

Серия изданий МАГАТЭ по ядерной энергии

№. NW-T-2.9

Основные
принципы

Цели

Руководства

Технические
доклады

Вывод из эксплуатации ускорителей частиц



IAEA

Международное агентство по атомной энергии

ПУБЛИКАЦИИ СЕРИИ ИЗДАНИЙ МАГАТЭ ПО ЯДЕРНОЙ ЭНЕРГИИ

СТРУКТУРА СЕРИИ ИЗДАНИЙ МАГАТЭ ПО ЯДЕРНОЙ ЭНЕРГИИ

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

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

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

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

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

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

ВЫВОД ИЗ ЭКСПЛУАТАЦИИ УСКОРИТЕЛЕЙ ЧАСТИЦ

Членами Международного агентства по атомной энергии являются следующие государства:

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

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

СЕРИЯ ИЗДАНИЙ МАГАТЭ ПО ЯДЕРНОЙ ЭНЕРГИИ, № NW-T-2.9

ВЫВОД ИЗ ЭКСПЛУАТАЦИИ УСКОРИТЕЛЕЙ ЧАСТИЦ

МЕЖДУНАРОДНОЕ АГЕНТСТВО ПО АТОМНОЙ ЭНЕРГИИ,
ВЕНА, 2022 год

УВЕДОМЛЕНИЕ ОБ АВТОРСКОМ ПРАВЕ

Все научные и технические публикации МАГАТЭ защищены положениями Всемирной конвенции об авторском праве, принятой в 1952 году (Берн) и пересмотренной в 1972 году (Париж). Впоследствии авторские права были распространены Всемирной организацией интеллектуальной собственности (Женева) также на интеллектуальную собственность в электронной и виртуальной форме. Для полного или частичного использования текстов, содержащихся в печатных или электронных публикациях МАГАТЭ, должно быть получено разрешение, которое обычно оформляется соглашениями типа роялти. Предложения о некоммерческом воспроизведении и переводе приветствуются и рассматриваются в каждом случае в отдельности. Вопросы следует направлять в Издательскую секцию МАГАТЭ по адресу:

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

© МАГАТЭ, 2022 год
Отпечатано МАГАТЭ в Австрии
Октябрь 2022 года
STI/PUB/1854

ВЫВОД ИЗ ЭКСПЛУАТАЦИИ
УСКОРИТЕЛЕЙ ЧАСТИЦ
МАГАТЭ, 2022 ГОД
STI/PUB/1854

ISBN 978–92–0–427520–9 (печатный формат)
ISBN 978–92–0–427620–6 (формат pdf)
ISSN 2664–4886

ПРЕДИСЛОВИЕ

Главной целью МАГАТЭ является достижение «более скорого и широкого использования атомной энергии для поддержания мира, здоровья и благосостояния во всем мире». Одним из путей достижения этой цели является публикация различных серий документов по техническим вопросам. К ним относятся следующие две серии: Серия изданий МАГАТЭ по ядерной энергии и Серия норм безопасности МАГАТЭ.

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

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

Появление первых ускорителей частиц было обусловлено стремлением изучить структуру атомного ядра. В развитии и усовершенствовании этого изобретения произошел быстрый скачок от экспериментов по «расщеплению атомов» ко множеству практических применений. Самые большие и мощные ускорители по-прежнему используются для исследований частиц высоких энергий, однако в XX веке и в настоящее время наибольшее распространение ускорители получили в медицине и промышленности. К наиболее распространенным установкам относятся линейные ускорители электронов, используемые в лучевой терапии; кроме того, продолжается быстрый рост применения ускорителей для протонной и ионной терапии. Увеличение спроса на производимые ускорителями радионуклиды для использования в медицине, промышленности и научных исследованиях обуславливает расширение их производства. В области исследований использование источников синхротронного излучения и светового излучения лазеров на свободных электронах позволяет расширять сферу применения ускорителей, распространяя ее на гораздо более широкий спектр научных дисциплин — от физики твердого тела до биологии и археологии, что также предопределяет устойчивый рост числа таких установок.

Вывод из эксплуатации является неизбежным завершающим этапом жизненного цикла ускорителя, также как и в случае всех других ядерных установок. Оценка потенциальных проблем (в том числе радиологического облучения работников и населения), радиологическая характеристика, методы демонтажа, образование радиоактивных отходов и обращение с ними, затраты и повторное использование площадки — все это важные аспекты процесса вывода из эксплуатации любой ядерной установки, включая объекты, на которых размещены ускорители.

Во многих странах ускорители не подлежат такому же регулированию, которое применяется в отношении таких ядерных установок, как ядерные реакторы или объекты ядерного топливного цикла, и сотрудники, работающие на ускорителях, могут обладать меньшими знаниями в области обращения с отходами и вывода из эксплуатации, чем персонал других ядерных установок. В некоторых случаях ускорители оказывались частично невостребованными и оставленными без внимания из-за отсутствия интереса или непонимания важности работ по выводу ускорителя из

эксплуатации. В таких случаях при выводе из эксплуатации могло игнорироваться применение даже минимальных требований и надлежащих стратегий, что приводило к неоправданным расходам, задержкам и, возможно, к проблемам в обеспечении безопасности.

В настоящей публикации приводится практическая информация о выборе и реализации стратегий и методов дезактивации и демонтажа ускорителей. Публикация предназначена для лиц, осуществляющих работы по выводу из эксплуатации, в том числе лиц, имеющих небольшой опыт или вообще не имеющих опыта в данной области.

В связи с тем, что в государствах — членах МАГАТЭ значительно увеличилось число и расширилась сфера применения ускорителей, МАГАТЭ признало необходимость подготовки публикации по выводу ускорителей из эксплуатации. Ранее был опубликован ряд руководящих материалов по требованиям, относящимся к обеспечению радиологической защиты во время эксплуатации ускорителей, однако вопросы, касающиеся вывода из эксплуатации этих установок, не были отражены в полной мере.

Настоящая публикация преследует цель обеспечить системный охват всего комплекса работ по выводу из эксплуатации в соответствии с программой деятельности МАГАТЭ в области вывода из эксплуатации. После подготовки первоначального проекта покойным Э. Фурье (Южная Африка) был проведен ряд совещаний консультантов с участием международных экспертов для рассмотрения проекта, внесения поправок и завершения работы над публикацией. Особая благодарность выражается С. Гриффитсу (Соединенное Королевство), который председательствовал на двух совещаниях консультантов и отрецензировал проект перед опубликованием. Сотрудниками МАГАТЭ, ответственными за настоящую публикацию, являются М. Ларая и В. Михаль из Отдела ядерного топливного цикла и технологии обращения с отходами.

РЕДАКЦИОННОЕ ПРИМЕЧАНИЕ

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

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

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

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

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

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

СОДЕРЖАНИЕ

1.	ВВЕДЕНИЕ	1
1.1.	Общие сведения	1
1.2.	Цель	4
1.3.	Область применения	4
1.4.	Структура	4
2.	РАСПРОСТРАНЕНИЕ УСКОРИТЕЛЕЙ В МИРЕ	5
3.	ХАРАКТЕРИСТИКИ, КЛАССИФИКАЦИЯ И КОМПОНЕНТЫ УСКОРИТЕЛЕЙ, ЗНАЧИМЫЕ С ТОЧКИ ЗРЕНИЯ ПРОВЕДЕНИЯ РАБОТ ПО ВЫВОДУ ИЗ ЭКСПЛУАТАЦИИ	9
3.1.	Введение	9
3.2.	Радиационная обстановка на ускорителях	10
3.3.	Классификация ускорителей частиц	13
3.4.	Ускорители частиц класса 1	17
3.5.	Ускорители частиц класса 2	20
3.6.	Ускорители частиц класса 3	22
3.7.	Ускорители частиц класса 4	23
3.8.	Новые установки и технологии	27
4.	РАДИОЛОГИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИЗАЦИЯ УСКОРИТЕЛЬНЫХ УСТАНОВОК	32
4.1.	Характеризация ускорителей класса 1	35
4.2.	Характеризация ускорителей класса 2	37
4.3.	Характеризация ускорителей класса 3 и 4	41
5.	ПЛАНИРОВАНИЕ И ОСУЩЕСТВЛЕНИЕ РАБОТ ПО ВЫВОДУ УСКОРИТЕЛЕЙ ИЗ ЭКСПЛУАТАЦИИ	45
5.1.	Выбор стратегии вывода из эксплуатации	46
5.2.	Факторы, влияющие на стратегию вывода из эксплуатации	47
5.3.	Планирование вывода из эксплуатации	49
5.4.	Оценка воздействия на окружающую среду	53
5.5.	Подготовка и осуществление плана вывода из эксплуатации	55
5.6.	Технология демонтажа ускорителей	56
5.7.	Организационные и управленческие вопросы	57
5.8.	Заинтересованные стороны	58
5.9.	Учет вопросов вывода из эксплуатации при проектировании установок	59
6.	ПОВТОРНОЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ И РЕКОНСТРУКЦИЯ РЕЗЕРВНЫХ УСТРОЙСТВ И ЗАПАСНЫХ ЧАСТЕЙ	65
7.	ЗАТРАТЫ	68
7.1.	Оценка затрат	69
7.2.	Структура затрат	72

7.3. Финансовый анализ.	76
7.4. Финансирование.	76
8. ОБРАЩЕНИЕ С РАДИОАКТИВНЫМИ ОТХОДАМИ.	77
8.1. Общие вопросы обработки радиоактивных отходов и обращения с ними в проектах по выводу из эксплуатации.	77
8.2. Конкретные вопросы обработки радиоактивных отходов и обращения с ними в проектах по выводу из эксплуатации.	82
9. ОХРАНА ЗДОРОВЬЯ И БЕЗОПАСНОСТЬ.	85
9.1. Нормы безопасности МАГАТЭ.	85
9.2. Дифференцированный подход к обеспечению безопасности при выполнении работ по выводу из эксплуатации.	87
9.3. Последствия применения дифференцированного подхода.	88
9.4. Радиационная защита.	89
9.5. Охрана окружающей среды.	91
9.6. Радиологические и нерадиологические опасности.	91
10. ВЫВОДЫ.	96
ДОПОЛНЕНИЕ I: ПРИМЕРЫ УСКОРИТЕЛЕЙ В РАЗБИВКЕ ПО ТИПАМ.	99
ДОПОЛНЕНИЕ II: РАЗЛИЧНЫЙ ОПЫТ И ИССЛЕДОВАНИЯ В ОБЛАСТИ ОСУЩЕСТВЛЕНИЯ ПРОЕКТОВ ПО ВЫВОДУ УСКОРИТЕЛЕЙ ИЗ ЭКСПЛУАТАЦИИ.	102
СПРАВОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ.	105
БИБЛИОГРАФИЯ.	113
ПРИЛОЖЕНИЕ I: ПРИМЕРЫ НАЦИОНАЛЬНОГО ОПЫТА.	115
ПРИЛОЖЕНИЕ II: РАЗРАБОТКА УСКОРИТЕЛЕЙ.	172
ПРИЛОЖЕНИЕ III: ВЫВОД ИЗ ЭКСПЛУАТАЦИИ ТЕРМОЯДЕРНЫХ УСТАНОВОК.	178
ГЛОССАРИЙ.	195
СОКРАЩЕНИЯ.	199
СОСТАВИТЕЛИ И РЕЦЕНЗЕНТЫ.	201
СТРУКТУРА СЕРИИ ИЗДАНИЙ МАГАТЭ ПО ЯДЕРНОЙ ЭНЕРГИИ.	202

1. ВВЕДЕНИЕ

1.1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Начиная 1930-х годов ускорители становятся важными инструментами исследований, открывающими широкие возможности в осуществлении разработок, предназначенных для применения в промышленности и медицине. Арсенал ускорителей разнообразен и насчитывает многие тысячи устройств: от малогабаритных устройств до уникального гигантского Большого адронного коллайдера (БАК). В 1994 году общее число ускорителей составило около 10 000; темпы роста составляют примерно 15% в год [1].

Сегодня почти все государства — члены МАГАТЭ используют ускорители частиц, и десятки тысяч устройств используются по всему миру, внося существенный вклад в повышение благосостояния людей, а также улучшение многих услуг и продуктов, используемых в повседневной жизни [2–4]. Более 97% этих ускорителей используются для специальных медицинских или коммерческих целей. Лишь несколько сотен, в основном в университетах, исследовательских институтах и международных организациях, используются для научных исследований. Наиболее распространенные области применения ускорителей включают:

- a) производство радиоизотопов;
- b) диагностику и лечение рака в медицине;
- c) стерилизацию медицинских изделий и пищевых продуктов;
- d) разведку полезных ископаемых и нефти с использованием нейтронов, полученных на малогабаритных ускорителях;
- e) материаловедение и такие области применения, как модификация свойств материалов, нейтронно-активационный анализ, испытание материалов для термоядерных реакторов и обработка полупроводниковых чипов;
- f) фундаментальные и прикладные физические исследования;
- g) археологическое датирование, досмотр и исследование грузов.

Производство удобных для пользователя компактных медицинских циклотронов расширилось за последние десять лет благодаря достижениям в области медицинского оборудования для визуализации (позитронно-эмиссионная томография (ПЭТ) и в последнее время ПЭТ в сочетании с компьютерной томографией (ПЭТ-КТ)). Дополнительным стимулирующим фактором стало недавно принятое в развитых странах решение о том, что расходы на некоторые радиофармацевтические препараты для ПЭТ подлежат возмещению страховыми компаниями либо государством.

ПЭТ играет фундаментальную роль в медицинской визуализации с широким спектром применений, охватывающих, в частности, онкологию, неврологию и кардиологию [5]. Ожидается, что этот быстрый рост продолжится, и спрос на новые радионуклиды, применяемые в промышленности, а также в медицине, будет расширяться. При таком расширении применения возрастет потребность в циклотронах и радионуклидах, которые они могут производить [6]. Еще одна развивающаяся область связана с источниками светового излучения (источниками синхротронного излучения и лазерами на свободных электронах), охватывающими широкий спектр исследовательских и промышленных применений.

В ускорителях в типичных реакциях с заряженными частицами используются электроны и протоны, хотя дейтроны, ядра гелия ($^3\text{He}^{2+}$ и альфа-частицы) и другие более тяжелые ионы также играют определенную роль. Радиоактивность может быть наведена прямым действием первичного пучка, либо косвенным взаимодействием вторичных частиц в окружающих конструкционных материалах с образованием ряда радионуклидов. Удельная активность радиоактивных материалов, производимых на ускорительных установках, варьируется в значительной степени в зависимости от типа ускорителя,

положения материала с учетом потерь энергии пучка, а также от времени охлаждения после активации; в большинстве случаев она довольно низкая. Радиологическая характеристика является важной составляющей планирования вывода из эксплуатации. Разработаны компьютерные коды для оценки активации на ускорительной установке; типичные примеры применения иллюстрируются в настоящей публикации.

Излучение, возникающее во время эксплуатации ускорителей на высокие энергии, может взаимодействовать с окружающими материалами и предметами и приводить к активации компонентов и инфраструктуры. В результате во время вывода установок из эксплуатации необходимо обеспечивать вывоз значительных объемов радиоактивных отходов. Во многих случаях выводу из эксплуатации ускорителей не уделяется должное внимание, и работы осуществляются с той же мотивацией, что и монтаж и эксплуатация установок. В первые годы сооружения и эксплуатации ускорителей радиологические опасности не осознавались и не получали соответствующего внимания. Однако, когда были выявлены опасности, связанные с ежедневной эксплуатацией и техническим обслуживанием этих объектов, были приняты соответствующие меры радиационной защиты. Был подготовлен и опубликован ряд международных докладов [6–9] и документов по вопросам радиологических опасностей и менеджмента рисков, связанных с эксплуатацией и техническим обслуживанием ускорителей¹. Активация приводит к наличию остаточной мощности амбиентной дозы внутри туннелей ускорителей и мишенных зон, и это создает проблемы с точки зрения обеспечения радиационной защиты при выводе из эксплуатации, которые подробно рассматриваются в настоящей публикации.

Лишь в конце 1970-х годов внимание стало уделяться образованию радиоактивных отходов и радиологическим опасностям, связанным с выводом из эксплуатации. К тому времени в мире уже эксплуатировались тысячи ускорителей. Большая подборка примеров опыта, накопленного в разных странах, приводится в приложении I. В приложении II представлена краткая история ускорителей от их создания до разработки современных устройств. Одно из первых комплексных исследований по выводу ускорителей из эксплуатации было представлено международному сообществу на конференции, состоявшейся в 1979 году в Сан-Валли, штат Айдахо, Соединенные Штаты Америки (США) [10]. С тех пор были осуществлены работы по выводу из эксплуатации ускорителей всех типов. Некоторые из первых бетатронов и циклотронов, выводившихся из эксплуатации, были просто разобраны с использованием простых методов, а их компоненты повторно использованы для других целей либо проданы как металлолом. Энергия и интенсивность пучка на ранних установках, как правило, были очень низкими, поэтому любая наведенная радиоактивность практически не обнаруживалась, если не применялись очень чувствительные методы измерения. Никаких документов, протоколирующих вывод из эксплуатации ранних бетатронов и циклотронов, практически не существует, хотя компоненты ускорителей некоторых из ранних установок можно найти на выставке «Atom Smashers: Fifty Years» («Ускорители частиц: пятьдесят лет») в университетских музеях и Смитсоновском институте [11].

Публикация в технической литературе информации о проектах по выводу ускорителей из эксплуатации на ранних этапах носила периодический характер, и поэтому в открытом доступе имеется лишь ограниченное число подробных отчетов о работах по выводу из эксплуатации, выполненных в 1970-х и 1980-х годах.

В 1979 году уже было установлено, что в США насчитывалось более 1200 ускорителей частиц — от весьма малогабаритных типа Кокрофта-Уолтона и электронных линейных ускорителей (динаков) до исследовательских синхротронов на энергию в гигаэлектронвольтном диапазоне [12]. В то время не менее пятидесяти ускорителей могли создавать значительную наведенную активацию и еще несколько сотен были источником существенной активации отдельных компонентов на ускорительной установке. Было признано, что при выводе из эксплуатации некоторых ускорителей могут образовываться радиоактивные отходы низкого уровня активности. Аргоннская национальная лаборатория под эгидой Министерства энергетики

¹ Список соответствующих публикаций МАГАТЭ можно найти по адресу: www.iaea.org/publications/.

США провела исследование по выводу из эксплуатации пяти ускорителей в США. Информация, полученная в результате осуществления этих пяти проектов по выводу из эксплуатации, была использована для оценки возможности повторного использования компонентов ускорителя после проведения работ по выводу из эксплуатации. Информацию о пяти ускорителях и об их выводе из эксплуатации можно кратко изложить следующим образом [12]:

- a) *синхроциклотрон на 250 МэВ, эксплуатируемый Рочестерским университетом.* Эксплуатация ускорителя была прекращена в 1968 году, а в 1971 году он был демонтирован. Стальная рама была повторно использована для защитного экранирования, а радиоактивные отходы были захоронены, однако доступная информация о типах нуклидов, содержащихся в отходах, является весьма скудной. Здание ускорителя было оставлено целым для дальнейшего использования университетом; таким образом, анализ возможной активации бетона не проводился. Максимальная мощность дозы во время демонтажа достигла 1,4 мЗв/ч. Затраты на вывод из эксплуатации составили 104 500 долл. США;
- b) *кембриджский ускоритель электронов — электронный синхротрон на энергию 6 ГэВ в Гарвардском университете.* Эксплуатация этого ускорителя была прекращена в мае 1973 года, и большинство демонтированных компонентов было отправлено в другие лаборатории для повторного использования. Здание ускорителя не было снесено, и максимальная мощность дозы, зарегистрированная при выполнении работ по выводу из эксплуатации, была равна 1 мЗв/ч. Затраты на вывод из эксплуатации составили 735 200 долл. США;
- c) *синхроциклотрон на энергию 440 МэВ в Центре ядерных исследований Университета Карнеги-Меллона.* Ускоритель был остановлен в 1969 году и выведен из эксплуатации в 1974–1975 годах. Радиоактивные отходы были удалены, и максимальная зарегистрированная мощность дозы была на уровне 1,75 мЗв/ч. Затраты на вывод из эксплуатации составили 504 000 долл. США;
- d) *линейный ускоритель (лиinak) тяжелых ионов в Йельском университете.* Ускоритель был остановлен, и работы по демонтажу начались в январе 1975 года, почти сразу после прекращения эксплуатации. Большая часть основного оборудования была отправлена в другие лаборатории для повторного использования. Здание было признано радиологически чистым. Затраты на вывод из эксплуатации составили 105 000 долл. США;
- e) *протонный синхротрон на энергию 3 ГэВ в составе Брукхейвенского космотрона.* Ускоритель был остановлен в декабре 1966 года и оставлен в режиме ожидания на один год. Утверждается, что эта задержка с началом работ по выводу из эксплуатации привела к значительному снижению уровней наведенной активности. Большая часть оборудования была использована повторно, а остальной материал был направлен в пункт приема металлолома.

Общей чертой этих пяти проектов по выводу из эксплуатации было то, что основные компоненты были признаны пригодными для повторного использования на других установках либо отправлены на хранение в другие ускорительные лаборатории [13].

За этими проектами последовала серия других проектов по выводу из эксплуатации. Со временем международному сообществу стала доступна документация по планированию вывода из эксплуатации, информация о соответствующих затратах и извлеченных уроках. Например, в 1999 году Европейская комиссия выпустила доклад «Evaluation of the Radiological and Economic Consequences of Decommissioning Particle Accelerators» («Оценка радиологических и экономических последствий вывода из эксплуатации ускорителей частиц») [14], но это исследование ограничивалось ускорителями, которые находились в Европейском союзе. Это первая публикация, в которой была системно предоставлена информация, а также были изложены рекомендации по выводу ускорителей из эксплуатации, которые могут применяться во всем мире. Вывод ускорителей из эксплуатации становится довольно распространенным видом деятельности не только в развитых, но и в развивающихся странах.

1.2. ЦЕЛЬ

Настоящая публикация имеет целью предоставить информацию об опыте и уроках, извлеченных из осуществления проектов по выводу из эксплуатации ускорителей частиц, для всех лиц и сторон, играющих определенную роль в этом процессе, с уделением особого внимания возникающим типичным вопросам и проблемам. Она предназначена для использования операторами ускорительных установок, в особенности установок, жизненный цикл которых приближается к этапу вывода из эксплуатации, или операторами установок, находящихся в состоянии отложенного демонтажа; регулирующими органами; руководителями работ по обращению с отходами; лицами, принимающими решения на правительственном уровне; местными органами власти; подрядчиками на проведение работ по выводу из эксплуатации; конструкторами ускорителей.

Настоящая публикация также содержит информацию о преодолении типичных ограничений в отношении вывода из эксплуатации, возникающих вследствие наведенной при эксплуатации ускорителя радиоактивности на деталях установки, а также о связанных с этим стратегиях и планах обращения с отходами. Ожидается, что описанные здесь извлеченные уроки будут способствовать тому, что вопросы планирования вывода из эксплуатации будут учитываться на этапе проектирования новых установок и что, следовательно, будет сводиться к минимуму образование активированных материалов и радиоактивных отходов без ущерба для конструктивных характеристик и эффективности проведения строительных работ. Изложенные в настоящей публикации руководящие материалы с описанием надлежащей практики отражают мнение экспертов и не являются рекомендациями, сформулированными на основе консенсуса государств-членов.

1.3. ОБЛАСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ

Настоящая публикация содержит информацию о выводе из эксплуатации ускорителей частиц с уделением особого внимания установкам, подвергшимся активации или радиоактивному загрязнению в значительной степени. Определены различные типы ускорителей, используемых в составе ядерных и промышленных установок, в лечебных учреждениях или исследовательских центрах, и описано, как их проектирование, сооружение и эксплуатационные характеристики влияют на работы по выводу из эксплуатации. Приводится практическая информация о стратегиях, организации и технологиях вывода из эксплуатации.

Публикация охватывает вопросы вывода из эксплуатации ускорителей частиц, включая все их системы и подсистемы, но не касается связанных с ними объектов (например, исследовательских экспериментальных лабораторий, радиофармацевтических и радиохимических лабораторий). Термоядерные установки не являются ускорителями, однако их вывод из эксплуатации имеет ряд общих черт с выводом из эксплуатации ускорителей частиц, и поэтому в приложении III приводится описание и излагается опыт вывода из эксплуатации таких установок.

1.4. СТРУКТУРА

При составлении настоящей публикации использована структура, позволяющая упростить для работника, не имеющего достаточного опыта, задачу соблюдения логически последовательного поэтапного подхода к выполнению работ по выводу из эксплуатации ускорителя частиц.

После данного введения в разделе 2 приводится подробный перечень имеющихся в мире ускорителей с указанием их количества, типов и географического местоположения. В разделе 3 для удобства изложена классификация ускорителей с подразделением на четыре группы в зависимости от рабочего энергетического диапазона установки и типа ускоряемых частиц. Также

приводится подробная информация об этой классификации. Раздел 4 посвящен радиологической характеристике ускорителей для целей вывода из эксплуатации с использованием категорий, определенных ранее в разделе 3. В разделе 5 подробно описан весь процесс вывода ускорителей из эксплуатации, начиная с обоснования необходимости и определения стратегии и заканчивая разработкой плана вывода из эксплуатации, проведением соответствующих мероприятий и освобождением данной площадки от регулирующего контроля. В разделе 6 рассматриваются вопросы повторного использования и реконструкции ускорительных установок после вывода из эксплуатации. Раздел 7 посвящен вопросам затрат и финансирования, связанным с выполнением работ по выводу ускорителей из эксплуатации, включая нормативные требования, принятые в некоторых странах. В разделе 8 представлена информация об обращении с отходами при проведении работ по выводу из эксплуатации, включая варианты обработки, упаковки, перевозки, хранения и удаления. Раздел 9 охватывает вопросы вывода ускорителей из эксплуатации, связанные с охраной здоровья и безопасностью (включая выявление как радиационных, так и промышленных опасностей) и радиационной защитой. В разделе 10 представлены выводы, вытекающие из практического опыта. Публикация дополнена двумя дополнениями, в которых приводятся примеры ускорителей и их вывода из эксплуатации, перечнем справочных материалов, а также библиографией, глоссарием, списком сокращений и тремя приложениями, содержащими подробную информацию и описание уроков, извлеченных из конкретных проектов по выводу ускорителей из эксплуатации, краткую историю создания ускорителей и информацию о выводе из эксплуатации термоядерных установок.

2. РАСПРОСТРАНЕНИЕ УСКОРИТЕЛЕЙ В МИРЕ

В настоящее время большинство небольших ускорителей используется в медицинских или промышленных целях, и общее количество ускорителей частиц в мире превышает 30 000 [15]. Это соответствует данным о количестве ускорителей частиц, опубликованным в 2012 году [16] (данные собраны в 2010 году), когда, согласно имеющимся сообщениям, за предыдущие 60 лет во всем мире было построено 24 000 промышленных ускорителей частиц. Распределение совокупного количества промышленных ускорителей частиц по различным областям применения является следующим: 45% — ионная имплантация, 30% — обработка материалов, 10% — облучение электронным пучком, 5% — производство радиоизотопов и 5% — генерация нейтронов.

Ускорители также применяются в целях, связанных с природоохранной деятельностью, таких как очистка питьевой воды, очистка сточных вод, обеззараживание осадка сточных вод и удаление загрязняющих веществ из дымовых газов [3]. В случае промышленных ускорителей непрерывно предлагаются новые виды применения, повышается качество и расширяются возможности, что обеспечивает их затратоэффективность. Эффект от их применения продолжает расти, поскольку они обладают потенциалом, обеспечивающим решение ключевых экономических или социальных вопросов.

Получение данных о наличии ускорителей в мире весьма затруднено, поскольку в большинстве стран ускорители не лицензируются и не регулируются так, как это делается в случае таких ядерных установок, как энергетические реакторы, установки ядерного топливного цикла и исследовательские реакторы. Как правило, если ускорительные установки подлежат регулированию, то регулирующим органом для них будет не тот же самый регулирующий орган, который курирует другие упомянутые выше ядерные установки. Между поставщиками ускорителей также существует коммерческая конкуренция, и они, как правило, не всегда с готовностью предоставляют информацию о своих клиентах, защищая собственные интересы, связанные с продажей будущих установок и текущими контрактами на техническое обслуживание

и поставку запасных частей. В 1999 году Европейская комиссия разослала 266 вопросников с целью составления базы данных и получила только 91 ответ, что составило лишь 40% от ожидаемого сбора данных [14, 17].

В августе 2003 года МАГАТЭ попыталось составить перечень ускорителей частиц, вывод из эксплуатации которых может потребоваться в ближайшем будущем [18]. Перечень также не оказался полным по указанным выше причинам.

Отсутствие систематической информации о количестве, типах и применении ускорителей в мире было признано серьезной проблемой. МАГАТЭ создало базу данных [5], которая называется «База данных МАГАТЭ по источникам ионных пучков, нейтронов скалывания и синхротронного излучения в мире» (Database of Ion Beam, Spallation Neutron and Synchrotron Light Sources in the World). Эта база данных содержит техническую информацию об установках на базе ускорителей, используемых для прикладных исследований и оказания аналитических услуг в государствах — членах МАГАТЭ. Она была составлена с использованием общедоступной информации, содержащейся в других базах данных МАГАТЭ, информации, полученной от исследовательских институтов в государствах-членах и изготовителей ускорителей. Разнообразные используемые сегодня ускорительные технологии, как современные, так и более ранние, целесообразно классифицировать в соответствии с терминологией изготовителей ускорителей, которая широко применяется научным сообществом.

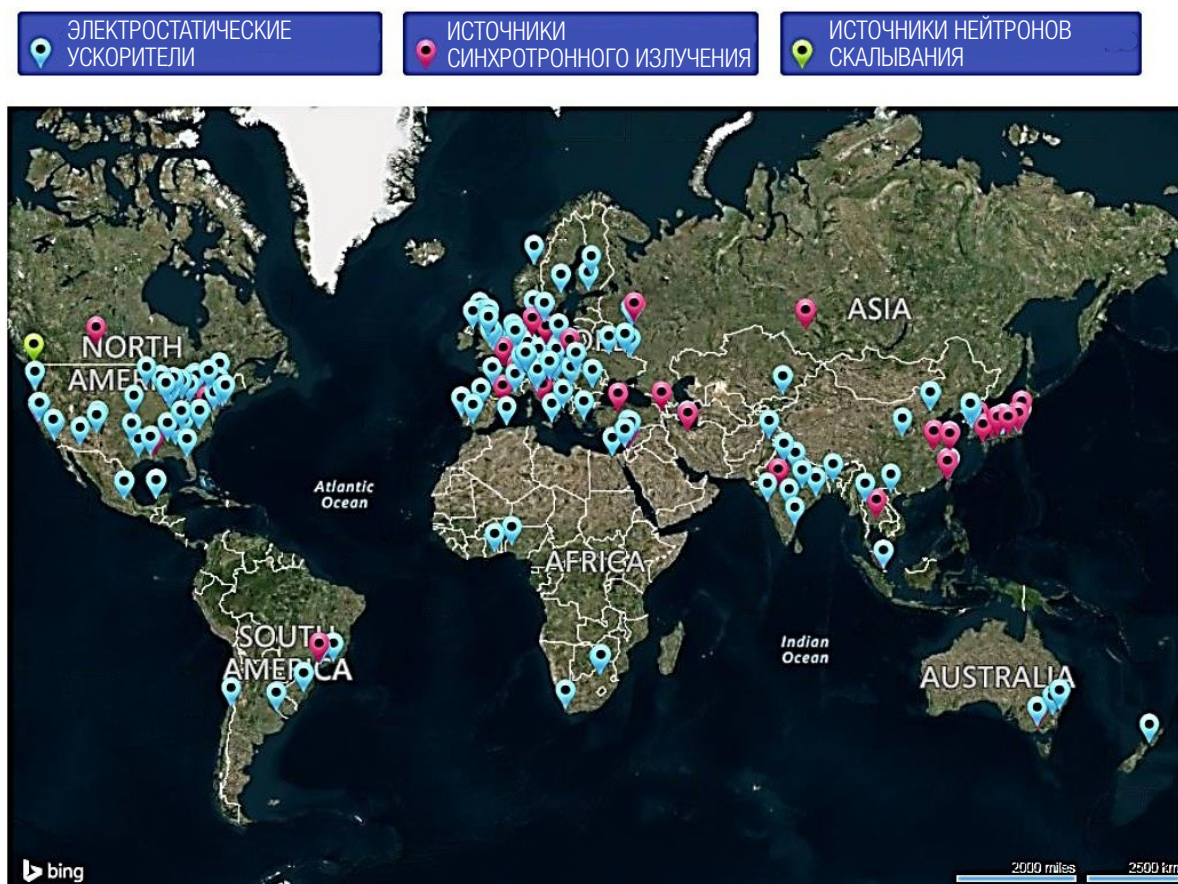


РИС. 1. Карта имеющихся в мире ускорителей частиц (воспроизведено со страницы портала знаний об ускорителях МАГАТЭ [19]).

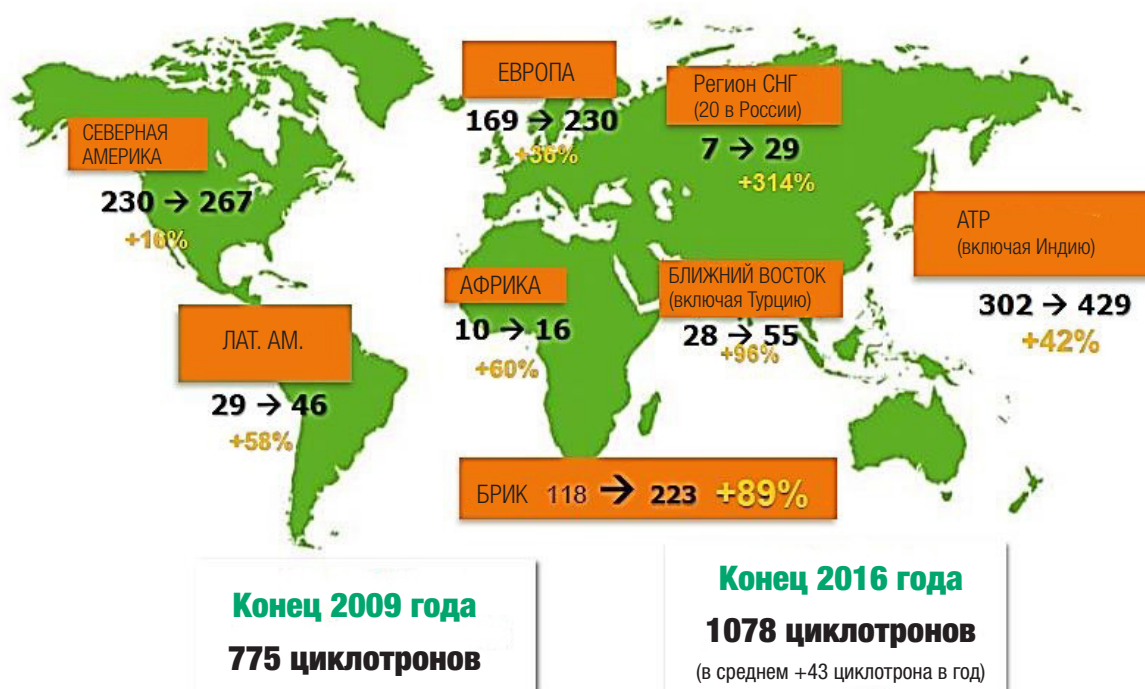


РИС. 2. Число ПЭТ-циклотронов в мире в период с 2009 по 2016 год (любезно предоставлено компанией Ion Beam Applications SA).

В этой базе данных установки на базе ускорителей группируются по трем категориям: электростатические ускорители, источники синхротронного излучения и источники нейтронов скалывания. База данных включает географические карты глобального распространения этих установок, а также данные в разбивке по государствам-членам. Пример такой карты показан на рис. 1. Актуализированная интерактивная карта, отображающая имеющиеся в мире ускорители частиц, доступна на портале знаний по ускорителям МАГАТЭ [19]. На этом сайте предоставлена информация о различных типах ускорительных установок, а также сведения о типах, местонахождении и параметрах ускорителей в государствах-членах.

Применение радиоизотопов за последнее десятилетие значительно расширилось, и одним из основных факторов, способствовавших этому ускоренному росту, было наличие большого количества циклотронов, предназначенных исключительно для производства радиоизотопов для медицинских целей. Исследование МАГАТЭ, проведенное в начале 2000-х годов [20], показало, что в государствах-членах насчитывается более 350 циклотронов. Многие из этих циклотронов предназначены для производства изотопов для ПЭТ, в частности ^{18}F для получения фтордезоксиглюкозы. Хотя производство изотопов, кроме ^{18}F с использованием этих циклотронов имеет ограниченные масштабы, сфера их применения может быть расширена с целью производства большого количества изотопов, используемых в медицине и промышленности [8]. В работе ([21]), опубликованной в 2003 году, приведенная оценка общего количества циклотронов составила 242.

Более подробные численные данные приведены в публикации [20]. Согласно этому источнику, общее количество ускорителей частиц в мире выросло с 10 000 до 17 370 за период с 1996 по 2002 год. Эта тенденция примерно согласуется с приведенной выше оценкой 30 000 ускорителей (см. [15]). На рис. 2 показан значительный рост числа циклотронов для ПЭТ в период 2009–2016 годов.

Другая классификация приводится в [22]. В этой работе перечислены ускорители; они сгруппированы по регионам мира и по типу ускорителя (приложение I). В Европе насчитывается 43 объекта; в Северной Америке — 37; в Южной Америке — пять; в Азии — 13; в Африке — один; в Австралии — четыре. На нескольких объектах размещено более одного ускорителя.

В качестве примера в таблице 1 показаны установки для адронной терапии, действовавшие в Европе в 2017 году.

ТАБЛИЦА 1. УСТАНОВКИ ДЛЯ АДРОННОЙ ТЕРАПИИ,
ДЕЙСТВОВАВШИЕ В ЕВРОПЕ В 2017 ГОДУ

Государство	Место нахождения
Австрия	Винер-Нойштадт
Бельгия	Лувен-ля-Нев
Германия	Берлин
Германия	Гейдельберг
Германия	Дармштадт
Германия	Дрезден
Германия	Мюнхен
Германия	Эссен
Италия	Катания
Италия	Павия
Италия	Тренто
Польша	Краков
Российская Федерация	Дубна
Российская Федерация	Москва
Российская Федерация	Санкт-Петербург
Соединенное Королевство	Клаттербридж
Франция	Ницца
Франция	Орсе
Чешская Республика	Прага
Швейцария	Виллиген
Швеция	Уппсала

3. ХАРАКТЕРИСТИКИ, КЛАССИФИКАЦИЯ И КОМПОНЕНТЫ УСКОРИТЕЛЕЙ, ЗНАЧИМЫЕ С ТОЧКИ ЗРЕНИЯ ПРОВЕДЕНИЯ РАБОТ ПО ВЫВОДУ ИЗ ЭКСПЛУАТАЦИИ

3.1. ВВЕДЕНИЕ

Ускорители имеют разные размеры: от достаточно малогабаритных аппаратов, размещаемых на лабораторном столе, до устройств длиной в несколько километров. Ускорители частиц — это самые большие установки, созданные человеком. БАК Европейской организации ядерных исследований (ЦЕРН) является самым большим и мощным ускорителем частиц в мире с 27-километровым кольцом, состоящим из сверхпроводящих магнитов. С другой стороны, медицинский линейный ускоритель (лиinak) обычно имеет длину 1–2 м. Ускорители могут быть линейными или циклическими (круговыми), могут работать в непрерывном или импульсном режиме и могут использовать различные методы для ускорения заряженных частиц. Энергия используемых частиц варьируется от нескольких электронвольт до нескольких тераэлектронвольт в случае коллайдеров. Общее введение в ускорители частиц содержится в [23].

Ускорители ускоряют «сгустки», содержащие большое количество частиц. В ускорителе могут одновременно находиться несколько сгустков. Например, в пучке БАК может быть до 3000 сгустков. Каждый сгусток содержит $\sim 10^{11}$ протонов. Таким образом, БАК может иметь до 3×10^{14} протонов.

Применение защитного экранирования и других мер радиологической защиты, необходимых для обеспечения безопасной эксплуатации ускорителей, составляет значительную часть первоначальных затрат на сооружение установки. В качестве защитного экранирования и конструкционных материалов, как правило, используются свинец, бетон или железо в различной конфигурации и форме.

В течение срока службы, который может составлять десятилетия, ускорители и окружающие их конструкции подвергаются активации в результате воздействия первичных и вторичных частиц на оборудование и конструкции, в которых размещаются ускорители. Поверхностное радиоактивное загрязнение может быть обусловлено осаждением радиоактивных веществ (например, аэрозолей на компонентах ускорителя и расположенных вблизи конструкциях). Вместе с тем радиоактивное загрязнение — это явление, редко возникающее во время эксплуатации большинства ускорителей. На некоторых установках может возникать проблема загрязнения тритием (например, как примесь в материале мишени или детекторном газе или как продукт реакций скалывания при высоких энергиях). В более долгосрочной перспективе аккумуляция радиоактивного загрязнения является проблемой, связанной с выполнением работ по выводу из эксплуатации. Наличие радиоактивности и сложность задачи вывода из эксплуатации в значительной степени зависят от типа ускорителя, истории его эксплуатации и области применения; сложность может варьироваться от почти нулевой до значительной. Ускорители имеют ограниченный ожидаемый срок эксплуатации и должны быть спроектированы, изготовлены, и управление ими должно осуществляться должным образом с учетом проведения в будущем работ по выводу из эксплуатации.

Международные стандарты, нормы или руководства по выводу ускорителей из эксплуатации отсутствуют. Некоторые документы содержат материалы, касающиеся ускорителей, в виде небольшого раздела в составе более объемных руководств (например, по выводу из эксплуатации небольших установок [24]), но рекомендации, изложенные в таких документах, носят общий характер и не предназначены для конкретной установки. Руководящие материалы по выводу из эксплуатации содержатся, например, в публикации Американского национального института стандартов «Radiation Safety for the Design and Operation of Particle Accelerators» («Радиационная безопасность при проектировании и эксплуатации ускорителей частиц») [25]. В технической

литературе время от времени описывались примеры вывода ускорителей из эксплуатации, однако публикаций по системному подходу к дезактивации и системной технологии демонтажа и обращения с отходами применительно к всем типам ускорителей не было. Эти проблемы являются довольно распространенными, поскольку в большинстве стран имеются ускорители.

Вывод ускорителей из эксплуатации представляет собой сложную задачу по ряду причин, включая следующие:

- a) диапазон остаточной активации сильно варьируется (остаточная активация незначительна в случае некоторых ускорителей и близка к критериям освобождения от контроля или ниже этих критериев). Кроме того, распределение активации различается в значительной степени в пределах данного объекта с вероятным наличием горячих точек;
- b) национальные или рекомендованные на международном уровне критерии освобождения от контроля очень низкие, и поэтому измерение или оценка остаточной активации может стать трудной задачей;
- c) критерии освобождения от контроля различаются от государства к государству, и процедуры характеристики, применяемые в одном государстве, могут не применяться в другом государстве, в котором предусматривается общее освобождение от контроля, как например, во Франции (см. раздел I-5, касающийся вывода из эксплуатации Большого электрон-позитронного коллайдера (LEP) в ЦЕРН);
- d) радиологические характеристики в конце жизненного цикла существенно различаются в зависимости от истории эксплуатации, конкретных спецификаций и модификаций, а также наличия необычных радиоизотопов. Такая вариативность ограничивает применение общих планов вывода из эксплуатации.

3.2. РАДИАЦИОННАЯ ОБСТАНОВКА НА УСКОРИТЕЛЯХ

Исторические модели возникновения полей мгновенного излучения во время работы ускорителя непосредственно обуславливают появление наведенной активности и радиационных повреждений материалов, с которыми приходится иметь дело в процессе выполнения работ по выводу из эксплуатации. Поэтому полезно иметь общее представление о природе и распределении полей мгновенного излучения в ускорителях электронов и адронов (протонов и ионов).

Мгновенное излучение образуется в результате запланированных и незапланированных потерь энергии пучка в компонентах канала транспортировки пучка. Запланированные и ожидаемые потери возникают в поглотителях пучка, чопперах, щелях, узких апертурах, ударных (кикерных) магнитах, магнитных шиканах (селекторах), септумах, экранах и других диагностических устройствах. Потери энергии пучка также могут возникать практически где угодно, если пучок имеет неправильное направление в случае неисправности оборудования настройки ускорителя (например, при отказе рулевого магнита).

Активация возникает в результате ядерных взаимодействий в материалах пучкового канала и его окружения. В случае адронных машин такие ядерные реакции возможны в мегаэлектронвольтовом диапазоне первичных частиц, который для конкретных материалов значительно ниже 10 МэВ. Примеры (p, n) взаимодействий для ядер, имеющих низкое массовое число, с низким порогом приведены в таблице 2. Эффективный порог выше для ядер с большей массой из-за влияния кулоновского барьера.

ТАБЛИЦА 2. ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ ПОРОГ
 НЕСКОЛЬКИХ (P, N) РЕАКЦИЙ *(воспроизведено
 из [26] с разрешения Национального совета по
 радиационной защите и измерениям)*

Реакции	Энергетический порог [МэВ]
${}^3\text{H}(\text{p},\text{n}){}^3\text{He}$	1,019
${}^7\text{Li}(\text{p},\text{n}){}^7\text{Be}$	1,882
${}^{45}\text{Sc}(\text{p},\text{n}){}^{45}\text{Ti}$	2,908
${}^{51}\text{V}(\text{p},\text{n}){}^{51}\text{Cr}$	1,566
${}^{63}\text{Cu}(\text{p},\text{n}){}^{63}\text{Zn}$	4,214
${}^{65}\text{Cu}(\text{p},\text{n}){}^{65}\text{Zn}$	2,165

По мере увеличения энергии первичных протонов постепенно происходят реакции, приводящие к появлению испарительных нейтронов, ядерному скалыванию и адронных каскадов. В последнем процессе приходящий протон сталкивается с отдельными нуклонами, которые могут выходить из ядра с достаточной энергией для того, чтобы вызвать аналогичную реакцию дальше по потоку. До энергий протонов в несколько сотен мегаэлектронвольт адронные каскады распространяются в основном за счет нейтронов из-за короткого диапазона ионизации вторичных протонов с более низкой энергией. При энергиях выше ~450 МэВ диапазон ионизации протонов превышает диапазон их ядерного взаимодействия (т.е. большинство протонов инициируют ядерную реакцию до окончания своего пути). На этом этапе протоны в равной степени вносят вклад в нейтроны в каскадном процессе, и с увеличением энергий генерируются более экзотические частицы.

При низких энергиях электроны также теряют энергию в основном из-за столкновений, что приводит к ионизации и возбуждению атомов в окружающей среде. С увеличением энергии все большая часть потерь энергии происходит из-за испускания фотонов, называемого «тормозным излучением». Радиационные потери за счет тормозного излучения достигают величины столкновительных потерь при так называемой критической энергии E_c и доминируют при энергиях, превышающих это значение. Для данного материала с атомным номером Z критическую энергию можно оценить, используя уравнение $E_c \text{ [МэВ]} = 800/(Z + 1,2)$. Из этого уравнения следует, что радиационные потери начинают преобладать при гораздо более низких энергиях для более тяжелых материалов, чем более легких. Например, в соответствии с этим уравнением для алюминия, вольфрама и свинца критические энергии составляют, соответственно, 56,2, 10,6 и 9,62 МэВ. В угловом распределении тормозного излучения имеется острый компонент с прямым пиком, который сужается с увеличением энергии.

При энергиях электронов, значительно превышающих критическую, когда электроны теряют свою энергию почти исключительно за счет тормозного излучения, возникает явление, известное как «электромагнитный ливень» или «электромагнитный каскад». Электрон с энергией намного больше, чем E_c , производит тормозной фотон после пересечения в среднем расстояния X_0 , называемого «радиационной длиной». Например, радиационная длина для свинца, железа и алюминия составляет 0,56, 1,76 и 8,9 см соответственно. При энергиях выше E_c фотоны тормозного излучения высокой энергии взаимодействуют в основном путем образования пар, пройдя среднее расстояние $9/7 X_0$. Образовавшиеся электрон и позитрон по-прежнему обладают очень большой энергией и скорее всего снова будут производить фотоны тормозного излучения.

Цикл повторяется, умножая частицы на каждом этапе, пока заряженные компоненты каскада, электроны и позитроны обладают достаточной энергией, чтобы в основном создавать тормозное излучение. Из вышесказанного ясно, что электромагнитный каскад также может быть инициирован обладающим энергией фотоном.

В отличие от адронов электроны не взаимодействуют напрямую с ядрами, но тормозные фотоны, обладающие достаточной энергией, могут взаимодействовать в результате возникновения фотоядерных реакций. При низких энергиях фотоны вызывают возбуждение ядра с последующим испусканием «испарительных» нейтронов. Сечение этого процесса имеет максимум, называемый «гигантским резонансом», в диапазоне примерно от 13 МэВ в случае тяжелых ядер ($A > 40$) до 20–23 МэВ в случае легких ядер. При более высоких энергиях нейтроны также образуются в результате развала псевдодейтронов и образования фотопионов. Последнее происходит за пределами порога ~ 140 МэВ (т.е. массы покоя пиона), когда рождение пиона становится энергетически возможным. Эти пионы затем генерируют вторичные нейтроны как побочные продукты своего взаимодействия с ядрами.

По сравнению с протонными машинами в электронных ускорителях ядерные реакции (и активация) начинаются при более высоких энергиях, а сечения фотоядерных процессов относительно малы. В результате при той же энергии и суммарных потерях мощности с течением времени мощности дозы от долговременной активации в электронных ускорителях будут примерно на один-два порядка величины ниже, чем в сопоставимых ускорителях протонов. Продольная протяженность электромагнитного каскада составляет примерно $20 X_0$, а максимум — около $5-8 X_0$, что соответствует 35,2 см и $\sim 11,4$ см в железе соответственно. Для сравнения, протяженность адронных каскадов измеряется в метрах.

Электромагнитные и адронные каскады генерируются преимущественно в компонентах пучкового канала, и в результате самые высокие уровни остаточной активации будут встречаться в пучковом канале и в непосредственной близости от него. Ловушки пучка, поглотители (стоперы), узкие апертуры и экспериментальные мишени обычно являются компонентами, подвергающимися наибольшей активации. Нейтроны и фотоны высоких энергий, выходящие из этих каскадов, также могут активировать окружающие конструкционные и защитные материалы, хотя на сравнительно гораздо более низком уровне.

Хотя мюоны генерируются различными процессами, они становятся важными как в протонных, так и в электронных ускорителях при высоких энергиях (ускорителях класса 4 с энергией свыше 1 ГэВ). Поскольку мюоны в основном вылетают под малыми передними углами, они создают определенную проблему при появлении за ловушками пучка. Мюоны не инициируют ядерные реакции и замедляются из-за ионизационных потерь. В результате используется большое количество конструкций переднего защитного экранирования (обычно выполненного из железа), которое существенно увеличивает объем материалов, с которыми приходится иметь дело на этапе вывода из эксплуатации.

Многие аспекты, касающиеся радиационных полей в ускорителях протонов, описанные выше, также применимы к ускорителям ионов. Скорость ионизационных потерь ионов возрастает с увеличением z^2 , где z — заряд иона. Даже с одним зарядом ион тяжелее протона, и с той же кинетической энергией он будет иметь меньшую скорость и, следовательно, более высокую тормозную способность dE/dx в нерелятивистском режиме. Следовательно, пробег ионов будет короче, чем пробег протонов, и он существенно возрастет по мере увеличения их массы или заряда. Ионы также инициируют ядерные реакции, приводящие к образованию вторичных частиц. Таким образом, важным отличительным аспектом ионных ускорителей будет первый этап взаимодействия, когда генерируется первая волна вторичных частиц. Последующие этапы аналогичны тем, которые уже обсуждались выше применительно к протонным ускорителям, включая адронные каскады и производство нейтронов на высокоэнергетических машинах.

Некоторые взаимодействия легких ионов являются экзотермическими и имеют особое значение в производстве нейтронов: ${}^2\text{H}(d, n){}^3\text{He}$ ($Q = 3,266$ МэВ), ${}^3\text{H}(d, n){}^4\text{He}$ ($Q = 17,586$ МэВ) и ${}^9\text{Be}(\alpha, n){}^{12}\text{C}$ ($Q = 5,708$ МэВ). Первые два широко используются в так называемых нейтронных

генераторах (дейтерий-дейтерий и дейтерий-третий соответственно), в которых дейтроны ускоряются всего до нескольких сотен килоэлектронвольт. Эти реакции, а также слегка эндотермическая $^{12}\text{C}(\text{d}, \text{n})^{13}\text{N}$ ($Q = 0,281 \text{ МэВ}$) могут быть использованы для получения пучков моноэнергетических нейтронов переменной энергии в зависимости от энергии первичных частиц.

Наведенная активность может возникать в некотором ускорительном оборудовании даже без включенного пучка. Например, радиочастотные резонаторы ускорителей (в частности, сверхпроводящие радиочастотные резонаторы), как известно, создают «темновой ток» электронов, испускаемых поверхностью резонатора. Высокие градиенты в сверхпроводящих радиочастотных резонаторах могут ускорять эти электроны до нескольких десятков мегаэлектронвольт, что достаточно для создания электромагнитных каскадов и последующей активации материала. Таким образом, этот тип активации может встречаться на вспомогательных объектах (например, испытательных стендах, отделенных от ускорителя).

3.3. КЛАССИФИКАЦИЯ УСКОРИТЕЛЕЙ ЧАСТИЦ

3.3.1. Критерии классификации

Большое разнообразие ускорителей частиц затрудняет применение единой системы классификации или критериев размещения и компоновки установок. Для классификации ускорителей частиц можно использовать ряд критериев. Их можно классифицировать по технологии, с помощью которой достигается ускорение (например, источник энергии, геометрия траектории ускорения), применению ускорителей (например, промышленные, медицинские), максимальной энергии, максимальному току пучка и временной структуре доставки пучка [26]. В таблицах 3 и 4 показаны два разных критерия, используемых для классификации ускорителей частиц.

Энергетические диапазоны, указанные для классов 1–4 ускорителей частиц в таблице 4, приводятся исключительно для общих целей. Эти диапазоны энергий не учитывают различия между ускорителями адронов и электронов или между ускорителями, которые использовались для разных применений. В целом, ускорители электронов будут характеризоваться гораздо более низкими уровнями активации, чем адронные ускорители. По этой причине предлагаемый порог для ускорителей класса 2 составляет 10 МэВ для протонных и 30 МэВ для электронных ускорителей. В случае электронных машин при энергиях до приблизительно 8 МэВ активации не может быть. Классификация, представленная в таблице 4, будет использоваться в дальнейшем в настоящей публикации.

В другой возможной классификации можно использовать ожидаемые количества и объемы активированных отходов, образующиеся в результате выполнения работ по выводу из эксплуатации. Согласно этому критерию, в первую категорию могут входить ускорители, активация в которых ограничивается только мишенью. Ко второй категории будут относиться ускорители, в случае которых активации подвергается мишень и ее непосредственное окружение (например, терапевтическая головка и коллиматор). Третья категория будет включать ускорители, у которых происходит активация всего ускорительного оборудования. Четвертая категория также будет охватывать соседние инфраструктуры и службы (например, защитное экранирование, строительные конструкции, грунт). В случае сложных объектов категоризация может быть разной для различных частей объекта.

ТАБЛИЦА 3. ПОЛУЧАЕМОЕ НА УСКОРИТЕЛЯХ ИЗЛУЧЕНИЕ С КЛАССИФИКАЦИЕЙ ПО ПРАКТИЧЕСКОМУ ПРИМЕНЕНИЮ

(воспроизведено из [26] с разрешения Национального совета по радиационной защите и измерениям)

Описание	Электроны	Протоны	Ионы	Фотоны	Нейтроны
Лучевая терапия	*	*	*	*	*
Промышленная радиография	н/п	н/п	н/п	*	*
Анализ материалов	н/п	н/п	н/п	н/п	н/п
Активационный анализ	н/п	*	*	н/п	*
Микроскопия электронная, ионная или позитронная	*	*	*	*	н/п
Рентгенофлуоресцентный анализ	*	*	*	*	
Геологический картаж скважин	*	н/п	*	*	*
Нейтронное рассеивание	н/п	*	н/п	н/п	*
Источники синхротронного излучения	*	н/п	н/п	*	н/п
ЛСЭ (лазеры на свободных электронах)	*	н/п	н/п	н/п	н/п
Разделение ионов	н/п	н/п	*	н/п	н/п
Археологические исследования	*	н/п	*	н/п	н/п
Ионная имплантация, оценка износа	н/п	н/п	*	н/п	н/п
Кондиционирование поверхности, огрубление	*	н/п	н/п	*	н/п
Производство радиоизотопов	н/п	*	*	н/п	*
Радиационная обработка	*	н/п	н/п	*	н/п
Радиационная стерилизация	*	н/п	н/п	*	н/п
Исследования и профессиональная подготовка	н/п	н/п	н/п	н/п	н/п
Физика ядерных структур	*	*	*	*	*
Нейтронная физика	*	*	*	*	*
Атомная физика и физика твердого тела	*	*	*	*	*
Биология, химия	*	*	*	*	*
Воздействие излучения на материалы	*	*	*	*	*
Физика частиц	*	*	*	н/п	*

Примечание: * — существует или применяется; н/п — не применимо.

ТАБЛИЦА 4. УСКОРИТЕЛИ С КЛАССИФИКАЦИЕЙ ПО ЭНЕРГЕТИЧЕСКОМУ ДИАПАЗОНУ

(воспроизведено из [14])

Класс	Энергетический диапазон ^a	Тип ускорителя	Примеры
Класс 1	Низкая энергия (2–30 МэВ)	Электронные линаки и электростатические ускорители	• Линаки для лучевой терапии • Ван-де-Грааф, tandemные ускорители, Пеллетрон, с потенциалом ниже 10 МВ
Класс 2	Средняя энергия (10–100 МэВ)	Протонные, H ⁺ или многочастичные циклотроны и линаки	• Циклотроны для производства радионуклидов для ПЭТ/однофотонной эмиссионной компьютерной томографии (ОФЭКТ) • Циклотроны для источников нейтронов • Другие ускорители (линаки и циклотроны) для физических исследований (инжекторы) • Некоторые циклотроны или синхротроны для лучевой терапии
Класс 3	Высокая энергия (100–несколько сотен МэВ)	Протонные циклотроны и синхроциклотроны и линейные высокоэнергетические ускорители	• Протонная терапия • Ускорители для физических исследований (инжекторы) • Источники нейтронов скалывания
Класс 4	Очень высокая энергия (диапазон ГэВ–ТэВ)	Высокоэнергетические синхротроны, накопительные кольца, коллайдеры	• Фундаментальные физические исследования • Широкий спектр междисциплинарных исследований с источниками светового излучения

^a Применительно к ионам: кинетическая энергия на нуклон.

3.3.2. Особенности ускорителей частиц классов 1–4

Многие компоненты ускорителей частиц являются общими для всех категорий таких ускорителей. Компоненты и их функции перечислены в таблице 5. Пользователю настоящей публикации рекомендуется обратиться к [27], где содержится полное описание элементов ускорителя, эксплуатационных методов и т.д.

В ускорителях частиц можно выделить наличие трех возможных категорий радиоактивности:

- активация.* Активации подвергаются основные компоненты, которые могут напрямую взаимодействовать с пучком (т.е. мишени, поглотители, экраны, коллиматоры, «челюсти», кикеры и септумы, источники античастиц и нейтронов). Другие компоненты, которые могут подвергаться активации, находятся в местах, где происходит потеря энергии пучка (например, магниты и узкие апертуры);
- радиоактивное загрязнение.* Радиоактивное загрязнение может возникнуть в результате утечек подвергшихся активации масла или охлаждающей воды или в результате распространения активированных материалов, отделившихся от поврежденных мишеней и окон пучкового канала. Радиоактивное загрязнение также может возникнуть в результате

ТАБЛИЦА 5. ТИПИЧНЫЕ КОМПОНЕНТЫ, НАХОДЯЩИЕСЯ В КОРПУСАХ
УСКОРИТЕЛЯ И ИХ ФУНКЦИИ

Компонент	Функция	Главный материал (вторичный материал ^a)
Источник или пушка	Производство заряженных частиц	Сталь, Cu (глинозем, HPT ^b)
Чоппер	Создание импульсной структуры пучка	Fe, Cu, W, др.
Вакуумная камера	Обеспечение вакуумной среды для пучка частиц	Сталь, Al
Система вакуумной откачки, вакуумные клапаны	Создание и поддержание вакуума	Сталь
Радиочастотные резонаторы	Ускорение пучка	Cu, Nb
Радиочастотные волноводы	Подведение радиочастотной энергии к радиочастотным резонаторам	Cu, Al, Cu/Al
Магнитные системы	Поворот, фокусировка или дефокусировка пучка; ограничение разброса энергии	Cu, Fe (сталь, Al)
Электростатические и магнитные кикеры и септумы	Изменение направления пучка	Cu, Fe (ферриты)
Криогенные системы	Охлаждение сверхпроводящих магнитов и резонаторов ускорителей (в случае ускорителей класса 3 и 4)	Сталь, Al (жидкий N и He)
Системы охлаждения (трубопроводы и слои ионообменной смолы)	Охлаждение и содержание деионизированной воды	Сталь, Cu, смола, вода (сталь, Al)
Коллиматоры, челюсти	Ограничение апертуры на переходах пучкового канала	Сплав W/Cu, Pb
Маски, теплозащитные экраны	Поглощение тепла от синхротронного излучения	Cu (сталь, Al)
Вигтлеры, ондуляторы	Получение синхротонного излучения	Cu, Fe (Co, Ni, Fe, редкоземельные элементы)
Стоперы, ловушки пучка	Поглощение или прерывание пучка	Сталь, Cu, Al, вода, графит
Мишени, окна пучкового канала	Изменение состава пучка за счет взаимодействия с материалом мишени; применяется для целей изменения структурных параметров либо проведения экспериментов; может быть внутренним или внешним по отношению к вакуумной системе	Разнообразные материалы; Be, алюминиевые сплавы и C, используемые для окон

ТАБЛИЦА 5. ТИПИЧНЫЕ КОМПОНЕНТЫ, НАХОДЯЩИЕСЯ В КОРПУСАХ УСКОРИТЕЛЯ И ИХ ФУНКЦИИ (продолжение)

Компонент	Функция	Главный материал (вторичный материал ^а)
Экраны, проволочные сканеры, цилиндры Фарадея	Выполнение диагностики пучка	Cu, сталь, др.
Постоянные магниты	Предотвращение случайного переноса пучка в оптические линии на синхротронных установках	Fe, Co, Ni, Al, Sm, редкоземельные элементы
Специализированные источники античастиц, источники нейтронов	Создание вторичных пучков, используемых на специализированных установках; достигается путем бомбардировки твердых мишеней первичным пучком	W, Hg, др.

Примечание: др. — другие материалы.

^а Перечислены только типичные материалы. Для конкретных целей может использоваться широкий спектр материалов (например, фотокатодные материалы для электронных пушек, изоляторы, покрытия).

^б Нераспыляемый геттер (газопоглотитель) примесей в вакуумном корпусе.

аварийных ситуаций, распыления или испарения после взаимодействия пучка с материалами или в результате производства радиоизотопов (включая осаждение из радиоизотопных пучков или радионуклидов, произведенных на ускорителе);

- с) *радиоактивные вещества, не образующиеся при эксплуатации ускорителя.* К таким веществам относятся калибровочные источники в экспериментальном оборудовании и другие компоненты (например, защитное экранирование из обедненного урана, детекторы).

Наличие и количество радиоактивности, которое необходимо учитывать при планировании работ по выводу из эксплуатации, будет различным в случае каждой из четырех категорий ускорителей частиц и, как правило, у адронных ускорителей будет более значительным по сравнению с ускорителями электронов.

3.4. УСКОРИТЕЛИ ЧАСТИЦ КЛАССА 1

Электростатические ускорители перемещают заряды, механически переносимые движущейся лентой-транспортером (электростатический высоковольтный ускоритель/ускоритель Ван-де-Граафа) или цепью (Пеллетрон) от источника с низким электрическим потенциалом к коллектору с высоким потенциалом. В ускорителе Ван-де-Граафа лента, движущаяся между двумя электродами, расположенными на расстоянии в несколько метров друг от друга, непрерывно переносит электрические заряды. Газоразрядная трубка помещается в большой резервуар, заполненный под давлением в несколько атмосфер азотом или смесью других газов, которые препятствуют пробое. В более поздних моделях ускорителей Ван-де-Граафа цилиндрический объем с почти однородным градиентом поля получается за счет использования большого количества коаксиальных металлических кольцевых электродов, поддерживающих последовательно градуированные потенциалы. Заряженные частицы инжектируются и ускоряются примерно до 10 МэВ в электрическом поле, созданном между электродами.

Пеллетрон представляет собой еще один пример электростатического ускорителя частиц, который похож на генератор Ван-де-Граафа, за исключением того, что в нем используется цепь,

а не резиновая лента. Цепь обеспечивает работу Пеллетрона с более высокой скоростью по сравнению с резиновой лентой ускорителя Ван-де-Граафа; следовательно, и напряжение, и токи, достигаемые на Пеллетроне, гораздо выше.

Ускорители tandemного типа предназначены для получения ионных пучков высокой энергии для ускорительной масс-спектрометрии и анализа ионных пучков в исследовательской среде. Танделы состоят из связанных между собой ускорителей Ван-де-Граафа, в которых положительные ионы сначала проходят через газовый канал, где они подхватывают электроны и ускоряются в сторону положительного вывода высокого напряжения. Затем энергетические отрицательные частицы проходят через обдирочную систему (стриппер), становятся положительно заряженными и еще раз ускоряются через вторую разрядную трубку до потенциала земли. Таким образом, общий выигрыш в энергии может достигать удвоенной разности приложенных потенциалов. Существуют трех- и четырехступенчатые варианты таких конструкций. Танделы обладают способностью производить большое разнообразие высокостабильных ионных пучков с энергиями от сотен килоэлектронвольт до нескольких мегаэлектронвольт. Танделный ускоритель состоит из двух ступеней (ускоритель Ван-де-Граафа может использоваться для генерирования энергии на первой ступени). На первой ступени отрицательные ионы (с дополнительными электронами) ускоряются от земляного потенциала до высокого положительного напряжения, а затем с ионов срываются два-три электрона в стриппере, и они становятся положительно заряженными. Положительные (прошедшие обдирку) ионы затем ускоряются дальше, переходя от положительного высокого напряжения до земляного потенциала. Установка, построенная в Дарсбери, Соединенное Королевство, имела вертикальную ускорительную трубку длиной 42 м. Это был один из самых больших танделных ускорителей, когда-либо построенных, и он находился в эксплуатации в течение многих лет. Центральный электрод этого танделного ускорителя может иметь потенциал до 20 МэВ.

Словацкий технологический университет в Трнаве имеет два ускорительных комплекса: ускоритель Тандетрон на 6 МВ и установку для ионной имплантации под открытым небом на 500 кВ. На рис. 3 показан ускоритель Тандетрон на 6 МВ, который находится в эксплуатации с 2016 года; подробные сведения приводятся в работе [28].

Пеллетрон в значительной степени вытеснил многие из более ранних ускорителей Ван-де-Граафа и танделных ускорителей. Подавляющее большинство этих машин работают с энергиями ниже 5 МэВ и, следовательно, не связаны с необходимостью обращения с значительными количествами продуктов активации во время выполнения работ по выводу из эксплуатации. Установки с более высокой рабочей энергией, как например, танделный ускоритель Ван-де-Граафа (25 МВ) в Окриджской национальной лаборатории, США, могут быть подвержены активации, и это необходимо дополнительно учитывать при проведении работ по выводу из эксплуатации.

Линейный ускоритель (лиinak) — это ускоритель, в котором частицы разгоняются по прямым траекториям при помощи переменного электрического напряжения. Переменное напряжение синхронизируется таким образом, что оно обеспечивает возрастающее приращение энергии частиц. Скорость заряженных частиц значительно увеличивается в части ускорителя, называемой «волноводом». Частицы подвергаются воздействию серии осциллирующих электрических потенциалов вдоль линейного пучкового канала за счет использования СВЧ-технологии (аналогичной той, которая используется в радарах).

Подавляющее большинство линаков представляет собой электронные устройства, используемые для дистанционной лучевой терапии. Электроны ускоряются, а затем сталкиваются с мишенью из тяжелого металла, генерируя высокоэнергетическое рентгеновское излучение. Подобные системы также используются в промышленности и исследованиях, когда требуются высокие мощности дозы для модификации материалов, стерилизации, обработки пищевых продуктов с целью продления их срока годности и т.п. [29].

Линак с максимальной энергией ниже 10 МэВ характеризуется очень ограниченной активацией компонентов, и необходимо учитывать возможное повторное использования ранее



РИС. 3. Ускоритель «Тандетрон» на 6 МВ в Словацком технологическом университете, Трнава, Братислава (любезно предоставлено Словацким технологическим университетом).

активированных конструкционных блоков и активированных запасных частей. Линаки с энергией до 30 МэВ могут иметь обнаруживаемую активацию, особенно в элементах гантри и системы коллимации пучка.

Помимо проблемы активации в связи с работами по выводу из эксплуатации линаков следует отметить, что во многих ранних установках использовался обедненный уран в конструкции защитного экранирования (коллиматоры, стержни и «челюсти»). В более поздних моделях уран был заменен вольфрамом или свинцом.

Бетатрон — это циклический ускоритель электронов, обращающихся по круговой орбите. Он имеет примерно постоянный радиус; ускорение электронов обеспечивается за счет магнитной индукции. Бетатрон состоит из трансформатора с тороидальной вакуумной трубкой в качестве вторичной обмотки. Переменный ток в первичных обмотках ускоряет электроны в вакууме по круговой траектории. В течение одной четверти периода переменного тока направление и сила магнитного поля, а также скорость изменения поля внутри орбиты имеют значения, необходимые для ускорения электронов в одном направлении.

Бетатроны с более низкой энергией в диапазоне 7–20 МэВ были специально сконструированы для использования в качестве источников «жесткого» рентгеновского излучения в энергетическом диапазоне для использования в медицинской и промышленной радиографии. Малогабаритные бетатроны, работающие с уровнями энергии примерно 7 МэВ, были разработаны для специализированных приложений в промышленной радиографии, например, для исследования бетонных, стальных и литых металлических конструкций на предмет контроля конструкционной целостности.

Вопрос активации не рассматривается в случае бетатронов на низкую энергию класса 1. Бетатронные устройства с высокими энергиями существуют и используются для различных целей. Эти устройства относятся к классу 2.

Примером типа ускорителя, относящегося к классу 1, является ускоритель «родотрон», используемый для стерилизации и других промышленных применений (рис. 4). Родотрон — это мощный ускоритель электронов, специально разработанный для стерилизации медицинских изделий в промышленных условиях. Эти ускорители, которые обычно имеют ширину около 3 м, могут обеспечивать мощность пучка до 700 кВт при энергии электронов 7 МэВ [16].

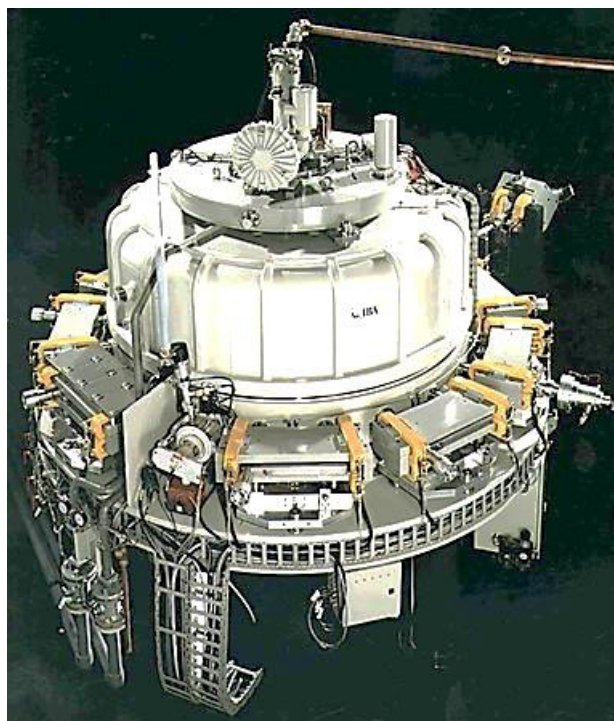


РИС. 4. Промышленное применение ускорителя частиц «Родотрон» (любезно предоставлено компанией Ion Beam Applications SA).

3.5. УСКОРИТЕЛИ ЧАСТИЦ КЛАССА 2

3.5.1. Ускорители на среднюю энергию

Ускорители класса 2 включают: а) ускорители электронов, работающие в диапазоне энергий 30–100 МэВ; б) ускорители протонов и других частиц, работающие в диапазоне энергий 10–100 МэВ. Эти устройства, рассчитанные на среднюю энергию, характеризуются активацией как первичным пучком, так и вторичным излучением (нейтроны и гамма-излучение высокой энергии).

3.5.2. Линейные ускорители

Линейные ускорители (линаки) в основном используются: а) в качестве инжекторов; б) для производства изотопов; с) в качестве источников нейтронов; d) для материаловедческих исследований. На рис. 5 показан пример линейного ускорителя протонов. Большинство активированных компонентов будет находиться в конце траектории ускорения и в окружающих мишенях или поглотителях (стоперах) пучка.



РИС. 5. Пример линейного ускорителя протонов (любезно предоставлено компанией AccSys Technology, Inc.).

3.5.3. Циклотроны

Циклотрон состоит из кольцевого устройства, состоящего из двух электродов D-образной формы (называемых «дуантами»), помещенных в магнитное поле. Основные характеристики всех циклотронов одинаковы. В составе имеется источник ионов для получения ионов, ускорительная камера для их ускорения и магнит для удержания ионов на круговой траектории. В циклотронах, используемых для производства изотопов, источник ионов обычно находится внутри вакуумной камеры; в высокоэнергетических системах ионный источник является внешним устройством, а заряженные частицы инжектируются в сильное магнитное поле. Благодаря сочетанию магнитного поля и переменного электрического поля между электродами частицы движутся по спиральной траектории до максимального радиуса, а затем выводятся к мишеням. Объем вакуумной камеры, размещаемой между массивными полюсными наконечниками электромагнита, часто составляет несколько кубических метров, а диаметры полюсов могут достигать нескольких метров.

Использование отрицательных ионов позволило значительно снизить уровень активации внутренних структур циклотронов по сравнению с ускорителями положительных ионов. Для последних требуются электростатические дефлекторы особой формы для вывода частиц, и на эти дефлекторы обычно попадает значительная часть пучка. В случае отрицательных ионов вывод частиц осуществляется за счет срыва электронов с отрицательных ионов только на последнем участке (10–20 см) траектории ускорения. Очень высокая эффективность такого механизма способствует значительному снижению активации.

Вместе с тем для циклотронов с отрицательными ионами требуются более сложные источники ионов и улучшенная вакуумная система. Выбор соответствующей технологии зависит от конечного использования и требуемого тока пучка. Как правило, в современном циклотроне для производства радионуклидов выбор делается в пользу отрицательных ионов, а в случае применений с относительно низким током в целях упрощения конструкции предпочтение отдается положительным ионам.

Во всех случаях невозможно полностью избежать потерь энергии пучка, приводящих к внутренней активации и генерации нейтронов. Чаще всего циклотроны в диапазоне энергий до 100 МэВ используются для производства широкого спектра радионуклидов, которые, как правило, применяются для медицинской диагностики с помощью однофотонной эмиссионной компьютерной томографии или методов ПЭТ-визуализации [8].

В старых циклотронах помимо дефлектора и септумов активации будут подвергаться дуанты, которые, как правило, тяжелые и громоздкие, и для характеристики и удаления этих конструкций может требоваться их резка.

Взаимодействие пучка с мишенями и системой коллимации приводит к образованию вторичных нейтронов вследствие реакций (p, xn) (d, xn) и т.д. В результате происходит активация элементов конструкции самого ускорителя, а также окружающей инфраструктуры (вспомогательных подсистем, периметральных стен или самозащиты (собственного защитного экранирования), используемых в системах некоторых типов).

