содержатся данные о сухом и мокром хранении, в том числе о мониторинге отработавшего топлива, фактическом поведении отработавшего топлива, характеристиках хранилищ и программах испытаний, а также об аспектах, связанных с консолидацией твэлов, безопасностью, физической защитой, регулируемыми положениями и гарантиями.
INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Decontamination of Transport Casks and of Spent Fuel Storage Facilities (Proc. of a Technical Committee Meeting, Vienna, 4–7 April 1989) (Дезактивация транспортных контейнеров и хранилищ отработавшего топлива (материалы совещания технического комитета, Вена, 4–7 апреля 1989 года)), IAEA-TECDOC-556, IAEA, Vienna (1990).	Цель этой публикации — рассмотреть современное состояние технологии и практики в области дезактивации транспортных контейнеров и хранилищ отработавшего топлива и сформулировать рекомендации относительно направлений международного сотрудничества. Публикация содержит анализ технических докладов, представленных на тематическом техническом совещании, состоявшемся в Вене в апреле 1989 года, а также резюме панельной дискуссии.
INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Methods for Expanding the Capacity of Spent Fuel Storage Facilities (Proc. of a Technical Committee meeting, Vienna, 12–15 June 1989) (Методы увеличения емкости хранилищ отработавшего топлива (материалы совещания технического комитета, Вена, 12–15 июня 1989 года)), IAEA-TECDOC-559, IAEA, Vienna (1990).	Эта публикация имела перед собой следующие цели: обобщить имеющуюся на международном уровне информацию об увеличении емкости хранилищ отработавшего топлива, проанализировать текущее состояние дел в этой области и дать рекомендации потенциальным пользователям по выбору и применению оптимальных методов увеличения емкости хранилищ отработавшего топлива с учетом специфики конкретной страны.

ТАБЛИЦА 11. ПЕРЕЧЕНЬ ПУБЛИКАЦИЙ МАГАТЭ ПО ВОПРОСАМ
ХРАНЕНИЯ ОТРАБОТАВШЕГО ТОПЛИВА (продолжение)

Тема/ссылка	Область применения
INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Guidebook on Spent Fuel Storage — 2nd edn (Руководство по хранению отработавшего топлива, 2-е издание), Technical Reports Series No. 240, IAEA, Vienna (1991).	В этом руководстве обобщены опыт и информация из многих областей, связанных с хранением отработавшего топлива, включая технологию хранения отработавшего топлива, транспортировку отработавшего топлива, экономические аспекты хранения отработавшего топлива, институциональные аспекты и вопросы регулирования и безопасности, а также факторы, используемые при оценке возможных вариантов хранения отработавшего топлива.
INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Guidebook on Non-destructive Examination of Water Reactor Fuel (Руководство по неразрушающему контролю топлива водяных реакторов), Technical Reports Series No. 322, IAEA, Vienna (1991).	В этом руководстве дан всесторонний обзор неразрушающих методов, которые могут применяться в бассейне выдержки отработавшего топлива, а также в горячих камерах.
INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Extended Storage of Spent Fuel (Final Report of a Co-ordinated Research Programme, (BEFAST-II), 1986–1991) (Длительное хранение отработавшего топлива (заключительный доклад по программе координированных исследований (БЕФАСТ-II), 1986–1991 годы)), IAEA-TECDOC-673, IAEA, Vienna (1992).	Эта публикация является заключительным докладом по программе координированных исследований МАГАТЭ, посвященной поведению отработавшего топлива и компонентов хранилищ при длительном хранении (БЕФАСТ-II, 1986–1991 годы). В ней приведены результаты по технологиям мокрого и сухого хранения отработавшего топлива, полученные от 16 организаций, представляющих 13 стран (Аргентину, Венгрию, Германию, Италию, Канаду, Республику Корея, Соединенное Королевство, США, СССР (на тот момент), Финляндию, Швецию и Японию), которые участвовали в программе координированных исследований.

ТАБЛИЦА 11. ПЕРЕЧЕНЬ ПУБЛИКАЦИЙ МАГАТЭ ПО ВОПРОСАМ
ХРАНЕНИЯ ОТРАБОТАВШЕГО ТОПЛИВА (продолжение)

Тема/ссылка	Область применения
INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Away-from-Reactor Storage Concepts and their Implementation (Концепции вне реакторного хранения и их реализация), IAEA-TECDOC-759, IAEA, Vienna (1994).	Эта публикация содержит краткую информацию о совещании технического комитета по концепциям вне реакторного (ВР) хранения и их реализации, состоявшегося в Вене в 1994 году, а также документы, представленные на этом совещании. На него собрались представители большинства стран, эксплуатирующих АЭС, чтобы обсудить четыре вопроса, связанных с ВР хранением: современное положение дел в области ВР хранения; критерии оценки и выбора технологии ВР хранения; ожидаемое развитие событий; возможная международная деятельность в области ВР хранения отработавшего топлива и инициативы МАГАТЭ в этой связи.
INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Remote Technology Related to the Handling, Storage and Disposal of Spent Fuel (Дистанционные технологии, связанные с обращением, хранением и захоронением отработавшего топлива), IAEA-TECDOC-842, IAEA, Vienna (1995).	В этой публикации содержатся документы, представленные на совещании технического комитета МАГАТЭ по дистанционным технологиям, связанным с обращением, хранением и/или захоронением отработавшего топлива, которое состоялось в Альбукерке, штат Нью-Мексико, США, 5–8 декабря 1994 года и было посвящено следующим вопросам: выбор дистанционных технологий; использование дистанционных технологий при обращении с топливом; использование дистанционных технологий для инспектирования и определения характеристик топлива; техническое обслуживание установок при помощи дистанционных технологий; текущее положение дел и прогнозируемые тенденции.

ТАБЛИЦА 11. ПЕРЕЧЕНЬ ПУБЛИКАЦИЙ МАГАТЭ ПО ВОПРОСАМ
ХРАНЕНИЯ ОТРАБОТАВШЕГО ТОПЛИВА (продолжение)

Тема/ссылка	Область применения
INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Further Analysis of Extended Storage of Spent Fuel (Дополнительный анализ проблем длительного хранения отработавшего топлива), IAEA-TECDOC-944, IAEA, Vienna (1997).	Эта публикация является заключительным докладом по программе координированных исследований МАГАТЭ, посвященной поведению отработавших тепловыделяющих сборок при длительном хранении (БЕФАСТ-III, 1991–1996 годы). В ней содержатся результаты анализа технологий мокрого и сухого хранения отработавшего топлива, проведенного 16 организациями, представляющими 13 стран (Венгрию, Германию, Испанию, Канаду, Республику Корея, Российскую Федерацию, Словакию, Соединенное Королевство, США, Финляндию, Францию, Швецию и Японию), которые участвовали в программе координированных исследований в качестве участников или наблюдателей.
INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Durability of Spent Nuclear Fuels and Facility Components in Wet Storage (Долговечность отработавшего топлива и компонентов хранилища при мокром хранении), IAEA-TECDOC-1012, IAEA, Vienna (1998).	В этой публикации приводятся количественные и полуколичественные данные о поведении материалов или ссылки на источники данных для решения широкого круга материаловедческих вопросов, с которыми могут столкнуться органы, принимающие решения, и операторы «мокрых» хранилищ. Она была подготовлена по итогам проекта координированных исследований «Деградация материалов в хранилищах отработавшего топлива под действием облучения».
INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Technologies for Gas Cooled Reactor Decommissioning, Fuel Storage and Waste Disposal (Технологии вывода из эксплуатации, хранения топлива и захоронения отходов газоохлаждаемых реакторов), IAEA-TECDOC-1043, IAEA, Vienna (1998).	В этой публикации представлен обзор программ и проблем вывода из эксплуатации и соответствующих программ и проблем хранения отработавшего топлива и захоронения радиоактивных отходов газоохлаждаемых реакторных установок, включая установки, схожие с ними в технологическом отношении, такие как другие типы реакторов с графитовым замедлителем.

ТАБЛИЦА 11. ПЕРЕЧЕНЬ ПУБЛИКАЦИЙ МАГАТЭ ПО ВОПРОСАМ
ХРАНЕНИЯ ОТРАБОТАВШЕГО ТОПЛИВА (продолжение)

Тема/ссылка	Область применения
INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Spent Fuel Storage and Transport Cask Decontamination and Modification (Дезактивация и модификация транспортно-упаковочных контейнеров для отработавшего топлива), IAEA-TECDOC-1081, IAEA, Vienna (1999).	В этой публикации обобщен международный опыт, связанный с решением проблем загрязнения контейнеров и применением методов их дезактивации. Ее задача — рассказать об имеющихся знаниях и опыте в этой области. В приложениях для наглядности приведены изображения контейнеров нескольких типов.
INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Survey of Wet and Dry Spent Fuel Storage (Обзор вопросов мокрого и сухого хранения отработавшего топлива), IAEA-TECDOC-1100, IAEA, Vienna (1999).	Задача этой публикации — рассмотреть технологию хранения отработавшего топлива энергетических реакторов. В ней рассказывается об опыте стран в области мокрого и сухого хранения отработавшего топлива, а также транспортировки отработавшего топлива.
INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Multi-purpose Container Technologies for Spent Fuel Management (Технологии многоцелевых контейнеров для обращения с отработавшим топливом), IAEA-TECDOC-1192, IAEA, Vienna (2001).	Задача этой публикации — рассмотреть текущее положение дел с использованием двухцелевых и многоцелевых контейнеров и вопросы их внедрения, проектирования и эксплуатации. В приложении приведены примеры типичных конструкций контейнеров.
INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Long Term Storage of Spent Nuclear Fuel — Survey and Recommendations (Долгосрочное хранение отработавшего ядерного топлива — обзор и рекомендации), IAEA-TECDOC-1293, IAEA, Vienna (2002).	В этой публикации рассматриваются тенденции в области хранения отработавшего топлива в течение длительного времени и связанные с этим потенциальные технологические и нормативные последствия. В ней дается обзор мирового положения дел с хранением отработавшего топлива и разбираются технические вопросы, связанные с мокрым и сухим хранением, аспекты, касающиеся НИОКР, а также аспекты нормативного регулирования.

ТАБЛИЦА 11. ПЕРЕЧЕНЬ ПУБЛИКАЦИЙ МАГАТЭ ПО ВОПРОСАМ
ХРАНЕНИЯ ОТРАБОТАВШЕГО ТОПЛИВА (продолжение)

Тема/ссылка	Область применения
INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Effects of Radiation and Environmental Factors on the Durability of Materials in Spent Fuel Storage and Disposal (Воздействие факторов радиации и окружающей среды на долговечность материалов при хранении и захоронении отработавшего топлива), IAEA-TECDOC-1316, IAEA, Vienna (2002).	Это вторая публикация, посвященная результатам проекта координированных исследований «Деграция материалов в хранилищах отработавшего топлива под действием облучения» (первая — IAEA-TECDOC-1012). В ней рассматриваются результаты тематических исследований, которые касаются вопросов, важных с точки зрения поведения материалов при мокром хранении, но также затрагиваются проблемы, касающиеся поведения материалов при сухом хранении и условий в хранилищах, включая воздействие радиации.
INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Spent Fuel Performance Assessment and Research (Оценка и исследования характеристик отработавшего топлива), IAEA-TECDOC-1343, IAEA, Vienna (2003).	В этой публикации представлен обзор технических вопросов, связанных с мокрым и сухим хранением отработавшего топлива, и подытожены цели и основные результаты исследований, проведенных в рамках проекта координированных исследований «Оценка и исследования характеристик отработавшего топлива» (СПАР).
INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, WWER-440 Fuel Rod Experiments Under Simulated Dry Storage Conditions (Эксперименты с твэлами ВВЭР-440 в моделированных условиях сухого хранения), IAEA-TECDOC-1385, IAEA, Vienna (2004).	Задача этой публикации — провести анализ максимальной температуры оболочки отработавшего топлива ВВЭР-440 в начале размещения в «сухом» хранилище с учетом времени, предшествующего охлаждению. В этом техническом документе приведены результаты предварительной характеристики стержней, описания испытаний и результаты характеристики в двух основных температурных режимах.

ТАБЛИЦА 11. ПЕРЕЧЕНЬ ПУБЛИКАЦИЙ МАГАТЭ ПО ВОПРОСАМ
ХРАНЕНИЯ ОТРАБОТАВШЕГО ТОПЛИВА (продолжение)

Тема/ссылка	Область применения
INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Technical, Economic and Institutional Aspects of Regional Spent Fuel Storage Facilities (Технические, экономические и институциональные вопросы, связанные с региональными хранилищами отработавшего топлива), IAEA-TECDOC-1482, IAEA, Vienna (2005).	В этой публикации рассматриваются технические, экономические и институциональные вопросы, связанные с региональными хранилищами отработавшего топлива, на основе результатов серии совещаний по этой теме с участниками из государств — членов МАГАТЭ.
INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Understanding and Managing Ageing of Material in Spent Fuel Storage Facilities (Изучение процесса старения материала и управление этим процессом в хранилищах отработавшего топлива), Technical Reports Series No. 443, IAEA, Vienna (2006).	В этой публикации содержатся результаты проекта координированных исследований по старению материалов в хранилищах отработавшего топлива. Она включает разделы, посвященные современному состоянию знаний о старении отдельных материалов и об управлении старением. В нее также включены краткий раздел, посвященный особым подходам применительно к хранилищам топлива, и некоторые конкретные рекомендации. Кроме того, содержание было расширено с таким расчетом, чтобы заинтересовать тех, кто, возможно, только приступает к созданию программ управления старением.
INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Selection of Away-from-Reactor Facilities for Spent Fuel Storage (Выбор вне реакторных объектов для хранения отработавшего топлива), IAEA-TECDOC-1558, IAEA, Vienna (2007).	Задача этой публикации — проанализировать ключевые факторы, связанные с выбором возможного ВР объекта для хранения отработавшего топлива, а также рассмотреть общую методологию принятия решений, дав тем самым рекомендации в отношении практических подходов к реализации проектов.