3.6. УСКОРИТЕЛИ ЧАСТИЦ КЛАССА 3

Ускорители на энергию от 100 МэВ до нескольких сотен мегаэлектронвольт относятся к классу 3 и включают циклотроны, синхротроны и синхроциклотроны, а также высокоэнергетические линейные ускорители (линаки). Протоны, ускоренные циклотроном до максимальной энергии 250 МэВ, и ионы углерода, ускоренные синхротроном до максимальной энергии 400 МэВ, обычно используются для лучевой терапии глубоко сидящих опухолей.

Высокоэнергетические линаки, как правило, используются для обработки промышленных материалов и исследований. В диапазоне энергий ускорителей класса 3 можно ожидать значительной активации ускорительной установки и окружающих конструкций и инфраструктуры как за счет первичного, так и вторичного излучения.

Синхротрон является примером одного из типов циклических ускорителей частиц. В синхротроне магнитное поле (которое служит для цели вращения частиц, заставляя их циркулировать) и электрическое поле (которое ускоряет частицы) тщательно синхронизируются с движущимся пучком частиц. Синхротроны могут быть ускорителями протонов или электронов и используются для достижения очень высоких энергий пучка. Количество пациентов, проходящих ежегодно лечение с помощью протонной терапии, растет; по оценкам компании «Ion Beam Applications S.A.», это число увеличится с 16 200 в 2015 году до 300 000 к 2030 году. На рис. 6 показан протонный синхротрон на энергию 230 МэВ, установленный в 2015 году и используемый для терапии в Центре протонной терапии в Тренто, Италия [30]. Электронные и позитронные синхротроны в основном используются в источниках светового излучения.

Для компенсации релятивистских эффектов (которые возникают, когда скорость частицы приближается к скорости света) синхроциклотроны (конструкция которых основана на циклотронной технологии) работают с использованием радиочастотного электрического поля переменной частоты. В современных циклотронах с азимутально переменным полем используются сверхпроводящие магниты, создающие очень сильное магнитное поле в компактном объеме для получения аналогичных результатов.

В циклотронах с системой доставки пучка с несколькими гантри вся система распределения пучка должна рассматриваться как подверженная активации. Стенки установки также подвержены активации. Кроме того, активации будет возникать в дополнительном защитном экранировании, используемом для мишеней, системах выбора энергии и пучковых каналах. Источники нейтронов скалывания характеризуются высоким уровнем активации в мишенной зоне и вокруг нее. Использование жидкой ртутной мишени (которая применяется в случае больших источников нейтронов на основе реакции скалывания) создает особые проблемы для проведения работ по выводу из эксплуатации [31].

Подробная информация о проблемных материалах, включая ртуть, образующихся при выводе из эксплуатации, и руководящие материалы по обращению с ними изложены в [32].



РИС. 6. Первый протонный синхротрон на рельсовых направляющих в процедурном кабинете в Центре протонной терапии Тренто, Италия (любезно предоставлено компанией Ion Beam Applications SA).

3.7. УСКОРИТЕЛИ ЧАСТИЦ КЛАССА 4

3.7.1. Линейные ускорители (лиаки), синхротроны, накопительные кольца и коллайдеры

Линейные ускорители (лиаки), синхротроны и накопительные кольца с очень высокой энергией класса 4 используются для получения пучков протонов или электронов с энергией в диапазоне от гигаэлектронвольт до тераэлектронвольт для исследований в области физики элементарных частиц или для применения в качестве источников интенсивного рентгеновского излучения (синхротронного излучения). Вывод из эксплуатации больших ускорителей класса 4, таких как накопительные кольца и коллайдеры, требует надлежащего планирования и документации. Это сложная работа с точки зрения логистических, эксплуатационных и лицензионных аспектов. Во время демонтажа образуется большое количество массивных компонентов (например, магниты могут достигать длины в несколько метров и весить несколько тонн), и поэтому методы демонтажа, как правило, должны предусматривать уменьшение размеров, с тем чтобы материалы могли быть упакованы и кондиционированы в соответствии с требованиями в отношении их окончательного захоронения или для целей характеристики.

Выбор стратегии вывода из эксплуатации будет во многом зависеть от уровня активации, от конечного объема работ по выводу из эксплуатации (объект в состоянии «зеленая лужайка» или «объект неограниченного использования» или повторное использование конструкций защитного экранирования в другой ускорительной установке), от требований в отношении окончательного захоронения и от нормативной базы, в рамках которой проводятся работы по выводу из эксплуатации.

Синхротроны — это в основном постускорители, в которых используются пучки заряженных монохроматических частиц с низким эмиттансом, исходящих из инжекторов пучков низкой энергии. Ускорители представляют собой тороидальную вакуумную трубку диаметром от нескольких десятков до сотен метров. Источники синхротронного излучения обеспечивают получение синхротронного света для фундаментальных и прикладных научных исследований; мировые данные приведены в [33]. На рис. 7 показан большой современный комплекс источника синхротронного излучения на 2,75 ГэВ *SOLEIL*, расположенный недалеко от Парижа.



РИС. 7. Вид с воздуха на комплекс *SOLEIL* с источником синхротронного излучения на 2,75 ГэВ, расположенный недалеко от Парижа (любезно предоставлено комплексом *SOLEIL*).

3.7.2. Накопительные кольца

Накопительное кольцо — это тип циклического ускорителя частиц, в котором пучок частиц может циркулировать в течение многих часов. Технические решения и эффективность накопления пучка частиц зависят от массы, энергии и, как правило, заряда накапливаемых частиц. Чаще всего накопительные кольца используются для накопления электронов, протонов или позитронов в непрерывных пучках или в импульсных структурах (сгустках).

Наиболее распространенное применение накопительных колец — это накопление электронов, которые затем обеспечивают получение синхротронного излучения. В настоящее время в мире действует несколько десятков установок на основе электронных накопителей, которые используются для различных исследований во многих областях науки. Еще одно очень известное применение — накопление пучков для больших коллайдеров-ускорителей.

3.7.3. Коллайдеры

Коллайдер — это экспериментальная конфигурация пучка, которая в основном используется для фундаментальных физических исследований. В коллайдерах могут использоваться кольцевые ускорители или линейные ускорители для осуществления лобового столкновения двух пучков. Пучки могут ускоряться в а) общем пучковом канале (вакуумной камере в виде трубы), как в случае с электронами и позитронами в Большом электрон-позитронном коллайдере (LEP) ЦЕРН [34], который в настоящее время выведен из эксплуатации, или б) в двух разных пучковых каналах, как например в БАК ЦЕРН, который ускоряет протоны в разных направлениях. На рис. 8 показан БАК ЦЕРН.



Рис. 8. Большой адронный коллайдер в ЦЕРН (любезно предоставлено ЦЕРН).

Из-за потерь энергии на излучение при следовании по искривленной траектории круговые коллайдеры обычно представляют собой очень большие машины. Самая мощная и самая большая установка из когда-либо построенных — это БАК, длина кольца которого составляет 27 км.

Два пучка протонов высокой энергии, движущиеся со скоростью, близкой к скорости света, но в противоположном направлении, сталкиваются друг с другом. Оба пучка находятся в отдельных сверхвысоковакуумных трубах.

Эти пучки циркулируют по ускорительному кольцу с помощью сильного магнитного поля, генерируемого сверхпроводящими магнитами. Пучки поворачиваются посредством 1232 дипольных магнитов длиной 15 м и фокусируются с помощью 392 квадрупольных магнитов, каждый из которых имеет длину 5–7 м.

Большинство элементов ускорителя соединены с системой распределения жидкого гелия для охлаждения сверхпроводящих магнитов, температура которых поддерживается на уровне -271°C , и с другими обеспечивающими системами. Коллиматоры и фокусирующие магниты обеспечивают высокое качество пучка вблизи точек столкновения, что увеличивает вероятность столкновений.

Ускоритель «Теватрон» в Национальной ускорительной лаборатории им. Энрико Ферми («Фермилабе») в Батавии, шт. Иллинойс, США (рис. 9), ускорял пучки протонов и антипротонов со скоростью, близкой к скорости света, по кольцу длиной 6,4 км. Это был второй по мощности протон-антипротонный ускоритель в мире; он завершил свою работу в 2011 году.

Два пучка сталкивались в центрах двух детекторов массой 5000 т, расположенных вокруг пучкового канала в экспериментах «DZERO» и «CDF» (показаны на рис. 9). Столкновения воспроизводили условия, аналогичные условиям ранней Вселенной, и позволяли исследовать структуру материи на очень малых масштабах.

В отличие от «Теватрона» и БАК, где частицы вращаются по кругу до столкновения, ускоритель в Национальной ускорительной лаборатории SLAC, шт. Калифорния, США, представляет собой самый длинный в мире линейный ускоритель (лиак) — его длина составляет 3,2 км, который ускоряет электроны и позитроны в пиковом режиме работы с максимальной энергией 50 ГэВ.

На рис. 10 показан вид участка ускорителя длиной 3,2 км в Национальной ускорительной лаборатории SLAC. Сокращение объема работ по физике высоких энергий в Национальной ускорительной лаборатории SLAC привело к отсоединению некоторых частей лиака; соответственно снизился максимальный уровень энергии.

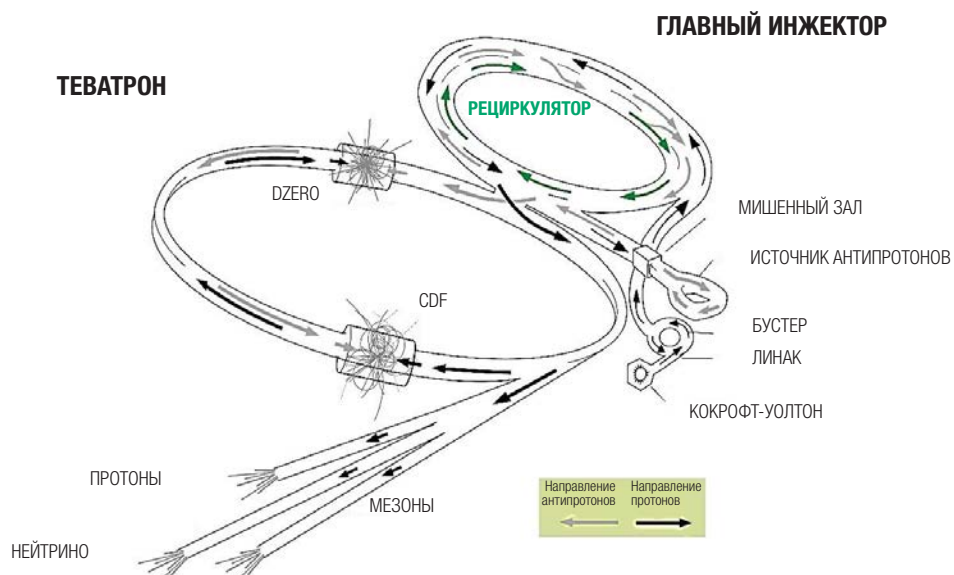


РИС. 9. Ускорительный центр с ускорителем «Теватрон» лаборатории «Фермилаб» и инжекторами (любезно предоставлено лабораторией «Фермилаб»).



РИС. 10. Вид на ускоритель длиной 3,2 км Национальной ускорительной лаборатории SLAC (любезно предоставлено Национальной ускорительной лабораторией SLAC).

3.8. НОВЫЕ УСТАНОВКИ И ТЕХНОЛОГИИ

Технологии и установки, перечисленные в предыдущих разделах, не следует рассматривать как исчерпывающий перечень всего спектра ускорительных установок. Новые установки и технологии появляются в период подготовки настоящей публикации, и они, возможно, обусловят возникновение новых проблем при их выводе из эксплуатации.

Краткий, неисчерпывающий обзор новейших установок и технологий приводится в подразделах ниже: сначала перечисляются установки, которые находятся в стадии строительства, установки, для которых разработан детальный технический проект, а затем описываются современные тенденции в исследованиях по ускорителям.

3.8.1. Новейшие технологии

Плазменное ускорение — это метод ускорения заряженных частиц, таких как электроны, позитроны и ионы, с использованием электрического поля, связанного с электронной плазменной волной. Волна создается электронными импульсами, либо прохождением сверхкоротких лазерных импульсов [35]. В плазменном ускорителе используется относительно новый метод ускорения частиц, в котором частицы совершают «серфинг» на плазменной волне. Плазма представляет собой текучую среду (флюид), состоящую из положительно и отрицательно заряженных частиц, обычно образующихся при нагревании разряженного газа.

Лазерное ускорение плазмы основано на иных физических принципах, чем обычное ускорение частиц, в случае которого до настоящего времени использовались электрические поля, генерируемые радиоволнами, для ускорения электронов и других частиц до значений, близких к скорости света. Для ускорения частиц лазерными полями было предложено множество подходов; среди рассмотренных подходов лазерное кильватерное ускорение в плазме низкой плотности является одним из наиболее перспективных методов. Потенциально это позволяет достигать энергий до 1 ГэВ в очень маленьких ускорительных камерах с размерами, составляющими сантиметры, а не сотни метров. В такой системе возможно использование лазерного импульса для создания зарядового «следа» в плазменной среде с низкой плотностью, где частицы будут перемещаться по плазменному следу (подобно серфингисту, поймавшему хорошую волну), развивая постоянно растущие скорости. Предстоит решить многие технические проблемы, прежде чем реальностью станет применение «настоющих» ускорителей и плазменных устройств турбозарядки частиц (turbochargers) в конструкции более крупных ускорителей.

Плазменные ускорители успешно используются для ускорения электронов, протонов, дейтронов и других ионов. Ускорение электронов достигается за счет выстрела в газовую струю очень мощного лазерного пучка. Электроны могут ускоряться до энергий в сотни мегаэлектронвольт и после взаимодействия со стенками экспериментальной камеры и окружающим материалом будут генерировать мгновенное излучение в виде тормозных фотонов, нейтронов и других частиц (заряженных частиц, ионов, ядерных фрагментов и задержанного излучения). Мгновенное излучение получается тем сложнее, чем выше энергия ускоренных частиц [36, 37].

Быстрый прогресс в изучении процессов взаимодействий высокоинтенсивного лазерного излучения с веществом в релятивистской области привел к появлению нескольких применений с созданием интенсивных источников частиц [38]. Были получены энергии протонов порядка десятков мегаэлектронвольт, а также была доказана возможность производства медицинских радионуклидов [39]. Опубликован ряд первоначальных отчетов по вопросам радиационной защиты при использовании этого типа ускорителей и по активации, которая может иметь место при выполнении работ по выводу установок из эксплуатации [40, 41]. Приведенные оценки указывают на ограниченную активацию самой системы и окружающих материалов.

Однако на момент подготовки настоящей публикации объем доступной информации очень мал и в основном включает оценки, а не опыт, накопленный при использовании первых прототипов. Поскольку исследования по этому типу ускорителей все еще находятся в стадии

осуществления, а прикладные технологии не достигли зрелости, вывод из эксплуатации первых экспериментальных установок не стоит в повестке дня. Вместе с тем первые экспериментальные установки могут подвергаться модернизации или частичной модификации, что будет приводить к демонтажу или повторному использованию по крайней мере некоторых компонентов. Ускорители этого типа еще не могут быть включены в систему классификации, используемую в настоящей публикации (классы 1–4) из-за незрелости конструкции и недостатка имеющейся информации. В то же время первые испытания и планы использования мощных лазеров свидетельствуют о том, что гигаэлектронвольтный диапазон энергии является вполне достижимым. На установке Extreme Light Infrastructure Beamlines, которая строится на площадке в Румынии, планируется достичь ускорения электронов до 1 ГэВ и протонов до 100 МэВ.

При проектировании новых установок следует применять осторожный подход, предусматривающий решения, облегчающие проведение работ по выводу из эксплуатации, информация о которых приводится в настоящей публикации применительно к ускорителям других типов.

3.8.2. Новые строящиеся установки

В число других строящихся установок входят:

- a) *Центр по исследованию ионов и антипротонов (FAIR).* Это новый уникальный международный ускорительный комплекс, предназначенный для исследований с использованием антипротонов и ионов. Он уже строится недалеко от Дармштадта, Германия. Его основа — это двухкольцевой ускоритель (синхротрон тяжелых ионов SIS100) с окружностью 1100 м, который будет иметь сложную систему охладительных и накопительных колец и экспериментальные установки. Синхротрон будет обеспечивать доставку пучков ионов в беспрецедентном диапазоне интенсивностей и энергий. Следовательно, могут быть получены интенсивные вторичные пучки, обеспечивающие антипротоны и экзотические ядра для революционных экспериментов. Он будет представлять собой уникальный комплекс ускорительных и экспериментальных установок, позволяющий проводить широкий спектр беспрецедентных передовых исследований в области физики адронов, ядер, атома и плазмы, а также в прикладных научных целях [42]. Ожидается, что к 2025 году Центр FAIR начнет работу, и получаемые пучки будут использоваться для научных экспериментов. На рис. 11 представлен схематический план Центра;
- b) *КЕК — Организация по изучению высокоэнергетических ускорителей, Япония.* SuperKEKB находится в стадии строительства для замены КЕКВ. Строятся два синхротрона для экспериментов по столкновению электронов с энергией 7 ГэВ и позитронов с энергией 4 ГэВ. SuperKEKB будет иметь светимость, в 40 раз превышающую светимость, которая была у КЕКВ;
- c) *Международная установка по облучению материалов для термоядерного синтеза* Это совместный проект в области термоядерного синтеза с участием Японии, Российской Федерации, США и Европейского союза (ЕС) (рис. 12); установка строится в префектуре Аомори в Японии [43]. Основной задачей, которая будет решаться на установке, является изучение поведения материалов и компонентов, подвергающихся облучению в условиях, типичных для термоядерного реактора. Для этого ускорение дейтерия с большим током пучка будет осуществляться с помощью двух ускорителей для источников нейтронов с энергией 14 МэВ, генерируемых литиевой мишенью;
- d) *JT-60SA.* Это термоядерный эксперимент, разработанный с целью поддержки работы по Международному термоядерному экспериментальному реактору (ИТЭР) (рис. 13). «SA» означает «super, advanced — супер продвинутый», поскольку эксперимент будет иметь сверхпроводящие катушки и изучать продвинутые режимы удержания плазмы [44].

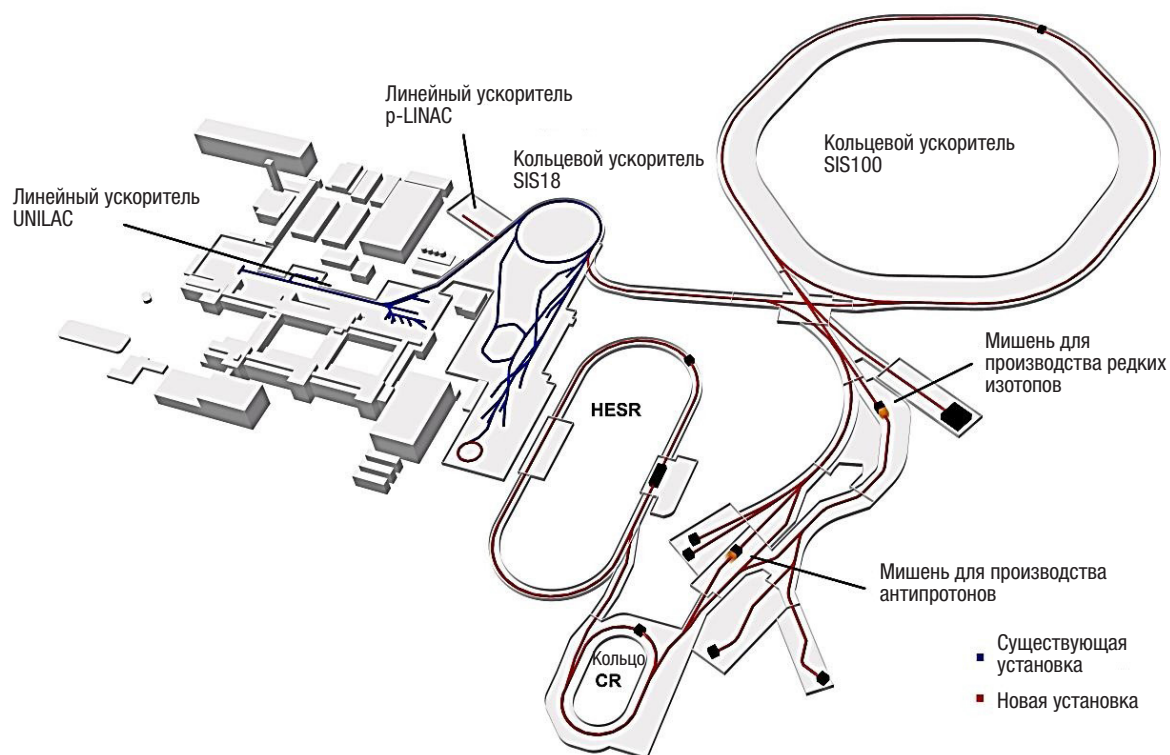


РИС. 11. Центр по исследованию антипротонов и ионов 2017 (любезно предоставлено Центром по исследованию антипротонов и ионов/GSI Helmholtzzentrum für Schwerionenforschung).

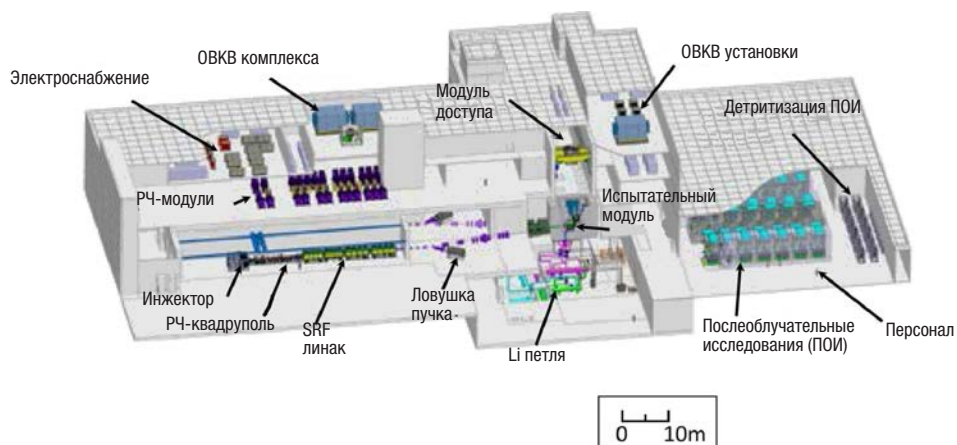


РИС. 12. Схематическое изображение Международной установки по облучению материалов для термоядерного синтеза (воспроизведено из [43]).

Цель проекта JT-60SA заключается в оптимизации работы термоядерных энергетических установок, которые будут строиться после ИТЭР. Это совместный международный научно-исследовательский проект с участием Японии и ЕС; установка строится в Наке, Япония, с использованием инфраструктуры существующего модернизированного эксперимента JT-60 Upgrade.

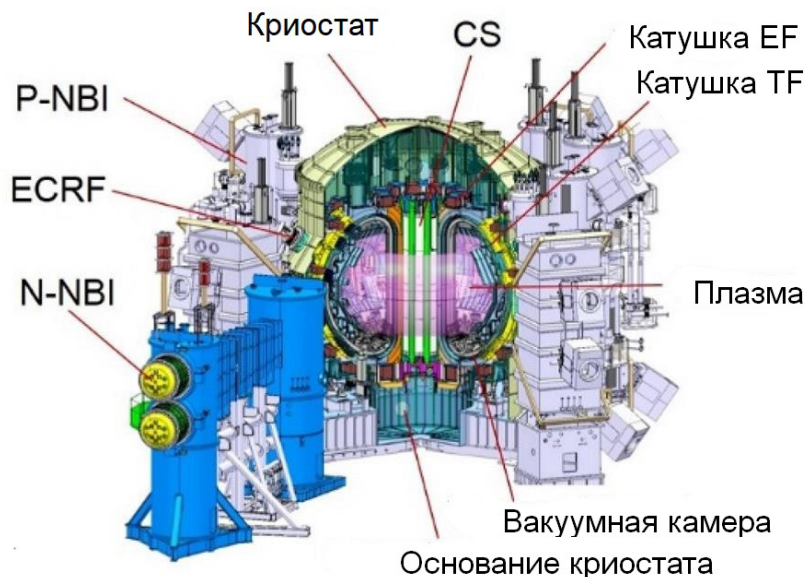


Рис. 13. Устройство JT-60SA (воспроизведено из [44]).

В Японии в дополнение к упомянутым выше большим установкам запланировано множество проектов ускорителей, таких как линейный ускоритель (линяк) с рекуперацией энергии для будущего источника светового излучения, источника нейтронов с высокой плотностью потока для борной нейтронно-захватной терапии, ускорения плазмы и т.д.

3.8.3. Установки, для которых имеется отчет о концептуальном проектировании

Отчеты о концептуальном проектировании имеются для следующих установок:

- а) *Европейский источник нейтронов скалывания (ESS)*, который будет самым мощным длинноимпульсным источником нейтронов мощностью 5 МВт. Это совместный проект Швеции и Дании; установка находится в Лунде, Швеция, с центром анализа данных в Копенгагене и испытательной лабораторией и заводом по производству компонентов ускорителя в Бильбао, Испания. Были проведены предварительные исследования по выводу из эксплуатации, и с результатами можно ознакомиться в [45–47]. Предварительная оценка затрат на вывод из эксплуатации составляет 300 миллионов евро [48];
- б) *Будущий мультитераэлектронвольтный $e^+ e^-$ коллайдер* на основе технологии Компактного линейного коллайдера (CLIC), которая находится в стадии изучения. Концепция CLIC базируется на высокоградиентных, нормально проводящих ускоряющих структурах, в которых радиочастотная мощность для ускорения встречных пучков извлекается из сильноточного пучка возбуждения, распространяющегося параллельно основному пучку линака. В последние годы исследования и разработки по CLIC были направлены на решение ряда ключевых вопросов, связанных с осуществимостью, что необходимо для доказательства фундаментальной обоснованности концепции CLIC. Исследование по ускорителю CLIC организовано как международная коллаборация 43 партнеров 22 стран. Для проверки двухпучковой схемы было проведено несколько более крупных системных испытаний; особое значение имеют результаты, полученные на испытательной установке CLIC в ЦЕРН (CTF3). Исследования, касающиеся как самой машины, так и детекторов и физики для CLIC, были в основном сосредоточены на реализации CLIC на энергии 3 ТэВ в качестве контрольной точки для определения реализуемости CLIC. Также были проведены конкретные исследования по начальной машине с энергией 500 эВ, а также рассмотрены

возможные промежуточные энергетические режимы. Вопросы эффективности и эксплуатации, связанные с работой при пониженной энергии по сравнению с номинальной, а также соображения, касающиеся поэтапной программы строительства, освещаются в отчете о концептуальном проектировании [49];

- с) *Международный линейный коллайдер*, схематический план которого представлен на рис. 14. Этот предлагаемый линейный ускоритель с высокой светимостью базируется на технологии ускорения в сверхпроводящей радиочастотной структуре с частотой 1,3 ГГц; отчет о техническом проектировании для него был подготовлен в 2012 году [50]. Первоначально планируется получить энергию столкновения 500 ГэВ с возможностью дальнейшего повышения до 1000 ГэВ (1 ТэВ). Страна, в которой будет строиться ускоритель, еще не выбрана, предлагается разместить его в Японии, США («Фермилаб») и Европе (ЦЕРН). В привязанном к конкретной площадке проекте в качестве предпроектной фазы предполагается, что японская площадка начнет работу примерно в 2030 году. В Международном линейном коллайдере электроны будут сталкиваться с позитронами. Его длина составит от 30 до 50 км, что более чем в 10 раз превышает длину Стэнфордского линейного ускорителя на 50 ГэВ, самого длинного из существующих линейных ускорителей. Это будет ускорительный комплекс класса 4;



РИС. 14. Схематическое изображение Международного линейного коллайдера без соблюдения масштаба (любезно предоставлено проектом «Международный линейный коллайдер»).

- d) Проект *MYRRHA*, представляющий собой многоцелевую облучательную установку; ее строительство рассматривается в Бельгийском центре ядерных исследований. Это гибкий исследовательский реактор с быстрым спектром нейтронов (50–100 МВт (тепл.)), концептуально задуманный как электроядерная система (с ускорителем-драйвером), способная работать в подкритических и критических режимах. В ее состав входят ускоритель протонов на 600 МэВ, мишень скалывания (расщепления) и размножительная активная зона со смешанным оксидным топливом и жидким теплоносителем свинец-висмут. Это первый в мире прототип ядерного реактора с ускорителем частиц в качестве драйвера. При выполнении работ по выводу из эксплуатации установок этого типа будут возникать определенные трудности, обусловленные сопряжением проблем, связанных как с ускорителем, так и с реактором [51];
- е) *Международная установка по облучению материалов для термоядерного синтеза*, представляющая собой источник нейтронов на базе ускорителя, который будет использовать реакции срыва дейтерий–литий для моделирования нейтронов с энергией 14 МэВ от реакций синтеза дейтерия и трития [43].

3.8.4. Изучаемые в настоящее время установки

В настоящее время изучаются две установки:

- а) ЦЕРН инициировал проведение глобального исследования по Будущему кольцевому коллайдеру (FCC) [52] в ответ на рекомендацию, содержащуюся в обновленной Европейской стратегии по физике частиц [53], принятой Советом ЦЕРН на специальной сессии в Брюсселе 30 мая 2013 года. В нем рассматриваются оба подхода в рамках единого всемирного научного проекта:
- исследование по кольцевому адронному коллайдеру (протоны, ионы) с энергией в системе центра масс 100 ТэВ при светимости от 5 до $10 \times 10^{34} \text{ см}^2/\text{с}$ в точке взаимодействия;
 - исследование по кольцевому e^+e^- коллайдеру с энергиями в системе центра масс до 350 ГэВ и светимостями от 1,8 (tt) до $28 (z\text{-полюс}) \times 10^{34} \text{ см}^2/\text{с}$ в качестве потенциального промежуточного шага в направлении создания инновационного высокоэнергетического адронного коллайдера;
 - исследование по высокоэнергетическому БАК с энергиями столкновения в системе центра масс до 33 ТэВ в туннеле БАК;
 - исследование по вариантам адрон-электронного коллайдера, включая линейный ускоритель с рекуперацией энергии на коллайдере в туннеле БАК или удлинение на базе нового 100-километрового адронного коллайдера.
- Графики реализации ориентированы на 2035 год как дату начала поэтапного ввода в эксплуатацию. Исследования по коллайдерам не зависят от места их расположения, тем не менее при их проведении учитывается опыт, накопленный в ЦЕРН по вопросам, касающимся геологии, строительства, инфраструктуры и эксплуатации (включая аспекты здоровья и безопасности);
- б) Китайский институт физики высоких энергий в сентябре 2012 года объявил о планах создания отечественного кольцевого коллайдера. В предполагаемом центре будет размещен e^+e^- коллайдер (кольцевой электронно-позитронный коллайдер с энергией в системе центра масс порядка 250 ГэВ, действующий как фабрика бозонов Хиггса). Он также может включать протон-протонный коллайдер с энергией в системе центра масс порядка 50–70 ТэВ [54].

4. РАДИОЛОГИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИЗАЦИЯ УСКОРИТЕЛЬНЫХ УСТАНОВОК

Активированные материалы образуются на ускорителях в результате различных процессов:

- а) взаимодействия первичного пучка с мишенями, коллиматорами или другими материалами, на которые преднамеренно (целенаправленно) направляется пучок;
- б) непреднамеренного взаимодействия пучка с конструкцией ускорителя, вызванное потерей контроля над траекториями частиц (потерями пучка) или менее серьезными, но более частыми небольшими потерями пучка из-за соскабливания широких краев пучка (образования «галло») в пучковых каналах и их компонентах;
- в) взаимодействия излучения, которое испускается при изгибе пучка (т.е. синхротронного или тормозного излучения) внутри конструкции ускорителя или вспомогательных компонентов;
- г) вторичного излучения, производимого всеми указанными выше механизмами, которые могут вызывать активацию (например, вторичными нейтронами, фотонами высоких энергий).

Ряд ядерных реакций может привести к активации; наиболее важными являются ядерные реакции, производимые частицами пучка в поглощающем материале. Типичными примерами являются (p, n), (p, α) и аналогичные реакции, возникающие при взаимодействии протонов с коллиматорами или мишенями на ускорителях протонов.

Активация также вызывается вторичным излучением, таким как ядерные реакции, индуцированные нейтронами, фотоядерные реакции (γ, n) или адронные взаимодействия (скалывание/расщепление), происходящие при высоких энергиях. Продукты активации в ускорителях отличаются от аналогичных продуктов в ядерных реакторах из-за различий в первичных и вторичных частицах, спектрах и материалах. Кроме того, на ускорителях не образуются продукты деления, и производство альфа-излучателей будет очень ограниченным, если вообще будет возникать (только в случае активированных материалов с высоким Z). Типичными продуктами активации являются бета- и гамма-излучатели с периодом полураспада от короткого до среднего. Большинство активированных материалов имеют низкие концентрации активности и могут рассматриваться как отходы с очень низким и низким уровнем активности [55]. В таблице 6 перечислены типичные продукты активации, которые обнаруживаются в компонентах ускорителя [7].

ТАБЛИЦА 6. РАДИОНУКЛИДЫ, ОБЫЧНО ОБНАРУЖИВАЕМЫЕ В ТВЕРДЫХ МАТЕРИАЛАХ, ОБЛУЧЕННЫХ ВБЛИЗИ УСКОРИТЕЛЕЙ
(воспроизведено из [7])

Облученный материал	Радионуклиды
Пластмассы, масла	^3H , ^7Be , ^{11}C
Бетон и алюминий	^3H , ^7Be , ^{11}C , ^{22}Na , ^{24}Na , ^{32}P , ^{42}K , ^{45}Ca , ^{152}Eu
Железо и сталь	^3H , ^7Be , ^{11}C , ^{22}Na , ^{24}Na , ^{32}P , ^{42}K , ^{45}Ca , ^{44}Sc , $^{44\text{m}}\text{Sc}$, ^{46}Sc , ^{47}Sc , ^{48}Sc , ^{48}V , ^{51}Cr , ^{52}Mn , $^{52\text{m}}\text{Mn}$, ^{54}Mn , ^{56}Mn , ^{57}Co , ^{58}Co , ^{60}Co , ^{57}Ni , ^{55}Fe , ^{59}Fe , ^{63}Ni
Медь	^3H , ^7Be , ^{11}C , ^{22}Na , ^{24}Na , ^{32}P , ^{42}K , ^{45}Ca , ^{44}Sc , $^{44\text{m}}\text{Sc}$, ^{46}Sc , ^{47}Sc , ^{48}Sc , ^{48}V , ^{51}Cr , ^{52}Mn , $^{52\text{m}}\text{Mn}$, ^{54}Mn , ^{56}Mn , ^{57}Co , ^{58}Co , ^{60}Co , ^{57}Ni , ^{63}Ni , ^{65}Ni , ^{55}Fe , ^{59}Fe , ^{61}Cu , ^{64}Cu , ^{63}Zn , ^{65}Zn

При условии, что механическая обработка (резка, распиловка, опиловка и т.д.) не требуется и коррозия поверхности исключена, отходы ускорителей не представляют значительной опасности с точки зрения радиоактивного загрязнения (например, ускорители класса 1). Хотя активированные материалы не могут рассматриваться как закрытые источники и должны приниматься соответствующие меры по предотвращению радиоактивного загрязнения, активированные элементы в основном находятся в стационарном состоянии и как таковые не могут быть демонтированы.

В результате осаждения аэрозольных радиоактивных веществ на компоненты ускорителя и близлежащие конструкции может происходить поверхностное радиоактивное загрязнение, однако оно не является главной проблемой при проведении работ по выводу из эксплуатации. В случае поверхностного загрязнения тритием необходимо немедленно удалить это загрязнение в целях предотвращения его миграции и превращения в более серьезную проблему во время проведения работ по выводу из эксплуатации. Продукты активации, образующиеся в защитном материале на различной глубине, могут в долгосрочной перспективе стать проблемой при выполнении работ по выводу из эксплуатации. Количество радиоактивных веществ, которое необходимо принимать во внимание во время проведения работ по выводу установки из эксплуатации, зависит от типа ускорителя, и оно колеблется от почти нуля до значимого с радиологической точки зрения

объема. Количество образующихся радионуклидов в принципе очень велико, но на практике лишь относительно небольшое число этих радионуклидов имеет значение для радиологической защиты и применительно к образованию продуктов активации в защитных конструкциях и других твердых материалах вокруг ускорителей [7]. Радионуклиды с коротким периодом полураспада являются проблемным вопросом в плане радиационной защиты только на стадии эксплуатации и во время технического обслуживания ускорителя, а не при проведении работ по выводу из эксплуатации.

В большинстве случаев ускорители размещаются в толстостенных бетонных зданиях, которые выполняют функцию защитного экранирования. Однако возможны самые разные ситуации в зависимости от типа и класса данного ускорителя; эти ситуации включают: а) отсутствие стационарных барьеров (например, в случае промышленных бетатронов класса 1 или линейных ускорителей для интраоперационной лучевой терапии); б) сочетание «собственного защитного экранирования», являющегося неотъемлемой частью конструкции ускорителя, с относительно тонкостенным бункером (например, в случае циклотронов класса 2 с собственным защитным экранированием для производства радионуклидов для ПЭТ); в) использование толстостенной защитной оболочки (например, бетонных бункеров для линейных ускорителей класса 1 для лучевой терапии, а также иных бункеров или бетонной или земляной защиты для ускорителей более высокого класса).

Защитное экранирование необходимо для снижения излучения до уровней, приемлемых с точки зрения пределов дозы и оптимизации облучения персонала или населения с должным учетом предполагаемого уровня присутствия людей в соответствующей зоне. Защитное экранирование также помогает ограничить повреждение материалов (тем самым продлевая их срок службы), особенно электронных компонентов, полимеров, используемых в трубопроводах для охлаждающей воды и давления пневматических газов в эксплуатационных целях.

Конструкция защитного экранирования считается очень важной с точки зрения радиационной защиты, но также следует надлежащим образом учитывать вторичные эффекты (например, образование продуктов активации в защитном материале).

Во время эксплуатации ускорителей 2–4 классов бетонные стены со временем становятся радиоактивными из-за активации следов металлов, присутствующих в бетоне, или арматурных стержней; эта радиоактивность должна быть полностью охарактеризована на ранней стадии при планировании работ по выводу из эксплуатации.

Излучение, возникающее в результате распада радиоактивности, наведенной в конструкции ускорителя и его вспомогательных компонентах, остается значительным даже после прекращения эксплуатации ускорителя. Точные характеристики активации будут зависеть от многих факторов, таких как тип частиц, энергия ускорения, ток и интенсивность пучка, а также изотопный и химический состав материалов, облучаемых первичным пучком и вторичным излучением [55].

Жидкая среда, используемая при эксплуатации ускорителя (охлаждающая вода и другие жидкости и газы), может активироваться и вносить вклад в дозу облучения персонала, если в течение первых часов после отключения ускорителя к его корпусу осуществляется доступ или если во время эксплуатации происходит циркулирование жидкой среды за пределами защитного экранирования [55].

Выбросы активированного воздуха и воды, а также активация почвы и грунтовых вод нейтронами и другими вторичными частицами также могут оказывать воздействие на окружающую среду, выходящее, возможно, за границы площадки ускорителя. Уровни радиоактивности обычно низкие. В некоторых случаях, например, в случае электронных ускорителей, активность трудно поддается измерению. В таких условиях для прогнозирования активности могут использоваться методы надежного моделирования с целью составления отчета о воздействии в соответствии с требованиями большинства национальных нормативных актов и международных руководящих документов [55].

Для оценки активации за счет мгновенного и остаточного (задержанного) излучения, а также наведенной радиоактивности были успешно приняты и проверены методом бенчмаркинга несколько кодов моделирования [56–58].

Перед выводом ускорителя из эксплуатации необходимо проводить комплексное характеризационное обследование всех жидких сред и грунта, окружающего ускорительные установки.

4.1. ХАРАКТЕРИЗАЦИЯ УСКОРИТЕЛЕЙ КЛАССА 1

У всех ускорителей частиц с энергией пучка свыше 10 МэВ появляется некоторая наведенная радиоактивность. До недавнего времени медицинские и промышленные ускорители (почти исключительно ускорители электронов) работали с энергиями ниже 10 МэВ; вместе с тем масштабы использования медицинских линейных ускорителей, работающих в диапазоне энергий свыше 10 МэВ, возрастают [12].

Медицинские линейные ускорители, работающие в диапазоне ниже 10 МэВ, особенно линейные ускорители (линаки), применяемые в лучевой терапии, составляют наибольшее число эксплуатируемых ускорителей класса 1, многие тысячи которых установлены по всему миру. Более подробную информацию можно найти в [59]. В ускорителях этого типа активация происходит из-за реакций (γ , n), возникающих под действием фотонов высокой энергии и тормозного излучения, образующихся в головке аппаратов, особенно на уровне поворотного магнита и в мишени. При взаимодействии фотонов высокой энергии с материалом с высоким Z велика вероятность образования активированных ядер. Эти материалы с высоким Z (свинец и вольфрам) присутствуют в основном в фильтрах для увеличения жесткости и в коллиматорной системе. Большинство продуктов активации в вольфраме будут короткоживущими ^{187}W ($T_{1/2} = 23,7$ ч) и ^{181}W ($T_{1/2} = 121,2$ сут.), а в сплавах свинца содержание сурьмы приводит к появлению ^{121}Sb (короткоживущий) и ^{124}Sb ($T_{1/2} = 60,2$ сут.). Золото может присутствовать в фольге или мониторинговых камерах, что приводит к образованию ^{198}Au ($T_{1/2} = 2,7$ сут.).

Другие типичные металлические компоненты, используемые в ускорителях класса 1, изготавливаются из нержавеющей стали, меди или алюминия. Примеси в сплавах этих металлов могут активироваться [60–62].

В таблице 7 представлены наиболее значимые продукты активации бета- и гамма-излучением, обнаруженные в металлических компонентах, образовавшихся в результате демонтажа медицинских линаков. Радиоактивность в этих металлах включает три разные составляющие:

- a) *распад радионуклидов с более коротким периодом полураспада*. Средний период полураспада большинства извлеченных при разборке металлов составляет порядка одного года;
- b) *долгоживущий ^{60}Co* . Ожидается, что он будет присутствовать на более низких уровнях в указанном диапазоне из-за более низкого выхода образования;
- c) *индивидуальные уровни активности в небольших элементах*, свидетельствующие о более высокой степени активации, до десяти раз выше по сравнению со средними значениями, указанными в таблице.

Однако, хотя ожидаемая общая масса отходов находится в диапазоне 1000–2500 кг, размер и масса отдельных компонентов могут значительно различаться; небольшие компоненты могут быть активированы в значительной степени или же в одном куске со значительной массой могут появляться «горячие точки». Как следствие, для каждого из основных радионуклидов сообщается приблизительный и широкий диапазон уровней концентрации активности. Относительно высокая активность короткоживущих радионуклидов может быть существенно снижена за счет соответствующего времени выдержки, необходимого для естественного радиоактивного распада после демонтажа.

Существует большой объем информации, которая поможет при планировании работ по выводу из эксплуатации ускорителей класса 1, поскольку многие из этих установок уже выводились из эксплуатации. Эта информация может быть использована в качестве основы для расчета

ТАБЛИЦА 7. НАИБОЛЕЕ ВАЖНЫЕ РАДИОНУКЛИДЫ ДЛЯ
ХАРАКТЕРИЗАЦИИ АКТИВИРОВАННЫХ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ
КОМПОНЕНТОВ ЛИНАКОВ

Нуклид	Период полураспада	Концентрация активности в металле (Бк/кг)	Активированный материал
Zn-65	244 сут.	500–5 000	Детали установки
Co-60	5 лет	500–5 000	Детали установки
Mn-54	312 сут.	500–5 000	Детали установки
Co-57	271 сут.	500–5 000	Детали установки
W-181	121 сут.	20 000–100 000	Детали установки
Sb-124	60 сут.	100 000–150 000	Детали установки

затрат на обращение с отходами и материалами, однако запланированные действия необходимо верифицировать для каждого отдельного элемента при демонтаже соответствующих секций оборудования после проверки степени их активации. Также необходимо учитывать возможное использование нестандартных материалов в некоторых установках (например, танталовой или ренийевой фольги вместо вольфрама). Подходящие приборы для первоначального скрининга включают портативные мониторы загрязнения, а для более детальной оценки материалов можно использовать портативные системы гамма-спектрометрии на базе сцинтилляторов NaI (Tl) или твердотельные CdTe-детекторы. Портативные гамма-спектрометрические системы высокого разрешения на основе сверхчистого германия (HPGe), если они доступны, могут оказать большую помощь в точной идентификации и количественном определении присутствующих радионуклидов. Также могут быть отобраны образцы для лабораторного анализа с использованием имеющихся в стране средств, либо образцы могут быть отправлены во внешнюю измерительную лабораторию.

Для оценки излучения компонентов установки и порядка величины активации с учетом константы образования гамма-излучения у основного идентифицированного радионуклида могут использоваться измерители дозы и мощности дозы.

Уровни мощности дозы излучения от активированных компонентов были измерены, и было установлено, что они находятся в диапазонах 1–5 мкЗв/ч на расстоянии 20 см от головки линака и 0,1–0,3 мкЗв/ч на расстоянии 50 см, вскоре после использования установки. Основной вклад в эти мощности дозы вносят короткоживущие радионуклиды, такие как ^{198}Au , ^{124}Sb и ^{187}W . Мощность дозы, измеренная после демонтажа, может быть значительно выше из-за отсутствия защитного экранирования, обеспечиваемой головкой. Наивысшие уровни активации будут в мишени и фильтрах для увеличения жесткости, при этом мощности дозы могут достигать величины в несколько сотен микрозивертов в час на расстоянии 20 см.

В старых моделях линаков в качестве компонентов защитного экранирования головки или в коллиматорных «челюстях» использовались детали из обедненного урана. Эти детали обычно маркируются, так что их идентификация, как правило, не вызывает затруднений. Масса указывается или может быть измерена или оценена; ожидаемая общая масса составляет менее 150 кг. С обедненным ураном следует обращаться с особой осторожностью во время проведения работ по демонтажу ввиду возможности радиоактивного загрязнения от эродированных или изношенных деталей.

4.2. ХАРАКТЕРИЗАЦИЯ УСКОРИТЕЛЕЙ КЛАССА 2

Этот класс включает в себя множество различных систем, таких как протонные циклотроны на 10–20 МэВ для производства радионуклидов ПЭТ в больницах, протонно-дейтронные циклотроны на 30 МэВ для промышленного производства радионуклидов для ПЭТ или однофотонной эмиссионной компьютерной томографии, исследовательские циклотроны с энергиями в несколько десятков мегаэлектронвольт, инжекторы, установленные на исследовательских площадках, и иные ускорители, используемые в материаловедении, для стерилизации и т.д.

В случае всех циклофонов, используемых для производства радионуклидов, происходит существенная активация самого ускорителя и окружающих его материалов. Во всех типах систем пучок преднамеренно направляется на мишени и коллиматоры.

Применяются разнообразные мишенные материалы и устройства; в жидких мишенях (например, для получения ^{18}F) камера, которая часто изготавливается из серебра, ниобия или титана, закрывается фольгой, которая может состоять из сплава Navar (42,5% кобальта, 20% хрома, 20% никеля и следы марганца, молибдена, железа и пр.) или выполняется из титана. Узел, вмещающий мишенную камеру, часто изготавливается из алюминия. Объем мишенной камеры составляет несколько десятых кубического сантиметра, в то время как все мишенное устройство обычно имеет объем меньше 1 дм³.

Мишени для производства радионуклидов в газообразной форме (например, для производства ^{11}C), как правило, изготавливаются из алюминиевого массива с желобом для газа мишени и также герметизируются фольгой из сплава Navar или титана, при этом общий объем тела мишени составляет ≤ 3 дм³.

Мишени для эффективного производства радионуклидов можно облучать пучками с током от 10 до 100 мкА, в зависимости от типа и эффективности охлаждения. Более того, в современных ПЭТ-циклотронах двойная мишень является нормальным элементом конструкции, поэтому, например, производство соответствующих количеств обогащенной ^{18}O воды, излучающей ^{18}F , может быть реализовано с использованием реакции $^{18}\text{O}(p, n)^{18}\text{F}$. На установках для коммерческого производства радиофармпрепаратов, таких как меченная фтором-18 фтордезоксиглюкоза (^{18}F -FDG), производственные циклы запускаются три-четыре раза в сутки, тогда как циклотрон в лечебном учреждении, как правило, используется периодически для облучения с целью производства очень короткоживущих радионуклидов только для внутреннего применения или производства радионуклидов для исследований, и в результате суммарное время облучения оказывается меньше по сравнению с коммерческими установками.

Все металлические компоненты мишеней становятся активированными, в частности фольга из сплава Navar (диаметр < 5 см, толщина $< 0,005$ см) [63, 64]. Предполагается, что активация в алюминиевом массиве мишени в основном связана с очень короткоживущими радионуклидами и поэтому не вызывает особого беспокойства во время проведения работ по выводу из эксплуатации.

Коллиматоры обычно поглощают примерно 10% тока пучка и подвергаются значительной активации; наиболее часто используемые материалы — это тантал (общая масса < 200 г) или графит, при этом преимущество последнего заключается в том, что он производит короткоживущие радиоизотопы.

В циклотронах с положительными ионами, где дефлектор и септумы выполнены из меди, система экстракции поглощает значительную часть пучка (примерно до 40%) и сильно активируется. В машинах с отрицательными ионами эффективность экстракции намного выше ($> 95\%$), и компоненты системы экстракции активируются в меньшей степени; как правило, это алюминиевые детали (рамы и опора для графитовых обдирочных фольг) и некоторые детали из железа.

Потери пучка в процессе ускорения вызывают активацию в стенках вакуумной камеры (обычно в алюминии с образованием только короткоживущих радионуклидов) и в дуантах (например, в меди).

Производство вторичных нейтронов в мишенях и коллиматорах является значительным и приводит к активации самого ускорителя и окружающих его материалов и защитного экранирования. Особое внимание необходимо уделять ядру магнита (из железа с низким содержанием углерода); в случае циклотронов для производства радионуклидов для ПЭТ общая масса железа достигает порядка 20 т.

В вакуумной камере (алюминиевой) активация ограничивается короткоживущими радионуклидами, тогда как в циклотронах с внутренним источником ионов, как правило, активируется вольфрамовый анод широко используемого ионного источника ионизационного датчика Филипс (типа PIGIS).

Кроме того, в некоторых моделях циклотронов блоки или плиты из свинцового сплава используются для частичного экранирования некоторых компонентов с возможностью образования ^{124}Sb .

В таблицах 8–10 перечислены основные активационные радионуклиды, которые можно обнаружить в компонентах ПЭТ-циклотронов. Ввиду большого разнообразия возможных сочетаний материалов, рабочих нагрузок и типов реакций в мишени и реакций производства эти таблицы не претендуют на то, чтобы быть полностью исчерпывающими или в полной мере отражать весь диапазон возможных действий, которые могут происходить. Приводятся данные о наиболее значимых радионуклидах. Данные, опубликованные в научной литературе, относятся как к моделированию ожидаемых уровней активности методом Монте-Карло, так и к экспериментальным измерениям, проведенным на образцах после вывода установки из

ТАБЛИЦА 8. РАДИОНУКЛИДЫ, ПРОИЗВОДИМЫЕ ЧАСТИЦАМИ ПУЧКА В УСКОРИТЕЛЯХ КЛАССА 2

Нуклид	Период полураспада	Активность отходов, образующихся в результате прямого облучения протонами ^a (МБк)	Активированный материал
V-48	15 сут.	<0,01–0,05	Мишенные фольги
Cr-51	27 сут.	5–31	Мишенные фольги
Mn-52	5 сут.	3–22	Мишенные фольги
Mn-54	312 сут.	0,3–1	Мишенные фольги
Co-56	77 сут.	6–49	Мишенные фольги
Co-57	271 сут.	2–10	Мишенные фольги
Co-58	70 сут.	15–100	Мишенные фольги
Re-183	70 сут.	0,2–2	Мишенные фольги
Re-184	38 сут.	0,01–0	Мишенные фольги
Ta-179	1 год	0,2–1	Коллиматоры
W-181	121 сут.	8 000–20 000	Коллиматоры

^a Ввиду малых размеров рассматриваемых компонентов активность указана как суммарная активность, а не как активность на единицу массы.

ТАБЛИЦА 9. РАДИОНУКЛИДЫ, ПРОИЗВОДИМЫЕ ВТОРИЧНЫМИ НЕЙТРОНАМИ В УСКОРИТЕЛЯХ КЛАССА 2

Нуклид	Период полураспада	Концентрация активности в отходах, создаваемая вторичными нейтронами в компонентах циклотрона (Бк/кг)	Активированный материал
Zn-65	244 сут.	3E+06 — 2E+07	Дуанты, медь
Co-58	70 сут.	1E+03 — 1E+06	Магнитное ярмо
Co-60	5 лет	1E+02 — 5E+03	Магнитное ярмо
Ni-63	100 лет	1E+03 — 8E+04	Магнитное ярмо

ТАБЛИЦА 10. ПРИМЕР РАДИОНУКЛИДОВ, ПРОИЗВОДИМЫХ В БЕТОННЫХ СТЕНАХ

Нуклид	Период полураспада	Концентрация активности, создаваемая вторичными нейтронами в бетонных стенах (Бк/кг)	Активированный материал
Na-22	2,6 года	1E+01 — 3E+01	Бетон
Sc-46	83,79 сут.	4E+01 — 2E+02	Бетон
Mn-54	312,3 сут.	1E+00 — 4E+01	Бетон
Co-60	5,27 года	4E+01 — 2E+03	Бетон
Zn-65	244,26 сут.	1E+00 — 6E+00	Бетон
Cs-134	2,06 года	2E+00 — 8E+00	Бетон
Eu-152	13,54 года	1E+01 — 5E+01	Бетон
Eu-154	8,59 года	1E+00 — 5E+00	Бетон

эксплуатации. Не всегда можно напрямую сравнить смоделированные и измеренные данные; когда проводится такое сравнение, обычно достаточным является совпадение (с точностью до одной десятой); вместе с тем данные демонстрируют значительную вариабельность, что нашло отражение в таблицах [65, 66]. Более подробные исследования по характеризации приведены в работах [67–69].

Активация происходит в бетоне стен бункеров ускорителей класса 2. В таблице 10 приведен референсный диапазон активности на единицу массы в бетоне, который можно ожидать при проведении работ по выводу из эксплуатации. Как отмечалось ранее в отношении активации компонентов ускорителей, в научной литературе сообщается как о превентивной оценке, выполняемой с помощью моделирования методом Монте-Карло, так и об экспериментальных данных; в случае со стенами, однако, сбор образцов относительно прост; было проведено

несколько сопоставлений результатов моделирования и экспериментов, которые в целом показали хорошее согласие. Вариабельность данных отражает как историю облучения оборудования, так и разнообразие форм и размеров бункеров и состава бетона.

Блоки или «оболочки», образующие самозащиту (собственное защитное экранирование), которые являются частью конфигурации многих циклотронов, в особенности с низким диапазоном энергий (10–11 МэВ), включая, однако, ряд систем с диапазоном 14–18 МэВ, требуют особого внимания. Общая масса элементов самозащиты может достигать 25–30 т.

У ПЭТ-циклотронов старой конструкции (построенных в период между 1980 и 2000 годами) самозащита выполнялась в основном из специальных бетонных блоков; в последующие годы самозащита была интегрирована с элементами или компонентами, специально предусматриваемыми для уменьшения активации (например, плиты из борированного полиэтилена; боросодержащий бетон; резервуары, заполненные специально подобранными смесями воды, песка, железа и бора). Это существенно снижает присутствие активированных радионуклидов в самозащите и упрощает удаление или переработку отходов.

Таким образом, при выводе ПЭТ-циклотронов из эксплуатации на этапе характеризации необходимо применять хорошо структурированный комплексный подход, включающий сочетание измерений, отбора проб и математического моделирования.

Все основные активированные компоненты, демонтируемые с внешнего корпуса циклотрона, должны быть отсоединены и помещены в подходящее безопасное место для проведения дальнейших работ по обращению с ними с целью снижения облучения в непосредственной близости от ускорителя. В число этих компонентов входят фольгированные мишени, циклотронные мишени, запасные мишени и испытательные мишени, размещаемые на специальном складе или в мастерской. Кроме того, следует проводить демонтаж диагностических средств, в том числе цилиндров Фарадея.

Мощность дозы от мишеней через несколько дней после отключения установки может по-прежнему составлять порядка 500 мкЗв/ч на расстоянии 50 см; большая часть активности будет сосредоточена в передней части, где расположены фольги. Демонтаж каждой мишени необходимо проводить отдельно с учетом положения фольг, и демонтированная мишень должна быть складирована в экранированном помещении для временного хранения до начала демонтажа следующей мишени. Целесообразно использовать переносные экранированные контейнеры, в которые каждая мишень должна немедленно укладываться во время транспортировки на склад для временного хранения.

В случае демонтажа ускорителя необходимо заранее четко идентифицировать все внутренние компоненты, обращая особое внимание на следующие наиболее активированные компоненты и их положение внутри вакуумной камеры:

- a) коллиматоры;
- b) система экстракции;
- c) внутренний источник ионов.

Эти компоненты, как правило, имеют ограниченный объем и могут быть демонтированы и удалены с целью минимизации облучения работников и облегчения оценки уровней активации.

Необходимо учитывать риск радиоактивного загрязнения при проведении работ внутри открытой вакуумной камеры; должно быть принято решение о начале демонтажа этих компонентов или предварительном проведении тщательной очистки внутреннего пространства вакуумной камеры. Все внутренние элементы конструкции вакуумной камеры необходимо тщательно осмотреть с целью выявления горячих точек активации, которые могли возникнуть в результате аварийных случаев (например, потери управления пучком во время эксплуатации ускорителя).

Дуанты могут иметь разные формы и размеры; поэтому степень сложности демонтажа может быть разной в зависимости от типа циклотрона.

Для оценки активации ярма магнита иногда можно отбирать образцы болтов, винтов или других мелких деталей.

Вакуумные насосы могут подвергаться ограниченной активации; масло может быть радиоактивно загрязненным, и необходимо проводить отдельно его сбор и проверку перед удалением. То же самое относится и к системе охлаждения. Если внутри бункера установлена система охлаждения, то железные компоненты могут быть слегка активированы, общий объем охлаждающей воды, как правило, ограничивается несколькими сотнями литров или меньше, может присутствовать активность ^3H и некоторые активированные продукты могут содержаться в цилиндрах с ионообменной смолой системы деионизации воды.

Компоненты гелиевой системы охлаждения могут иметь низкий уровень радиоактивного загрязнения; клапаны, трубопроводы и компрессор необходимо проверять перед удалением или рециклированием.

Все металлические компоненты, установленные внутри бункера циклотрона, могут подвергаться активации, в особенности все детали, содержащие железо или медь. Это могут быть трубопроводы, клапаны, патрубки, детали системы сжатия воздуха, воздухопроводы системы кондиционирования воздуха или рамы и опоры подвесного потолка или фальшпола.

Первоначальное обследование материалов требует использования портативных мониторов радиоактивного загрязнения и измерителей мощности дозы. Для идентификации радионуклидов необходимы портативные системы гамма-спектрометрии (NaI (Tl), CdTe). Ввиду большого разнообразия присутствующих продуктов активации и связанной с этим сложности спектров гамма-излучения идеальным является использование портативных гамма-спектрометрических систем высокого разрешения на основе HPGe. Вместе с тем фоновое излучение внутри бункера может затруднять процесс измерения портативными спектрометрами; небольшие элементы или образцы могут быть доставлены в лабораторию, оснащенную экранированным спектрометрическим детектором для более точной характеристики.

Для оценки излучения компонентов установки и порядка величины активации, с учетом константы образования гамма-излучения у основного идентифицированного радионуклида, могут использоваться измерители мощности дозы.

В Германии были проведены исследования, в которых сопоставлялись мощности дозы и продукты активации в случае четырех высокоэнергетических медицинских линейных ускорителей (линаков) с целью оценки влияния выбора различных конструкционных материалов и методов [70].

В некоторых исследовательских ускорителях класса 2 (например, ускорителях Ван-де-Граафа для протонных и ионных пучков) могут использоваться мишени с газообразным тритием для низкоэнергетических ядерных исследований. Газообразный тритий поступает в урановые контейнеры, которые могут содержать порядка 100 ТБк трития.

В случае утечки из мишени длинные участки находящихся под вакуумом пучковых каналов могут быстро подвергнуться радиоактивному загрязнению. Перед демонтажем пучковых каналов и вакуумных насосов важно изучить историю эксплуатации на предмет выявления наличия признаков загрязнения тритием в прошлом. При осуществлении демонтажа работникам необходимо принимать дополнительные меры предосторожности, с тем чтобы до начала работ загрязнение тритием было исключено путем отбора проб и проведения обследований.

4.3. ХАРАКТЕРИЗАЦИЯ УСКОРИТЕЛЕЙ КЛАССА 3 И 4

Ускорители частиц класса 3 — это высокоэнергетические установки, эксплуатируемые в диапазоне энергий от 100 МэВ до менее 1 ГэВ. Ускорителями класса 3 обычно являются протонные циклотроны и синхроциклотроны, а также линейные ускорители (линаки) на высокую энергию. К ним относятся ускорители для протонной терапии, а также ускорители для физических исследований, источники нейтронов скалывания и источники светового излучения.

Первым этапом в характеристике является радиологическая оценка, проводимая путем измерения мощности дозы на ускорителе и окружающих его конструкциях. Параллельно с этим необходимо оценивать активацию, предпочтительно путем измерений или расчетов. Эти измерения и расчеты используются для определения основных компонентов, которые могут подвергаться активации. Обычно работы по выводу из эксплуатации откладываются на определенный срок еще до характеристики для обеспечения распада радиоактивности на раннем этапе. Соответствующий срок может быть рассчитан на основе измерений, проведенных во время эксплуатации установки. Для аналитических измерений, в особенности для оценки глубины проникновения активации, проводится отбор буровых кернов из элементов конструкции или образцов частей оборудования.

Широкий спектр радиоактивных нуклидов, производимых на высокоэнергетическом ускорителе, имеет массовое число атома менее 70. Наиболее важные радионуклиды перечислены в таблицах 11 и 12.

Активация зависит от типа ускоренной частицы, истории облучения и характеристик материала (а именно, химического состава и размера). Нередко во время эксплуатации установки компоненты подвергаются ремонту и повторно используются в других частях ускорителя [45]. При радиологической характеристике целесообразно учитывать различные поля излучения, воздействию которых компоненты могли подвергаться в течение срока их эксплуатации [73, 74].

В ускорителях на высокую энергию области с высокой остаточной активацией зависят от основных источников излучения, используемых во время эксплуатации установки. В зонах, где пучок взаимодействует с компонентами ускорителя и окружающими конструкциями, в основном канале облучения электронных ускорителей будут преобладать фотоны высоких энергий и вторичные нейтроны. Это излучение может распространяться по каналам и шахтам ускорителя (если они не экранированы должным образом), тем самым вызывая активацию и в местах, удаленных от туннеля ускорителя. Это относится к волноводным каналам, соединяющим радиочастотные клистроны (обычно расположенные во вспомогательных туннелях) с резонаторами в туннеле ускорителя. В адронных машинах взаимодействие пучков в компонентах ускорителя создает более сложные поля излучения, но нейтроны и фотоны также доминируют в полях излучения, проходящих через длинные лабиринты, каналы и апертуры.

Активация синхротронным излучением обычно не является проблемой, однако она возможна в кольцевых ускорителях электронов с энергией, превышающей 100 ГэВ.

Остаточные мощности дозы в компонентах ускорителя после нескольких лет эксплуатации и нескольких дней остановки (в течение которых происходит распад короткоживущих радионуклидов) обычно являются значимыми в областях инжекции и зонах ускорения (где установлены радиочастотные резонаторы). Эти остаточные мощности дозы могут составлять от 100 мкЗв/ч до нескольких мЗв/ч, и в определенных местах возможны более высокие уровни.

Большинство активированных компонентов в ускорителях класса 3 и класса 4 изготовлены из твердого и металлического материала, включая:

- a) железо и цинк, особенно в конструкции магнитов и кабельных лотков;
- b) медь, используемую в катушках магнитов и электрических кабелях;
- c) обычную и нержавеющую сталь, используемую в конструкции опор, трубопроводов систем водяного охлаждения и узлов ускорителя;
- d) алюминий в силовых кабелях и трубопроводах;
- e) пластмассы и смолы, используемые в качестве изоляторов электрических кабелей или для покрытий;
- f) графит, медь, вольфрам, сталь или алюминий для челюстей коллиматоров, поглотителей пучка и ловушек пучка;
- g) смолы в деионизирующих фильтрах контуров охлаждающей воды;
- h) бетон, используемый для сооружения стен и в качестве биологической защиты от излучения;
- i) почва, которая подвергается радиационному воздействию в случае подземных установок.

ТАБЛИЦА 11. ОСНОВНЫЕ РАДИОНУКЛИДЫ
В РАЗЛИЧНЫХ МАТЕРИАЛАХ,
ПОДВЕРГАЮЩИХСЯ АКТИВАЦИИ В БОЛЬШОМ
ЭЛЕКТРОННО-ПОЗИТРОННОМ КОЛЛАЙДЕРЕ
(воспроизведено из [71])

Материал	Нуклид	$T_{1/2}$
Алюминий	^{22}Na	2,6 года
	^{54}Mn	312 сут.
Медь	^{51}Cr	27,7 сут.
	^{52}Mn	5,6 сут.
	^{54}Mn	312,2 сут.
	^{56}Co	77,7 сут.
	^{57}Co	271,8 сут.
	^{58}Co	70,9 сут.
	^{60}Co	5,27 года
Свинец	^{105}Ag	41,3 сут.
	^{122}Sb	2,7 сут.
	^{124}Sb	60,2 сут.
	^{203}Hg	46,6 сут.
	^{202}Tl	12,2 сут.
Нержавеющая сталь	^{46}Sc	84 сут.
	^{48}V	16 сут.
	^{51}Cr	27,7 сут.
	^{52}Mn	5,6 сут.
	^{54}Mn	312,2 сут.
	^{59}Fe	44,5 сут.
	^{56}Co	77,3 сут.
	^{57}Co	271,8 сут.
	^{58}Co	70,9 сут.
	^{60}Co	5,27 года
Железо-бетон	^{95}Nb	34,9 сут.
	^{48}V	15,97 сут.
	^{51}Cr	27,7 сут.
	^{52}Mn	5,6 сут.
	^{54}Mn	312,2 сут.
	^{59}Fe	44,5 сут.
	^{56}Co	77,7 сут.

В рамках одной группы конструкционных элементов (например, стали) существует множество различных типов материалов, которые различаются по плотности и наличию следовых элементов. Следовые элементы особенно важны с точки зрения захвата нейтронов, когда большое поперечное сечение может компенсировать содержание в малом количестве. Следует проявлять особое внимание при характеристике активированных печатных плат из-за присущей им химической опасности, поскольку они часто классифицируются как пригодные для удаления в качестве смешанных отходов.

Масла в вакуумных насосах и жидкости из контуров охлаждения представляют собой типичные жидкие активированные материалы, образующиеся после вывода из эксплуатации ускорителей класса 3 или 4.

ТАБЛИЦА 12. ОСНОВНЫЕ КАНАЛЫ ПРОИЗВОДСТВА ОТДЕЛЬНЫХ РАДИОНУКЛИДОВ В РАЗЛИЧНЫХ МАТЕРИАЛАХ, ОБЛУЧАЕМЫХ В АДРОННЫХ УСКОРИТЕЛЯХ

(адаптировано из [57, 72])

Изотоп	$T_{1/2}$	Медь	Нержавеющая сталь	Алюминий	Бетон
^7Be	53,3 сут.	Spall (Al, Cu)	Spall (C, N)	Spall (Al)	Spall (O, C)
^{22}Na	2,6 года	Spall (Al, Cu)	Spall (Fe, Ni)	Spall (Al)	Spall (Ca, Si, Al)
^{46}Sc	83,8 сут.	Spall (Cu)	Spall (Fe, Ni)	Spall (Mn) ^a	Spall (Fe)
^{44}Ti	60,4 года	Spall (Cu)	Spall (Fe, Cr, Mn)	н/п	Spall (Fe)
^{54}Mn	312,1 сут.	Spall (Cu)	Spall (Fe, Mn)	Spall (Mn, Fe) ^a	Spall (Fe)
^{57}Co	271,8 сут.	Spall (Cu)	$^{58}\text{Ni}(n, pn)$	н/п	н/п
^{58}Co	70,8 сут.	Spall (Cu) $^{59}\text{Co}(n, 2n)^a$	$^{58}\text{Ni}(n, p)$	н/п	$^{59}\text{Co}(n, 2n)^a$
^{60}Co	5,27 года	Spall (Cu) $^{59}\text{Co}(n, \gamma)^a$	$^{60}\text{Ni}(n, p)$ $^{59}\text{Co}(n, \gamma)^a$	н/п	$^{59}\text{Co}(n, \gamma)^a$
^{65}Zn	244,3 сут.	$^{65}\text{Cu}(p, n)^a$	$^{65}\text{Cu}(p, n)^a$ $^{62}\text{Ni}(\alpha, n)$	н/п	н/п

Примечание: н/п — не применимо.

^a Реакции на примесях материала.

В случае ускорителей электронов в его компонентах, как правило, образуется более низкая остаточная активность, чем у адронных коллайдеров. Несмотря на то, что большинство компонентов попадают в категорию отходов с низким уровнем активности, а некоторые из них могут подлежать даже освобождению от регулирующего контроля, определенные части больших ускорителей могут иметь достаточно высокий уровень радиоактивности и будут классифицироваться как отходы среднего уровня активности, и поэтому обращение с ними и их хранение должны осуществляться в соответствии с уровнем связанного с ними риска.

Вследствие большой вариабельности полей облучения и компонентов диапазон остаточной активации в различных компонентах ускорителей очень широк. Например, применительно к электронному коллайдеру значения, указанные в [75], позволили определить коэффициенты пересчета средней мощности пучка (в ваттах) в наведенную удельную активность при насыщении для радионуклидов в различных материалах [55].

Высокоэнергетические ускорители, как правило, монтируются под землей из-за их больших размеров и уровня мгновенного излучения, возникающего во время эксплуатации. При рассмотрении вопроса о выводе из эксплуатации необходимо проводить оценку остаточной активации грунта и пород, окружающих туннель ускорителя. Она может быть значительной в случае протонных и тяжелоионных установок и значительно уменьшается или становится пренебрежимо малой в случае электронных ускорителей. В работе Borak et al. [76] была измерена радиоактивность, создаваемая в грунте адронами высоких энергий вокруг двух высокоэнергетических синхротронов: Аргоннского синхротрона с нулевым градиентом на 12 ГэВ и Брукхейвенского синхротрона с переменным градиентом на 28 ГэВ. Были идентифицированы

радионуклиды ^3H , ^7Be , ^{22}Na , ^{45}Ca , ^{46}Sc , ^{48}V , ^{51}Cr , ^{54}Mn , ^{55}Fe , ^{59}Fe и ^{60}Co . Часть активности, индуцированной в почве, может выщелачиваться и переноситься подземными водами [77]. В исследовании Borak et al. [76] в выщелоченных водах были обнаружены ^3H , ^{22}Na , ^{45}Ca и ^{54}Mn .

Активация почвы и пород в основном является пренебрежимо малой вокруг электронных ускорителей, за возможным исключением мест около ловушек пучков высоких мощности. Например, радиологическое воздействие Большого электрон-позитронного коллайдера (LEP) в ЦЕРН оценивалось начиная с его строительства и тщательно мониторировалось в течение 11-летнего срока службы установки. Результаты показали, что уровни излучения в местах, доступных во время эксплуатации LEP, были очень низкими и что на поверхности почвы значения AMBIENTного эквивалента дозы никогда не отличались от фонового уровня [78].

Оптимизация конструкции и выбор материалов для компонентов ускорителя в значительной степени способствует сведению до минимального уровня активации и, следовательно, минимизации затрат на работы по выводу из эксплуатации. Одним из возможных методов оптимизации является предварительное моделирование остаточной активации с применением кодов Монте-Карло.

В [57, 79, 80] дан хороший обзор возможных методов, основанных на доступных кодах. В [81] представлены расчеты радионуклидного состава для конкретной мишени ускорителя. Код переноса частиц Monte-Carlo N-Particle X (MCNPX) используется вместе с кодами трансмутации CINDER'90, ORIHET-3 и SP-FISPACT (код для расчетов изотопного состава и наведенной активации в термоядерных устройствах). Результаты, полученные с использованием различных кодов и библиотек данных, сравниваются с экспериментальными измерениями. В случае более чем половины исследованных нуклидов результаты применения кодов согласуются с измерениями с точностью до 0,5 и почти все с точностью до 0,10 [55]. Однако теоретические оценки необходимо валидировать и улучшать путем отбора образцов. Конкретные стратегии отбора образцов для определения активации ускорителя описаны, например, в [82, 83]. В работе Schumann et al. [84] рассмотрены вопросы радиохимического анализа образцов бетона ускорителя.

При проведении химической характеристики компонентов необходимо соблюдать особые меры предосторожности: могут присутствовать некоторые токсичные материалы (например, свинец, бериллий, никель, асбест); такой материал опасен, если он находится в рыхлом, порошкообразном или мелкодисперсном состоянии. Это важная информация, которую необходимо использовать при планировании работ по выводу из эксплуатации с целью обеспечения надлежащей защиты персонала при обращении с демонтируемыми материалами, их обработке и хранении.

5. ПЛАНИРОВАНИЕ И ОСУЩЕСТВЛЕНИЕ РАБОТ ПО ВЫВОДУ УСКОРИТЕЛЕЙ ИЗ ЭКСПЛУАТАЦИИ

Предполагаемый срок службы ускорителей и причины их остановки почти так же разнообразны, как и типы ускорителей. Ускорительные установки могут быть остановлены из-за повреждений в результате экстремальных погодных явлений, таких как тропические штормы или торнадо, как в случае с ускорителем в Техасском медицинском центре Техасского университета в Хьюстоне, США, который пострадал от сильнейшего тропического циклона в июне 2001 года. Исследовательские ускорители, как правило, останавливаются после завершения исследовательской работы на них и их применения. Финансы, политика, колебания рынка, усовершенствованные технологии, цели учреждения и старение оборудования могут обуславливать закрытие ускорительной установки. Например, предполагается, что примерно каждые десять лет происходит замена терапевтического оборудования благодаря технологическому прогрессу (например, в системах управления пучком) или развитию медицинских знаний. Вывод из эксплуатации тандемного ускорителя в Миннесотском университете, США, который описан

в приложении I-1, был вызван тем, что в отношении безопасности здания возникли вопросы. Большинство ускорительных установок регулярно модернизируются или реконструируются в течение срока их эксплуатации. Во многих проектах по выводу из эксплуатации компоненты или ускорительные установки используются повторно, и при таком выводе из эксплуатации образуется минимальное количество отходов. В некоторых случаях целые блоки демонтируются, транспортируются на новое место и используются там в течение определенного периода времени для тех же самых или других целей. Также некоторые части ускорителя частиц могут удаляться в качестве отходов, а другие элементы используются повторно или модифицируются для использования в новой установке в том же здании или на той же площадке.

Планирование вывода из эксплуатации желательно начинать на ранней стадии жизненного цикла объекта, в идеале на этапе проектирования и строительства. Собранные на раннем этапе данные, связанные с проектированием и строительством, можно постепенно улучшать во время эксплуатации объекта вплоть до его окончательной остановки [85]. В следующих разделах подробно рассматриваются конкретные аспекты планирования и реализации стратегии вывода из эксплуатации.

5.1. ВЫБОР СТРАТЕГИИ ВЫВОДА ИЗ ЭКСПЛУАТАЦИИ

В публикации Серии норм безопасности МАГАТЭ, № GSR Part 6, «Вывод из эксплуатации установок» [85] определены две стратегии вывода из эксплуатации: немедленный демонтаж и отложенный демонтаж. Захоронение, как правило, не рекомендуется и ограничивается особыми случаями. «Бездействие» не рассматривается как приемлемая стратегия вывода из эксплуатации. Немедленный и отложенный демонтаж являются общими терминами и не обязательно означают, что вывод из эксплуатации должен включать демонтаж строительных конструкций, поскольку это не является обязательным в случае всех ускорителей частиц, особенно когда предполагается повторное использование экранированного помещения [85]. При выводе из эксплуатации некоторых ускорителей частиц в эти стратегии могут вноситься изменения [21, 86].

Оптимальным процессом является принятие эксплуатирующей организацией на ранней стадии жизненного цикла ускорителя частиц решения о наиболее подходящей стратегии вывода из эксплуатации и использование этого решения в качестве основы для будущего планирования [24]. Выбранная стратегия должна соответствовать национальной политике вывода из эксплуатации и обращения с отходами, а также учитывать применение дифференцированного подхода в отношении опасностей, связанных с выводом из эксплуатации ускорителя частиц конкретного типа.

Применение многоатрибутного анализа во многих случаях может быть целесообразным в процессе принятия решений, а также может облегчать обоснование выбранной стратегии и плана вывода из эксплуатации. Такой многоатрибутный анализ включает рассмотрение конкретных условий на объекте. Для обеспечения оптимизации плана можно использовать соответствующие весовые коэффициенты применительно к конкретному объекту. Выбор стратегии вывода из эксплуатации должен осуществляться на основе и с учетом в обосновании как факторов, относящихся к конкретной установке, так и факторов национального масштаба. Это обоснование должно быть документально оформлено и сохраняться в качестве основы для принятия решений при планировании вывода из эксплуатации на протяжении всего жизненного цикла ускорителя.

Немедленный демонтаж в большинстве случаев является предпочтительной стратегией вывода из эксплуатации ускорителей частиц класса 1, для которых подход, предусматривающий «выдержку и распад», как правило, не дает никаких преимуществ. И наоборот, поэтапный подход, в котором предусматриваются периоды, обеспечивающие распад радионуклидов с более коротким периодом полураспада, может быть оправдан, как правило, в случае ускорителей частиц класса 2–4. При отложенном демонтаже важным моментом является обеспечение безопасности в период безопасного закрытия установки, в особенности в таких учреждениях, как больницы (например, оборудованных гамма-ножом), где имеется доступ населения к объекту.

В целом поэтапный подход, принятый в стратегии пофазового вывода из эксплуатации, обеспечивает время для мобилизации необходимых ресурсов, распада радионуклидов с коротким периодом полураспада для снижения профессионального облучения, обеспечения принятия необходимых мер управления и решения имеющихся технических проблем. Поэтапный подход также обеспечивает период времени, в течение которого распад радионуклидов в зданиях и материалах может снизить активность до уровня, допускающего полное освобождение от регулирующего контроля.

Применительно к ускорителям частиц целесообразным может быть сочетание стратегий немедленного и отложенного демонтажа, которое будет обеспечивать реализацию пофазового вывода из эксплуатации. После проведения характеристики фрагменты установки и ее активированные компоненты могут быть демонтированы и отсортированы на радиоактивные и нерадиоактивные отходы. С учетом уровней активации ускорительный зал, защитное экранирование и другие активированные материалы могут быть оставлены на соответствующий период выдержки для обеспечения распада радионуклидов, после чего может быть рассмотрен вопрос о проведении очистки.

На период безопасной консервации необходимо назначить ответственный орган, который может быть или не быть лицензиатом, для осуществления надзора (при соответствующей поддержке) за программой контроля и технического обслуживания с целью обеспечения постоянного поддержания требуемого уровня безопасности и возложения на него ответственности за обеспечение проведения окончательного вывода из эксплуатации в ближайшие соответствующие сроки.

Если финансовые средства, необходимые для выполнения работ по выводу из эксплуатации, отсутствуют на начальном этапе, пофазовая стратегия отложенного вывода из эксплуатации может быть более эффективной стратегией, чем отказ от проведения работ из-за нехватки финансов [24]. Будущая перепродажа очищенных металлов, таких как медь, может обеспечить значительный доход, который может быть использован для завершения работ по выводу из эксплуатации. Оптимальной стратегией может быть отложенный демонтаж, подразделенный на несколько фаз, когда средства выделяются через определенные промежутки времени. Это может быть особенно актуально в случае ускорителей частиц в учреждениях, финансируемых государством, таких как больницы и университеты [24].

Важно, чтобы конечное состояние процесса вывода из эксплуатации было определено с самого начала. Наиболее распространенная стратегия — это освобождение площадки от контроля для неограниченного использования (иногда называемое приведением в состояние «зеленая лужайка»). Возможны, однако, и другие варианты, в том числе разрешение на ограниченное использование в качестве конкретной площадки или переделка предыдущего ускорителя в другую ядерную или радиологическую установку. Конечное состояние процесса вывода из эксплуатации влияет на такие параметры, как затраты, образование отходов и обращение с ними, а также продолжительность осуществления данного проекта.

5.2. ФАКТОРЫ, ВЛИЯЮЩИЕ НА СТРАТЕГИЮ ВЫВОДА ИЗ ЭКСПЛУАТАЦИИ

Для определения стратегии вывода из эксплуатации ядерных установок, включая ускорители частиц, необходимо учитывать перечисленные ниже факторы.

- а) Национальная политика и нормативно-правовая база:
 - соблюдение национальной политики в области вывода из эксплуатации;
 - наличие правовой базы, в которой подробно описаны регулирующие функции и инфраструктура, а также регулирующие требования и определенные стандарты, которые должны применяться при выводе из эксплуатации;

- наличие установленных и хорошо понятных национальных процессов выдачи официальных разрешений/лицензий для обеспечения регулирования вопросов, относящихся к ускорителям частиц, начиная с этапа первоначального планирования и на протяжении всего эксплуатационного жизненного цикла благодаря применению регулирующего режима, необходимого для планирования и проведения работ по выводу из эксплуатации.
- b) Финансовое обеспечение:
- наличие и надежность адекватного финансового обеспечения, включая надежные механизмы обеспечения своевременного выделения средств для эффективного вывода из эксплуатации;
 - надежная оценка затрат, связанных с осуществлением выбранной стратегии вывода из эксплуатации, включая соответствующие резервные финансовые средства на случай возникновения непредвиденных обстоятельств и неопределенностей в осуществлении проекта, с тем чтобы обеспечить реализацию стратегии вывода ускорителя из эксплуатации вплоть до полного завершения проекта;
 - наличие на рынке и применение надлежащих механизмов регулирующего надзора за продажей рециклированных материалов для пополнения бюджета, предусмотренного для выполнения работ по выводу из эксплуатации (например, медных труб, освобожденных от регулирующего контроля, продажа которых осуществляется в качестве металлолома для целей рециклирования).
- c) Факторы, характерные для конкретного объекта:
- сложность работ по выводу из эксплуатации ускорителей частиц;
 - конфигурация объекта: является ли ускоритель частиц автономной установкой или частью многоцелевого комплекса и существует ли взаимозависимость между выводимой из эксплуатации установкой и другими установками на площадке;
 - исторические или культурные ценности: подлежат ли части оборудования сохранению или документированию (например, в качестве музейных экспонатов или исторических архивов).
- d) Проведение работ по выводу из эксплуатации:
- причины окончательной остановки ускорителя, если она выполняется не в соответствии с первоначально намеченным сроком эксплуатации ускорителя (например, политические, экономические, обусловленные аварией);
 - наличие и легкость своевременного доступа к соответствующим технологиям и методам вывода из эксплуатации, которые могут оказаться особенно актуальными после внезапного закрытия установки после аварии;
 - все возможные варианты реконструкции и повторного использования ускорителя частиц (или его компонентов) и прилегающей территории.
- e) Система обращения с отходами:
- наличие разработанных, введенных в действие и соответствующим образом регулируемых положений национальной политики и стратегии в области обращения с отходами;
 - наличие или отсутствие национальных уровней освобождения от контроля для облегчения удаления или рециклирования и повторного использования материалов (например, обломков сноса или металлов);
 - объемы и категории отходов, образующихся при проведении работ по выводу из эксплуатации, включая любые проблемные отходы с иными химическими, физическими или опасными свойствами, помимо радиоактивности;
 - планы по обращению с отходами на конкретном объекте, включая меры по безопасному разделению и обеспечению хранения, подкрепленные наличием доступа к соответствующим объектам для обращения с отходами и внешним хранилищам. Часто подготовка необходимой документации и подтверждение наличия требующихся систем контроля на площадке для получения разрешения, связанного с оформлением приема

- отходов от вывода из эксплуатации на внешнем хранилище, могут быть очень сложной задачей, приводящей к возможным задержкам в осуществлении процесса вывода из эксплуатации.
- f) Воздействие на здоровье, безопасность и окружающую среду:
- воздействие на безопасность и здоровье, включая всесторонний анализ, показывающий оптимизацию этого воздействия;
 - оценка воздействия на окружающую среду с применением дифференцированного подхода к выводу из эксплуатации, включая воздействие операций по транспортировке материалов или отходов;
 - физическое состояние ускорителя частиц (например, оценка ожидаемой со временем целостности зданий и качества их содержания после прекращения эксплуатации ускорителя);
 - влияние характеристик радиологических и опасных материалов, с которыми приходится иметь дело в процессе вывода из эксплуатации.
- g) Управление знаниями и людские ресурсы:
- наличие достаточно квалифицированного и опытного персонала (работавшего с ускорителями частиц или имеющего опыт работы в других проектах по выводу из эксплуатации);
 - аккумулирование, поддержание и сохранение экспертных знаний, накопленных опытным персоналом, до выхода работников на пенсию или смены ими места работы;
 - использование уроков, извлеченных из предыдущих проектов по выводу из эксплуатации;
 - история эксплуатации ускорителя и адекватность информации, связанной с выводом из эксплуатации (например, документации, чертежей), особенно если в течение срока эксплуатации ускорителя в его конструкцию и оборудование были внесены изменения;
 - наличие компетентной и опытной группы управления проектами.
- h) Социальное воздействие и вовлечение заинтересованных сторон:
- воздействие на местное население процесса вывода из эксплуатации;
 - проблемы и опасения заинтересованных сторон и пути их эффективного устранения.

5.3. ПЛАНИРОВАНИЕ ВЫВОДА ИЗ ЭКСПЛУАТАЦИИ

Пункт 1.6 публикации GSR Part 6 [85] гласит: «Планирование вывода из эксплуатации начинается на этапе проектирования и продолжается в течение всего срока службы установки». Преимущества раннего планирования будущего вывода из эксплуатации включают в себя установление оптимизированных процедур для минимизации облучения работников и населения, обеспечение максимального уровня защиты окружающей среды, требующегося при выполнении работ по выводу из эксплуатации, сведение к минимуму радиоактивных отходов и своевременное освобождение объекта или площадки от регулирующего контроля по окончании работ по выводу из эксплуатации. Другие преимущества рассмотрения вопросов вывода из эксплуатации ускорителя частиц на ранней стадии эксплуатации обусловлены созданием соответствующих механизмов ведения документации, сохранения знаний в целях облегчения проведения работ по выводу из эксплуатации, а также обеспечения как адекватных финансовых, так и других необходимых ресурсов в случае ситуации, когда происходит останов.

Для новых установок общий план работ по выводу из эксплуатации, как правило, готовится во время подачи первоначальной заявки на лицензию, в которой запрашивается разрешение регулирующего органа на строительство и/или ввод в эксплуатацию ускорителя частиц. Этот первоначальный план вывода из эксплуатации может обновляться, и в течение срока эксплуатации объекта может добавляться более подробная информация в целях облегчения процесса вывода из эксплуатации [24]. Уровень детализации плана вывода из эксплуатации будет повышаться на протяжении всего жизненного цикла ускорителя. Площадка многоцелевого комплекса

должна иметь общий план вывода из эксплуатации, в котором учитываются взаимозависимости отдельных установок и видов деятельности, связанные с этим ограничения и содержание планов вывода из эксплуатации каждой установки. Стандартный формат и содержание документации по выводу из эксплуатации, относящейся к обеспечению безопасности, приведены в [87]. Часто ускорители частиц эксплуатируются в течение многих лет, и вопросы вывода из эксплуатации могут не рассматриваться на этапах проектирования, строительства и эксплуатации. В таких случаях необходимо обязательно приступить к планированию вывода из эксплуатации при приближении времени окончательной остановки. В 1999 году Европейская комиссия провела исследование [14] и обнаружила, что для большинства ускорителей частиц в Европейском союзе не были предусмотрены первоначальные планы вывода из эксплуатации и стратегии его подготовки, поскольку отсутствовали соответствующие регулирующие требования.

В случае ускорителей частиц класса 1 и 2 в краткий план вывода из эксплуатации, подготовленный эксплуатирующей организацией, как правило, не включается оценка воздействия на окружающую среду и, как правило, предусматривается проведение дезактивации в ограниченном объеме и часто без сноса с применением ограниченных мер по контролю и обращению с отходами. Часто помещение, в котором был установлен ускоритель, повторно используется для размещения новой модели ускорителя [24]. С другой стороны, ускорители класса 3 и 4 могут иметь масштабную активацию материалов и конструкций, и в этом случае необходим более подробный план вывода из эксплуатации.

Для выполнения основных работ по демонтажу и сносу конструкций необходимо внешнее руководство проектом и требуются внешние подрядчики. Характеризация может выполняться внутренним персоналом или внешними подрядчиками, не связанными с эксплуатирующей организацией. Для сложного объекта, к которому, скорее всего, в основном будут относиться ускорители класса 4, необходимо разрабатывать масштабный план вывода из эксплуатации, как правило, требующий проведения детальной оценки воздействия на окружающую среду, и в таких случаях для управления часто привлекается внешний руководитель проекта ввиду отсутствия собственных специалистов, способных руководить проведением сложных работ по выводу из эксплуатации. В стратегии вывода из эксплуатации сложных ускорительных установок класса 4, как правило, предусматриваются обширная дезактивация, снос и возможное проведение работ по экологической реабилитации прилегающих территорий, выполняемых профессиональными субподрядчиками.

Первоначальный план вывода из эксплуатации необходимо периодически пересматривать и обновлять в период эксплуатации, как это предписывается регулирующим органом [85]. Проведение пересмотра также может быть обусловлено предлагаемыми изменениями в конструкции объекта, введением различных мер по обращению с отходами или альтернативными способами их удаления/захоронения, изменениями в общем финансовом состоянии или конкретными изменениями, касающимися оборудования или здания, которые оказывают влияние на план вывода из эксплуатации (например, в случае внесения изменений в дренажную систему, удаления опасных материалов, таких как асбест). В течение срока эксплуатации установки необходимо также вносить изменения или поправки в план вывода из эксплуатации с целью отражения опыта эксплуатации, новых или пересмотренных требований безопасности или внедрения усовершенствованной технологии, а также изменения в стратегии вывода из эксплуатации и предполагаемом конечном состоянии, которые были согласованы с регулирующим органом. Такие изменения или поправки должны быть всесторонне задокументированы и далее храниться в соответствующей поисковой системе, с тем чтобы они были легко доступными для проведения будущих работ по выводу из эксплуатации.

План также необходимо пересматривать и корректировать в случае возникновения серьезных аварий или инцидентов, которые могут влиять на характеристики объекта [85]. Для будущей характеристики объекта требуются подробные описания таких событий и их последствий.

Непредвиденное закрытие объекта может быть обусловлено рядом факторов, таких как: а) объявление владельцем о банкротстве; б) серьезный случайный ущерб, нанесенный зданию

объекта (например, в результате наводнения или пожара); с) наличие серьезных дефектов в конструкции здания; d) старение здания, в результате которого становится экономически нецелесообразным его восстановление до состояния соответствия современным требованиям; e) проблемы, связанные с асбестом или другими опасными материалами, удаление которых будет связано с очень высокими затратами; f) нецелесообразность дальнейшей эксплуатации объекта вследствие чрезмерного увеличения затрат. После непредвиденного останова объекта регулирующий орган должен незамедлительно обеспечить соблюдение требования о наличии достаточного финансового обеспечения работ по выводу из эксплуатации, в особенности в случае, когда собственник объявляет о банкротстве. Регулирующий орган должен требовать заблаговременного представления планов вывода из эксплуатации, с тем чтобы можно было надлежащим образом оценить адекватность и надежность финансового обеспечения. При разработке плана досрочного вывода из эксплуатации ускорителя необходимо должным образом предусматривать меры, которые необходимо будет принять в случае остановки ускорителя до подготовки окончательного плана вывода из эксплуатации. Для обеспечения безопасного содержания объекта до подготовки и осуществления удовлетворительного плана вывода из эксплуатации необходимо предусматривать соответствующие документально оформленные меры, которые могут быть реализованы в кратчайшие сроки. В следующих ниже подразделах приведено краткое описание предварительных планов вывода из эксплуатации отдельных ускорителей.

5.3.1. Позитрон-электронный проект, США

Позитрон-электронная установка (PEP-II) в Национальной ускорительной лаборатории SLAC состоит из двух независимых накопительных колец, которые располагаются один над другим в туннеле PEP. Высокоэнергетическое кольцо, в котором накапливается электронный пучок с энергией 9 ГэВ, представлял собой модернизацию ранее существовавшего коллайдера PEP; в нем повторно были использованы все магниты PEP, и конструкция включала медную вакуумную камеру и новую радиочастотную систему, способную поддерживать накапливаемый сильноточный пучок. Недавно было построено низкоэнергетическое кольцо, в котором накапливаются позитроны с энергией 3,1 ГэВ. Инжекция достигается путем экстракции электронов и позитронов при энергиях столкновения и транспортировки каждого из них по выделенной байпасной линии. Для инжекции используются пучки Стэнфордского линейного коллайдера с низким эмиттансом. Строительство коллайдера было завершено в июле 1998 года. Предварительный план вывода из эксплуатации, в котором особое внимание уделяется вопросам активации и удаления отходов, изложен в [88].

5.3.2. Европейский источник нейтронов скалывания, Швеция

В предварительном плане вывода из эксплуатации Европейского источника нейтронов скалывания (ESS) в Швеции предполагается, что объект будет построен с ожидаемым сроком эксплуатации 40 лет. Согласно Экологическому кодексу Швеции, планы вывода из эксплуатации должны быть представлены при строительстве такого объекта [45]. О предварительных исследованиях по выводу из эксплуатации, которые также включают меры, направленные на снижение активации и упрощение работ по выводу из эксплуатации, сообщается в [45, 46]. Установка предназначена для производства нейтронов для исследовательских целей путем использования ртути в качестве источника нейтронов скалывания. Происходит активация ртути, в результате чего образуется ряд радионуклидов. Кроме того, ускорительная система подвергается радиоактивному загрязнению, и в металлах и бетоне может возникать наведенная активность [45].

Основными компонентами Европейского источника нейтронов скалывания являются:

- a) источник ионов;
- b) линейный ускоритель (лиinak);
- c) накопительное кольцо;

- d) мишень;
- e) инструментальные средства.

Легкие металлические части (например, вакуумные насосы, системы транспортировки пучка, трубопроводы) после измерения их активности могут быть разрезаны с помощью мобильных гидравлических ножниц [45]. Если использование такого оборудования не представляется возможным, можно применять ручные ленточные пилы или абразивно-отрезные станки. План предусматривает, что все оборудование будет разрезано и компактировано на площадке. Детали, которые не могут быть полностью освобождены от контроля, упаковываются в контейнеры для удаляемых отходов. В случае крупных устройств, используемых в связи с ускорителем, может потребоваться резка с помощью ленточных пил с дистанционным управлением. Бетонные конструкции могут быть демонтированы с помощью таких методов, как резка проволокой, распиловка, сверление кольцевой пилой, колонковое бурение, резка специальными гидравлическими клещами или термическое воздействие с использованием электрического нагрева сопротивлением [45]. При осуществлении работ по выводу из эксплуатации необходимо применять дистанционно управляемое оборудование для демонтажа, в частности мишени, а также системы, подсоединенные к мишенным станциям, с целью снижения радиационного облучения работников [46].

Объем активированного материала в значительной степени зависит от потерь пучка. Уменьшение потерь пучка или вероятности их возникновения может обеспечить значительное уменьшение объемов активированного материала [46]. Низкоактивные отходы в виде бетона и его арматуры являются основными активированными материалами. Относительно короткоживущие радионуклиды являются доминирующими, и время между остановкой и выводом из эксплуатации влияет на величину остаточной активности. Радиоактивные отходы могут захораниваться на полигонах с грунтовой засыпкой или в хранилищах, размещенных в коренных породах [45, 47].

5.3.3. Канадский источник синхротронного излучения (CLS), Канада

Строительство Канадского источника синхротронного излучения (CLS) началось в 1999 году, и его запуск состоялся в 2004 году. Исследовательская лаборатория CLS является национальным центром синхротронных исследований, предназначенным для получения синхротронного излучения высокой яркости в диапазоне от инфракрасного, видимого и ультрафиолетового излучения до рентгеновской области электромагнитного спектра. Комплекс CLS представляет собой масштабное расширение существующей Саскачеванской ускорительной лаборатории, расположенной на территории площадью 3,3 га в кампусе Саскачеванского университета, Канада.

В настоящее время комплекс CLS включает [89]:

- a) линак — существующий ускоритель электронов на 300 МэВ Саскачеванской ускорительной лаборатории;
- b) бустер — бустерный синхротронный ускоритель на энергию от 250 МэВ до 2,9 ГэВ;
- c) накопитель — накопительное кольцо с энергией 2,9 ГэВ и источник синхротронного излучения;
- d) пучковые каналы — для переноса синхротронного излучения к экспериментальным мишенным станциям, на которых проводятся научные эксперименты или процессы, требующие синхротронного излучения;
- e) инженерные системы;
- f) вспомогательные средства — контроль объекта, подготовка образцов, сбор данных и ведение архивов и документации, техническое обслуживание и административные функции.

Полезный срок службы комплекса CLS оценивается в 20–30 лет начиная с даты рутинной эксплуатации. В предварительном плане вывода из эксплуатации указывается, что вывод из

эксплуатации комплекса CLS не будет сопряжен с какими-либо особыми трудностями и может быть осуществлен с использованием имеющихся в настоящее время технологий. В 30-страничном предварительном плане вывода из эксплуатации подробно описываются этапы, которые будут связаны с выводом из эксплуатации комплекса CLS. Цель, указанная в плане, заключается в проведении дезактивации и удалении радиоактивно загрязненных и радиоактивных материалов, оборудования и компонентов для получения разрешения регулирующего органа на неограниченное использование.

Во вставке 1 показано содержание предварительного плана вывода из эксплуатации комплекса CLS [89]. Структура этого предварительного плана вывода из эксплуатации отличается от структуры, предложенной в [87], но его можно считать интересным альтернативным примером, поскольку особое внимание в нем уделяется обычным и радиологическим опасностям, которые должны быть устранены в ходе выполнения работ по выводу из эксплуатации.

5.3.4. Институт Пауля Шеррера, Швейцария

Предварительный план вывода из эксплуатации протонного ускорителя высокой интенсивности на 600 МэВ в Институте Пауля Шеррера, Швейцария, кратко изложен в [90]; в этом плане особое внимание уделяется вопросам образования отходов при выводе из эксплуатации.

5.4. ОЦЕНКА ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ОКРУЖАЮЩУЮ СРЕДУ

Оценка воздействия на окружающую среду (ОВОС) представляет собой структурированный процесс, который помогает прогнозировать, выявлять и оценивать потенциальное воздействие предложения на экологические системы, природные ресурсы и биосферу до принятия важных решений или обязательств. Проведение ОВОС для ускорительной установки представляет собой комплексный процесс, в рамках которого необходимо учитывать радиологические и нерадиологические опасности (создаваемые, например, асбестом, бериллием, полихлорированными дифенилами (ПХД)) и то, как они могут влиять на работы по выводу из эксплуатации. В ходе оценки также необходимо рассмотреть и описать, каким образом будет достигнуто соблюдение национальных требований по экологической безопасности.

В случае большинства ускорителей частиц, в частности медицинских линаков класса 1, при выводе из эксплуатации не требуется ОВОС. Вместе с тем в план вывода из эксплуатации можно включить краткий экологический анализ. В случае сложных ускорителей частиц, как правило, класса 3 и 4, в план вывода из эксплуатации необходимо включать резюме ОВОС и ее выводов.

Если этого требует национальное законодательство, то ОВОС необходимо проводить для определения соблюдения национальных требований в отношении потенциальных экологических последствий, связанных с проведением работ по выводу ускорителя из эксплуатации. В ОВОС необходимо оценивать как воздействие работ по выводу из эксплуатации, так и воздействие любого будущего ограниченного использования установок и площадки на население и окружающую среду после достижения согласованного конечного состояния процесса вывода из эксплуатации.

ОВОС включает оценку экологических последствий для работников, населения и окружающей среды. ОВОС, как правило, включает справочную информацию об объекте и окружающей его территории, описание задач по выводу из эксплуатации, которые необходимо выполнить, краткое описание любых оцененных альтернативных методов вывода из эксплуатации, обоснование причин и последствий выбора предпочтительной стратегии вывода из эксплуатации, а также любые меры по смягчению последствий, которые будут предприняты с целью минимизации воздействия на окружающую среду. В оценке можно также указать вероятное воздействие работ по выводу из эксплуатации на окружающую среду. В случае проектов по выводу из эксплуатации больших ускорителей в ОВОС также должны учитываться такие факторы, как перенос за пределы площадки, геология и почвы, вода, местная экология, наличие охраняемой биоты в окрестностях,

**ВСТАВКА 1. СОДЕРЖАНИЕ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОГО ПЛАНА ВЫВОДА
ИЗ ЭКСПЛУАТАЦИИ КОМПЛЕКСА КАНАДСКОГО ИСТОЧНИКА
СИНХРОТРОННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ (CLS)**

(воспроизведено с разрешения из [89])

1. Общие сведения
2. Цель
3. Круг задач
4. Краткое описание
5. Основные опасности и физические условия
 - 5.1 Обычные опасности
 - 5.1.1 Опасные материалы
 - 5.1.2 Электрические опасности
 - 5.1.3 Магнитные опасности
 - 5.1.4 Криогенные опасности
 - 5.1.5 Опасности, связанные с недостатком кислорода
 - 5.1.6 Механические опасности
 - 5.1.7 Опасности, связанные с вакуумом и давлением
 - 5.1.8 Асбест
 - 5.2 Радиологические опасности
6. Снижение опасностей при осуществлении работ по выводу из эксплуатации
 - 6.1 Обычные опасности
 - 6.1.1 Физические опасности
 - 6.1.2 Опасности, связанные с опасными материалами
 - 6.1.3 Электрические опасности
 - 6.1.4 Магнитные опасности
 - 6.1.5 Криогенные опасности
 - 6.1.6 Опасности, связанные с недостатком кислорода
 - 6.1.7 Механические опасности
 - 6.1.8 Опасности, связанные с вакуумом и давлением
 - 6.1.9 Асбест
 - 6.2 Радиологические опасности
7. Окружающая природная и социальная среда
8. Подход к выводу из эксплуатации
9. Цели финального конечного состояния
10. Финансовые гарантии
11. Комплексы работ по выводу из эксплуатации
 - 11.1 Административная/регулирующая деятельность
 - 11.2 Остановка и деактивация объекта
 - 11.3 Отключение и демонтаж средств технических служб
 - 11.4 Демонтаж ускорителя/пучковых каналов
 - 11.5 Снос и удаление сплошного защитного экранирования
 - 11.6 Радиологические измерения
 - 11.7 Обращение с радиоактивными отходами и их удаление/захоронения
 - 11.8 Окончательная очистка площадки и объекта
12. Концептуальный график
13. Оценки затрат
14. Документация
15. Справочные материалы
16. Дополнения
17. Приложения

воздействие на качество воздуха, уровень шума, исторический интерес к территории площадки, визуальные последствия в результате осуществления работ по выводу из эксплуатации, социально-экономические последствия, здоровье населения и работников, обращение с отходами (до удаления) и любые иные совокупные последствия, которые могут иметь значение.

Результаты ОВОС могут быть использованы в качестве основы для разработки надлежащих мер по охране окружающей среды, применимых к проекту по выводу из эксплуатации. Выводы ОВОС могут также облегчить определение мер по смягчению последствий осуществления работ по выводу из эксплуатации в целях уменьшения выявленного воздействия на окружающую среду. Эти меры по смягчению последствий должны быть отражены в программе охраны окружающей среды и процедурах выполнения работ по выводу из эксплуатации. Результаты ОВОС также необходимо учитывать при разработке программы радиационной защиты для проекта по выводу из эксплуатации.

5.5. ПОДГОТОВКА И ОСУЩЕСТВЛЕНИЕ ПЛАНА ВЫВОДА ИЗ ЭКСПЛУАТАЦИИ

Окончательный план вывода ускорителя из эксплуатации вместе с предписанными приложениями, необходимыми для получения соответствующего разрешения регулирующего органа, должен быть представлен в регулирующий орган для утверждения до начала работ по выводу ускорителя из эксплуатации. Все применимые требования, действующие в отношении ускорителя, должны соблюдаться надлежащим образом за исключением случаев, когда регулирующий орган утверждает смягчение требований с учетом уменьшения опасности (например, в результате удаления радиоактивного материала из установки).

Подход к подготовке и реализации плана вывода из эксплуатации в целом един для всех ускорителей и, как правило, включает:

- a) применение дифференцированного подхода к требованиям безопасности в связи с выполнением работ по выводу из эксплуатации в зависимости от класса ускорителя (см. раздел 3.3);
- b) подготовку и своевременную подачу любых необходимых лицензионных заявок и получение разрешений на начало вывода из эксплуатации от соответствующих регулирующих органов;
- c) заблаговременное установление контактов, по мере необходимости, с заинтересованными сторонами и согласование текущей коммуникационной стратегии, а также установление четких каналов связи для всех, кто может иметь отношение к проекту вывода из эксплуатации;
- d) обеспечение своевременной и надлежащей коммуникации и осуществление мер по обеспечению радиационной защиты и обращению с отходами;
- e) четкое распределение функций и обязанностей и обеспечение их ясного понимания всеми лицами, участвующими в проекте по выводу ускорителя из эксплуатации;
- f) своевременное привлечение обладающего надлежащим опытом руководителя проекта или внешних подрядчиков при отсутствии собственных специалистов для выполнения конкретных функций и задач по выводу из эксплуатации и обеспечение полного документального оформления и ясного понимания возложенных на них функций и обязанностей;
- g) обеспечение надлежащего обучения для штатных сотрудников, не имеющих опыта работы по выводу из эксплуатации, которых предполагается использовать в осуществлении проекта, с тем чтобы они знали порядок выполнения действий;
- h) проведение комплексной оценки безопасности и доведение полученных выводов и заключений до сведения всех, кому требуется такая информация. Оценка безопасности позволит определить, какие средства индивидуальной защиты (СИЗ) потребуются в ходе проведения различных работ по выводу из эксплуатации; необходимо определить

ответственного руководителя, который обеспечит своевременное наличие и надлежащее хранение и обслуживания СИЗ, а также проведение необходимого обучения по их правильному использованию;

- i) обеспечение наличия и заблаговременного заказа оборудования, которое будет арендовано для выполнения ключевых задач в ходе осуществления проекта (например, подъемное, режущее оборудование или техника для сноса). Заблаговременное обеспечение соответствия письменно заявленных спецификаций арендованного оборудования спецификациям предоставленного оборудования;
- j) рассмотрение и адаптация аварийных механизмов на местах, например, для принятия мер по обеспечению готовности к пожарам или иным чрезвычайным ситуациям. Это требует обеспечения того, чтобы все операторы информировались об изменениях, вносимых по результатам рассмотрения, чтобы при необходимости размещались новые знаки для аварийной эвакуации и чтобы создавался механизм информирования операторов о любых дальнейших изменениях, которые могут потребоваться по мере продвижения работ по выводу из эксплуатации;
- k) согласование и обеспечение соответствующих средств и маршрутов для перемещения материалов, отходов, контейнеров, упаковок и оборудования в зону вывода из эксплуатации или из нее;
- l) заблаговременное установление контактов с регулирующим органом с целью согласования уровней таможенной очистки и методов измерения и калибровки оборудования, которое будет использоваться. Обеспечение компетентности соответствующих операторов и подрядчиков и соблюдение ими согласованных условий;
- m) применение соответствующей системы управления, которая будет действовать в течение всего срока реализации проекта;
- n) обеспечение достаточных средств и ресурсов и согласование соответствующих сроков их выделения во избежание ненужных задержек в осуществлении проекта;
- o) обеспечение наличия достаточно квалифицированных инженеров для проведения тщательных инженерных исследований на ключевых этапах проекта по выводу ускорителя из эксплуатации, чтобы гарантировать сохранение конструкционной целостности ускорителя, его здания и инфраструктуры в безопасном состоянии при проведении всех работ по демонтажу.

5.6. ТЕХНОЛОГИЯ ДЕМОНТАЖА УСКОРИТЕЛЕЙ

Методы демонтажа ускорителей, как правило, не отличаются от методов, применяемых при выводе из эксплуатации других ядерных и радиологических установок (см. [91–93]). Ниже приводятся примеры, а не исчерпывающий обзор методов вывода из эксплуатации ускорителей.

В [94] рассматривается ряд важных мер, относящихся к осуществлению стратегий вывода ядерных установок из эксплуатации.

Также в [95] представлен другой процесс выбора технологии демонтажа для синхротрона ЦЕРН. Выводы, признанные приемлемыми для данного проекта по выводу из эксплуатации, отличаются от выводов, указанных в таблице 13, что является подтверждением того, что оценку технологии вывода из эксплуатации лучше всего проводить на индивидуальной основе применительно к конкретному случаю.

Методом, широко используемым при проведении работ по выводу из эксплуатации, является резка алмазной проволокой. Преимущество этого метода заключается в том, что он позволяет с высокой точностью резать бетон любой толщины без производства пыли в воздухе или распространения радиоактивно загрязненного материала. Основным ограничением метода

ТАБЛИЦА 13. СООБРАЖЕНИЯ, ВЛИЯЮЩИЕ НА ВЫБОР ТЕХНОЛОГИЙ ДЕМОНТАЖА

Термическая резка

- Требуется тщательная разработка систем локализации и фильтрации
- Резка ограничена расстоянием примерно 18 дюймов (46 см)
- Необходимо тщательное наблюдение в целях контроля радиоактивного загрязнения и обеспечения пожарной безопасности
- Проблемы безопасности при извлечении тонн расплавленного металла
- Проблемы безопасности при тепловом стрессе, связанном с многочасовой работой с горелкой при использовании полного комплекта СИЗ

Механическая резка

- Происходит чрезмерное засаливание и износ абразивной проволоки режущих инструментов
- Сверление швов обеспечивает неограниченные возможности для резки, но установка и эксплуатация оборудования являются практически нецелесообразными и дорогостоящими
- Холодная резка закаленными дисковыми пилами показала превосходные результаты, однако доступное оборудование было тяжелым, и материал приходилось доставлять к режущему агрегату
- Большие ленточные пилы доступны, но связанные с ними расходы и требования к охлаждению не являются практически целесообразными
- Фрезерная резка является практически целесообразной с точки зрения минимального образования вторичных отходов, однако система подачи крупногабаритных деталей отсутствует

является то, что он требует протягивания проволоки через блок, который должен быть разрезан. В [96] приводится информация об использовании этого метода при демонтаже ускорителя Принстон-Пенн.

5.7. ОРГАНИЗАЦИОННЫЕ И УПРАВЛЕНЧЕСКИЕ ВОПРОСЫ

В функции руководителя проекта входит обеспечение своевременного планирования, подготовки и выполнения задач по выводу из эксплуатации с должным учетом технических, административных и правовых требований. Гибкость в преодолении непредвиденных трудностей или устранении задержек является еще одним важным обязательством. Поэтому все требования в отношении квалификации инженерно-технического и административного персонала, необходимой для планирования и выполнения задач, должны быть отражены в плане проекта для обеспечения надлежащего и незамедлительного реагирования на любые неожиданные события. Обеспечение качества является важным компонентом любого проекта вывода из эксплуатации, и соблюдение стандартов и кодексов обеспечения качества должно быть соразмерно сложности проекта в соответствии с дифференцированным подходом к выводу из эксплуатации.

Системы менеджмента и обязанности должны соответствовать сложности выводимого из эксплуатации ускорителя и отвечать требованиям безопасности и обеспечения качества. Комплексный подход к управлению проектами следует применять на всех этапах.

Целесообразно предусматривать необходимые системы и процессы менеджмента для обеспечения выполнения требований в отношении:

- а) управления проектом, менеджмента ресурсов и финансового менеджмента;
- б) выполнения законодательных положений (охватывающих законодательство в области безопасности, охраны окружающей среды и труда);
- в) лицензирования и повторного лицензирования;

- d) обеспечения качества, распределения функций и обязанностей, менеджмента ресурсов, ведения документации и записей или отчетности, рабочих процедур, менеджмента событий и несоответствий (процедур реагирования на чрезвычайные ситуации), анализа менеджмента и рабочих процессов.

В [97–99] представлена дополнительная информация по этому вопросу. Общие требования в отношении обеспечения безопасности при осуществлении комплексного управления проектом изложены в [85].

В таблице 14 указаны типичные проблемы, возникающие в результате неэффективного организационного управления при осуществлении работ по выводу из эксплуатации.

Оценка применения требований в отношении системы менеджмента может проводиться в соответствии со сложностью ускорительной установки, выводимой из эксплуатации, с учетом:

- a) значимости и сложности каждого продукта или вида деятельности;
- b) опасности и масштаба потенциальных рисков для безопасности и здоровья работников и для окружающей среды, физической безопасности, качества и экономики, связанных с осуществлением деятельности по выводу из эксплуатации;
- c) возможные последствия в случае сбоя в работе из-за проблем с оборудованием или в случае неправильного осуществления деятельности.

ТАБЛИЦА 14. НЕДОСТАТКИ И ПОСЛЕДСТВИЯ, СВЯЗАННЫЕ С НЕЭФФЕКТИВНЫМ ОРГАНИЗАЦИОННЫМ УПРАВЛЕНИЕМ
(адаптировано с разрешения из [24])

Недостатки	Последствия
Отсутствие адекватной коммуникационной инфраструктуры.	Эффективное осуществление проекта не будет возможным. Успех и безопасность проекта могут быть поставлены под угрозу.
Неадекватные системы и процессы управления.	Неэффективное управление проектом. Возможные последствия для охраны здоровья и обеспечения безопасности.
Чрезмерно усложненные организационные механизмы управления наряду со сложностью самого проекта.	Дезориентация среди работников. Излишние затраты и задержки, обусловленные тем, что работники вынуждены применять эти чрезмерно усложненные механизмы управления.
Функции и обязанности неадекватно определены и доведены до сведения всех заинтересованных сторон.	Отсутствует общий контроль за задержками в осуществлении проекта и возможными последствиями для охраны здоровья и обеспечения безопасности.
Назначение недостаточно опытного руководителя проекта.	Успешное осуществление проекта не будет возможным. Может потребоваться замена руководителя после того, как осуществление проекта уже было начато, что приведет к задержкам и дополнительным расходам.

5.8. ЗАИНТЕРЕСОВАННЫЕ СТОРОНЫ

В целом, заинтересованные стороны оказывают также влияют на процесс вывода из эксплуатации ускорителя, как и в случае любого другого проекта по выводу ядерного объекта из эксплуатации. Обзор участия заинтересованных сторон приводится в [100]. Одна из возможных

специфических проблем, связанных с ускорителем, заключается в том, что владелец площадки и оператор ускорителя могут быть разными юридическими лицами (например, это может быть университет, научно-исследовательский институт, местный орган власти или национальное правительство) [24]. Владелец площадки может требовать гарантии того, что будущее использование после реконструкции не будет ограниченным [101].

С другой стороны, общественность может также требовать гарантии того, что удаление всей радиоактивности и других опасных материалов будет осуществлено без ущерба для здоровья населения в результате проведения работ по выводу из эксплуатации. Общественность, как правило, не принимает и не понимает концепцию «оптимизации» радиационной защиты. Нередко в период эксплуатации ускорителя формируются антиядерные настроения, которые будут сохраняться на протяжении всего этапа его вывода из эксплуатации.

Примером вовлечения антиядерных групп в проект по выводу ускорителя из эксплуатации является демонтаж синхрофазотрона «Беватрон» в лаборатории в Беркли, о котором сообщается в [102]. Планы лаборатории по сносу подстегнули полемику среди местных экологических активистов, обеспокоенных перспективой удаления многих тонн радиоактивных материалов с площадки «Беватрона» и их транспортировки в результате вывода синхрофазотрона из эксплуатации.

5.9. УЧЕТ ВОПРОСОВ ВЫВОДА ИЗ ЭКСПЛУАТАЦИИ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ УСТАНОВОК

На этапе проектирования, строительства и ввода в эксплуатацию новой установки необходимо учитывать требования в отношении вывода из эксплуатации [24, 85, 103]. Заблаговременное рассмотрение требований к выводу из эксплуатации может способствовать оптимизации проекта и эксплуатации ускорителя частиц таким образом, который впоследствии облегчит проведение работ по выводу из эксплуатации. Примеры учета вопросов вывода из эксплуатации на этапе проектирования, включают:

- a) обеспечение легкого доступа к зонам ускорителя частиц с целью облегчения текущего обслуживания, проведения работ по дезактивации и демонтажу, применения оборудования, необходимого для выполнения этих работ, и вывоза ускорителя;
- b) проектирование установки таким образом, чтобы исключалась нежелательная активация материалов или существенно снижалась вероятность такой активации, а также облегчалась дезактивация без демонтажа трубопроводов, каналов и т.д.;
- c) подбор подходящих материалов или сочетания материалов, обеспечивающий малое значение сечения реакций при активации нейтронами и заряженными частицами, которые также будут устойчивы к деградации под воздействием любых химических веществ, используемых на ускорителе, и прочны с точки зрения износостойкости, что будет облегчать их дезактивацию в конце срока службы;
- d) включение в конструкцию адекватной вентиляции с целью сокращения или сведения к минимуму накопления озона и снижения вероятности его воздействия на операторов и возникновения коррозии оборудования;
- e) заблаговременный учет опыта, накопленного при реализации предыдущих проектов по строительству и выводу из эксплуатации ускорителей, в целях совершенствования проекта строительства;
- f) учет экстремальных экспериментов, которые могут проводиться в течение срока службы ускорителя, и исключение радиоактивного загрязнения и активации, что особенно актуально в случае исследовательских ускорителей.

Приведенные выше соображения по проектированию могут значительно облегчить вывод из эксплуатации, но применение технологических и административных мер контроля не менее важно для обеспечения эксплуатации установок в пределах установленных ограничений (пределов безопасности).

Нередко ускорители демонтируются и заменяются более современными моделями (особенно в медицинских учреждениях) либо частично выводятся из эксплуатации и модернизируются. В случае ранних ускорительных установок вопрос упрощения работ по выводу из эксплуатации, по-видимому, комплексно не рассматривался на стадии строительства, и поэтому любая запланированная модернизация или модификация установки является идеальной возможностью для возможного внесения усовершенствований, которые будут облегчать вывод из эксплуатации в будущем.

Важно четко определить на стадии эксплуатации ускорителя факторы, которые будут приводить к активации материалов, и осуществить возможные контрмеры, которые необходимо было принять на стадии проектирования и строительства, для сведения к минимуму этих факторов. Проведение на раннем этапе углубленного исследования по активации ускорителей и защитного экранирования позволит также лучше оценить возможное радиологическое воздействие на работников и население, которое может возникнуть в результате проведения работ по выводу из эксплуатации [14].

Оценка величины уровней радиоактивности и связанного с ней излучения, которое будет образовываться при ускорении частиц до высоких энергий, является необходимым условием обеспечения безопасной и эффективной эксплуатации, технического обслуживания и вывода из эксплуатации ускорителя частиц. Существует ряд моделей, облегчающих относительно реалистичную оценку всех аспектов активации, которая может происходить в ускорителе в течение его жизненного цикла, но при этом необходимо помнить, что это будет неточная оценка, хотя она и является важным инструментом планирования вывода из эксплуатации на раннем этапе.

При проектировании ускорителей подробно рассматриваются лишь радиологические соображения, а именно защитное экранирование и, возможно, механизм управления мишенями. В целях облегчения вывода из эксплуатации на этапе проектирования необходимо рассматривать еще четыре вопроса [12]:

- 1) *выбор материалов.* Химический состав материалов, используемых на объекте, и настройка эксплуатационных параметров могут сильно влиять на вид и активность радиоактивных отходов и профессиональные дозы при осуществлении работ по выводу из эксплуатации. Образование радиоактивных отходов, для удаления которых требуется дорогостоящая технология или такая технология не требуется, можно предупредить путем рационального подбора материалов и технологий, используемых для компонентов, которые непосредственно подвергаются воздействию пучка. Кроме того, минимизация изотопного состава в компонентах, которые находятся ближе всего к пучку, может быть достигнута путем проведения предварительных расчетов и оценки альтернатив на самой ранней стадии проектирования. Программное обеспечение, разработанное в ЦЕРН для этой цели, называется ActiWiz, и его можно использовать для облегчения инженерам задачи подбора материалов [104]. Соответствующий подбор металлов, например использование алюминия вместо меди в магнитных катушках, позволяет снизить образование ^{60}Co . На рынке доступны различные защитные материалы; материал из вольфрамового сплава находит все более широкое применение для изготовления элементов экранирования для защиты операторов от излучения (например, в случае плазменных ускорителей). Вольфрам на 60% плотнее свинца, что эффективно обеспечивает ослабление сильного излучения. Наиболее важные моменты, которые необходимо учитывать, заключаются в том, что вольфрамовый материал является экологически чистым, но стоит намного дороже свинца. Однако следует проявлять осторожность, чтобы убедиться, что вольфрам не будет создавать более высокий риск

активации, чем свинец. Преимущества эксплуатационной безопасности следует взвешивать против возможных недостатков, которые могут возникнуть при выполнении работ по выводу из эксплуатации;

- 2) *физическая компоновка компонентов ускорителя.* При наличии возможности изменения компоновки ускорительной установки компоненты и оборудование в идеале не должны располагаться вблизи мест, где будет происходить взаимодействие с большей частью ускоренного пучка [12]. В противном случае будет сокращаться срок службы электронного оборудования и может происходить ненужное образование радиоактивных отходов;
- 3) *метод сборки.* Если бетонное экранирование состоит из отдельных съемных блоков, то снять каждый блок будет намного проще для выполнения характеристики и разделения отходов при демонтаже. В конструкции некоторых ускорительных установок используется сочетание съемных блоков и сплошных стен. Эта концепция, часто называемая модуляризацией, подробно описана в [105], включая преимущества и потенциальные недостатки. Дополнительным преимуществом модульного защитного экранирования является гибкость в конфигурировании во время эксплуатации ускорителя. В качестве примера можно привести модульные лабиринты из ограждения корпуса Hall D Tagger в лаборатории Джефферсона (рис. 15–17). Если в будущем будет принято решение перестроить экспериментальную конфигурацию внутри, можно будет разобрать лабиринт, обеспечить доступ к крупногабаритному оборудованию, перестроить экспериментальную установку и при необходимости сконфигурировать новую экранирующую стену. Такая гибкость не будет возможной, если стены смонтированы стационарно;
- 4) *тщательное выполнение операций и технического обслуживания оборудования.* Точная настройка пучка помогает уменьшить количество нежелательных потерь пучка, которые приводят к активации оборудования и защитного экранирования (за счет создания горячих точек). Поэтому важно постоянно повышать эффективность экстракции пучка из ускорителя и его транспортировки к мишени с минимальными потерями [12].



РИС. 15. Строящийся лабиринт у рамп, ведущей к корпусу Hall D Tagger в лаборатории Джефферсона (любезно предоставлено компанией Jefferson Science Associates, LLC).



РИС. 16. Модульное защитное экранирование, используемое в Лаборатории Джефферсона (любезно предоставлено компанией Jefferson Science Associates, LLC).



РИС. 17. Модульное защитное экранирование лабиринта, ведущего к корпусу Hall D Tagger в Лаборатории Джефферсона (любезно предоставлено компанией Jefferson Science Associates, LLC).

На рис. 15 показан почти полный лабиринт в нижней части рампы для грузовиков, ведущей к корпусу Hall D Tagger. Модульный лабиринт можно полностью разобрать, чтобы обеспечить доступ к крупногабаритным экспериментальным устройствам или компонентам пучкового канала или их удаление. Конструкция лабиринта также облегчает перемещение более мелких компонентов с помощью вилочного погрузчика.

На рис. 16 показан лабиринт, отличающийся от представленного на рис. 15; он построен из модульных блоков защитного экранирования, отделяющих корпус Hall D Tagger в лаборатории Джефферсона (пучковый канал виден слева) от рампы для грузовиков за стеной справа. Эти блоки также используются в качестве локального экранирования для защиты чувствительного оборудования (крайние слева на переднем плане на рис. 16).

На рис. 17 показано модульное защитное экранирование лабиринта, ведущего к ловушке электронного пучка в корпусе Hall D Tagger в лаборатории Джефферсона. В случае этого модульного защитного экранирования используются как бетонные, так и железные блоки; последние имеют покрытие (зеленого цвета) для минимизации коррозии.

Учет вопросов вывода из эксплуатации на этапе проектирования ускорителя может снизить затраты на демонтаж, свести к минимуму неизбежные зоны активации и максимально повысить возможности повторного использования [12].

В [106] представлены результаты исследования по гипотетической циклотронной установке в цепочке от концепции до проектирования и далее, включая эксплуатацию и на конечной стадии вывод из эксплуатации. Образование наведенной активности в стенах шахты циклотрона оценивалось с использованием компьютерных кодов MCNPX, Monte-Carlo N-Particle (MCNP) и FISPACT (код для расчетов изотопного состава и наведенной активации в термоядерных устройствах). С помощью этих компьютерных симуляций были выявлены проблемы, связанные с нейтронной активацией стен шахты циклотрона, а также они указали на необходимость использования специальных материалов защитного экранирования, таких как борированный полиэтилен. Эти коды позволили спроектировать защитную камеру для экономически эффективного проведения работ по выводу из эксплуатации благодаря использованию защитных слоев. Проведенное исследование [106] показывает, как коды переноса частиц, применяемые для оценки количества и пространственного распределения продуктов активации, могут использоваться для оценки затрат на удаление отходов.

Сверхпроводящий циклотрон в Циклотронном центре переменной энергии, Калькутта, Индия, находится на продвинутой стадии ввода в эксплуатацию и обеспечил успешную доставку множества внутренних пучков (от легких до тяжелых частиц) до радиуса экстракции. Код FLUKA («флуктуирующий каскад» — код для моделирования переноса излучения методом Монте-Карло) использовался для оценки наведенной активности в компонентах ускорителя и результирующих мощностей доз, с которыми персонал может сталкиваться при проведении работ по техническому обслуживанию. Симуляция с использованием простой геометрии предусматривала использование толстой мишени из нержавеющей стали, бомбардируемой протонами с энергией 80 МэВ, для облучения различных часто применяемых материалов — нержавеющей стали, меди, алюминия и бетона, размещаемых на нижнем участке потока. Активность образующихся радионуклидов была рассчитана для времени облучения семь суток и периода охлаждения от 1 до 100 000 ч. Результаты этой симуляции позволили определить долгоживущие нуклиды, которые будут накапливаться в течение срока службы установки. Такой же подход и аналогичные полученные данные также могут успешно применяться в качестве инструмента первоначального планирования, а затем для оптимизации вывода ускорителя из эксплуатации.

Потеря основного пучка частиц — не единственный возможный источник активации в ускорителях. Спонтанная полевая эмиссия электронов в высокоградиентных радиочастотных резонаторах может приводить к образованию «темнового тока» электронов, достигающего энергий в нескольких десятках мегаэлектронвольт и более. Потеря этих электронов вызывает активацию компонентов ускорителя во время работы в радиочастотном диапазоне с пучком или без него. В лаборатории Джефферсона код FLUKA использовался для оценки такой активации в криогенных радиочастотных модулях после многих лет эксплуатации, при этом в качестве исходных параметров применялись измеренные значения мощности дозы по истечении трехмесячного периода после ввода в эксплуатацию. Были изучены возможности использования различных материалов, таких как нержавеющая сталь, медь, алюминий и ниобий, применительно к наиболее сильно активируемым компонентам с целью оптимизации будущего проектирования. Сравнение

показывает, что в случае проведения кратковременных работ наиболее низкие уровни активации отмечаются у алюминия и что нержавеющая сталь является наилучшим выбором при выполнении долговременных работ и осуществлении работ по выводу из эксплуатации.

Другие примеры исследований по активации приводятся в [55, 107–117]. Эти примеры указывают на то, что благодаря постоянному совершенствованию современных кодов переноса частиц упрощается учет соображений, касающихся вывода из эксплуатации, на стадии проектирования. Коды, которые использовались для расчетов защитного экранирования ускорителей, теперь могут применяться для прогнозирования характера и масштабов образующихся радионуклидных составов. В первом примере представлен двухэтапный процесс, в котором общий код переноса (MCNP/MCNPX) позволяет получить входные данные, такие как спектры частиц, для специального кода (FISPACT), который обеспечивает получение информации об образующихся радионуклидных составах, их эволюции во времени и связанных с ними количествах (например, мощности дозы гамма-излучения, тепловыделении). В некоторые общие коды переноса в последнее время были также включены инструменты по образованию продуктов активации, как показано в двух других примерах выше. Описание общих кодов переноса частиц выходит за рамки настоящей публикации, однако ниже приводятся краткие сведения о нескольких кодах, обычно используемых для целей проектирования и обеспечения радиационной безопасности на ускорительных установках:

- *MCNP 6*. Этот код получен в результате слияния кодов MCNP и MCNPX, которые были разработаны в Лос-Аламосской национальной лаборатории (поточечные сечения X и многогрупповые сечения; обширный набор предопределенных параметров источника и вариантов подсчета; вычисления в сопряженном режиме). Добавление MCNPX обеспечило значительное расширение диапазона энергий и количества переносимых частиц, что сделало код пригодным для ускорительных применений;
- *FLUKA*. Этот код первоначально был разработан для применения в отношении ускорителей на высокие энергии. Современная версия была разработана в Национальном институте ядерной физики, Милан, Италия; она распространяется на перенос частиц в низкоэнергетическом диапазоне и значительно расширяет возможности кода в целом. В последнее время были добавлены инструменты по активации и радиационному повреждению. Код FLUKA широко используется в ЦЕРН и других ускорительных центрах по всему миру;
- *PHITS*. Этот код разработан в Японии в результате сотрудничества Японского агентства по атомной энергии (ЯАЭ), Исследовательской организации по информационным наукам и технологиям (ИИНТ) и Организации по изучению высокоэнергетических ускорителей (КЕК) при участии также соответствующих специалистов Японии и Европы. Первоначально он был предназначен для высокоэнергетических космических и ускорительных применений, но позже был расширен для охвата «низких» энергий (ниже 20 МэВ) и более широкого круга применений. Специфические функции включают перенос тяжелых ионов, подсчет радиационного повреждения и подробные микродозиметрические подсчеты, используемые в лучевой терапии;
- *MARS*. Этот код был разработан для высокоэнергетических ускорительных применений в Институте физики высоких энергий в бывшем СССР, но позже использовался для целей проекта по конструкциям, системам и элементам (КСЭ). Дальнейшая разработка кода MARS продолжается в «Фермилаб». MARS был сопряжен с кодом MCNP с целью его распространения на энергетический диапазон ниже 20 МэВ. Среди его отличительных особенностей следует отметить оперативное получение описания структур ускорителя в программной системе MAD (англ. methodical accelerator design — методические расчеты ускорителя) и использование программы STRUCT (композиционный тип данных для определения группы значений в памяти) для отслеживания частиц в структурах ускорителя. MARS нашел применение в крупных ускорительных центрах и для применений в области физики элементарных частиц в космосе.

Общими особенностями указанных выше кодов являются их применение к многочастичным процессам переноса, широкий диапазон энергий (от теплового до гига- или тераэлектронвольтного), комбинаторные (или аналогичные) геометрические модули, сложные инструменты для подготовки ввода данных, отображение геометрии и анализ и отображение результатов. Для дальнейшего расширения таких функций или для дополнительных конкретных целей (например, обеспечения сопряжения с кодами анализа методом конечных элементов для расчетов эффектов теплового стресса или для импорта геометрии и карт магнитного поля из специализированных кодов проектирования ускорителей) могут быть предусмотрены дополнительные модули. Коды переноса постоянно развиваются, и наиболее актуальные и современные описания функций можно найти в недавно опубликованных руководствах по кодам и на соответствующих веб-сайтах. Подробное общее описание метода Монте-Карло, используемого для расчета переноса частиц, дано в [108].

6. ПОВТОРНОЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ И РЕКОНСТРУКЦИЯ РЕЗЕРВНЫХ УСТРОЙСТВ И ЗАПАСНЫХ ЧАСТЕЙ

Первоначальная концепция управления выводом из эксплуатации установок, как правило, влечет за собой демонтаж оборудования и снос строений с окончательным удалением отходов и восстановлением площадки [118]. Повторное использование оборудования и здания ускорителя после его остановки по возможности следует рассматривать как конечный результат вывода из эксплуатации. Большое количество металла, бетона и других слаборадиоактивных объектов, образующихся в результате вывода из эксплуатации ускорителя частиц, может значительно повысить затраты на обращение с отходами в случаях, когда отсутствуют регулирующие положения об освобождении от контроля. Уровни концентрации активности в материале, поступающем с ускорителей, варьируются в значительных пределах. Во многих случаях (в особенности это касается ускорителей класса 1) объемы активированных материалов будут очень низкими. Если активированные объекты или объемные материалы соответствуют критериям освобождения от контроля, получение разрешения на рециклирование и повторное использование является предпочтительным вариантом для дальнейшего обращения с ними [119].

Важно всегда учитывать преимущества повторного использования установки для других работ с излучением. Финансовые выгоды достигаются благодаря исключению необходимости демонтажа некоторых стен и вспомогательных сооружений, а также за счет вытекающего из этого сокращения объема удаляемых отходов [24]. После принятия окончательного решения о повторном использовании объекта важно провести как можно более точную характеристику объекта, с тем чтобы обеспечить соответствие требованиям для такого повторного использования, принимая во внимание соответствующие вопросы соблюдения, такие как регулирующие положения и лицензионные требования, действующие в отношении нового использования. Если конечным результатом вывода из эксплуатации не является неограниченное использование (с освобождением от регулирующего контроля), очень важно планировать и указывать будущие финансовые обязательства, которые могут возникнуть, при планировании к выводу из эксплуатации повторно используемой установки (передаваемой для нового использования с определенными будущими обязательствами в отношении обеспечения радиологической безопасности в рамках конечного результата вывода из эксплуатации).

Даже если государство предусматривает освобождение от контроля металлических отходов с использованием обычных методов дезактивации, таких как переплавка, результатом может быть дорогостоящее решение по обращению с отходами, связанное с выводом из эксплуатации ускорительных установок. Также может возникнуть проблема с конкретным типом металлических отходов, образующихся после переплавки, так как они могут не соответствовать нормальным критериям приемки отливок, и металлургические и сталелитейные заводы могут отказываться

принимать их для дальнейшего разбавления другими чистыми первичными металлами. В государствах, в которых освобождение от контроля не практикуется, повторное использование оборудования и установки возможно только на объектах с радиологическими условиями работы.

Имеется ряд примеров ускорительных установок, которые были выведены из эксплуатации и использованы повторно. Установка в Кампердауне Австралийской организации по ядерной науке и технике — это недавняя инициатива, в рамках которой Австралийская организация по ядерной науке и технике и Сиднейский университет совместно работали над проектом по повторному использованию здания, в котором размещался резервный циклотрон на 30 МэВ, для строительства нового циклотрона на 18 МэВ и сопутствующие вспомогательные сооружения. Циклотрон на 30 МэВ был успешно выведен из эксплуатации в начале 2011 года. Важный урок повторного использования этого объекта заключается в том, что благодаря этому возникла концепция учета вопросов вывода из эксплуатации при проектировании. Циклотрон без защитного экранирования был выбран по разным причинам, и одна из них сводится к тому, что экранированный циклотрон имеет недостаток, связанный с необходимостью обращения с активированным защитным экранированием во время выполнения работ по выводу из эксплуатации.

В отчете по анализу безопасности нового циклотрона на 18 МэВ стратегия и планирование вывода из эксплуатации были рассмотрены кратко и подробно будут изложены лишь к концу срока службы циклотрона. Историческая практика показывает, что при эксплуатации циклотрона не образуются большие объемы радиоактивных отходов, обращение с которыми необходимо будет обеспечить на этапе вывода из эксплуатации. Факторы, влияющие на образование радиоактивных отходов, известны, и в течение всего срока эксплуатации установка будет содержаться в хорошем состоянии и хорошо обслуживаться.

Таким образом, вероятно, что дезактивация демонтированного оборудования будет возможна и что здание может быть снесено или отремонтировано в соответствии с данной ситуацией по истечении соответствующего периода времени, необходимого для распада активированных компонентов [120]. План и график вывода из эксплуатации установки в Кампердауне приведены в [121]. Конкретные детали плана вывода из эксплуатации установки в Кампердауне содержатся в оценке безопасности [122], плане управления безопасностью [123], плане обеспечения радиационной защиты [124], плане противоаварийных мероприятий [125], плане обеспечения физической безопасности [126], плане контроля работ по выводу из эксплуатации [127] и плане обращения с отходами [128].

Вывод ускорителей из эксплуатации может также проводиться с целью их транспортировки и повторного ввода в эксплуатацию в другом месте. Имеются примеры продажи и повторного использования ускорителей на другом объекте или в другом государстве. Развитый рынок бывших в использовании ускорителей, однако, отсутствует, так как изготовители ускорителей не раскрывают информацию о своих клиентах в интересах защиты своего бизнеса. Пользователи также не заинтересованы покупать оборудование без надлежащих гарантий и сервисного обслуживания, которые предусматриваются при поставке нового оборудования. Каждый проект по выводу из эксплуатации должен рассматриваться как уникальный проект, и повторное использование оборудования не должно преследовать цель решения проблемы минимизации отходов и преодоления ограничений, связанных с выводом из эксплуатации. Нередко бывший в использовании циклотрон, который еще способен работать, передается другому пользователю для того, чтобы избежать затрат и административных расходов, связанных с удалением радиоактивных отходов. В [129] приведено подробное описание и изложены многочисленные примеры факторов, связанных с передачей циклотронов другим пользователям. Один из проектов такого рода детально описан в [130]. Вопросы повторного использования ускорительного оборудования рассматриваются в [12, 131].

Иногда при повторном использовании оборудования могут возникнуть проблемы, связанные с тем, что некоторые части оборудования были изменены первоначальным пользователем (например,

покрыты эпоксидной смолой или стекловолокном для определенных целей). Подобные изменения могут ограничивать повторное использование такого оборудования новым пользователем, а также могут приводить к проблемам с удалением отходов при выводе установки из эксплуатации.

Ниже приводится один из соответствующих примеров. Площадка ТА-3, Южная Меса, представляет собой большую техническую зону и функционирует как административный центр Лос-Аламосской национальной лаборатории. Объект ТА-3 был создан в период осуществления Манхэттенского проекта для использования в качестве огневой площадки. Сооружения, связанные с самым ранним использованием объекта ТА-3, включали мастерскую, складские здания и здания для хранения и сборки научного оборудования. Техническая зона военного времени была выведена из эксплуатации и очищена в 1943 году. Было признано, что ускорители имеют большую ценность, так как они были ключевыми инструментами в исследованиях в области ядерной физики, и, следовательно, было важно обеспечить их консервацию и повторное использование. В 1946 году в Лос-Аламосе был построен ускоритель Ван-де-Граафа. Ионно-пучковая установка ТА-3-16 на территории Лос-Аламосской национальной лаборатории была построена в 1951 году и вступила в строй в 1952 году для поддержки проведения важных научных исследований после Второй мировой войны; на площадке размещены оригинальные вертикальный и тандемный ускорители Ван-де-Граафа Лос-Аламосской национальной лаборатории. С течением времени лаборатория модернизировала ионно-пучковую установку и в 1965 году добавила к ней мощный тандемный ускоритель. В 1970 году вертикальный ускоритель был модернизирован, и теперь он может работать с ускорением на энергию 10 МэВ. Министерство энергетики США (Национальное управление ядерной безопасности, Администрация Лос-Аламосской лаборатории) предлагает осуществить работы по выводу из эксплуатации, провести дезактивацию и в конечном итоге снести этот исторический ускорительный комплекс. В период с августа 2002 по январь 2005 года было проведено несколько обследований исторических строений на объекте ТА-3-16. Планируется провести очистку и в конечном счете снос объекта ТА-3-16, поскольку это стареющий объект, на котором больше не может обеспечиваться уровень поддержки, необходимый для выполнения важнейших функций, связанных с проведением лабораторных исследований. В рамках подготовки к этим работам по очистке и сносу Министерство энергетики США перенесло исследования, ранее проводившиеся на объекте ТА-3-16, на другие объекты в Лос-Аламосе и в другие центры Министерства энергетики. Однако вследствие характера ранее проводившихся работ ионно-пучковая установка была загрязнена тритием и другими опасными отходами и не пригодна для повторного использования для других целей [132]. Ниже приводится несколько примеров тематических исследований по повторному использованию зданий ускорителей или их оборудования для целей, не связанных с ускорителями.

В Канаде здание ускорителя частиц Ван-де-Граафа после освобождения от регулирующего контроля было преобразовано в высокопроизводительный вычислительный кластер, известный как «Colossus» [133]. В Пенсильвании еще один ускоритель частиц Ван-де-Граафа, выведенный из эксплуатации, был сохранен в качестве местного исторического памятника. Ускоритель частиц («atom smasher») внесен в список достопримечательностей Питтсбурга, одобренный Питтсбургским фондом истории и достопримечательностей [134].

В Чок-Ривер, Канада, сверхпроводящий циклотрон с тандемным ускорителем находился в эксплуатации с начала 1960-х по 1997 год. Он использовался для проведения фундаментальных экспериментов в области ядерной физики. На площади 4200 м² размещались ускоритель, пучковые каналы, мишенные зоны, зал управления и помещения для инженерных систем. Здание состояло из одного основного этажа, частично второго этажа и цокольного помещения. Этот объект был специально сооружен для размещения в нем ускорителя и пучковых каналов и построен из железобетона с защитным экранированием толщиной до 1,5 м. К циклотрону примыкает двухэтажное офисно-лабораторное здание площадью 1500 м² с частичным цокольным этажом из дерева с облицовкой кирпичом. После остановки циклотрона были завершены работы по выводу из эксплуатации с демонтажем всех технологических систем, оборудования и компонентов, после чего осталась находящаяся на техническом обслуживании бетонная коробка.

Бывший циклотрон был делицензирован, а затем возвращен в эксплуатацию для повторного использования. Эту огромную территорию было трудно реконструировать из-за нестандартных углов и толстых бетонных стен. Ряд небольших помещений был переоборудован для размещения в них экспериментальных контуров, большие же площади с мостовыми кранами использовались для производственных цехов, учебных и лабораторных помещений, а бывшие залы управления и компьютерные центры были преобразованы в офисные помещения и библиотеки технического обслуживания. Был реализован проект по расширению этого объекта за счет новых лабораторных площадей. Офисная часть, примыкающая к циклотрону, также была реконструирована после закрытия установки. Структурный анализ параметров здания подтвердил его конструкционную прочность, и были разработаны планы по модифицированию старинного здания 1940 года. Была завершена масштабная реконструкция, включающая расчистку здания до наружных стен и демонтаж всех прежних внутренних перегородок. Были смонтированы новые электрические и механические службы, включая пристройку к зданию с системой приточного воздуха и вытяжной вентиляции. Здание было преобразовано в офисное помещение с открытой планировкой для размещения сотрудников различных подразделений [118].

Многие объекты могут быть пригодными для повторного использования, но это не всегда возможно. О безуспешных попытках переоборудовать сверхпроводящий суперколлайдер в Техасе, США, для другого использования (последнее рассмотренное предложение сводилось к переоборудованию помещения в центр обработки данных) сообщается в [135].

7. ЗАТРАТЫ

Затраты на вывод из эксплуатации ядерных установок нельзя рассматривать как связанные с простым демонтажем, аналогичным демонтажу обычных выведенных из эксплуатации электростанций на ископаемом топливе и других промышленных объектов. Ввиду роста затрат на персонал и резкого увеличения расходов на удаление радиоактивных отходов затраты на вывод из эксплуатации стали основным фактором, учитываемым при определении общих расходов этой отрасли на весь жизненный цикл. В середине 1980-х годов в атомной отрасли некоторых государств наблюдался серьезный перерасход средств на строительство, что привело к серьезным финансовым проблемам у нескольких энергетических компаний. Регулирующие органы пришли к выводу, что если действующие объекты испытают такой же финансовый стресс, то безопасная остановка и вывод из эксплуатации объектов, на которых использовались радиоактивные материалы, может стать финансовым бременем для владельцев, плательщиков тарифов и государственных учреждений. Оценки затрат на вывод из эксплуатации этих крупных ядерных установок резко выросли в некоторых государствах-членах, что обусловлено быстро растущими расходами на удаление радиоактивных отходов и ограниченным количеством объектов, имеющих лицензию на прием таких отходов. Даже в государствах с более привлекательной инфраструктурой обращения с отходами более точные оценки затрат на вывод из эксплуатации потребовались в связи с растущей эксплуатационной зрелостью ядерной отрасли.

В рамках исследования, проведенного Аргоннской национальной лабораторией в 1979 году, вывод из эксплуатации четырех ускорителей был подробно изучен, и были определены связанные с этим затраты на вывод из эксплуатации. Большая часть выведенного из эксплуатации резервного оборудования была куда-то отправлена по различным адресам или использована повторно, что обеспечило образование очень небольшого количества радиоактивных отходов [12]. Ниже приведена краткая справка о расходах на вывод из эксплуатации:

- a) 1971 год — 104 500 долл. США на проведение работ по выводу из эксплуатации синхроциклотронов на 250 МэВ, которые эксплуатировались в Рочестерском университете [12];
- b) 1973 год — 735 200 долл. США на вывод из эксплуатации электронного синхротрона на 6 ГэВ в Гарвардском университете [12];
- c) 1974 и 1975 годы — 504 000 долл. США на вывод из эксплуатации синхроциклотрона на 440 МэВ в Центре ядерных исследований Университета Карнеги-Меллона [12];
- d) 1975 год — 105 000 долл. США на вывод из эксплуатации линейного ускорителя тяжелых ионов в Йельском университете [12].

Со времени осуществления этих проектов прошло более четырех десятилетий, и указанные выше расходы будут абсолютно нереалистичными в условиях нынешнего рынка. Кроме того, затраты на эти четыре проекта не включали потребности в удалении радиоактивных отходов, как это принято во многих проектах по выводу ускорителей из эксплуатации. В настоящее время типичные полные расходы на вывод из эксплуатации медицинского линейного ускорителя класса 1 составляет порядка 20 000–40 000 долл. США. Указанные исторические проекты не отражают сегодняшних затрат на соблюдение регулирующих требований, обращение с отходами и их удаление, а также на оплату труда.

«Америфизикс», компания, оказывающая услуги в области медицинской радиационной физики и охраны окружающей среды, которая базируется в Ноксвилле, шт. Теннесси, США, является поставщиком радиологических, экологических и связанных с отходами решений. Совсем недавно компания «Америфизикс» провела характеризацию, выполнила работы по демонтажу и удалению 50-тонного циклотрона Cyclone 30 на 30 МэВ фирмы «IBA (Ion Beam Applications SA) Radiopharma Solutions» и вспомогательного оборудования, двух циклотронных бункеров, четырех мишенных станций, четырех горячих камер и трех вытяжных шкафов. Затраты составили 6,3 млн долл. США. Этот проект включал дезактивацию в рамках работ по выводу из эксплуатации с последующим вывозом и удалением более 6000 т радиоактивных отходов низкого уровня активности. Компания «Америфизикс» составила и реализовала план исследования окончательного состояния площадки на основе Руководства по многоучрежденческому радиационному обследованию и исследованию площадки (MARSSIM) и разработала критерии освобождения от контроля с использованием моделирующих кодов, включая компьютерный код для остаточной радиоактивности (RESRAD) и MicroShield [136]. Оценка затрат для ускорителя «Теватрон» составила около 10 млн долл. США; точная постатейная разбивка затрат приведена в [137].

Важно не применять прямую корреляцию данных о затратах на вывод из эксплуатации одного проекта в другом проекте, поскольку целый ряд факторов может оказывать существенное влияние на затраты.

7.1. ОЦЕНКА ЗАТРАТ

Затраты на вывод ускорителей из эксплуатации зависят от различных факторов, общих для всех проектов вывода из эксплуатации, такие как: выбранная стратегия вывода из эксплуатации; период времени, необходимый для распада; наличие пунктов для захоронения в государстве; возможности характеристики объекта; имеющиеся ресурсы; доступные технологии; доступные хранилища; национальная политика в области обращения с отходами. Конечное состояние процесса вывода из эксплуатации объекта и площадки является важным фактором, влияющим на затраты.

Оценка затрат выполняется на этапе планирования вывода из эксплуатации и используется для принятия решения о жизнеспособности и относительной желательности различных вариантов. План вывода из эксплуатации формирует основу для ввода в оценку затрат на проект, при этом ее глубина и точность возрастают по мере доработки плана. При подготовке плана могут наблюдаться качественные различия в калькуляции затрат на ранних и поздних стадиях, поскольку

этот подход эволюционирует от простых сравнений к калькуляции затрат по принципу «снизу вверх» на пооперационной основе. В любом проекте по выводу из эксплуатации испрашиваемое финансирование должно быть тесно увязано с планом, но вместе с тем должно быть достаточно надежным, чтобы учитывать неопределенности, которые могут возникнуть в ходе осуществления проекта.

Оценка затрат может быть одним из наиболее сложных этапов проекта по выводу из эксплуатации для организаций, впервые приступающих к реализации такого проекта. Руководителю ускорителя очень хорошо известны данные по текущим эксплуатационным расходам, связанным с ускорителем, и затратам на вспомогательные услуги, такие как обращение с отходами и их удаление, и поэтому недооценка затрат на проект по выводу из эксплуатации будет означать, что проект не будет иметь достаточного финансирования для его выполнения. Одним из возможных решений может быть подготовка завышенных смет расходов, с тем чтобы гарантировать наличие достаточных средств. Проблема в этом случае заключается в обеспечении покрытия предполагаемых расходов. Если затраты будут сочтены слишком высокими, это может оказаться препятствием для финансирования проекта по выводу из эксплуатации. Если в смету заложена слишком большая неопределенность (например, 40%-ный резервный фонд), то смета также может быть отклонена; следует решать эту проблему, по возможности не дожидаясь необходимости представления пересмотренной сметы [24].

Эксплуатирующая организация, не имеющая конкретного опыта в области вывода из эксплуатации, может воспользоваться самым простым способом составления предварительной сметы затрат — разбивка проекта на составные задачи и далее расчет расходов на выполнение каждой из них после получения оценок затрат от внешних поставщиков услуг или от действующих поставщиков услуг для эксплуатируемого объекта [24].

В случае объектов класса 1 лицензиатов часто обращаются к подрядчику с просьбой предложить в рамках тендера фиксированную сумму для осуществления проекта по выводу объекта из эксплуатации. Нередко после ознакомления подрядчика с тендерной документацией в него требуется вносить изменения, так как часто не все работы, необходимые для выполнения проекта, четко определены. Типичный недостаток в первом варианте тендерной документации — это недостаточный учет операций по обращению с отходами и материалами, для которых необходимо будет предусматривать переработку, повторное использование и удаление.