ТАБЛИЦА 11. ПЕРЕЧЕНЬ ПУБЛИКАЦИЙ МАГАТЭ ПО ВОПРОСАМ
ХРАНЕНИЯ ОТРАБОТАВШЕГО ТОПЛИВА (продолжение)

Тема/ссылка	Область применения
INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Operation and Maintenance of Spent Fuel Storage and Transportation Casks/ Containers (Эксплуатация и техническое обслуживание хранилищ отработавшего топлива и транспортных контейнеров), IAEA-TECDOC-1532, IAEA, Vienna (2007).	Эта публикация представляет собой всесторонний обзор информации об эксплуатации и техническом обслуживании контейнеров, связанных с хранением отработавшего топлива. Она опирается на общие знания, почерпнутые из опыта и практических применений в отрасли, и призвана служить основой для более эффективного планирования и реализации соответствующих проектов.
INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Optimization Strategies for Cask Design and Container Loading in Long Term Spent Fuel Storage (Стратегии оптимизации конструкции контейнеров и загрузки контейнеров при долгосрочном хранении отработавшего топлива), IAEA-TECDOC-1523, IAEA, Vienna (2007).	В этой публикации описывается процесс оптимизации проектирования, лицензирования и использования контейнеров, а также три основные группы мероприятий по оптимизации с точки зрения соответствующих технических аспектов, таких как критичность, защита, конструкция, эксплуатация, техническое обслуживание и извлекаемость.
INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Spent Fuel Performance Assessment and Research Final Report of a Coordinated Research Project (SPAR-II) (Оценка и исследования характеристик отработавшего топлива: заключительный доклад по проекту координированных исследований (СПАР-II)), IAEA-TECDOC-1680, IAEA, Vienna (2012).	В этой публикации представлены результаты проекта координированных исследований МАГАТЭ СПАР-II и содержится полезная информация о целостности и деградации отработавшего топлива в процессе хранения. Собранный опыт и знания помогают выявить проблемы, возникающие при долгосрочном хранении, и дают представление о современном состоянии исследований, посвященных характеристикам отработавшего топлива в контексте долгосрочного хранения.

ТАБЛИЦА 11. ПЕРЕЧЕНЬ ПУБЛИКАЦИЙ МАГАТЭ ПО ВОПРОСАМ
ХРАНЕНИЯ ОТРАБОТАВШЕГО ТОПЛИВА (продолжение)

Тема/ссылка	Область применения
INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Spent Fuel Storage Operation-Lessons Learned (Эксплуатация хранилищ отработавшего топлива — извлеченные уроки), IAEA-TECDOC-1725, IAEA, Vienna (2013).	В этой публикации собран опыт государств-членов в области проектирования, строительства и эксплуатации хранилищ отработавшего топлива. В ней обобщаются данные об усовершенствованиях, внесенных в проекты новых хранилищ за последние пятьдесят лет, описываются положительные практики в области эксплуатации и передовые конструкции, а также рассказывается об извлеченных уроках. Представленная информация поможет тем государствам-членам, у которых уже имеются мощности для хранения ОЯТ, а также тем, кто планирует создавать такие мощности, принимать обоснованные решения в процессе обращения с ОЯТ.
INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Spent Fuel Performance Assessment and Research – Final Report of a Coordinated Research Project on Spent Fuel Performance Assessment and Research (SPAR III) 2009–2014, (Оценка и исследования характеристик отработавшего топлива — заключительный доклад по проекту координированных исследований «Оценка и исследования характеристик отработавшего топлива» (СПАР-III), 2009–2014 годы) IAEA-TECDOC-1771, IAEA, Vienna (2015).	В этой публикации содержатся обновленные данные о национальных стратегиях обращения с отработавшим топливом, характеристиках отработавшего топлива и систем мокрого и сухого хранения, а также о национальных НИОКР, связанных с хранением отработавшего топлива. В ней приведена полезная информация о переориентации гидридов и влиянии этого явления на топливо и компоненты системы хранения, новых проблемах, связанных с очень длительным хранением, а также о хранении металлического топлива в закрытой системе. Опыт и знания участвующих в проекте стран помогут государствам-членам выявить проблемы, возникающие при долгосрочном хранении, и понять современное состояние исследований, посвященных характеристикам отработавшего топлива в контексте долгосрочного хранения.

ТАБЛИЦА 11. ПЕРЕЧЕНЬ ПУБЛИКАЦИЙ МАГАТЭ ПО ВОПРОСАМ
ХРАНЕНИЯ ОТРАБОТАВШЕГО ТОПЛИВА (продолжение)

Тема/ссылка	Область применения
INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Evaluation of Conditions for Hydrogen Induced Degradation of Zirconium Alloys during Fuel Operation and Storage. Final Report of a Coordinated Research Project 2011–2015 (Оценка условий деградации циркониевых сплавов в водородной среде при эксплуатации и хранении топлива. Заключительный доклад по проекту координированных исследований, 2011–2015 годы), IAEA-TECDOC-1781, IAEA, Vienna (2015).	Эта публикация содержит краткое описание исследовательской работы, проведенной в рамках проекта координированных исследований МАГАТЭ по оценке условий деградации циркониевых сплавов в водородной среде в процессе эксплуатации и хранения топлива, а также подробные сведения об экспериментальных процедурах оценки пороговых условий для ЗГР, в результате которых был получен набор данных для этих материалов.
INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Demonstrating Performance of Spent Fuel and Related Storage System Components during Very Long Term Storage Final Report of a Coordinated Research Project (Демонстрация характеристик отработавшего топлива и соответствующих компонентов системы хранения при очень длительном хранении. Заключительный доклад по проекту координированных исследований), IAEA-TECDOC-1878, IAEA, Vienna (2019).	Эта публикация содержит краткое описание работы, проведенной в рамках проекта координированных исследований МАГАТЭ по безопасному и надежному обращению с ОЯТ, и способствует достижению общей цели — продемонстрировать характеристики ОЯТ и соответствующих компонентов систем хранения в течение длительного времени, — а также облегчает передачу этих знаний государствам-членам. К числу технических областей, рассмотренных участниками проекта, относились потенциальные механизмы деградации металлических и бетонных контейнеров, такие как КРН, долгосрочная целостность и характеристики оболочек твэлов, термомеханическое поведение металлических уплотнений и долгосрочная способность к защите от гамма- и нейтронного излучения.

ТАБЛИЦА 11. ПЕРЕЧЕНЬ ПУБЛИКАЦИЙ МАГАТЭ ПО ВОПРОСАМ
ХРАНЕНИЯ ОТРАБОТАВШЕГО ТОПЛИВА (продолжение)

Тема/ссылка	Область применения
INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, INPRO Methodology for Sustainability Assessment of Nuclear Energy Systems: Safety of Nuclear Fuel Cycle Facilities. INPRO Manual (Методология ИНПРО для оценки устойчивости ядерно-энергетических систем: безопасность установок ядерного топливного цикла. Руководство ИНПРО), IAEA-TECDOC-1903, IAEA, Vienna (2020).	Эта публикация содержит руководство по оценке устойчивости ядерно-энергетической системы с точки зрения безопасности установок ядерного топливного цикла. В ней рассматриваются установки ядерного топливного цикла, которые потенциально могут быть частью ядерно-энергетической системы, такие как предприятия по добыче, переработке, очистке, конверсии и обогащению руды, изготовлению топлива, хранению отработавшего топлива и переработке отработавшего топлива.
INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Methodology for a Safety Case of a Dual Purpose Cask for Storage and Transport of Spent Fuel (Методология обоснования безопасности двухцелевого контейнера для хранения и транспортировки отработавшего топлива), IAEA-TECDOC-1938, IAEA, Vienna (2020).	В этой публикации даются практические рекомендации по структуре и содержанию комплексного обоснования безопасности двухцелевого контейнера со ссылкой на существующие требования МАГАТЭ в отношении лицензирования и использования транспортно-упаковочных контейнеров для отработавшего топлива.

ТАБЛИЦА 11. ПЕРЕЧЕНЬ ПУБЛИКАЦИЙ МАГАТЭ ПО ВОПРОСАМ
ХРАНЕНИЯ ОТРАБОТАВШЕГО ТОПЛИВА (продолжение)

Тема/ссылка	Область применения
МЕЖДУНАРОДНОЕ АГЕНТСТВО ПО АТОМНОЙ ЭНЕРГИИ, Хранение отработавшего топлива до отправки на переработку или захоронение, Серия изданий МАГАТЭ по ядерной энергии, № NF-T-3.3, МАГАТЭ, Вена (2021).	В этой публикации разбираются вопросы и проблемы, имеющие отношение к разработке и реализации схем, политики, стратегий и программ, обеспечивающих безопасное, надежное и эффективное хранение отработавшего топлива до его отправки на переработку или захоронение. Ее целевой аудиторией являются политики и руководящие работники, которые должны быть осведомлены о скрытых рисках и затратах, связанных со сроками принятия решений по определению и достижению конечной точки в процессе обращения с отработавшим топливом (такой как переработка или захоронение), в целях обеспечения ответственного и устойчивого использования ядерной энергии. Эта публикация поможет работникам ядерной отрасли донести мысль о важности ясной, заслуживающей доверия и устойчивой стратегии обращения с отработавшим топливом и побудит руководство отрасли изучить разные подходы, которые могут оказаться полезными для устранения неопределенностей, вызванных неизвестной длительностью хранения и неясной конечной точкой обращения с отработавшим топливом.
МЕЖДУНАРОДНОЕ АГЕНТСТВО ПО АТОМНОЙ ЭНЕРГИИ, Поведение отработавшего топлива ядерных энергетических реакторов при хранении. Выдержки из заключительных докладов проектов координированных исследований по изучению поведения отработавших тепловыделяющих сборок при хранении (БЕФАСТ I–III) и оценке и исследованию характеристик отработавшего топлива (СПАР I–III), 1981–2014 годы, IAEA-TECDOC-1862, МАГАТЭ, Вена (2021).	В этой публикации собраны результаты серий проектов координированных исследований БЕФАСТ и СПАР, проводившихся в период 1981–2014 годов, и вся необходимая информация сведена в один источник, снабженный соответствующими ссылками. Приведенная в этой публикации техническая информация будет особенно полезной для экспертов, выполняющих оценки безопасности.

ТАБЛИЦА 11. ПЕРЕЧЕНЬ ПУБЛИКАЦИЙ МАГАТЭ ПО ВОПРОСАМ
ХРАНЕНИЯ ОТРАБОТАВШЕГО ТОПЛИВА (продолжение)

Тема/ссылка	Область применения
INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Spent Fuel Performance Assessment and Research, Final Report of a Coordinated Research Project (SPAR-IV) (Оценка и исследования характеристик отработавшего топлива: заключительный доклад по проекту координированных исследований (СПАР-IV)), IAEA-TECDOC-1975, IAEA, Vienna (2021).	В этой публикации дан обзор технических вопросов, связанных с мокрым и сухим хранением отработавшего топлива. Он основан на результатах, полученных участвующими государствами-членами в ходе проекта координированных исследований МАГАТЭ по изучению характеристик отработавшего топлива и систем хранения.
Нормы безопасности, руководства и доклады по безопасности (хранение и транспортировка)	
МЕЖДУНАРОДНОЕ АГЕНТСТВО ПО АТОМНОЙ ЭНЕРГИИ, Основопологающие принципы безопасности, Основы безопасности, Серия норм безопасности МАГАТЭ, № SF-1, МАГАТЭ, Вена (2007).	В этой публикации излагаются основополагающая цель безопасности и десять соответствующих принципов безопасности, а также кратко описываются их предназначение и цель. Они применяются в соответствующих случаях на протяжении всего жизненного цикла всех имеющихся и новых установок, включая хранилища отработавшего топлива, используемых в мирных целях, и на протяжении всей нынешней и новой деятельности в мирных целях, а также в отношении защитных мер для уменьшения существующих радиационных рисков.

ТАБЛИЦА 11. ПЕРЕЧЕНЬ ПУБЛИКАЦИЙ МАГАТЭ ПО ВОПРОСАМ
ХРАНЕНИЯ ОТРАБОТАВШЕГО ТОПЛИВА (продолжение)

Тема/ссылка	Область применения
МЕЖДУНАРОДНОЕ АГЕНТСТВО ПО АТОМНОЙ ЭНЕРГИИ, Обращение с радиоактивными отходами перед захоронением, Общие требования безопасности, часть 5, GSR Part 5, МАГАТЭ, Вена (2010).	В этой публикации категории требований безопасности изложены согласованные на международном уровне требования к обращению с радиоактивными отходами перед их захоронением. В ней установлены императивы в области безопасности, на основе которых может осуществляться проектирование, эксплуатация и регулирование деятельности установок. Обращение с радиоактивными отходами перед захоронением как термин, употребляемый в этой публикации категории требований безопасности, охватывает все стадии обращения с радиоактивными отходами от их образования до захоронения, включая переработку (предварительную обработку, обработку и кондиционирование), хранение и перевозку.
МЕЖДУНАРОДНОЕ АГЕНТСТВО ПО АТОМНОЙ ЭНЕРГИИ, Система управления для ядерных установок, руководство по безопасности, Серия норм безопасности МАГАТЭ, № GS-G-3.5, МАГАТЭ, Вена (2014).	Это руководство по безопасности издано в дополнение к публикации категории требований безопасности «Система управления для установок и деятельности», Серия норм безопасности МАГАТЭ, № GS-R-3. Оно содержит подробные рекомендации в отношении ядерных установок, дополняющие общие рекомендации, приведенные в публикации Серии норм безопасности МАГАТЭ, № GS-G-3.1. Это руководство по безопасности может применяться в течение всего срока службы ядерной установки.
INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Criticality Safety in the Handling of Fissile Material, Specific Safety Guide (Безопасность по критичности при обращении с делящимся материалом, специальное руководство по безопасности), Safety Standards Series No. SSG-27, IAEA, Vienna (2014).	В этом специальном руководстве по безопасности содержатся указания и рекомендации по выполнению соответствующих требований по обеспечению подкритичности при работе с делящимся материалом и по планированию мер реагирования на аварии с возникновением критичности. Эти требования относятся к крупным коммерческим предприятиям, таким как ядерные установки, деятельность которых связана с поставками свежего топлива, обращением с отработавшим топливом и радиоактивными отходами, содержащими делящиеся нуклиды, включая обращение, переработку, использование, хранение и захоронение таких отходов.

ТАБЛИЦА 11. ПЕРЕЧЕНЬ ПУБЛИКАЦИЙ МАГАТЭ ПО ВОПРОСАМ ХРАНЕНИЯ ОТРАБОТАВШЕГО ТОПЛИВА (продолжение)

Тема/ссылка	Область применения
INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Ageing Management for Nuclear Power Plants: International Generic Ageing Lessons Learned (IGALL) (Управление старением атомных электростанций: Международная программа по общим урокам, связанным со старением (ИГАЛЛ)), Safety Reports Series No. 82, IAEA, Vienna (2015).	Эта публикация закладывает общую международно согласованную основу для того, что должна представлять собой приемлемая ПУС, и содержит базу знаний по управлению старением, необходимую для проектирования новых установок и анализа проекта и безопасности, а также призвана служить дорожной картой для поиска доступной информации по управлению старением. В ней рассматривается управление старением пассивных и активных конструкций и элементов реакторов с водным замедлителем, которые могут прямо или косвенно влиять на безопасность эксплуатации станции и которые подвержены деградации вследствие старения. Представленная информация актуальна для станций, работающих в режиме нормальной эксплуатации, станций, рассматривающих возможность долгосрочной эксплуатации, а также для новых станций, в том числе станций новых конструкций.
МЕЖДУНАРОДНОЕ АГЕНТСТВО ПО АТОМНОЙ ЭНЕРГИИ, Оценка безопасности установок и деятельности, Общие требования безопасности, № GSR Part 4 (Rev. 1), МАГАТЭ, Вена (2016).	В этой публикации изложены универсально применимые требования, которые необходимо выполнять при проведении оценок безопасности установок и деятельности, с уделением особого внимания глубокоэшелонированной защите, количественному анализу и применению дифференцированного подхода к широкому спектру рассматриваемых установок и видов деятельности. В 2011 году был начат пересмотр публикаций категории требований безопасности после аварии на АЭС «Фукусима-дайити» в Японии. Этот пересмотр охватывал, среди прочих тем, вопросы, касающиеся структуры регулирования, аварийной готовности и реагирования, ядерной безопасности, а также инженерно-технические вопросы (выбор и оценка площадки, оценка экстремальных опасных природных явлений, включая их комбинированное воздействие, управление тяжелыми авариями, обесточивание станции, прекращение теплоотвода, накопление взрывчатых газов, поведение ядерного топлива и обеспечение безопасности хранения отработавшего топлива).

ТАБЛИЦА 11. ПЕРЕЧЕНЬ ПУБЛИКАЦИЙ МАГАТЭ ПО ВОПРОСАМ
ХРАНЕНИЯ ОТРАБОТАВШЕГО ТОПЛИВА (продолжение)

Тема/ссылка	Область применения
МЕЖДУНАРОДНОЕ АГЕНТСТВО ПО АТОМНОЙ ЭНЕРГИИ, Лидерство и менеджмент для обеспечения безопасности, Общие требования безопасности, № GSR Part 2, МАГАТЭ, Вена (2017).	В этой публикации категории требований безопасности устанавливаются требования, необходимые для выполнения принципа 3 основополагающих принципов безопасности в отношении формирования, устойчивого поддержания и постоянного совершенствования лидерства и менеджмента для обеспечения безопасности и создания интегрированной системы менеджмента. Эти требования относятся к тем типам установок и видам деятельности, которые создают радиационные риски, включая объекты для хранения ОЯТ.
МЕЖДУНАРОДНОЕ АГЕНТСТВО ПО АТОМНОЙ ЭНЕРГИИ, Безопасность установок ядерного топливного цикла, Конкретные требования безопасности, № SSR-4, МАГАТЭ, Вена (2018).	Эта публикация категории требований безопасности закладывает основу для обеспечения безопасности и для проведения оценок безопасности на всех этапах жизненного цикла установок ядерного топливного цикла. Изложен широкий спектр требований в отношении оценки площадки, проектирования, строительства, ввода в эксплуатацию, эксплуатации и подготовки к выводу из эксплуатации, которые должны выполняться для обеспечения безопасности. Эти требования применяются к установкам по конверсии, обогащению, изготовлению ядерного топлива, хранению свежего и отработавшего топлива, переработке, подготовке к захоронению и установкам для проведения соответствующих НИОКР.

ТАБЛИЦА 11. ПЕРЕЧЕНЬ ПУБЛИКАЦИЙ МАГАТЭ ПО ВОПРОСАМ
ХРАНЕНИЯ ОТРАБОТАВШЕГО ТОПЛИВА (продолжение)

Тема/ссылка	Область применения
МЕЖДУНАРОДНОЕ АГЕНТСТВО ПО АТОМНОЙ ЭНЕРГИИ, Правила безопасной перевозки радиоактивных материалов, Конкретные требования безопасности, Серия норм безопасности МАГАТЭ, № SSR-6 (Rev. 1), издание 2018 года, МАГАТЭ, Вена (2019).	Эта публикация представляет собой последнюю редакцию документа № SSR-6 Серии норм безопасности МАГАТЭ «Правила безопасной перевозки радиоактивных материалов». Эти правила применяются к перевозке радиоактивного материала всеми видами наземного, водного или воздушного транспорта, включая перевозку, связанную с использованием радиоактивного материала. Под перевозкой понимаются все операции и условия, связанные с перемещением радиоактивного материала и имеющие отношение к такому перемещению. Сюда входят проектирование, изготовление, техническое обслуживание и ремонт упаковочного комплекта, а также подготовка, отправление, погрузка, перевозка, включая транзитное хранение, разгрузка и приемка в конечном пункте назначения грузов радиоактивного материала и упаковок.
INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Storage of Spent Nuclear Fuel (Specific Safety Guide) (Хранение отработавшего ядерного топлива (специальное руководство по безопасности)), Safety Standards Series No. SSG-15 (Rev. 1), Vienna (2020).	Эта публикация представляет собой новое, исправленное издание публикации № SSG-15 Серии норм безопасности МАГАТЭ и содержит рекомендации и руководящие указания по хранению ОЯТ. Она охватывает все типы хранилищ и все виды отработавшего топлива АЭС и исследовательских реакторов. В ней учтены более длительные периоды хранения, превышающие первоначальный проектный срок службы хранилища, которые стали необходимыми ввиду задержек с созданием пунктов захоронения и сокращения объемов деятельности по переработке. В ней также рассматриваются новшества, связанные с ядерным топливом, такие как более высокое обогащение, внедрение MOX-топлива и повышение глубины выгорания. Даются руководящие указания в отношении всех стадий жизненного цикла хранилища отработавшего топлива — от планирования, выбора площадки и проектирования до эксплуатации и вывода из эксплуатации.

ТАБЛИЦА 11. ПЕРЕЧЕНЬ ПУБЛИКАЦИЙ МАГАТЭ ПО ВОПРОСАМ
ХРАНЕНИЯ ОТРАБОТАВШЕГО ТОПЛИВА (продолжение)

Тема/ссылка	Область применения
INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Design of Fuel Handling and Storage Systems for Nuclear Power Plants (Проектирование систем обращения с топливом и его хранения на атомных электростанциях), Safety Standards Series No. SSG-63, Vienna (2020).	Это руководство по безопасности содержит рекомендации по выполнению требований документа Серии норм безопасности МАГАТЭ, № SSR-2/1 (Rev. 1), «Безопасность атомных электростанций: проектирование» в части, касающейся систем обращения с топливом и хранения топлива. В этой публикации рассматриваются вопросы проектирования систем обращения с топливом и хранения топлива, которое остается частью эксплуатационной деятельности на ядерном реакторе. Она охватывает следующие этапы обращения с топливом и его хранения на АЭС: прием, хранение и инспектирование свежего топлива перед использованием и перемещение свежего топлива в реактор; извлечение облученного топлива из реактора и перемещение облученного топлива в бассейн выдержки отработавшего топлива; повторную загрузку облученного топлива из бассейна выдержки отработавшего топлива в реактор. Кроме того, приводятся рекомендации по хранению, инспектированию и ремонту облученного или отработавшего топлива в бассейне выдержки отработавшего топлива и подготовке этого топлива к извлечению из бассейна выдержки отработавшего топлива, а также по манипулированию с топливными контейнерами в бассейне выдержки отработавшего топлива и их перемещению.
INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Methodology for a Safety Case of a Dual Purpose Cask for Storage and Transport of Spent Fuel. Report of a WASSC/TRANSSC Joint Working Group (Методология обоснования безопасности двухцелевого контейнера для хранения и транспортировки отработавшего топлива. Доклад совместной рабочей группы ВАССК/ТРАНССК), IAEA-TECDOC No. 1938, Vienna (2020).	В этой публикации даются практические рекомендации по структуре и содержанию комплексного обоснования безопасности ДЦК со ссылкой на существующие требования МАГАТЭ в отношении лицензирования и использования транспортно-упаковочных контейнеров для отработавшего топлива.

ТАБЛИЦА 11. ПЕРЕЧЕНЬ ПУБЛИКАЦИЙ МАГАТЭ ПО ВОПРОСАМ ХРАНЕНИЯ ОТРАБОТАВШЕГО ТОПЛИВА (продолжение)

Тема/ссылка	Область применения
Глоссарий по вопросам безопасности	
МЕЖДУНАРОДНОЕ АГЕНТСТВО ПО АТОМНОЙ ЭНЕРГИИ, Глоссарий МАГАТЭ по вопросам безопасности: терминология, используемая в области ядерной безопасности и радиационной защиты, издание 2018 года, МАГАТЭ, Вена (2023)	В Глоссарии МАГАТЭ по вопросам безопасности приведены определения и пояснения технических терминов, используемых в нормах безопасности МАГАТЭ и других публикациях МАГАТЭ по вопросам безопасности, и представлена информация об их употреблении. Это новое издание Глоссария МАГАТЭ по вопросам безопасности, который первоначально увидел свет в 2007 году. Оно было пересмотрено и актуализировано с учетом новой терминологии и ее употребления в нормах безопасности, выпущенных в период 2007–2018 годов.
Международные конференции по вопросам обращения с отработавшим топливом	
INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Safety and Engineering Aspects of Spent Fuel Storage (Аспекты безопасности и инженерно-технические аспекты хранения отработавшего топлива) (материалы международной конференции в Вене, 10–14 октября 1994 года), IAEA, Vienna (1995).	Материалы симпозиума, организованного совместно с АЯЭ в Вене 10–14 октября 1994 года. Симпозиум был организован для того, чтобы дать возможность участникам обмениваться информацией о современном состоянии и перспективах хранения отработавшего топлива, обсудить ситуацию в мире и основные факторы, влияющие на национальную политику в этой области, и наметить важнейшие направления будущих национальных усилий и международного сотрудничества в этой сфере.
INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Storage of Spent Fuel from Power Reactors (Хранение отработавшего топлива энергетических реакторов) (материалы симпозиума в Вене, 9–13 ноября 1998 года), IAEA-TECDOC-1089 (1999).	Этот симпозиум дал возможность участникам обмениваться информацией о современном состоянии и перспективах хранения отработавшего топлива, обсудить ситуацию в мире и основные факторы, влияющие на национальную политику в этой области, и наметить важнейшие направления будущих национальных усилий и международного сотрудничества в этой сфере.

ТАБЛИЦА 11. ПЕРЕЧЕНЬ ПУБЛИКАЦИЙ МАГАТЭ ПО ВОПРОСАМ
ХРАНЕНИЯ ОТРАБОТАВШЕГО ТОПЛИВА (продолжение)

Тема/ссылка	Область применения
INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Storage of Spent Fuel from Power Reactors (Хранение отработавшего топлива энергетических реакторов) (материалы международной конференции, Вена, Австрия, 2–6 июня 2003 года), IAEA, Vienna (2003).	Международная конференция по хранению отработавшего топлива энергетических реакторов дала возможность участникам обмениваться информацией о современном состоянии и перспективах хранения отработавшего топлива, обсудить ситуацию в мире и основные факторы, влияющие на национальную политику в этой области, и наметить важнейшие направления будущих национальных усилий и международного сотрудничества в этой сфере.
INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Management of Spent Fuel from Nuclear Power Reactors (Обращение с отработавшим топливом ядерных энергетических реакторов) (материалы международной конференции в Вене, Австрия, 19–22 июня 2006 года), IAEA, Vienna (2007).	На этой конференции рассматривались актуальные стратегические вопросы, в частности многонациональные подходы и международное сотрудничество, в области обращения с отработавшим топливом, включая проблематику усовершенствованных топливных циклов. В программу конференции входило также обсуждение международного режима безопасности, оценка вопросов безопасности, имеющих отношение к безопасности по критичности и кредиту выгорания, а также вопросов долгосрочного лицензирования хранилищ отработавшего топлива. Были также рассмотрены технические проблемы хранения отработавшего топлива, в том числе вопросы, касающиеся хранилища, контейнеров для хранения и топлива.
INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Management of Spent Fuel from Nuclear Power Reactors (Обращение с отработавшим топливом ядерных энергетических реакторов) (материалы международной конференции в Вене, Австрия, 31 мая — 4 июня 2010 года), IAEA, Vienna (2015).	В этой публикации содержатся материалы международной конференции по обращению с отработавшим топливом, организованной МАГАТЭ в сотрудничестве с АЯЭ. Программой конференции был охвачен широкий спектр тем: национальные стратегии, безопасность и вопросы регулирования, транспорт, технические инновации, поведение топлива и материалов, опыт эксплуатации хранилищ, новые разработки в области топлива и технологий переработки, а также долгосрочное хранение и захоронение.