МАГАТЭ и другие международные организации определили стандартизированный перечень статей расходов на вывод из эксплуатации [138]. К основным компонентам, входящим в прогноз затрат на вывод из эксплуатации ускорителя, относятся:

- a) количество отходов в каждой категории, образующихся в процессе вывода из эксплуатации, и удельные затраты на всех этапах обращения с отходами, включая сортировку (разделение), упаковку, перевозку и удаление. Возможности продажи рециклируемых материалов не должны упускаться из виду в качестве потенциального источника дохода;
- b) расходы на подготовку документации, включая окончательный план вывода из эксплуатации и при необходимости план доступа к пунктам захоронения отходов;
- c) расходы на получение необходимых регулирующих разрешений или лицензий для осуществления работ по выводу из эксплуатации, включая подготовку документации;
- d) затраты на оплату труда в час для проведения демонтажа;
- e) затраты на наем внешнего руководителя проекта, если это необходимо;
- f) характеристика объекта, включая затраты на любые внешние измерительные средства;
- g) потребности в приобретении дополнительных контрольно-измерительных приборов или оборудования при проведении работ по выводу из эксплуатации в основном силами собственного персонала и оборудования;
- h) расходы на реабилитационные мероприятия, включая восстановление окружающей среды;
- i) резерв на непредвиденные расходы, относящийся к проекту.

Затраты на персонал должны рассчитываться на основе удельных затрат на персонал. В случае, когда требуются специализированные подрядчики или специалисты по управлению проектами и когда таких собственных специалистов нет на объекте, для оценки затрат необходимо использовать ставки заработной платы соответствующего государства, из которого будут наняты эти специалисты. Разбивка затрат в проекте по выводу из эксплуатации на более мелкие составные части облегчает сопоставление расходов, которые будут покрываться внешним подрядчиком, с расходами на переподготовку имеющегося персонала и завершение работ в эксплуатирующей организации по данному разделу проекта.

Важно с самого начала убедиться, что для завершения проекта будет достаточно средств, даже если не все средства будут в наличии на начальном этапе [24]. Необходимо обеспечивать, чтобы окончательный бюджетный прогноз включал резервный фонд в размере не менее 10–20% от общего прогнозируемого бюджета для покрытия любых неопределенностей или повышения цен, которые неизбежно возникнут по мере реализации проекта. Резерв в 10–20%, как правило, более чем достаточен в случае ускорителей класса 1. При наличии большого числа неопределенностей в бюджете вывода из эксплуатации, возможно, имеет смысл увеличить резерв на непредвиденные расходы до 25–30% от общих расходов по проекту при условии, что такой подход может быть обоснован имеющимися подтверждающими данными. Это особенно касается ускорителей класса 3 и 4. МАГАТЭ опубликовало данные по финансовым аспектам вывода объектов из эксплуатации [139].

В коммерческих организациях, таких как промышленные предприятия, производящие товарную продукцию с регулярным движением денежных средств, перенос целевых средств, предусмотренных для проведения работ по выводу из эксплуатации, из одного финансового года на следующий год, как правило, не является проблемой. Во многих случаях это не относится к организациям, финансируемым государством, в которых денежные средства, остающиеся в бюджете организации на конец финансового года, будут подлежать возврату. Заблаговременное планирование вывода из эксплуатации и включение предварительных данных о затратах на вывод из эксплуатации на ранней стадии в долгосрочный финансовый план, возможно, является наилучшим способом обеспечить наличие средств, когда они фактически требуются. Нередко коммерческие организации осуществляют перспективное финансовое планирование на 5 или 10 лет вперед, в связи с чем может возникнуть необходимость в определении прогнозной суммы для вывода из эксплуатации задолго до того, как вывод из эксплуатации будет сочтен возможным. Цели не противоречат то, что эта сумма является «наилучшим предположением» на момент ее включения в финансовый план.

Главное — добиться, чтобы организация думала о будущих расходах, которые потребуются для выполнения работ по выводу из эксплуатации. «Наилучшее предположение» целесообразно пересматривать через соответствующие промежутки времени (возможно, каждые два-три года) и обновлять в соответствии с текущими прогнозами затрат, добавляя дополнительные уточнения к прогнозу затрат с целью повышения его точности при планировании фактических работ по выводу из эксплуатации. Финансовое планирование вывода из эксплуатации на ранней стадии не является обязательством организации в отношении времени проведения работ по выводу из эксплуатации. Фактически одна коммерческая организация в Соединенном Королевстве использовала предварительный бюджет, предусмотренный для работ по выводу из эксплуатации, на цели модернизации радиоактивных установок, когда предполагается, что эксплуатация будет продолжаться в течение еще 20 лет, а не прекращаться через три года.

При использовании любых методов калькуляции расходов по конкретному проекту неизбежна некоторая неопределенность, однако необходимо избегать главных неопределенностей. Чем больше неизвестных (например, наличие радиоактивного загрязнения от прошлых инцидентов или исторических источников, отходов или активированных компонентов), тем больше должен быть резервный фонд. Даже в тех случаях, когда считается, что все затраты были точно подсчитаны и нет никаких неучтенных неопределенностей, в качестве абсолютного минимума необходимо также предусматривать 10%-ный резервный фонд, с тем чтобы обеспечить по крайней мере некоторый

резерв средств на покрытие появившихся непредвиденных расходов или увеличения расходов на удаление отходов. Если ожидается, что проект будет продлен на более длительные периоды времени, целесообразно предусмотреть резерв на ежегодный рост инфляции.

7.2. СТРУКТУРА ЗАТРАТ

В 2011 году в совместной публикации Агентства по ядерной энергии ОЭСР, МАГАТЭ и Европейской комиссии [138] был представлен стандартизированный перечень статей для расчета затрат на вывод из эксплуатации (Международная структура расчета затрат на вывод из эксплуатации). Затраты в этой публикации были подразделены на следующие 11 групп:

- a) работы по подготовке к выводу из эксплуатации;
- b) работы по остановке объекта;
- c) дополнительные работы по обустройству безопасного ограждения или изоляции;
- d) работы по демонтажу в пределах контролируемой зоны;
- e) обработка, хранение и удаление отходов;
- f) инфраструктура и эксплуатация площадки;
- g) традиционный демонтаж, снос и восстановление площадки;
- h) управление проектами, инженерно-технические и вспомогательные средства;
- i) исследования и разработки;
- j) топливные и ядерные материалы;
- k) прочие расходы.

Предварительный анализ этого перечня из 11 общих групп учета затрат может показать, что они не имеют отношения к ускорительным установкам и подходят только для гораздо более крупных установок, таких как атомные электростанции и исследовательские реакторы [24]. Возможно, это верно в случае многих подгрупп затрат в рамках каждой из 11 групп затрат, однако десять из 11 групп затрат (исключая топливо) могут иметь определенное отношение к ускорительным установкам. В случае линейных ускорителей (линаков) класса 1 расчет затрат будет намного проще, поскольку будет меньше отдельных статей затрат, которые следует учитывать в каждой из общих групп затрат. Кроме того, лицензиату часто не приходится проводить оценку затрат на вывод из эксплуатации большинства медицинских установок класса 1, поскольку их вывод из эксплуатации, как правило, осуществляется подрядчиками, которые имеют контракт с суммой, зафиксированной в тендерной документации на выполнение работ по проекту. Если смета расходов должна быть подготовлена собственными силами, это можно сделать с использованием простых электронных таблиц или с помощью программного обеспечения для оценки работ по выводу из эксплуатации.

На каждом объекте необходимо предусматривать определенное финансирование для мероприятий, предшествующих выводу из эксплуатации, с целью покрытия расходов, связанных с подачей в регулирующие органы заявок на получение лицензий или их пересмотром. На этом этапе осуществляются расходы, связанные с планированием вывода из эксплуатации, и любые затраты, обусловленные необходимостью проведения обследований или вовлечения заинтересованных сторон, могут быть эффективно учтены. На данном раннем этапе также могут проводиться оценки, связанные с опасными материалами, и выбираться специализированные организации-подрядчики с целью обеспечения учета соответствующих затрат [24].

Важно рассмотреть предлагаемое повторное использование площадки или установки, так как это окажет существенное влияние на стратегию вывода объекта из эксплуатации и связанные с этим расходы. Снос стены, которая может быть использована при сооружении будущего объекта, является экономически нецелесообразным, равно как и дорогостоящая дезактивация с целью удаления всего радионуклидного состава в случаях, когда ускорительный зал будет объектом,

содержащим радиоактивные изотопы. Следует также учитывать возможность возврата активов (например, за счет извлечения больших объемов медных трубопроводов из медицинского циклотрона, имеющих коммерческую перепродажную стоимость после дезактивации и освобождения от регулирующего контроля, или путем сбыта излишков имеющегося в запасе оборудования, которое пользуется спросом на рынке перепродажи). Эти объекты перепродажи следует указывать как источник дохода в финансовой аналитической таблице проекта. На всех выводимых из эксплуатации объектах в бюджете должны предусматриваться средства на радиологическую характеристику и закрытие установки на этом этапе осуществления проекта. В случае линейных ускорителей (линаков) класса 1 затраты на радиологическую характеристику могут быть относительно низкими при отборе образцов и проведении измерений на месте собственными силами и с использованием собственных ресурсов, в особенности если учесть вероятное отсутствие на объекте активированного материала. Важно не упускать из виду затраты на калибровку оборудования для обеспечения прослеживаемости или затраты на внешние измерения дубликатов образцов при проведении характеристического обследования, выполнение которого может требовать регулирующий орган.

Закупка общего оборудования и материалов на первый взгляд может представляться несущественной с точки зрения затрат при выводе из эксплуатации ускорителя класса 1, но это может оказаться неверным в случае ускорителей более высокого класса.

Возможно, что объект уже имеет в своем распоряжении соответствующее оборудование для демонтажа, инструменты и материалы для проведения дезактивации и достаточное количество аппаратуры для дозиметрии и служб радиационной безопасности, необходимых для выполнения этого пункта в плане вывода из эксплуатации. Если это не так, то соответствующие затраты должны быть количественно определены и включены в оценку затрат по проекту. На этом этапе оценки затрат не учитываются затраты на оплату труда для фактического выполнения задач, для которых требуется оборудование и материалы. В таблице 15 перечислены различные проблемы, которые могут возникнуть в результате неадекватной оценки затрат на вывод из эксплуатации (необязательно специфичных для ускорителей частиц) [24].

В [24] рассмотрен широкий спектр затрат на демонтаж различных компонентов для целей калькуляции затрат. По этой причине будут возникать финансовые последствия для каждого плана вывода из эксплуатации. Работы по демонтажу будут существенной статьёй бюджета при выводе из эксплуатации ускорителей классов 3 и 4, особенно когда требуется ограниченная глубинная резка для удаления активированного бетона перед сносом оставшихся неактивированных конструкций. В случаях, когда процесс вывода из эксплуатации должен быть поэтапным и осуществляться в течение длительного времени для обеспечения выдержки, необходимой для естественного радиоактивного распада, работы по демонтажу могут сводиться к обеспечению безопасных условий выдержки до распада. Общее требование в отношении проведения оценки затрат на демонтаж предусматривает включение сметы расходов на персонал и других расходов, связанных с выполнением всего спектра работ по дезактивации перед демонтажем, передачей загрязненного оборудования и материалов на хранение, отбором образцов для радиологической характеристики в рамках принятия мер по безопасному хранению или осуществления работ по выводу из эксплуатации и дезактивации, созданием зон временного хранения отходов, экологической реабилитацией, дезактивацией для целей рециклирования и повторного использования, обучением персонала, возвратом активов и окончательным обследованием радиоактивности.

Одна из самых затратных статей вывода ускорителя из эксплуатации, в особенности при наличии активации, относится к обработке, хранению, транспортировке и удалению отходов и материалов. Эта статья бюджета должна покрывать расходы на подготовку демонтированных компонентов для окончательного захоронения в качестве радиоактивных отходов либо для ограниченного или неограниченного рециклирования или повторного использования. Все отходы в любой физической форме, как загрязненные радиоактивностью, так и нет, должны быть оценены с точки зрения затрат на обработку, упаковку и транспортировку. В идеальном варианте в оценку

ТАБЛИЦА 15. НЕДОСТАТКИ И ПОСЛЕДСТВИЯ, СВЯЗАННЫЕ С НЕЭФФЕКТИВНЫМ ПРОВЕДЕНИЕМ ОЦЕНКИ ЗАТРАТ [24]

Недостатки	Последствия
Неадекватное доведение регулирующих требований в отношении конечных результатов до владельца или оператора объекта, когда они не совпадают с конечными результатами, планируемыми владельцем или оператором.	Могут возникнуть трудности в получении достаточных средств для завершения проекта по выводу из эксплуатации.
Невозможность адекватно определить бюджетные потребности, связанные с проектом, вследствие отсутствия специалистов в данной области и необеспечения необходимой подготовки кадров или неиспользования услуг внешнего консультанта.	Сложности с реализацией проекта в случае недостаточного финансирования или в случае, если движение денежных средств не соответствует ходу осуществления работ.
Непонимание механизмов финансового планирования в организации.	Задержки с получением финансирования для осуществления проекта. Это может приводить к увеличению расходов по проекту, дополнительных расходов на обслуживание перед демонтажем, а также возможным проблемам в обеспечении безопасности. Это также может приводить к тому, что регулирующий орган, доноры или другие заинтересованные стороны будут оказывать давление с целью добиться продвижения работ по выводу из эксплуатации.
Отсутствие надлежащих прогнозов в отношении расходов.	Недостаточное наличие средств для завершения проекта. Это может приводить к принятию мер со стороны регулирующего органа, в особенности в том случае, если точка задержки в графике осуществления проекта сопряжена с дополнительными проблемами в обеспечении безопасности. Это также может приводить к задержкам в осуществлении проекта до получения дополнительных средств. Бюджетные расходы со временем могут увеличиваться.
Составление завышенного прогноза расходов во избежание недофинансирования.	Руководство отклоняет смету и требует представления пересмотренной сметы, что приводит к задержке в обеспечении финансирования. Общая инертность проекта вследствие того, что руководство не может финансировать завышенный прогноз затрат.

также следует включать расходы на удаление нерадиоактивных отходов для сжигания, захоронения на свалочных полигонах или в специализированных хранилищах, а также расходы на контейнеры для отходов и сборы, взимаемые хранилищами отходов.

Безопасность, контроль и техническое обслуживание площадки будут иметь большие финансовые последствия, особенно если вывод из эксплуатации предусматривает период выдержки для распада короткоживущих радионуклидов. Этот компонент оценки затрат охватывает меры по защите, контролю и техническому обслуживанию участка, а также может включать финансирование расходов по окончательной очистке и благоустройству участка. Может

потребуется финансирование независимой проверки применения норм очистки при повторном использовании площадок, и в этом случае расходы на ее проведение должны учитываться в оценке. Любое бессрочное финансирование ограниченного освобождения здания или площадки от контроля включается в эти расходы.

Расходы на управление проектом, инженерное обеспечение и поддержку на площадке увеличиваются в зависимости от сложности проекта по выводу из эксплуатации [24]. Вместе с тем крупные проекты по выводу из эксплуатации также открывают возможности для синергизма в организации процессов, что будет ограничивать рост расходов. Этот компонент относится к затратам, связанным с этапом реализации проекта по выводу из эксплуатации. Требование о найме обладающего соответствующим опытом руководителя проекта, подрядчика для оказания специализированных инженерно-технических услуг или специалистов по сносу будет зависеть от типа и сложности ускорительной установки, подлежащей выводу из эксплуатации [24]. В случае некоторых проектов в большей степени приходится учитывать затраты на развертывание временных сооружений, таких как временный пункт дезактивации персонала, зона для разделения чистых отходов и отходов, для которых требуются дальнейшие измерения, и ангар шатрового типа для характеристики отходов и их упаковки с целью удаления или дополнительной очистки. Затраты на обеспечение качества и контроль качества включаются при оценке затрат в эту общую группу. Не всегда сразу видно, что эти процессы будут иметь финансовые последствия для проекта; тем не менее целесообразно предусматривать затраты, требующиеся для дополнительного обучения персонала в связи с выполнением этого компонента плана по выводу из эксплуатации. Контроль за документацией и регистрационными записями может также иметь долгосрочные последствия с точки зрения расходов, связанных с хранением, ведением и хранением документации. Необходимо учитывать затраты на компьютерное оборудование и программное обеспечение, а также затраты на управление изменяющимися технологиями. В случае более крупных проектов, при осуществлении которых необходимо взаимодействие с общественностью, в оценке в эту статью расходов целесообразно включать расходы на связи с общественностью. Необходимо включать расходы на охрану здоровья и обеспечение безопасности (в том числе расходы на обеспечение радиационной защиты и радиационный мониторинг), а также финансовые последствия, связанные с обеспечением промышленной безопасности.

В разделе 3.3.9 публикации [138] указывается, что необходимо рассматривать и при необходимости учитывать оценку затрат, связанных с результатами исследований и разработок, проведение которых требуется для поддержки плана вывода из эксплуатации. Маловероятно, что это будет требоваться в случае ускорительных установок класса 1 или 2, однако такая необходимость может возникать при использовании непроверенных технологий вывода из эксплуатации, которые могут применяться при закрытии больших исследовательских ускорителей. Этот компонент расходов, связанный с выводом из эксплуатации, вероятно, будет включать в себя затраты на анализ доступных технических вариантов и выбор (или адаптацию) предпочтительного способа выполнения конкретных задач в рамках проекта, а также на любые макетные испытания в рамках планирования с соблюдением принципа «на разумно достижимом низком уровне» (ALARA).

В разделе 3.3.11 публикации [138] рассматриваются все другие затраты, которые не могут быть конкретно классифицированы по другим десяти группам оценки затрат. Сюда входят такие расходы, как компенсационные выплаты в связи с сокращением штатов, уплата налогов и страхование, а также накладные расходы по статье общих расходов. Также включен резерв для финансового обеспечения на случай возникновения неопределенностей в процессе осуществления проекта по выводу из эксплуатации. Также целесообразно учитывать любой доход, который может быть получен от продажи оборудования, приобретенного специально для использования в ходе осуществления проекта, которое имеет перепродажную стоимость, что часто имеет место в случае проектов по выводу ускорителей из эксплуатации.

7.3. ФИНАНСОВЫЙ АНАЛИЗ

В процессе осуществления проекта и при его завершении целесообразным с точки зрения финансового менеджмента является проведение анализа состояния бюджета. В случае перерасхода средств по одним статьям возможно достижение экономии средств по другим статьям, с тем чтобы обеспечить осуществление проекта в рамках установленного бюджета. Такое закрытие отчетного периода важно для обеспечения выплат всем кредиторам из суммы остаточных средств. Для учета того, как были израсходованы эти средства, необходимо проводить окончательную проверку ожидаемых затрат против выплаченных сумм. Это требование не является абсолютно обязательным для соблюдения при завершении проекта и не представляет интереса для регулирующего органа, однако такая проверка необходима для руководства объекта.

Во время подготовки к выводу из эксплуатации может потребоваться создание финансового резерва для завершения работ (т.е. обособленного финансирования). Если вывод из эксплуатации не является неограниченным, регулирующий орган может потребовать, чтобы некоторые средства хранились в резерве для покрытия остаточных финансовых обязательств по объекту. В таблице 16 показано, как неэффективное проведение финансового анализа может привести к нежелательным последствиям [24].

Калькуляция затрат на вывод из эксплуатации должна осуществляться на протяжении всего жизненного цикла ускорительной установки:

- a) на основе соответствующих расчетов выполняется первоначальная оценка затрат на вывод из эксплуатации;
- b) в ходе эксплуатации на основе соответствующих измерений уточняются затраты на вывод из эксплуатации, и это также будет способствовать минимизации общей суммы;
- c) оценки затрат на вывод из эксплуатации будут периодически пересматриваться и корректироваться, а затем после остановки объекта будет составляться смета на основе окончательного радиологического обследования и инвентаризации [101].

ТАБЛИЦА 16. НЕДОСТАТКИ И ПОСЛЕДСТВИЯ, СВЯЗАННЫЕ С НЕЭФФЕКТИВНЫМ ПРОВЕДЕНИЕМ ФИНАНСОВОГО АНАЛИЗА [24]

Недостатки	Последствия
Отсутствие анализа общих финансовых обязательств по проекту при завершении проекта.	Некоторые кредиторы могут остаться без причитающихся им выплат. Остаток средств недостаточен, и требуется заявка на получение дополнительных средств.
Отсутствие согласования с регулирующим органом требования в отношении финансового резерва для покрытия будущих обязательств по выводу из эксплуатации, когда завершение проекта предполагает ограниченное использование некоторых или всех установок.	Возникновение проблем в будущем при выводе объекта из эксплуатации. Отсутствие средств для покрытия финансовых обязательств.

7.4. ФИНАНСИРОВАНИЕ

Комиссия по ядерному регулированию США предложила типовую схему, которую можно использовать для финансирования работ по выводу из эксплуатации ускорителей частиц [140]. В США любой лицензиат, которому регулирующий орган разрешает владеть радиоактивными

материалами в объеме, превышающем пределы, указанные в законодательстве, должен представить план финансирования вывода из эксплуатации и сертификат финансовой гарантии, подтверждающий обеспечение необходимого объема финансирования для покрытия расходов, связанных с выводом из эксплуатации.

Регулирующий орган необходимо убедить в том, что лицензиат будет иметь все возможности для выполнения требований по выводу из эксплуатации с минимальным воздействием на здоровье и безопасность населения и работников и без негативного воздействия на окружающую среду, включая обеспечение своевременного и достаточного наличия финансовых средств. Большинство ускорительных производственных установок обязаны представлять план финансирования работ по выводу из эксплуатации и сертификат финансовой гарантии вследствие того, что в процессе эксплуатации образуются материалы активации в объеме, который, вероятно, будет превышать пределы, указанные в законодательстве (обычно указанные пределы для радиоактивных материалов с периодом полураспада более 120 суток). В этих требованиях в отношении финансовых гарантий может быть указано, что лицензиат обязан резервировать средства для будущего вывода из эксплуатации и увеличивать соответствующее финансовое обеспечение на протяжении всего срока эксплуатации ускорителя либо предоставлять финансовую гарантию, в том числе через третью сторону, подтверждающую, что средства будут в наличии. Последний вариант типичен для государственных и финансируемых государством объектов. В [141] описан случай, когда Комиссия по ядерному регулированию США приостановила лицензированную деятельность ускорительной установки из-за отсутствия доказательств того, что были выделены достаточные средства для выполнения работ по выводу из эксплуатации.

Даже если план финансирования вывода из эксплуатации не является нормативным требованием для ускорительной установки класса 1, лицензиаты обязаны хранить связанную с выводом из эксплуатации документацию в соответствующем архиве; в этой документации должна содержаться исчерпывающая информация о конструкциях и оборудовании, в которых находятся радиоактивные материалы, включая хранение компонентов, ранее удаленных из ускорителя.

Лицензиат обязан хранить записи в легко извлекаемом формате в безопасном месте до тех пор, пока площадка не получит разрешение на неограниченное пользование. В случае демонтажа и перемещения ускорителя и перехода права собственности к новому юридическому лицу соответствующая документация должна передаваться новому лицензиату еще до передачи ему лицензированной деятельности. После этого новый лицензиат принимает на себя ответственность за ведение документации до тех пор, пока прекращение действия лицензии не будет согласовано с регулирующим органом. Всестороннее и достаточно подробное ведение документации будет облегчать освобождение от контроля территории и процедуру прекращения действия лицензии.

Механизм финансовой гарантии будущего вывода из эксплуатации ускорительной установки TRIUMF в Канаде подробно описан и оценен в [142]. Регулирующий орган выносит одобрение на основе детального изучения эффективности обеспечения безопасности объекта на протяжении нескольких лет. Случай нехватки средств, препятствующей повторному использованию или выводу из эксплуатации ускорителя, приводится в [143].

8. ОБРАЩЕНИЕ С РАДИОАКТИВНЫМИ ОТХОДАМИ

8.1. ОБЩИЕ ВОПРОСЫ ОБРАБОТКИ РАДИОАКТИВНЫХ ОТХОДОВ И ОБРАЩЕНИЯ С НИМИ В ПРОЕКТАХ ПО ВЫВОДУ ИЗ ЭКСПЛУАТАЦИИ

При подготовке к выводу из эксплуатации все эксплуатационные отходы (например, использованные мишени, компоненты ускорителя или радиоактивные материалы для ионных

источников или пушек) необходимо удалять и обеспечивать надлежащее обращение с ними. Если это невозможно, работы с отходами должны включаться в общий проект по выводу из эксплуатации.

Основными целями обращения с отходами в контексте вывода ускорителей из эксплуатации являются:

- a) сведение к минимуму количества радиоактивных отходов на всех этапах вывода из эксплуатации;
- b) предотвращение смешивания отходов разных категорий (например, радиоактивных отходов, опасных химических отходов);
- c) выполнение всех применимых регулирующих положений при обращении с отходами, их хранении, переработке и удалении.

МАГАТЭ выпустило многочисленные публикации, содержащие информацию о подготовке и упаковке отходов для хранения и захоронения, которые образуются в результате эксплуатации объектов неядерной энергетики [144–146].

Имеется также множество публикаций, помогающих количественно оценить уровень продуктов активации, присутствующих в бетоне, а также понять пределы обнаружения различных приборов [147–149]. Вопросы, касающиеся наведенной радиоактивности, валидации компьютерных программ для прогнозирования наведенной радиоактивности и радионуклидной характеристики радиоактивных отходов, образующихся на высокоэнергетических ускорителях, рассматриваются в исследованиях [55, 58, 75, 79, 80, 109, 110, 150]. На каждом этапе процесса обращения с отходами необходимо вести надлежащую документацию. Соответствующие вопросы безопасности также рассматриваются в других публикациях МАГАТЭ [145, 151, 152].

Как и в случае многих других радиологических объектов, основная масса отходов, образующихся при выводе из эксплуатации ускорителей, будет подлежать неограниченному (полному) освобождению от регулирующего контроля ввиду незначительного уровня радиоактивности, присутствующей в этих отходах. Большинство государств — членов МАГАТЭ приняли законодательство, которое предусматривает применение критериев освобождения, облегчающих процесс освобождения отходов от регулирующего контроля: при соответствии числовым значениям для радионуклидов (т.е. при их непревышении) материалы освобождаются от регулирующего контроля. Иная ситуация сложилась во Франции, где нет регулирующих положений, разрешающих использование критериев освобождения. Комиссия по радиологической защите Германии опубликовала специальное руководство по освобождению от контроля ускорителей и удалению элементов ускорителя из контролируемых зон; см. [153]. МАГАТЭ в 2004 году опубликовало руководство по согласованным на международном уровне критериям освобождения от контроля твердых материалов [154]. Во многих государствах (например, в Германии, Японии) критерии освобождения зависят от дальнейшего применения компонентов или материалов (например, в ядерной отрасли или для неограниченного использования).

Логистика, связанная с обращением с материалами и отходами, образующимися в процессе вывода из эксплуатации, может показаться организациям, впервые приступающим к проведению работ по выводу из эксплуатации, непосильным бременем, поскольку они, вероятно, не могли предвидеть образования больших объемов материалов и отходов в течение короткого периода времени после начала демонтажа. Очень важно на ранней стадии установить контакты с операторами пунктов по обращению с отходами или удалению/захоронению отходов, которые будут принимать отходы различного типа, образующиеся при осуществлении проекта по выводу из эксплуатации (в том числе с учетом возможностей рециклирования или возврата элементов конструкции или даже всего ускорителя изготовителю), и уточнить детали применяемых операторами критериев приемки отходов и любых особых требований, действующих в отношении

упаковки. Особенно важно понять, что является неприемлемым в отходах, так как сортировку отходов можно проводить на месте их образования, исключив таким образом обработку упаковок с отходами впоследствии (или же следует найти иные решения).

В идеальном варианте работы по выводу из эксплуатации не следует начинать до тех пор, пока не будут приняты четко определенные меры по обращению с отходами, учитывающие новые или пересмотренные разрешения регулирующего органа, и пока работники не пройдут полную подготовку по вопросам применения новых процедур и любых связанных с этим рисков.

Проблемные отходы (например, смешанные, химические, токсичные отходы) должны быть надлежащим образом идентифицированы, и в отношении них должно быть получено разрешение на удаление/захоронение соответствующим способом. Подробная информация о схеме классификации отходов МАГАТЭ изложена в [155]. Схема МАГАТЭ базируется на вариантах удаления отходов, однако она может быть дополнена другими схемами, основанными, например, на мощности дозы или физических свойствах (горючесть, сжимаемость и т.д.).

Необходимо разработать и задокументировать процедуры обращения с отходами для проекта по выводу из эксплуатации, если они еще не разработаны [24]. Может потребоваться рассмотрение или пересмотр существующих документально оформленных процедур обращения с отходами с учетом новых потоков отходов или увеличения объема отходов, возникающих при проведении работ по выводу из эксплуатации, изменений в законодательстве, внесенных после их первоначальной разработки, или поправок, согласованных в ходе консультаций с регулирующим органом.

Целесообразно учитывать возможность возникновения любых биологических опасностей, включая возможное наличие болезнетворных организмов, в особенности при проведении работ по выводу из эксплуатации в медицинском учреждении.

В процедурах обращения с отходами должны быть указаны СИЗ, которые могут потребоваться и необходимость применения которых, вероятно, будет подтверждена оценкой безопасности [24]. В случаях, когда для безопасного проведения различных работ по выводу из эксплуатации требуется большее количество одноразовой защитной одежды, необходимо учитывать ее закупку и утилизацию, а также проводить оценку возможностей объекта обеспечивать обращение с возрастающими объемами отходов, которые требуется хранить до момента их удаления с объекта [24].

При реализации любой технологии дезактивации образуются отходы, для которых требуется обеспечивать надлежащее обращение. Тщательное планирование и использование оптимальных методов дезактивации позволяют сводить к минимуму образование вторичных отходов.

Надлежащее использование технологии дезактивации может обеспечить снижение затрат на удаление отходов. Если дальнейшая дезактивация делает отходы пригодными для рециклирования, это можно рассматривать как позитивный фактор в осуществлении проекта по выводу из эксплуатации. Свинец и медь имеют прямую перепродажную стоимость после проведения операций по рециклированию. Даже в случае обычных и высококачественных сталей дезактивация обходится дороже, чем рециклирование материала. Поэтому очень важно провести анализ затрат и выгод, в котором затраты на дальнейшую дезактивацию сравниваются с выгодами от получения разрешения на рециклирование. Этот анализ лучше всего выполнять на ранней стадии планирования обращения с отходами и материалами.

Некоторые решения относительно метода удаления отходов требуют предварительного согласования с регулирующим органом. В случае отходов, которые не имеют поддающейся обнаружению радиоактивности либо они содержат лишь практически номинальные уровни радиоактивности, допустимым может быть их удаление в качестве освобожденных от контроля отходов наряду с обычным мусором. Однако для использования этого метода удаления требуется разрешение как регулирующего органа, так и пункта по удалению/захоронению отходов, в который предполагается направлять отходы. Объемная характеристика отходов, как правило, проводится только на основе измерения гамма-излучателей. Для бета-излучателей могут требоваться специальные измерения или корреляция с легко обнаруживаемыми гамма-излучателями. Важным

условием является возможность подтверждения регулирующему органу соблюдения требующихся уровней точности приборов, используемых для проведения измерений с целью освобождения от регулирующего контроля, а также любых допустимых пределов погрешности в измерениях, которые могут привести к сомнительным результатам в определении пригодности к освобождению от контроля.

В случаях, когда прогнозируемые объемы отходов, образующихся в результате осуществления проекта, являются весьма незначительными, затраты и усилия, необходимые для подтверждения соблюдения регулирующих требований в отношении уровней освобождения от контроля, могут превышать затраты и усилия, требующиеся в случае удаления отходов в качестве очень низкоактивных или очень короткоживущих отходов. Это необходимо учитывать при принятии решений в отношении определения вариантов сортировки отходов и обращения с ними для целей осуществления данного проекта.

Необходимо заблаговременно рассматривать все категории материалов и отходов, которые могут образоваться, а также их индивидуальные характеристики [151]. Это — один из ключевых компонентов планирования на раннем этапе, которое необходимо для обеспечения планомерного, своевременного и эффективного с точки зрения затрат осуществления работ по выводу из эксплуатации.

Материалы и отходы должны надлежащим образом сортироваться в месте образования, чтобы избежать необходимости дальнейшего дублирования усилий по сортировке и обработке. МАГАТЭ выпустило ряд публикаций с описанием различных характеристик классов отходов, но особенно полезной является публикация [155], в которой МАГАТЭ ввело стандартную категоризацию для использования государствами-членами во избежание путаницы, возникающей в случаях, когда государства устанавливают собственные уровни активности отходов для определения категорий отходов.

Способ удаления/захоронения отходов во многих случаях предопределяет ограничения в отношении свойств отходов [155, 156]. Эти ограничения часто включают физическую форму отходов, уровень их активности, а также наличие и концентрацию других нерадиологических компонентов. Хранилище низкоактивных отходов в Соединенном Королевстве, расположенное недалеко от населенного пункта Дригт в Камбрии, предоставляет своим пользователям обширный перечень таких неприемлемых характеристик отходов, как влажные отходы, биологические материалы и отходы с коррозионными или взрывчатыми свойствами. Эти факторы необходимо учитывать в полном объеме до подачи заявки в регулирующий орган на получение лицензии на удаление потоков отходов, образующихся в результате проведения работ по выводу из эксплуатации.

Для измерения отходов и материалов необходимо иметь подходящее оборудование с прослеживаемой калибровкой. В некоторых случаях целесообразно использовать имеющиеся на объекте или в лаборатории контрольно-измерительные приборы, однако для более сложных проектов по выводу из эксплуатации может потребоваться закупка специального оборудования, например германиевых детекторов [24].

Если в конструкциях присутствует идентифицированная активность одного радионуклида (например, ^{60}Co), можно использовать прибор для измерения мощности дозы, подходящий для измерения этого радионуклида, а также формулу приравнивания результатов измерения к эквиваленту мощности дозы при условии согласования этого метода с регулирующим органом. Можно рассчитать эквивалентную мощность дозы для прибора, которая будет соотнесена с конечной точкой, установленной регулирующим органом для данного радионуклида в беккерелях на грамм, и позволит проводить сравнение с критериями приемлемости или освобождения отходов от контроля.

Расходы на приобретение германиевого детектора редко бывают оправданными при выводе из эксплуатации простого объекта, однако такие затраты будут целесообразными в случае вывода из эксплуатации более сложного объекта, например ускорителя частиц класса 2–4. В случае простой

установки, такой как ускоритель частиц класса 1 или 2, часто бывает достаточно детектора на основе иодида натрия. В таблице 17 представлен длинный, практически исчерпывающий перечень примеров неэффективной практики обращения с отходами [24].

ТАБЛИЦА 17. НЕДОСТАТКИ И ПОСЛЕДСТВИЯ, СВЯЗАННЫЕ С НЕЭФФЕКТИВНОЙ ПРАКТИКОЙ ОБРАЩЕНИЯ С ОТХОДАМИ [24]

Недостатки	Последствия
Отсутствие адекватной категоризации и разделения материалов и отходов.	При ретроспективном решении этого вопроса необходимы дополнительные ресурсы. Повышение облучения работников в связи с необходимостью осуществления дополнительных операций с отходами и увеличение расходов на удаление отходов.
Непринятие мер по выявлению и подаче заявок на получение дополнительных официальных разрешений или лицензий на обращение с отходами, образующимися при проведении работ по выводу из эксплуатации, и их удаление/захоронение.	Длительные задержки в осуществлении проекта, связанные с подачей соответствующих заявок. Дополнительные расходы в связи с получением разрешений. Может потребоваться привлечение внешнего консультанта, если новый способ удаления/захоронения отходов требует составления качественной документации, что, по мнению штатных сотрудников, выходит за рамки их квалификационных возможностей.
Непринятие достаточных мер по обеспечению хранения материалов и отходов, связанных с выводом из эксплуатации.	Задержки в осуществлении проекта и возможные проблемы с обеспечением безопасности и физической безопасности. Дополнительные потребности в ресурсах, которые могут превышать бюджет, предусмотренный для выполнения работ по выводу из эксплуатации. Возможные ошибки при сортировке упаковок отходов из-за нехватки места для разделения различных категорий отходов.
Непредотвращение образования проблемных отходов.	Утрата доверия со стороны регулирующего органа. Возможные проблемы с обеспечением безопасности и физической безопасности. Дополнительные потребности в ресурсах. Могут оставаться отходы, в отношении которых нет определенного способа удаления/захоронения, что приводит к задержкам в прекращении действия лицензии. Может потребоваться средне- и долгосрочное хранение радиоактивных отходов.
Отсутствие соответствующего оборудования и формул для выявления, измерения и количественной оценки отходов.	Недостаток средств в бюджете проекта, когда необходимо приобрести дополнительное оборудование или нанять внешнего утвержденного подрядчика для выполнения конкретных работ.
Несвоевременное обеспечение обработки отходов, образующихся при проведении работ по выводу из эксплуатации.	Задержки в обработке отходов (случайные или преднамеренные) могут привести к потере информации, ухудшению состояния хранилищ радиоактивных отходов и т.д. Поскольку стоимость удаления/захоронения отходов постоянно увеличивается, расходы на удаление/захоронение будут расти. Возможное изменение условий приема отходов для удаления/захоронения может привести к тому, что характеристики отходов будут не соответствовать новым условиям, а их обработка может оказаться более дорогостоящей. В будущем может сложиться ситуация, когда в наличии не будет соответствующих площадей для удаления/захоронения, и необходимо будет обеспечить долгосрочное хранение отходов.

ТАБЛИЦА 17. НЕДОСТАТКИ И ПОСЛЕДСТВИЯ, СВЯЗАННЫЕ С НЕЭФФЕКТИВНОЙ ПРАКТИКОЙ ОБРАЩЕНИЯ С ОТХОДАМИ [24] (продолжение)

Недостатки	Последствия
Недооценка объемов отходов из-за недостаточной характеристики.	Отсутствие бюджетных средств. Возможные проблемы, связанные с хранением.
Отсутствие согласования с регулирующим органом мер по обеспечению хранения отходов в процессе выполнения работ по выводу из эксплуатации.	Это может привести к задержкам в выполнении работ, поскольку регулирующий орган может потребовать удаления отходов по мере их образования, и, таким образом, к задержкам в осуществлении всего проекта.

8.2. КОНКРЕТНЫЕ ВОПРОСЫ ОБРАБОТКИ РАДИОАКТИВНЫХ ОТХОДОВ И ОБРАЩЕНИЯ С НИМИ В ПРОЕКТАХ ПО ВЫВОДУ ИЗ ЭКСПЛУАТАЦИИ

Активация оборудования и конструкций приводит к наличию остаточных мощностей амбиентной дозы внутри туннелей ускорителя и мишенных зон, и также это означает, что при демонтаже компонентов ускорителя в конце срока их службы с ними необходимо будет обращаться как с радиоактивными отходами. Таким образом, при выводе из эксплуатации всего ускорительного комплекса класса 3 или 4 могут образовываться большие количества активированного материала [157].

Большая часть радиоактивного материала, образующегося в ускорителях, состоит из твердых объемных конструкций (например, вакуумных камер, насосов, магнитов, других связанных с пучком элементов), в основном резервных металлических частей, характеризующихся очень низким риском внесения радиоактивного загрязнения. В течение срока эксплуатации, который может составлять десятилетия, ускорители и материал защитного экранирования активируются в результате воздействия первичных и вторичных частиц на оборудование и конструкции. Уровень наведенной радиоактивности существенно различаются у разных ускорителей и зависит от таких факторов, как тип или класс ускорителя, расположение материалов и конструкций с учетом потерь пучка, а также от эксплуатационных факторов. Вопросы, касающиеся характеристики отходов, рассматриваются в [158].

Ожидается, что большие объемы отходов могут образовываться в тех случаях, когда объекты являются очень старыми и не эксплуатировались надлежащим образом и когда не проводился предварительный анализ принятия мер с целью сведения к минимуму активации. Если пучки ускорителя правильно не отцентрированы, то в материале могут возникать очаги (горячие точки), в результате чего образуются значительные объемы радиоактивных отходов.

Объем отходов действительно может быть проблемой в случаях, когда оборудование и особенно само здание повторно не используются в аналогичных целях. Рециклирование в ядерной отрасли, безусловно, является разумной технологией удаления как минимум значительной части материалов.

Конкретная проблема, которая часто возникает во время вывода ускорителя из эксплуатации, заключается в том, что в течение длительного срока эксплуатации ускорителя спектр проводимых экспериментов изменяется, что требует изменения длительности пучка, тока пучка и материалов, применяемых в ускорителе; такие изменения часто не регистрируются в полной мере. Кроме того, поставщики строительных материалов со временем могут меняться, а также они могут переходить на использование материалов из других источников. В такой ситуации состав вещества не поддается отслеживанию, и трудно надежно определить изотопный состав. Эта проблема и другие вопросы обращения с отходами подробно рассматриваются в [159] в контексте вывода из эксплуатации ускорителя в Институте Пауля Шеррера, Швейцария. В конечном итоге

радиоактивные отходы могут быть освобождены от контроля, если дать выдержку в течение достаточного периода времени для распада нуклидов, который зависит от присутствующих радионуклидов и возможности хранить отходы до тех пор, пока не завершится распад, а также от их удаления в качестве отходов, имеющих неограниченное (полное) освобождение от регулирующего контроля. МАГАТЭ разработало нормы, которые можно использовать при проведении работ по очистке радиоактивно загрязненных материалов с целью их неограниченного использования [154].

Как правило, радиоактивные отходы, образующиеся в процессе вывода из эксплуатации ускорителя, могут удаляться в качестве отходов с низким или очень низким уровнем активности в соответствии с системой классификации отходов МАГАТЭ [155]. Вместе с тем, согласно [155], большая часть отходов, образующихся при выводе ускорителей из эксплуатации, может быть классифицирована в качестве очень короткоживущих отходов. В эту категорию входят отходы, которые после относительно краткосрочного хранения, необходимого для обеспечения распада радионуклидов, в течение периода продолжительностью до нескольких лет могут быть освобождены от регулирующего контроля в соответствии с процедурами, одобренными регулирующим органом для неконтролируемого удаления, использования или сброса таких отходов. К этому классу относятся отходы, содержащие в основном радионуклиды с очень коротким периодом полураспада, которые обычно используются для исследовательских и медицинских целей.

Если в государстве не приняты общие уровни освобождения от контроля, как это имеет место во Франции, обращение с радиоактивными отходами, образующимися в результате осуществления работ по выводу из эксплуатации ускорителя, может привести к высоким затратам на хранение или захоронение отходов. Для решения этой проблемы во Франции была принята концепция «зонирования», согласно которой отходы в принципе могут быть освобождены от регулирующего контроля с учетом их местонахождения в ускорителе и истории эксплуатации ускорителя. Основные примеры применения концепции «зонирования» в контексте проектов по демонтажу ускорителей приведены в [160, 161]. См. также раздел I–5.

Обращение с радиоактивными материалами на ускорительной установке высоких энергий — это непрерывный процесс. Например, отслужившие свой срок активированные вакуумные камеры или кабели направляются на хранение в качестве радиоактивных материалов в рамках рутинных операций, и более крупные части, такие как целые активированные магниты, обычно помещаются на хранение во время этапов длительного останова [157]. Как правило, материалы, для которых необходимо обеспечивать радиоактивный распад перед дальнейшим обращением с ним, оставляют на промежуточное хранение.

В случае радиоактивных отходов ситуация является более сложной, поскольку в отношении окончательного захоронения действует национальное законодательство, но регулирующие органы могут также требовать принятия мер по обработке материала, пока он остается на площадке ускорительной установки [157]. Предварительное кондиционирование радиоактивных отходов может быть сопряжено с большими расходами, поскольку оператор пункта удаления/захоронения отходов может потребовать использования специальных контейнеров, соответствующих требованиям приемки отходов в пункте захоронения.

В настоящее время эксплуатационные отходы ускорителей на большинстве объектов не кондиционируются для возможного окончательного захоронения в пунктах захоронения радиоактивных отходов, поскольку считается, что в конечном итоге эти отходы могут быть освобождены от контроля. Однако, если в государстве не применяется освобождение отходов от контроля, все эксплуатационные отходы считаются радиоактивными отходами. В этом случае крайне важно снизить активацию в месте нахождения источника (за счет минимизации потерь пучка и правильного подбора материалов для компонентов ускорителя), а также максимально ограничить образование и распространение радиоактивного загрязнения в процессе демонтажа.

Проблема может возникать в связи с отходами на ускорительных установках, на которых не была проведена адекватная характеристика, что привело к неполной идентификации радионуклидного состава. В частности, национальные хранилища могут утверждать, что

неизвестные радионуклиды, образовавшиеся в результате высокоэнергетических реакций скалывания, расширяют нормальный радионуклидный состав вследствие протекания классических реакций (n, γ) и (γ, n). Для количественной оценки образующихся радионуклидов в тех случаях, когда простая гамма-спектроскопия часто является недостаточной, применяются методы Монте-Карло и измерения [157].

Радиохимические методы идеально подходят для определения таких радионуклидов, как ^{55}Fe , ^{63}Ni или ^3H в твердых материалах. Количество этих громоздких и дорогостоящих оценок можно уменьшить, оценив (методами Монте-Карло или аналитическими методами) соотношение активности гамма-излучателя (обычно ^{60}Co или ^{22}Na) и этих трудно обнаруживаемых радионуклидов. Радиохимический анализ позволяет проводить валидацию и масштабирование до абсолютных значений этого соотношения. При применении этого метода к радиоактивным отходам наиболее важным требованием является обеспечение прослеживаемости [157].

Вследствие взаимодействия первичного пучка или вторичных частиц, образующихся во множестве ядерных процессов, невозможно избежать наведенной радиоактивности, и поэтому компоненты ускорителя должны рассматриваться как радиоактивные до тех пор, пока не будет подтверждена активность, при которой допускается освобождение от контроля. Характеризация часто может быть сопряжена с техническими проблемами, и неправильное определение характеристик или применение неправильной методологии может привести к неправильной классификации отходов. Очень важно иметь четко составленный план характеристики, согласованный с регулирующим органом, пунктом по удалению/захоронению отходов и оператором ускорителя.

Методы и планы характеристики обычно не подпадают под действие регулирующих требований и не подлежат одобрению регулирующими органами в связи с ускорителями, как это имеет место в случае ядерных установок, таких как атомные электростанции и установки ядерного топливного цикла. Рекомендуется изучить вопрос и иметь четкое представление о критериях приемлемости отходов и требованиях к упаковке отходов, действующих в пункте по удалению/захоронению отходов, с тем чтобы исключить отказ в принятии отходов и необходимость их повторной обработки.

В ходе эксплуатации ускорительных установок, как правило, не образуется большое количество отходов. Это, однако, зависит от типа ускорительной установки и спектра выполняемых работ. На ускорительных установках, связанных с производством изотопов, может образовываться более значительный объем эксплуатационных отходов, обращение с которыми необходимо будет обеспечивать. Отходы, образующиеся в результате вывода ускорителя из эксплуатации, отличаются от эксплуатационных отходов и требуют детальной оценки категорий отходов, которые, как ожидается, будут накоплены в ходе проведения работ по выводу из эксплуатации. Такие оценки будут включать характеристику отходов, а также оценку критериев приемлемости отходов, применяемых пунктом по удалению/захоронению отходов. Критерии приемлемости отходов, действующие в пункте по удалению/захоронению, как правило, содержат требования, предъявляемые к упаковкам отходов, или определяют процессы утверждения нестандартных упаковок отходов или являющихся отходами предметов. При разработке плана обращения с отходами, предусматривающего обращение с отходами, которые образуются в результате вывода ускорителей из эксплуатации, требуется тесное взаимодействие с регулирующим органом и оператором пункта по удалению/захоронению отходов.

Другим примером является лаборатория на базе ускорителя Ван-де-Граафа в Студсвике, Швеция. Эта лаборатория использовалась для экспериментов по нейтронной физике в период с 1962 по 1989 год. Лаборатория никогда не классифицировалась как ядерный объект, но впоследствии выяснилось, что она сильно загрязнена тритием.

Для идентификации загрязненного материала и поверхностей была проведена комплексная характеристика. После проведения тщательной дезактивации здание было освобождено от регулирующего контроля, и в 1999 году оно было снесено. Три бочки и один стальной ящик с отходами, загрязненными тритием, находятся в хранилище радиоактивных отходов [162].

Другие неожиданные проблемы, связанные с радиоактивным загрязнением, подобные указанной выше, вероятно, будут и далее появляться в будущем с образованием не учтенных в прошлом радиоактивных отходов.

Пример характеристики материалов ускорителя в связи с проведением вывода из эксплуатации приведен в [150]. Измерения и другие процедуры, предназначенные для разделения отходов ускорителей на различные категории для целей хранения и удаления/захоронения, описаны на практическом примере центра Deutsches Elektronen-Synchrotron (DESY) в Германии в [163].

9. ОХРАНА ЗДОРОВЬЯ И БЕЗОПАСНОСТЬ

9.1. НОРМЫ БЕЗОПАСНОСТИ МАГАТЭ

Обеспечение радиационной и «обычной» безопасности является такой же неотъемлемой частью работ по выводу из эксплуатации, как и рутинной эксплуатации. По этому вопросу имеется ряд соответствующих публикаций (например, ссылки [52–55] в [24]). Требования в отношении безопасности, касающиеся системы менеджмента установок и деятельности, подробно изложены в публикации Серии норм безопасности МАГАТЭ, № GSR Part 2, «Лидерство и менеджмент для обеспечения безопасности» [164]. Требования безопасности, конкретно относящиеся к выводу из эксплуатации, изложены в публикации GSR Part 6 [85]. Руководящие материалы МАГАТЭ по оценке безопасности при осуществлении вывода из эксплуатации, включая описание опасностей и сценариев аварий, содержатся в [165]; в [166] подробно описан дифференцированный подход к оценке безопасности.

Во время вывода из эксплуатации необходимо обеспечивать надлежащую защиту работников, населения и окружающей среды от радиологических и нерадиологических опасностей. При выводе из эксплуатации необходимо применять соответствующие пределы доз облучения работников и населения [85]. Необходимо соблюдать национальные регулирующие положения об охране окружающей среды и требования об охране окружающей среды, содержащиеся в действующих основных нормах безопасности Европейского союза, при проведении работ по выводу из эксплуатации и в последующий период в случае, если объект освобождается от регулирующего контроля с ограничениями в отношении его будущего использования [85]. Также необходимо продемонстрировать соблюдение ограничений по сбросам в окружающую среду, указанным в лицензии, выданной регулирующим органом. Необходима комплексная программа радиационной защиты для обеспечения оптимизированной радиационной защиты работников и населения во время проведения работ по выводу из эксплуатации. При оптимизации необходимо учитывать специфику проекта по выводу из эксплуатации. Радиационная защита людей, подвергающихся облучению в результате проведения работ по выводу из эксплуатации, должна оптимизироваться с надлежащим учетом соответствующих граничных доз [85].

Принципы и цели радиационной защиты, применяемые во время эксплуатации и при выводе из эксплуатации в основном одинаковы, однако методы и процедуры реализации этих принципов могут различаться. В процессе вывода из эксплуатации могут возникать различные рабочие сценарии, которые могут потребовать использования специализированного оборудования и выполнения определенных нестандартных процедур.

Во время проведения работ по выводу из эксплуатации необходимо применять адекватные средства контроля посредством реализации комплексной интегрированной системы менеджмента. Интегрированная система менеджмента обеспечит единую основу для проведения работ по выводу из эксплуатации, включая процедуры обеспечения безопасности для защиты работников от потенциального облучения в результате инцидентов или аварий во время выполнения работ по выводу из эксплуатации или для уменьшения последствий этого облучения. В других публикациях

МАГАТЭ даны рекомендации для таких ситуаций [86, 165, 166]. Лицензиат несет ответственность за все аспекты безопасности, радиационной защиты и охраны окружающей среды во время проведения работ по выводу из эксплуатации [85].

Эксплуатирующая организация объекта, который выводится из эксплуатации, должна надлежащим образом управлять соответствующими работами и контролировать их таким образом, чтобы обеспечивать уменьшение любого воздействия на окружающую среду площадки и прилегающей территории. Следует обеспечивать, чтобы эти требования соблюдались во время проведения работ по выводу из эксплуатации и в последующий период в случае, если объект освобождается от регулирующего контроля с ограничениями в отношении его будущего использования. Регулирующий орган должен получить подтверждение выполнения условий конечного состояния в рамках проекта по выводу из эксплуатации, прежде чем площадка или ускорительная установка может быть освобождена от контроля без ограничений [24].

Выполняемые работы по выводу из эксплуатации могут создавать новые опасности. Поэтому важной целью в планировании вывода из эксплуатации является обеспечение полной готовности и способности оценивать и осуществлять управление любыми новыми последствиями для безопасности, которые могут возникнуть в ходе проведения работ по выводу из эксплуатации. Для определения защитных мер необходимо проводить оценку безопасности, используя оптимизационный подход к обеспечению радиологической защиты с должным учетом требований радиологической безопасности [85]. Существует множество функций безопасности и связанных с ними КСЭ (например, вентиляция, электробезопасность, дренаж), которые необходимо учитывать в целях обеспечения безопасной эксплуатации ускорительных установок в течение нормального срока эксплуатации. Многие из этих КСЭ отсоединяются при переходе к этапу вывода ускорителя из эксплуатации; вместе с тем необходимость в некоторых КСЭ будет сохраняться и потеря работоспособности определенных КСЭ может обусловить необходимость реализации новых функций безопасности по мере выполнения работ по выводу из эксплуатации.

Переход от эксплуатации к выводу из эксплуатации будет облегчен, если в течение жизненного цикла объекта выполнялись все необходимые работы по планированию и подготовке; в особенности это касается тщательной регистрации модификаций ускорителя или изменений в его использовании. Такие меры позволят снизить вероятность негативного воздействия на здоровье человека и окружающую среду, которое может возникнуть в ходе осуществления активных и пассивных процессов во время выполнения работ по выводу из эксплуатации (см. раздел 5). Тщательное планирование и осуществление вывода из эксплуатации ускорительных установок и обращение с образующимися радиоактивными материалами позволяет исключить чрезмерный риск для работников, населения и окружающей среды или радиологическое воздействие на них [24].

Лицензиат и регулирующий орган должны содействовать культуре безопасности и поддерживать ее в целях поощрения критического и конструктивного отношения к безопасности и исключения самоуспокоенности [85]. Лицензиат должен обеспечивать наличие должным образом подготовленного, квалифицированного и компетентного персонала для проекта по выводу из эксплуатации [85]. Необходимо обеспечить своевременную и соответствующую подготовку по вопросам охраны здоровья, безопасности и окружающей среды для лиц, участвующих в работах по выводу из эксплуатации, причем в надлежащие сроки должна проводиться соответствующая переподготовка. Необходимо вести учет профессиональной подготовки.

Во время выполнения работ по выводу из эксплуатации необходимо осуществлять тщательный контроль и управлять образованием радиоактивных и нерадиоактивных сбросов аналогично тому, как это в рутинном порядке осуществляется во время эксплуатации. В некоторых случаях это может включать период хранения на площадке в соответствии с процедурами хранения радиоактивных отходов и лицензией на площадку. Сбросы в окружающую среду должны контролироваться согласно соответствующим национальным регулирующим положениям и условиям лицензии, выданной регулирующим органом. Как правило, лицензии на сброс ограничиваются сроком эксплуатации установки. Перед началом работ по выводу объекта из

эксплуатации нередко необходимо получать специальные лицензии на вывод из эксплуатации, поскольку сбросы, связанные с выводом из эксплуатации, могут отличаться от сбросов, которые имеют место во время эксплуатации объекта [24]. Кроме того, в период проведения работ по выводу из эксплуатации может значительно увеличиваться объем отходов, что может стать проблемой при наличии ограниченного количества хранилищ. В таких условиях необходимо в полной мере учитывать и включать в план обращения с отходами, составляемый при окончательном выводе из эксплуатации, меры по обращению с возросшими объемами отходов, предусматривающие, в частности, обеспечение достаточного физического пространства для сортировки отходов и проведения измерений на месте их образования.

Руководящие материалы по обращению с отходами и регулирующему контролю радиоактивных сбросов в окружающую среду содержатся в публикациях Серии докладов по безопасности и Серии норм безопасности МАГАТЭ (например, [165, 167]). Вопросы обращения с радиоактивными отходами более подробно рассматриваются в разделе 8. Руководство по радиологическим критериям освобождения от регулирующего контроля материалов, оборудования и площадок содержится в публикации Серии норм безопасности МАГАТЭ, № RS-G-1.7, «Применение концепций исключения, изъятия и освобождения от контроля» [154] и публикации Серии норм безопасности МАГАТЭ, № WS-G-5.1, «Освобождение площадок от регулирующего контроля после завершения практической деятельности» [168].

Руководящие материалы по перевозке радиоактивных материалов изложены в публикации Серии норм безопасности МАГАТЭ, № SSR-6, «Правила безопасной перевозки радиоактивных материалов», издание 2012 года [169].

9.2. ДИФФЕРЕНЦИРОВАННЫЙ ПОДХОД К ОБЕСПЕЧЕНИЮ БЕЗОПАСНОСТИ ПРИ ВЫПОЛНЕНИИ РАБОТ ПО ВЫВОДУ ИЗ ЭКСПЛУАТАЦИИ

Спектр работ по выводу из эксплуатации медицинских, промышленных и исследовательских объектов широк, и поэтому сфера охвата, степень и уровень детализации планирования, оценка и подтверждение безопасности, а также подготовка, пересмотр и обновление документации, связанной с безопасностью, должны быть соразмерны и соответствовать типу и масштабам опасностей и их потенциальным последствиям для работников, населения и окружающей среды [24]. Требование 2 публикации GSR Part 6 [85] гласит: **«Дифференцированный подход должен применяться во всех аспектах вывода из эксплуатации для определения сферы охвата и степени детализации в отношении любой конкретной установки с учетом масштабов возможных радиационных рисков, которые могут возникнуть в связи с выводом из эксплуатации»**. Этот дифференцированный подход может надлежащим образом применяться к ускорительным установкам в соответствии с их сложностью и будет влиять на все аспекты планирования, проведения и завершения работ по выводу из эксплуатации вплоть до освобождения площадки от контроля и выдачи разрешения на неограниченное или ограниченное использование.

Мероприятия по выводу из эксплуатации и регулирующий надзор за их проведением должны быть соразмерны и соответствовать опасностям и рискам, связанным с ускорительной установкой [85]. Дифференцированный подход [166] — это процесс, с помощью которого можно обеспечить, чтобы уровень анализа, документация и меры, необходимые для выполнения требований безопасности, были соразмерны и учитывали приведенные ниже факторы. Дифференцированный подход необходимо применять так, чтобы не ставилась под угрозу безопасность и обеспечивалось соблюдение всех соответствующих требований и критериев безопасности. При применении дифференцированного подхода в контексте вывода из эксплуатации ускорителей частиц должны учитываться следующие факторы [24]:

- а) класс ускорителя и тип ускоряемых частиц (включая сложность ускорителя, эксплуатационное использование и прошлые аварии или инциденты);

- b) физическое состояние объекта, в частности целостность КСЭ, и в особенности степень, в которой старение или прекращение эксплуатации могут поставить под угрозу строительные конструкции или КСЭ, например, в результате длительного периода неудовлетворительного обслуживания;
- c) радиологическое (параметры источника), биологическое и химическое учитываемое содержание и опасности, связанные с выводом объекта из эксплуатации;
- d) этап жизненного цикла объекта (проектирование, строительство, ввод в эксплуатацию, эксплуатация, останов или вывод из эксплуатации), в частности подготовка первоначального плана вывода из эксплуатации на стадии проектирования или подготовка окончательного плана вывода из эксплуатации перед запланированным остановом;
- e) сфера охвата оценки (включая, например, модернизацию ускорителя, полную замену ускорителя с повторным использованием имеющегося здания, вывод из эксплуатации части объекта без запланированной замены или полного вывода из эксплуатации). Важно учитывать, в какой степени предлагаемые работы по выводу из эксплуатации могут негативно повлиять на текущие операции, имеющие значимость для безопасности в других местах на объекте или на расположенных поблизости объектах;
- f) неопределенность информации (например, в отношении качества и степени характеристики установки), а также надежность и доступность соответствующей вспомогательной информации (например, чертежей и документации, касающихся модификаций или прошлых аварий и инцидентов) для использования в качестве входных данных для оценки безопасности в рамках реализации интегрированной системы менеджмента;
- g) сложность задач, связанных с выводом из эксплуатации;
- h) финальное конечное состояние процесса вывода объекта из эксплуатации (например, неограниченное или ограниченное использование).

Всем лицам, выполняющим работы по выводу из эксплуатации, должно быть вменено в обязанность информировать руководство о любой обеспокоенности в отношении безопасности. Это особенно важно в тех случаях, когда письменные процедуры для нового вида работ по выводу из эксплуатации воспринимаются как слишком сложные, и работники считают, что они недостаточно подготовлены для того, чтобы выполнять эти процедуры, или обеспокоены другими аспектами своей безопасности. Лицензиат должен содействовать культуре безопасности, которая поощряет критическое и конструктивное отношение к безопасности [85], чтобы работники были уверены в том, что они могут поднимать такие вопросы в рамках действующей системы линейного менеджмента.

9.3. ПОСЛЕДСТВИЯ ПРИМЕНЕНИЯ ДИФФЕРЕНЦИРОВАННОГО ПОДХОДА

Применение дифференцированного подхода должно способствовать эффективному использованию ресурсов и содействовать оптимизации усилий. В контексте вывода из эксплуатации ускорителя дифференцированный подход представляет собой процесс, с помощью которого обеспечивается, чтобы тип информации и уровень детализации в планах вывода из эксплуатации и вспомогательной документации, включая оценки безопасности и меры, необходимые для обеспечения соблюдения требований безопасности, были соизмеримы и соответствовали классу ускорителя, подлежащего выводу из эксплуатации.

Успешное осуществление вывода из эксплуатации зависит от адекватного и правильно организованного планирования и системного выполнения работ по выводу из эксплуатации в соответствии с условиями лицензии. Документация (например, сфера охвата плана вывода из эксплуатации, его содержание и требуемая степень детализации, включая оценку безопасности) может варьироваться в зависимости от сложности и потенциальной опасности ускорительной

установки, а также от мер, которые должны приниматься в целях соблюдения национальных регулирующих положений. Дифференцированный подход распространяется на весь процесс вывода из эксплуатации и, в частности, охватывает следующие вопросы:

- a) определение КСЭ и требований к контролю;
- b) контроль работ по выводу из эксплуатации;
- c) процесс получения официального разрешения;
- d) надлежащий анализ работ после их завершения;
- e) управление проектом (включая, например, организационную структуру). При управлении проектом по выводу из эксплуатации следует учитывать сложность и масштабы проекта, а также связанные с ним потенциальные опасности [164]. Конкретная информация, касающаяся организации работ по выводу объектов из эксплуатации, изложена в разделе 5;
- f) укомплектование штатов и профессиональная подготовка;
- g) надзор (т.е. наблюдение, инспекции, контроль).

9.4. РАДИАЦИОННАЯ ЗАЩИТА

Принципы радиационной защиты и безопасности практической деятельности изложены в публикациях Серии норм безопасности МАГАТЭ; они основываются на системе радиационной защиты, установленной Международной комиссией по радиологической защите [167]. План радиационной защиты должен быть включен в общий план вывода из эксплуатации и основываться на национальных требованиях по радиологической защите.

Во время проведения работ по выводу из эксплуатации центром внимания в обеспечении радиационной защиты является защита работников от нормального и потенциального профессионального облучения. Система управления безопасностью должна также предусматривать меры по защите работников, участвующих в осуществлении реагирования в случае возникновения аварийной ситуации. Должны быть разработаны и применяться соразмерные опасностям меры по аварийному реагированию при выполнении работ по выводу из эксплуатации, и о значимых для безопасности событиях необходимо своевременно сообщать регулирующему органу [85]. Лицензиат должен обеспечивать подготовку и выполнение надлежащих процедур обеспечения безопасности, включая планы противоаварийных мероприятий [85]. Радиационная защита работников и населения, подвергающихся облучению при проведении работ по выводу из эксплуатации, должна оптимизироваться с должным учетом соответствующих граничных доз [85].

Эксплуатирующая организация может создать орган по обеспечению радиационной защиты, который будет независимо функционировать и заниматься вопросами, касающимися здоровья и обеспечения радиационной безопасности работников и населения. Это потребует разработки и применения надлежащих процедур и при необходимости обеспечения дополнительной профессиональной подготовки. Эти процедуры, предназначенные для применения во время вывода из эксплуатации, могут быть такими же или незначительно отличаться от процедур, которые используются во время эксплуатации и технического обслуживания объекта; вместе с тем это не означает, что конкретная ситуация не должна тщательно изучаться и что при необходимости не должны разрабатываться дополнительные процедуры обеспечения безопасности. Особое внимание необходимо уделять снижению опасностей в ситуациях, когда:

- a) выполняются работы по выводу из эксплуатации, при которых работники оказываются в непосредственной близости от источников излучения (вследствие удаления защитного экранирования или снятия блокировок для получения доступа к выводимому из эксплуатации ускорителю) и, следовательно, повышается вероятность облучения;

- b) во время демонтажа осуществляются новые виды работ, которые могут приводить к повышению вероятности образования радионуклидов в виде аэрозолей (например, это может быть резка, распиловка). Удаляемое радиоактивное загрязнение может распространяться (например, из загрязненного масла вакуумной системы);
- c) внедряется применение новых методов и письменных процедур, требующих особого контроля и соответствующей профессиональной подготовки персонала;
- d) проводится перепланировка и зонирование территорий с соответствующим размещением предупреждений. Следует проявлять осторожность в случаях, когда перенацеливание излучения перекрывает путь аварийной эвакуации [24].

При планировании вывода из эксплуатации необходимо предусматривать:

- 1) обеспечение оптимизации радиационной защиты работников и населения;
- 2) наличие необходимого количества квалифицированных сотрудников службы радиационной защиты для оказания помощи в обеспечении безопасного выполнения работ по выводу из эксплуатации;
- 3) обеспечение наличия у персонала, выполняющего работы по выводу из эксплуатации, соответствующих навыков, квалификации и профессиональной подготовки в области применения методов и требований радиационной защиты;
- 4) использование средств защиты для обеспечения защиты от внутреннего или внешнего облучения и доз (например, это могут быть свинцовые экраны, шатровые конструкции, локальные системы вентиляции и фильтрации);
- 5) применение надлежащих методов ведения административно-хозяйственной деятельности в целях снижения доз и предотвращения распространения радиоактивного загрязнения;
- 6) демонтаж элементов высокоактивированного оборудования, к которым ранее не было доступа (например, ловушек пучка), с помощью дистанционного управления и применение других методов для сведения к минимуму внешнего облучения персонала;
- 7) зонирование производственной деятельности в зависимости от уровней излучения и радиоактивного загрязнения, а также соответствующее изменение зонирования по мере проведения работ по выводу из эксплуатации с учетом связанных с этим радиологических опасностей;
- 8) документальное оформление всех мер радиационной защиты и результатов обследований.

Эксплуатирующая организация должна провести пересмотр классификации радиационных зон, которая применялась во время эксплуатации, и определить их актуальность для целей проведения работ по выводу из эксплуатации с учетом величины ожидаемого нормального облучения, вероятности и величины потенциального облучения, а также характера и степени требуемой защиты и процедур обеспечения безопасности в ходе осуществления работ по выводу из эксплуатации.

Эксплуатирующая организация может учитывать конечное состояние объекта и связанной с ней площадки. Необходимо уделять внимание обеспечению защиты работников и лиц из населения не только в процессе вывода из эксплуатации, но и при выполнении любых последующих работ и использовании выведенного из эксплуатации объекта. Более подробно вопросы радиационной защиты рассматриваются в публикациях Серии норм безопасности МАГАТЭ. Описание (незначительных) радиологических инцидентов, имевших место во время демонтажа ускорителя, приводится в [170].

9.5. ОХРАНА ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

Лицензиат должен выполнять возложенные на него обязанности по обеспечению надлежащей охраны окружающей среды. Наилучшим образом это достигается с помощью комплексной интегрированной системы менеджмента, облегчающей эффективное управление операциями по выводу из эксплуатации и позволяющей определить меры контроля с целью смягчения любого воздействия на окружающую среду как на площадке объекта, так и на прилегающей территории. Охрана окружающей среды должна обеспечиваться в течение всего процесса вывода из эксплуатации, а также после того, как объект будет освобожден от контроля с ограничениями в отношении его будущего использования [85]. В рамках подготовки окончательного плана вывода из эксплуатации при необходимости проводится актуализация ОВОС с должным применением дифференцированного подхода [24]. Как правило, в случае ускорителей класса 1 ОВОС не требуется, однако в окончательный план вывода из эксплуатации целесообразно включать краткую справку, указывающую на то, что воздействие на окружающую среду было учтено.

При сборе информации для подготовки ОВОС необходимо тщательно изучить отчеты о мониторинге окружающей среды, который проводился в период эксплуатации ускорителя, наряду с данными характеристики площадки ускорителя и прилегающих территорий перед началом работ по выводу из эксплуатации. Кроме того, также необходимо проанализировать любые записи о модификациях установки или прошлых авариях или инцидентах. Имевшие место в прошлом выбросы активированного воздуха и воды, а также активация почвы и грунтовых вод нейтронами и другими вторичными частицами также могут оказывать воздействие на окружающую среду, выходящее, возможно, за границы площадки ускорителя. В ускорителях электронов уровни радиоактивности обычно низкие, и в некоторых случаях они очень трудно поддаются измерению; вместе с тем для составления отчета о воздействии (или аналогичного документа) необходимы надежные методы прогнозирования, как это требуется в большинстве национальных регулирующих положений [55].

Мониторинг окружающей среды необходимо проводить на протяжении всего периода проведения работ по выводу из эксплуатации. Все потенциальные выбросы радиоактивных и опасных материалов необходимо предотвращать или контролировать на месте их образования, а также удерживать их в разрешенных пределах, установленных регулирующим органом [85]. В случаях, когда выбросы ожидаются и санкционированы, необходимо осуществлять мониторинг и регистрировать данные, касающиеся выбросов в определенных точках. Для подтверждения адекватности контроля за выбросами радиоактивных и опасных материалов в окружающую среду может проводиться мониторинг за пределами площадки [24].

9.6. РАДИОЛОГИЧЕСКИЕ И НЕРАДИОЛОГИЧЕСКИЕ ОПАСНОСТИ

Комплексная оценка безопасности учитывает рутинные операции, и нерационально считать, что эта оценка эксплуатационной безопасности будет достаточной, чтобы охватывать все ситуации, которые могут возникнуть при проведении работ по выводу из эксплуатации. Работы, осуществляемые в ходе реализации плана вывода из эксплуатации, могут привести к возникновению ряда ранее непредвиденных опасностей для работающих операторов, для населения или даже для посетителей, находящихся на площадке объекта. Эти опасности могут быть прямым следствием физического состояния здания, особенно когда проводится снос конструкций, или они могут возникать в результате демонтажа детали ускорителя в процессе выполнения работ по выводу из эксплуатации. Дополнительные опасности могут возникать в связи с применяемыми технологиями или изменением условий окружающей среды; например, резка бетона или крупных конструкций ускорителя может приводить к радиоактивному загрязнению воздуха. Перед началом работы

необходимо проводить всестороннюю оценку опасностей. Очевидно, что оценка опасностей будет более полной, если операторы и внешние подрядчики, участвующие в осуществлении проекта, привлекаются к проведению оценки.

Во время демонтажа ускорителей могут возникать по отдельности и в сочетании друг с другом различные опасности, имеющие отношение к обеспечению радиологической или обычной безопасности; к ним относятся:

- a) опасности радиационного облучения;
- b) опасности радиоактивного загрязнения рабочего места;
- c) опасности радиоактивного загрязнения окружающей среды;
- d) обычные опасности (биологические, физические или химические).

В целях обеспечения безопасности труда необходимо применять комплексный подход к управлению опасностями. Это особенно актуально при выводе из эксплуатации ускорителей класса 1, когда опасность радиационного облучения может быть менее значимой по сравнению с такими обычными опасностями, как опасности, связанные с подъемом или падением.

Радиологические опасности могут возникать по ряду причин; к ним относятся:

- 1) пробел в учете радиоактивности (например, хранятся ранее демонтированные с ускорителя фольги);
- 2) утечка охлаждающей жидкости или утрата защитного экранирования;
- 3) утечки жидкости или распространение радиоактивного загрязнения, которые произошли во время эксплуатации ускорителя и которые своевременно не были должным образом устранены;
- 4) наличие активированных жидкостей в системах трубопроводов;
- 5) наличие активированных жидкостей в скрытых трубопроводах, целостность которых могла быть нарушена;
- 6) попадание в резервуары активированной охлаждающей жидкости;
- 7) накопление радиоактивной пыли в системах вентиляции и фильтрации;
- 8) скопление значительного количества радиоактивных материалов во время демонтажа и сноса, как правило, в виде активированных деталей и конструкций;
- 9) радиоактивное загрязнение чистых зон в результате нарушения герметизации (например, из-за недостаточно надежного разделения на месте чистых и загрязненных деталей ускорителя и строительных материалов при выполнении работ по выводу из эксплуатации);
- 10) повторное радиоактивное загрязнение дезактивированных зон, которое произошло из-за неадекватного контроля за передвижением персонала и обращением с материалами.

Не все опасности, связанные с выводом из эксплуатации, являются радиологическими. Могут возникать строительные опасности, технические опасности, химические опасности, биологические опасности, термические опасности, опасности, связанные с недостаточной защитой органов слуха и зрения, а также повышенная опасность поскользнуться, споткнуться или упасть. Поэтому план по охране здоровья и обеспечению безопасности и оценки рисков, а также планы чрезвычайных мер должны быть адекватными и учитывать все соответствующие обстоятельства.

Если объект характеризуется наличием как радиологических, так и нерадиологических опасностей, как это имеет место на ускорительных установках, государства-члены могут устанавливать требование, согласно которому оценка каждого вида опасностей должна проводиться отдельно. В некоторых государствах-членах требуется, чтобы проводилась общая оценка опасностей. Руководитель проекта должен определить, какой вариант подходит для данного проекта по выводу из эксплуатации. Регулирование каждого из указанных выше вариантов оценки может осуществляться разными регулирующими органами, поэтому необходимо заранее консультироваться с каждым из них, с тем чтобы определить их предпочтительный метод

расчета и сочетания опасностей. Если государство-член не имеет четких норм в этом отношении, то регулирующий орган может применять определенные ограничения, и важно иметь ясное представление о том, как соблюдать эти ограничения.

Опасности радиоактивного загрязнения окружающей среды и активации конструкций, как правило, не являются проблемой в случае ускорителей класса 1, и их необходимо оценивать на индивидуальной основе [24]. При оценке воздействия на окружающую среду важную роль играет определение границ пострадавшего участка, которые могут проходить в непосредственной близости от объекта.

После идентификации всех опасностей необходимо составить комплексную документацию по оценке безопасности для данного проекта, а также разработать вспомогательные планы чрезвычайных мер и закупить соответствующую защитную одежду и средства защиты; это должно быть подкреплено проведением надлежащей профессиональной подготовки персонала и отработкой планов действий в чрезвычайных ситуациях. Подготовка необходимого соответствующего плана по обеспечению радиологической и обычной безопасности и информирование о нем является важной частью любого проекта по выводу из эксплуатации. Работники должны получить подготовку по вопросам, касающимся потенциальных опасностей, с которыми они могут столкнуться, по процедурам, установленным для защиты от этих опасностей, по возложенным на них функциям и обязанностям по выполнению этих процедур, а также по механизмам, позволяющим работникам информировать своего руководителя о возможных проблемах в области охраны здоровья и обеспечения безопасности. Оценка опасностей проводится с расчетом на их возможное устранение. Если устранение опасностей невозможно, необходимо установить административные меры контроля с целью сведения к минимуму их воздействия.

Общие меры защиты работников от опасностей включают:

- надлежащее использование инженерно-технических средств контроля (например, защитного экранирования, систем вентиляции);
- детальное планирование работы по снижению уровней и времени облучения (в соответствии с анализом ALARA или дозовым бюджетированием);
- обучение персонала рабочим процедурам и инструктаж по конкретным опасностям;
- проведение обследований и отбор проб применительно к отдельным лицам и определенным рабочим зонам;
- соблюдение всех надлежащих стандартов в области охраны здоровья и обеспечения безопасности и соответствующих письменных процедур;
- надлежащее использование СИЗ с обеспечением должных процедур очистки, хранения и проверки СИЗ многократного применения;
- применение методов, направленных на сведение к минимуму уровней воздействия на рабочем месте (например, организация хранения отходов в изолированных зонах и их частый вывоз);
- предотвращение радиоактивного заражения путем применения соответствующих указателей, зонирования и контроля за входом и выходом.