ТАБЛИЦА 11. ПЕРЕЧЕНЬ ПУБЛИКАЦИЙ МАГАТЭ ПО ВОПРОСАМ
ХРАНЕНИЯ ОТРАБОТАВШЕГО ТОПЛИВА (продолжение)

Тема/ссылка	Область применения
INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Management of Spent Fuel from Nuclear Power Reactors: An Integrated Approach to the Back End of the Fuel Cycle (Обращение с отработавшим топливом ядерных энергетических реакторов: комплексный подход к заключительной стадии топливного цикла) (материалы международной конференции в Вене, Австрия, 15–19 июня 2015 года), IAEA, Vienna (2019).	В этих материалах представлены результаты международной конференции МАГАТЭ 2015 года по обращению с отработавшим топливом ядерных энергетических реакторов. На ней были рассмотрены и обсуждены достижения и уроки, связанные с конечной стадией ядерного топливного цикла, и соответствующие проблемы.
INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Management of Spent Fuel from Nuclear Power Reactors: Learning from the Past, Enabling the Future (Обращение с отработавшим топливом ядерных энергетических реакторов: уроки прошлого на благо будущего) (материалы международной конференции в Вене, Австрия, 24–28 июня 2019 года), Vienna (2020).	В этой публикации представлены материалы состоявшейся в 2019 году Международной конференции МАГАТЭ по обращению с отработавшим топливом ядерных энергетических реакторов на тему «Уроки прошлого на благо будущего». Конференция была призвана стать площадкой для обмена информацией о национальных стратегиях обращения с отработавшим топливом и о том, какое влияние на них может оказывать меняющаяся структура энергопроизводства и каким образом они содействуют достижению национальных энергетических целей. На конференции рассматривался широкий спектр вопросов: все этапы обращения с отработавшим топливом на основе прошлых, современных и будущих технологий и то, как на это могут повлиять решения, принимаемые на других стадиях ядерного топливного цикла.

ТАБЛИЦА 11. ПЕРЕЧЕНЬ ПУБЛИКАЦИЙ МАГАТЭ ПО ВОПРОСАМ
ХРАНЕНИЯ ОТРАБОТАВШЕГО ТОПЛИВА (продолжение)

Тема/ссылка	Область применения
Затраты	
INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Cost Analysis Methodology of Spent Fuel Storage (Методология анализа затрат на хранение отработавшего топлива), Technical Reports Series No. 361, IAEA, Vienna (1994).	В этом докладе представлена методология расчета стоимости различных вариантов промежуточного хранения отработавшего топлива, произведенного в активных зонах реакторов. В нем рассматриваются различные технические особенности и варианты хранения и определяются факторы, влияющие на все эти варианты. Далее в докладе анализируются основные категории затрат, рассчитывается чистая приведенная стоимость каждого варианта и определяется выравненная стоимость. Он также содержит анализ чувствительности, учитывающий неопределенность различных смет расходов.
INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Costing of Spent Fuel Storage (Расчет стоимости хранения отработавшего топлива), Nuclear Energy Series NF-T-3.5, IAEA, Vienna (2009).	Эта публикация представляет собой руководство по методам оценки стоимости хранения отработавшего топлива. Она включает в себя разбивку базовых данных о стоимости затрат и методы анализа затрат для оценки проектов и сравнения различных вариантов. Кроме того, рассматриваются финансовые и связанные с бизнесом аспекты хранения отработавшего топлива. В приложениях приведены обзоры основных программных средств и примеры расчетов.
INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Costing Methods and Funding Schemes for Radioactive Waste Disposal Programmes (Методы расчета стоимости и схемы финансирования программ захоронения радиоактивных отходов), Nuclear Energy Series NW-T-1.25, IAEA, Vienna (2020).	Эта публикация дает государствам-членам информацию о составлении сметы расходов на программу захоронения и создании механизмов финансирования. Публикация применима ко всем категориям отходов и к обоим типам захоронения — приповерхностному и геологическому. В ней содержатся соответствующие примеры и проводится разбор конкретных национальных программ. Данные о расходах приводятся для того, чтобы дать представление о возможной стоимости определенных частей или составляющих программы захоронения, а не для сравнения стоимости разных программ захоронения.

ТАБЛИЦА 11. ПЕРЕЧЕНЬ ПУБЛИКАЦИЙ МАГАТЭ ПО ВОПРОСАМ
ХРАНЕНИЯ ОТРАБОТАВШЕГО ТОПЛИВА (продолжение)

Тема/ссылка	Область применения
Поврежденное топливо	
INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Management of Severely Damaged Nuclear Fuel and Related Waste (Обращение с сильно поврежденным ядерным топливом и соответствующими отходами), Technical Reports Series No. 321, IAEA, Vienna (1991).	Эта публикация представляет собой всеобъемлющий обзор идей и принципов управления, связанных с послеаварийной деятельностью на площадке АЭС, где имело место значительное повреждение топлива. В ней сочетается информация о регламентах аварийного реагирования и планах действий за пределами площадки с рассмотрением опыта деятельности на площадке. Она представляет собой справочное руководство по требованиям, возникающим по завершении критической фазы аварийного реагирования.
INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Management of Damaged Spent Nuclear Fuel (Обращение с поврежденным отработавшим ядерным топливом), Nuclear Energy Series NF-T-3.6, IAEA, Vienna (2009).	Эта публикация помогает определить, допустимо ли использование топлива с определенным типом дефекта и не требует ли такое топливо нестандартного обращения. Она призвана облегчить оценку затрат и выгод, связанных с концептуальными проектами или модификациями проектов систем хранения или транспортировки, а также помочь в выборе подходящих методов идентификации поврежденного ОЯТ и обращения с ним.
Привлечение заинтересованных сторон	
INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Stakeholder Involvement Throughout the Life Cycle of Nuclear Facilities (Привлечение заинтересованных сторон на протяжении всего жизненного цикла ядерных установок), IAEA Nuclear Energy Series NG-T-1.4, IAEA, Vienna (2011).	Признавая существование неодинаковых национальных подходов, авторы этой публикации предлагают план для эффективного привлечения заинтересованных сторон на всех основных стадиях жизненного цикла ядерных установок (т.е. строительство, эксплуатация, обращение с радиоактивными отходами, вывод из эксплуатации) и использования современных методов для реализации программ привлечения заинтересованных сторон. Эта публикация демонстрирует важность привлечения заинтересованных сторон на протяжении всего жизненного цикла ядерных установок, в том числе действующих реакторов, промежуточных хранилищ отработавшего топлива и пунктов окончательного захоронения радиоактивных отходов.

ТАБЛИЦА 11. ПЕРЕЧЕНЬ ПУБЛИКАЦИЙ МАГАТЭ ПО ВОПРОСАМ
ХРАНЕНИЯ ОТРАБОТАВШЕГО ТОПЛИВА (продолжение)

Тема/ссылка	Область применения
Аварийная готовность	
МЕЖДУНАРОДНОЕ АГЕНТСТВО ПО АТОМНОЙ ЭНЕРГИИ, Меры по защите населения в случае тяжелой аварийной ситуации на легководном реакторе, EPR-NPP-PPA, МАГАТЭ, Вена (2015).	Эта публикация является частью Серии изданий МАГАТЭ по аварийной готовности и реагированию (АГР). В ней содержится основная информация и критерии, необходимые руководящему органу для организации защиты населения во время аварийной ситуации, вызванной серьезным повреждением топлива в активной зоне LWR или реактора с графитовым замедлителем (РБМК) либо в бассейне выдержки отработавшего топлива. Эта публикация касается реакторов мощностью более 30 МВт (эл.) (100 МВт (тепл.)) и бассейнов выдержки отработавшего топлива, содержащих реакторное топливо, которое нуждается в активном охлаждении для предотвращения перегрева и повреждения топлива. В ней учтены уроки реагирования на аварийные ситуации прошлых лет, включая аварию на АЭС «Фукусима-дайити» компании ТЕРПО в 2011 году, а также результаты последних исследований.
Гарантии	
INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, International Safeguards in the Design of Facilities for Long Term Spent Fuel Management (Международные гарантии при проектировании установок для долгосрочного обращения с отработавшим топливом), IAEA Nuclear Energy Series NF-T-3.1, IAEA, Vienna (2018).	В этой публикации даются руководящие указания по учету гарантий в процессе проектирования и строительства ядерных установок. Она предназначена главным образом для организаций, занимающихся проектированием и эксплуатацией установок для долгосрочного обращения с отработавшим топливом. В ней рассматриваются как общие, так и особые соображения в отношении применения гарантий к транспортировке, мокрому и сухому хранению отработавшего топлива.

ТАБЛИЦА 11. ПЕРЕЧЕНЬ ПУБЛИКАЦИЙ МАГАТЭ ПО ВОПРОСАМ
ХРАНЕНИЯ ОТРАБОТАВШЕГО ТОПЛИВА (продолжение)

Тема/ссылка	Область применения
Вывод из эксплуатации хранилищ	
INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Decommissioning of Nuclear Facilities Other Than Reactors (Вывод из эксплуатации ядерных установок помимо реакторов), Technical Reports Series No. 386, IAEA, Vienna (1998).	Эта публикация специально посвящена вопросам вывода из эксплуатации нереакторных ядерных установок. Она относится в первую очередь к установкам ядерного топливного цикла, включая предприятия по конверсии урана, обогащению и изготовлению топлива, перерабатывающие заводы и объекты по хранению и переработке отходов или отработавшего топлива, но также охватывает аналитические и исследовательские лаборатории. В ней показаны особенности, отличающие вывод из эксплуатации нереакторных ядерных установок от вывода из эксплуатации реакторов.
INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Decommissioning of Pools in Nuclear Facilities (Вывод из эксплуатации бассейнов на ядерных установках), IAEA Nuclear Energy Series NW-T-2.6, IAEA, Vienna (2015).	На некоторых ядерных установках используются бассейны для охлаждения отработавшего топлива либо для экранирования активной зоны исследовательских реакторов или источников облучательных установок. В течение своего срока службы, который может составлять несколько десятков лет, бассейны на ядерных установках могут подвергаться загрязнению в результате осаждения радиоактивных веществ. К соответствующим аспектам вывода бассейнов из эксплуатации, освещаемым в этой публикации, относятся планирование и управление осуществлением проекта, охрана труда и техника безопасности, а также обращение с образующимися отходами.

ТАБЛИЦА 11. ПЕРЕЧЕНЬ ПУБЛИКАЦИЙ МАГАТЭ ПО ВОПРОСАМ
ХРАНЕНИЯ ОТРАБОТАВШЕГО ТОПЛИВА (продолжение)

Тема/ссылка	Область применения
Физическая безопасность (хранение и транспортировка)	
МЕЖДУНАРОДНОЕ АГЕНТСТВО ПО АТОМНОЙ ЭНЕРГИИ, Рекомендации по физической ядерной безопасности, касающиеся материалов и ядерных установок (INFCIRC/225/Rev. 5), Серия изданий МАГАТЭ по физической ядерной безопасности, № 13, МАГАТЭ, Вена (2012).	В этой публикации государствам и их компетентным органам даются руководящие указания по разработке или усовершенствованию, введению и поддержанию режима физической защиты ядерного материала и ядерных установок за счет создания или расширения их потенциала для осуществления программ в сфере законодательства и регулирования. Рекомендации, представленные в этой публикации, базируются на широком консенсусе государств — членов МАГАТЭ в отношении требований, которым должны отвечать системы физической защиты ядерных материалов и ядерных установок.
МЕЖДУНАРОДНОЕ АГЕНТСТВО ПО АТОМНОЙ ЭНЕРГИИ, Физическая защита ядерного материала и ядерных установок (практическое применение рекомендаций INFCIRC/225/Rev. 5), практическое руководство Серии изданий МАГАТЭ по физической ядерной безопасности, № 27-G, МАГАТЭ, Вена (2022).	Эта публикация является главным практическим руководством в комплексе руководств по выполнению рекомендаций по физической ядерной безопасности, касающихся физической защиты ядерного материала и ядерных установок. В ней содержатся руководящие указания и предложения, призванные помочь государствам и их компетентным органам в установлении, укреплении и поддержании национального режима физической защиты, а также во введении соответствующих систем и мер, в том числе систем физической защиты операторов.
МЕЖДУНАРОДНОЕ АГЕНТСТВО ПО АТОМНОЙ ЭНЕРГИИ, Создание системы контроля ядерного материала для целей обеспечения физической ядерной безопасности на установках в процессе его использования, хранения и перемещения, Серия изданий МАГАТЭ по физической ядерной безопасности, № 32-T, МАГАТЭ, Вена (2023).	Эта публикация посвящена вопросам контроля ядерного материала при хранении, использовании и перемещении при помощи системы учета и контроля ядерного материала на установке.

ТАБЛИЦА 11. ПЕРЕЧЕНЬ ПУБЛИКАЦИЙ МАГАТЭ ПО ВОПРОСАМ
ХРАНЕНИЯ ОТРАБОТАВШЕГО ТОПЛИВА (продолжение)

Тема/ссылка	Область применения
МЕЖДУНАРОДНОЕ АГЕНТСТВО ПО АТОМНОЙ ЭНЕРГИИ, Обеспечение физической безопасности в течение срока службы ядерной установки, Серия изданий МАГАТЭ по физической ядерной безопасности, № 35-G, МАГАТЭ, Вена (2023).	В этой публикации государствам, компетентным органам и операторам даются руководящие указания относительно надлежащих мер по обеспечению физической ядерной безопасности на каждой стадии жизненного цикла ядерной установки — от первоначального планирования установки до ее окончательного вывода из эксплуатации. В ней рассматриваются действенные меры по обеспечению физической ядерной безопасности при переходе от одной стадии к другой применительно к физической ядерной безопасности ядерных материалов и установок в течение жизненного цикла всех типов ядерных установок.
МЕЖДУНАРОДНОЕ АГЕНТСТВО ПО АТОМНОЙ ЭНЕРГИИ, Физическая безопасность радиоактивного материала при перевозке, Серия изданий МАГАТЭ по физической ядерной безопасности, № 9-G (Rev. 1), МАГАТЭ, Вена (2023).	Эта новая редакция публикации Серии изданий МАГАТЭ по физической ядерной безопасности, № 9, «Security of Radioactive Material in Transport» («Физическая безопасность радиоактивного материала при перевозке») призвана содействовать выработке согласованного на международном уровне подхода к обеспечению физической безопасности радиоактивного материала при перевозке. Она применима для обеспечения физической безопасности упаковок, содержащих радиоактивный материал, который может вызвать неприемлемые радиологические последствия.
Выгорание и МОХ-топливо	
INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Implementation of Burnup Credit in Spent Fuel Management Systems (Применение кредита выгорания в системах обращения с отработавшим топливом), IAEA-TECDOC-1241, IAEA, Vienna (2001).	В этой публикации рассматривается современное состояние международной деятельности, связанной с использованием кредита выгорания при обращении с отработавшим топливом. Многим государствам — членам требуется рассчитывать кредит выгорания для систем мокрого и сухого хранения, чтобы иметь возможность повысить начальное обогащение топлива, а также увеличить вместимость хранилища и тем самым избежать необходимости кардинального переоборудования используемых систем обращения с отработавшим топливом.

ТАБЛИЦА 11. ПЕРЕЧЕНЬ ПУБЛИКАЦИЙ МАГАТЭ ПО ВОПРОСАМ
ХРАНЕНИЯ ОТРАБОТАВШЕГО ТОПЛИВА (продолжение)

Тема/ссылка	Область применения
INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Practices and Developments in Spent Fuel Burnup Credit Applications (Практика и тенденции в области применения кредита выгорания к отработавшему топливу), IAEA-TECDOC-1378, IAEA, Vienna (2003).	В этой публикации содержатся материалы третьего крупного совещания МАГАТЭ по проблематике кредита выгорания, которое состоялось в Мадриде в апреле 2002 года и было посвящено требованиям, практике и тенденциям в области применения кредита выгорания.
INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Status and Advances in MOX Fuel Technology (Современное состояние и достижения в развитии технологии MOX-топлива), Technical Reports Series No. 415, IAEA, Vienna (2003).	В этой публикации дан обзор состояния дел с разработкой плутониевого топлива во всем мире. Приведена информация о современном состоянии и тенденциях развития технологии MOX-топлива в таких областях, как проектирование, изготовление, эксплуатационные характеристики, обращение с топливом в активной зоне, транспортировка, обращение с отработавшим MOX-топливом, вывод из эксплуатации, обработка отходов, гарантии и альтернативные подходы к рециклированию плутония. Публикация посвящена MOX-топливу тепловых энергетических реакторов.
INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Advances in Applications of Burnup Credit to Enhance Spent Fuel Transportation, Storage, Reprocessing and Disposition (Достижения в применении кредита выгорания для улучшения транспортировки, хранения, переработки и захоронения отработавшего топлива) (материалы технического совещания в Лондоне, 29 августа — 2 сентября 2005 года), IAEA-TECDOC-1547 (2007).	В этой публикации содержатся материалы технического совещания, проведенного МАГАТЭ в Лондоне с 29 августа по 2 сентября 2005 года с участием 60 представителей из 18 стран. Как явствует из названия, оно было призвано стать площадкой для обмена технической информацией о применениях кредита выгорания отработавшего топлива и обобщения тем самым современных данных о технических новшествах, связанных с транспортировкой, хранением, переработкой и захоронением отработавшего топлива.

ТАБЛИЦА 11. ПЕРЕЧЕНЬ ПУБЛИКАЦИЙ МАГАТЭ ПО ВОПРОСАМ
ХРАНЕНИЯ ОТРАБОТАВШЕГО ТОПЛИВА (продолжение)

Тема/ссылка	Область применения
Обращение с отработавшим топливом	
INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Spent Fuel Surveillance and Monitoring Methods (Методы наблюдения и контроля за отработавшим топливом) (материалы совещания технического комитета, Вена, 27–30 октября 1987 года), IAEA-TECDOC-461, IAEA, Vienna (1988).	В этой публикации содержатся документы, представленные на совещании технического комитета по методам наблюдения и контроля за отработавшим топливом, которое состоялось в Вене в октябре 1987 года. Эти документы включали в себя информацию о существующих конструкциях и критериях эксплуатации, принципах безопасности и лицензионных требованиях и процедурах для предотвращения: случайного возникновения критичности, чрезмерно высокого радиационного облучения и недопустимого выброса радиоактивности, а также для контроля за потерей воды в бассейне выдержки, воздействием продуктов коррозии, водно-химическим режимом, распределением и поведением твердых частиц в охлаждающей воде, окислением неповрежденных и поврежденных твэлов в зависимости от температуры и глубины выгорания, распределением радиации и температуры в стенке контейнера сухого хранения, мониторинга течей из бассейнов и утечек газов из «сухих» хранилищ, периодических испытаний локализирующих барьеров на целостность, а также об обязанностях организаций в связи с необходимой эксплуатацией, структуре, кадрах и порядке подчинения.
INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Options, Experience and Trends in Spent Nuclear Fuel Management (Возможности, опыт и тенденции в области обращения с отработавшим ядерным топливом) (1995), Technical Reports Series No. 378, IAEA, Vienna (1995).	Цель этой публикации состоит в том, чтобы помочь государствам-членам своевременно выработать стройную политику и национальные механизмы обращения с отработавшим топливом. Отдельная глава посвящена технологиям хранения.

ТАБЛИЦА 11. ПЕРЕЧЕНЬ ПУБЛИКАЦИЙ МАГАТЭ ПО ВОПРОСАМ
ХРАНЕНИЯ ОТРАБОТАВШЕГО ТОПЛИВА (продолжение)

Тема/ссылка	Область применения
INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Remote Technology in Spent Fuel Management (Дистанционные технологии в области обращения с отработавшим топливом) (материалы совещания консультативной группы, Вена, 22–25 сентября 1997 года), IAEA-TECDOC-1061, IAEA, Vienna (1999).	В этой публикации рассматриваются дистанционные технологии, используемые для всего комплекса работ по обращению с отработавшим топливом, в том числе при мокром и сухом хранении, и описываются текущие разработки.
INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Institutional Framework for Long Term Management of High Level Waste and/or Spent Nuclear Fuel (Институциональная основа долгосрочного обращения с высокоактивными отходами и/или отработавшим ядерным топливом), IAEA-TECDOC-1323, IAEA, Vienna (2002).	В этой публикации собрана информация об институциональных аспектах национальных программ долгосрочного обращения с ВАО и отработавшим топливом, таких как имплементация, регулирующая и надзорная деятельность, определение ответственности, процессы выбора площадок для размещения хранилищ, затраты на управление и схемы финансирования.
INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Remote Technology Applications in Spent Fuel Management (Применение дистанционных технологий при обращении с отработавшим топливом), IAEA-TECDOC-1433, IAEA, Vienna (2005).	В этой публикации дается обзор текущего состояния дел с применением дистанционных технологий при обращении с отработавшим топливом. Он охватывает ряд технологических операций в процессе обращения с отработавшим топливом — от выгрузки из реактора до переработки или упаковки с целью захоронения, в зависимости от выбранной схемы обращения с отработавшим топливом. Поскольку в текущих и ожидаемых в обозримом будущем требованиях по обращению с отработавшим топливом преобладают и будут преобладать необходимые действия по организации хранения отработавшего топлива, более подробно описываются дистанционные технологии, связанные с хранением отработавшего топлива.

ТАБЛИЦА 11. ПЕРЕЧЕНЬ ПУБЛИКАЦИЙ МАГАТЭ ПО ВОПРОСАМ
ХРАНЕНИЯ ОТРАБОТАВШЕГО ТОПЛИВА (продолжение)

Тема/ссылка	Область применения
INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Data Requirements and Maintenance of Records for Spent Fuel Management: A Review (2006) (Потребности в данных и ведение учетной документации в области обращения с отработавшим топливом: обзор (2006 год)), IAEA-TECDOC-1519, IAEA, Vienna (2006).	Чтобы принимать обоснованные решения по обращению с отработавшим топливом, необходимо сохранять данные на всех этапах обращения с отработавшим топливом, включая хранение, транспортировку, переработку или захоронение. Задача этой публикации — дать обзор современного состояния дел в области управления данными об отработавшем топливе, включая то, какие данные необходимо собирать для соответствующих мероприятий по обращению с отработавшим топливом и как их сохранять ответственным органам на различных стадиях ядерного топливного цикла.
INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Joint Convention on the Safety of Spent Fuel Management and on the Safety of Radioactive Waste Management (Объединенная конвенция о безопасности обращения с отработавшим топливом и о безопасности обращения с радиоактивными отходами), IAEA International Law Series No. 1, IAEA, Vienna (2006).	В этой публикации в более удобном формате собраны официальные отчеты и другие соответствующие публикации, относящиеся к переговорам по Объединенной конвенции о безопасности обращения с отработавшим топливом и о безопасности обращения с радиоактивными отходами. Эта конвенция применяется к отработавшему топливу и радиоактивным отходам, образующимся в результате эксплуатации гражданских ядерных реакторов и гражданской деятельности, а также к отработавшему топливу и радиоактивным отходам, образующимся в результате осуществления военных или оборонных программ, в тех случаях, если и когда такие материалы окончательно передаются гражданским программам и обращение с ними происходит исключительно в рамках таких программ или когда они объявляются отработавшим топливом или радиоактивными отходами для целей Конвенции.

ТАБЛИЦА 11. ПЕРЕЧЕНЬ ПУБЛИКАЦИЙ МАГАТЭ ПО ВОПРОСАМ
ХРАНЕНИЯ ОТРАБОТАВШЕГО ТОПЛИВА (продолжение)

Тема/ссылка	Область применения
INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Nuclear Fuel Cycle Information System (Информационная система по ядерному топливному циклу), IAEA-TECDOC-1613, IAEA, Vienna (2009).	Информационная система по ядерному топливному циклу (NFCIS) — это международный каталог гражданских установок ядерного топливного цикла, публикуемый в интернете как часть Комплексной информационной системы по ядерному топливному циклу. Это четвертое издание в печатном виде за почти 30 лет, отражающее состояние базы данных NFCIS на конец 2008 года.
INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Impact of High Burnup Uranium Oxide and Mixed Uranium-Plutonium Oxide Water Reactor Fuel on Spent Fuel Management (Последствия использования оксидного уранового топлива глубокого выгорания и смешанного оксидного уран-плутониевого топлива в водяных реакторах для обращения с отработавшим топливом), Nuclear Energy Series NF-T-3.8, IAEA, Vienna (2011).	В этой публикации анализируются многие аспекты, связанные с более широким использованием UOX- и MOX-топлива глубокого выгорания, и потенциальные последствия этого для обращения с отработавшим топливом, а также для всей ядерной отрасли. В ней рассматриваются различные типы реакторов с акцентом на технологию LWR и HWR, анализируется современное положение дел с UOX- и MOX-топливом в мире, приводится информация о различных типах топлива и оболочек и составляющих процесса обращения с отработавшим топливом и разбираются характеристики отработавшего топлива, относящиеся к UOX- и MOX-топливу с повышенной глубиной выгорания, после чего проводится подробный анализ.
INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Nuclear Fuel Cycle Objectives (Цели ядерного топливного цикла), IAEA Nuclear Energy Series NF-O, IAEA, Vienna (2013).	В этой публикации устанавливаются критерии в области ядерных топливных циклов, которые должны быть выполнены для того, чтобы соответствовать Основным принципам использования ядерной энергии в части, касающейся ресурсов, инженерно-технических аспектов и характеристик топлива, обращения с отработавшим топливом и его переработки, а также ядерных топливных циклов исследовательских реакторов.

ТАБЛИЦА 11. ПЕРЕЧЕНЬ ПУБЛИКАЦИЙ МАГАТЭ ПО ВОПРОСАМ
ХРАНЕНИЯ ОТРАБОТАВШЕГО ТОПЛИВА (продолжение)

Тема/ссылка	Область применения
INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Potential Interface Issues in Spent Fuel Management (Потенциальные проблемы взаимосвязи между стадиями в процессе обращения с отработавшим топливом), IAEA-TECDOC-1774, IAEA, Vienna (2015).	Целостный взгляд на ядерный топливный цикл обеспечивает ясное понимание того, как влияют друг на друга все стадии ядерного топливного цикла. Такой широкий взгляд облегчает принятие эффективных решений на конечной стадии топливного цикла. К числу особенно сложных задач относится сохранение гибкости для того, чтобы учесть ряд потенциальных будущих вариантов утилизации отработавшего топлива, а также определение и решение соответствующих проблем хранения и транспортировки ввиду неопределенностей, касающихся продолжительности хранения, доступности будущих технологий, а также будущей финансовой, нормативно-правовой и политической ситуации. В этой публикации излагается подход к определению взаимосвязей на конечной стадии топливного цикла, а также потенциальных проблем такой взаимосвязи, которые необходимо решить. В ней также приводятся примеры подходов государств-членов к определению и решению проблем взаимосвязи.
INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Options for Management of Spent Fuel and Radioactive Waste for Countries Developing New Nuclear Power Programmes (Варианты обращения с отработавшим топливом и радиоактивными отходами для стран, разрабатывающих новые ядерно-энергетические программы) (Rev. 1), Nuclear Energy Series NW-T-1.24 (Rev. 1), IAEA, Vienna (2018)	В этой публикации содержится краткий обзор основных вопросов, касающихся создания надежной системы обращения с радиоактивными отходами и ОЯТ. Страны с небольшими ядерно-энергетическими программами и страны, недавно приступившие к освоению ядерной энергетики, смогут ознакомиться с проблемами и существующими и потенциальными вариантами обращения с реакторными отходами и отработавшим топливом, которые образуются в ходе эксплуатации и вывода из эксплуатации АЭС.