При наличии различных вариантов выполнения конкретной части плана вывода из эксплуатации необходимо оценить преимущества каждого метода (оценка с применением принципа ALARA) и выбрать наиболее подходящий метод для применения. Окончательный выбор метода может не обеспечивать наименьшее радиационное воздействие. При попытке снизить радиационное облучение могут непропорционально возрастать другие опасности; в связи с этим оптимизированный подход может обуславливать необходимость незначительного увеличения радиационного облучения. В дополнение к нерадиологическим опасностям, существующим во время эксплуатации объекта, работы по выводу из эксплуатации, по-видимому, будут создавать новые нерадиологические опасности при выполнении таких операций, как резка, бурение и распиловка, и эти опасности также необходимо учитывать. Для завершения комплексного характеристического обследования может потребоваться исследование участков,

к которым операторы обычно не имеют доступа. Это может включать бурение и отбор кернов конструкционного материала для определения глубины проникновения продуктов активации. Дезактивация может включать использование химикатов или оборудования, которые никогда не использовались на объекте. Снос может быть связан с целым рядом физических опасностей, среди которых не последнее место занимает риск поскользнуться, споткнуться и упасть. Работа в замкнутом пространстве, на высоте или в подземных условиях, т.е. в местах, к которым не предусматривался доступ персонала, может привести к возникновению ряда возможных сценариев аварийных случаев, которые необходимо надлежащим образом учесть [23]. Важными являются такие вопросы, как подсоединение коммуникаций к новым рабочим зонам; возведение платформ, строительных лесов или других опорных конструкций; обеспечение надлежащего освещения (повышение уровня освещенности по сравнению с существующим или оборудование новой системы освещения, если таковая отсутствует); обеспечение простого коммуникационного оборудования, такого как двусторонняя радиосвязь; снабжение воздухом для дыхания в ограниченном пространстве с обеспечением нагрева/охлаждения.

Некоторые примеры неэффективного управления радиологической и обычной безопасностью и возможные последствия этого, необязательно связанные исключительно с ускорителями частиц, приведены в таблице 18 [24].

ТАБЛИЦА 18. НЕДОСТАТКИ И ПОСЛЕДСТВИЯ, СВЯЗАННЫЕ С НЕЭФФЕКТИВНЫМ ОБЕСПЕЧЕНИЕМ ОХРАНЫ ЗДОРОВЬЯ И БЕЗОПАСНОСТИ [24]

Недостатки	Последствия
Вопросы охраны здоровья и обеспечения безопасности надлежащим образом не отражены в плане вывода из эксплуатации.	Охрана здоровья и обеспечение безопасности могут быть поставлены под угрозу, что может привести к событиям или уровням радиационного облучения, при которых не будет соблюдаться принцип ALARA.
Непроведение пересмотра оценок безопасности в процессе осуществления проекта, в особенности после внесения согласованных изменений в рабочие процедуры и т.п.	Оценки безопасности могут оказаться неполными, что может привести к возможным сценариям аварий или инцидентов, которые ранее не рассматривались.
Отсутствие комплексной оценки безопасности, охватывающей как радиологическую, так и нерадиологическую безопасность.	Актуальное значение обеспечения безопасности должным образом не учитывается, в результате чего вопросы обеспечения безопасности надлежащим образом не оцениваются и не решаются. Создание излишнего риска для работников.
Отсутствие координации в вопросах охраны здоровья и обеспечения безопасности для всех работников, особенно в случаях, когда в осуществлении проекта участвуют как внешние подрядчики, так и штатные работники.	Неправильное понимание функций и обязанностей по охране здоровья и обеспечению безопасности, приводящее к неприемлемым рискам или неадекватному контролю, при которых не соблюдается принцип ALARA. Могут вводиться дополнительные требования по радиационной защите, например, радиационные паспорта для подрядчиков, работающих в зонах, контролируемых оператором.
Неинформирование должным образом о внесении изменений в пересмотренные оценки рисков или процедуры по охране здоровья и обеспечению безопасности в процессе осуществления проекта.	Работники могут оставаться не информированными о связанных с безопасностью дополнительных рисках при проведении соответствующих работ, что может приводить к негативным событиям. Возможная утрата доверия со стороны регулирующего органа или применение регулирующим органом санкций.

ТАБЛИЦА 18. НЕДОСТАТКИ И ПОСЛЕДСТВИЯ, СВЯЗАННЫЕ С НЕЭФФЕКТИВНЫМ ОБЕСПЕЧЕНИЕМ ОХРАНЫ ЗДОРОВЬЯ И БЕЗОПАСНОСТИ [24] (продолжение)

Недостатки	Последствия
Ненадлежащее определение и установление требований в отношении применения средств защиты и соответствующей подготовки персонала для каждого этапа проекта по выводу из эксплуатации.	Неправильное проведение проверки и использование защитной одежды. Неправильное использование средств защиты вследствие отсутствия соответствующей подготовки.
Неудовлетворительное выявление наличия химических, биологических или связанных с асбестом опасностей.	Несоответствующий управленческий контроль, ведущий к неадекватному менеджменту в области охраны здоровья и обеспечения безопасности.
Несоблюдение рекомендованных сроков проведения проверок и тестирования средств защиты.	Средства защиты могут стать небезопасными для использования, в результате чего сотрудники будут подвергаться ненужному риску.
Отсутствие надлежащей защитной одежды и необеспечение ею при выполнении отдельных рабочих процедур.	Персонал может подвергаться ненужному дополнительному риску или дозы могут не соответствовать требованию ALARA.
Отсутствие адекватной оценки физических последствий отдельных рабочих процедур с точки зрения самочувствия и состояния работников (включая, например, температуру, обезвоживание при ношении респираторного костюма).	Предоставление недостаточного времени для отдыха, или же работники, носящие защитную одежду, могут подвергаться обезвоживанию и утрачивать концентрацию, что приводит к повышению риска аварий или инцидентов.

Примечание. В случае долгосрочных проектов по выводу из эксплуатации можно рассмотреть возможность создания на объекте прачечной службы для стирки спецодежды вместо использования одноразовой спецодежды, с тем чтобы сократить объем отходов и расходы на удаление. Следует уделять особое внимание обеспечению того, чтобы в случае присутствия в воздухе радиоактивного загрязнения, в особенности альфа-радионуклидов, операторы были обеспечены изолирующими костюмами с автономной подачей воздуха, а не полнолицевыми респираторами, которые обеспечивают более низкий уровень защиты оператора. ALARA — принцип «на разумно достижимом низком уровне».

Несмотря на низкую интенсивность пучка у первых циклотронов, многие из них сооружались под землей во избежание ожидаемых, но не поддающихся количественной оценке проблем с излучением. При этом вопросы обеспечения безопасности и облегчения вывода из эксплуатации подземных сооружений и оборудования никогда не рассматривались в свое время, особенно в том, что касается облегчения перемещения оборудования и материалов на объект и из него.

Во многих случаях, особенно при задержке в подготовке плана вывода из эксплуатации после остановки ускорителя, происходит утрата документации, относящейся к использованию объекта в прошлом, и отчетов об авариях или инцидентах, которая может повлиять на безопасность при выполнении работ по выводу из эксплуатации. В 2008 году МАГАТЭ опубликовало Технический доклад, в котором представлена полезная информация о долгосрочном хранении информации при осуществлении проектов по выводу из эксплуатации [171]. Если после остановки и прекращения технического обслуживания объекта проходит длительный период времени, необходимо провести не только комплексную характеристику радиоизотопного состава, но и в полной мере

исследовать состояние систем электроснабжения, вентиляционных и других систем, которые могут играть важную роль в обеспечении безопасности, и убедиться в том, что все актуальные вопросы были учтены при планировании мероприятий по обеспечению безопасности. Многие большие современные ускорительные установки класса 3 и 4 в основном сооружаются под землей (например, БАК в ЦЕРН), и поэтому руководитель проекта должен иметь опыт управления общей безопасностью проведения работ под землей.

Ниже будут приведены два примера нерадиологических инцидентов на ускорителях. Хотя эти два случая не произошли во время проведения работ по выводу из эксплуатации, они являются репрезентативными для типичных условий вывода из эксплуатации.

В первом примере подрядчик работал внутри туннеля ускорителя, перемещая тяжелые рулевые магниты с применением тележки. Когда работник из бригады подрядчика катил пустую тележку, чтобы забрать дополнительные магниты, он наткнулся на лужу воды и попытался ее перепрыгнуть. Однако он поскользнулся при этом и вывихнул лодыжку. Туннелю ускорителя было 25 лет, и в крыше вследствие коррозии образовались отверстия, что привело к просачиванию воды в туннель. Эта проблема не решалась в течение нескольких лет. Предыдущие корректирующие меры включали лишь очистку туннеля от воды, поскольку ремонт был весьма дорогостоящим. Конечной корректирующей мерой в описанном случае стал наем подрядчика для замены облицовки и гидроизоляции всех отверстий. Протечка воды продолжалась некоторое время, но нанесенный ущерб послужил стимулом для надлежащего решения этой проблемы. Общий урок, извлеченный в этом случае, заключается в том, что обеспечение безопасности должно иметь приоритет. В данном конкретном случае ответственная организация не должна допускать, чтобы конструкции разрушались до степени, при которой возникает опасность для доступа [172].

Во втором примере 21 июня 2001 года работник подрядной строительной компании на площадке лаборатории «Фермилаб» получил серьезные травмы головы, требующие госпитализации, когда его ударило инструментом от буровой установки, которой он управлял. Источником травмы стал штанговый ключ, представляющий собой стальную штангу длиной 80 см с ручкой, который использовался главным образом как трубный ключ для подсоединения и отсоединения бурильной трубы. Авария произошла в результате разрыва сварного соединения в гидравлической системе, используемой для приложения усилия к ключу, когда бригада из двух человек удаляла нижние секции бурового агрегата (операция технического обслуживания, аналогичная той, которая выполняется при выводе из эксплуатации). Исчерпывающая иллюстрация инцидента, принятых мер и извлеченных уроков приведена в [173].

10. ВЫВОДЫ

Вывод ускорителей из эксплуатации облегчается, если он осуществляется вскоре после окончательной остановки объекта. Всесторонний учет требований, касающихся вывода из эксплуатации, включая все технические, правовые, связанные с безопасностью и финансовые факторы, целесообразно проводить еще на стадии лицензирования. Однако такой учет не часто проводится на ранней стадии.

В целом, вывод из эксплуатации ускорительной установки относительно прост по сравнению с выводом из эксплуатации ядерных установок многих других типов, особенно когда в результате эксплуатации не образуется радиоактивное загрязнение.

В мире накоплен значительный опыт вывода ускорителей из эксплуатации, и многие проекты были успешно завершены. Опыт показывает, что эти проекты могут быть осуществлены без негативных последствий для населения, работников и окружающей среды. Передача знаний от организаций, осуществлявших такие проекты, организациям, впервые приступающим к реализации аналогичных проектов, может быть весьма полезной.

В настоящей публикации (включая дополнения и приложения) также определены некоторые ограничения и проблемы; к ним относятся:

- a) нехватка или отсутствие финансирования или инфраструктуры для проведения работ по выводу из эксплуатации (например, вследствие изменения политических приоритетов);
- b) отсутствие вариантов обращения с отходами в конце жизненного цикла установки, в том числе в пунктах удаления/захоронения;
- c) отсутствие плана вывода из эксплуатации на ранних этапах жизненного цикла ускорителя;
- d) отсутствие или неадекватность документации (особенно фактических исполнительных чертежей), облегчающей проведение работ по выводу из эксплуатации;
- e) трудность обнаружения и оценки уровней излучения и радиационного загрязнения, близких к критериям освобождения от контроля.

Требование 10 публикации GSR Part 6 [85] гласит:

«В соответствии с требованиями регулирующего органа лицензиат должен подготовить план вывода из эксплуатации и сохранять его в силе на протяжении всего жизненного цикла установки, чтобы показать, что вывод из эксплуатации можно выполнить безопасным образом с достижением соответствия определенному конечному состоянию».

Лицензиатам также необходимо учитывать следующее:

- a) При выдаче лицензии на ускорительную установку необходимо создать соответствующий надежный механизм финансирования, который затем периодически подвергается пересмотру для обеспечения наличия достаточных финансовых ресурсов, когда они будут необходимы. Этот механизм должен предусматривать учет расходов на выемку и вывоз элементов конструкции из зданий, а также затрат на упаковку и транспортировку и на удаление/захоронение или рециклирование в соответствующих случаях;
- b) планирование вывода из эксплуатации должно охватывать этапы проектирования, строительства и эксплуатации и может включать, например:
 - модульное защитное экранирование для облегчения демонтажа и сортировки (съемные отдельные блоки, а не сплошные стены, как указано в разделе 5.9);
 - подбор конструкционных материалов для защитного экранирования и оборудования, которые обеспечивают сведение к минимуму активации;
 - оптимизацию рабочих параметров (например, с целью сведения к минимуму потерь пучка).

Для снижения будущих затрат на демонтаж и обращение с отходами, связанными с выводом из эксплуатации ускорителей, важно четко количественно определить степень активации, которая возможна в случае типа ускорителя, который будет строиться. В любом случае оценки активации необходимо выполнять заблаговременно до окончательной остановки ускорителя и учитывать эти оценки в плане вывода из эксплуатации.

Необходимо обеспечивать надежное и безопасное хранение соответствующей документации, относящейся ко всем аспектам эксплуатации ускорительной установки, включая любые модификации или пользовательские доработки. Также необходимо, чтобы институциональные знания, связанные с этой документацией, сохранялись на протяжении всего жизненного цикла объекта и в последующий период [24].

В случае высокоэнергетических ускорителей (на энергию свыше 1 ГэВ) скорее всего потребуются применение дистанционных методов проведения работ при осуществлении демонтажа незамедлительно после остановки такого объекта. Период выдержки перед демонтажем высокоактивных компонентов может обеспечить достаточное снижение уровня излучения,

позволяющее проводить демонтаж без использования оборудования для дистанционной работы [12]. Демонтаж большинства ускорителей на среднюю энергию может проводиться с применением практических методов, предусматривающих использование локального защитного экранирования [12]. Низкоэнергетические ускорители (на энергию ниже 10 МэВ), такие как ускорители Ван-де-Граафа и линейные электронные ускорители, используемые в медицине и промышленности, как правило, не создают уровней излучения, способных влиять на процедуры вывода из эксплуатации [12]. Поэтому в случае малых ускорителей вывод из эксплуатации должен проводиться незамедлительно после прекращения эксплуатации ускорителя.

Дополнение I

ПРИМЕРЫ УСКОРИТЕЛЕЙ В РАЗБИВКЕ ПО ТИПАМ

Приведенный ниже список типов ускорительных установок и информация о их местоположении заимствованы в основном из [22].

I.1. ЭЛЕКТРОНЫ: РАСТЯЖИТЕЛЬНОЕ КОЛЬЦО ИЛИ С НЕПРЕРЫВНЫМ ПУЧКОМ

ELSA (Боннский университет, Германия); JLab (Национальный ускорительный центр им. Томаса Джефферсона, США); MAMI (Майнцский университет, Германия); MAX-Lab (Лундский университет, Швеция); SLAC (Национальная ускорительная лаборатория SLAC, США).

I.2. ЭЛЕКТРОНЫ: ИСТОЧНИКИ СИНХРОТРОННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ, НАКОПИТЕЛЬНЫЕ КОЛЬЦА

ALBA (установка синхротронного излучения, Испания); ALS (Лаборатория им. Лоуренса в Беркли, США); ANKA (Ängströmquelle Karlsruhe, Германия); APS (Аргоннская национальная лаборатория, США); AS (австралийский синхотрон, Мельбурн); ASTRID & ASTRID2 & ELISA (ISA) (Институт установок на основе накопительных колец, Дания); BESSY II (Helmholtz-Zentrum Berlin für Materialien und Energie GmbH, Германия); CAMD (Центр современных микроструктур и устройств, Университет шт. Луизиана, США); Канадский источник синхротронного излучения (CLS) (Саскачеванский университет, Канада); CeBeTeRad (Институт ядерной химии и технологии, Польша); CHESS (Корнельский университет, США); DELTA (Zentrum für Synchrotronstrahlung, Дортмундский университет, Германия); ELBE (Helmholtz-Zentrum Dresden, Германия); Elettra (Научный парк AREA, Италия); ELU-бе (Лодзинский технический университет, Польша); ESRF (Европейский центр синхротронного излучения, Франция); HASYLAB (Das Hamburger Synchrotronstrahlungslabor, Германия); HLS (Университет науки и технологий Китая, город Хэфэй); INDUS (Центр передовых технологий, Индия); LNLS (Laboratório Nacional de Luz Sincrotron, Бразилия); MAX-Lab (Лундский университет, Швеция); MLS (Metrology Light Source, Physikalisch-Technische Bundesanstalt, Германия); NSLS (Брукхейвенская национальная лаборатория, США); PAL (Pohang Accelerator Laboratory, Республика Корея); SESAME (Синхротронное излучение для экспериментальной науки и применений на Ближнем Востоке, Иордания, в стадии строительства); SLS (Институт Пауля Шерпера, Швейцария); SOLEIL (Gif-Sur-Yvette, Франция); SPEAR (Национальная ускорительная лаборатория SLAC, США); SPring-8 (Суперфотонное кольцо, Япония); SRC (Центр синхротронного излучения, Висконсинский университет, Мэдисон, США); SSRF (Шанхайский центр синхротронного излучения, Китай); SURF III (Национальный институт стандартов и технологий, США); TPS (Тайваньский источник фотонов, Тайвань, Китай); TUNL (Ядерная лаборатория трех университетов, США).

I.3. ЭЛЕКТРОНЫ: ПРОЧИЕ

BATES (Массачусетский технологический институт, США); IAC (Айдахский ускорительный центр, США); PBPL (Лаборатория физики пучков частиц, США); PEGASUS (Фотоэлектронный источник усиленного спонтанного излучения, США); PITZ (Deutsches Elektronen-Synchrotron, Германия); S-DALINAC (Технический университет Дармштадта, Германия); UNAM (Национальный автономный университет Мексики); WMU (Ускоритель Ван-де-Граафа, физический факультет Западно-мичиганского университета, США).

I.4. ПРОТОНЫ

Циклотрон 88 дюймов (Лаборатория им. Лоуренса в Беркли, США); ARRONAX (Ускоритель для исследований в области радиохимии и онкологии, Франция); CNA (Национальный ускорительный центр, Испания); CNL (Ядерная лаборатория им. Крокера, Калифорнийский университет, Дэвис, США); COSY (Cooler Synchrotron, Институт ядерной физики (ИФП), Германия); ININ (Национальный институт ядерных исследований, Мексика); ISIS (Лаборатория Резерфорда–Эплтона, Соединенное Королевство); iThemba (Лаборатория научных исследований на ускорителях, Южная Африка); IUCF (Циклотронная установка Индианского университета, США); KEK (Национальная лаборатория физики высоких энергий, Япония); Большой адронный коллайдер (БАК), PS (протонный синхротрон) и SPS (суперпротонный синхротрон) (ЦЕРН, Швейцария); RHIC (Релятивистский коллайдер тяжёлых ионов, Брукхейвенская национальная лаборатория, США); TRIUMF (Национальная лаборатория физики элементарных частиц и ядерной физики Канады, Ванкувер); TSL (Лаборатория им. Сведберга, Уппсальский университет, Швеция).

I.5. ЛЕГКИЕ И ТЯЖЕЛЫЕ ИОНЫ

Циклотрон 88 дюймов (Лаборатория им. Лоуренса в Беркли, США); AGOR (Accélérateur Groningen-ORsay, KVI, Нидерланды); ANSTO (Австралийская организация ядерной науки и технологий, Лукас-Хайтс); ANU (Австралийский национальный университет, Канберра); ARRONAX (Ускоритель для исследований в области радиохимии и онкологии, Франция); ASTRID (Институт установок на основе накопительных колец, Дания); ATLAS (Аргоннская национальная лаборатория, США); CENPA (Центр экспериментальной ядерной физики и астрофизики, Вашингтонский университет, США); CMAM CNL (Центр микроанализа материалов, Автономный университет Мадрида, Испания); CRYRING (Лаборатория им. Мане Сигбана, Швеция); CYCLONE (Циклотрон Лувен-ля-Нев, Бельгия); ESSB (ESS-Бильбао, Испания); FRIB (Установка для пучков редких изотопов, Университет штата Мичиган, США); GANIL (Grand Accélérateur National d'Ions Lourds, Франция); GSI (Gesellschaft für Schwerionenforschung, Германия); HSKP (Helmholtz-Institut für Strahlen- und Kernphysik, Германия); ININ (Национальный институт ядерных исследований, Мексика); ISNAP (Институт структуры и ядерной астрофизики, Университет Нотр-Дам, США); iThemba (Лаборатория научных исследований на ускорителях, Южная Африка); IUCF (Циклотронная установка Индианского университета, США); JYFL (Jyväskylä Yliopiston Fysiikan Laitos, Финляндия); LAC (Луизианский ускорительный центр, Университет шт. Луизиана в Лафайете, США); LAFN (Laboratório Aberto de Física Nuclear, Бразилия); Большой адронный коллайдер (БАК) (ЦЕРН, Швейцария); комплекс «Синхрофазотрон/нуклотрон» ЛВЭ (Объединенный институт ядерных исследований, Российская Федерация); LNL (Laboratori Nazionali di Legnaro, Istituto Nazionale di Fisica Nucleare, Италия); LNS (Laboratori Nazionali del Sud, Istituto Nazionale di Fisica Nucleare, Италия); Maier-Leibnitz-Laboratorium (Мюнхен, Германия); MIBL (Мичиганская лаборатория ионных пучков, Мичиганский университет, США); MIC (Microanalytical Centre at Jožef Stefan Institute, Словения); MPI-HD (Институт ядерной физики Макса Планка, Германия); NCSL (Национальная лаборатория сверхпроводящих циклотронов, Университет шт. Мичиган, США); ORNL (Окриджская национальная лаборатория, США); OUAL (Ускорительная лаборатория им. Джона Э. Эдвардса, Университет штата Огайо, США); PSI (Виллиген, Швейцария); RHIC (Брукхейвенская национальная лаборатория, США); RIBRAS (Radioactive Ion Beam in Brasil, Сан-Паулу); RUBION (Zentrale Einrichtung für Ionenstrahlen und Radionuklide, Universität Bochum, Германия); SNS (Источник нейтронов скалывания, США); SPS (ЦЕРН, Швейцария); TAMU (Циклотронный институт, Техасский университет A&M, США); TANDAR (Тандемный ускоритель, Буэнос-Айрес, Аргентина); TSL (Лаборатория им. Сведберга, Уппсальский университет, Швеция); TUNL (Ядерная лаборатория трех университетов, США); У-400/У-400М (Объединенный институт ядерных исследований, Российская Федерация);

UAC (Межуниверситетский ускорительный центр, Индия); UMASS (Радиационная лаборатория в Лоуэлле Массачусетского университета, США); UNAM (Национальный автономный университет Мексики); Циклотронный центр переменной энергии (Индия).

1.6. КОЛЛАЙДЕРЫ

БЕРС (Пекинский электронно-позитронный коллайдер, Китай); CESR (Корнельское электронно-позитронное накопительное кольцо, Корнельский университет, США); DAFNE (Laboratori Nazionali di Frascati, Istituto Nazionale di Fisica Nucleare, Италия); Большой адронный коллайдер (БАК) (ЦЕРН, Швейцария); RHIC (Брукхейвенская национальная лаборатория, США); Стэнфордский линейный коллайдер (Национальная ускорительная лаборатория SLAC, США); TESLA (Deutsches Elektronen-Synchrotron, Германия); Теватрон (Фермилаб, США); ВЭПП-3, ВЭПП-4М и ВЭПП-2000 (Институт ядерной физики им. Будкера, Российская Федерация).

Дополнение II

РАЗЛИЧНЫЙ ОПЫТ И ИССЛЕДОВАНИЯ В ОБЛАСТИ ОСУЩЕСТВЛЕНИЯ ПРОЕКТОВ ПО ВЫВОДУ УСКОРИТЕЛЕЙ ИЗ ЭКСПЛУАТАЦИИ

В данном дополнении кратко описывается фактический опыт или приводятся теоретические оценки в отношении конкретных проектов по выводу ускорителей из эксплуатации. Другие проекты по выводу из эксплуатации подробно описаны в приложениях. Ознакомление с опытом, информация о котором приведена ниже, может быть полезным с точки зрения его применимости к новым проектам по выводу из эксплуатации.

II.1. СОЕДИНЕННЫЕ ШТАТЫ АМЕРИКИ

В 2001 году были завершены работы по дезактивации и выводу из эксплуатации циклотронной установки длиной 60 дюймов (152 см) Аргоннской национальной лаборатории. Работа по характеристике, планированию и подготовке документации была начата в июне 1997 года и завершена в декабре 1998 года. Работы по выводу из эксплуатации непосредственно на объекте начались в январе 2000 года, и отчет об окончании работ был опубликован в феврале 2001 года. Общая продолжительность работ по выводу из эксплуатации на объекте составила 13 месяцев. Суммарное облучение персонала, участвовавшего в осуществлении проекта, составило 0,436 чел.-бэр (4,36 чел.-мЗв). Общие затраты на проект по выводу циклотрона из эксплуатации, включая оплату труда, управление и удаление отходов, достигли 3,9 млн долл. США. Для захоронения за пределами площадки было упаковано в общей сложности 197 м³ радиоактивных отходов низкого уровня активности, суммарная активность которых составила 1900 МБк. Кроме того, было упаковано для захоронения 3,3 м³ смешанных отходов, включая облицовку, имеющих суммарную активность 1070 МБк. В феврале 2001 года циклотронная установка была официально выведена из эксплуатации и передана владельцу.

После завершения независимого проверочного обследования циклотрон был передан для неограниченного повторного использования. Хотя установка подлежала неограниченному повторному использованию, в ходе независимого проверочного обследования был зафиксирован факт сохранения повышенной активности в некоторых недоступных зонах:

«Верхний уровень циклотронной камеры содержит легко измеряемую радиоактивность, обусловленную нейтронной активацией бетона и других конструкций, возникшей при эксплуатации циклотрона. В доступных зонах было соблюдено требование в отношении мощности экспозиционной дозы, предусмотренной в постановлении 5400.5 МЭ США, т.е. ≤ 20 мкР/ч. Для входа в эти зоны разрешения на работу с источниками излучения (РРИИ) дозиметры или другие средства радиологического контроля не требуются» [170].

В [174] рассматриваются основные элементы политики и стратегий, способствующих системному, безопасному, своевременному и экономически эффективному планированию вывода из эксплуатации ядерных и радиологических установок.

Летом 2011 года после 20 лет использования был выведен из эксплуатации циклотрон Scanditronix с энергией 17 МэВ в Айовском университете. Описание этого проекта содержится в [175, 176]. Отходы были разделены с классификацией на две категории: отходы от циклотрона и мишеней и отходы от бетонной стены камеры, которую необходимо было удалить для того, чтобы демонтировать старый циклотрон и смонтировать новый.

С собственно циклотрона были сняты полезные детали в качестве запасных частей, которые были отправлены на объекты с эксплуатируемыми циклотронами Scanditronix 17 МэВ. Радиоактивные отходы, образовавшиеся за 20 лет эксплуатации, были упакованы и помещены в вакуумную камеру циклотрона. В их число вошли мишенные фольги, которые в первую очередь были уложены в свинцовые контейнеры с целью сведения к минимуму гамма-излучения от циклотрона. Затем камера была окончательно освобождена от контроля. Перед отправкой циклотрона в пункт захоронения отходов в Клайве, шт. Юта (Energy Solutions) необходимо было провести идентификацию и оценку количества радионуклидов, связанных с циклотроном.

Остаточная радиоактивность циклотрона и его частей обусловлена прямой протонной и дейтронной бомбардировкой материалов (фольги, тела мишени и внутренних компонентов блуждающими протонами и дейтронами), а также нейтронной активацией главным образом магнитной стали и медных катушек.

Характеристики проекта включали следующее:

- a) радиоактивные отходы низкого уровня активности, отправленные на захоронение: 22 т;
- b) затраченное время: 324 человеко-часа в течение трех дней;
- c) затраты: ~ 200 000 долл. США;
- d) суммарная доза: 0,53 чел.-мЗв.

В Национальной лаборатории им. Лоуренса в Беркли работы по выводу из эксплуатации включали передислокацию ускорителя Ван-де-Граафа и биомедицинских программ, радиационные измерения, планирование, подготовку сметы, разработку и закупку инструментов и оборудования, составление графиков, организацию доставки, изучение такелажных работ, получение разрешений, координацию удаления отходов и очистку. Все эти работы описаны в [177].

II.2 НИДЕРЛАНДЫ

Краткое описание демонтажа Амстердамского линейного ускорителя электронов на энергию 700 МэВ приведено в [178, 179]. В 1998 году была завершена научная программа. В 1999–2000 годах установка была перевезена в Дубну, Российская Федерация. Работы по удалению активированных материалов были выполнены в 2001 году, и в 2002–2003 годах было проведено окончательное обследование с целью проверки остаточной радиоактивности. Стратегия обращения с материалами предусматривала следующее:

- a) повторное использование является более предпочтительным, чем рециклирование (значительная часть оборудования была передана в Дубну);
- b) рециклирование является более предпочтительным, чем удаление/захоронение в качестве отходов;
- c) принимаются следующие критерии освобождения от контроля:
 - >100 Бк/г: установлен Центральной организацией по радиоактивным отходам (голландская компания по обращению с радиоактивными отходами);
 - >10 Бк/г: химические отходы;
 - <10 Бк/г: контролируемое рециклирование;
 - < 1 Бк/г: неконтролируемое рециклирование (но металл даже с <1 Бк/г не принимался к рециклированию; свинец рециклировался).

Поток материалов состоял из 8 т радиоактивных отходов, 23 т химических отходов, было совершено 60 перевозок грузов в Дубну и была рециклирована 31 т свинца. Общие затраты составили 295 000 долл. США.

II.3. ФРАНЦИЯ

В [180] описан вывод из эксплуатации двух французских ускорителей. Этими двумя установками были линак в Сакле (электроны, 700 МэВ) и синхротрон Saturne (ионы, протоны 3 ГэВ). В [180] подробно рассматривается моделирование реакторов и категоризация материалов, образующихся при осуществлении работ по выводу из эксплуатации. Следует отметить, что из общей массы 12 700 т было рециклировано в качестве радиологического материала 83%, в качестве обычного материала 10% и только 7% было удалено в качестве отходов очень низкого уровня активности. В докладе подробно сообщается об экономии средств, достигнутой благодаря удалению отходов в качестве отходов очень низкого уровня активности, а не отходов низкого уровня активности: затраты на кубический метр первого вида отходов составили одну десятую от затрат на удаление второго вида отходов во Франции. Обзор проектов по выводу из эксплуатации ядерных установок и ускорителей во Франции приведен в [181].

II.4. БЕЛЬГИЯ

Стратегии моделирования активации и вывода из эксплуатации многочастичного (протоны, дейтроны и альфа- и ^3He) циклотрона с переменной энергией в Брюссельском свободном университете изложены в [182, 183]. Оптимизация профессионального облучения в этом проекте с применением программного обеспечения VISIPLAN описана в [184].

II.5. СОЕДИНЕННОЕ КОРОЛЕВСТВО

В Харуэллской лаборатории в течение последних 20 лет осуществлялась обширная программа по выводу циклотрона из эксплуатации. Циклотрон с переменной энергией был построен в середине 1960-х годов для изучения радиационного повреждения, исследований по радиохимии и физике твердого тела. В более поздние годы его основным назначением было производство радиоизотопов (например, ^{123}I) для медицинских целей. Циклотрон с переменной энергией состоял из большой железобетонной экранированной конструкции (приблизительно 2500 м³ на поверхности), содержащей четыре зоны: циклотронную камеру (в которой размещалась циклотронная машина с переменной энергией, включая главный магнит массой 250 т) и три отдельных мишенных помещения. Вокруг циклотрона располагались несколько больших механических и электрических технических помещений, зал управления и системы водяного охлаждения. Циклотрон с переменной энергией был первым объектом, который был полностью демонтирован в рамках программы в Харуэлле (1994 год). Подробная информация об основных элементах проекта по выводу из эксплуатации 250-тонного циклотрона и сносу бетонного защитного экранирования массой 5 000 т и внешней конструкции здания приведена в [183]. Фактический снос занял шесть недель.

Информация о последних проектах по выводу ускорителей из эксплуатации в Соединенном Королевстве содержится в [184]. Проекты охватывают циклотрон MC40, циклотронные службы, ядро магнита на 8 МэВ и ПЭТ-циклотрон.

СПРАВОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

- [1] AMALDI, U., The importance of particle accelerators, *Europhys. News* **31** 6 (2000) 5–9.
- [2] VYLET, V., LIU, J.C., Radiation protection at high energy electron accelerators, *Radiat. Prot. Dosim.* **96** 4 (2001) 333–343.
- [3] MACHI, S., “Trends for electron beam accelerator applications in industry”, *Reviews of Accelerator Science and Technology*, Vol. 4 (CHAO, A.W., Ed.), World Scientific Publishing Company, Singapore (2011).
- [4] GARNETT, R.W., SHEFFIELD, R.L., “Accelerator applications in energy and security”, *Reviews of Accelerator Science and Technology*, Vol. 8 (CHAO, A.W., CHOU, W., Eds), World Scientific Publishing Company, Singapore (2015).
- [5] PIZZICHEMI, M., Positron emission tomography: State of the art and future developments, *J. Instrum.* **11** 8 (2016).
- [6] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Cyclotron Produced Radionuclides: Physical Characteristics and Production Methods, Technical Reports Series No. 468, IAEA, Vienna (2009).
- [7] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Radiological Safety Aspects of the Operation of Proton Accelerators, Technical Reports Series No. 283, IAEA, Vienna (1988).
- [8] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Cyclotron Produced Radionuclides: Principles and Practice, Technical Reports Series No. 465, IAEA, Vienna (2008).
- [9] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Cyclotron Produced Radionuclides: Guidelines for Setting Up a Facility, Technical Reports Series No. 471, IAEA, Vienna (2009).
- [10] OPELKA, J.H., et al., “A decommissioning plan for particle accelerators”, *Proc. Conf. on Decontamination and Decommissioning of Nuclear Facilities* (OSTERHOUT, M.M., Ed.), Sun Valley, 1979, Plenum Press, New York (1980).
- [11] FORMAN, P., ‘Atom smashers: Fifty years’: Preview of an exhibit on the history of high energy accelerators, *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **24** 3 (1977).
- [12] OPELKA, J.H., MARMER, G.J., MUNDIS, R.L., PETERSON, J.M., SISKIND, B., Reutilization potential of accelerator components: A decommissioning perspective, *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **26** 3 (1979).
- [13] OPELKA, J.H., et al., Particle Accelerator Decommissioning, ANL/ES-82, Argonne National Laboratory, IL (1979).
- [14] EUROPEAN COMMISSION, Evaluation of the Radiological and Economic Consequences of Decommissioning Particle Accelerators, EUR 19151, European Commission, Brussels (1999).
- [15] WITMAN, S., Ten things you might not know about particle accelerators, *Symmetry Mag.* (15 Apr. 2014).
- [16] HAMM, R.W., HAMM, M.E. (Eds), *Industrial Accelerators and Their Applications*, World Scientific Publishing Company, Hackensack, NJ (2012).
- [17] SONCK, M., BULS, N., EGGERMONT, G., “Radiological and economic impact of decommissioning charged particle accelerators”, *IRPA-10 Proc. 10th Int. Cong. International Radiation Protection Association on Harmonization of Radiation, Human Life and the Ecosystem*, Japan Health Physics Society, Japan (2000).
- [18] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Status of the Decommissioning of Nuclear Facilities around the World, IAEA, Vienna (2004).
- [19] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, IAEA Accelerator Knowledge Portal, <https://nucleus.iaea.org/sites/accelerators/Pages/default.aspx>
- [20] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Directory of Cyclotrons Used for Radionuclide Production in Member States: 2006 Update, IAEA, Vienna (2006).
- [21] LARAIA, M., Decommissioning strategies and concerns for small non-fuel-cycle facilities, *Radwaste Solutions* **12** (2003) 24–31.
- [22] ELEKTRONEN-STRETCHER-ANLAGE, Particle Accelerators Around the World, (2017), www-elsa.physik.uni-bonn.de/Informationen/accelerator_list.html
- [23] WILSON, E.J.N., *An Introduction to Particle Accelerators*, Oxford University Press, Oxford (2001).
- [24] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Decommissioning of Small Medical, Industrial and Research Facilities, Technical Reports Series No. 414, IAEA, Vienna (2003).
- [25] AMERICAN NATIONAL STANDARDS INSTITUTE, Radiation Safety for the Design and Operation of Particle Accelerators, ANSI/HPS N43.1, ANSI, Washington, DC (2011).
- [26] NATIONAL COUNCIL ON RADIATION PROTECTION AND MEASUREMENTS, Radiation Protection for Particle Accelerator Facilities, Rep. 144, NCRP, Bethesda, MD (2003).
- [27] CHAO, W.U., MESS, K., TIGNER, M., ZIMMERMANN, F. (Eds), *Handbook of Accelerator Physics and Engineering*, 2nd edn, World Scientific Publishing Company, Hackensack, NJ (2013).

- [28] NOGA, P., et al., A new ion-beam laboratory for materials research at the Slovak University of Technology, Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. B **409** (2017) 264–267.
- [29] UNITED STATES DEPARTMENT OF ENERGY, A Symposium and Workshop on Accelerators for America's Future, USDOE, Washington, DC (2009).
- [30] ORECCHIA, R., FOSSATI, P., SANDRO ROSSI, S., The National Center for Oncological Hadron Therapy: Status of the project and future clinical use of the facility, Tumori **95** (2009) 169–175.
- [31] CHIRIKI, S., et al., Decommissioning and safety issues of liquid-mercury waste generated from high-power spallation sources with particle accelerators, Nucl. Technol. **168** 2 (2009) 264–269.
- [32] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Management of Problematic Waste and Material Generated during the Decommissioning of Nuclear Facilities, Technical Reports Series No. 441, IAEA, Vienna (2006).
- [33] EUROPEAN SYNCHROTRON RADIATION FACILITY, ESRF News, Grenoble, France, Dec. (2017), <https://www.esrf.eu/news>
- [34] MEYERS, S., PICASSO, E., The design, construction and commissioning of the CERN Large Electron–Positron collider, Contemp. Physics. **31** (1990) 387–403.
- [35] TAJIMA, T., DAWSON, J.M., Laser electron accelerator, Phys. Rev. Lett. **43** 4 (1979) 267–270.
- [36] YANG, J.M., et al., Neutron production by fast protons from ultraintense laser–plasma interactions, J. Appl. Phys. **96** 11 (2004) 6912–6918.
- [37] DAVIS, J., PETROV, G.M., Angular distribution of neutrons from high-intensity laser–target interactions, Plasma Phys. Control. Fusion **50** 6 (2008).
- [38] MALKA, V., et al., Principles and applications of compact laser–plasma accelerators, Nat. Phys. **4** (2008) 447–453.
- [39] LEDINGHAM, K.W.D., et al., High power laser production of short-lived isotopes for positron emission tomography, J. Phys. D: Appl. Phys. **37** 16 (2004) 2341–2345.
- [40] FABBRI, A., et al., Radiation protection of PFMA-1, a plasma focus for medical applications, J. Radiol. Prot. **27** 4 (2007) 465–470.
- [41] ESPOSITO, A., Radiation protection issues for laser-based accelerators, Radiat. Prot. Dosim. **146** 4 (2011) 403–406.
- [42] STURM, C., STÖCKER, H., The Facility for Antiproton and Ion Research FAIR, Phys. Part. Nuclei Lett. **8** 8 (2011) 865–868.
- [43] KNASTER, J., et al., Overview of the IFMIF/EVEDA project, Nucl. Fusion **57** 10 (2017).
- [44] SHIRAI, H., BARABASCHI, P., KAMADA, Y., JT-60SA TEAM, Recent progress of the JT-60SA project, Nucl. Fusion **57** 10 (2017) 102002.
- [45] ENE, D., “Preliminary waste management plan of European spallation source”, Proc. 15th Int. Conf. on Environmental Remediation and Radioactive Waste Management, Belgium, 2013, ASME, New York (2013).
- [46] ENE, D., Decommissioning plan for European spallation source, EPJ Web of Conferences **153** (2017), http://www.epj-conferences.org/articles/epjconf/pdf/2017/22/epjconf_iers2017_05022.pdf
- [47] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, International Network of Laboratories for Nuclear Waste Characterization (LABONET) (2011), <https://nucleus.iaea.org/sites/connect/LABONETpublic/Pages/default.aspx>.
- [48] EUROPEAN STRATEGY FORUM ON RESEARCH INFRASTRUCTURES, Roadmap for research infrastructure, strategy report and roadmap update (2010), <https://www.esfri.eu/>
- [49] AICHELER, M., et al. (Eds), A multi-TeV linear collider based on CLIC technology: CLIC conceptual design report, CERN, Geneva (2012).
- [50] New 31-km-long International Linear Collider Ready for Construction, CERN, Geneva (2013), <https://phys.org/news/2013-06-international-linear-collider-ready.html>
- [51] ABDERRAHIMA, H., et al., MYRRHA: A multipurpose accelerator driven system for research & development, Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. A **463** 3 (2001) 487–494.
- [52] BENEDIKT, M., ZIMMERMANN, F., Towards future circular colliders, J. Korean Phys. Soc. **69** 6 (2016) 893–902.
- [53] KRAMMAR, M., The update of the European strategy for particle physics, Physica Scripta, **2013** T158 (2013).
- [54] CIRCULAR ELECTRON POSITRON COLLIDER, CEPC Conceptual Design Report, Vol. 2, Physics & Detector (DA COSTA, J. (Eds), IHEP-CEPC-DR-2018-02, IHEP, Beijing (2018).
- [55] FASSO, A., SILARI, M., ULRICI, L., Predicting induced radioactivity at high-energy electron accelerators, J. Nucl. Sci. Technol. **37** Suppl. 1 (2000) 827–834.
- [56] AGOSTEO, S., Radiation protection constraints for use of proton and ion accelerators in medicine, Radiat. Prot. Dosim. **137** 1–2 (2009) 167–186.

- [57] BRUGGER, M., FERRARI, A., ROESLER, S., ULRICI, L., Validation of the FLUKA Monte Carlo code for predicting induced radioactivity at high-energy accelerators, *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. A* **562** 2 (2006) 814–818.
- [58] BRIESMEISTER, J.F. (Ed.), *MCNP: A general Monte Carlo N-particle transport code, Version 4C*, Los Alamos National Laboratory, NM (2000).
- [59] PODGORSK, E.B. (Ed.), *Radiation Oncology Physics: A Handbook for Teachers and Students*, IAEA, Vienna (2005).
- [60] BRUSA, A., CESANA, A., STUCCHI, C., TERRANI, M., ZANELLATI, F., Long-term activation in a 15 MeV radiotherapy accelerator, *Med. Phys.* **35** 7 (2008) 3049–3053.
- [61] FUJIBUCHI, T., et al., Induced radioactive nuclides of 10-MeV radiotherapy accelerators detected by using a portable HP-Ge survey meter, *Radiat. Prot. Dosim.* **148** 2 (2012) 168–173.
- [62] FISCHER, H.W., TABOT, B.E., POPPE, B., Activation processes in a medical linear accelerator and spatial distribution of activation products, *Phys. Med. Biol.* **51** 24 (2006).
- [63] O'DONNELL, R.G., VINTRÓ, L.L., DUFFY, G.J., MITCHELL, P.I., Measurement of the residual radioactivity induced in the front foil of a target assembly in a modern medical cyclotron, *Appl. Radiat. Isot.* **60** 2–4 (2004) 539–542.
- [64] MARENGO, M., et al., Assessment of radionuclidic impurities in 2-[¹⁸F]fluoro-2-deoxy-D-glucose ([¹⁸F] FDG) routine production, *Appl. Radiat. Isot.* **66** 3 (2007) 295–302.
- [65] BIRATTARI, C., CANTONE, M.C., FERRARI, A., SILARI, M., Residual radioactivity at the Milan AVF cyclotron, *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. B* **43** 1 (1989) 119–126.
- [66] CALANDRINO, R., et al., Decommissioning procedures for an 11 MeV self-shielded medical cyclotron after 16 years of working time, *Health Phys.* **90** 6 (2006) 588–96.
- [67] KIMURA, K., ISHIKAWA, T., KINNO, M., YAMADERA, A., NAKAMURA, T., Residual long-lived radioactivity distribution in the inner concrete wall of a cyclotron vault, *Health Phys.* **67** 6 (1994) 621–631.
- [68] PHILLIPS, A.B., PRULL, D.E., RISTINEN, R.A., KRAUSHAAR, J.J., Residual radioactivity in a cyclotron and its surroundings, *Health Phys.* **51** 3 (1986) 337–342.
- [69] CARROLL, L.R., Predicting long-lived, neutron-induced activation of concrete in a cyclotron vault, *AIP Conf. Proc.* **576** 1 (2001) 301–304.
- [70] FISCHER, H.W., TABOT, B., POPPE, B., Comparison of activation products and induced dose rates in different high-energy medical accelerators, *Health Phys.* **94** 3 (2008) 272–278.
- [71] FORKEL-WIRTH, D., HÖFERT, M., “On the release of radioactive material produced at high energy accelerators”, *Proc. 2nd Int. Symp. on Release of Radioactive Material from Regulatory Control*, Hamburg, 1999.
- [72] BRUGGER, M., ROESLER, S., ULRICI, L., “Benchmark study of radionuclides production with FLUKA”, *Proc. Topical Mtg on The Monte Carlo Method: Versatility Unbounded in a Dynamic Computing World*, Chattanooga, 2005, ANS, La Grange Park, IL (2005).
- [73] ULRICI, L., MAGISTRIS, M., Radioactive waste management and decommissioning of accelerator facilities, *Radiat. Prot. Dosim.* **137** 1–2 (2009) 138–148.
- [74] ULRICI, L., BRUGGER, M., OTTO, T.H., ROESLER, S., Radionuclide characterization studies of radioactive waste produced at high-energy accelerators, *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. A* **562** 2 (2006) 596–600.
- [75] SILARI, M., ULRICI, L., Investigation of induced radioactivity in the CERN Large Electron Positron collider for its decommissioning, *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. A* **526** 3 (2004) 510–536.
- [76] BORAK, T.B., AWSCHALOM, M., FAIRMAN, W., IWAMI, F., SEDLET, J., The underground migration of radionuclides produced in soil near high energy proton accelerators, *Health Phys.* **23** 5 (1972) 679–687.
- [77] COSSAIRT, J.D., *Radiation Physics for Personnel and Environmental Protection*, Rev. 12, Fermilab TM1934, Fermi National Accelerator Laboratory, Batavia, IL (2013).
- [78] GABORIT, J.C., SILARI, M., ULRICI, L., Radiation levels in the CERN Large Electron Positron collider during the LEP 2 phase (68–105 GeV), *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. A* **565** 2 (2006) 333–350.
- [79] WALTER, N., “Development of an in-situ radiological classification technique for material and waste from CERN’s accelerator facilities”, paper presented at the Workshop on Accelerator Radiation Induced Activation (ARIA 2015), 15–17 April 2015, Knoxville, TN, (2015).
- [80] BÖHLEN, T., et al., The FLUKA code: Developments and challenges for high energy and medical applications, *Nucl. Data Sheets* **120** (June 2014) 211–214.
- [81] MICKLICH, B.J., GALLMEIER, F., WOHLMUTHER, M., Comparison of selected codes for calculating induced radioactivity at accelerator facilities, *Nucl. Technol.* **168** 3 (2009) 700–705.

- [82] KINOSHITA, N., et al., Depth profile of radioactivity induced in the thick concrete shield in EP1 beam line at the KEK 12-GeV proton synchrotron facility, *Nucl. Technol.* **168** 3 (2009) 694–699.
- [83] WANG, Q., et al., Evaluation of the radioactivity in concrete from accelerator facilities, *J. Radioanal. Nucl. Chem.* **273** 1 (2007) 55–58.
- [84] SCHUMANN, D., KISELEV, D., TEICHMANN, S., SYNAL, H.-A., KUBIK, P., Radiochemical analysis of concrete samples from accelerator waste, *Radiochim. Acta* **100** (2012) 851–856.
- [85] МЕЖДУНАРОДНОЕ АГЕНТСТВО ПО АТОМНОЙ ЭНЕРГИИ, Вывод из эксплуатации установок, Серия норм безопасности МАГАТЭ, № GSR Part 6, МАГАТЭ, Вена (2015).
- [86] МЕЖДУНАРОДНОЕ АГЕНТСТВО ПО АТОМНОЙ ЭНЕРГИИ, Оценка безопасности установок и деятельности, Серия норм безопасности МАГАТЭ, № GSR Part 4 (Rev.1), МАГАТЭ, Вена (2016).
- [87] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Standard Format and Content for Safety Related Decommissioning Documents, Safety Reports Series No. 45, IAEA, Vienna (2005).
- [88] NUCLEAR ENERGY AGENCY, ORGANISATION FOR ECONOMIC CO-OPERATION AND DEVELOPMENT, Metadata for Radioactive Waste Management, NEA No. 7378, OECD, Paris (2018).
- [89] CANADIAN LIGHT SOURCE INC., Preliminary Decommissioning Plan, Rev. 5, 11.12.1.1 (2014).
- [90] ALDER, J.C., TUNABOYLU, K., MCGINNES, D.F., “Decommissioning waste arising from a 600 MeV proton, high intensity beam (1.5 MA) accelerator facility”, *Proc. Int. Topical Mtg on Nuclear and Hazardous Waste Management*, Atlanta, 1994, ANS, La Grange Park, IL (1994).
- [91] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, State of the Art Technology for Decontamination and Dismantling of Nuclear Facilities, Technical Reports Series No. 395, IAEA, Vienna (1999).
- [92] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Decommissioning of Research Reactors: Evolution, State of the Art, Open Issues, Technical Reports Series No. 446, IAEA, Vienna (2006).
- [93] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Innovative and Adaptive Technologies in Decommissioning of Nuclear Facilities, IAEA-TECDOC-1602, IAEA, Vienna (2008).
- [94] BOING, L., Ten key actions for decommissioning, *Nucl. Plant J.* **23** 4 (2005) 56–58.
- [95] SPINNEY, G., “Thoughts on decommissioning the CERN Synchro Cyclotron”, *Proc. 13th Int. Conf. on Cyclotrons and Their Applications*, Vancouver, 1992, World Scientific Publishing Company, Singapore (1993).
- [96] GRANT, T.J., SNEDAKER, W.H., “Decommissioning of the Princeton–Penn accelerator”, *Proc. Symp. on Waste Management*, Tucson, 1990, ANS, La Grange Park, IL (1990).
- [97] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Organization and Management for Decommissioning of Large Nuclear Facilities, Technical Reports Series No. 399, IAEA, Vienna (2000).
- [98] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Planning and Management for the Decommissioning of Research Reactors and Other Small Nuclear Facilities, Technical Reports Series No. 351, IAEA, Vienna (1993).
- [99] UNITED STATES DEPARTMENT OF ENERGY, Decommissioning Handbook: Procedures and Practices for Decommissioning, USDOE, Washington, DC (2000).
- [100] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, An Overview of Stakeholder Involvement in Decommissioning, IAEA Nuclear Energy Series No. NW-T-2.5, IAEA, Vienna (2009).
- [101] MORITZ, L., “Radiation protection at low-energy proton accelerators”, presented at International School of Radiation Damage and Protection, 10th Course: Accelerator Radiation Protection, Erice, Italy, 2–9 October (2001).
- [102] GILSON, D., Berkeley’s Bevatron blues, *East Bay Express* (7 Aug. 2002).
- [103] ULRICI, L., ALGOET, Y., BRUNO, L., MAGISTRIS, M., Radiation protection challenges in the management of radioactive waste from high-energy accelerators, *Radiat. Prot. Dosim.* **164** 1–2 (2015) 112–115.
- [104] VINCKE, H., THEIS, C., ActiWiz — Optimizing your nuclide inventory at proton accelerators with a computer code, *Prog. Nucl. Sci. Tech.* **4** (2014) 228–232.
- [105] DEVGUN, J.S., “Modular construction for eventual deconstruction and decommissioning”, paper presented at Conf. on Waste Management, Phoenix, AZ, 2010.
- [106] MAJOR, B., “PET cyclotron design for decommissioning and waste inventory reduction”, *Proc. 12th Int. Conf. on Environmental Remediation and Radioactive Waste Management*, Liverpool, 2009, ASME, New York, NY (2009).
- [107] MARTÍNEZ-SERRANO, J.J., DÍEZ DE LOS RÍOS, A., Prediction of neutron induced radioactivity in the concrete walls of a PET cyclotron vault room with MCNPX, *Med. Phys.* **37** 11(2010) 6015–6021.
- [108] FASSÓ, A., FERRARI, A., SALA, P.R., Radiation transport calculations and simulations, *Radiat. Prot. Dosim.* **137** 1–2 (2009) 118–133.
- [109] BATTISTONI, G., et al., “The FLUKA code: Description and benchmarking”, *Proc. Hadronic Shower Simulation Workshop*, Batavia, IL, 2006 (ALBROW, M., RAJA, R., Eds), AIP, Melville, NY (2007).

- [110] FERRARI, A., SALA, P.R., FASSO, A., RANFT, J., FLUKA: A multi-particle transport code, CERN-2005-010, INFN/TC_05/11, SLAC-R-773, CERN, Geneva (2005).
- [111] NIITA, K., et al., PHITS — A particle and heavy ion transport code system, *Radiation Measurements* **41** 9–10 (2006) 1080–1090.
- [112] MOKHOV, N.V., JAMES, C.C., The MARS Code System User’s Guide, Version 15, Fermi National Accelerator Laboratory, Batavia, IL (2016).
- [113] MOKHOV, N., MARS code developments, benchmarking and applications, *J. Nucl. Sci. Technol.* **37** Suppl. 1 (2000) 167–171.
- [114] MOKHOV, N.V., et al., “MARS code developments”, paper presented at 4th Workshop on Simulating Accelerator Radiation Environments (SARE4), Knoxville, TN, 14–16 Sept. 1998, LANL Report LA-UR-98-5716 (1998).
- [115] MOKHOV, N.V., “MARS code status”, *Proc. of the Monte Carlo 2000 Conference: Advanced Monte Carlo for Radiation Physics, Particle Transport Simulation and Applications* (KLING, A., et al., Eds), Lisbon, 23–26 October (2000).
- [116] CHATTERJEE, S., BANDYOPADHYAY, T., Estimation of induced activity in superconducting cyclotron at VECC: Monte Carlo calculations, *Indian J. Pure Appl. Phys.* **50** (2012) 498–500.
- [117] KAO, C., SLAC National Accelerator Laboratory Annual Laboratory Plan FY 2016, SLAC National Accelerator Laboratory, Menlo Park, CA (2016).
- [118] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Redevelopment and Reuse of Nuclear Facilities and Sites: Case Histories and Lessons Learned, IAEA Nuclear Energy Series No. NW-T-2.2, IAEA, Vienna (2011).
- [119] HÖFERT, M., FORKEL-WIRTH, D., “The decommissioning of accelerator installations: A challenge for radiation protection in the 21st century”, *Proc. 10th Int. Cong. of the International Radiation Protection Association*, Hiroshima, 2000, Japan Health Physics Society, Tokyo (2000).
- [120] AUSTRALIAN NUCLEAR SCIENCE AND TECHNOLOGY ORGANISATION, Facility licence application, ANSTO, Sydney (2010).
- [121] AUSTRALIAN NUCLEAR SCIENCE AND TECHNOLOGY ORGANISATION, ANSTO Camperdown Facility Decommissioning Plan, ANSTO, Sydney (2010).
- [122] AUSTRALIAN NUCLEAR SCIENCE AND TECHNOLOGY ORGANISATION, Decommissioning Safety Assessment of the ANSTO Camperdown Facility, ANSTO, Sydney (2010).
- [123] AUSTRALIAN NUCLEAR SCIENCE AND TECHNOLOGY ORGANISATION, ANSTO Camperdown Facility Decommissioning, Safety Management Plan, ANSTO, Sydney (2010).
- [124] AUSTRALIAN NUCLEAR SCIENCE AND TECHNOLOGY ORGANISATION, Radiation Protection Plan for Decommissioning of the ANSTO Camperdown Facility, ANSTO, Sydney (2010).
- [125] AUSTRALIAN NUCLEAR SCIENCE AND TECHNOLOGY ORGANISATION, ANSTO Camperdown Facility Decommissioning Emergency Plan, ANSTO, Sydney (2010).
- [126] AUSTRALIAN NUCLEAR SCIENCE AND TECHNOLOGY ORGANISATION, ANSTO Camperdown Facility Decommissioning Security Plan, ANSTO, Sydney (2010).
- [127] AUSTRALIAN NUCLEAR SCIENCE AND TECHNOLOGY ORGANISATION, ANSTO Camperdown Facility Decommissioning Effective Control Plan, ANSTO, Sydney (2010).
- [128] AUSTRALIAN NUCLEAR SCIENCE AND TECHNOLOGY ORGANISATION, ANSTO Camperdown Facility Decommissioning and Waste Management Plan, ANSTO, Sydney (2010).
- [129] CARROLL, L., “Decommissioning and recommissioning cyclotrons”, *Proc. 9th Int. Workshop on Targetry and Target Chemistry*, Turku, Finland, 2002 (ESELIUS, S.-J., LILL, J.-O., RAJANDER, A., Eds), Turku PET Centre, Accelerator Laboratory, Åbo Akademi University, Turku (2002).
- [130] CARROLL, L.R., RAMSEY, F., ARMBRUSTER, J., MONTENERO, M., “Recycling and recommissioning a used biomedical cyclotron”, *Proc. 16th Conf. on the Application of Accelerators in Research and Industry*, Denton, TX, 2000, AIP Conference Proceedings **576** 1 (2001) 639–642.
- [131] REICH, E.S., Physicists raid Tevatron for parts, *Nature* **482** (2012) 453.
- [132] LOOMIS, E., LOS ALAMOS NATIONAL LABORATORY, The Decommissioning of TA-3-16, the Ion Beam Facility (IBF), LA-UR-05-0775, LANL, Los Alamos, NM (2005).
- [133] MILLER, R., Wild New Design: Data Center in A Silo (2009), <https://www.datacenterknowledge.com/archives/2009/12/10/wild-new-design-data-center-in-a-silo>
- [134] COLTMAN, J., The Westinghouse atom smasher??? An IEEE historical milestone, *IEEE transactions on education* **E-30** 1 (Feb. 1987) 37–42.
- [135] BERGER, P., For sale: US\$ 20 million particle accelerator, never used, *Science* (9 Sep. 2009).

- [136] Ameripysics Completes \$6.3M Cyclotron Decontamination and Decommissioning Project (2013), <https://www.ameripysics.com/decommissioning-project.html>
- [137] HOLMES, S.D., SHILTSEV, V., The legacy of the Tevatron in the area of accelerator science, *Annu. Rev. Nucl. Part. Sci.* **63** 1 (2013) 435–465.
- [138] OECD NUCLEAR ENERGY AGENCY, International Structure for Decommissioning Costing (ISDC) of Nuclear Installations, OECD/NEA, Paris (2012).
- [139] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Financial Aspects of Decommissioning, IAEA-TECDOC-1476, IAEA, Vienna (2005).
- [140] NUCLEAR REGULATORY COMMISSION, Financial Assurance and Recordkeeping for Decommissioning, 10 CFR 30.35, US Govt Printing Office, Washington, DC (2011).
- [141] NUCLEAR REGULATORY COMMISSION, Order Suspending Licensed Activities, NRC-2011-0292 (2011), <https://www.nrc.gov/docs/ML1135/ML1135A417.pdf>
- [142] CANADIAN NUCLEAR SAFETY COMMISSION, Record of Proceedings, including Reasons for Decision, Application to Renew the TRIUMF Accelerators Inc. Class 1B Particle Accelerator Operating Licence (2012), <https://www.cnsccsn.gc.ca/eng/the-commission/pdf/2012-05-02-Decision-TRIUMF-e-Edocs3961683-Final.pdf>
- [143] HEINKEL-WOLFE, P., NuView says prospective partner could help company ‘start fresh’, *Denton Rec. Chron.* (24 Dec. 2014).
- [144] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Clearance of Materials Resulting from the Use of Radionuclides in Medicine, Industry and Research, IAEA-TECDOC-1000, IAEA, Vienna (1998).
- [145] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Management of Radioactive Waste from Non-Power Applications — Sharing the Experience (Proc. Int. Conf. Malta, 2001), C&S Papers Series 15, IAEA, Vienna (2002) CD-ROM.
- [146] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Treatment and Conditioning of Radioactive Solid Wastes, IAEA-TECDOC-655, IAEA, Vienna (1992).
- [147] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Radiological Characterization of Shut Down Nuclear Reactors for Decommissioning Purposes, Technical Reports Series No. 389, IAEA, Vienna (1998).
- [148] SULLIVAN, A.H., A Guide to Radiation and Radioactivity Levels Near High Energy Particle Accelerators, Nuclear Technology Publishing, Ashford, United Kingdom (1992).
- [149] MASUMOTO, K., TOYODA, A., EDA, K., IZUMI, Y., SHIBATA, T., Evaluation of radioactivity induced in the accelerator building and its application to decontamination work, *J. Radioanal. Nucl. Chem.* **255** 3 (2003) 465–469.
- [150] Safety of Radioactive Waste Disposal (Proc. Int. Conf. Tokyo, 2005), IAEA, Vienna (2006).
- [151] МЕЖДУНАРОДНОЕ АГЕНТСТВО ПО АТОМНОЙ ЭНЕРГИИ, Вывод из эксплуатации медицинских, промышленных и исследовательских установок, Серия норм безопасности МАГАТЭ, № WS-G-2.2, МАГАТЭ, Вена (2005).
- [152] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Maintenance of Records for Radioactive Waste Disposal, IAEA-TECDOC-1097, IAEA, Vienna (1999).
- [153] KÜPPERS, C., FEINHALS, J., “Clearance of accelerators and removal of accelerator parts from controlled areas”, Proc. 6th Int. Symp. on Release of Radioactive Materials from Regulatory Requirements, Wiesbaden, Germany, 2009.
- [154] МЕЖДУНАРОДНОЕ АГЕНТСТВО ПО АТОМНОЙ ЭНЕРГИИ, Применение концепций исключения, изъятия и освобождения от контроля, Серия норм безопасности МАГАТЭ, № RS-G-1.7, МАГАТЭ, Вена (2006).
- [155] МЕЖДУНАРОДНОЕ АГЕНТСТВО ПО АТОМНОЙ ЭНЕРГИИ, Классификация радиоактивных отходов, Серия норм безопасности МАГАТЭ, № GSG-1, МАГАТЭ, Вена (2014).
- [156] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Predisposal Management of Radioactive Waste from Nuclear Power Plants and Research Reactors, IAEA Safety Standards Series No. SSG-40, IAEA, Vienna (2016).
- [157] HÖFERT, M., FORKEL-WIRTH, D., The Decommissioning of Accelerator Installations: A Challenge for Radiation Protection in the 21st Century, CERN, Geneva (2000).
- [158] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Strategy and Methodology for Radioactive Waste Characterization, IAEA-TECDOC-1537, IAEA, Vienna (2007).
- [159] BEER, H.-F., “Accelerator waste: A disregarded problem?” Proc. WM’01 Conf., Tucson, AZ, 2001.
- [160] AUBERT, M.C., BOURGOIS, L.M., JOLY, J., DAMOY, F., MASSON, L., “Reference radioactive waste zones for the dismantling of particle accelerators”, Proc. Int. Conf. on Management of Radioactive Wastes from Non-Power Applications, Malta, 2001, IAEA, Vienna (2002).

- [161] PAUWELS, N., HORODYNSKI, J.M., ROBERT, P., TADJEDDINE, A., Demantèlement de l'installation nucléaire de Base 106 (LURE), Radioprotection **48** 4 (2013) 545–561.
- [162] HEDBERG, P., HOLMBERG, S., Swedish Nuclear Power Policy, University of Gothenberg (2008).
- [163] TESCH, N., “Dismantling, clearance and radioactive waste at DESY”, Proc. 1st Workshop on Accelerator Radiation Induced Activation, Paul Scherrer Institut, Villigen, Switzerland, 2008.
- [164] МЕЖДУНАРОДНОЕ АГЕНТСТВО ПО АТОМНОЙ ЭНЕРГИИ, Лидерство и менеджмент для обеспечения безопасности, Серия норм безопасности МАГАТЭ, № GSR Part 2, МАГАТЭ, Вена (2017).
- [165] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Safety Assessment for Decommissioning, Safety Reports Series No. 77, IAEA, Vienna (2013).
- [166] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, “Annex II: Graded approach to safety assessment for decommissioning of facilities using radioactive material”, Safety Assessment for Decommissioning, Safety Reports Series No. 77, IAEA, Vienna (2013) CD-ROM.
- [167] АГЕНТСТВО ПО ЯДЕРНОЙ ЭНЕРГИИ ОЭСР, ВСЕМИРНАЯ ОРГАНИЗАЦИЯ ЗДРАВООХРАНЕНИЯ, ЕВРОПЕЙСКАЯ КОМИССИЯ, МЕЖДУНАРОДНАЯ ОРГАНИЗАЦИЯ ТРУДА, МЕЖДУНАРОДНОЕ АГЕНТСТВО ПО АТОМНОЙ ЭНЕРГИИ, ПАНАМЕРИКАНСКАЯ ОРГАНИЗАЦИЯ ЗДРАВООХРАНЕНИЯ, ПРОГРАММА ОРГАНИЗАЦИИ ОБЪЕДИНЕННЫХ НАЦИЙ ПО ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЕ, ПРОДОВОЛЬСТВЕННАЯ И СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННАЯ ОРГАНИЗАЦИЯ ОБЪЕДИНЕННЫХ НАЦИЙ, Радиационная защита и безопасность источников излучения: Международные основные нормы безопасности, Серия норм безопасности МАГАТЭ, № GSR Part 3, МАГАТЭ, Вена (2015).
- [168] МЕЖДУНАРОДНОЕ АГЕНТСТВО ПО АТОМНОЙ ЭНЕРГИИ, Освобождение площадок от регулирующего контроля после завершения практической деятельности, Серия норм безопасности МАГАТЭ, № WS-G-5.1, МАГАТЭ, Вена (2008 год).
- [169] МЕЖДУНАРОДНОЕ АГЕНТСТВО ПО АТОМНОЙ ЭНЕРГИИ, Правила безопасной перевозки радиоактивных материалов, издание 2012 года, Серия норм безопасности МАГАТЭ, № SSR-6, МАГАТЭ, Вена (2013 год).
- [170] ARGONNE NATIONAL LABORATORY, Decontamination and Decommissioning of the 60" Cyclotron Facility at Argonne National Laboratory-East, Project Final Rep. ANL/D&D/01-1, Argonne National Laboratory, IL (2001).
- [171] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Long Term Preservation of Information for Decommissioning Projects, Technical Reports Series No. 467, IAEA, Vienna (2008).
- [172] OFFICE OF ENVIRONMENT, HEALTH, SAFETY & SECURITY, Operating Experience Level 1, 2, and 3 Documents (2011), www.energy.gov/ehss/operating-experience-level-1-2-and-3-documents
- [173] OFFICE OF ENVIRONMENT, HEALTH, SAFETY & SECURITY, Type A Accident Investigation of the June 21, 2001, Drilling Rig Operator Injury at the Fermi National Accelerator Laboratory (2001), www.energy.gov/ehss/downloads/type-accident-investigation-june-21-2001-drilling-rig-operator-injury-fermi-national
- [174] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Policies and Strategies for the Decommissioning of Nuclear and Radiological Facilities, IAEA Nuclear Energy Series No. NW-G-2.1, IAEA, Vienna (2011).
- [175] SUNDERLAND, J.J., ERDAHL, C.E., BENDER, B.R., SENSOY, L., WATKINS, G.L., Considerations, measurements and logistics associated with low energy cyclotron decommissioning, AIP Conf. Proc. **1509** (2012) 16.
- [176] GILLENWALTERS, E.D., HANSEN, T., Pharmaceutical-producing cyclotron characterization, removal and disposition, Proc. 13th Int. Cong. of the International Radiation Protection Association (IRPA13), Glasgow, UK, 13–18 May 2012.
- [177] REIMERS, R., HALEY, J., HAMPTON, G., “184-inch synchrocyclotron decommissioning”, Proc. 1989 Particle Acceleration Conf., Chicago, 1989, IEEE, New York (1989).
- [178] LOUWRIER, P.W.F., SPELT, J., “Dismantling of the Amsterdam 700 MeV linear electron accelerator MEA, electron storage ring AmPS and the experimental halls”, Proc. 7th Workshop on Decommissioning of Installations and Site Remediation, Arnhem, Netherlands, 29–31 Oct. 2003, European ALARA Network (2006).
- [179] LOUWRIER, P.W.F., “Restoration of the former site of the Institute for Nuclear Physics Research in Amsterdam”, Proc. 7th Workshop on Decommissioning of Installations and Site Remediation, Arnhem, Netherlands, 29–31 Oct. 2003, European ALARA Network (2006).
- [180] AUBERT, M.-C., DAMOY, F., JOLY, J.-M., “Retour d'expériences du demantèlement de deux accélérateurs”, Decommissioning Challenges: An Industrial Reality? (Proc. SFEN 2003 Conf., Avignon, 2003).
- [181] AUTORITE de SÛRETÉ NUCLEAIRE, “La sûreté du demantèlement des installations nucléaires de base”, Rapport Annuel, ASN, Montrouge, France (2013).

- [182] SONCK, M., BULS, N., HERMANNE, A., EGGERMONT, G., “Radiological and economic impact of decommissioning charged particle accelerators”, Proc. WM’00 Conf., Tucson, AZ, 2000.
- [183] EGGERMONT, G., HERMANNE, A., BULS, N., SONCK, M., SERRUYS, O., “Prospective analysis of activation and decommissioning of a university cyclotron”, Proc. Int. Conf. on Dismantling of Nuclear Facilities, 15–18 March 1998, Avignon, Vol. 2 (D’ESCATHA, Y., Ed.), Avignon, 1998.
- [184] EGGERMONT, G., BULS, N., HERMANNE, A., VAN SUETENDAEL, W., VERMEERSCH, F., Optimization Opportunities in the Decommissioning of Accelerators, Proc. 1st European ALARA Network Workshop, Saclay, France, 1997, European ALARA Network (2006).

БИБЛИОГРАФИЯ

AMALDI, U., “The First Fifty Years”, Particle Accelerators: From Big Bang Physics to Hadron Therapy, Springer, Switzerland (2015).

CARROLL, L.R., RAMSEY, F.A., “Technical, logistical and administrative aspects of decommissioning and shipping a used cyclotron overseas”, Health Physics of Radiation-Generating Machines (Proc. 30th Midyear Topical Mtg of the Health Physics Society, Health Physics Society, San Jose, CA, 1997).

CLARK, D.J., Accelerators for nuclear physics, Rep. Prog. Phys **35** 3 (1972).

GE HEALTHCARE, PETtrace-unshielded Machine: Summary of Source Terms, Radiation Fields and Radwaste Production, Rep. RP001181, GE Healthcare, Chicago, IL (2004).

HERB, R.G., The Pelletron accelerator, IEEE Trans. Nucl. Sci. **18** 3 (1971).

INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Fusion Physics (KIKUCHI, M., LACKNER, K., TRAN, M.Q., Eds), IAEA, Vienna (2012).

JOSHI, C., Plasma accelerators, Sci. Am. **294** (2006) 40–47.

KULLANDER, S., Accelerators and Nobel Laureates,
<https://www.nobelprize.org/prizes/themes/accelerators-and-nobel-laureates>

LOUGHBOROUGH, D., HAMBLIN, C., “Decommissioning of a hot laboratory and cyclotron to greenfield”, Proc. Int. Conf. on Nuclear Decommissioning, London, 1995.

MALKA, V., et al., Principles and applications of compact laser–plasma accelerators, Nat. Phys. **4** (2008) 447–453.

SESSLER, A., WILSON, E., Engines of Discovery: A Century of Particle Accelerators, World Scientific Publishing, Singapore (2014).

WATANABE, S., et al., “Decommissioning of CNS SF-Cyclotron facility”, Proc. 13th Symp. on Accelerator Science and Technology, Osaka, Japan, 2001, RCNP, Osaka (2001).

WU CHAO, A., TIGNER, M. (Eds), Handbook of Accelerator Physics and Engineering, World Scientific Publishing, Singapore (2002).

WUPPERTAL INSTITUTE FOR CLIMATE, ENVIRONMENT AND ENERGY (Ed.), Comparison among Different Decommissioning Funds Methodologies for Nuclear Installations, Rep. TREN/05/NUCL/S07.55436, European Commission, Brussels (2007).

Приложение I

ПРИМЕРЫ НАЦИОНАЛЬНОГО ОПЫТА

Примеры, представленные в данном приложении, относятся к широкому кругу технических и организационных аспектов вывода ускорителя из эксплуатации. Они приводятся с целью предоставить практическую информации о том, как планируются и осуществляются проекты вывода из эксплуатации ускорителей в разных странах. Приведенные примеры необязательно являются примерами передовой практики; они скорее отражают широкое разнообразие национального законодательства и инфраструктуры, условий площадки и ядерных программ. Представленная информация не является исчерпывающей, и пользователю публикации предлагается оценить применимость этих схем к конкретному проекту вывода ускорителя из эксплуатации.

I-1. ВЫВОД ИЗ ЭКСПЛУАТАЦИИ ТАНДЕМНОГО УСКОРИТЕЛЯ В МИННЕСОТСКОМ УНИВЕРСИТЕТЕ, США

I-1.1. Введение

Целью этого проекта был снос здания тандемного ускорителя (или «тандемного корпуса»), расположенного на восточном берегу реки Миссисипи с северной стороны моста межштатной автомагистрали Interstate 35 West. Когда в 2007 году произошло обрушение моста, актуальными стали вопросы, связанные с тандемным корпусом и его состоянием. На тот момент большая часть корпуса пустовала, за исключением исследовательской лаборатории Центра междисциплинарного применения магнитного резонанса. Вскоре после этого стало ясно, что лабораторию необходимо перевести из тандемного корпуса в другое место из-за близости к работам по сносу и реконструкции моста и связанных с этим рисков для персонала и оборудования. Лаборатория была передислоцирована на новую арендованную площадку за пределами университетского кампуса.

I-1.2. Проект по выводу из эксплуатации

Тандемный ускоритель в Миннесотском университете (рис. I-1) был размещен в исследовательском корпусе, расположенном на восточном берегу реки, рядом с межштатной автомагистралью 35. Дополнительные сведения о тандемном ускорителе приводятся в [I-1]. После того, как в 2007 году произошло обрушение моста межштатной автомагистрали Interstate 35 West, были вновь рассмотрены возможные сценарии аварий вследствие непосредственной близости ускорителя к автомагистрали. В результате проведения этого анализа безопасности было принято решение прекратить все работы в исследовательском корпусе и снести здание.

Проект требовал полного сноса и экологической реабилитации территории тандемного корпуса. Он был передан для исполнения внешнему подрядчику. Важными аспектами этого проекта были сильно укрепленный корпус ускорителя, который был выполнен из 50-миллиметровой прочной стали, и массивная бетонная конструкция толщиной 0,9 м, окружающая корпус.