ТАБЛИЦА 11. ПЕРЕЧЕНЬ ПУБЛИКАЦИЙ МАГАТЭ ПО ВОПРОСАМ
 ХРАНЕНИЯ ОТРАБОТАВШЕГО ТОПЛИВА (продолжение)

Тема/ссылка	Область применения
INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Status and Trends in Spent Fuel and Radioactive Waste Management (Положение дел и тенденции в области обращения с отработавшим топливом и радиоактивными отходами), Nuclear Energy Series NW-T-1.14, IAEA, Vienna (2018).	В этой публикации, основанной на результатах совместного проекта МАГАТЭ, АЯЭ и Европейской комиссии, представлен глобальный обзор положения дел в области обращения с радиоактивными отходами и отработавшим топливом, затрагивающий такие аспекты, как запасы, программы, современная практика, технологии и тенденции. В ней приводятся результаты анализа национальных механизмов и программ в области обращения с радиоактивными отходами и отработавшим топливом, общая информация о текущих запасах отходов и отработавшего топлива и оценка будущих объемов. Кроме того, анализируются наблюдаемые на международном и национальном уровне тенденции в этих областях.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- [1] МЕЖДУНАРОДНОЕ АГЕНТСТВО ПО АТОМНОЙ ЭНЕРГИИ, Обращение с радиоактивными отходами перед захоронением, Серия норм безопасности МАГАТЭ, № GSR Part 5, МАГАТЭ, Вена (2010).
- [2] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Storage of Spent Nuclear Fuel, IAEA Safety Standards Series No. SSG-15 (Rev. 1), IAEA, Vienna (2020).
- [3] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Guidebook on Spent Fuel Storage, Technical Report Series No. 240 (2nd edn), IAEA, Vienna (1991).
- [4] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, IAEA Nuclear Safety and Security Glossary, Non-serial Publications, IAEA, Vienna (2022).
- [5] NONBØL, E., Description of the Advanced Gas Cooled Type of Reactor (AGR), NKS Nordisk kernesikkerhedsforskning report, Risø National Laboratory (1996).
- [6] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Options, Experience and Trends in Spent Nuclear Fuel Management, Technical Reports Series No. 378, IAEA, Vienna (1995).
- [7] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Survey of Wet and Dry Spent Fuel Storage, IAEA-TECDOC-1100, IAEA, Vienna (1999).
- [8] МЕЖДУНАРОДНОЕ АГЕНТСТВО ПО АТОМНОЙ ЭНЕРГИИ, Обзор ядерных технологий, GC(63)/INF/2, МАГАТЭ, Вена (2019).
- [9] МЕЖДУНАРОДНОЕ АГЕНТСТВО ПО АТОМНОЙ ЭНЕРГИИ, Поведение отработавшего топлива ядерных энергетических реакторов при хранении. Выдержки из заключительных докладов проектов координированных исследований по изучению поведения отработавших тепловыделяющих сборок при хранении (БЕФАКТ I–III) и оценке и исследованию характеристик отработавшего топлива (СПАР I–III), 1981–2014 годы, IAEA-TECDOC-1862, МАГАТЭ, Вена (2021).
- [10] МЕЖДУНАРОДНОЕ АГЕНТСТВО ПО АТОМНОЙ ЭНЕРГИИ, Хранение отработавшего топлива до отправки на переработку или захоронение, Серия изданий МАГАТЭ по ядерной энергии, № NF-T-3.3, МАГАТЭ, Вена (2021).
- [11] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Selection of Away-from-Reactor Facilities for Spent Fuel Storage. A Guidebook, IAEA-TECDOC-1558, IAEA, Vienna (2007).
- [12] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Spent Fuel Performance Assessment and Research: Final Report of a Coordinated Research Project (SPAR-II), IAEA-TECDOC-1680, IAEA, Vienna (2012).
- [13] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Spent Fuel Storage Operation — Lessons Learned, IAEA-TECDOC-1725, IAEA, Vienna (2013).
- [14] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Management of Damaged Spent Nuclear Fuel, IAEA Nuclear Energy Series NF-T-3.6, IAEA, Vienna (2009).
- [15] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Storage of spent fuel from power reactors, (Proc. Symp. Vienna, 9–13 November 1998), IAEA-TECDOC-1089, IAEA, Vienna (1999).

- [16] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Long Term Storage of Spent Nuclear Fuel — Survey and Recommendations, IAEA-TECDOC-1293, IAEA, Vienna (2002).
- [17] МЕЖДУНАРОДНОЕ АГЕНТСТВО ПО АТОМНОЙ ЭНЕРГИИ, Государственная, правовая и регулирующая основа обеспечения безопасности, Серия норм безопасности МАГАТЭ, № GSR Part 1 (Rev. 1), МАГАТЭ, Вена (2016).
- [18] МЕЖДУНАРОДНОЕ АГЕНТСТВО ПО АТОМНОЙ ЭНЕРГИИ, Безопасность установок ядерного топливного цикла, Серия норм безопасности МАГАТЭ, № SSR-4, МАГАТЭ, Вена (2018).
- [19] US NUCLEAR REGULATORY COMMISSION, Standard Review Plan for Spent Fuel Dry Storage Systems and Facilities — Final Report, NUREG-2215 (2020).
- [20] US NUCLEAR REGULATORY COMMISSION, Cladding Considerations for the Transportation and Storage of Spent Fuel, Spent Fuel Project Office, Interim Staff Guidance — 11 (SFST-ISG-11), Rev. 3 (2003).
- [21] US NUCLEAR REGULATORY COMMISSION, Mechanical Fatigue Testing of High-Burnup Fuel for Transportation Applications, NUREG/CR-7198, Rev. 1, ORNL/TM-2016/689 (2017).
- [22] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Impact of High Burnup Uranium Oxide and Mixed Uranium-Plutonium Oxide Water Reactor Fuel on Spent Fuel Management, IAEA Nuclear Energy Series NF-T-3.8, IAEA, Vienna (2011).
- [23] ADVISORY COMMITTEE FOR NATURAL RESOURCES AND ENERGY OF JAPAN, Long-term Integrity of the Dry Metallic Casks and their Contents in the Spent fuel Interim Storage Facilities, Attachment 3, Interim Storage and Transportation WGs, Nuclear and Industrial Safety Subcommittee (2009).
- [24] МЕЖДУНАРОДНОЕ АГЕНТСТВО ПО АТОМНОЙ ЭНЕРГИИ, Радиационная защита и безопасность источников излучения: Международные основные нормы безопасности, Серия норм безопасности МАГАТЭ, № GSR Part 3, МАГАТЭ, Вена (2015).
- [25] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Justification of Practices, Including Non-Medical Human Imaging, IAEA Safety Standards Series No. GSG-5, IAEA, Vienna (2014).
- [26] МЕЖДУНАРОДНОЕ АГЕНТСТВО ПО АТОМНОЙ ЭНЕРГИИ, Оценка безопасности установок и деятельности, Серия норм безопасности МАГАТЭ, № GSR Part 4 (Rev. 1), МАГАТЭ, Вена (2016).
- [27] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, The Safety Case and Safety Assessment for the Predisposal Management of Radioactive Waste, IAEA Safety Standards Series No. GSG-3, IAEA, Vienna (2013).
- [28] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Safety Analysis and Licensing Documentation for Nuclear Fuel Cycle Facilities, Safety Reports Series No. 102, IAEA, Vienna (2020).
- [29] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Ageing Management for Nuclear Power Plants: International Generic Ageing Lessons Learned (IGALL), Safety Reports Series No. 82 (Rev. 1), IAEA, Vienna (2020).

- [30] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Spent Fuel Performance Assessment and Research, Final Report of a Coordinated Research Project (SPAR-IV), IAEA-TECDOC-1975, IAEA, Vienna (2021).
- [31] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Behaviour of Spent Fuel Assemblies During Extended Storage (Final Report of a Co-ordinated Research Programme on BEFAST, Phase 1, 1981–1986), IAEA-TECDOC-414, IAEA, Vienna (1987).
- [32] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Extended Storage of Spent Fuel (Final Report of a Co-ordinated Research Programme, (BEFAST-II), 1986–1991), IAEA-TECDOC-673, IAEA, Vienna (1992).
- [33] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Further Analysis of Extended Storage of Spent Fuel, IAEA-TECDOC-944, IAEA, Vienna (1997).
- [34] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Spent Fuel Performance Assessment and Research, IAEA-TECDOC-1343, IAEA, Vienna (2003).
- [35] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Spent Fuel Performance Assessment and Research — Final Report of a Coordinated Research Project on Spent Fuel Performance Assessment and Research (SPAR III) 2009–2014, IAEA-TECDOC-1771, IAEA, Vienna (2015).
- [36] MOHTADI BONAB, M.A., Effects of Different Parameters on Initiation and Propagation of Stress Corrosion Cracks in Pipeline Steels: A Review, *Metals* **9** (2019) 590.
- [37] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Understanding and Managing Ageing of Material in Spent Fuel Storage Facilities, Technical Reports Series No. 443, IAEA, Vienna (2006).
- [38] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Durability of Spent Nuclear Fuels and Facility Components in Wet Storage, IAEA-TECDOC-1012, IAEA, Vienna (1998).
- [39] MON, K., Aqueous Corrosion Rates for Waste Package Materials, ANL-DSD-MD-000001 Rev. 01, Argonne National Laboratory, USA (2008).
- [40] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Storage of Spent Fuel from Power Reactors, C&S Papers Series (Print) No. 20, IAEA, Vienna (2003) 431.
- [41] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Effects of Radiation and Environmental Factors on the Durability of Materials in Spent Fuel Storage and Disposal, IAEA-TECDOC-1316, IAEA, Vienna (2002).
- [42] LAMPMAN, T., GILLESPIE, P., Assessment of delayed hydride cracking in used CANDU fuel bundles during storage, Nuclear Waste Management Organization, NWMO-TR-2010-13 (2010).
- [43] SAWATZKY, A., Hydrogen in zircaloy-2: Its distribution and heat of transport, *J. Nuc. Mat.* **24** (1960) 321–328.
- [44] HONG, H.S., KIM, S.J., LEE, K.S., Thermotransport of hydrogen in Zircaloy-4 and modified Zircaloy-4, *J. Nuc. Mat.* **257** 1 (1998) 15–20.
- [45] FORSBERG, K., MASSIH, A.R., Redistribution of hydrogen in Zircaloy, *J. Nuc. Mat.* **172** 1 (1990) 130–134.

- [46] HILLNER, E., FRANKLIN, D.G., SMEE, J.D., The Corrosion of Zircaloy-Clad fuel Assemblies in a Geological Repository Environment, WAPD-T3173, Bettis Atomic Power Laboratory, West Mifflin, PA (1998).
- [47] THOMAS, L.E., EINZIGER, R.E., BUCHANAN, H.C., Effect of fission products on air-oxidation of LWR spent fuel, *J. Nuc. Mat.* **201** (1993) 310–319.
- [48] SAEGUSA, T., SERT, G., VOLZKE, H., WILLIE, F., Basics of Transport and Storage of Radioactive Materials, World Scientific Publishing (2018).
- [49] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Demonstrating Performance of Spent Fuel and Related Storage System Components during Very Long Term Storage. Final Report of a Coordinated Research Project, IAEA-TECDOC-1878, IAEA, Vienna (2019).
- [50] МЕЖДУНАРОДНОЕ АГЕНТСТВО ПО АТОМНОЙ ЭНЕРГИИ, Правила безопасной перевозки радиоактивных материалов, издание 2018 года, Серия норм безопасности МАГАТЭ, № SSR-6 (Rev. 1), МАГАТЭ, Вена (2019).
- [51] US NUCLEAR REGULATORY COMMISSION, Dry Cask Storage Characterization Project — Phase 1: CASTOR V/21 Cask Opening and Examination, NUREG/CR-6745 (2001).
- [52] US NUCLEAR REGULATORY COMMISSION, Examination of Spent PWR Fuel Rods after 15 Years in Dry Storage, NUREG/CR-6831 (2003).
- [53] NAKABAYASHI, Y., OGI, Y., YOMOGITA, H., KAWAMOTO, A., Design and Inspection Plan of Dual Purpose Dry Metal Casks for Interim Storage Facility in Japan (Proc. 18th Int. Symp. Packaging and Transportation of Radioactive Materials — PATRAM 2016, September 18–23, 2016), Kobe, Japan (2016).
- [54] TAKEDA, H., WATARU, M., SHIRAI, K., SAEGUSA, T., Development of the detecting method of helium gas leak from canister, *Nuc. Eng. Des.* **238** (2008) 1220–1226.
- [55] US NUCLEAR REGULATORY COMMISSION, Standard Review Plan for Renewal of Specific Licenses and Certificates of Compliance for Dry Storage of Spent Nuclear Fuel — Final Report, NUREG-1927, Rev. 1 (2016).
- [56] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Data Requirements and Maintenance of Records for Spent Fuel Management: A Review, IAEA-TECDOC-1519, IAEA, Vienna (2006).
- [57] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Methodology for a Safety Case of a Dual Purpose Cask for Storage and Transport of Spent Fuel. Report of a WASSC/TRANSSC Joint Working Group, IAEA-TECDOC-1938, IAEA, Vienna (2020).
- [58] MINISTRY OF ECONOMY, TRADE AND INDUSTRY OF JAPAN, Long-term Integrity of the Dry DPCs and their Contents in the Spent fuel Interim Storage Facilities, Japanese Nuclear and Industrial Safety Subcommittee of the Advisory Committee for Natural Resources and Energy Nuclear Fuel Cycle Safety Subcommittee Interim Storage Working Group and Transportation Working Group, Tokyo (2009).

- [59] МЕЖДУНАРОДНОЕ АГЕНТСТВО ПО АТОМНОЙ ЭНЕРГИИ, Рекомендации по физической ядерной безопасности, касающиеся физической защиты ядерных материалов и ядерных установок (INFCIRC/225/Rev. 5), Серия изданий МАГАТЭ по физической ядерной безопасности, № 13, МАГАТЭ, Вена (2012).
- [60] МЕЖДУНАРОДНОЕ АГЕНТСТВО ПО АТОМНОЙ ЭНЕРГИИ, Физическая защита ядерного материала и ядерных установок (практическое применение рекомендаций INFCIRC/225/Rev. 5), практическое руководство Серии изданий МАГАТЭ по физической ядерной безопасности, № 27-G, МАГАТЭ, Вена (2022).
- [61] МЕЖДУНАРОДНОЕ АГЕНТСТВО ПО АТОМНОЙ ЭНЕРГИИ, Обеспечение физической безопасности в течение срока службы ядерной установки, Серия изданий МАГАТЭ по физической ядерной безопасности, № 35-G, МАГАТЭ, Вена (2023).
- [62] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Serving Nuclear Non-Proliferation, IAEA, Vienna (2021).
- [63] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, International Safeguards in Nuclear Facility Design and Construction, Nuclear Energy Series NP-T-2.8, IAEA, Vienna (2013).
- [64] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Costing of Spent Fuel Storage, IAEA Nuclear Energy Series NF-T-3.5, IAEA, Vienna (2009).
- [65] ORGANISATION FOR ECONOMIC CO-OPERATION AND DEVELOPMENT/NUCLEAR ENERGY AGENCY (OECD/NEA), Decommissioning Funding: Ethics, Implementation, Uncertainties. A Status Report, NEA No. 5996 (2006).
- [66] ORGANISATION FOR ECONOMIC CO-OPERATION AND DEVELOPMENT/NUCLEAR ENERGY AGENCY (NEA), The Economics of the Back End of the Nuclear Fuel Cycle, NEA No. 7061 (2013).
- [67] MINISTRY OF ECONOMY, TRADE AND INDUSTRY OF JAPAN, Strategic Energy Plan, (2018),
https://www.enecho.meti.go.jp/en/category/others/basic_plan/5th/pdf/strategic_energy_plan.pdf
- [68] JOINT CONVENTION ON THE SAFETY OF SPENT FUEL MANAGEMENT AND ON THE SAFETY OF RADIOACTIVE WASTE MANAGEMENT, National Report of Japan for the Sixth Review Meeting (2017),
https://www.iaea.org/sites/default/files/national_report_of_japan_for_the_6th_review_meeting_-_english.pdf
- [69] TAKAHASHI, M., Design and construction work experience of Interim Storage Facility for Spent Fuels (Proc. Int. Con. Mg of Spent Fuel from Nuclear Power Reactors — An Integrated Approach to the Back End of the Fuel Cycle, Vienna, 15–19 June 2015), (2019).
- [70] MINISTERIO DE INDUSTRIA COMERCIO Y TURISMO, General Radioactive Waste Plan (GRWP) (2006),
<http://www.enresa.es/esp/inicio/conozca-enresa/plan-general-de-residuos-radiactivos>
- [71] NUCLEAR SAFETY STANDARDS COMMISSION, Heat Removal Systems for Fuel Pools in Nuclear Power Plants with Light Water Reactors, KTA-Geschaeftsstelle (2015).

- [72] EUROPEAN COMMISSION, 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 (2011),
<https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2011/70/oj>
- [73] WESTERN EUROPEAN NUCLEAR REGULATORS' ASSOCIATION (WENRA), Waste and Spent Fuel Storage Safety Reference Levels, Report of Working Group on Waste and Decommissioning (WGWD), Version 2.2 (2014),
https://www.wenra.eu/sites/default/files/publications/wgwd_storage_report_final.pdf
- [74] INSTITUT DE RADIOPROTECTION ET DE SÛRETÉ NUCLÉAIRE (IRSN), Storage of nuclear spent fuel: concepts and safety issues, IRSN 2019-00181 (2018).
- [75] INSTITUT DE RADIOPROTECTION ET DE SÛRETÉ NUCLÉAIRE (IRSN), Assessment of dry storage possibilities for MOX or Enriched Reprocessed Uranium spent fuels, IRSN 2019-00903 (2019).
- [76] NUCLEAR WASTE MANAGEMENT COMMISSION (ESK), Guidelines for dry cask storage of spent fuel and heat-generating waste, (2013),
http://www.entsorgungskommission.de/sites/default/files/reports/eskempfehlung_esk30llberevfassung10062013en_0.pdf
- [77] US NUCLEAR REGULATORY COMMISSION, Managing Aging Processes in Storage (MAPS) Report: Final Report, NUREG-2214 (2019).
- [78] US NUCLEAR REGULATORY COMMISSION, Spent Fuel Storage and Transportation Interim Staff Guidance,
<https://www.nrc.gov/reading-rm/doc-collections/isg/spent-fuel.html>
- [79] ОРГАНИЗАЦИЯ ОБЪЕДИНЕННЫХ НАЦИЙ, Рекомендации по перевозке опасных грузов — Типовые правила, 21-е издание (2019).
- [80] INTERNATIONAL MARITIME ORGANIZATION, IMDG Code, the International Maritime Dangerous Goods Code, 2016 edn (2016).
- [81] INTERNATIONAL CIVIL AVIATION ORGANIZATION, Technical Instructions for the Safe Transport of Dangerous Goods by Air (2020).
- [82] ЕВРОПЕЙСКАЯ ЭКОНОМИЧЕСКАЯ КОМИССИЯ ОРГАНИЗАЦИИ ОБЪЕДИНЕННЫХ НАЦИЙ (ЕЭК ООН), Европейское соглашение о международной дорожной перевозке опасных грузов (ДОПОГ), Организация Объединенных Наций (2019).
- [83] INTERGOVERNMENTAL ORGANISATION FOR INTERNATIONAL CARRIAGE BY RAIL (OTIF), Convention concerning International Carriage by Rail (COTIF). Appendix C — Regulations concerning the International Carriage of Dangerous Goods by Rail (RID) (2019).
- [84] ЕВРОПЕЙСКАЯ ЭКОНОМИЧЕСКАЯ КОМИССИЯ ОРГАНИЗАЦИИ ОБЪЕДИНЕННЫХ НАЦИЙ (ЕЭК ООН), Европейское соглашение о международной перевозке опасных грузов по внутренним водным путям (2019).
- [85] INTERNATIONAL MARITIME ORGANIZATION, International Convention for the Safety of Life at Sea (SOLAS) (1980).

- [86] INTERNATIONAL MARITIME ORGANIZATION, INF Code, Resolution MSC.88(71), Adoption of the International Code for the Safe Carriage of Packaged Irradiated Nuclear Fuel, Plutonium and High Level Radioactive Wastes On Board Ships (INF Code) (1999).
- [87] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Methodology for a Safety Case of a Dual Purpose Cask for Storage and Transport of Spent Fuel, IAEA-TECDOC-1938, IAEA, Vienna (2020).

ГЛОССАРИЙ

анализ безопасности. Оценка возможных опасностей, связанных с эксплуатацией установки или осуществлением деятельности.

Формальный анализ безопасности является частью общей оценки безопасности; т.е. частью систематического процесса, который осуществляется в течение всего этапа проектирования (и на протяжении всего срока службы установки или всего периода осуществления деятельности) с целью обеспечения соблюдения всех соответствующих требований безопасности в предлагаемой (или фактической) конструкции.

Термин «анализ безопасности» часто взаимозаменяем с термином «оценка безопасности». Однако в тех случаях, когда важно провести различие между ними, термин «анализ безопасности» следует употреблять применительно к документированному процессу исследования положения дел в области безопасности, а термин «оценка безопасности» — применительно к документированному процессу оценивания безопасности, например оценки величины опасностей, оценки выполнения мер безопасности и вынесения суждения об их адекватности либо количественного определения общего радиологического воздействия или безопасности установки или деятельности.

анализ затрат и выгод. Системная технико-экономическая оценка положительных эффектов (выгод) и отрицательных эффектов (потерь, включая денежные затраты), связанных с совершением того или иного действия.

бассейн выдержки отработавшего топлива. Сооружение для мокрого хранения на площадке или вне площадки АЭС. Вода в бассейне, окружающая топливо, обеспечивает рассеяние тепла и радиационную защиту, а стеллажи или другие устройства обеспечивают геометрическую конфигурацию, которая позволяет поддерживать подкритичность.

бункер. Стационарная или передвижная конструкция, имеющая одно или несколько отдельных гнезд для хранения. Бункер обеспечивает все

функции безопасности хранилища (т.е. структурную поддержку и радиологическую защиту).

вне реакторное (ВР) хранилище. «Мокрое» или «сухое» хранилище, которое не расположено рядом с реактором, что означает, что топливо должно перемещаться или перевозиться в хранилище. Существует два типа таких хранилищ.

Хранилище на площадке реактора (ПР) — это хранилище, которое находится в пределах реакторной площадки, но расположено независимо от реактора и требует передачи отработавшего топлива с одного объекта на другой. Для ВР-ПР хранилищ можно провести еще одно различие: между теми, которые являются автономными и могут продолжать функционирование, если реактор будет выведен из эксплуатации, и теми, которые зависят от обеспечивающих систем реактора.

Хранилище вне площадки (ВП) — это хранилище, которое расположено за пределами реакторной площадки и требует перевозки отработавшего топлива по дорогам общего пользования.

гарантии. Технические меры, при помощи которых МАГАТЭ стремится независимо проверить соблюдение юридического обязательства государства по обеспечению того, чтобы ядерные установки не использовались не по назначению, а ядерный материал не переключался с использования в мирных целях.

глубина выгорания. Мера расхода реакторного топлива, равная количеству высвобождаемой энергии на единицу массы ядерного топлива в реакторе (для топлива энергетических реакторов). Типичными единицами измерения для последнего являются мегаватт в сутки на тонну (МВт·сут/т) урана или гигаватт в сутки на тонну (ГВт·сут/т).

двухцелевой контейнер (ДЦК). Контейнер, используемый как для хранения, так и для транспортировки за пределы площадки.

деградация топлива. Изменения в состоянии топлива, которые могут негативно повлиять на последующие технологические операции, хранение и обработку топлива, например искривление стержневого твэла, повреждение оболочки, дефекты таблеток и потеря структурной целостности.

дефект оболочки. Сквозное отверстие в оболочке твэла, вызванное производственным браком или являющееся результатом эксплуатации в реакторе и/или обращения и хранения после облучения. Оно может стать причиной выброса радиоактивного материала.

деформация ползучести. Увеличение длины или диаметра материала с течением времени под действием одного или нескольких факторов стресса. По мере расширения материал будет становиться все тоньше, пока не наступит момент, когда он разорвется. Для оболочки твэла факторами стресса являются внутреннее давление в топливном стержне и температура оболочки. Деформация ползучести также зависит от состава и состояния материала.

документация по безопасности конструкции упаковки (ДБКУ).

Документ, сопровождающий заявку на утверждение конструкции упаковки компетентным органом. В нем приводится полное описание конструкции упаковки и демонстрируется ее соответствие нормативным требованиям, применимым к данной конструкции.

замедленное гидридное растрескивание (ЗГР). Очень специфический механический процесс, требующий напряжения циркония по трем осям для того, чтобы расширить кристаллическую решетку. Трехосное напряжение расширяет тетраэдрические участки циркониевой решетки, которые занимают атомы водорода в растворе. Это позволяет атомам водорода рассеяться по градиенту напряжения и осесть в области пикового напряжения. Хотя ЗГР было отмечено в достаточно массивных образцах циркалоя, вряд ли стоит ожидать, что ЗГР будет активным механизмом деградации в оболочках-трубах по той причине, что последние, как представляется, не имеют достаточно толстых стенок для формирования значительного трехосного напряжения.

запроектные условия (ЗУ). Постулируемые аварийные условия, которые не учитываются в ПА, но учитываются в процессе проектирования установки в соответствии с методологией улучшенной оценки и при которых выбросы радиоактивного материала удерживаются в рамках допустимых пределов. Применительно к АЭС и исследовательским реакторам ЗУ означают условия, возникающие в случае событий без значительной деградации топлива, и условия, возникающие в случае событий с расплавлением активной зоны реактора.

зачехлованное отработавшее топливо. (в основном США) Поврежденное топливо, помещенное в чехол для отработавшего топлива, чтобы обеспечить возможность обращения с ним.

испытание кольцевым сжатием (ИКС). Метод, используемый для определения пластичности оболочки твэла путем приложения нагрузки с контролируемой скоростью перемещения.

камера. Наземное или подземное железобетонное сооружение с системой гнезд хранения, каждое из которых может содержать один или несколько топливных блоков с защитой, обеспечиваемой внешней частью сооружения. Отвод тепла происходит в основном за счет принудительного или естественного движения газов по внешней поверхности топливного блока или гнезда хранения. Выброс тепла в атмосферу осуществляется либо напрямую, либо через вторичную систему охлаждения.

композит. Материалы, обычно используемые для поглощения нейтронов. Обычно используются два типа: слоистый композит, в котором B_4C заключен между двумя листами алюминия, и композиты с металлической матрицей, в которых B_4C рассеян в металлической матрице.

конструкции, системы и элементы (КСЭ). Общий термин, охватывающий все компоненты (узлы) установки или деятельности, которые вносят вклад в обеспечение защиты и безопасности, кроме человеческого фактора. Человеческий фактор может учитываться в той мере, в какой в проекте КСЭ отражены принципы эргономики — науки об эффективности труда человека в его рабочей среде.