Вывод из эксплуатации включал демонтаж тандемного ускорителя, что поставило перед университетом новую сложную задачу. Университет не располагал квалифицированным персоналом для выполнения этой задачи, поэтому он нанял подрядчиков, специализирующихся на выводе объектов из эксплуатации. Первоначальный план и график вывода из эксплуатации были составлены на основе информации, предоставленной персоналом ускорителя, и дополнительных исследований, проведенных в ускорительном корпусе. Далее план пересматривался и уточнялся по мере необходимости в ходе осуществления проекта. Возможность повторного использования оборудования ускорителя предполагалась на ранней стадии и была учтена при составлении плана

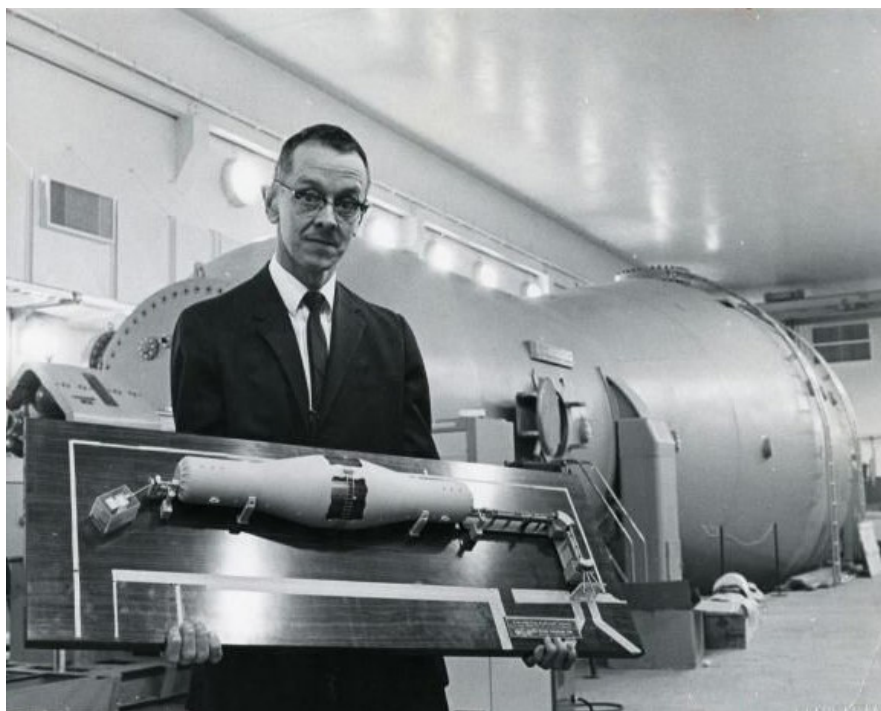


РИС. 1-1. Тандемный ускоритель в Миннесотском университете; макет демонстрирует Дж. М. Блэр (воспроизведено из [1-1] с любезного разрешения Миннесотского университета).

вывода из эксплуатации. Оборудование, которое не соответствовало установленным требованиям и повторное использование которого было бы дорогостоящим, например вакуумный корпус, рассматривалось как отходы.

В процессе планирования были выявлены многочисленные проблемы. Было принято решение о необходимости проведения сейсмического мониторинга во время сноса с целью предотвращения повреждений существующего туннеля, предназначенного для инженерных коммуникаций Миннесотского университета, а также недавно построенного нового моста межштатной автомагистрали Interstate 35 West, находящегося сверху. Из-за близости к реке Миссисипи при осуществлении этого проекта потребовалось принять широкомасштабные меры по борьбе с эрозией.

Пространство, прилегающее к вакуумному корпусу длиной 24 м, использовалось для хранения оборудования; на стадии планирования значительная часть ускорителя вообще не была видна. Потребовалась расчистка этого пространства для обеспечения необходимого доступа к ускорителю. Сам ускоритель находился в большом стальном корпусе длиной 24 м; между торцами корпуса располагалась ферменная опорная конструкция из стекла и алюминия, находящаяся под действием сжимающей силы около 75 т. После вскрытия корпуса потребовалось проведение тестирования на наличие опасных газов, которые использовались в качестве диэлектрической среды. Разборка и демонтаж тяжелой и хрупкой внутренней конструкции были осуществлены с применением системы строительных лесов, легкорельсовой тележки для вывоза элементов оборудования из внутреннего пространства, а также гидравлических домкратов для нейтрализации 75-тонной силы давления на внутреннюю изолированную ферменную конструкцию, служащую опорой для центрального пучкового канала. Были приняты дополнительные меры безопасности, такие как установка веб-камеры внутри корпуса для мониторинга состояния гидравлических домкратов и процесса снятия напряжения.

В общей сложности из здания было вывезено 100 т оборудования, пригодного для повторного использования. Проект планировалось завершить за четыре недели. Планирование

было выполнено за 50 часов, инженерные работы — за 160 часов, и на непосредственные работы на месте потребовалось еще 160 часов. Применение специальных инструментов для осуществления работ по выводу из эксплуатации не потребовалось, при этом на объекте в наличии имелась большая часть необходимых ручных инструментов и оборудования. Вопросам обеспечения безопасности придавался высокий приоритет, поскольку существовала опасность катастрофического разрушения хрупкой внутренней структуры. Данный проект по выводу из эксплуатации был оценен как успешно завершённый.

I-1.3. Выводы

Отдел закупок Миннесотского университета оценил проект по выводу из эксплуатации как весьма успешный. Работы были завершены в срок и в рамках согласованного бюджета. Применение дополнительных мер безопасности, включая использование сейсмического мониторинга с целью предотвращения повреждений существующего туннеля для инженерных коммуникаций университета или недавно построенного нового моста межштатной автомагистрали, оказалось эффективным. Возможность повторного использования оборудования массой 100 т, удаленного из корпуса, была рассмотрена на ранней стадии планирования, и это позволило существенно снизить затраты на обращение с отходами и материалами, предусматриваемые в бюджете, и продемонстрировать передовой опыт.

I-2. «БЕВАТРОН» (КЛАСС 4), НАЦИОНАЛЬНАЯ ЛАБОРАТОРИЯ ИМ. ЛОУРЕНСА В БЕРКЛИ, США

I-2.1. Введение

Эксплуатация протонного синхротрона «Беватрон» в Национальной лаборатории им. Лоуренса в Беркли (ЛБНЛ) была начата в 1954 году; он был способен ускорять протоны на энергию до 6,2 ГэВ. В 1971 году он был подсоединен к линейному ускорителю Super-HILAC (линаку) в качестве инжектора тяжелых ионов; эта связка получила название «Бевалак». Она использовалась для ускорения ядер всех элементов периодической таблицы до релятивистских энергий. Эксплуатация была прекращена в 1993 году, финансирование работ по выводу из эксплуатации началось в 2008 году, и освобожденная от контроля площадка была возвращена лаборатории для повторного использования в начале 2012 года. История объекта описана в [I-2].

I-2.2. Проект по выводу из эксплуатации

Проект предусматривал деактивацию и снос корпусов 51, 51А и ускорителя «Беватрон». Здание корпуса 51, в котором размещался «Беватрон», представляло собой стальную каркасную конструкцию, имело площадь около 1,16 га и было построено в начале 1950-х годов. Здание располагалось в западно-центральной части ЛБНЛ и занимало площадь около 0,9 га. Проект также предусматривал удаление приблизительно 30 000 т радиологически активированного материала, восстановление загрязненных участков грунта в пределах территории корпуса и около усилительных элементов ограждающих стен. Цели проекта заключались в сносе самого большого здания лаборатории, устранении опасностей, связанных с конструкцией и ускорителем, снижении нагрузки на ресурсы лаборатории и обеспечении возможности повторного использования корпуса 51 в будущем. Проект был завершен в соответствии с графиком в феврале 2012 года и обеспечил возврат более 2,4 млн долл. США Управлению науки (решением Critical Decision (CD)-2/3 были утверждены общие расходы по проекту в сумме 50 млн долл. США, и окончательная сумма расходов по проекту составила 47,6 млн долл. США на этапе CD-4). В рамках проекта также была достигнута цель по утилизации более 75% отходов, годных для рециклирования. Несмотря на то,

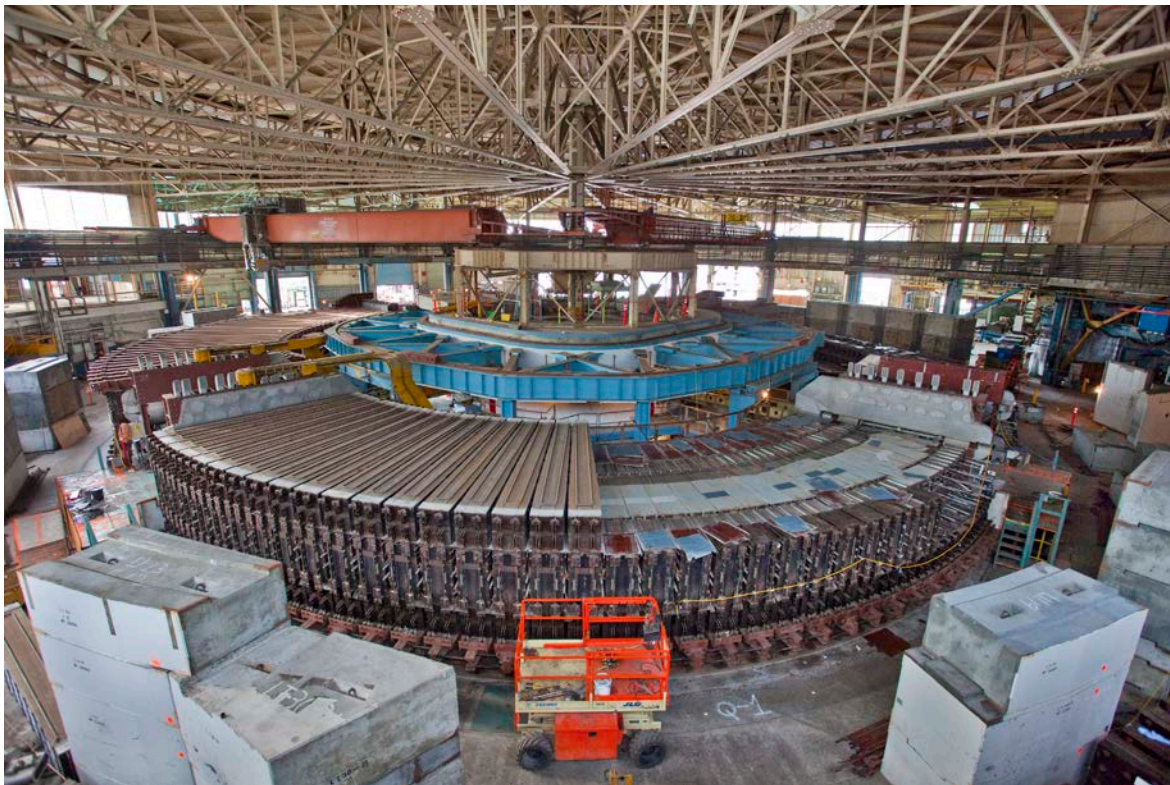


РИС. I–2. Ускоритель «Беватрон» в процессе разборки, 14 января 2010 года. (Фото © 2010 Попечительский совет Калифорнийского университета через Национальную лабораторию им. Лоуренса в Беркли.)

что корпус 51 находился в обветшалом состоянии, что создавало опасности при проведении работ по сносу, работы в объеме более 230 000 часов были выполнены без потерь рабочего времени (лишь с одной зарегистрированной травмой).

Дополнительные сведения о проекте «Беватрон» приводятся в [I–3 — I–5]. На рис. I–2 показан ранний этап осуществления проекта. Более подробная информация о проекте по выводу из эксплуатации «Беватрона» содержится в [I–6].

I–2.3. Достижения

Как отмечается в докладе Министерства энергетики США [I–7]^{1,2}, тремя наиболее успешными результатами этого проекта являются достижения, указанные ниже.

- а) Пороговые и целевые значения. Использование пороговых и целевых значений для ключевых параметров эффективности применительно к критериям завершения проекта, в соответствии с разрешением, содержащимся в постановлении 413.3В МЭ США, и Руководством 413.3-5А МЭ США, позволило успешно завершить проект без конечного понимания уровня необходимого восстановления окружающей среды. Пороговые и целевые значения были указаны в плане осуществления проекта и использовались как ключевые параметры эффективности.

¹ Часть текста в разделах I–2.3 — I–2.5 содержалась в предыдущих докладах, включая доклад о завершении проекта, размещенный на веб-сайте Управления научно-технической информации (OSTI) Министерства энергетики США.

² Доступен в виде дополнительного файла на отдельной веб-странице по адресу: www.iaea.org/publications.

В качестве порогового значения был выбран ключевой параметр эффективности 1900 ярдов³ (0,75 м³) очищенного грунта, и целевое значение для очистки всего грунта соответствовало установленным нормам для повторного использования. В результате осуществления проекта было выполнено требование в отношении ключевого параметра эффективности 1900 ярдов³ (0,75 м³) очищенного грунта, и проведение дальнейших работ по восстановлению не предусматривалось. Если бы потребовались дальнейшие работы по восстановлению, график осуществления проекта и бюджет могли бы оказаться под угрозой.

- b) Участие вышедших на пенсию сотрудников. Использование персонала, имеющего опыт работы на данном объекте и его эксплуатации, в частности привлечение на неполный рабочий день вышедшего на пенсию руководителя службы эксплуатации «Беватрона», явилось отличной стратегией, которая оказалась полезной как ЛБНЛ, так и субподрядчику. Участие бывшего руководителя службы эксплуатации позволило повысить эффективность работы благодаря его знанию процессов, методов и инструментов сборки и демонтажа. Если бы этот бывший сотрудник не был задействован, субподрядчику потребовалось бы дополнительное время для определения наиболее эффективных способов сноса объекта. Были также определены потенциальные опасности, связанные с демонтажем, что, очевидно, способствовало повышению безопасности в ходе осуществления проекта. В случае всех проектов по сносу эффективной практикой является установление отношений с аналогичным опытным персоналом на ранних этапах проекта, по возможности при проведении характеристики объекта.
- c) Единичные расценки для неизвестных объемов. Отражение в тендерной документации неизвестных объемов с помощью единичных расценок обеспечивает снижение риска и непредвиденных расходов, которые участникам тендерного конкурса пришлось бы включать в требующиеся тендерные предложения с фиксированной ценой. В запросе на представление тендерного предложения содержалось требование о том, чтобы участники тендерной процедуры включали единичные расценки на случай, если объем отходов выходит за пределы прогнозируемого диапазона (т.е. образуется больший или меньший объем активированных бетонных блоков защитного экранирования, больший или меньший объем активированной стали и больший или меньший объем грунта, загрязненного полихлорированными дифенилами (ПХД) или летучими органическими соединениями). Если бы единичные расценки не использовались, то участники тендерного конкурса включили бы дополнительные непредвиденные расходы для покрытия дополнительного риска, что привело бы к увеличению затрат. Единичные расценки применялись, когда отклонение не приводило к кардинальным изменениям в проекте; такой подход позволяет сократить число заявок в связи с изменением объема работ.

I–2.4. Возможности усовершенствования

Ниже приводится информация о трех значительных областях, в которых можно добиться усовершенствования, и указано, как они могут отрицательно влиять на проект.

- a) Повышение информированности об ожидаемых пределах обнаружения при проведении анализа образцов. Хотя на момент запроса тендерных предложений действовали четко установленные минимальные обнаруживаемые уровни активности, подрядчик произвел отбор образца, который не требовался, и без обсуждения этого вопроса и одобрения со стороны руководства проекта отправил его в лабораторию, не предоставив ей четкой информации о применяемых минимальных обнаруживаемых уровнях активности. Отсутствие утвержденных в рамках проекта минимальных обнаруживаемых уровней активности в случае этого образца привело к тому, что тесты были проведены в соответствии с более жесткими нормами, чем это требовалось, и в конечном итоге некоторые материалы были объявлены радиологическими отходами, хотя очевидно, что необходимости в принятии такого решения

не было. Если бы субподрядчик имел четкую информацию об ожидаемых значениях минимальных обнаруживаемых уровней активности, можно было бы избежать больших изменений в стоимости и графике осуществления данного проекта. Руководство проекта должно участвовать в рассмотрении и утверждении процедур отбора проб, обеспечивая тем самым проведение исследования образцов только тогда, когда это действительно необходимо, надлежащий отбор образцов, а также выполнение анализа образцов должным образом в целях достижения требуемых показателей качества данных.

- b) Улучшение характеристики опасностей. За несколько лет до этого на более раннем этапе осуществления общего проекта по сносу объекта первоначальная проектная группа подготовила отчет о рекогносцировочной характеристике объекта, а также карты опасностей. До начала этого заключительного этапа произошел ряд изменений в составе проектной группы, что привело к утрате значительной части незадокументированных знаний и связанной с ними информации. Поскольку это узкоспециализированная область, а также в связи с большой рабочей нагрузкой персонала работа по рекогносцировочной характеристике была передана субподрядчикам. Одна из компаний не смогла провести как радиологическую, так и нерадиологическую характеристику, поскольку такая работа относилась к разряду узкоспециализированной. Важным элементом взаимодействия с квалифицированным субподрядчиком является получение плана, составленного на основе предписанного метода, увязанного с историческим использованием зданий, а также привлечение внутренних профильных экспертов к разработке плана отбора проб. Рекогносцировочная характеристика не предназначена для получения полной картины имеющихся опасностей, связанных с материалами. Субподрядчик по сносу должен проявлять должную осмотрительность при фактическом выполнении работ, что должно быть отражено как в запросе тендерных предложений, так и в контрактной документации. Целесообразным могло быть проведение дополнительного отбора образцов, в частности фундамента и грунта под плитами, на начальном этапе планирования или на этапе сноса. Доступ к точкам отбора образцов такого типа может быть затруднен, но характеристика на более раннем этапе обеспечивает уменьшение последствий при проведении работ по сносу субподрядчиками, что позволяет снизить затраты и сократить нарушения графика.
- c) Улучшение формулирования требований в отношении подачи документов субподрядчиками. Качество и своевременность подачи документов должны быть четко оговорены в контрактных документах. Основные правила подготовки документов и требования в отношении их представления должны устанавливаться до уведомления о начале работ. Неудовлетворительное представление документов приводит к увеличению объема работы для организаций, проводящих рассмотрение и принимающих решение об утверждении, что влечет за собой повышение соответствующих расходов и отражается на графике. На основании устных договоренностей в рамках проекта во время рассмотрения уведомления о начале работ было допущено принятие не отвечающих требованиям результатов работы субподрядчика, и этот недостаток в составлении и проработанности документации определил качество и уровень подготовки документов субподрядчиком на протяжении всего срока осуществления проекта. Если бы не было необходимости в повторном рассмотрении, представлении замечаний и переработке документации субподрядчика, не отвечающей установленным требованиям, удалось бы сэкономить средства подрядчика. Возможным решением может быть принятие условия, согласно которому субподрядчик не может приступить к конкретному этапу или выполнению определенных работ до тех пор, пока не будут представлены и утверждены требуемые документы. Необходимо требовать строгого выполнения субподрядчиком контрактных обязательств. Целесообразно рассматривать возможность установления поэтапной оплаты в целях обеспечения представления качественных документов и качественного выполнения работ, а также применения требования о предоставлении документов, касающихся образцов, в составе тендерного пакета или при

заключении контракта для оценки уровня подготовки документации. Необходимо особо подчеркнуть важность обеспечения качества и своевременности представления документов, например, направив субподрядчику примеры результатов, отвечающих ожиданиям.

I–2.5. Другие извлеченные уроки

Из данного проекта можно извлечь множество других уроков, о которых говорится ниже.

- a) Документация по опасностям. При изучении документов и требований не следует считать, что вся историческая информация является точной. Собранная информация должна анализироваться, подлежать одобрению и дополнительно исследоваться до ее принятия и использования в запросе тендерных предложений. Следует перестраховываться, подвергая критическому сомнению историческую информацию. Используемые отчеты должны служить лишь отправной точкой для дальнейшего исследования под руководством новой группы по проекту. Положительным моментом является то, что карты опасностей были обновлены и использованы в запросе тендерных предложений. Эти карты оказались также полезными при получении одобрения Министерства энергетики (МЭ) США на начало работ по проекту. В рамках будущих проектов может быть рассмотрено проведение интервью с членами предыдущей проектной группы в случае, если проекты делятся на различные этапы, на которых могут происходить изменения в составе группы.
- b) Требования МЭ США. В проекте могли использоваться требования постановления 413.3А МЭ США. Использование концепции проектирования с учетом операций по сносу позволило осуществлять работу по проекту в рамках индивидуального подхода, определенного в постановлении 413.3А МЭ США, и объединить этапы CD-2 и CD-3. Это обеспечило экономию времени, необходимого для проведения рассмотрений и подготовки отдельного заключения.
- c) Верификация выполнения постановления. Проектная группа не смогла установить, что данный объем радиоактивного материала на хранении требует подготовки документов по обоснованию официального разрешения или заключения, что документы по обоснованию официального разрешения не требуются. Было принято решение подготовить документы по обоснованию официального разрешения, что потребовало подготовки документа по оценке безопасности и документа о пределах безопасности ускорителя до проведения рассмотрения в рамках объединенных этапов CD-2 и CD-3; подготовка этих документов стала одной из важнейших задач. Целесообразно было бы заранее провести верификацию выполнения постановления МЭ США, с тем чтобы обеспечить надлежащую подготовку и утверждение всех необходимых документов. Целесообразно также проводить независимую перекрестную проверку выполнения постановления МЭ США.
- d) Различия в работе с малыми предприятиями. Подрядчики должны понимать, что субподрядчики и/или другие малые предприятия, специализирующиеся на проведении работ по сносу, часто используют иные подходы, располагают иными ресурсами и обладают иными знаниями и опытом, чем генподрядчики по строительству. Понимание этих различий позволяет подрядчикам и МЭ США определить свои требования в отношении этих вопросов на раннем этапе осуществления проекта.
- e) Межведомственная коммуникация. Подрядные группы, отделы и подразделения должны работать вместе, добиваясь улучшения межведомственной коммуникации. Наем специалиста по радиологическому контролю для проекта занял больше времени, чем ожидалось. Процесс найма был отложен из-за принятого в последний момент решения не использовать работающих на договорной основе специалистов по радиологическому контролю для усиления группы радиационной защиты ЛБНЛ и нанять штатного сотрудника. На эту должность было подано мало заявлений ввиду того, что другие учреждения МЭ США, такие как объекты «Хэнфорд» и «Саванна-Ривер», одновременно проводили набор большого числа специалистов по радиологическому контролю. Первый отобранный кандидат использовал предложение

ЛБНЛ, чтобы получить более высокую зарплату от своего работодателя, и отказался от предложения в последний момент; второй кандидат к тому времени нашел другую работу, и поэтому перед заполнением вакансии пришлось организовать сбор дополнительного числа заявлений. Ввиду того, что процесс проведения собеседований и отбора кандидатов проходил медленнее, чем планировалось, после осуществления начальных этапов проекта произошли изменения в кадровом составе специалистов по радиологическому контролю. Хотя утрата последовательности и частичный охват не привели к долгосрочным проблемам, возникновения такой ситуации вполне можно было избежать. Улучшение коммуникации обеспечило бы достаточное время для найма соответствующего персонала для проекта.

- f) Разработка графика. В графике, представленном субподрядчиком, не были в достаточной степени учтены возможные последствия перемены погодных условий. В графике субподрядчика необходимо принимать во внимание возможность влияния погодных условий; например, следует учитывать дождливые дни в каждом из зимних месяцев. В графике работы субподрядчика не предусматривались непредвиденные расходы; риски субподрядчика учитывались при планировании отдельных видов работ. Указание субподрядчиком непредвиденных расходов в контрактной документации проекта не требовалось, однако определение риска и документирование связанных с графиком остающихся непредвиденных расходов могло бы улучшить понимание возникающих для лаборатории рисков. Кроме того, когда связанные с графиком риски четко указываются при составлении графика, легче согласовывать распоряжения о внесении изменений, обусловленные запрашиваемыми субподрядчиком изменениями в графике.
- g) Планирование надзора за безопасностью. На ранних стадиях планирования в проект было запланировано включить надзор за охраной окружающей среды, здоровья и обеспечением безопасности; характер и объем предполагаемых мероприятий были учтены в плане надзора за охраной окружающей среды, здоровья и обеспечением безопасности в рамках проекта. Выполнение соответствующей работы в связи с данным проектом было поручено экологической службе, службе пожарной охраны, группам по промышленной гигиене, безопасности труда, радиационной защите и обращения с отходами Отдела охраны окружающей среды, здоровья и обеспечения безопасности. Объем поддержки и услуг, оказанных группами по охране окружающей среды, здоровья и обеспечению безопасности, соответствовал ожиданиям или превысил их, и в некоторых случаях потребовался более значительный объем мероприятий, чем предполагалось. Раннее понимание и согласованность мнений в отношении предполагаемого объема мероприятий по охране окружающей среды, здоровья и обеспечения безопасности облегчает планирование и укрепляет уверенность в том, что поддержка будет получена.
- h) Разрешенные пределы освобождения от контроля. Для данного проекта было предложено использовать разрешенные пределы освобождения от контроля; однако утверждение разрешенных пределов освобождения от контроля не гарантировано в штате Калифорния, и даже если бы это было возможно, то скорее всего получение утверждения привело бы к задержке в выполнении графика. При осуществлении будущих проектов, по-видимому, целесообразно проводить оценку положительного эффекта для проекта, достигаемого благодаря применению разрешенных пределов освобождения от контроля (по сравнению со стандартной концепцией «не допускать добавления радиологического материала антропогенного происхождения»), и если этот эффект будет выявлен, то следует заблаговременно запрашивать одобрение на применение разрешенных пределов освобождения от контроля. Ввиду ограничений, действующих в настоящее время в штате Калифорния, это, вероятно, можно будет применять с положительным эффектом только в других штатах.
- i) Стратегия финансирования. Стратегия, примененная в отношении обеспечения финансирования, в частности, способ аккумуляции средств и приостановка проекта с целью накопления достаточных средств для продолжения проекта без повторяющихся этапов и перерывов с развертыванием и свертыванием работ, сработала очень хорошо. Несмотря на

определенный риск для ЛБНЛ, вполне полезным оказалось обращение в МЭ США с просьбой скорректировать и одобрить этот метод. До применения этой стратегии в реализации проекта не удавалось добиться существенного прогресса, и имели место многочисленные кадровые изменения и сбои в работе.

- j) Процесс отбора субподрядчика. Отбор субподрядчика осуществлялся на основе критерия «наиболее выгодное предложение». В результате процесс отбора тендерных заявок прошел без каких-либо нареканий. Только один участник тендера запросил разъяснение. При проведении тендера достаточное число участников представили обоснованные и сопоставимые предложения. Несколько компаний позвонили после истечения срока подачи тендерных заявок, подчеркнув, что, возможно, следует шире распространять информацию об объявлении тендеров в будущем. В случае контрактов данного типа следует и далее использовать критерий наиболее выгодного предложения.
- k) Профессиональная подготовка персонала субподрядчика. ЛБНЛ успешно провела учебные курсы для субподрядчика по конкретным вопросам данного проекта и данной площадки. Первоначально подготовка для персонала проекта, в особенности работников, подвергающихся воздействию излучения, и общего персонала, была организована ЛБНЛ в удобные для проекта сроки. Далее подготовка была проведена субподрядчиком после тщательного рассмотрения учебных материалов группой радиационной защиты и подтверждения группой радиационной защиты, что пересмотренная программа подготовки соответствует требованиям ЛБНЛ. Наличие соответствующей учебной базы у подрядчика при планировании работ по проекту позволяет обеспечить выполнение субподрядчиками требований в отношении профессиональной подготовки.
- l) Штатный специалист по вопросам обеспечения безопасности. Решение включить в группу ЛБНЛ штатного специалиста по вопросам обеспечения безопасности оказалось весьма полезным. Наличие у субподрядчика специалиста по вопросам обеспечения безопасности также является полезным, однако следует учитывать, что персонал субподрядчика, занимающийся вопросами обеспечения безопасности, может иметь конфликт интересов между обеспечением безопасности труда и удовлетворением требований клиентов. Дополнительный надзор за безопасностью со стороны подрядчика, включая как штатный персонал проекта, так и внештатный персонал отдела охраны окружающей среды, здоровья и обеспечения безопасности, работающий вне рамок проекта, способствовал повышению безопасности труда.
- m) Включение предложения участника тендера в контрактную документацию. Включение в контракт предложения участника тендера и запроса тендерных предложений позволило бы избежать ряда последующих вопросов, касающихся объема работ. Важно отметить, что при отсутствии единичных расценок в случае выявления дополнительных активированных блоков защитного экранирования требовались переговоры по содержанию контракта.
- n) Требования к ключевому персоналу. В субподрядный договор необходимо включать описание уровней ключевых сотрудников, их функций и количества времени, которое будет потрачено на проект, а также положение о применении критерия «наиболее выгодное предложение». Относительно небольшое число требований к ключевому персоналу, зафиксированных в тендерной документации, позволило субподрядчику производить смену персонала или сокращать степень его участия. После выбора субподрядчика выяснилось, что он не обладает достаточным опытом в области контроля и планирования осуществления проектов. Спецификации подрядчика можно улучшить за счет более четкого определения требований в отношении ключевого персонала проекта, механизмов контроля и планирования осуществления проекта, а также потребностей в ресурсах.
- o) Ожидаемые результаты программы по стимулированию обеспечения безопасности. Программа по стимулированию обеспечения безопасности, предусмотренная контрактом, не была реализована, как предполагалось. Несмотря на то, что подрядчик поощрял весь коллектив за достижение показателей в области безопасности в виде совместных обедов в

течение рабочего дня и корпоративных мероприятий после работы, использование средств, выделяемых на стимулирование обеспечения безопасности, для выплаты именных премий или награждения за особые заслуги, носило ограниченный характер. Присуждение именных премий и наград за особые заслуги при осуществлении другого проекта ЛБНЛ, связанного с корпусом поддержки пользователей, явилось хорошим примером передовой практики. При разработке будущих программ ЛБНЛ следует предусматривать самостоятельное администрирование программы или более подробно определять требования в отношении программы в контрактной документации.

- p) Бюджет вспомогательных услуг на площадке. Предполагается, что на протяжении всего периода осуществления проекта необходимо обеспечивать наличие некоторых услуг на данной площадке и выполнение появляющихся заказов на производство работ. Примеры включают услуги по определению местоположения инженерных сетей, заказы на выполнение работ по блокировке или установке бирок (система «ЛОТО»), а также по обслуживанию периферийных систем и конструкций, затрагиваемых работами по сносу. Практически нецелесообразно планировать каждую деталь для каждого этапа проекта; соответственно, следует предусматривать достаточные бюджетные средства на поддержку лабораторией этих работ по проекту.
- q) Формат планерок. Проведение субподрядчиком планерок оказалось целесообразным и рекомендовалось для всех крупных проектов ЛБНЛ. Первоначальные планерки были вполне адекватными, при этом обратная связь и накопленный субподрядчиками опыт позволили улучшить их проведение. Планерки признаны важным элементом комплексного управления безопасностью, и дальнейшее применение практики проведения планерок, аналогичных тем, которые проводились в рамках данного проекта, будет способствовать повышению информированности по вопросам обеспечения безопасности в лаборатории.
- r) Получение разрешения на проходку (рытье). Подготовка разрешений на проходку (рытье) со временем улучшилась; первоначальные разрешения налагали значительные ограничения на проведение работ в связи с заброшенными/выведенными из эксплуатации или обесточенными линиями. Разрешения на землеройные работы были выданы с конкретными условиями, облегчающими рабочие процессы; например, в разрешении могло быть указано, что предполагалось наличие заброшенных/выведенных из эксплуатации линий и что после получения согласия руководителя по строительным работам ЛБНЛ производство работ может продолжаться без внесения изменений в разрешение, или указано, что незначительное повреждение обесточенной (или неопасной) системы допустимо при условии, что повреждения будут устранены до завершения работ по проходке. Получение отдельных разрешений на проведение землеройных работ для каждой экскавационной операции могло быть трудоемким и дорогостоящим процессом. С целью исключения многократного получения разрешений на проведение землеройных работ при осуществлении проекта было оформлено подтверждение, что здание изолировано от всех действующих инженерных сетей и что в пределах территории здания можно безопасно проводить экскавационные работы. На основе этого подтверждения проект получил право на отступление от стандартных ограничений в выданном разрешении в отношении как сроков, так и площади. Было утверждено общее разрешение на проведение землеройных работ применительно ко всем работам, связанным со зданием, и оно было выдано со сроком действия на весь запланированный период осуществления проекта.
- s) Предоставление перечня одобренных поставщиков. Целесообразной может быть передача подрядчикам перечня одобренных поставщиков ЛБНЛ или аналогичного документа в начале осуществления проекта. В требованиях к проекту ЛБНЛ указано, что субподрядчики должны быть одобрены ЛБНЛ; однако при этом одобренные субсубподрядчики не были определены. Несколько субсубподрядчиков, выбранных подрядной группой, оказались не

совсем пригодными. Передача перечня одобренных поставщиков и другой информации ЛБНЛ до выбора подрядчика могла бы уберечь подрядчика от проблем, возникающих в связи с привлечением субподрядчиков ненадлежащего уровня.

- t) Привлечение субподрядчика к планированию управления рисками. Субподрядчик может определять риски, стратегии смягчения последствий и потенциальные воздействия, не учтенные подрядчиком. Целесообразным может быть участие субподрядчика на ежеквартальной или полугодовой основе. При осуществлении проекта необходимо периодически привлекать субподрядчика к планированию управления рисками. Это следует делать на отдельном совещании, в ходе которого конфиденциальные риски не сообщаются подрядчику.
- u) Раннее рассмотрение проектных требований. Четкое определение в максимально возможной степени проектных потребностей до начала или на начальном этапе осуществления проекта может значительно повысить перспективы его успешной реализации. В рамках проекта необходимо проводить тщательный анализ критериев осуществления проекта, включая применимые кодексы, стандарты и правила. Целесообразно привлекать соответствующих профильных экспертов для консультаций и выработки рекомендаций на ранней стадии проектирования. Это требует осторожного подхода, поскольку попытки излишне детализировать спецификацию могут оказаться непродуктивными. Необходимо разработать надежный процесс отбора фирм, оказывающих архитектурные и инженерные услуги. При проведении анализа и оценки потенциальных архитектурных и инженерных фирм необходимо учитывать квалификацию ключевого персонала, актуальный недавний опыт, результаты осуществления предыдущих проектов и возможности предоставлять требующиеся услуги.
- v) Определение функций и обязанностей субподрядчика. На начальном этапе осуществления проекта должны быть четко определены функции, обязанности и ожидаемые результаты. Например, в ходе собеседований с субподрядчиком следует четко установить количество времени, которое конкретный персонал субподрядчика будет затрачивать на собственно осуществление проекта, отразив это затем в проектной документации. В случае данного проекта иногда было неясно, кто из сотрудников субподрядчика отвечал за работы, что потребовало многократного коммуницирования с руководством субподрядчика. Одним из средств достижения этой цели могло бы стать требование о представлении субподрядчиками документа, аналогичного плану надзора ЛБНЛ, в котором определялись бы функции, обязанности и объем усилий, планируемых на различных этапах проекта.
- w) Планирование проекта субподрядчиками. В перечень работ в рамках крупного проекта строительных работ необходимо включать требование о подготовке и осуществлении комплексного плана работы с использованием графика работ, составленного с учетом объема работ и обеспеченности ресурсами. В начале этапа строительных работ необходимо согласовать исходный график строительных работ. Постоянное уделение внимание графику с обеспеченностью ресурсами и его регулярное обновление имеют важное значение, поскольку на момент подготовки базисного периода заключены не все субподряды генподрядчиков. Кроме того, необходимо определять минимальный объем работы составителя графика на конкретных этапах осуществления проекта для обеспечения своевременной корректировки графика. Без надлежащей и последовательной корректировки риски, связанные с планированием субподрядчика, могут своевременно не учитываться, в результате чего не обеспечивается достаточное время для разработки мер по исправлению положения или планов действий в чрезвычайных ситуациях.
- x) Планирование графика характеристики. Когда не оказывается возможным или практически невозможно провести характеристику площадки до стадии предварительного проектирования (например, нет доступа к грунту под плитами из-за находящегося на площадке ускорителя), следует предусматривать возможность выполнения характеристики после того, как соответствующие участки объекта станут доступными. В контрактной документации проекта требовалось выделить определенное время для характеристики

грунта, этого времени оказалось недостаточно для проведения характеристики в результате выявления новых загрязнителей. Планирование управления рисками в рамках проекта включало возможную очистку от ранее не идентифицированных загрязнителей под плитами, но также оно должно было предусматривать возможность характеристики; в частности, при планировании управления рисками необходимо было учесть, что приостановка выполняемых субподрядчиком работ может потребоваться до завершения характеристики. В будущих контрактных документах для проведения характеристики следует указывать более длительный срок, чем пять дней, отведенные на характеристику ЛБНЛ в данном проекте.

- у) Своевременность выполнения распоряжений о внесении изменений. В случаях, когда выполнение распоряжения о внесении изменений является неизбежным, необходимо делать все возможное для того, чтобы как можно скорее решить вопросы, связанные с расходами и сроками. В рамках проекта необходимо обеспечивать своевременное получение подтверждающей документации для решения вопроса о внесении изменений. Положения контракта, устанавливающие порядок выдачи распоряжений о внесении изменений, должны предусматривать сроки представления информации, а также варианты действий, которые могут быть рассмотрены группой по осуществлению проекта в случае непредставления информации. Это особенно важно при выполнении распоряжения о внесении изменений, снижающих объем работ и приводящих к занесению средств на кредит счета владельца. Стоимость работ по выполнению распоряжения о внесении изменений должна рассчитываться в максимально возможной степени по форвардной цене. Прежде чем приступить к выполнению работы, необходимо обсудить последствия с точки зрения затрат и сроков. В случаях, когда выполнение распоряжения о внесении изменений планируется как имеющее важное значение и должно быть осуществлено незамедлительно в силу неизвестных условий на объекте, реализация распоряжения о внесении изменений на объекте может облегчить ход работ и уменьшить возможные задержки с выполнением графика.

1-3. ИНТЕНСИВНЫЙ ИМПУЛЬСНЫЙ ИСТОЧНИК НЕЙТРОНОВ, АРГОННСКАЯ НАЦИОНАЛЬНАЯ ЛАБОРАТОРИЯ, США

1-3.1. Введение

Интенсивный импульсный источник нейтронов (IPNS) был первым источником медленных нейтронов скалывания на базе протонного синхротрона. Он проработал 26 лет с 1982 по 2008 год, когда было объявлено о его закрытии [1–8]. Ускорительный комплекс состоял из предускорителя, протонного линака и быстрого циклического синхротрона. Полученные протоны с энергией 500 МэВ доставлялись по транспортной линии к рассеивающей мишени в большом экспериментальном зале IPNS, в котором находилось 12 экспериментальных пучковых каналов. На рис. 1-3 показана схема расположения ускорителей IPNS и экспериментального зала.

IPNS зарекомендовал себя как очень эффективная пользовательская установка, предназначенная для проведения исследований конденсированных сред. Несмотря на успешную программу, эксплуатация IPNS была внезапно и окончательно прекращена 27 декабря 2007 года из-за сокращения государственного финансирования. В 2008 году произошло два сокращения штатов, однако работники, обладающие навыками и опытом, необходимыми для безопасного отключения установки, остались на рабочих местах. К концу сентября 2008 года осталось только шесть сотрудников, которые должны были выполнить планирование и приступить к проведению работ по деактивации и выводу из эксплуатации. Переходный план был разработан и представлен в МЭ США с запросом на финансирование, которое в конечном итоге было предоставлено до конца 2011 финансового года.

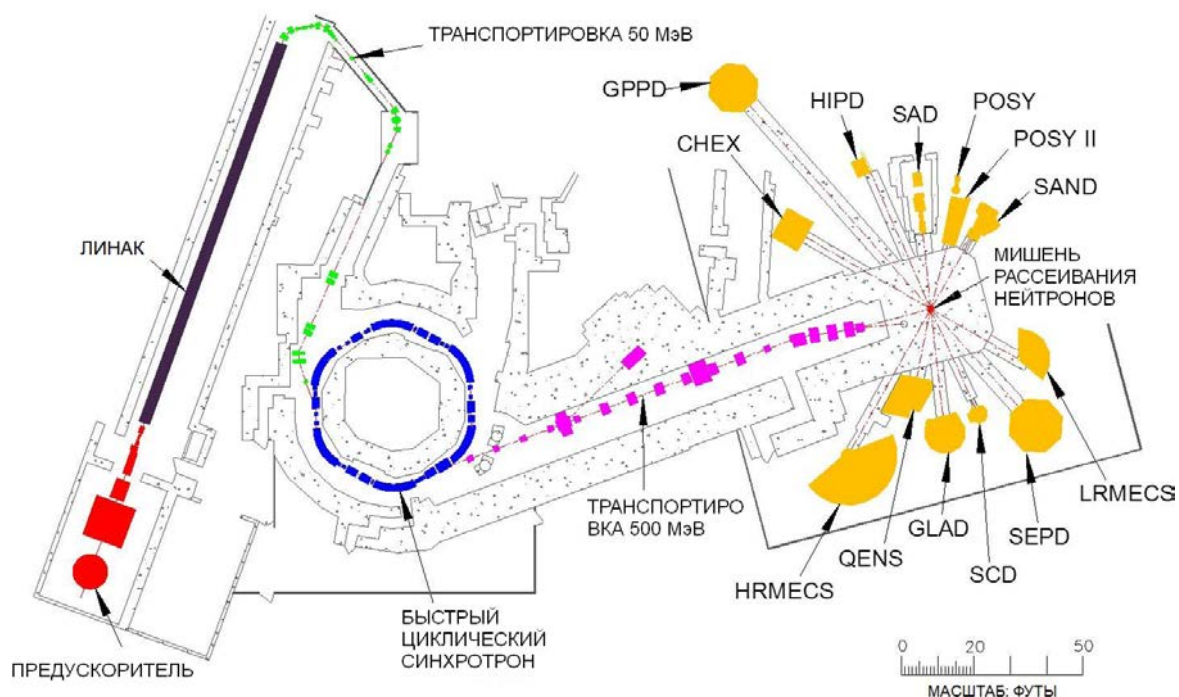


РИС. I-3. Схема расположения ускорителей IPNS и экспериментального зала (любезно предоставлено Аргоннской национальной лабораторией).

I-3.2. Работы по деактивации

Из-за внезапного и незапланированного закрытия объект был оставлен в рабочей конфигурации со множеством экспериментальных образцов, а также оборудованием и расходными материалами. Многие образцы не имели надлежащей идентификации или маркировки. В процессе деактивации источники электроэнергии, вакуума, давления, газа и воды были демонтированы или на них в административном порядке была установлена защита с применением системы блокировки/установки бирок («ЛОТО»). Системы противопожарной защиты, освещения, отопления, вентиляции, кондиционирования, электроснабжения здания, а также обеспечения безопасности и охраны остались в рабочем состоянии.

I-3.3. Работы по демонтажу и удалению

Для того, чтобы сделать здание приемлемым для передачи Управлению охраны окружающей среды МЭ США, необходимо было удалить все материалы/элементы, за исключением конструктивных элементов и компонентов пучковых каналов. Вначале были удалены или идентифицированы все элементы, представлявшие опасность. Вся электропроводка была проверена и промаркирована, вспомогательные источники питания были отключены и удалены. Здание было очищено от всего лишнего оборудования и материалов, что потребовало демонтажа крупных экспериментальных установок и удаления химических веществ, ПХД-содержащих трансформаторов, опасных металлов (например, бериллия, свинца) и доступных радиоактивных материалов. Большое количество пригодного для использования оборудования (например, вакуумные насосы, компьютеры, детекторы, электроника, вспомогательное оборудование) было передано другим программам МЭ США для повторного использования.

I-3.4. Извлеченные уроки

Из данного проекта можно извлечь следующие уроки:

- a) для повышения информированности о возникающих проблемах и оказания поддержки в изыскании финансовых средств необходимо как можно скорее подключать к процессу старшее руководство объекта;
- b) необходимо подбирать наиболее квалифицированный и опытный персонал, поскольку для данной деятельности требуются специальные знания и навыки. В данном проекте человеческая память оказалась более ценным ресурсом, чем хранимая на носителях информация. Отдел кадров Аргоннской национальной лаборатории оказался эффективным в отборе соответствующего персонала при сохранении штата сотрудников;
- c) на раннем этапе необходимо сформировать мультиорганизационные группы. Руководство IPNS организовало совместные оперативные группы с участием подразделений по эксплуатации и обслуживанию установок и по обращению с отходами. Установка IPNS перешла в ведение отдела эксплуатации и обслуживания установок. Удаление всех опасных отходов осуществлялось через отдел обращения с отходами;
- d) проведение ежедневных совещаний группы для обсуждения вопросов, касающихся запланированных работ, контроля и безопасности, может оказаться эффективным для группы по выводу из эксплуатации, насчитывающей примерно десять человек;
- e) руководители должны вести ежедневный рабочий журнал, желательно в твердом переплете для обеспечения его длительного использования. В данном проекте впоследствии оказалась полезной информация о хронологии выполнения многочисленных работ;
- f) программные подразделения, как правило, не удаляют излишки оборудования и материалов в процессе эксплуатации в целях экономии средств. Полезными могут быть ведомственные программы по уборке помещений, такие как программа Аргоннской национальной лаборатории «Чистая уборка»;
- g) контроль и обслуживание отнимают больше времени после закрытия объекта из-за сокращения численности персонала. Это является еще одной причиной для привлечения сотрудников, обладающих необходимыми знаниями;
- h) целесообразным может быть фотографирование всех удаляемых предметов (см. рис. I-4). Для справочных целей необходимо применять идентификационные бирки. С целью облегчения работы с тысячами фотографий следует использовать хорошо продуманную и логичную систему маркировки;



РИС. I-4. Все удаляемые предметы были сфотографированы и каталогизированы. Обратите внимание на использование на фотографии идентификационной маркировки с инвентарным номером, что позволило избежать необходимости проставлять номера или маркировку на множестве фотографий впоследствии (любезно предоставлено Аргоннской национальной лабораторией).

- i) при подъеме тяжелых устаревших элементов, таких как магниты ускорителя, могут возникнуть проблемы с болтовыми скобами. Поиск квалифицированных поставщиков и выполнение квалификационных расчетов инженерами могут потребовать много времени. Целесообразно начинать работу на раннем этапе и предусматривать длительные сроки выполнения заказа;
- j) упрощение требующихся систем позволяет сократить объем технического обслуживания. Например, в данном проекте электронная система обеспечения физической безопасности ускорителя была заменена системой контроля с ключевым замком на входе и нажимной переключателем на выходе (система «антипаника»), которая проста в обслуживании;
- k) не следует недооценивать так называемые простые задачи. Очистка помещений, небольших лабораторий и удаление бумажных папок могут быть весьма трудоемкими операциями. Проверка личных данных и уничтожение документов требуют времени. Существуют юридические требования в отношении хранения документов, и они должны оцениваться руководителями соответствующих учреждений;
- l) удаление экспериментальных образцов является трудоемкой задачей. Образцы необходимо было ранее вернуть ученым-пользователям. Перед удалением необходимо было проводить идентификацию, однако некоторые образцы остались неидентифицированными. Важно анализировать опасности и учитывать знания и навыки работников; в данном случае для нейтрализации некоторых высокореактивных образцов использовалась внешняя компания. Полезно иметь описи образцов;
- m) передача кому-либо и удаление больших количеств неиспользованных промышленных химических веществ, таких как масла, краски и ацетон, представляются трудным делом. Для решения этой проблемы можно рассмотреть возможность использования коммерческой компании, специализирующейся на работах по удалению;
- n) ведомственная онлайн-система контроля избыточных материалов оказалась неадекватной, так как она не была рассчитана на наличие большого количества оборудования и материалов. Ввод данных по отдельным элементам был трудоемким;
- o) отправка материалов для передачи в другие учреждения может быть проблематичной. Запрашивающая сторона часто не осведомлена о транспортных и административных требованиях и расходах. Руководство и запрашивающие стороны не всегда приходят к соглашению. Перед отправкой необходимо получать подпись руководства принимающей организации;
- p) до начала демонтажа объекта по возможности необходимо направлять предварительное уведомление об этом организациям, которые могут быть заинтересованы в получении графической документации и исторической информации;
- q) целесообразно избегать квалифицирования пограничных случаев как смешанные отходы вместо четкого определения в качестве химических или радиоактивных отходов. Это может обеспечить достижение существенной экономии средств.

I-4. ВЫВОД ИЗ ЭКСПЛУАТАЦИИ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ОБОРУДОВАНИЯ ПРИ МОДЕРНИЗАЦИИ УСКОРИТЕЛЯ СЕВАФ В ЛАБОРАТОРИИ ДЖЕФФЕРСОНА, США

Национальный ускорительный центр им. Томаса Джефферсона (Лаборатория Джефферсона) — это исследовательский центр ядерной физики, финансируемый МЭ США. Его ускоритель электронов СЕВАФ на 4 ГэВ начал доставлять пучки в три экспериментальных зала (залы А, В и С) в 1994 году. Ускоритель состоит из двух линаков с использованием сверхпроводящей радиочастотной технологии ускорения, имеющих конфигурацию гоночной трассы. Проведенная в 2000 году первая модернизация установки позволила увеличить энергию ускорителя до 6 ГэВ. Вторая масштабная

модернизация была проведена в период с мая 2011 по сентябрь 2013 года. Целью этой модернизации было повышение энергии электронного пучка до 12 ГэВ и строительство нового экспериментального зала (зала D).

Модернизация с повышением энергии до 12 ГэВ осуществлялась в два основных этапа с шестимесячным периодом эксплуатации, разделяющим два периода сноса и модификаций [I–9]. В туннелях ускорителя модификации включали удаление, модернизацию и переустановку десятков крупных дипольных магнитов и связанного с ними оборудования, а также установку большого количества новых магнитов для соответствующего пучкового канала. В результате модернизации собственно ускорителя образовалось около 20 т отходов (почти полностью металлических), состоящих из дипольных магнитов и их опорных конструкций, кабелей, трубопроводов, кабельных лотков и т.п. Два из первоначальных экспериментальных залов были подвергнуты значительной реконфигурации. В зале В был полностью демонтирован первоначальный пакет мишенных детекторов. Большая часть оборудования в зале В была освобождена от контроля как нерадиоактивная. В зале С короткоорбитальный спектрометр (см. рис. I–5) был демонтирован и удален. Перестройка экспериментальных залов привела к образованию большого количества активированного бетона, а также массивных металлических конструкций, для которых требовалось обеспечить удаление/захоронение. Один только короткоорбитальный спектрометр стал источником более 180 т отходов, часть из которых — около 43 т бетона — была освобождена от контроля как нерадиоактивная. Окончательный подсчет радиоактивных материалов, с которыми необходимо было обеспечить обращение как с отходами, указал на наличие приблизительно 150 т металлов и более 230 т бетона. Из этого объема материалов приблизительно 136 т слабо активированного бетона находилось на хранении с целью обеспечения радиоактивного распада и конечного освобождения от контроля. Обращение с остальной частью (всего около 250 т) осуществляется в соответствии с пятилетним планом, утвержденным МЭ США, который включает в себя разработку специальных разрешенных пределов освобождения от контроля для части отходов. Примеры радиоактивных материалов, собранных в процессе вывода из эксплуатации, показаны на рис. I–6 — I–8.

Экспериментальный зал представляет собой цилиндрическую конструкцию, которая имеет внутренний диаметр 46,4 м и высоту 15 м в наивысшей точке. Электроны поступают из ускорителя в пучковом канале, пересекающем зал от нижнего правого к верхнему левому углу, проходят

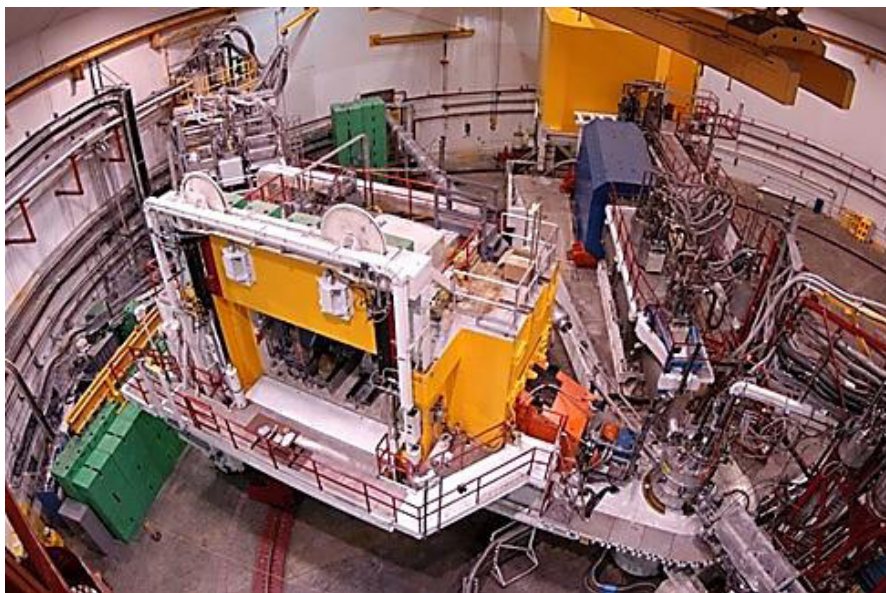


РИС. I–5. Экспериментальный зал С перед модернизацией до 12 ГэВ; показаны короткоорбитальный спектрометр и высокоимпульсный спектрометр (любезно предоставлено компанией Jefferson Science Associates, LLC).



РИС. I-6. Каркас короткоорбитального спектрометра из экспериментального зала С с маркировкой веса в фунтах (любезно предоставлено компанией Jefferson Science Associates, LLC).



РИС. I-7. Поворотный механизм из экспериментального зала С с маркировкой веса в фунтах (любезно предоставлено компанией Jefferson Science Associates, LLC).



РИС. I–8. Неиспользованные излишние дипольные магниты на переднем плане, бетонные экранирующие блоки на заднем плане и фрагменты бетонной плиты перекрытия из экспериментального зала С справа на заднем плане (любезно предоставлено компанией Jefferson Science Associates, LLC).

через цилиндрическую мишенную камеру и продолжают движение к ловушке пучка за стеной зала. Короткоорбитальный спектрометр и высокоимпульсный спектрометр находятся на левой и правой стороне пучкового канала соответственно. Рамы короткоорбитального спектрометра и высокоимпульсного спектрометра могут вращаться на шарнирах под мишенной камерой.

I–5. ДЕМОНТАЖ УСКОРИТЕЛЯ КЛАССА 4: БОЛЬШОЙ ЭЛЕКТРОН-ПОЗИТРОННЫЙ КОЛЛАЙДЕР, ЦЕРН (2000–2001 ГОДЫ)

I–5.1. Введение

Большой электрон-позитронный коллайдер (LEP) Европейской организации ядерных исследований (ЦЕРН) был введен в эксплуатацию в 1989 году. До 1995 года он работал с энергией пучков 45,6 ГэВ для изучения образования Z^0 -частиц. В конце 1995 года началась фаза LEP2 с постепенным увеличением энергии коллайдера выше порога образования W-пар. Цель состояла в получении энергии 100 ГэВ в пучке в 1999 году; этот уровень был превышен в 2000 году, последнем году эксплуатации коллайдера, когда LEP достиг энергии пучка 104 ГэВ. В период эксплуатации LEP2 основными модификациями в коллайдере были добавлены устройства: а) новая ускорительная система с использованием сверхпроводящих радиочастотных резонаторов; б) система ловушки.

Ускоритель, который был смонтирован под землей на глубине от 50 до 170 м, имел восьмистороннюю схему с восемью дугами, восемью длинными прямыми секциями и периметр/длину 26 658 м (рис. I–9). Четыре эксперимента — L3, ALEPH, OPAL и DELPHI — были расположены в точках взаимодействия в центре прямых секций.



Рис. 1-9. Пример экспериментального зала ускорителя LEP (любезно предоставлено ЦЕРН).

Строительство Большого адронного коллайдера в тоннеле LEP потребовало демонтажа LEP после 11 лет эксплуатации. Вывод из эксплуатации начался в начале 2001 года и был завершен к февралю 2002 года. Более подробную информацию об этом демонтаже можно найти в [1–10].

Прежде чем можно было бы приступить к демонтажу, необходимо было провести полную характеристику ожидаемого объема радиоактивного материала низкого уровня активности, подлежащего удалению во время проведения работ по выводу ускорителя из эксплуатации.

Швейцарские нормы в области радиационной защиты не предусматривают безусловные уровни освобождения от контроля (т.е. пороговые значения, ниже которых материал может рассматриваться как нерадиоактивный) применительно к концентрации активности (активности на единицу массы) в материалах, освобождаемых от контроля и переходящих в категорию общественного достояния. Освобождение материала от контроля может быть разрешено только после выполнения детального теоретического исследования, подкрепленного экспериментальными измерениями.

Основное ограничение, налагаемое швейцарским законодательством, заключается в том, что материалы или оборудование, классифицируемые в рамках зонирования как радиоактивные, не могут быть переведены в категорию обычных после проведения измерений независимо от того, насколько точно последние показывают отсутствие следов наведенной радиоактивности. Материал может быть «деклассифицирован» только путем пересмотра зонирования области его происхождения. Из более чем 30 000 т материала, удаленного из самого ускорителя, только около 3% были классифицированы как радиоактивные.

1-5.2. Планирование вывода из эксплуатации

Работа над проектом по выводу из эксплуатации LEP началась за несколько лет до фактической остановки коллайдера. Работа по организации проекта была начата в 1999 году после

определения основных технических и логистических проблем, связанных с вывозом оборудования из подземных зон. В начале осуществления проекта были выявлены основные проблемы, связанные с:

- a) обеспечением соответствия национальным (швейцарским) регулирующим положениям;
- b) выполнением графика осуществления проекта (в связи со строительством Большого адронного коллайдера);
- c) наличием ограниченных ресурсов.

Были определены более 140 основных видов работ, установлены план проекта и предварительный график, и в течение всего периода осуществления проекта при необходимости в них вносились коррективы. Руководящий комитет осуществлял мониторинг осуществления различных этапов вывода из эксплуатации.

Мониторинг обеспечения безопасности проводился на протяжении всего времени осуществления проекта с целью удержания доз облучения персонала на разумно достижимом низком уровне. Радиационный контроль, применяемый на нескольких последовательных этапах вывоза и захоронения материала, был направлен на обеспечение наивысшего уровня уверенности в верификации прогнозируемой активности. Проект демонтажа включал:

- 1) подготовительный этап;
- 2) исследования и подготовку документации;
- 3) проведение тендеров и закупок;
- 4) планирование;
- 5) создание инфраструктуры;
- 6) обеспечение прослеживаемости, зонирования, радиационной защиты и рециклирования;
- 7) обеспечение физической безопасности и временное хранение;
- 8) исполнение проекта;
- 9) обеспечение безопасности, профессиональной подготовки и транспортирования;
- 10) осуществление координации и контроль за реализацией проекта.

При разработке документации по вопросам безопасности, общим рабочим процедурам и специальным процедурам (например, по обеспечению радиационной защиты), а также для анализа рисков потребовалось подготовить около трехсот страниц текста (с привлечением значительных ресурсов).

I–5.3. Исполнение проекта

В связи с повторяющейся структурой ускорителя (восемь дуг, восемь прямых секций, четыре больших экспериментальных зала и т.д.) проект осуществлялся поэтапно с использованием ограниченного числа бригад, следующих друг за другом в туннеле и последовательно выполняющих демонтаж элементов и обеспечивающих систем ускорителя.

Ускоритель был разделен на 50 секций примерно в соответствии с электрическими секторами установки. Для каждой зоны была установлена соответствующая процедура.

Список задач по демонтажу был следующим:

- создание участков, свободных от попадания пучка;
- проведение детального радиологического обследования для подтверждения предварительной оценки;
- обеспечение безопасности и готовности оборудования к демонтажу;
- удаление радиоактивных объектов;
- отсоединение вакуумных компонентов;

- отсоединение вакуумной камеры и шин;
- удаление пучковых компонентов;
- удаление кабелей;
- удаление охлаждающих трубопроводов;
- очистка и удаление оставшихся мелких предметов;
- проведение радиологического обследования и реклассификация зон.

В общей сложности примерно 30 000 т оборудования пришлось удалить из зон LEP и еще 10 000 т — из участков для проведения экспериментов. Эти материалы были разделены на четыре категории: оборудование, подлежащее хранению для будущего повторного использования в качестве обычных (т.е. без активации) либо радиоактивных материалов, и материалы, подлежащие удалению в качестве отходов — также в качестве обычных отходов (для продажи в виде лома) либо слабо радиоактивных (остающихся на хранении на площадке ЦЕРН).

При характеризации материалов учитывались возможные явления активации:

- a) локализованные потери пучка (преимущественно в большинстве частей кольца), включая:
 - облучение образцов и анализ с помощью гамма-спектрометрии;
 - определение коэффициентов пересчета потерь мощности пучка в наведенную удельную активность насыщения;
- b) распределенные потери пучка: путем симуляции;
- c) синхротронное излучение: расчеты методом Монте-Карло показали, что при $E < 105$ ГэВ активация за счет синхротронного излучения является пренебрежимо малой;
- d) высокоэнергетическое рентгеновское излучение, создаваемое сверхпроводящими радиочастотными резонаторами: измерения.

I–5.4. Измерение гамма-спектра во время демонтажа

В дополнение к измерениям мощности дозы, выполненным на всем оборудовании на подземных участках LEP, были выборочно взяты образцы различных материалов (например, кабелей, кабельных лотков, диполей, ярма магнитов, гаек и болтов, бетона пола и стен туннеля) и проанализированы методом гамма-спектрометрии. Эти измерения проводились на материалах четырех классов:

- 1) материале, классифицированном как обычный согласно результатам исследования по зонированию и подтвержденном в качестве обычного в результате радиационной проверки (т.е. в качестве нерадиоактивного материала);
- 2) материале, классифицированном как обычный согласно результатам исследования по зонированию, но по результатам измерений являющемся материалом с очень низкой активностью (т.е. с аномалиями);
- 3) материале, классифицированном как имеющем очень низкую активность согласно результатам исследования по зонированию, но по результатам измерений являющемся обычным материалом;
- 4) материале, классифицированном как имеющем очень низкую активность согласно результатам исследования по зонированию и подтвержденном в качестве такового по результатам измерений.

Все измерения проводились с помощью высокочувствительного низкофонового детектора из особо чистого германия фирмы «Канберра» (чувствительный объем 245 см³; эффективность регистрации 60% при энергии 1,33 МэВ). На рис. I–10 показаны сверхпроводящие модули



РИС. I-10. Семьдесят два сверхпроводящих резонатора ускорителя на хранении после демонтажа. Длина каждого модуля около 12 м (любезно предоставлено ЦЕРН).



РИС. I-11. Очень низкоактивные отходы от демонтажа LEP (любезно предоставлено ЦЕРН).

ускорителя, которые хранились после демонтажа; каждый модуль имел длину около 12 м. На рис. I–11 можно видеть отходы очень низкого уровня активности, образовавшиеся в результате демонтажа LEP.

Вся система сверхпроводящих ускоряющих модулей (72 модуля, объем около 2000 м³ и масса 440 т) была исследована в 2017 году на предмет выявления остаточной активности. На основе тщательных измерений, подкрепленных компьютерными исследованиями, выполненными с применением метода Монте-Карло, 95% материалов оказалось возможным освободить от регулирующего контроля. Оставшиеся 5% материалов слегка превышали установленный швейцарским законодательством предел для освобождения от контроля в качестве обычных отходов и хранились в ЦЕРН с целью дальнейшего удаления в качестве низкоактивных отходов. Радиологическая характеристика была основана на определении соотношений активности, позволяющих связать активность не гамма-излучающих радионуклидов с активностью «ведущего нуклида», являющегося источником гамма-излучения (например, ²²Na или ⁶⁰Co) для каждого участка и для каждого типа материалов.

Швейцарским органам было представлено очень подробное описание процедуры отбора образцов с целью подтверждения расчетов. Он основывался на образцах, отобранных из наиболее активированных деталей и конструкций в соответствии с расчетами и измерениями, проведенными в ходе эксплуатации установки; образцы отбирались таким образом, чтобы они были репрезентативными для каждой части модулей и каждого типа материалов.

До и во время демонтажа ускорителя были проведены эксперименты по оценке радиоактивности, наведенной в материалах LEP, которые в наибольшей степени применялись на объекте, а именно в алюминии (вакуумные камеры, шины возбуждения дипольных магнитов), меди (радиочастотные резонаторы, катушки магнитов, вакуумные соединения, коллиматоры), свинце (защитное экранирование вокруг вакуумной камеры), нержавеющей стали (вакуумные камеры, вакуумные клапаны, сильфоны) и железобетоне (диполи). Состав и основные следовые элементы в различных материалах, представляющие интерес как для расчетов методом Монте-Карло, так и для анализа с применением гамма-спектрометрии, были рассмотрены, и соответствующие данные приведены в таблице I–1.

Все транспортные средства, которые использовались для перевозки обычных материалов в пункты приема металлолома, проходили конечный радиационный контроль с применением высокочувствительного портального монитора. Портальный монитор оказался очень надежным инструментом и позволял обнаруживать даже очень слабые уровни излучения радиоактивных материалов.

ТАБЛИЦА I–1. СОСТАВ И ОСНОВНЫЕ СЛЕДОВЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ В МАТЕРИАЛАХ LEP

Материал LEP	Основные следовые элементы	Масса (%)
Al тип 6060 ^a	Si	0,3–0,6
	Fe	0,10–0,30
	Cu	0,10
	Mn	0,10
	Mg	0,35–0,6
	Cr	0,05
	Zn	0,15
	Ti	0,10
	Прочие	0,15

ТАБЛИЦА I–1. СОСТАВ И ОСНОВНЫЕ СЛЕДОВЫЕ
ЭЛЕМЕНТЫ В МАТЕРИАЛАХ LEP (продолж.)

Материал LEP	Основные следовые элементы	Масса (%)
Pb (99,94%)	Ag	0,0015 max.
	Cu	0,0015 max.
	Ag+Cu	0,0025 max.
	As+Sb+Sn	0,002 max.
	Zn	0,001 max.
	Fe	0,002 max.
	Bi	0,050 max.
Нержавеющая сталь 316L ^b	Cr	16–18,5
	Ni	11–14
	C	0,03 max.
	Si	1 max.
	Mn	2 max.
	Mo	2,5 max.
	N	0,05 max.
	P	0,03 max.
	S	0,01 max.
	Co	0,22 max.
Бескислородная медь с высокой проводимостью (OFHC) (99,99% Cu) ^c	Ca	1×10^{-4}
	P	3×10^{-4}
	S	$1,8 \times 10^{-3}$
	Zn	1×10^{-4}
	Hg	1×10^{-4}
	Pb	1×10^{-3}
	Bi	1×10^{-3}
	O	1×10^{-3}
Fe диполей LEP ^{d,e}	C	$1-2 \times 10^{-3}$
	P	$7-14 \times 10^{-3}$
	Mn	$165-218 \times 10^{-3}$
	Ni	$18-21 \times 10^{-3}$
	Cr	$10-16 \times 10^{-3}$
	Cu	$8-25 \times 10^{-3}$

^a Остальное — алюминий.

^b Остальное — железо.

^c Общая концентрация семи элементов As, Sb, Bi, Se, Te, Sn и Mn не превышает 40 частей на миллион.

^d Остальное — железо.

^e Разброс в процентах относится к разным отливкам.

I–5.5. Извлеченные уроки

По окончании проекта демонтажа можно извлечь некоторые уроки.

I–5.5.1. Оценка наведенной радиоактивности

Некоторые оценки ожидаемого количества наведенной радиоактивности в LEP были проведены на этапе проектирования коллайдера [I–11, I–12]. Факторы, учитываемые при расчете этих оценок, были ограниченными и основывались на предположениях о распределении потерь пучка, которые не всегда подтверждались эксплуатационным опытом и поэтому имели ограниченное применение при планировании вывода из эксплуатации.

Из-за отсутствия четкого понимания конструкции или плохого знания элементов конструкции, установленных в туннеле, и, в частности, их подробного химического состава и условий облучения, в начале осуществления проекта необходимо было провести системный радиохимический анализ с целью оценки влияния следовых элементов на общую активацию материалов (например, определения количества кобальта в нержавеющей стали, который является источником возникновения ^{60}Co).

I–5.5.2. Радиационная защита

С точки зрения радиационной защиты измерения мощности дозы, проведенные в подземных зонах, были очень точными. Фактически лишь в нескольких случаях при прохождении через порталный монитор транспортных средств сработала сигнализация (конечный контроль материала при вывозе с территории ЦЕРН), что свидетельствует о том, что слабо активированные предметы не были подвергнуты первичному измерению. И наконец, об удовлетворительно организованной работе свидетельствует тот факт, что ни одно из примерно 1600 автотранспортных средств, вывозивших из ЦЕРН металл для рециклирования, не было возвращено в ЦЕРН из-за обнаружения радиоактивности на посту мониторинга в пункте приема металлолома.

Индивидуальные дозы облучения работников, участвовавших в выполнении работ, были очень низкими, при этом коллективная доза для почти 250 работников за период их работы в течение 15 месяцев, составила менее 7 мЗв. Максимальная полученная индивидуальная доза не превысила 0,55 мЗв.

I–5.5.3. Менеджмент

Хорошие результаты были достигнуты в координации большого количества работ в условиях жестких ограничений по времени: установленный рабочий день был равен восьми часам. На случай непредвиденных обстоятельств была предусмотрена возможность сменной работы.

Одной из проблем в процессе демонтажа было ограниченное количество складских помещений в ЦЕРН. Так, в ходе демонтажа LEP одновременно требовались складские помещения для других проектов, в частности проекта по крупномасштабной модернизации инжекторной цепи.

I–5.5.4. Прослеживаемость

Была проведена тщательная инвентаризация оборудования, подлежащего удалению, с нанесением штрих-кодов на детали и узлы. Это обеспечило наличие детальной информации об общем количестве материалов и элементов конструкций, подлежащих демонтажу (67 000 единиц конструкции LEP), и вместе с тем потребовало последовательного инвестирования средств и применения очень точных процедур (включая, например, использование баз данных и последующий контроль).

I–5.5.5. Отходы и рециклирование

Более половины оборудования (по массе) было удалено из туннеля в виде цельных единиц, которые могли быть пригодны для рециклирования или повторного использования (в качестве ценного материала). Это оборудование ЦЕРН было передано в дар другим исследовательским институтам или ускорительным центрам.

I–5.5.6. Технические проблемы

Перед началом вывода из эксплуатации было запланировано и проведено профилактическое обслуживание всей транспортной техники, что позволило добиться низкого уровня отказов оборудования в ходе осуществления проекта по выводу из эксплуатации и, следовательно, высокого показателя безостановочной работы на объекте.

I–5.5.7. Инциденты/аварии

В ходе демонтажа крупных аварий или инцидентов не было; многочисленные мелкие инциденты и аварии объясняются недостаточной подготовкой персонала подрядчика.

I–6. ВЫВОД ИЗ ЭКСПЛУАТАЦИИ ЛИНЕЙНОГО УСКОРИТЕЛЯ В ГЕРМАНИИ (КЛАСС 1)

I–6.1. Введение

Одной из наиболее распространенных областей применения линаков является лечение рака методом лучевой терапии. Эти ускорители обычно имеют высокую рабочую нагрузку из-за постоянно растущей потребности их применения для лечения онкологических заболеваний. Нормальный срок службы такого устройства составляет 10–20 лет. Существуют различные причины для закрытия и вывода из эксплуатации линаков. К ним относятся:

- a) появление новых технологий или методов лечения рака, в случае которых существующие аппараты не могут быть адаптированы для их применения;
- b) выход из строя или повреждение таких компонентов ускорителя, как подшипники;
- c) смена поставщика (изготовителя) аппаратов, используемых в системе лечебных учреждений, когда необходимо обеспечить, чтобы все аппараты были одинаковыми в целях облегчения ротации персонала и проведения работ по техническому обслуживанию.

Вывод ускорителя из эксплуатации в данном случае проводился вследствие последней из указанных причин. Лечебное учреждение входило в одну из крупнейших групп больниц и медицинских учреждений Германии. Эта группа регулярно обновляет свое оборудование. В приводимом примере планировалось увеличение общего числа ускорителей, и отделение необходимо было равномерно оснащать аппаратами одного производителя в течение трехлетнего периода. Поэтому четыре старых ускорителя требовалось вывести из эксплуатации. Первый линак был выведен из эксплуатации силами лечебного учреждения, но остальные три аппарата выводились из эксплуатации коммерческой компанией, специализирующейся на проведении работ по выводу из эксплуатации («Gamma-Service Recycling GmbH»). Подрядчику предложили представить коммерческое предложение по выводу из эксплуатации каждого оставшегося аппарата, и все три предложения были приняты. Ниже описывается вывод из эксплуатации последнего линака.

Ускоритель был типа SLi (SLi расшифровывается как «скользящее окно», англ. sliding window). Аппарат имел заводской номер 5552 и был изготовлен в 1998 году и в том же году установлен в больнице. Ускоритель использовался на регулярной основе для лечения рака вплоть до 18 апреля 2012 года с небольшими перерывами в работе для планового технического обслуживания, проведения работ по модернизации или ремонту.

Ускоритель типа SLi, показанный на рис. I–12, представляет собой ускоритель с бегущей волной, который был дооснащен многоканальным коллиматором. Обычно уровни энергии фотонов, используемых для лечения рака с помощью этого аппарата, составляли 4 и 10 МэВ, хотя на нем было возможно получать более высокие энергии. Более высокие энергии используются только для специальных применений, но применение таких энергий может привести к активации некоторых частей ускорителя.

I–6.2. Проект по выводу из эксплуатации

До того, как было представлено коммерческое предложение на выполнение работ по выводу ускорителя из эксплуатации, лечебному учреждению был направлен контрольный список для заполнения. Подрядчик по выводу из эксплуатации имел возможность получить информацию о новом ускорителе, который должен быть установлен, однако контрольный список оказался полезным инструментом сбора другой информации, необходимой при выводе из эксплуатации, которую новая организация по монтажу не сможет предоставить (например, деталильные сведения о легкости доступа к оборудованию для целей демонтажа, а также о легкости перемещения материалов в рассматриваемую зону и из нее). В описываемом примере была также проведена инспекция объекта. На основе полученной информации было подготовлено коммерческое предложение на выполнение работ по выводу ускорителя из эксплуатации. После того, как предложение было принято, подрядчик по выводу из эксплуатации скоординировал проведение работ по выводу



РИС. I–12. Ускоритель типа SLi (любезно предоставлено компанией Ion Beam Applications SA).

ускорителя из эксплуатации с ответственными органами, изготовителем и лечебным учреждением. Подрядчик по выводу из эксплуатации имел разрешение на проведение работ по выводу из эксплуатации, которое не было привязано к конкретной площадке (т.е. не ограничивалось только данной площадкой). Это означало, что подрядчику по выводу из эксплуатации было разрешено проводить работы по обращению с радиоактивными материалами на площадке, на которой был размещен линак, при условии распространения действия этого имеющегося у него разрешения на другие объекты по согласованию с ответственным учреждением. В данном проекте ответственным учреждением был регулирующий орган, курирующий данный линейный ускоритель (линак).

Демонтаж этого малогабаритного ускорителя был начат 24 апреля 2012 года и завершен 25 апреля 2012 года. Подрядчик по выводу из эксплуатации работал вместе с квалифицированным субподрядчиком, который имел разрешение, выданное в соответствии с постановлением о радиационной защите Германии ([I-13]), для работы на зарубежных объектах. Субподрядчик выполнил сложный демонтаж и удаление неактивных отходов. Областью специализации субподрядчика была необычная логистика (например, монтаж и вывод из эксплуатации медицинских устройств), при этом субподрядчик обладал опытом демонтажа линаков, а также других ускорителей.

Подрядчик по выводу из эксплуатации предложил полный комплекс услуг по выводу ускорителя из эксплуатации, включая составление плана вывода из эксплуатации и подачу заявок на любые регулирующие разрешения. Помимо оформления всех необходимых документов подрядчик по выводу из эксплуатации проводил работы по демонтажу во взаимодействии с субподрядчиками, обеспечил принятие мер по обеспечению радиационной защиты и общей безопасности, выполнил работы по транспортировке материалов с площадки с должным учетом требований Европейского соглашения о международной дорожной перевозке опасных грузов и обеспечил рециклирование неактивных компонентов в соответствии с Директивой об отходах электротехнического и электронного оборудования.