конструкция*. Пассивный элемент (например, здания, сосуды, защитные экраны).

контейнер. Общий термин для обозначения емкости, в которую помещается отработавшее топливо с целью облегчить его перемещение и хранение или окончательное захоронение.

корзина. Съёмное приспособление, в которое помещаются несколько отработавших тепловыделяющих сборок.

коррозионное растрескивание под напряжением (КРН). Растрескивание, вызванное комбинированным воздействием растягивающего напряжения и коррозионной среды. Необходимые растягивающие напряжения могут быть в виде непосредственно приложенных напряжений либо в виде остаточных напряжений. Одной из форм коррозии под напряжением, наиболее часто встречающихся в ядерной отрасли, является хлоридная коррозия под напряжением — вид межкристаллитной коррозии, которая возникает в аустенитной нержавеющей стали под действием растягивающего напряжения в присутствии кислорода, хлорид-ионов и высокой температуры.

коррозия, локальная. Коррозия, возникающая в отдельных местах поверхности материала. На отработавшее топливо в «мокром» хранилище теоретически могут воздействовать три механизма:

гальваническая коррозия. В «мокром» хранилище это преимущественная форма поражения одного из двух электрически разнородных металлов, находящихся в электрическом контакте между собой, если вода бассейна выступает в качестве электролита. Гальваническая коррозия — это потенциальная проблемная область для материалов тепловыделяющих сборок, вступающих в контакт со стеллажами для хранения, контейнерами и т.д.;

микробиологическая коррозия (МБК). Коррозия, возникающая в результате активности микробов (т.е. нарастания биопленки и образования локальной среды, губительной для металла, который они покрывают);

точечная коррозия. Коррозия, возникающая в результате локальной депассивации защитного оксидного слоя металла под воздействием агрессивных ионов.

критическая температура хрупкости (КТХ). Температура, при которой происходит выраженное снижение способности материала выдерживать воздействие силы без разрушения. В этот момент материал переходит из пластичного состояния в хрупкое.

миграция и перераспределение водорода. Миграция водорода, находящегося в твердом растворе, из высокотемпературной области оболочки в низкотемпературную область ввиду осевого распределения температур в системе хранения. Водород будет осаждаться в более холодных областях в форме гидридов только в том случае, если будет происходить достаточно высокое перенасыщение. Если это

происходит, то осаждение гидридов ведет к усилению хрупкости, которое может негативно повлиять на целостность топлива.

многоцелевой контейнер, многоцелевая канистра (МЦК). Система хранения в контейнерах или канистрах, рассчитанная, в дополнение к хранению и транспортировке, на решение задач захоронения.

мокрое хранение. Хранение в воде. Универсальный способ мокрого хранения — это хранение **отработавших тепловыделяющих сборок** или отработавших твэлов в водяных бассейнах, обычно на стеллажах или в корзинах и/или в пеналах (см. также определение **бассейна выдержки отработавшего топлива**).

нормы безопасности. Нормы, публикуемые в соответствии со статьей III А.6¹ Устава МАГАТЭ.

Требования, регулирующие положения, нормы, правила, кодексы практики или рекомендации, предназначенные для защиты людей и окружающей среды от воздействия ионизирующего излучения и сведения к минимуму опасности для жизни и имущества.

Нормы безопасности, публикуемые с 1997 года в Серии норм безопасности МАГАТЭ, подразделяются на категории: «Основы безопасности», «Требования безопасности» и «Руководства по безопасности».

Некоторые нормы безопасности, выпущенные до 1997 года в (упраздненной) Серии изданий по безопасности, относились к категориям норм безопасности, кодексов, положений или правил.

оболочка твэла. Обычно это труба из какого-либо материала, в которую помещаются таблетки ядерного топлива и которая обеспечивает локализацию (средство локализации) радионуклидов.

обращение с отработавшим топливом. Все виды деятельности, имеющие отношение к технологическим операциям с отработавшим топливом (включая переработку и регенерацию) или хранению отработавшего топлива, за исключением транспортировки за пределами площадки.

¹ Агентство уполномочивается «устанавливать или применять, в консультации и, в надлежащих случаях, в сотрудничестве с компетентными органами Организации Объединенных Наций и с заинтересованными специализированными учреждениями, нормы безопасности для охраны здоровья и сведения к минимуму опасности для жизни и имущества (включая такие же нормы для условий труда)...».

отработавшее топливо. 1. Ядерное топливо, извлеченное из реактора после облучения, которое более не пригодно для использования в данной форме вследствие обеднения делящегося материала, накопления поглотителя нейтронов или радиационного повреждения.

2. Ядерное топливо, облученное в активной зоне реактора и окончательно извлеченное из нее.

охрупчивание. Значительное снижение пластичности материала, делающее его хрупким. Используется для описания любых явлений, когда окружающая среда, например температура или состав окружающей среды, ухудшает механические характеристики материала, находящегося под напряжением.

пенал (чехол). Контейнер (обычно цилиндрический) для дистанционных технологических операций с отработавшим топливом или высокоактивными отходами, который обеспечивает физическую локализацию и некоторую степень защиты, но может потребовать дополнительной защиты.

переориентация гидридов. Процесс, при котором осажденные гидриды циркония растворяются в твердой металлической матрице до точки насыщения водородом и могут переориентироваться в другом направлении во время охлаждения под влиянием внутреннего давления в стержне. Если гидрид меняет направление с кругового на радиальное, это может повлиять на механические свойства оболочки ТВЭЛ.

переработка. Процесс или операция, цель которых состоит в извлечении радиоактивных изотопов из отработавшего топлива для дальнейшего использования.

приреакторное (ПР) хранилище. Хранилище (бассейн), расположенное рядом с реактором, внутри здания гермообъема.

проектная авария (ПА). Постулируемая авария, приводящая к возникновению аварийных условий, с учетом которых установка проектируется в соответствии с установленными проектными критериями и консервативной методологией и при которых выбросы радиоактивного материала удерживаются в рамках допустимых пределов.

система*. Совокупность элементов, взаимодействующих в соответствии с проектом и обеспечивающих выполнение конкретной (активной) функции, при этом компонентом системы может быть другая система, называемая подсистемой. Примерами являются механические системы, электрические системы и системы контроля и управления.

система хранения в пенах. Система хранения, при которой некоторое количество тепловыделяющих сборок помещается в пенал, производится осушка содержимого и пенал заваривается для последующих операций по хранению и транспортировке.

смешанное оксидное топливо (МОХ-топливо). Топливо ядерных реакторов, содержащее более одного типа делящихся нуклидов, причем оба или все они находятся в форме оксидов. Чаще всего это топливо, содержащее как оксид урана, так и оксид плутония.

стеллаж для хранения топлива. Конструкция в «мокром» или «сухом» хранилище, в которую помещаются отработавшие тепловыделяющие сборки или контейнеры для хранения в такой конфигурации, которая позволяет управлять критичностью, обеспечивает отвод тепла и облегчает обращение с топливом.

сухое хранение. Хранение в газовой среде, такой как воздух или инертный газ. К «сухим» хранилищам относятся объекты для хранения отработавшего топлива в транспортно-упаковочных контейнерах, бункерах или камерах.

тепловыделяющая сборка. Комплект топливных стержней и связанных с ними компонентов, которые загружаются в активную зону реактора, а впоследствии извлекаются из нее в виде единого блока.

тепловыделяющий элемент (ТВЭЛ). Стержневой сердечник из ядерного топлива, его оболочка и любые связанные с ними компоненты, необходимые для формирования единой конструкции. В легководных реакторах обычно называется **топливным стержнем**.

топливная таблетка. Произведенная заводским способом форма керамического ядерного топлива, в основном оксидного, а также карбидного и нитридного, получаемая путем уплотнения и спекания порошка или топливных микросфер диаметром 10–1000 мкм.

топливный стержень. Основной компонент ядерного топлива, изготовленный для использования в реакторе и состоящий из делящегося материала и/или материала для воспроизводства (оксида или металла), герметизированного в металлической трубе; также называется «стержневым твэлом» и «топливной подсоркой».

транспортно-упаковочный контейнер. Емкость для перевозки и/или хранения отработавшего топлива и других радиоактивных материалов. Транспортно-упаковочный контейнер выполняет несколько функций: он обеспечивает химическую, механическую, тепловую и радиологическую защиту, а также рассеивание остаточного тепловыделения при обращении, перевозке и хранении.

транспортный пакет. Второй (или дополнительный) наружный контейнер для одной или нескольких упаковок с отходами или отработавшим топливом, используемый для манипулирования, перевозки, хранения и/или захоронения.

управление старением. Инженерно-технические, эксплуатационные меры и меры по техническому обслуживанию, предназначенные для удерживания в допустимых пределах деградации вследствие старения конструкций, систем и элементов.

Примеры инженерно-технических мер включают проектирование, аттестацию и анализ отказов. Примеры эксплуатационных мер включают надзор, выполнение эксплуатационных регламентов в установленных пределах и измерение параметров окружающей среды.

усталость. Состояние, при котором определенный материал или конструкция превысили расчетный срок службы и становятся более склонными к образованию дефектов.

установка для обращения с отработавшим топливом. Любая установка или объект, основным назначением которых является обращение с отработавшим топливом.

хранение отработавшего топлива. Процесс размещения и сохранения отработавшего топлива в определенном месте в безопасных условиях и с возможностью последующего извлечения. Это предполагает наличие сооружения, обеспечивающего адекватную защиту окружающей среды и физическую защиту. Необходимо обеспечить экранирование,

локализацию радионуклидов, управление критичностью и рассеивание остаточного тепловыделения.

элемент. Одна из составляющих системы, включающая в себя оборудование (например, провода, транзисторы, интегральные схемы, двигатели, реле, соленоиды, трубы, штуцеры, насосы, баки, клапаны) или программные средства (например, модули, регламенты, программы, функции программного обеспечения).

Примечание. Определения, отмеченные звездочкой (*), взяты из издания 2018 года Глоссария МАГАТЭ по вопросам безопасности.

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ

АЭС	атомная электростанция
ВАО	высокоактивные отходы
ВВЭР	водо-водяные энергетические реакторы
ВР	вне реакторный
ВР-ВП	вне реактора, вне площадки
ВР-ПР	вне реактора, на площадке реактора
ГХК	Горно-химический комбинат, Российская Федерация
ДБКУ	документация по безопасности конструкции упаковки
ДЖАПК	Японская ядерно-энергетическая компания
ДЦК	двухцелевой контейнер
ЗГР	замедленное гидридное растрескивание
ЗУ	запроектные условия
КРН	коррозионное растрескивание под напряжением
КСЭ	конструкции, системы и элементы
КТИ	ключевая точка измерения
МБК	микробиологическая коррозия
МКСХ	модульно-камерное сухое хранилище
МЦК	многоцелевая канистра
ПР	приреакторный
ПУС	программа управления старением
РБМК	реактор большой мощности канального типа
РФС	«Рисайклабл фьюэл сторидж компани», Япония
СОЛАС	Международная конвенция по охране человеческой жизни на море
СОНГС	атомная электростанция «Сан-Онофре», штат Калифорния, США
СПАР	оценка и исследования характеристик отработавшего топлива
ТЕПКО	Токийская электроэнергетическая компания, Япония
ХОЯТ-2	промежуточное хранилище отработавшего ядерного топлива сухого типа, Украина
ЦХ	централизованное хранилище, Испания
ЧАЭС	Чернобыльская атомная электростанция
ALARA	на разумно достижимом низком уровне
BWR	кипящий реактор
CANDU	канадский дейтериево-урановый [реактор]
CANSTOR	модуль хранения CANdu STORage
ККГ	атомная электростанция «Гёсген», Швейцария

KTA	Der Kerntechnische Ausschuss (Комиссия по нормам ядерной безопасности), Германия
LWR	легководный реактор
MACSTOR	модульное хранилище с воздушным охлаждением
MOX	смешанное оксидное (топливо)
NUHOMS	горизонтальная модульная система хранения компании «Орано»
PWR	реактор с водой под давлением
UOX	оксид урана

СОСТАВИТЕЛИ И РЕЦЕНЗЕНТЫ

Carlsen, B.	Айдахская национальная лаборатория, Соединенные Штаты Америки
Carreton, J.P.	Институт радиационной защиты и ядерной безопасности, Франция
Caruso, S.	«Кернкрафтверк-Гёстен-Даникен», Швейцария
Constantin, A.	Международное агентство по атомной энергии
Fernandez, J.	Национальная компания по обращению с радиоактивными отходами, Испания
Garrido, D.	«Ньюклеар эшюаранс корпорейшн интернэшнл», Испания
Gastl, C.	Международное агентство по атомной энергии
González-Espartero, A.	Международное агентство по атомной энергии
Granaas, R.	«Саузерн Калифорния Эдисон», Соединенные Штаты Америки
Guskov, A.	Международное агентство по атомной энергии
Issard, H.	«Орано ТН», Франция
Хаперская, А.	Росатом, Российская Федерация
McManniman, L.	Международное агентство по атомной энергии
Poirier, S.	Международное агентство по атомной энергии
Rovny, J.	Международное агентство по атомной энергии
Saegusa, T.	Центральный научно-исследовательский институт электроэнергетической промышленности, Япония
Shakoor, A.	Международное агентство по атомной энергии
Shepitchak, A.	Государственная инспекция ядерного регулирования Украины

Standring, P.	«Селлафилд лимитед», Соединенное Королевство
Takats, F.	«ТС Энеркон», Венгрия
Valiveti, L.	Международное агентство по атомной энергии

СОВЕЩАНИЯ КОНСУЛЬТАНТОВ

Вена, Австрия: 20–22 марта 2018 года, 11–13 декабря 2018 года,
3–5 декабря 2019 года, ежемесячные виртуальные совещания в 2020 году