Перед началом работ по демонтажу ответственный за радиационную защиту сотрудник подрядчика по выполнению работ по выводу из эксплуатации подписал соглашение между лечебным учреждением и подрядчиком по выводу из эксплуатации, которое позволило подрядчику применять свое собственное разрешение, полученное в связи с §7 постановления об обеспечении радиационной защиты ([I-13]) в лечебных учреждениях, применительно к рабочим зонам в облучательном бункере. Это было необходимо, так как требовалось предварительное разрешение на вывод из эксплуатации ускорителя, а у лечебного учреждения не было такого разрешения, включенного в лицензию на эксплуатацию. Следующим этапом был инструктаж всего персонала, работающего в зоне, по мерам радиационной защиты и процедурам обеспечения безопасности труда, что было подтверждено в протоколе по проекту. После завершения оформления документов начался процесс собственно демонтажа. Некоторые технические данные подлежащего демонтажу циклотрона, показанного на рис. I-13, представлены в таблице I-2.

В процессе демонтажа ускорителя ответственный за радиационную защиту сотрудник подрядчика по выполнению работ по выводу из эксплуатации отделил активированные детали ускорителя с использованием различных видов измерительного оборудования (например, измерителя мощности дозы и монитора радиационного загрязнения). Активированные детали были упакованы в соответствии с правилами перевозки радиоактивных грузов, предусмотренными в Европейском соглашении о международной дорожной перевозке опасных грузов. При выполнении этих работ максимальная мощность дозы, зарегистрированная на объекте измерения, составила 35 мкЗв/ч. После закрытия транспортных контейнеров максимальная мощность дозы на поверхности всей упаковки составляла 1 мкЗв/ч.

В число идентифицированных активированных деталей вошли многолепестковый коллиматор, коллиматорные изгибы с приводными устройствами, мишень, фильтры для увеличения жесткости, изгибающая секция и защитный материал (свинец, вольфрам). Кроме того, с площадки для будущего использования в качестве запасных частей была вывезена полная коллиматорная секция, которую лечебное учреждение хранило на своей территории. По окончании работ по

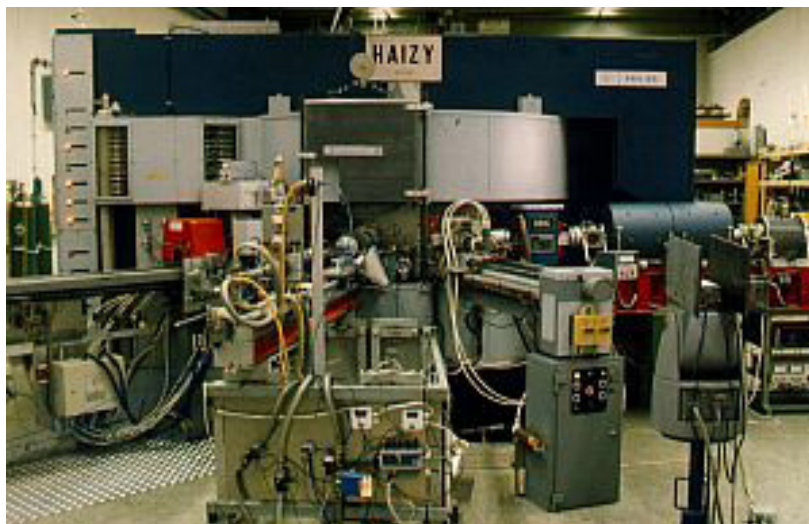


РИС. 1–13. Изохронный циклотрон Philips 140/IV (воспроизведено из [1–14] с любезного разрешения К. Пешеля).

ТАБЛИЦА 1–2. ТЕХНИЧЕСКИЕ ДАННЫЕ УСТАНОВКИ,
ПОДЛЕЖАВШЕЙ ВЫВОДУ ИЗ ЭКСПЛУАТАЦИИ
(воспроизведено с разрешения из [1–14])

Тип	Технические характеристики изохронного циклотрона Philips 140/IV	
Магнит	Среднее поле	15 кг
	Массивное железо	80 т
	Массивные медные катушки	8 т
	Диаметр полюсного наконечника	140 см
	Расстояние (мин.) между полюсными наконечниками	16 см
	Расстояние (макс.) между полюсными наконечниками	32 см
Передатчик	Частота	5–23 МГц
	ВЧ выход	Макс. 100 кВт
	Потенциал ускорения	Макс. 50 кВ
Энергия частиц	Протоны	30 МэВ
	Дейтроны	15 МэВ
	Гелий-3	40 МэВ
	Гелий-4	30 МэВ
Мишенные зоны	Внутренние	2
	Внешние	6

демонтажу 25 апреля 2012 года было подтверждено, что накопленная доза облучения работников субподрядной организации соответствовала рабочему протоколу, и она была внесена в их радиационные паспорта. Разобранный линак был в полном объеме передан подрядчику по выводу из эксплуатации, что было подтверждено письменной процедурой. Выявленные неактивные детали были переданы субподрядчику для рециклирования. Субподрядчик подтвердил, что детали, переданные ему для рециклирования, удовлетворяют критериям освобождения от контроля.

К подрядчику по выводу из эксплуатации перешло право собственности на активированный материал, вывезенный из лечебного учреждения. Ответственность лечебного учреждения за осуществление проекта по выводу из эксплуатации закончилась с момента урегулирования счета в пользу подрядчика по выводу из эксплуатации. Дальнейшая разборка и характеристика активности материалов, вывезенных с площадки ускорителя, проводились на складе подрядчика по выполнению работ по выводу из эксплуатации в Лейпциге. Эта работа продолжается пока часть материала остается на хранении, необходимом для обеспечения радиоактивного распада. Для некоторых демонтированных деталей линака предусматриваются длительные сроки хранения.

Стоимость вывода из эксплуатации линаков зависит от уровня энергии фотонов, используемого для целей лучевой терапии, срока службы аппарата и установленного оборудования, соседних устройств и характеристик объекта. Стоимость вывода из эксплуатации описанного выше ускорителя составила 21 000 евро, включая демонтаж, составление документации, характеристику радионуклидов и хранение материалов до конечного освобождения от контроля. Политика, которой руководствовался подрядчик, осуществлявший работы по выводу из эксплуатации, заключалась в том, чтобы направлять как можно больше материалов на рециклирование: для этого требовалось освобождение от контроля по истечении соответствующего срока хранения. Рециклирование таких материалов имеет важное значение для сведения к минимуму количества отходов малой активности, которые должны храниться в национальных пунктах хранения.

I–6.3. Извлеченные уроки

Из данного проекта можно извлечь следующие уроки:

- a) лечебные учреждения получают лицензию на эксплуатацию ускорителя, но часто не учитывают, что для осуществления работ по выводу из эксплуатации им может потребоваться другая лицензия. Это может приводить к задержкам в выводе ускорителей из эксплуатации, зависящим от государственного режима регулирования. В редких случаях подрядчики, специализирующиеся на работах по выводу из эксплуатации, могут иметь лицензию, позволяющую им выполнять работы по выводу ускорителя из эксплуатации, используя имеющееся у них разрешение регулирующих органов, и это позволяет им осуществлять проект;
- b) все материалы демонтированного ускорителя и любые запасные части, уже хранящиеся на объекте, должны быть отсортированы на месте их образования в целях подготовки к дальнейшему обращению с ними за пределами площадки. Это позволяет подрядчику иметь полную гибкость при принятии решения о времени, когда они должны быть направлены на рециклирование или вывезены с принадлежащей ему площадки. Предполагается, что в случае некоторых деталей, демонтированных с этого ускорителя, максимальный период радиоактивного распада до уровня освобождения от контроля составляет приблизительно шесть лет, хотя многие детали удаляются раньше этого срока;
- c) утечки из системы водяного охлаждения или прекращение технического обслуживания после окончания эксплуатации ускорителя могут привести к коррозии винтов и болтов, что затрудняет операции по демонтажу и повышает необходимость применения соответствующей программы технического обслуживания на период вывода из эксплуатации.

I–7. ВЫВОД ИЗ ЭКСПЛУАТАЦИИ ИЗОХРОННОГО ЦИКЛОТРОНА В ГЕРМАНИИ (КЛАСС 2)

I–7.1. Введение

В период между 1966 и 1968 годами на территории центра «Deutsches Elektronen-Synchrotron» (DESY) в районе Бахренфельд в Гамбурге был установлен изохронный циклотрон. Он использовался Институтом экспериментальной физики Гамбургского университета, и его эксплуатация началась 26 декабря 1968 года. Циклотрон был изготовлен компанией «Philips» в Эйндховене (Нидерланды) и назывался Hamburger Isochron-Zyklotron. Перед монтажом его основные функции были протестированы на заводе-изготовителе. После монтажа на площадке с помощью «Deutsche Bahn» (немецкой железнодорожной компании) он в течение нескольких лет тестировался на предмет проверки основных функций самого циклотрона и связанных с ним систем, таких как направляющие пучка и так называемые магниты-сплиттеры. После этапа тестирования были смонтированы экспериментальные станции. Около двух десятилетий экспериментальные станции использовались для различных целей в исследованиях в области экспериментальной физики и для производства радионуклидов, а также для экспериментов, связанных с активацией материалов и медицинскими исследованиями. На момент вывода из эксплуатации была доступна лишь очень скудная информация о фактических экспериментах и производстве радионуклидов, которые проводились в течение многих лет эксплуатации установки, и если такие данные и существовали, то они были в конечном счете утрачены. Некоторую информацию о прошлой деятельности можно было найти в диссертациях и исследовательских докладах, однако всеобъемлющие данные, которые могли бы помочь в проведении характеристики объекта при его подготовке к выводу из эксплуатации, отсутствовали.

После переключения внимания на исследования в области физики высоких энергий в центре «Deutsches Elektronen-Synchrotron» у института отпала необходимость в применении установки Hamburger Isochron-Zyklotron. При поддержке города Гамбурга была построена лаборатория радиохимии и физиологии растений, а также установлены позитрон-электронная камера и связанные с ней устройства. Установка Hamburger Isochron-Zyklotron была передана недавно основанному центру ускорителей и томографии, который специализировался на использовании позитронно-эмиссионной томографии (ПЭТ).

В 1994 году циклотрон и центр были включены в состав отделения лучевой терапии и ядерной медицины Университетской клиники Гамбург-Эппендорф. Там циклотрон применялся в основном для производства радионуклидов для ПЭТ в целях удовлетворения потребностей в препаратах ряда лечебных учреждений на севере Германии. Позднее было организовано циклотронно-радиохимическое отделение в качестве самостоятельного подразделения под названием Norddeutsche Zyklotron GmbH. Это подразделение продолжало производить радионуклиды до его закрытия в октябре 2007 года. Был проведен тендер на вывод циклотрона из эксплуатации, и работы начались в конце сентября 2008 года. В таблице I–2 представлены технические данные циклотрона, подлежавшего выводу из эксплуатации, который показан на рис. I–13. Подробное описание изохронного циклотрона приведено в [I–14].

I–7.2. Радиологическое обследование гамбургского изохронного циклотрона

Как указывалось ранее, радиационная история использования изохронного циклотрона не была полностью задокументирована. В отношении исследовательских проектов, которые проводились в первые годы использования циклотрона, было доступно мало информации. Обращение к первоначально работавшему на установке персоналу уже было невозможно, и, таким образом, ко времени проведения работ соответствующие знания были утрачены. Данные, доступные на момент начала тендерного процесса, не позволяли представить коммерческое предложение по выводу циклотрона из эксплуатации. Компании «Gamma-Service Recycling GmbH»

было предложено представить коммерческое предложение по выводу из эксплуатации, но на тот момент она не смогла удовлетворить эту просьбу. Для расчета потребностей, связанных с выводом из эксплуатации установки Hamburger Isochron-Zyklotron и связанного с ней оборудования и для очистки здания для дальнейшего использования были необходимы базовые данные, касающиеся радиоактивного загрязнения и активации. Компания «Gamma-Service Recycling GmbH» представила коммерческое предложение в сотрудничестве с VKTA (Исследовательским центром ядерных технологий и аналитики Россендорф, нем. Verein für Kernverfahrenstechnik und Analytik) на проведение радиологического обследования циклотрона, связанного с ним оборудования, передвижного защитного экранирования и конструкции здания.

Предложение было принято, и обследование было завершено в 2008 году. Были отобраны образцы стен, магнита, пучкового канала, мишенной зоны и различных вспомогательных устройств и механизмов, таких как кран, находящийся внутри помещения циклотрона. В число отобранных образцов входили мазки, срезы и демонтированные мелкие детали циклотрона, включая винты/болты. Посредством измерений образцов, проведенных разными методами (гамма-спектрометрия, жидкостный сцинтилляционный счетчик для ^3He и т.п.), было установлено, что продукты активации присутствовали только в бетоне стен ускорителя, бункере мишени и передвижном защитном экранировании, а также в металлической конструкции циклотрона, связанном с ним оборудовании и мишенных зонах, как указано в таблице I–3.

ТАБЛИЦА I–3. РАДИОНУКЛИДЫ, ВЫЯВЛЕННЫЕ ПРИ ОБСЛЕДОВАНИИ

Тип образца	Радионуклиды
Металл, разные образцы	Co-60, Ag-108m, Cs-137, Eu-152, Eu-154, Eu-155, Mn-54, Fe-55, Ni-63
Бетон, разные образцы	Co-60, Ag-108m, Cs-137, Eu-152, Eu-154, Eu-155, Mn-54, Fe-55, Ni-63

Как показано в таблице I–3, спектр нуклидов, присутствующих в образцах металла и бетона, был аналогичным. Были отмечены различия только в концентрации нуклидов. Образцы металлоконструкций содержали в основном ^{60}Co , ^{54}Mn , ^{55}Fe и ^{63}Ni , тогда как в образцах бетона содержались главным образом ^{152}Eu , ^{154}Eu и ^{155}Eu . В каждом образце были обнаружены все указанные радионуклиды. Измерения проводились с помощью системы гамма-спектрометрии in situ под названием Genie 2000 V3.1 (детектор и программное обеспечение). Что касается обследования, то были выбраны два ведущих нуклида. Для металлических образцов в качестве ведущего нуклида использовали ^{60}Co ; для образцов бетона и стен — ^{154}Eu . На основе результатов измерения указанных радионуклидов были определены поправочные коэффициенты для расчета общей активности.

В ходе обследования было выявлено радиоактивное загрязнение в мишенной зоне и в канале пучка. Это означало, что для этих участков потребуются дезактивация.

После наработки достаточной базы данных было подготовлено окончательное коммерческое предложение по проекту вывода из эксплуатации. Компания «Gamma-Service Recycling GmbH» выиграла тендер и 24 сентября 2008 года приступила к осуществлению работ по выводу из эксплуатации установки Hamburger Isochron-Zyklotron.

I–7.3. Организационные мероприятия перед началом осуществления проекта

Генеральным подрядчиком проекта по выводу из эксплуатации являлась компания «Gamma-Service Recycling GmbH»; основными субподрядчиками стали ранее упомянутый центр VKTA и

компания «Gerdt's Spedition GmbH», транспортная фирма, имеющая большой опыт осуществления работ в связи с выводом оборудования из эксплуатации. В данном проекте также участвовали и другие субподрядчики.

Центр VKTA разработал концепцию, основанную на данных радиологического обследования установки Hamburger Isochron-Zyklotron, для освобождения от контроля демонтированных материалов, передвижного защитного экранирования и стеновых конструкций. Концепция включала методы измерения, используемые в проекте, и методы кондиционирования материала в форме, соответствующей требованиям, предъявляемым к измерениям; она также определяла порядок измерения на поверхностях и включала критерии освобождения от контроля демонтируемых материалов. Концепция была обсуждена с ответственным лицом регулирующего органа и скорректирована с учетом дополнительных требований компетентных органов.

Соответствующие компетентные органы проверили наличие у компании «Gamma-Service Recycling GmbH» и субподрядчиков всех необходимых лицензий, достаточной квалификации для проведения работ по выводу циклотрона из эксплуатации, а также удовлетворительной профессиональной подготовки в области обеспечения радиационной защиты и безопасности труда. После выполнения всех требований было принято решение об одобрении осуществления работ по выводу из эксплуатации. Заключительными шагами было подписание контракта на проект и распределение ответственности за обеспечение радиационной защиты, безопасности труда, рециклирование материалов, разработку планов измерений и организацию любых работ, связанных с выводом из эксплуатации (охрана и патрулирование объекта службой безопасности в ночное время, контракт с субподрядчиками на выполнение специальных работ и т.п.).

I-7.4. Демонтаж циклотрона и связанного с ним оборудования

Была проведена разметка зон здания, включая циклотрон, мешенный бункер и связанное с ними оборудование, и осуществление работ началось с разборки модульной стены циклотронного зала.

Одновременно оборудование, находившееся по периферии циклотрона, было демонтировано/ удалено и упаковано в контейнеры со штрих-кодом, как было определено в программе измерений, для проведения гамма-спектрометрии.

При координации со стороны сотрудников компании «Gamma-Service Recycling GmbH» были демонтированы такие компоненты, как пучковый канал и электронные части циклотрона.

Радиологическая оценка демонтированных и кондиционированных частей циклотрона началась через две недели после начала осуществления проекта. К этому моменту было собрано большое количество материалов, в отношении которых требовалось обеспечить освобождение от контроля или хранение с целью выдержки до распада радионуклидов. Разделение материалов было осуществлено компанией «Gamma-Service Recycling GmbH»; затем центр VKTA провел оценку. При демонтаже циклотрона возникали разные проблемы. Имелись некоторые очень тяжелые и громоздкие детали, которые необходимо было привести в соответствие с требованиями, предъявляемыми к измерениям центром VKTA. Центр VKTA использовал компьютерные программы для расчета активности, содержащейся в деталях циклотрона, на основе измерений, выполненных с применением гамма-спектрометра.

В состав циклотрона входила резонансная камера длиной 4 м и диаметром 1,5 м. Камера представляла собой медную трубу с двойными стенками и трубой меньшего размера внутри (имеющей длину и диаметр одинакового размера: 0,5 м). Обе трубы были разрезаны на части для дальнейшей работы с ними и проведения измерений. Было установлено, что медь не была активирована и ее можно было утилизировать в качестве металлолома.

Необходимо было обеспечить вывоз сердечника магнита, а также нижнего полюсного наконечника и алюминиевой катушки. Эта работа была выполнена следующим образом. Сначала были установлены тавровые балки с тефлоновым покрытием. Затем магнит подняли с помощью гидравлических домкратов и установили на скользящие блоки также с тефлоновым покрытием.

Для сведения к минимуму трения на тавровую балку был нанесен мыльный раствор. Затем с помощью гидравлических подъемников магнит был притянут к стене. У стены магнит снова был поднят посредством гидравлических домкратов и установлен на тавровых балках. Наконец, он был вывезен из здания.

После вывоза из здания магнит был установлен на элементы бетонного защитного экранирования, чтобы облегчить резку магнита и удаление полюсного наконечника и катушки. Для установки магнита планировалось использовать четыре сейфа. Сейфы не выдержали массы магнита и разрушились, поэтому пришлось использовать элементы передвижного защитного экранирования. Полюсный наконечник состоял из трех секций, каждая массой 2 т. Алюминиевая катушка также имела приблизительно такую же массу.

Указанные детали подверглись активации, а также радиоактивному загрязнению. Во время разборки было обнаружено, что в катушке находилось некоторое количество льняной ленты, содержащей большое количество ^{152}Eu , ^{154}Eu и ^{155}Eu . Активность была настолько высокой, что сотрудники центра VKTA рассматривали вопрос об использовании коробки, наполненной льняной лентой, в качестве калибровочного источника для своих измерительных приборов. Наконец, магнит был разрезан на квадратные блоки массой около 1 т каждый для измерения с помощью гамма-спектрометра.

Пожарная служба центра «Deutsches Elektronen-Synchrotron» была заранее уведомлена о проведении данных работ. В процессе резки образовывались огромные облака желтого дыма. Об этом сообщил в местную пожарную часть находившийся поблизости житель, и для тушения пожара прибыло полное подразделение пожарной охраны. Ситуация была быстро урегулирована между двумя противопожарными службами.

Параллельно с этим сотрудники компании «Gamma-Service Recycling GmbH» провели демонтаж мишенного бункера с должным соблюдением мер предосторожности в связи с радиоактивным загрязнением и активацией. Дезактивация бункерных устройств проводилась до тех пор, пока не осталось никаких следов удаляемой активности. Затем был произведен полный демонтаж мишенной зоны. В бункере находились шесть мишенных стоек, система охлаждения и система кондиционирования воздуха. Сам бункер состоял из передвижного защитного экранирования, которое было удалено и подвергнуто измерению. Активированный материал хранился в закрытых 6-метровых контейнерах, которые позже перевозились на территорию компании «Gamma-Service Recycling GmbH» в Радеберге. Некоторое количество активированного материала пришлось хранить вне здания; также контейнеры с отходами были размещены на стоянке для автотранспорта. Для предотвращения кражи активированного материала в ночное время была предусмотрена охрана и осуществлялось патрулирование службой безопасности.

На протяжении всего процесса демонтажа активированный материал отделялся и хранился, а неактивный материал освобождался от контроля и утилизировался в качестве металлолома один раз в неделю после получения разрешения от ответственного органа. После демонтажа циклотрона и всей технической части установки здание было обследовано на предмет освобождения от контроля. Было установлено, что в конструкции стен циклотронного зала значимой активации не было. В мишенной зоне измерения позволили определить наличие лишь отдельных горячих точек. В горячих точках в грунте были установлены металлические маркеры из медного сплава, которые можно было легко удалить. В таблице I–3 указаны радионуклиды, идентифицированные в процессе измерения. Были также обнаружены небольшие количества других нуклидов, но они не указываются, поскольку были зафиксированы только следовые количества, которые не являлись значимыми в связи с требованиями в отношении освобождения от контроля.

I–7.5. Выводы

На демонтаж установки Hamburger Isochron-Zyklotron потребовалось три месяца, включая разделение активированных и неактивированных материалов, а также освобождение от контроля

неактивированного материала и проведение радиологического обследования циклотрона, здания и передвижного защитного экранирования. Около 70% демонтированной массы было освобождено от контроля, включая здание.

Весь активированный материал был доставлен в компанию «Gamma-Service Recycling» и до сих пор находится в хранилище компании в Радеберге. Некоторая часть, вероятно, была утилизирована или сдана на хранение. Остаток материалов все еще подлежит дальнейшему исследованию.

Для измерения активации и радиоактивного загрязнения использовались измерители мощности дозы, мониторы радиоактивного загрязнения, гамма-спектрометры и устройства для тестирования путем анализа мазковых проб. Мощность дозы активированных материалов варьировалась от 1 мкЗв/ч до 22 мЗв/ч. Отходы с мощностью дозы свыше 1 мЗв/ч составили лишь незначительный объем около 300 кг. Остальные материалы имели умеренные значения мощности дозы от 1 до 200 мкЗв/ч. Было вывезено около 250 т активированных материалов, которые в основном представляли собой передвижное бетонное защитное экранирование. Достоверных данных о содержащейся активности не было. В плане вывода из эксплуатации было предусмотрено, что активированные материалы будут храниться, а затем исследоваться на более позднем этапе. Времени на выполнение этой работы на площадке установки не оставалось.

В тендерном предложении была указана сумма бюджета проекта не менее 1 000 000 евро. После завершения работ на объекте выяснилось, что ввиду дополнительных потребностей в связи с необходимостью выполнения работ по обращению с отходами, включая дополнительную дезактивацию, измерения и отбор образцов и проб, эта сумма оказалась недостаточной для покрытия дополнительных расходов. Компания «Gamma-Service Recycling GmbH» успешно завершила работы, однако на оплату труда, обращение с отходами, измерения, пробы и на полное освобождение от контроля было затрачено больше средств, чем первоначально планировалось.

I–7.6. Уроки, извлеченные из стадии 1 проекта

На первой стадии проекта были извлечены следующие уроки:

- a) в течение срока службы циклотрона образовалось значительное количество материалов с низкой степенью активации; эти материалы не могли быть легко освобождены от контроля и требовали хранения с целью обеспечения радиоактивного распада или соответствующего удаления отходов;
- b) каждая машина имеет свои отличия и особенности, которые необходимо тщательно рассматривать, особенно при выводе из эксплуатации (объем работ, затраты и т.д.);
- c) для создания надежной базы данных, необходимой для осуществления работ по выводу из эксплуатации, потребовалось большое количество измерительного оборудования, а также наличие достаточной численности персонала на объекте;
- d) необходимо было иметь план вывода из эксплуатации, который требовалось корректировать еженедельно (менеджмент времени и ресурсов, постановка задач и т.д.).

I–7.7. Работа с материалами, являющимися отходами

Оставшиеся отходы, которые образовались в результате осуществления данного проекта по выводу из эксплуатации, были переданы другому предприятию для обработки и хранения; далее этот этап именуется стадией 2 проекта. В приведенной ниже информации указано, как организовывалась работа с этими отходами, особенно с бетоном защитного экранирования.

Как указывалось выше, активированные материалы были переданы специализированной компании с переходом ответственности в отношении этих материалов в пяти 6-метровых морских контейнерах и хранились на складской территории этой компании в соответствии с условиями имеющейся лицензии. Общая масса, согласно расчетам, составила примерно 250 т, включая около 160 т бетонных материалов (защитного экранирования), таких как блоки, стены и балки крыши. Девяносто тонн — это были разнообразные детали и различные материалы [I–14].

Поскольку в процессе осуществления проекта по выводу из эксплуатации материалы были плохо разделены, необходимо было провести надлежащее разделение и оценку отходов, что привело к увеличению доз и дополнительному объему работы для персонала. Кроме того, при выполнении операций, в результате которых образовывались отходы, не была предусмотрена возможность отделения материалов, отвечающих критериям полного освобождения от контроля. В ходе обработки накопившихся отходов было отмечено, что для подтверждения пригодности данных отходов для полного освобождения от контроля измерения должны были проводиться в условиях измерения низкой активности, что требовало соблюдения требований в отношении особо подобранных объемов, масс отходов, поверхностей, уровней заполнения и смесей материалов. Это обусловило необходимость выполнения большого объема работы по подготовке и обработке отходов и их сортировке с применением специальных контейнеров. Иногда в один контейнер для измерений для целей полного освобождения от контроля приходилось помещать только один предмет отходов. Это также привело к увеличению числа логистических процессов и к необходимости привлечения для выполнения этой работы большего количества работников.

Согласно расчетам, затраты на осуществление проекта по выводу из эксплуатации должны были составить сумму не менее 1 000 000 евро. В ретроспективе можно сказать, что в финансовом резерве на вывод из эксплуатации не были учтены дополнительные затраты на покрытие всех дополнительных работ по обработке, сортировке, логистике и предварительным измерениям, которые впоследствии потребовались для обеспечения надлежащего обращения с отходами. Дополнительные расходы потребовались также на аренду хранилища и продление сроков хранения, предусматриваемых в рамках лицензионных условий для пунктов хранения, с целью обеспечения среднесрочного хранения некоторых деталей и конструкций ускорителя с более высоким уровнем активности, для которых необходимо организовывать хранение, требующееся для обеспечения радиоактивного распада.

Из-за большого объема и массы материалов, которые были одновременно доставлены на внешний склад, подготовка и обучение работников, требовавшихся для выполнения дополнительных непредвиденных работ, оказались недостаточными, равно как и имевшаяся инфраструктура (место хранения, измерительное оборудование, погрузочно-разгрузочное оборудование, оборудование для дальнейшей разборки крупных узлов).

Все эти проблемы возникали из-за того, что перед началом осуществления проекта по выводу из эксплуатации не был разработан адекватный план обработки отходов. Некоторые материалы оставались на хранении и ожидали дальнейшей обработки по истечении пяти лет после завершения проекта по выводу из эксплуатации.

В течение этих пяти лет, после того как отходы, образовавшиеся в результате проведения работ по выводу из эксплуатации, были переданы для дальнейшего обращения с ними, большая часть материалов была объявлена пригодной для полного или ограниченного освобождения от контроля. Некоторые материалы после освобождения от контроля отправлялись на рециклирование или утилизацию в качестве металлолома. Другие материалы (главным образом активированные материалы, содержащие ^{60}Co) все еще находятся на хранении с целью обеспечения радиоактивного распада в среднесрочном хранилище в ожидании освобождения от контроля после достижения надлежащего распада. Некоторые отходы были окончательно объявлены радиоактивными и отправлены на государственный пункт сбора и хранения радиоактивных отходов. Были также обнаружены некоторые проблемные отходы, такие как асбест, ПХД или маслосодержащие материалы. В отношении этих материалов ожидается принятие решения, которое позволит выполнить операции по их окончательному удалению.

Еще одна проблема была связана с обработкой и исследованием бетонных материалов, использованных для сооружения защитного экранирования вокруг ускорителя. Как показано на рис. I-14, 128 бетонных блоков различной формы и 12 балок крыши были признаны активированными, и их анализ необходимо было проводить на месте с помощью мониторов



РИС. I–14. Балки крыши, блоки защитного экранирования и фрагменты стены (воспроизведено из [I–14] с любезного разрешения К. Пешеля).

поверхностного радиоактивного загрязнения, измерителей мощности дозы низкого уровня и системы гамма-спектрометрии, а также с отбором образцов, которые исследовались во внешней лаборатории.

Для транспортировки защитных бетонных материалов на внешний склад использовались транспортные средства с прицепами большой грузоподъемности. Также необходимо было решать эту особую логистическую проблему в соответствии с правилами перевозки опасных грузов (требованиями Европейского соглашения о международной дорожной перевозке опасных грузов, класс 7, радиоактивные материалы).

Все материалы располагались вокруг мишенного помещения, в котором производились радионуклиды для лечения. После того, как бетонные материалы были доставлены на площадку внешнего хранилища, было проведено радиологическое обследование с измерениями для полного освобождения от контроля. Каждый блок был четко пронумерован, и были отобраны дополнительные образцы в местах измеренной максимальной скорости счета на поверхности блоков (рис. I–15 и I–16).

Для дифференциации возможного поверхностного радиоактивного загрязнения блоков, создающегося в результате образования радионуклидов или активации пучками частиц облучателя, на блоках проводился отбор двух образцов. Также отбирался один образец путем соскабливания с поверхности и один керновый образец с разделением на несколько профилей разной глубины. Образцы анализировались в специализированной лаборатории на содержание радионуклидов. Профили разной глубины кривого образца исследовались отдельно для получения распределения профилей активации по глубине.

На рис. I–17 показаны результаты радиологического анализа блоков. Удельная активность в беккерелях на грамм представлена в зависимости от глубины в бетонном материале в сантиметрах.

Максимальный уровень активации от пучка протонов с энергией 18 МэВ и вторичных реакций (p/n), (n/γ) находился на глубине в пределах от 6 до 13 см; поэтому образующиеся вторичные нейтроны должны были иметь энергию менее 3 МэВ.

Кроме того, можно определить нуклидный вектор для упрощения измерений для целей полного освобождения от контроля. Этот вектор был обнаружен с содержанием 89,5% ^{60}Co и 10,5% ^{54}Mn ; таким образом, γ-излучающий ^{60}Co с его специфическими γ-линиями можно было легко измерить и идентифицировать.



РИС. I-15. Бетонный блок с идентификационным номером (воспроизведено из [I-14] с любезного разрешения К. Пешеля).



РИС. I-16. Отбор проб/образцов из точки максимальной измеренной скорости счета (воспроизведено из [I-14] с любезного разрешения К. Пешеля).

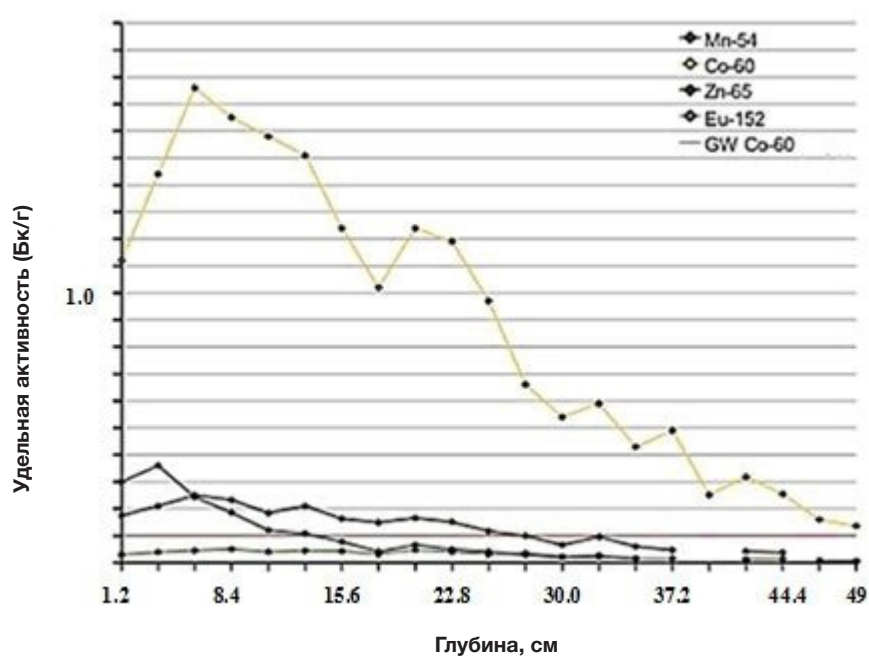


РИС. I-17. Удельная активность материала одного блока в зависимости от глубины (воспроизведено из [I-14] с любезного разрешения К. Пешеля).

После того, как все образцы были измерены и активность была определена как удельная активность в беккерелях на грамм, результаты можно было сравнить с пороговыми значениями для полного и ограниченного освобождения от контроля в соответствии с требованиями закона о радиационной защите Германии в отношении пороговых значений для полного и ограниченного

освобождения материалов от контроля. В таблице I–4 представлены некоторые пороговые значения для отдельных нуклидов, которые необходимо было учитывать при применении процедур освобождения от контроля [I–13].

Как видно из таблицы I–4, значение для полного освобождения от контроля для ^{60}Co составляет 0,1 Бк/г. Значение у образца, представленного на графике, имеет максимальную удельную активность 1,8 Бк/г. Таким образом, в данном примере существовало только два способа дальнейшего обращения с отходами:

- a) ограниченное освобождение от контроля;
- b) хранение, необходимое для обеспечения радиоактивного распада в течение примерно четырех-пяти периодов полураспада ^{60}Co (что соответствует 20–25 годам).

Поскольку срок хранения около 25 лет не был приемлемым решением, была использована стратегия ограниченного освобождения от контроля. Большая часть балок крыши и блоков защитного экранирования впоследствии была повторно использована для других строительных проектов в качестве дополнительной стабилизации инфраструктуры нового здания, используемого в качестве хранилища закрытых радиоактивных источников в водном бассейне и для размещения облучательной установки для целей стерилизации.

ТАБЛИЦА I–4. ПОРОГОВЫЕ ЗНАЧЕНИЯ ДЛЯ ПОЛНОГО И ОГРАНИЧЕННОГО ОСВОБОЖДЕНИЯ ОТ КОНТРОЛЯ МАТЕРИАЛОВ И ДЛЯ ПОВЕРХНОСТНОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ

Нуклид	Период полураспада	Полное освобождение от контроля (Бк/г)	Ограниченное освобождение от контроля (Бк/г)	Поверхностное загрязнение (Бк/см ²)
Mn-54	312,2 сут	4E–01	1E+01	1E+00
Fe-55	2,7 года	2E+02	1E+04	1E+02
Fe-59	45,1 сут	1E+00	7E+00	1E+00
Co-60	5,3 года	1E–01	4E+00	1E+00
Ni-63	100,0 лет	3E+02	3E+03	1E+02
Ni-59	7,5E+04 года	8E+02	5E+03	1E+02
Zn-65	244 сут	5E–01	1E+01	1E+00
Eu-152	13,3 года	2E–01	8E+00	1E+00
Eu-154	8,8 года	2E–01	7E+00	1E+00

I–7.8. Проблемы, возникшие на стадии 1 проекта, и выработанные решения

На первой стадии проекта возникли следующие проблемы:

- a) на площадке внешнего хранилища потребовались дополнительные погрузочно-разгрузочные работы, материально-техническое обеспечение и персонал для обращения с материалами, поступившими в рамках проекта по выводу из эксплуатации;

- b) затраты на вывод из эксплуатации превысили запланированный бюджет из-за неадекватного планирования операций по обращению с отходами в окончательном плане вывода из эксплуатации;
- c) внешнее хранилище не было должным образом подготовлено для приема таких больших объемов неотсортированных должным образом отходов, и потребовалось увеличение численности, обучение персонала, расширение инфраструктуры и складских площадей.

Соответствующие решения и анализ были следующими:

- 1) отделение активированных и радиоактивно загрязненных материалов в процессе осуществления проекта по выводу из эксплуатации осуществлялось неудовлетворительно, и потребовалось проведение дополнительных работ;
- 2) дополнительные расходы на дополнительную обработку, сортировку, логистику и предварительные измерения для отходов предусмотрены не были, также как и расходы на первоначальное и длительное хранение некоторых отходов;
- 3) вследствие нехватки времени в процессе осуществления проекта по выводу из эксплуатации все потенциальные отходы и материалы, предназначенные для освобождения от контроля, укладывались в 6-метровые морские контейнеры в момент их образования и передавались на внешнее хранение с целью выполнения дальнейших операций с ними.

I–7.9. Извлеченные уроки

При осуществлении данного проекта были извлечены следующие уроки:

- a) окончательный план вывода из эксплуатации не предусматривал комплексное планирование обращения с отходами с определением возможных вариантов освобождения от контроля образующихся отходов и методов измерения, которые должны использоваться при сортировке отходов на месте их образования на различные категории отходов. Это привело к существенному превышению бюджета проекта, когда обработку отходов пришлось передать второму подрядчику;
- b) непроведение сортировки отходов в процессе их образования (все они были помещены непосредственно в грузовой контейнер без измерения или разделения) свидетельствует об отсутствии у работников знаний о приемлемых нормах обращения с отходами, в особенности в связи с применением уровней освобождения от контроля и принципов сведения отходов к минимуму. Комплексный план обращения с отходами, соответствующий задачам проекта, подкрепленный разработкой письменных процедур и проведением профессиональной подготовки персонала по их применению, позволил бы избежать подобных ошибок;
- c) финансовое планирование этого проекта было неадекватным и не учитывало должным образом вероятные затраты на обращение с отходами и их удаление. На этапе финансового планирования проекта по выводу из эксплуатации необходимо учитывать такие факторы, как логистика, хранение, аналитическая работа, последующая обработка материалов и обращение с отходами. Расходы на обращение с отходами и их удаление являются фиксированным и важным компонентом любого плана вывода из эксплуатации;
- d) отсутствовали процедуры обеспечения учета всех связанных с последующей обработкой потребностей, таких как наличие оборудования, обеспечение логистических маршрутов и укомплектование соответствующим персоналом, удовлетворение которых необходимо для осуществления операций с активированными и радиоактивно загрязненными материалами и отходами, до отправки материалов в хранилище отходов. Это указывает на пробел в планировании работ по выводу из эксплуатации, особенно в части обращения с отходами и материалами.

I–8. ТЕКУЩЕЕ СОСТОЯНИЕ ВЫВОДА ИЗ ЭКСПЛУАТАЦИИ УСКОРИТЕЛЕЙ В ЯПОНИИ

I–8.1. Введение

В Японии в отношении радиоизотопных и ускорительных установок применяется система освобождения от контроля, предусматривающая: а) уровни освобождения от контроля радиоактивных веществ применительно к выбросам в окружающую среду; б) процедуры контроля Управления по ядерному регулированию. В этих регулирующих положениях изложены определение и правила обращения с активированными материалами. В данном разделе приложения приводится описание некоторых связанных с этим вопросов, нашедших отражение в регулирующих положениях Японии, а также приводятся примеры выполнения работ по выводу из эксплуатации ускорителей.

I–8.2. Ускорители в Японии

В таблице I–5 указаны ускорители Японии в разбивке на типы и учреждения, в которых они используются. При разработке правил обращения с активированными материалами очень важно

ТАБЛИЦА I–5. КОЛИЧЕСТВО ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ГЕНЕРАТОРОВ ИЗЛУЧЕНИЯ В ЯПОНИИ ПО СОСТОЯНИЮ НА 31 МАРТА 2016 ГОДА

Тип	Количество установок	Больницы и клиники ^a	Образовательные учреждения	Исследовательские учреждения	Промышленные компании	Другие организации
Циклотроны	233	155	4	22	50	2
Синхротроны	44	11	3	26	4	—
Линейные ускорители	1292	1107	26	65	63	31
Бетатроны	2	—	1	1	—	—
Ускорители Ван-де-Граафа	35	—	13	21	1	—
Ускорители Кокрофта-Уолтона	80	—	17	29	34	—
Ускорители трансформаторного типа	14	—	—	6	8	—
Микротроны	6	1	3	2	—	—
Генераторы плазмы	2	—	—	2	—	—
Общее количество	1708	1274	67	174	160	33
Отношение (%)	100	74,6	3,9	10,2	9,4	1,9

Примечание: «—»: ускорителей этого типа нет.

^a На основе данных, заимствованных из [I–15].

уделять должное внимание медицинским применениям, на которые приходится 73% ускорителей в Японии (около 70% линаков с энергией 10 МэВ и 20% с энергией 6 МэВ). Срок службы линаков для медицинского использования составляет примерно 10 лет и обусловлен непрерывным развитием медицины и компьютерных наук. Ежегодно из эксплуатации выводится около сотни ускорителей. В последнее время растет число малых циклотронов, применяемых для производства радиоизотопов для целей ПЭТ-диагностики в лечебных учреждениях.

I–8.3. Классификация неактивированных элементов оборудования ускорителей

Неактивированные элементы оборудования ускорителей могут быть подразделены на три категории:

- a) по энергии:
 - ускорители частиц с энергией ниже 2,5 МэВ/нуклон (кроме генераторов нейтронов);
 - ускорители электронов для медицинского использования с энергией 6 МэВ и ниже;
- b) по зонам:
 - вне собственного защитного экранирования циклотрона для производства изотопов для ПЭТ;
 - ускорители электронов для медицинского использования с энергией 10 МэВ и ниже (за исключением мишени и коллиматоров);
 - ускорители электронов для медицинского использования с энергией 15 МэВ и ниже (за исключением мишени, коллиматоров и материалов защитного экранирования);
- c) прочие: неактивированные ускорители, в отношении которых имеются рекомендации научных организаций, основанные на данных измерений радиоактивности и результатов расчета методом Монте-Карло. Электронные синхротроны для источников светового излучения и тандемных ускорителей для аналитических целей включаются в эту категорию неактивированных ускорителей.

I–8.4. Правила обращения с активированными материалами

Находящееся в использовании оборудование ускорителя не рассматривается как активированные материалы. При удалении активированных материалов из ускорителей их следует разделять на радиоактивные отходы и материалы для повторного использования. Многие компоненты ускорителя (например, магниты, вакуумная система, источник питания, система управления) могут быть повторно использованы на другом ускорительном оборудовании. Поэтому в новых регулирующих положениях предусмотрено принятие мер по обеспечению хранения компонентов, предназначенных для повторного использования в отличие от мер по обеспечению хранения, предусмотренных в хранилищах радиоактивных отходов. При обращении с активированными материалами в случае проведения ремонта или резки работники обязаны защищаться от радиоактивного загрязнения посредством применения респираторов, масок, перчаток и т.п. Следует проводить надлежащую характеристику активированного материала с регистрацией соответствующих данных, таких как основные нуклиды и их активность, для каждого объекта. Состав и активность основных нуклидов будут варьироваться в зависимости от падающей частицы и ее энергии, активированного материала, времени облучения и времени охлаждения. Поэтому регулирующим органом по радиационной защите была предложена процедура оценки радиоактивности, основанная на измерении мощности дозы на поверхности, применительно к электронным ускорителям для медицинских целей.

I–8.5. Система освобождения от контроля, используемая при выводе из эксплуатации

В рамках тематического исследования был оценен общий объем активированных и радиоактивно загрязненных материалов, образующихся на радиоизотопных и ускорительных

установках за один год. В качестве допустимого уровня активности для освобождения материалов от контроля в соответствии с системой освобождения от контроля был рассчитан предел дозы 10 мкЗв для работников и населения, представляющей собой годовую эффективную дозу, полученную для различных возможных сценариев облучения. Наконец, правительство страны приняло к применению в качестве нормы публикацию Серии норм безопасности МАГАТЭ, № RS-G-1.7, «Application of the Concepts of Exclusion, Exemption and Clearance» («Применение концепций исключения, изъятия и освобождения от контроля») [I-16]. Активированными материалами ускорительных установок, освобождаемыми от контроля, являются в основном металлы и бетон. Кроме того, бумага, стекло, пластмассы и грунт входят в число радиоактивно загрязненных материалов на радиоизотопных установках. В случае активированных материалов ускорительных установок и радиоактивных отходов радиоизотопных установок, соответственно, установлены уровни освобождения от контроля для 37 и 53 нуклидов.

При применении системы освобождения от контроля каждое учреждение должно представлять Управлению по ядерному регулированию план вывода из эксплуатации, включающий подробное описание методов оценки уровня освобождения от контроля и метода контроля качества, который будет использоваться. После разделения материалов, предназначенных для освобождения от контроля, Управление по ядерному регулированию проверяет обоснованность оценки активности разделенных материалов до выдачи разрешения на их освобождение от контроля.

I-8.6. Метод вывода из эксплуатации малой ускорительной установки

В настоящее время введение в действие системы освобождения от контроля требует больших затрат времени и является слишком дорогостоящим для небольших объектов. Лечебные учреждения, как правило, не имеют складских помещений, пригодных для хранения материалов, образующихся в результате проведения работ по выводу из эксплуатации, и обычно должны обеспечивать непрерывность оказания услуг по лечению пациентов. В таких обстоятельствах Управление по ядерному регулированию допускает использование в лечебных учреждениях процедуры вывода из эксплуатации без применения уровней освобождения от контроля. В случае низкоэнергетических ускорителей наблюдаемыми нуклидами, как правило, являются гамма-излучатели. Применяемая методология основана на использовании сцинтилляционных приборов радиационного контроля для проведения измерений с целью отделения активированных материалов от неактивированных. В этом случае на предел обнаружения влияет установка постоянной времени и скорости сканирования прибора радиационного контроля. Эта процедура доказала свою эффективность при контроле уровней неактивированных материалов с учетом пределов обнаружения [I-17].

В случае ПЭТ-циклотронных установок стены, пол, потолок и окружающие материалы могут активироваться вторичными нейтронами во время работы установки. Для подтверждения указанной выше процедуры на каждом объекте должны быть получены дополнительные данные: а) с помощью германиевого детектора следует измерить радиоактивность нескольких материалов, отобранных в помещении ускорителя; б) после сбора данных, относящихся к истории эксплуатации, следует оценить элементный состав каждого материала, пространственное распределение нейтронов в типичных условиях эксплуатации и наведенную активность у нескольких типичных материалов, включая бетон. При проведении работ по выводу из эксплуатации полезными являются оба набора данных. Типичный поток нейтронов в камере ПЭТ-циклотрона составляет 10^5 – 10^6 н·см⁻²·с⁻¹ при производстве ¹⁸F из ¹⁸O. Таким образом, суммарные объемы производства ¹⁸F становятся хорошими показателями флюенса нейтронов. Флюенс нейтронов за десять лет работы в типичной больнице оценивается в 10^{12} – 10^{13} н/см². Удельная активность ⁶⁰Co и ¹⁵²Eu на поверхности бетона почти соответствует уровням освобождения от контроля. Поэтому также важно уменьшить активацию нейтронов путем эффективного экранирования нейтронов у мишени.

I–8.7. Тематическое исследование по выводу из эксплуатации комплекса Института ядерных исследований при Токийском университете

В 999 году был осуществлен вывод из эксплуатации **комплекса** Института ядерных исследований (переименованного в отделение «Танаси» Организации по изучению высокоэнергетических ускорителей (Kō Enerugi Kasokuki Kenkyū Kikō) (КЕК) в 1997 году). Этот проект стал первым случаем, когда в Японии был осуществлен вывод из эксплуатации большого ускорительного комплекса, включающего ускорители заряженных частиц — электронов и тяжелых ионов [I–17].

I–8.7.1. Оценка фоновой мощности дозы

Для определения материалов активации были измерены мощности доз естественного фона на территории кампуса. Результаты представлены на рис. I–18. Фоновая мощность дозы составила 0,03–0,09 мкЗв/ч. Этот результат согласуется со статистическим расчетом трех стандартных отклонений 0,06 мкЗв/ч в случае однодюймового сцинтилляционного детектора NaI (Tl) (постоянная времени: 10 с). Активированный материал определялся как материал с мощностью дозы выше 0,1 мкЗв/ч.

I–8.7.2. Схема обследования

Вначале мощность дозы на поверхности измерялась с помощью измерительной системы на основе NaI (Tl). Затем был использован метод мазковых проб для обнаружения поверхностного радиоактивного загрязнения (>4 Бк/см²) с целью предотвращения перекрестного загрязнения. Если мощность дозы была ниже 0,1 мкЗв/ч, использовался непосредственно дозиметр-счетчик Гейгера-Мюллера. Предел обнаружения этого прибора составлял 0,35 Бк/см². Если скорость

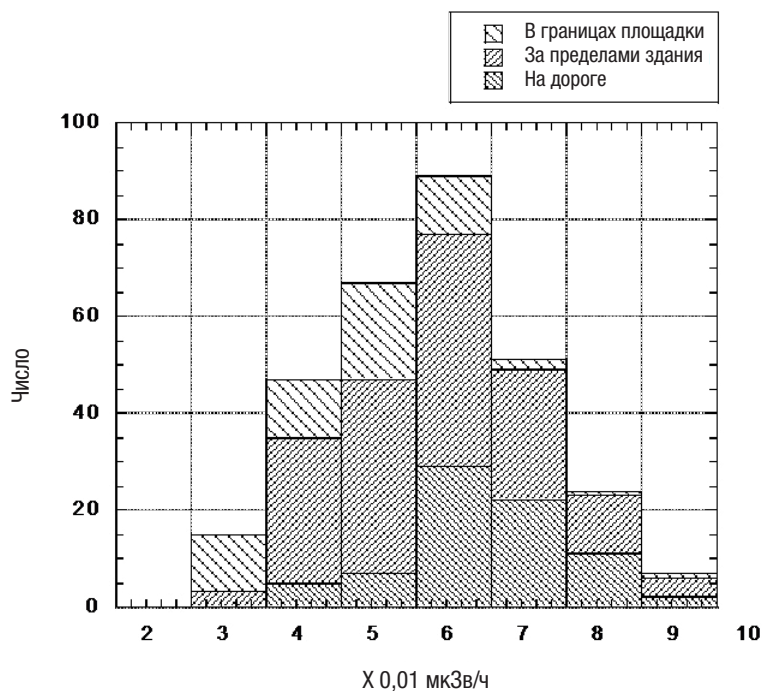


РИС. I–18. Гистограмма мощностей дозы на площадке Института ядерных исследований, полученная с применением прибора для радиационного контроля (воспроизведено из [I–18] с любезного разрешения К. Масумото).

счета материала была ниже порогового значения предела обнаружения, этот материал мог быть освобожден от контроля. Если скорость счета материала была выше предела обнаружения, материал не освобождался от контроля.

I–8.7.3. Пример блоков защитного экранирования

На рис. I–19 показаны результаты измерения бетонных блоков защитного экранирования ускорителя. Примерно 1000 блоков были подразделены на неактивированные и активированные. Все активированные бетонные блоки были перевезены в КЕК для использования в качестве защитного экранирования другого ускорителя.

I–8.7.4. Оценка активации конструкции

Был проведен анализ примерно 70 образцов бетона пола, стен и потолка. Результаты приведены в таблице I–6. Общая естественная активность составила $0,47 \pm 0,22$ Бк/г. Мощность дозы на поверхности, оцененная по активности, составила $0,05 \pm 0,02$ мкЗв/ч. Вклад активности ^{40}K был большим, но дозовый вклад от тория был выше, чем от ^{40}K . Такой анализ важен для принятия решения в отношении активированных материалов в случаях, когда система освобождения от контроля не применяется. В [I–19] представлена полезная информация для оценки наведенной активации.

Как показано на рис. I–20, было установлено соотношение между мощностью поверхностной дозы и удельной активностью ^{60}Co . На этом рисунке показана хорошая линейная зависимость. Для оценки уровня активации в этом проекте было принято значение мощности дозы 0,1 мкЗв/ч, включающее вклад естественного фона. Внутри помещения ускорителя мощности дозы были измерены на поверхности стен, пола и потолка и картированы с шагом 1, 2 и 4 м² соответственно. Если мощность дозы превышала предел обнаружения, отбирался керновый образец. Отбор керновых образцов использовался для определения глубины резки при удалении активированного

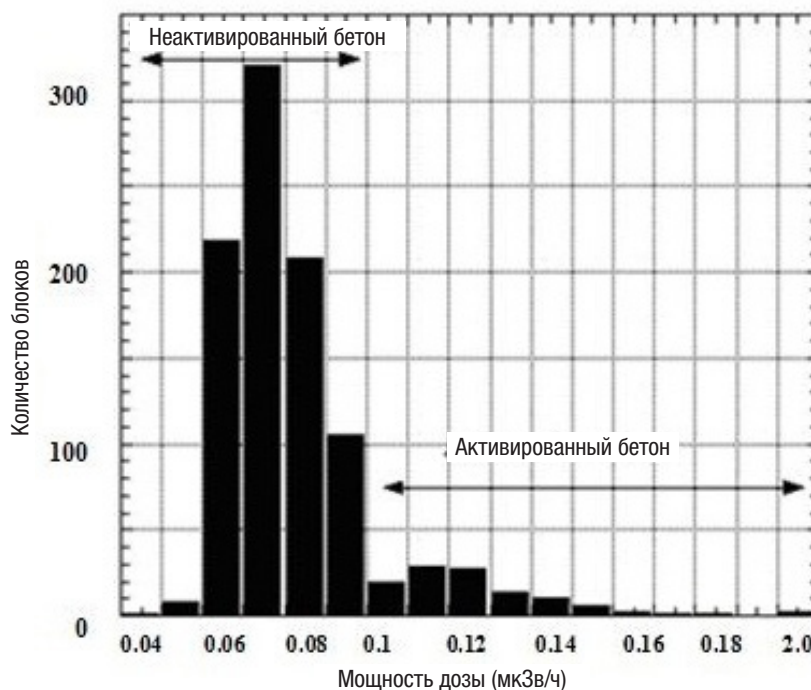


РИС. I–19. Результаты измерения приблизительно 1000 бетонных защитных блоков (воспроизведено из [I–18] с любезного разрешения К. Масумото).

ТАБЛИЦА I-6. АКТИВНОСТЬ ^{40}K , УРАНА И ТОРИЯ В ОБРАЗЦАХ БЕТОНА ПОЛА, СТЕН И ПОТОЛКА SF-ЦИКЛОТРОННОЙ УСТАНОВКИ (воспроизведено из [I-18] с разрешения К. Масумото)

Нуклид	Активность (Бк/г)	Вариация (Бк/г)	Мощность поверхностной дозы (мкЗв/ч)	Вариация (мкЗв/ч)
^{40}K	0,428	0,217	0,018	0,009
Ряд U	0,015	0,008	0,006	0,003
Ряд Th	0,022	0,012	0,022	0,012
Всего	0,465	0,217	0,046	0,015

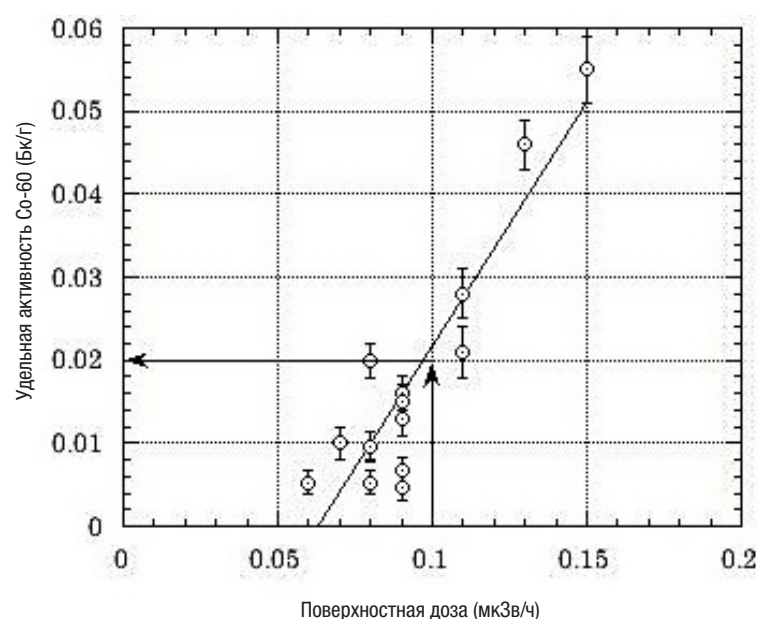


РИС. I-20. Зависимость мощности поверхностной дозы от удельной активности ^{60}Co в бетоне из циклотронного зала (воспроизведено из [I-18] с любезного разрешения К. Масумото).

материала из зоны. Для определения уровней мощности фоновой дозы образцы с поверхности вырезали для анализа с помощью гамма-спектрометрии. На рис. I-21 представлены данные ядерного образца бетона, для которого был получен профиль нуклидов по глубине стены вблизи дефлектора циклотрона. В этой зоне было отмечено накопление тепловых нейтронов. Верхняя область уровня освобождения от контроля находилась на глубине около 25 см. Результаты картирования дозы после демонтажа циклотрона были очень похожи на результаты флюенса нейтронов, полученные методами активации с использованием золотой фольги.

I-8.7.5. Электронный синхротрон на энергию 1,3 ГэВ

Электронный синхротрон (на 750 МэВ) был построен в 1961 году, а его мощность была увеличена до 1,3 ГэВ, 0,4 мА в 1966 году. В 1971 году была также построена установка SOR-RING

(500 МэВ, 500 мА), кольцо накопления электронов, которое использовалось в качестве источника синхротронного излучения. Большая часть общей активности приходилась на ^{60}Co и ^{54}Mn в магнитах синхротрона. Дозовый вклад этих двух нуклидов составил 80%. Остальными нуклидами были ^{22}Na (из алюминия), ^{65}Zn (из латуни), ^{56}Co и ^{58}Co . Никакой активности в SOR-RING обнаружено не было. Бетонное основание синхротронного магнита было разрезано проволочной пилой для изготовления защитного экранирования. Поскольку синхротрон был закрыт примерно тысячей защитных блоков, никакой активности в зданиях обнаружено не было. Рис. I-22 — I-24 иллюстрируют различные этапы вывода из эксплуатации электронного синхротрона

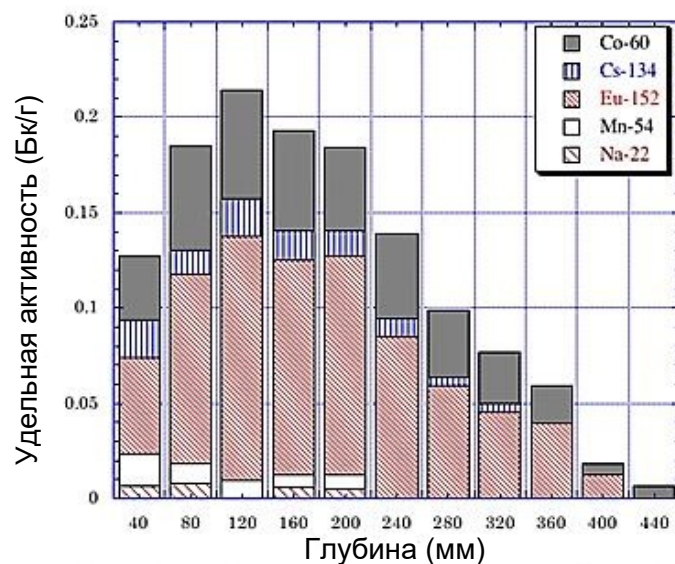


РИС. I-21. Глубинные профили радионуклидов в стене вблизи дефлектора циклотрона (воспроизведено из [I-18] с любезного разрешения К. Масумото).



РИС. I-22. Удаление защитных блоков (воспроизведено из [I-18] с любезного разрешения К. Масумото).

на 1,3 ГэВ. На рис. I-22 показан демонтаж блоков защитного экранирования, а на рис. I-23 — демонтаж синхротронных магнитов. Рис. I-24 показывает тип транспортного средства, которое использовалось для транспортировки магнитов в КЕК.

I-8.7.6. SF-циклотрон на энергию 40 МэВ

В 1971 году был введен в эксплуатацию SF-циклотрон (SF — англ. коэффициент насыщения) (энергия протона: 50 МэВ; ток пучка: 10 мкА); это был первый построенный в Японии циклотрон с переменным азимутальным полем. После 1996 года энергия протонов была снижена до 40 МэВ, и различные тяжелые ионы ускорялись для подачи пучка в накопительное кольцо TARN-II. Циклотрон был передан в КЕК, Цукуба, а большой спектрометр и множество магнитов были перевезены в крупнейший в Японии комплексный научно-исследовательский институт RIKEN, Вако. Радиоактивными отходами стали около 100 т бетона. На рис. I-25 показано



РИС. I-23. Демонтаж магнитов синхротрона (воспроизведено из [I-18] с любезного разрешения К. Масумото).



РИС. I-24. Транспортировка магнитов в КЕК (воспроизведено из [I-18] с любезного разрешения К. Масумото).

яро SF-циклотрона, на котором требовалось проводить работы по выводу из эксплуатации. На рис. I-26 и I-27 показано разделение верхней и нижней частей яра, соответственно, а на рис. I-28 иллюстрируется транспортировка магнитов в КЕК.

На рис. I-29 — I-31 показаны различные этапы работ по дезактивации, которые проводились в камере, включавшие разметку стены для определения необходимой глубины сверления, а также резку и сверление стены. На рис. I-32(a) и I-32(b) показан внутренний вид здания, которое использовалось для хранения активированных материалов.

I-8.7.7. Количества материалов при выводе из эксплуатации

В таблице I-7 указано количество разделенных материалов, образовавшихся в результате проведения работ по выводу из эксплуатации. В случае SF-циклотрона наибольшей частью 120 т удаленных радиоактивных отходов был бетон стен, пола и потолка камеры циклотрона. У синхротрона для защитного экранирования использовались бетонные блоки. Поэтому радиоактивный бетон можно было повторно использовать для защитного экранирования в КЕК.

Для безопасного и правильного выполнения работ по выводу из эксплуатации были проведены различные измерения излучения и радиоактивности. Также были запланированы и



РИС. I-25. Вывод из эксплуатации SF-циклотрона (воспроизведено из [I-18] с любезного разрешения К. Масумото).

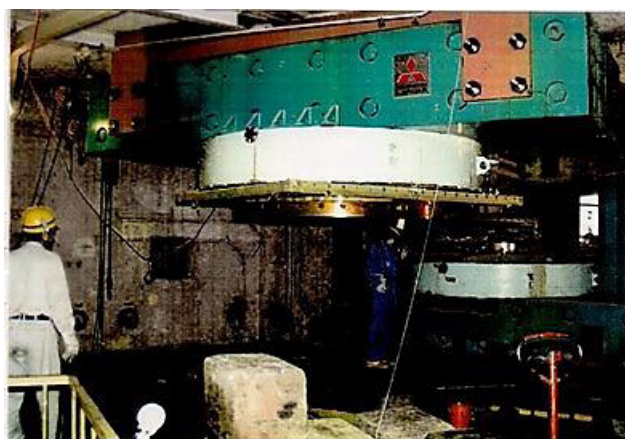


РИС. I-26. Разделение верхней части яра (воспроизведено из [I-18] с любезного разрешения К. Масумото).



РИС. I-27. Разделение нижней части ярма (воспроизведено из [I-18] с любезного разрешения К. Масумото).



РИС. I-28. Транспортировка магнитов в КЕК (воспроизведено из [I-18] с любезного разрешения К. Масумото).



РИС. I-29. Разметка глубины дезактивации стены (воспроизведено из [I-18] с любезного разрешения К. Масумото).



РИС. I-30. Резка бетонной стены (воспроизведено из [I-18] с любезного разрешения К. Масумото).



РИС. I-31. Сверление бетонной стены (воспроизведено из [I-18] с любезного разрешения К. Масумото).



(a)



(b)

РИС. I-32. Внутренний вид склада для хранения активированных материалов (воспроизведено из [I-18] с любезного разрешения К. Масумото).

опробованы несколько методов дезактивации. Тщательная оценка остаточной радиоактивности в различных материалах играла весьма важную роль в сокращении объема радиоактивных отходов. Многие виды деталей и узлов ускорителей и материалов защитного экранирования были повторно использованы на различных ускорительных установках университетов и научно-исследовательских институтов. Все ускорители были полностью выведены из эксплуатации в течение одного года. После сноса всех зданий освободившийся земельный участок был тщательно проверен на предмет радиоактивного и химического загрязнения, и впоследствии эта территория была преобразована в общественный парк.

Для хранения всех объемов нерадиоактивных материалов и радиоактивных магнитов, указанных в таблице I-7, в КЕК был построен склад площадью 800 м². В течение нескольких лет многие детали и узлы ускорителя были переданы другим ускорительным центрам для повторного использования. При осуществлении работ по выводу из эксплуатации важно составить план рециклирования для повторного использования, так как многие детали и оборудование ускорителя являются весьма дорогостоящими.

ТАБЛИЦА I–7. КОЛИЧЕСТВО МАТЕРИАЛОВ (Т), ОБРАЗУЮЩИХСЯ ПРИ ВЫВОДЕ ИЗ ЭКСПЛУАТАЦИИ

Тип ускорителя	Установки					Окружающие конструкции			
	Нерadioактивные			Radioактивные		Radioактивные		Нерadioактивные	
	Рециклирование и отходы	Повторное использование	Хранение	Отходы	Хранение	Повторное использование	Отходы	Рециклирование	Повторное использование
SF-циклотрон	40	30	10	3	400	30	120	5 000	0
Синхротрон	60	10	5	2	70	350	2	5 200	700
TARN-II	30	200	15	0	20	0	6	2 500	0
Линак тяжелых ионов	5	70	0	0	20	10	2	1 000	0
Всего	135	310	30	5	510	390	130	13 700	700

ТАБЛИЦА I–8. РЕЗУЛЬТАТЫ ОБСЛЕДОВАНИЯ ВАКУУМНОЙ КАМЕРЫ

Место нахождения	Неактивированная составляющая (%)	Серая составляющая (%)	Активированная составляющая (%)
HER-дуга	42,4	52,7	5,0
HER-прямая	44,6	52,6	2,8
LER-дуга	51,1	42,8	6,2
LER-дуга	37,5	56,7	5,7

Примечание: HER — кольцо высоких энергий; LER — кольцо низких энергий.

ТАБЛИЦА I–9. РЕЗУЛЬТАТЫ ОБСЛЕДОВАНИЯ МАГНИТНОЙ СЕКЦИИ: КОЛЬЦО ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ — ДУГА

Место нахождения	Количество	Неактивированная составляющая	Серая составляющая	Активированная составляющая
П	341	144	189	8
К	360	258	95	7
С	116	92	18	6

Примечание: П — поворотный магнит; К — квадраполь; С — секступоль.

ТАБЛИЦА I–10. РЕЗУЛЬТАТЫ ОБСЛЕДОВАНИЯ МАГНИТНОЙ СЕКЦИИ:
КОЛЬЦО ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ — ПРЯМАЯ

Место нахождения	Количество	Неактивированная составляющая	Серая составляющая	Активированная составляющая
П	41	20	18	3
К	97	59	33	5
С	88	45	39	4

Примечание: П — поворотный магнит; К — квадраполь; С — секступоль.

ТАБЛИЦА I–11. РЕЗУЛЬТАТЫ ОБСЛЕДОВАНИЯ МАГНИТНОЙ СЕКЦИИ:
КОЛЬЦО НИЗКИХ ЭНЕРГИЙ — ДУГА

Место нахождения	Количество	Неактивированная составляющая	Серая составляющая	Активированная составляющая
П	122	101	15	6
К	343	258	76	9
С	113	80	31	2

Примечание: П — поворотный магнит; К — квадраполь; С — секступоль.

ТАБЛИЦА I–12. РЕЗУЛЬТАТЫ ОБСЛЕДОВАНИЯ МАГНИТНОЙ СЕКЦИИ:
КОЛЬЦО НИЗКИХ ЭНЕРГИЙ — ПРЯМАЯ

Место нахождения	Количество	Неактивированная составляющая	Серая составляющая	Активированная составляющая
П	201	113	88	0
К	114	53	57	4

Примечание: П — поворотный магнит; К — квадраполь.

I–8.8. Тематическое исследование по электрон-синхротронной установке КЕКВ в КЕК

После остановки ускорителя TRISTAN (Transposable Ring Intersecting Storage Accelerator in Nippon — транспонируемый кольцевой пересекающийся ускоритель-накопитель в Японии) был построен КЕКВ (электрон-синхротронная установка КЕК) для исследований в области физики элементарных частиц путем проведения экспериментов с электрон-позитронными столкновениями; он состоял из двух электронных синхротронов, кольца низкой энергии (5,0 ГэВ) и кольца высокой энергии (10 ГэВ) в одном ускорительном туннеле. Окружность двух ускорителей составляла около 3 км. При модернизации до Super КЕКВ была проведена оценка активированного объема, образующегося в результате осуществления работ по выводу из эксплуатации путем радиационных

измерений. Результаты представлены в таблицах I-8 — I-12. В случае вакуумной камеры общая масса составила около 300 т, при этом 5% этого объема подверглась активации. Категоризация серых компонентов (материалов, активность которых близка к уровню освобождения от контроля) показала, что эти материалы были близки к уровню освобождения от контроля, и любой материал, соответствующий требованию по уровню освобождения от контроля, исключается из серой части после дополнительного тщательного анализа. Масса магнитов составила около 6000 т в кольце высокой энергии и 1700 т в кольце низкой энергии. Изгибающие магниты имели очень большую массу. Поэтому оценка активированного объема была важна для определения потребностей в складских помещениях. Поскольку был активирован небольшой процент магнитов, было важно определить серую часть этих компонентов. Основными обнаруженными нуклидами были ^{54}Mn и ^{60}Co .

В случае электронного синхротрона накопительного типа остаточная активность была очень низкой. Выдержка продолжительностью от нескольких лет до нескольких десятков лет позволяет весьма эффективно уменьшить объемы радиоактивных отходов. В случае КЕКБ строительные конструкции не подвергались активации во время эксплуатации. Большая часть магнитов была повторно использована при сооружении Super КЕКБ.

На рис. I-33 показано, как был проведен анализ нуклидов и активности, наведенной в магнитах, с использованием германиевого детектора. На рис. I-34 показаны сотрудники, выполняющие измерения мощности дозы.



РИС. I-33. Анализ нуклидов и активности, наведенной в магнитах, с использованием германиевого детектора (воспроизведено из [I-18] с любезного разрешения К. Масумото).



РИС. I–34. Измерения мощности дозы (воспроизведено из [I–18] с любезного разрешения К. Масумото).

I–8.9. Тематическое исследование по протонному синхротрону на энергию 12 ГэВ В КЕК

Комплекс протонного синхротрона на 12 ГэВ состоял из линака Кокрофта-Уолтона на 40 МэВ, бустерного синхротрона на 500 МэВ и протонного синхротрона на 12 ГэВ. К нему также были присоединены несколько экспериментальных лабораторий и пучковых каналов для научных работ,

ТАБЛИЦА I–13. КОЛИЧЕСТВО (Т), ПОВТОРНО ИСПОЛЬЗОВАННОЕ ПРИ СТРОИТЕЛЬСТВЕ КОМПЛЕКСА J-PARC

Уровень активности	Магнит	Железный экран	Бетонный экран
Низкий уровень	450	150	1000
Уровень освобождения от контроля	н/п	300	3000
Нерadioактивные	н/п	1000	5000
Всего	450	1450	9000

Примечание: н/п — не применимо.

ТАБЛИЦА I–14. КОЛИЧЕСТВА (Т), ОБРАЗОВАВШИЕСЯ ОТ ВЫВОДА ИЗ ЭКСПЛУАТАЦИИ ПРОТОННОГО СИНХРОТРОНА НА 12 ГЭВ

Уровень	Железо	Медь	Бетон
Низкий уровень	6 350	825	36 230
Уровень освобождения от контроля	3 840	225	36 380
Нерadioактивные	300	н/п	73 850
Всего	10 490	1 050	146 460

Примечание: н/п — не применимо.

связанных с изучением нейтронов, мюонов, ядер, частиц и нейтрино. Большая часть этого объекта была закрыта в 2005 году. Ряд приборов и элементов защитного экранирования, как показано в таблице I–13, был передан для повторного использования в комплекс J-PARC — ускорительный комплекс с протонным пучком высокой интенсивности.

После вычитания объемов повторно использованных материалов, указанных в таблице I–13, общее количество материалов, образовавшихся при выводе из эксплуатации, в отношении которых требуется осуществлять дальнейшие операции по обращению с ними, приведено в таблице I–14. Было установлено, что в случае высокоэнергетических протонных синхротронов освобождалось от контроля очень большое количество радиоактивных отходов и материалов, находящихся в пределах уровня освобождения от контроля. Особенно важным в этом проекте был метод оценки наведенной радиоактивности бетона при осуществлении работ по выводу из эксплуатации, о чем сообщается в [I–20]. Основные элементы оборудования протонного синхротрона на 12 ГэВ сохраняются в качестве активированных материалов. Осуществление проекта по выводу из эксплуатации еще не начато.

СПРАВОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ К ПРИЛОЖЕНИЮ I

- [I–1] BROADHURST, J.H., BLAIR, J.M., Constructional changes made to the Minnesota MP tandem Van de Graaff accelerator, Nucl. Instrum. Methods **122** (1974) 143–146.
- [I–2] KAHN, J., Our History: From Particle Physics to the Full Spectrum of Science, Lawrence Berkeley National Library (1989), <https://www2.lbl.gov/Science-Articles/Archive/history-of-lbl.html>
- [I–3] ESA, Demolition of Building 51 and the Bevatron, Final Environmental Impact Report, prepared for Lawrence Berkeley National Laboratory, ESA, Oakland, CA (2007).
- [I–4] Lawrence Berkeley National Laboratory, Demolition of Building 51 and the Bevatron, Final Environmental Assessment, DOE/EA-1541, March (2008).
- [I–5] GOGLIA, M.R., NEGIN, C.A., Demolishing the Berkeley Bevatron, Report LBNL-56732, Lawrence Berkeley National Laboratory, CA (2004).
- [I–6] UNITED STATES DEPARTMENT OF ENERGY, Demolition of Building 51 and the Bevatron, Environmental Assessment DOE/EA-1541, Lawrence Berkeley National Laboratory, CA (2008).
- [I–7] UNITED STATES DEPARTMENT OF ENERGY, Lessons Learned from the Demolition of the Bevatron, Lawrence Berkeley National Laboratory, Berkeley, CA, 2020.
- [I–8] Westfall, C., How Argonne’s Intense Pulsed Neutron Source Came to Life and Gained Its Niche: The View from an Ecosystem Perspective, USDOE, Washington, DC (2007).
- [I–9] McKEOWN, R.D., The Jefferson Lab 12 GeV Upgrade, J. Physics: Conf. Ser. **312** (2011) 032014.

- [I-10] SILARI, M., ULRICI, L., Investigation of induced radioactivity in the CERN Large Electron Positron collider for its decommissioning, Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. A **526** 3 (2004) 510–536.
- [I-11] FASSÒ, A., et al., Radiation Problems in the Design of the Large Electron Positron Collider (LEP), Rep. 84-02, CERN, Geneva (1984).
- [I-12] GOEBEL, K., The Radiological Impact of the LEP Project on the Environment, Rep. 81-08, CERN, Geneva (1981).
- [I-13] BUNDESAMT FÜR STRAHLENSCHUTZ, Ordinance on the Protection against Damage and Injuries Caused by Ionizing Radiation (Radiation Protection Ordinance), StrlSchV Edition 7/16 (2001).
- [I-14] PESCHEL, K., Radiologische Bewertung von Bauteilen aus dem Rückbau eines Isochronzyklotrons mit dem Ziel der Freigabe §29, diploma thesis, Leipzig Univ. (2009).
- [I-15] Statistics on the Use of Radiation in Japan, Japan Radioisotope Association, Tokyo (2017).
- [I-16] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Application of the Concepts of Exclusion, Exemption and Clearance, IAEA Safety Standards Series No. RS-G-1.7, IAEA, Vienna (2004).
- [I-17] UWAMINO, Y., Relation between surface dose rate and induced radioactivity, Japan, J. Radiat. Saf. Manage. **12** 1 (2013) 36–40 (in Japanese).
- [I-18] MASUMOTO, K., Decommissioning of an accelerator facility — Example of the Tanashi Branch, High Energy Accelerator Research Organization, Journal of the RANDEC **39** 3 (2009) 33 (in Japanese).
- [I-19] MASUMOTO, K., TOYODA, A., EDA, K., IZUMI, Y., SHIBATA, T., Evaluation of radioactivity induced in the accelerator building and its application to decontamination work, J. Radioanal. Nucl. Chem. **255** (2003) 465–469.
- [I-20] KINOSHITA, N., et al., Depth profile of radioactivity induced in the thick concrete shield in EP-1 beam line at the KEK 12 GeV proton synchrotron facility, Nucl. Technol. **168** (2009) 694–699.

Приложение II

РАЗРАБОТКА УСКОРИТЕЛЕЙ

II-1. ВВЕДЕНИЕ

В ноябре 1895 года Вильгельм Конрад Рентген первым ускорил пучок электронов статической разностью потенциалов и получил энергию порядка 20 000 эВ. К началу двадцатого века несколько лабораторий освоили эту технику [II-1], и многие больницы проявили интерес к ее применению. История создания первых ускорителей частиц описана в [II-2].

Рождение науки, которая привела к созданию современных ускорителей частиц, относится к 1911 году, когда Эрнест Резерфорд открыл ядро, рассеивая альфа-частицы на золотой фольге [II-3]. Интерес к использованию протонных ускорителей, однако, возник примерно в 1920-х годах после того, как Резерфорд «разбил» ядро азота альфа-частицами естественного источника радиоактивного излучения [II-1]. Физика и технология ускорителей и накопительных колец охватывает многие отрасли науки. К ним относятся электромагнетизм, свойства материалов в твердом состоянии, атомная физика, сверхпроводимость, нелинейная механика, спиновая динамика, физика плазмы и квантовая физика. Первый высоковольтный ускоритель частиц имел разность потенциалов порядка 100 кВ; он был разработан Кокрофтом и Уолтоном в 1920 году и назван ускорителем Кокрофта-Уолтона. Кокрофт и Уолтон использовали источник переменного тока для зарядки нескольких конденсаторов до высокого напряжения. Затем конденсаторы разряжались, так что разности потенциалов складывались. В 1932 году Кокрофт и Уолтон осуществили первую ядерную реакцию, используя искусственно ускоренные частицы, бомбардируя и разрушая ядра лития протонами, ускоренными до 700 кВ [II-4]. Впервые в этом случае ускоритель частиц был использован для запуска ядерной реакции. За эту работу в 1951 году Кокрофт и Уолтон были удостоены Нобелевской премии по физике.

В 1929 году Роберт Джејмисон Ван-де-Грааф сконструировал первую работающую модель электростатического ускорителя, на котором было достигнуто напряжение 80 кВ. Этот ускоритель был разработан для использования в экспериментах по «расщеплению атома»; в ноябре 1931 года на торжественном ужине Американского института физики была представлена демонстрационная модель, на которой было получено напряжение свыше 1 МВ. На рис. II-1 показана простая хорошо известная схема ускорителя Ван-де-Граафа. Генераторы Ван-де-Граафа используются и сегодня, особенно на начальных стадиях современных ускорителей, и в конечном итоге способны создавать разность потенциалов около 10 МВ [II-5].

В начале 1930-х годов Раймонд Дж. Херб вместе со своими студентами и коллегами из Висконсинского университета разработал электростатический генератор Ван-де-Граафа для практического применения в качестве ускорителя с мегаэлектронвольтным пучком ионов.

В 1931 году Эрнест Лоуренс сконструировал «циклотрон», кольцевое устройство, состоящее из двух электродов, помещенных в магнитное поле, в котором частицы движутся по круговой траектории. Частицы можно было ускорять путем изменения направления электрического поля электродов между двумя пересечениями зазора. При потенциале переменного тока всего 2000 В Лоуренс ускорял протоны до 80 кВ, и в 1932 году этот успех вдохновил его на ускорение протонов примерно до 1,2 МэВ в магнитном поле с индукцией, примерно равной 0,5 Тесла на расстоянии 30 см. В 1939 году за эту работу он был удостоен Нобелевской премии по физике [II-2, II-6].

Джеймс А. Ферри в 1965 году изобрел базовую индукционную систему зарядки ускорителя «Пеллетрон» и позже основал Национальную электростатическую корпорацию вместе с Хербом для производства ускорителей «Пеллетрон» [II-7].

Хотя Лоуренс и Ливингстон спроектировали первый небольшой циклотрон в 1930 году, Рольф Видероз еще в 1928 году опубликовал статью о своих результатах работы с радиочастотным линейным ускорителем (линаком) для ионов. Это устройство было предложено в 1925 году Эрнстом

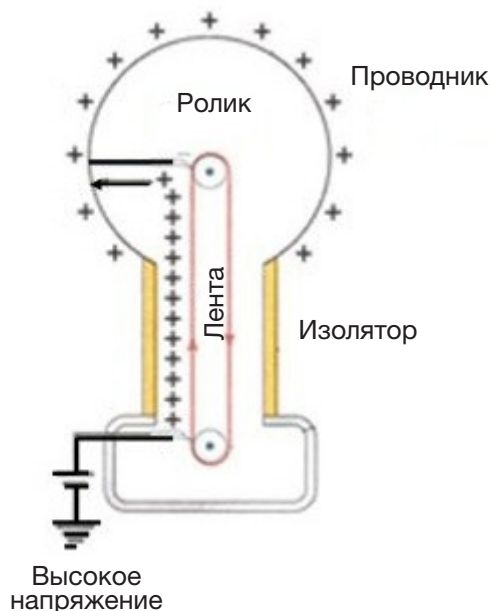


Рис. II-1. Упрощенная схема генератора Ван-де-Граафа.

Изингом. Оно состояло из ряда цилиндрических трубок, расположенных вдоль продольной оси вакуумированного стеклянного цилиндра. Попеременно трубки подключались к противоположным клеммам радиочастотного генератора [II-3]. Выбирая частоту и применяемое радиочастотное напряжение, можно было одновременно ускорять различные тяжелые ионы через зазоры и группировать их. В 1931 году Дэвид Х. Слоан и Лоуренс использовали набор из 30 электродов и ускорили ионы Hg^+ до 1,26 МэВ с напряжением 42 кВ на радиочастоте 10 МГц [II-3].

В конце 1940-х годов после Второй мировой войны Лоуренс инициировал осуществление программы в Радиационной лаборатории Калифорнийского университета (в настоящее время известной как Национальная лаборатория им. Лоуренса в Беркли) вместе с Комиссией по атомной энергии США по исследованию электроядерного бридинга ^{239}Pu , ^{232}U и ^3H (трития) при бомбардировке обедненного урана нейтронами, полученными на ускорителе [II-3, II-8]. Начиная с 1950 года на площадке, известной сейчас как Ливерморская национальная лаборатория им. Лоуренса, были сооружены и испытаны несколько мощных радиочастотных линейных ускорителей протонов и дейтронов. Когда был построен первый линак, единственным другим протонным линаком, который уже работал, был линейный ускоритель на 32 МэВ, построенный Луисом Альваресом, и в Миннесотском университете строился линак на 68 МэВ p^+ [II-3, II-8].

В середине 1950-х годов были демонтированы большие линаки, которые использовались в программе ускорителей для испытания материалов (12–48 МГц), но ученые, которые работали с такими системами, продолжали строить множество успешно работавших протонных линаков в исследовательских учреждениях, таких как Брукхейвенская национальная лаборатория, Аргоннская национальная лаборатория, Национальная лаборатория ускорителей им. Ферми (Fermilab) и Лос-Аламосская национальная лаборатория [II-3]. Большинство этих современных линейных ускорителей, которые используются для физических исследований, были основаны на первоначальной конструкции ускорителя Альвареса на 200 МГц [II-3]. Типичные линейные градиенты, достигаемые в этих линаках конструкции Альвареса, составляют 1–2,5 МэВ/м, а градиенты в зазорах варьируются от 6 до 10 МэВ/м. Благодаря разработке в 1938 году сильных фокусирующих магнитов (квадрупольных магнитов) в линаках такой конструкции также были использованы квадрупольные магниты внутри цилиндрических дрейфовых трубок [II-3]. Обычно магниты изготавливаются из стали или железа. Вместе с тем для изготовления мощных магнитов также могут применяться специальные сплавы железа, никеля, меди, кобальта и алюминия.

Бетатрон представляет собой циклический ускоритель частиц, разработанный Дональдом Керстом в Иллинойском университете в 1940 году для ускорения электронов [II–10 — II–12]. Следует отметить, что концепция бетатрона была первоначально предложена Видероз [II–13], однако ему не удалось реализовать создание индукционного ускорителя из-за отсутствия в конструкции поперечной фокусировки [II–14]. Макс Штеенбек из Германии также работал над созданием бетатрона в 1940-х годах [II–15]. В отличие от других ускорителей частиц название «бетатрон» ничего не говорит нам о том, как он работает. В бетатроне переменный ток, индуцированный переменным магнитным полем, обеспечивает ускорение электронов (бета-частиц) до высоких энергий по круговой орбите. Бетатрон стал первой важной установкой, предназначенной для получения высокоэнергетических электронов.

Первый бетатрон, построенный в Иллинойском университете, был изобретен Керстом [II–16]; он показан на рис. II–2. Первый частный медицинский центр для лечения онкологических больных с применением бетатрона был открыт в конце 1950-х годов доктором О. Артуром Стиенноном в пригороде Мэдисона, шт. Висконсин, Соединенные Штаты Америки (США).

Бетатроны до сих пор используются в промышленности и медицине, поскольку это очень компактные ускорители электронов. Однако максимальная энергия, которую можно получить с помощью бетатрона, ограничивается размером сердечника магнита и напряженностью магнитного поля из-за насыщения железа. В синхротронах, которые являются ускорителями следующего поколения, эти ограничения преодолены.

В США следует отметить физика и лауреата Нобелевской премии Эдвина Мэттисона Макмиллана, который разделил эту премию по химии с Гленном Сиборгом в 1951 году. Он присоединился к группе Лоуренса в Калифорнийском университете в Беркли после получения докторской степени и перешел в Радиационную лабораторию Беркли при ее основании в 1934 году [II–3]. Его экспериментальные работы привели к открытию ^{15}O вместе с Ливингстоном и ^{10}Be с Сэмюэлем Рубеном.

В 1937 году Ханс Альбрехт Бете продемонстрировал возможность ограничения энергии в циклотроне [II–16]. Основываясь на теории относительности Альберта Эйнштейна, которая подтверждает увеличение массы частицы, когда она движется со скоростью, близкой к скорости света, Бете показал, что это увеличение массы в конечном итоге уменьшает вращение каждой частицы. Таким образом, скорость частиц будет уменьшаться по мере замедления вращения каждой частицы, а частота переменного электрического поля остается постоянной, в конечном итоге устанавливая верхний предел энергии частицы, получаемой в циклотроне [II–2].

Для преодоления этого ограничения Владимир Иосифович Векслер независимо предложил уменьшить частоту переменного электрического поля, с тем чтобы она соответствовала уменьшающимся частотам вращения ускоряющихся частиц. Это означало синхронизацию электрического поля с движущимися частицами, и данная концепция позднее привела к разработке синхроциклотрона. Синхротрон использовался в Радиационной лаборатории в Беркли для создания новых элементов, расширяющих периодическую таблицу элементов после атомного номера 92. Описание ранних исследований по получению энергетических частиц изложено в [II–19 — II–21].

В 1957 году Радиационная лаборатория в Беркли модернизировала свой аппарат с целью достижения энергии частиц до 720 миллионов эВ, что стало рекордом для циклотронов в то время. Этот успех привел к созданию других синхроциклотронов в США и Европе.

В феврале 1949 года американский физик Роберт Эндрюс Макмиллан объявил о первых синтетических мезонах, полученных с использованием синхроциклотрона. Позднее его теоретические работы привели к созданию электронного синхротрона, протонного синхротрона, микротрона и линака. Более широкое использование ускорителей, особенно больших ускорителей, открыло новую эру в физических исследованиях. В 1960-х годах было доказано, что синхроциклотрон можно использовать в качестве мощного источника излучения (рентгеновских лучей), и некоторые ускорители стали доступными для применения этого излучения.



Рис. П-2. Первый бетатрон и его изобретатель в 1940 году в Иллиноиском университете (любезно предоставлено архивом Иллиноиского университета).

Первый электрон-позитронный коллайдер, Anello di Accumulazione, был построен в 1961 году в Италии в Национальном институте ядерной физики во Фраскати австро-итальянским физиком Бруно Тушеком [П-22]. Примерно в то же время Герш Будкер самостоятельно разработал электрон-электронный коллайдер ВЭП-1 в Институте ядерной физики в Советском Союзе.

В 1966 году в Европейской организации ядерных исследований (ЦЕРН) началась работа над Пересекающимися накопительными кольцами (ISR), которые были первой построенной установкой со встречными адронными пучками. Этот коллайдер работал с 1971 по 1983 год [П-23]. Это был первый адронный коллайдер, так как все предыдущие коллайдеры работали с электронами или с электронами и позитронами.

В период с 1989 по 2000 год Большой электрон-позитронный коллайдер (LEP) в ЦЕРН использовался для разгона электронных пучков до энергии 105 ГэВ в туннеле с окружностью 27 км. На месте LEP в 2000–2006 годах был построен Большой адронный коллайдер (БАК).

БАК расширил границы науки и техники и поднял их на новую высоту. В его конструкции используется 1232 больших дипольных магнита для управления пучком; каждый дипольный магнит имеет длину 14,3 м и массу 35 тонн. БАК работает при температуре примерно на 300 градусов Цельсия ниже комнатной. Эта система создавала пучок протонов с энергией 7 ТэВ на протон. Основываясь на успехе БАК, ЦЕРН строит амбициозные планы в отношении будущих исследований.

II-2. БУДУЩЕЕ УСКОРИТЕЛЕЙ

БАК является одной из самых сложных когда-либо созданных установок, и на создание этого коллайдера потребовалось 24 года, а его стоимость составила около 10 миллиардов евро. Менее чем за столетие созданные конструкции ускорителей позволили повысить энергию частиц с 10 МэВ в случае экспериментов Резерфорда с альфа-частицами до 7 ТэВ в пучках протонов БАК, т.е. почти в миллион раз. За последние десять лет БАК внес существенный вклад в развитие новых научных горизонтов. Это включает получение двух встречно вращающихся пучков протонов с энергией до 7 ТэВ и обеспечение их столкновения. Роль БАК в обнаружении бозона Хиггса 4 июля 2012 года была значительной, поскольку коллайдер обеспечил наличие механизма, способствующего возникновению массы у субатомных частиц.

На основе проведенных исследований и технологических разработок, извлеченных уроков и достигнутых успехов ЦЕРН осуществляет международное сотрудничество с участием более 150 научно-исследовательских институтов, в том числе университетов и промышленных партнеров, и планирует сооружение Будущего кольцевого коллайдера (FCC). Ожидается, что этот коллайдер позволит достигнуть энергии столкновения частиц до 100 ТэВ с применением туннеля с окружностью 100 км. Он будет построен рядом с существующим туннелем БАК и, как ожидается, станет крупнейшим в мире коллайдером, мощность которого в десять раз превышает мощность БАК. Детальная информация приводится в [II-24]. Усовершенствованная конструкция FCC расширит возможности исследований, проводимых в настоящее время на БАК, после окончания срока его службы. Ожидается, что FCC также позволит раскрыть некоторые тайны строения материи, ключ к которым не может быть найден с помощью исследований на БАК.

Возможности, которые может обеспечить применение FCC, охватывают множество интересных вопросов. FCC сделает возможным изучение галактик и других межскалярных структур во Вселенной и поможет разгадать тайну темной материи путем получения ответов на вопросы: «Состоит ли темная материя из неизвестных частиц?»; «Как она взаимодействует?»; «Почему после того, как большой взрыв привел к асимметрии вещества и антивещества, осталась небольшая часть темной материи?»; «Как этот дисбаланс создал полный материи мир, в котором мы живем?»; «Что такое темная энергия?»; «Что удерживает вместе вращающиеся галактики, где сила гравитации в глубоком космосе слишком мала?». Физики надеются, что на некоторые из этих вопросов можно будет ответить с помощью экспериментов на БАК и FCC, и это приведет нас к будущим поразительным открытиям.

СПРАВОЧНЫЙ МАТЕРИАЛ ДЛЯ ПРИЛОЖЕНИЯ II

- [II-1] AMALDI, U., "The First Fifty Years", Particle Accelerators: From Big Bang Physics to Hadron Therapy, Springer, Switzerland (2015).
- [II-2] KULLANDER, S., Accelerators and Nobel Laureates,
<https://www.nobelprize.org/prizes/themes/accelerators-and-nobel-laureates>
- [II-3] JONES, R.M., Linear Accelerators: Theory and Practical Applications, University of Manchester, Cockcroft Institute, Daresbury, UK (2007),
http://atlas.physics.arizona.edu/~kjohns/downloads/linac/Linacs_Week_1-Vers2.1.pdf
- [II-4] COCKCROFT, J.D., WALTON, E.T.S., Artificial production of fast protons, *Nature* **129** 242 (1932).
- [II-5] CHOPPIN, G.R., LILJENZIN, J. O., RYDBERG, J., Radiochemistry and Nuclear Chemistry, 3rd edn, Elsevier, Amsterdam (2002) 352 pp.
- [II-6] LAWRENCE, E., The Evolution of the Cyclotron, The Nobel Foundation 1939, Nobel Lectures, Physics 1922-1941, Elsevier, Amsterdam (1965).
- [II-7] HERB, R.G., The Pelletron accelerator, *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **18** 3 (1971).

- [II-8] OECD NUCLEAR ENERGY AGENCY, Shielding Aspects of Accelerators, Targets and Irradiation Facilities — SATIF 10: Workshop Proceedings, Geneva, Switzerland, 2–4 June 2010, OECD/NEA, Paris (2011).
- [II-9] UNITED STATES DEPARTMENT OF ENERGY, Department of Energy announces completion of world's largest laser (2009),
www.energy.gov/articles/departments-energy-announces-completion-worlds-largest-laser
- [II-10] KERST, D.W., Acceleration of electrons by magnetic induction, *Phys. Rev.* **58** 9 (1940) 841.
- [II-11] KERST, D.W., The acceleration of electrons by magnetic induction, *Phys. Rev.* **60** (1941) 47–53.
- [II-12] KERST, D.W., SERBER, R., Electronic orbits in the induction accelerator, *Phys. Rev.* **60** 1 (1941) 53–58.
- [II-13] WIDERÖE, R., Über ein neues Prinzip zur Herstellung hoher Spannungen, *Archiv für Elektrotechnik* **21** 4 (1928) 387–406.
- [II-14] DAHL, P.F., From Nuclear Transmutation to Nuclear Fission, 1932–1939, CRC Press, Boca Raton, FL (2002).
- [II-15] HINTERBERG, F., *Physik der Teilchenbeschleuniger und Ionenoptik*, Springer, Berlin (2008).
- [II-16] HENTSCHEL, K., *Physics and National Socialism: An Anthology of Primary Sources*, Birkhäuser, Switzerland (1996).
- [II-17] SESSLER, A., SYMON, K., Donald William Kerst, 1911–1993, Biographical Memoirs, National Academies Press, Washington, DC (1997).
- [II-18] MYERS, S., PICASSO, E., The design, construction and commissioning of the CERN Large Electron–Positron Collider, *Contemp. Phys.* **31** 6 (1990) 387–403.
- [II-19] KERST, D.W., et al., Attainment of very high energy by means of intersecting beams of particles, *Phys. Rev.* **102** 2 (1956) 590–591.
- [II-20] OHKAWA, T., Two-beam fixed field alternating gradient accelerator, *Rev. Sci. Instrum.* **29** 108 (1958).
- [II-21] O'NEILL, G., Storage ring synchrotron: Device for high-energy physics research, *Phys. Rev.* **102** 5 (1956) 1418–1419.
- [II-22] AMALDI, E., The Bruno Touschek Legacy, CERN 81-19, CERN, Geneva (1981).
- [II-23] KRISCH, A.D., Storage rings: Past, present and future, *AIP Conf. Proc.* **512** 1 (2000) 394–415.
- [II-24] SCHULTE, D., et al., Future Circular Collider Publication: Recommended Accelerator follow-up R&D: Milestone M2.6, CERN-ACC-2019-0046, European Circular Energy-Frontier Collider Study (EuroCirCol), May (2019),
<https://cds.cern.ch/record/2673144/files/CERN-ACC-2019-0046.pdf>

Приложение III

ВЫВОД ИЗ ЭКСПЛУАТАЦИИ ТЕРМОЯДЕРНЫХ УСТАНОВОК

III-1. ВВЕДЕНИЕ В УПРАВЛЯЕМЫЙ ТЕРМОЯДЕРНЫЙ СИНТЕЗ

Согласно отчету Управления энергетической информации США, опубликованному в «International Energy Outlook 2016» («Международном энергетическом обзоре 2016»), мировая чистая выработка электроэнергии в 2012 году составила 21,6 трлн кВт·ч и, как ожидается, возрастет до 25,8 трлн кВт·ч к 2020 году, а затем до 36,5 трлн кВт·ч к 2040 году [III-1]. Важным фактором спроса на электроэнергию является экономический рост в современном обществе. Для удовлетворения растущего спроса необходим коммерчески устойчивый, безопасный и недорогой источник энергии. В настоящее время исследуются различные перспективные источники, и управляемый термоядерный синтез является одним из наиболее важных.

С начала XX века стало ясно, что энергия Солнца и других звезд создается путем термоядерного синтеза. Простым вариантом термоядерного синтеза является базовый цикл синтеза водорода: четыре ядра водорода (протоны) образуют ядро гелия. Для этого требуются экстремально высокие давления и температуры, которые возникают естественным образом под действием сильной гравитационной силы в ядре Солнца; эти условия невозможно создать в лаборатории.

На протяжении десятилетий научное сообщество занимается термоядерным синтезом. В реакциях синтеза легкие атомные ядра сжимаются под действием сильного давления и высокой температуры, образуя более тяжелые ядра и выделяя при этом энергию. Основными видами топлива, используемыми в термоядерном синтезе, являются дейтерий и тритий — тяжелые изотопы водорода. Дейтерий составляет часть природного водорода и может быть недорого извлечен из морской воды. Тритий можно получить из лития, который изобилует в природе. Таким образом, термоядерное топливо является недорогим и в изобилии присутствует в природе. В настоящее время исследования достигли решающего этапа, и ученые строят экспериментальный реактор, который, как ожидается, продемонстрирует, что энергия термоядерного синтеза действительно является жизнеспособной и может быть использована для коммерческой выработки электроэнергии. Процесс необходимо оптимизировать, чтобы установка генерировала больше энергии, чем она потребляет.

Создание термоядерной электростанции, способной выдерживать огромные температуры и давления, — это одна из величайших инженерных задач, которые когда-либо решались. Смесь изотопов дейтерия и трития необходимо разогревать примерно до 100 миллионов градусов Цельсия. При этой температуре полностью ионизированная плазма должна оставаться достаточно плотной и удерживаться в ограниченном пространстве в течение времени, достаточного для слияния ядер. Целью программы исследований по управляемому термоядерному синтезу является достижение «зажигания», которое происходит при возникновении достаточного количества реакций синтеза для того, чтобы процесс стал самоподдерживающимся. В настоящее время ученые используют два метода достижения термоядерного синтеза: магнитное удержание и инерционное удержание плазмы, краткое описание которых приводится ниже. Полученное тепло затем используется для выработки пара, который приводит в действие турбины, вырабатывающие электроэнергию.

Потенциальные преимущества термоядерной энергетики многочисленны: она будет представлять собой долгосрочный, устойчивый, экономичный и безопасный источник энергии с короткоживущими ядерными отходами.

Исследования в области термоядерного синтеза продолжаются, но при этом многие побочные результаты, связанные с физикой плазмы и технологиями синтеза, уже приносят пользу обществу. К ним относятся достижения в области исследования материалов, космической науки, экологии,

медицины, коммуникации и удаления отходов. Существует несколько различных видов побочных результатов исследований в области термоядерного синтеза, к которым следует отнести, например, знания, получаемые в ходе экспериментов [III–2].

Ниже рассматриваются две важные схемы достижения высоких температур и давлений, необходимых для осуществления реакций термоядерного синтеза с использованием изотопов водорода. Успешная реализация технологии термоядерного синтеза позволит обеспечить мир безопасным, устойчивым, экологически ответственным и практически неисчерпаемым источником энергии.

III–2. ТЕХНОЛОГИИ ТЕРМОЯДЕРНОГО СИНТЕЗА

Сегодня программы по термоядерному синтезу активно развиваются в рамках международного сотрудничества и в ряде государств, включая Бразилию, Индию, Канаду, Китай, Республику Корея, Российскую Федерацию, Соединенные Штаты Америки (США) и Японию, при активной государственной поддержке, а также в Европейском союзе. Вскоре после Второй мировой войны исследования по ядерному синтезу в США и бывшем СССР были связаны с разработкой атомного оружия и оставались засекреченными до конференции «Атом для мира», состоявшейся в 1958 году в Женеве. В конце 1960-х годов исследования по термоядерному синтезу приобрели прагматический характер и перешли в сферу энергообеспечения. После прорывных результатов, достигнутых на советском токамаке, в 1970-е годы термоядерные исследования стали «большой наукой». В связи со сложностью разработки технологии и высокой стоимостью устройств единственным способом продвижения вперед стало международное сотрудничество.

Сложность заключалась в создании устройства, которое могло бы нагревать дейтерий-тритиевое топливо до высокой температуры и удерживать ее достаточно долгое время, чтобы энергия, выделяющаяся в результате реакций синтеза, была выше, чем энергия, используемая для запуска реакции.

В настоящее время изучаются два основных экспериментальных подхода:

- a) магнитное удержание, в котором используются магнитные и электрические поля для нагрева и сжатия смеси дейтерия и трития. Воплощением такого экспериментального подхода является проект Международного термоядерного экспериментального реактора (ИТЭР) во Франции;
- b) инерционное удержание, в котором используются интенсивные лазерные лучи или ионные пучки для сжатия и нагрева смеси дейтерия и трития. Экспериментальный подход к осуществлению на практике данной схемы реализуется в Национальном комплексе зажигания Ливерморской национальной лаборатории им. Лоуренса, США.

III–2.1. Магнитное удержание

Краткий исторический обзор работ по термоядерному синтезу с магнитным удержанием описан в публикации «Fifty Years of Magnetic Fusion Research (1958–2008)» («Пятьдесят лет исследований в области ядерного синтеза с магнитным удержанием плазмы (1958–2008 годы)») [III–3].

На сегодняшний день разработано семь магнитных концепций для научных и технологических разработок в области термоядерного синтеза. К ним относятся токамак, стелларатор, пинч с обращенным полем, тандемное зеркало, сферический тор (токамак), конфигурация с обращенным полем и сферомак. В настоящее время в более 90% мировых исследований по термоядерному синтезу с магнитным удержанием плазмы используются токамаки, и эта схема считается наиболее многообещающей; исследования продолжаются на различных токамаках по всему миру с целью продемонстрировать выработку термоядерной энергии.

Токамак (сокращение на русском языке от слов «**т**ороидальная **к**амера с **м**агнитными **к**атушками») был разработан в 1951 году советскими физиками Андреем Сахаровым и

Игорем Таммом. Первый экспериментальный токамак был построен в Москве в 1954 году в Институте атомной энергии им. И. В. Курчатова (бывшей тогда Лаборатории измерительных приборов АН СССР).

Магнитные поля идеально подходят для удержания плазмы, так как наличие электрических зарядов на разделенных ионах и электронах означает, что они будут следовать за линиями магнитного поля. Цель состоит в том, чтобы предотвратить контакт частиц со стенками реактора, так как он приводит к рассеиванию тепловой энергии и замедлению этих частиц. Наиболее эффективная магнитная конфигурация — тороидальная в форме бублика, в котором магнитное поле изогнуто вокруг, образуя замкнутый контур. В схеме термоядерного синтеза с магнитным удержанием плазмы сотни кубических метров дейтерий-третиевой плазмы с плотностью менее одного миллиграмма на кубический метр удерживаются магнитным полем и нагреваются до температуры термоядерного синтеза, достигающей 50 миллионов градусов Цельсия. Для надлежащего удержания плазмы на это тороидальное поле должна быть наложена перпендикулярная компонента поля (полоидальное поле). В токамаке тороидальное поле создается серией катушек, равномерно размещенных вокруг реактора в форме тора, а полоидальное поле формируется системой горизонтальных катушек вне тороидальной магнитной структуры. Сильный электрический ток индуцируется в плазме с помощью центрального соленоида, и этот индуцированный ток также вносит вклад в полоидальное поле [III–4].

Также проводятся исследования на нескольких типах стеллараторов с целью расширить понимание поведения плазмы с масштабированием применительно к токамакам большого размера. Лайман Спитцер разработал первое термоядерное устройство — стелларатор и начал работу на нем в Принстонской лаборатории физики плазмы в 1951 году. В стеллараторе трудно удерживать плазму, но горящую плазму можно легко отслеживать и контролировать.

III–2.2. Инерционное удержание

Работы по термоядерному синтезу с инерционным удержанием плазмы, которые являются более новым направлением исследований, были начаты в 1970-х годах, хотя первоначальное компьютерное моделирование концепции термоядерного синтеза с инерционным удержанием было выполнено Джоном Наколлсом и его сотрудниками в Ливерморской национальной лаборатории им. Лоуренса в конце 1950-х годов. В этой технологии лазерные или ионные пучки очень точно фокусируются на поверхности мишени, которая представляет собой гранулу диаметром около 10 мм, содержащую смесь дейтерий-третиевого топлива. Взаимодействие интенсивных пучков на поверхности гранул нагревает внешний слой материала, который расширяется наружу, генерируя направленный внутрь ударный фронт или имплозию, которая сжимает и нагревает внутренние слои материала. Центр топлива может быть сжат до плотности, в тысячу раз превышающей плотность жидкости, что приводит к условиям воспламенения, при которых может произойти термоядерный синтез. Выделяющаяся при этом энергия нагревает окружающее топливо, которое также может подвергнуться термоядерному синтезу, что приводит к цепной реакции, поскольку реакция распространяется наружу по топливу. Время, необходимое для этих реакций синтеза, ограничивается инерцией топлива и не превышает одну микросекунду. В настоящее время работа по инерционному удержанию плазмы с использованием лазеров находится на продвинутой стадии по сравнению с применением пучков легких или тяжелых ионов.

Для реализации концепции выработки энергии с использованием инерционного термоядерного синтеза было предложено несколько решений, включая прямое воздействие, не прямое воздействие, быстрое зажигание и ударное зажигание. На сегодняшний день, однако, окончательно конструкция мишени и драйверов не выбрана, и исследования по оптимизации параметров мишени и драйверов продолжаются. Энергетическая концепция на основе инерционного термоядерного синтеза имеет преимущество, заключающееся в том, что конструкция реактора является полностью независимой от драйверов, что позволяет проводить параллельную разработку драйверов и реакторов.

III-3. ТЕРМОЯДЕРНЫЕ УСТАНОВКИ

На первой Международной конференции по использованию атомной энергии в мирных целях, состоявшейся в Женеве, Швейцария, в 1955 году, председательствующий Хоми Дж. Баба предсказал, что коммерческое использование термоядерного синтеза начнется в течение двух десятилетий. На второй конференции в 1958 году, также в Женеве, эксперты в области атомной энергии, особенно американские, британские и советские ученые, начали делиться информацией о ранее засекреченных исследованиях по управляемому термоядерному синтезу. Что касается термоядерного синтеза для коммерческого использования, то в последние годы были совершены прорывы в этой области, и имеется ряд перспективных проектов, которые могут привести к коммерческой реализации термоядерной энергетики.

Было построено несколько токамаков, в том числе «Объединенный европейский тор» (JET) и «Мегаамперный сферический токамак» (MAST) в Соединенном Королевстве, а также «Испытательный реактор термоядерного синтеза типа токамак» (TFTR) в Принстонской лаборатории физики плазмы в Соединенных Штатах Америки (США). Значительный объем исследований был проведен также по стеллараторам; самое крупное из них связано с «Большим спиральным устройством» в Национальном институте термоядерных исследований Японии, работа на котором началась в 1998 году. Это устройство используется для проведения исследований по оптимальной магнитной конфигурации для удержания плазмы. ИТЭР, расположенный в Кадараше, Франция, станет крупнейшим в мире токамаком на сегодняшний день, а также крупнейшим экспериментальным проектом по физике магнитного удержания плазмы.

В Институте физики плазмы им. Макса Планка, Гархинг, Германия, в период с 1988 по 2002 год проводились исследования на стеллараторе Wendelstein 7-AS. Эта работа была продолжена на установке Wendelstein 7-X в центре Института физики плазмы им. Макса Планка в Грайфсвальде. Wendelstein 7-X — это самый большой термоядерный реактор стеллараторного типа. Работа на нем началась в декабре 2015 года, и 3 февраля 2016 года была получена первая водородная плазма. Это устройство предназначено для изучения возможности использования данной конфигурации в конструкции электростанций.

На рис. III-1 показан внутренний вид установки Wendelstein 7-X, содержащей камеру для плазмы, катушки стелларатора, плоскую катушку, криостат и охлаждающие трубы. Другой стелларатор — TJII работает в Мадриде, Испания.

В рамках проекта JET в Соединенном Королевстве проводятся испытания материалов для стенок ИТЭР и исследования, направленные на улучшение понимания поведения плазмы в ИТЭР с дейтерий-третиевым топливом. На рис. III-2 представлен внутренний вид установки JET. Первая плазма на установке JET была получена в 1983 году, а также эта установка стала первым токамаком, на котором в ноябре 1991 года в экспериментальном порядке была выработана энергия управляемого термоядерного синтеза. Несмотря на то, что в 1997 году была достигнута термоядерная мощность около 16 МВт в течение одной секунды с использованием дейтериево-третиевой плазмы (но при этом потребляемая мощность составила 25 МВт), эффективность технологии до сих пор остается низкой. В настоящее время проводятся многочисленные эксперименты по изучению различных систем нагрева и других методов. В установке JET были весьма успешно использованы методы дистанционного управления внесением изменений во внутреннюю конструкцию установки в условиях радиоактивной среды. Установка JET является чрезвычайно важным устройством, используемым в целях подготовки к реализации ИТЭР. В последние годы установка была подвергнута значительной модернизации, необходимой для изучения и тестирования исследовательских и технических систем в области физики плазмы, имеющих отношение к ИТЭР. В 2006 году установка JET была переоборудована, и были созданы магнитные конфигурации, подобные магнитам ИТЭР, и в период с 2009 по 2011 год была установлена стенка, подобная той, которая будет использоваться в ИТЭР.

Реактор TFTR работал с 1982 по 1997 год в Принстонской лаборатории физики плазмы, США. В декабре 1993 года этот реактор стал первым магнитным термоядерным устройством, на

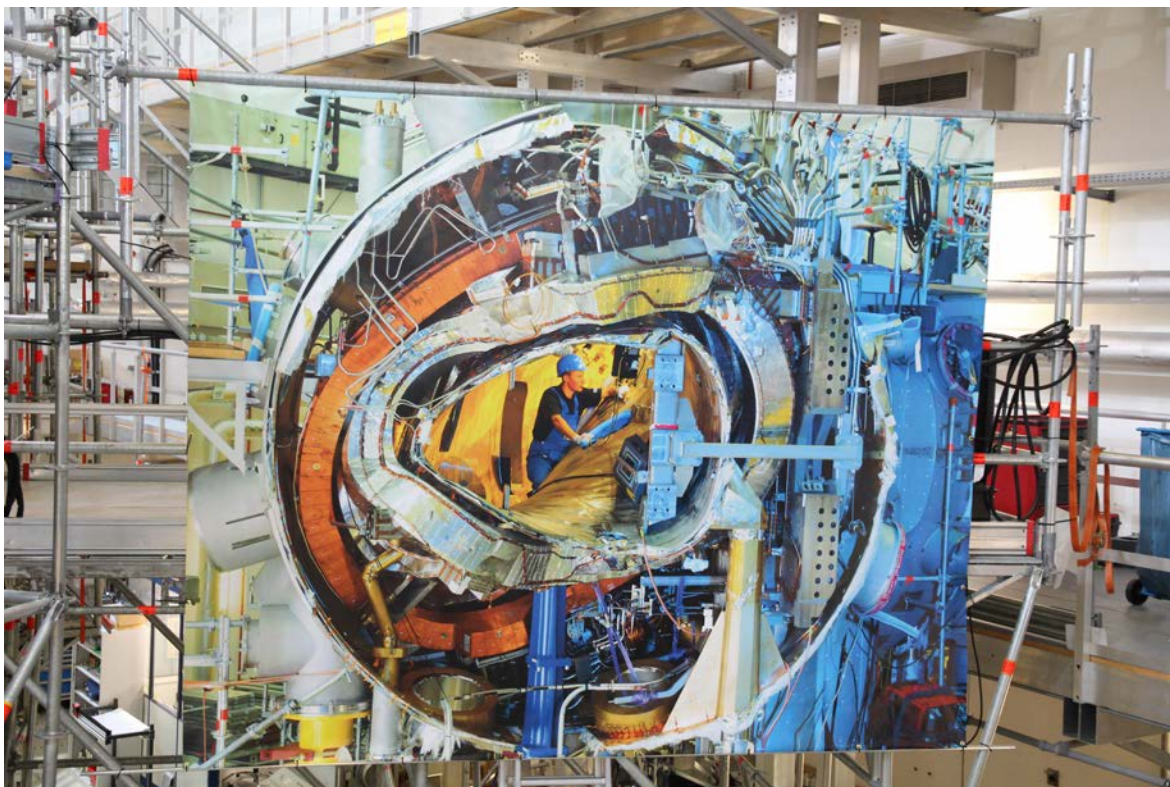


РИС. III–1. Стеллараторная установка Wendelstein 7-X в Институте физики плазмы им. Макса Планка в Грайфсвальде (любезно предоставлено Институтом им. Макса Планка).

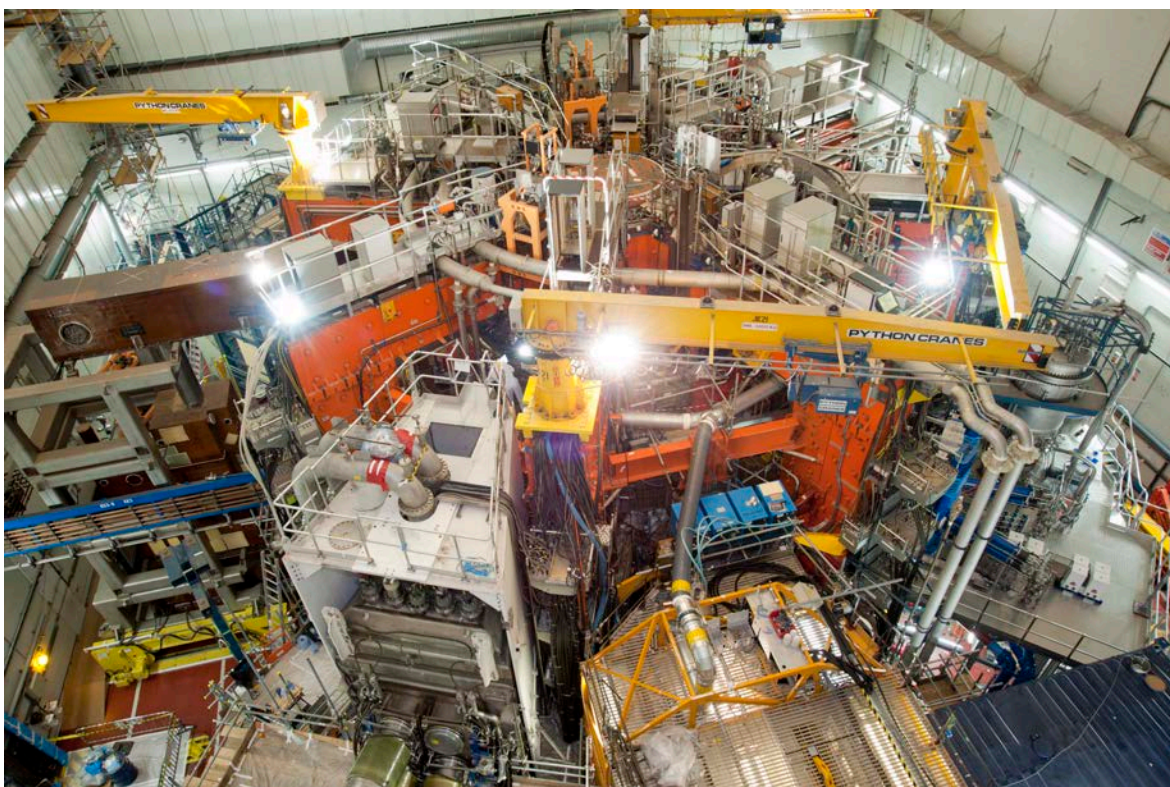


РИС. III–2. Внутренний вид установки JET (любезно предоставлено консорциумом «EUROfusion»).

котором проводились масштабные эксперименты с использованием дейтерий-тритиевой плазмы; в следующем году на нем была достигнута выработка 10,7 МВт энергии, что стало рекордом на тот момент времени. Проект не достиг цели безубыточной выработки энергии за счет управляемого термоядерного синтеза (когда энергия на выходе превышает энергию на входе), однако позволил достичь всех поставленных задач в области проектирования оборудования, и тем самым был внесен существенный вклад в разработку ИТЭР. В 1995 году реактор TFTR установил рекорд по достижению температуры плазмы в 510 миллионов градусов по Цельсию.

В ноябре 2006 года шесть государств-участников — Китай, Индия, Япония, Республика Корея, Российская Федерация и США, а также Европейский союз подписали соглашение о создании ИТЭР. В январе 2007 года были начаты работы по подготовке площадки в Кадараше, Франция. Эксперименты планировалось начать примерно в 2020 году при готовности использовать водород, чтобы избежать активации магнитов. Получение первой дейтерий-тритиевой плазмы ожидается не ранее 2026 года. Вакуумная камера будет иметь диаметр 19,4 м, высоту 11,4 м и вес 5200 т. ИТЭР имеет большие размеры, так как время удержания плазмы увеличивается пропорционально кубу размеров установки. ИТЭР проектируется с расчетом на выработку 500 МВт за 1000 секунд при мощности на входе всего 50 МВт. Успешная реализация этого проекта будет способствовать созданию реальной термоядерной электростанции, и ожидается, что демонстрационная установка будет готова для эксплуатации к 2040 году.

Концепция ИТЭР (рис. III–3) базируется на токамаке с магнитным удержанием плазмы в вакуумной камере, имеющей форму бублика. Топливо, представляющее собой смесь дейтерия

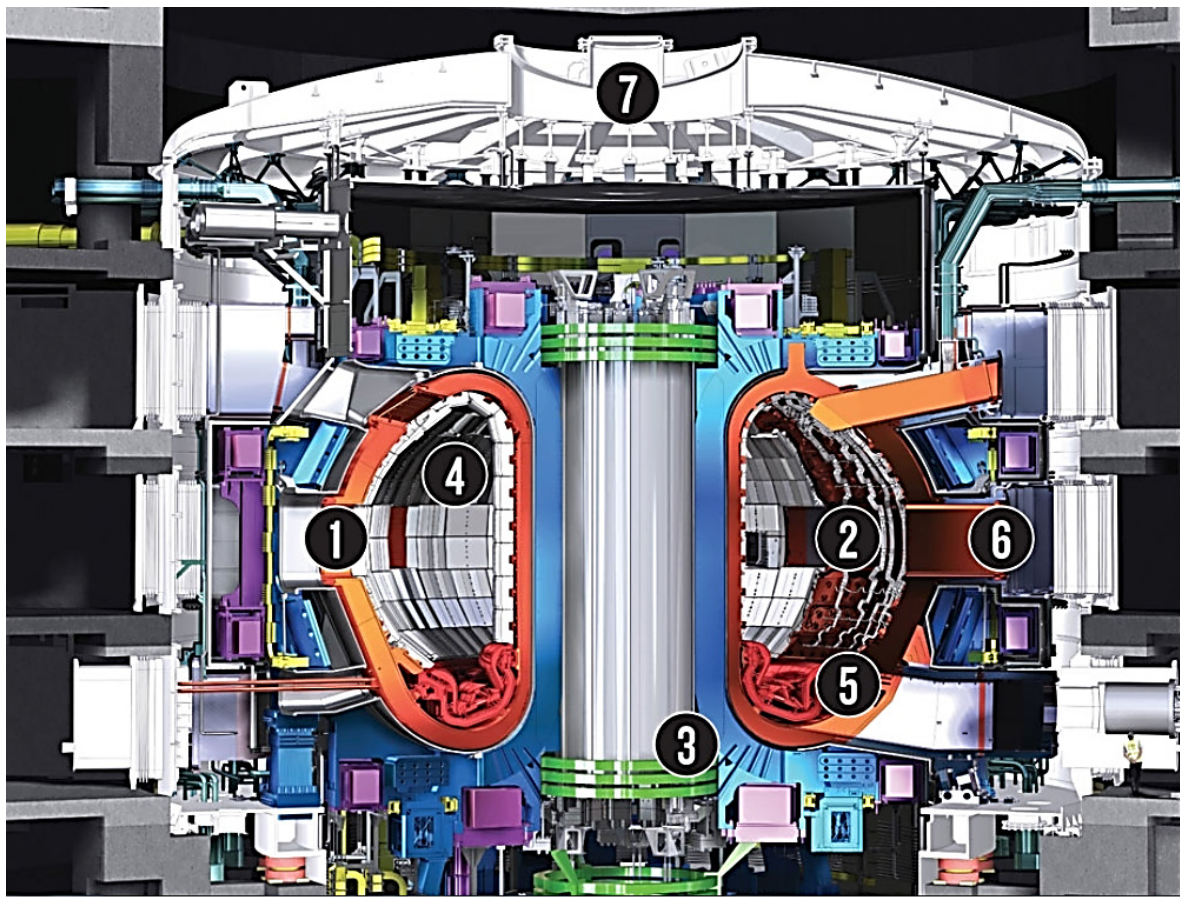


РИС. III–3. Конструкция ИТЭР: 1 — вакуумная камера, 2 — нагрев плазмы, 3 — сверхпроводящие магниты, 4 — бланкет, 5 — дивертор, 6 — диагностика, 7 — криостат (любезно предоставлено ИТЭР).

и трития, нагревается до температур, превышающих 150 миллионов градусов Цельсия, образуя при этом горячую плазму. Для удержания плазмы на расстоянии от стенок камеры используются сильные магнитные поля, создаваемые окружающими камеру сверхпроводящими катушками и проходящим через плазму электрическим током.

В Институте термоядерного синтеза в Наке, Япония, запланирован еще один проект, представляющий собой перспективный вклад в реализацию программы по управляемому термоядерному синтезу. Схема конструкции токамака JT-60SA (Super Advanced) показана на рис. III-4, и это один из трех проектов, осуществляемых совместно Японией и Европейским Союзом. Строительство было начато в январе 2013 года, и ожидалось, что первая плазма будет получена в сентябре 2020 года.

Будучи сателлитным токамаком ИТЭР, установка JT-60SA играет важную роль в решении ключевых физических и инженерных задач, связанных с ИТЭР [III-5] и его преемником — установкой DEMO [III-6], которая является последним шагом на пути к коммерческой выработке энергии с использованием термоядерной реакции.

Значительное развитие получили исследования по получению энергии путем осуществления инерционного термоядерного синтеза, основанные на концепции инерционного удержания плазмы. Важными учреждениями и проектами в мире, работающими над реализацией концепции получения энергии на основе инерционного термоядерного синтеза, являются Национальный комплекс зажигания (NIF) Ливерморской национальной лаборатории им. Лоуренса, Лос-Аламосская национальная лаборатория и Лаборатория лазерной энергетики Рочестерского университета в США; проект «Laser Megajoule» во Франции; проект «Vulcan» в Соединенном Королевстве; проект «HiPER» (Европейская установка по энергетическим исследованиям с помощью мощного лазера); проект лазерной установки «Gekko XII» в Японии; ИСКРА-5 в Российской Федерации. Среди перечисленных учреждений и проектов NIF является на сегодняшний день ведущей научно-исследовательской лабораторией [III-7].

Строительство NIF в Ливерморской национальной лаборатории им. Лоуренса финансировалось Национальным управлением ядерной безопасности, и оно было завершено в марте 2009 года; первые попытки зажигания плазмы были предприняты в 2010 году. На рис. III-5 показан внутренний вид опорной конструкции предусилителя NIF для эксперимента NIF по зажиганию.

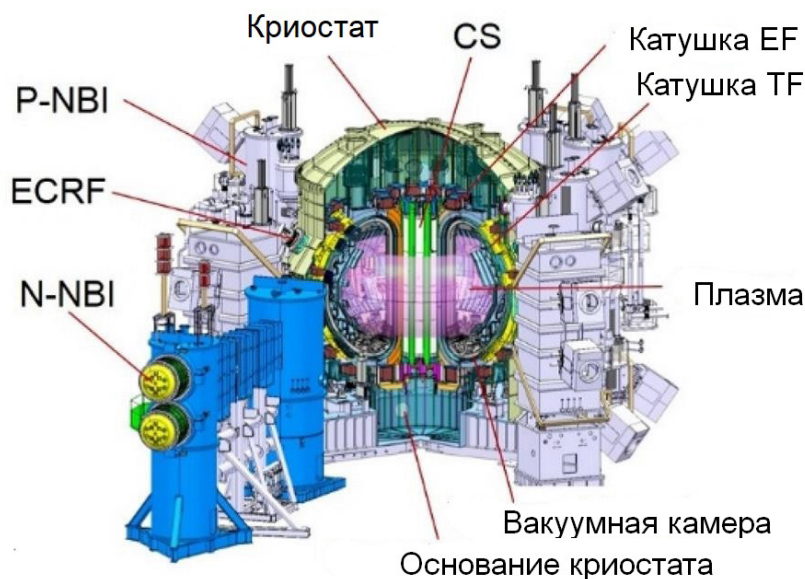


РИС. III-4. Схематический вид токамака JT-60SA (воспроизведено из [III-5]).

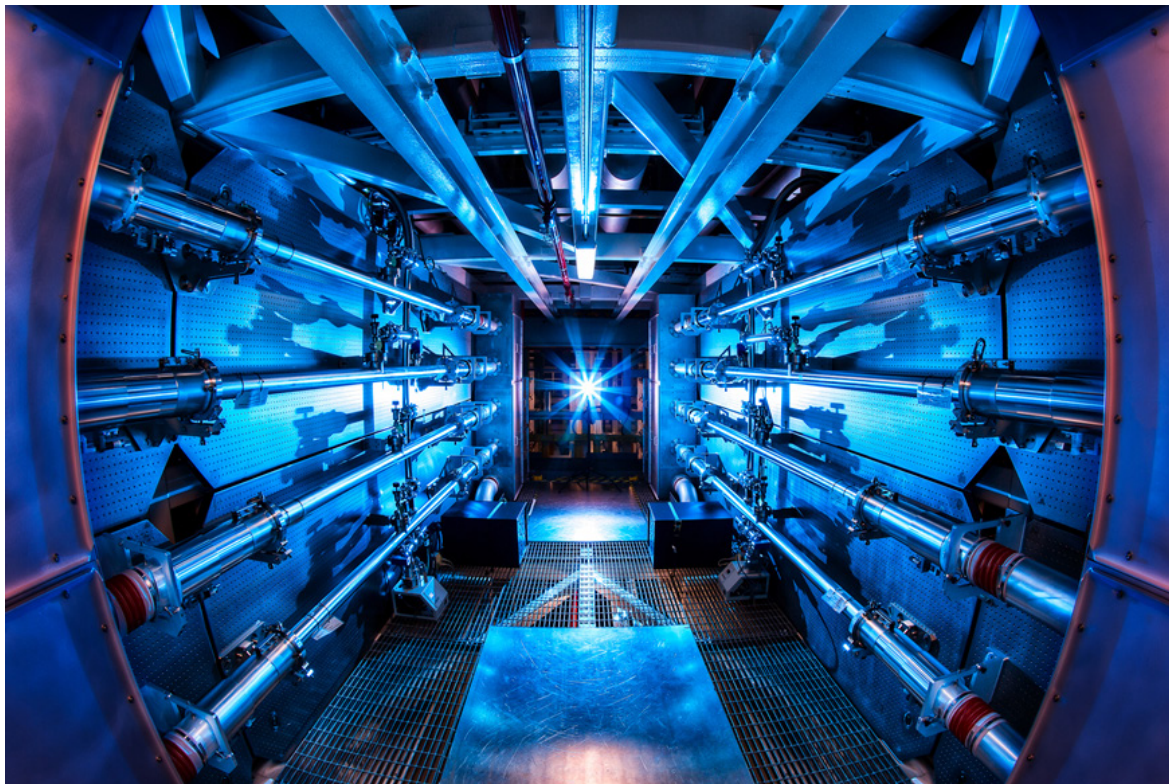


РИС. III–5. Внутренний вид (улучшенное цветное изображение) опорной конструкции предусилителя NIF (любезно предоставлено Ливерморской национальной лабораторией им. Лоуренса).

В настоящее время NIF является единственной в мире экспериментальной установкой, способной создавать температуры и давления, подобные тем, которые существуют в ядрах звезд и планет-гигантов. Она состоит из 192 лазеров на неодимовом стекле, которые сгруппированы в 24 связки по восемь лазеров, и мишенной камеры диаметром 10 м для экспериментов по зажиганию, в которой осуществляется реакция термоядерного синтеза [III–8].

Согласно недавнему отчету Ливерморской национальной лаборатории им. Лоуренса, опубликованному в августе 2017 года [III–9], эксперименты с использованием непрямого воздействия, являются первыми термоядерными измерениями поперечного сечения ядерных реакций, величины, описывающей вероятность того, что реагенты подвергнутся реакции синтеза, эквивалентной горению ядер звезд-гигантов, в 10–40 раз превышающих массу Солнца. Эти результаты свидетельствуют о том, что в экстремальных условиях плазмы плотность изотопов водорода при сжатии увеличивается в 1000 раз, а температура возрастает до 50 миллионов градусов Цельсия. Задача NIF состоит в том, чтобы достичь термоядерного воспламенения с высоким усилением энергии, а также и обеспечить поддержку работ, связанных с конструированием и обслуживанием ядерного оружия, путем изучения поведения вещества в условиях, создающихся в ядерном оружии [III–7].

Строительство NIF началось в 1997 году, однако из-за проблем с управлением и технических задержек сооружение NIF было завершено с отставанием от графика на пять лет и превышением первоначального бюджета почти в четыре раза. 31 марта 2009 года является датой окончания строительства, которое осуществлялось Министерством энергетики США [III–11]. Первые крупномасштабные эксперименты с лазерными мишенями были проведены в июне 2009 года с использованием хольраум-мишени (см. рис. III–6), и в октябре 2009 года было объявлено о выполнении первых «интегрированных экспериментов с зажиганием» (в ходе которых тестировалась мощность лазеров) [III–11].

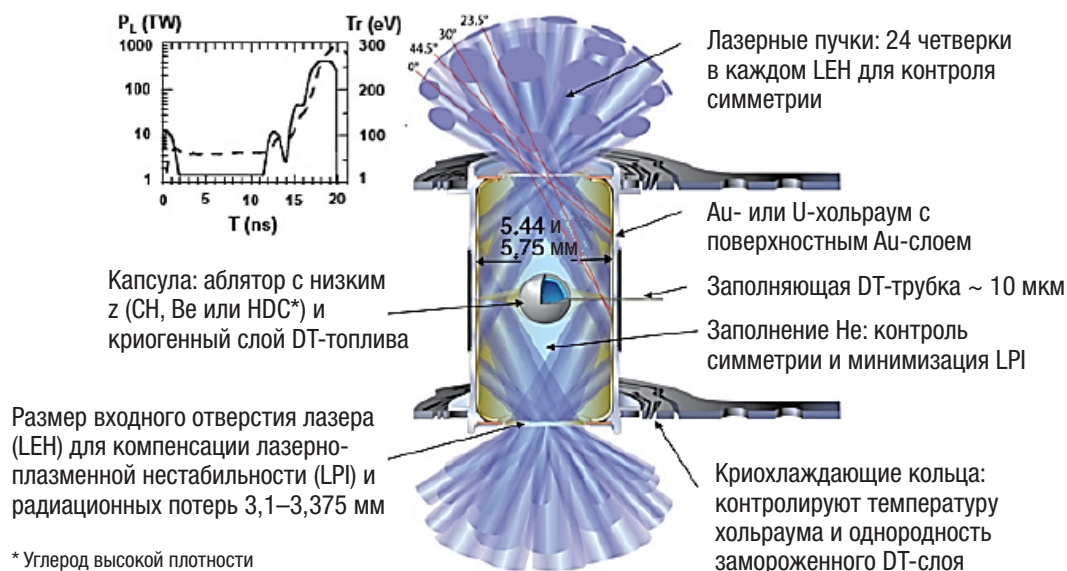


РИС. III–6. Структура мишени хольраума (воспроизведено из [III–10]).

Ливерморская национальная лаборатория им. Лоуренса объявила в июле 2012 года, что лазерная система NIF, состоящая из 192 лазеров, обеспечила доставку свыше 500 ТВт пиковой мощности и 1,85 мегаджоуля (МДж) ультрафиолетового лазерного излучения в хольрауме диаметром 2 мм в течение нескольких триллионных секунды [III–8]. Сообщалось, что в сентябре 2013 года на NIF впервые количество энергии, выделяемой в результате реакции термоядерного синтеза, превысило количество энергии, поглощаемой топливом, но не количество энергии, доставляемое гигантскими лазерами. В [III–12] сообщено, что высвободилось 17 кДж энергии.

Недавние работы, проведенные в Институте лазерной техники Осацкого университета в Японии, позволяют предположить, что воспламенение может быть достигнуто при более низкой температуре при использовании интенсивного второго лазерного импульса, направляемого через золотой конус длиной в несколько миллиметров в сжатое топливо и синхронизированного с пиковым сжатием. Этот метод, известный как «быстрое зажигание», означает, что компрессия топлива происходит отдельно от образования горячих точек с воспламенением, что делает процесс более практичным. Рис. III–7 иллюстрирует концептуальный проект испытательной установки лаборатории инерционного термоядерного синтеза для выработки энергии. Он базируется на текущих исследованиях на установке для проведения эксперимента по реализации быстрого зажигания (FIREX-II), и ожидается, что производство термоядерной энергии будет начато в 2035 году.

III–4. ОПЫТ И ИССЛЕДОВАНИЯ В ОБЛАСТИ ВЫВОДА ИЗ ЭКСПЛУАТАЦИИ

Реактор TFTR был остановлен в 1997 году после 15 лет эксплуатации. Работы по удалению TFTR начались в октябре 1999 года и были завершены в сентябре 2002 года в соответствии с графиком и в пределах выделенных бюджетных средств. Конструкция TFTR содержала 80-тонную вакуумную камеру в форме бублика, 587 т катушек магнитного поля, 15-тонную центральную колонну из титана и массивную опорную конструкцию из нержавеющей стали. На рис. III–8 показан реактор TFTR.

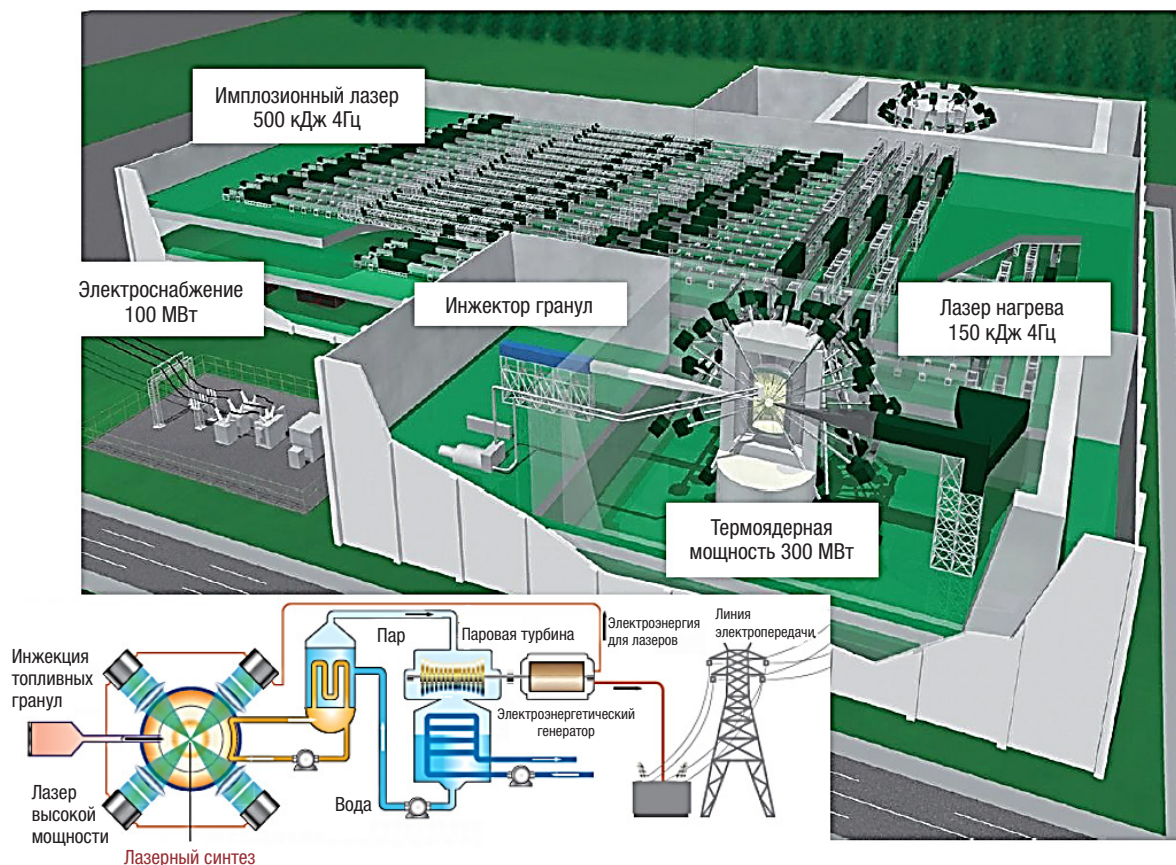


РИС. III–7. Концептуальный проект Лабораторной испытательной установки термоядерного синтеза с инерционным удержанием плазмы, Япония (воспроизведено из [III–13]).

Использование трития обусловило необходимость решения ряда проблем в целях обеспечения успешной реализации проекта по выводу из эксплуатации. В дополнение к 260 ТБк трития, оставшегося в вакуумной камере, преимущественно в соосажденном слое в графитовых плитках, существовала относительно высокая концентрация поверхностного загрязнения тритием ($160\,000\text{--}640\,000\text{ Бк/см}^2$ при измерении методом поверхностных мазков). Вакуумная камера и опорные конструкции были активированы до уровней в диапазоне от примерно $0,5\text{ мЗв/ч}$ в случае контакта с камерой до $0,02\text{ мЗв/ч}$ на вспомогательном оборудовании. По окончании осуществления трехлетнего проекта по выводу реактора TFTR из эксплуатации удалению/захоронению подлежало в конечном итоге примерно 1470 м^3 радиоактивных отходов и отходов, загрязненных тритием. Применение новых технологий при выводе из эксплуатации привело к сокращению примерно на 63% количества радиоактивных и загрязненных отходов, которые, согласно первоначальным оценкам, образовались бы в случае использования традиционных инструментов и процедур. Стоимость заверченного проекта составила 36,8 млн долл. США, что примерно на 9,5% ниже первоначальной сметной стоимости [III–14].

Самым сложным этапом разборки TFTR оказалось разделение на сегменты вакуумной камеры объемом 76 м^3 . Использование традиционных технологий, таких как распиловка с помощью абразивного инструмента и газопламенная резка, не могло обеспечить соблюдение требований в отношении охраны здоровья и обеспечения безопасности. Инженерная группа Принстонской лаборатории физики плазмы эффективно решила все проблемы, разработав инновационную систему, которая позволила снизить облучение работников, выбросы в атмосферу и образование отходов. Вакуумная камера была сначала заполнена легким бетоном, а затем разрезана на

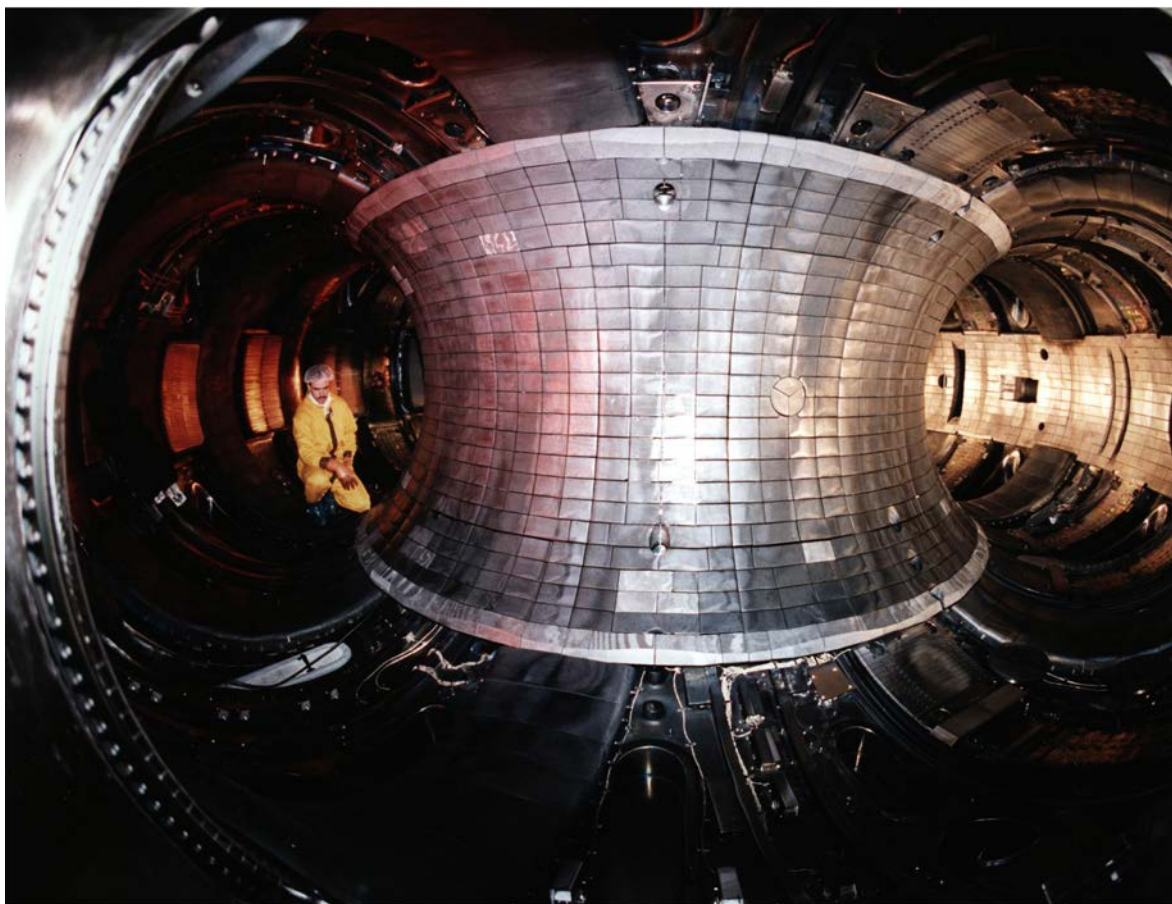


РИС. III–8. Испытательный реактор термоядерного синтеза типа токамак.

десять сегментов посредством резки алмазной проволокой для транспортировки и захоронения радиоактивных отходов на площадке комплекса в Хэнфорде. Возможность резки алмазной проволокой заполненного бетоном корпуса из нержавеющей стали была продемонстрирована в Принстонской лаборатории физики плазмы летом 1999 года. Эта демонстрация финансировалась в рамках программы Министерства энергетики США EM-50 Decommissioning Focus Area (основное направление деятельности управления EM-50 МЭ США в области вывода из эксплуатации) [III–15, III–16].

Благодаря применению промышленных обжимных устройств был реализован метод изоляции загрязненных тритием поверхностей, позволяющий обеспечить защиту работников и снижение уровня газовыделения трития. Кроме того, обжимка и разрезание труб и трубопроводов на отрезки позволили обеспечить снижение трудозатрат на демонтаж, а также оптимизацию габаритов деталей, размещаемых в упаковках, предназначенных для захоронения в качестве отходов. Применение обжимных устройств обеспечило значительное сокращение количества удаляемого тритиевого загрязнения на рабочей площадке, что привело к сокращению объема радиологических отходов, которые необходимо было удалять.

Большие промышленные пилы оказались эффективным инструментом резки крупных металлических деталей, таких как катушки тороидального поля. За последние несколько лет технология резки значительно продвинулась вперед и обеспечила оснащенность эффективными инструментами для разрезания крупных, неровных кусков твердых металлов (например, нержавеющей стали, инконеля), габариты которых необходимо уменьшить так, чтобы они помещались в соответствующие упаковки для отходов. В случае некоторых конфигураций резки

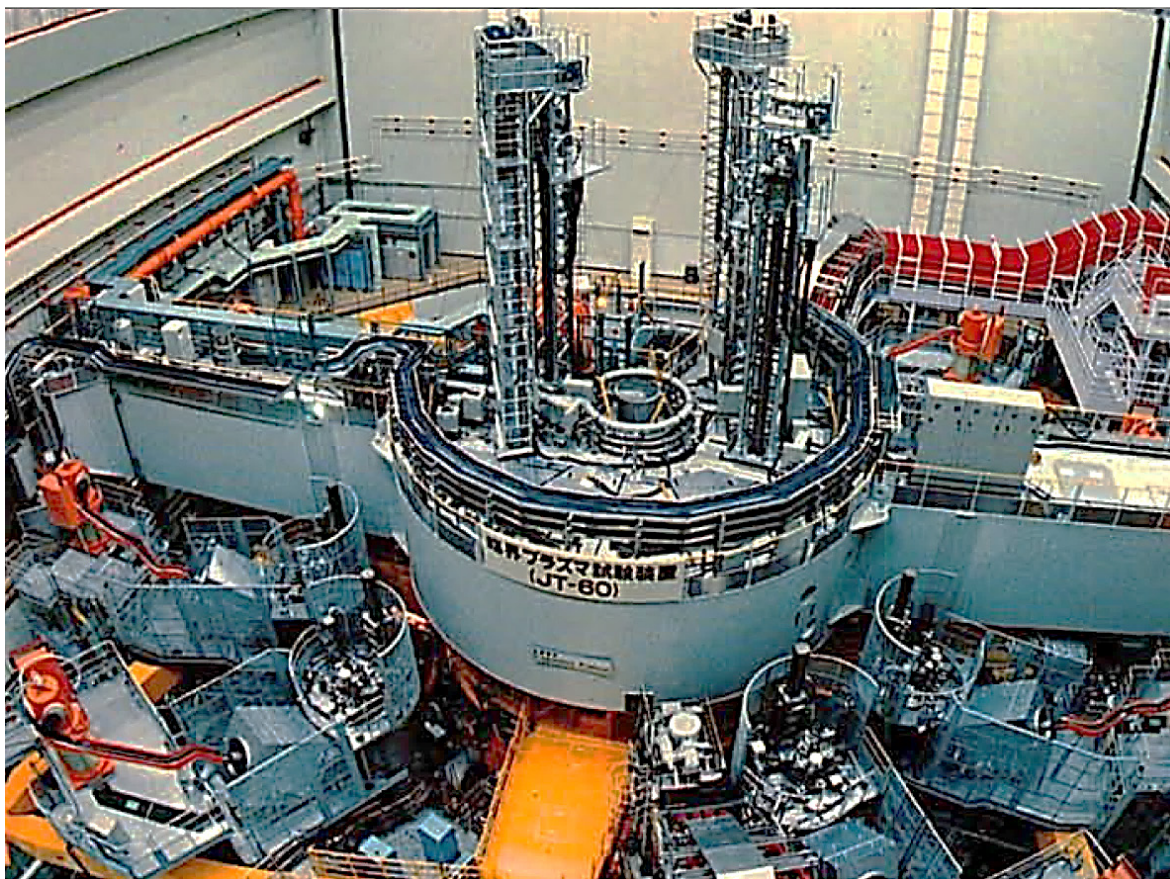


РИС. III-9. Токамак JT-60 (воспроизведено из [III-19]).

пилой работники устанавливали геометрию резки и закрепляли подлежащие распиловке куски на месте; пила производила резку, во время которой работник наблюдал за выполняемой операцией, находясь за пределами радиологической зоны. Это также обеспечило удержание облучения работников «на разумно достижимом низком уровне» (ALARA). Было определено, что за весь период осуществления проекта по выводу реактора TFTR из эксплуатации радиологическое облучение всех работников (на основе данных дозиметрии) составило 110 чел.-мЗв. Выбросы из вентиляционных труб в окружающую среду в ходе выполнения работ по выводу из эксплуатации составили 16,5 Бк трития по данным пассивных мониторов выброса в вентиляционных трубах [III-14].

Тритий был впервые введен в установку JET в 1991 году, и, по оценкам, в конце эксплуатации и после периода регенерации трития в вакуумном контуре будет находиться 2 г трития. Все внутрикорпусные элементы также загрязнены бериллием, а конструкция машины активируется нейтронами.

Вывод установки из эксплуатации начнется сразу же после прекращения эксплуатации JET, и планируется удалить все объекты и благоустроить территорию в течение десяти лет. С 1995 года план вывода из эксплуатации претерпел ряд изменений, которые позволили уточнить детали, сроки и расходы [III-17].

Предварительные планы по выводу ИТЭР из эксплуатации изложены в [III-18]. Предусматривается три стадии вывода из эксплуатации: этап 1 (пять лет), период радиоактивного распада (23 года) и этап 2 (шесть лет). Цель этапа 1 — привести машину в безопасное состояние вскоре после окончания эксплуатации с использованием средств и персонала, оставшихся

на объекте от предыдущего этапа эксплуатации. Ответственность за осуществление этапа 1 возлагается на организацию ИТЭР и прекращается с передачей объекта новой организации в стране нахождения ИТЭР, готовой принять объект к выполнению работ по выводу из эксплуатации. Этап 1 будет включать главным образом удаление мобилизуемого трития из внутрикорпусных компонентов и поддающейся извлечению активированной пыли (например, бериллия, вольфрама, углерода). Внутрикорпусные компоненты также будут удаляться. В течение периода распада радиоактивности будет продолжаться снижение радиоактивности внутри вакуумной камеры до целевой мощности контактной дозы для проведения практических операций на уровне в среднем ниже 10 мкЗв/ч [III–18]. На этапе 2 будет завершен демонтаж всех оставшихся компонентов.

Токамак JT-60 был построен в 1985 году в Японии для исследований и разработок в области термоядерной плазмы. Время удержания плазмы увеличилось с 5 до 65 секунд, и был установлен мировой рекорд по значению Q, температуре ионов и тройному термоядерному производству. На рис. III–9 показана установка JT-60 [III–19].

Разборка тора JT-60 U началась в 2009 году после 18 лет работы с дейтерий-дейтериевой плазмой и была завершена в октябре 2012 года, с тем чтобы на том же месте можно было построить тор JT-60SA. Тор JT-60 U имел сложную сварную конструкцию, которая была необходима в условиях действия мощной электромагнитной силы и радиоактивации в результате протекания дейтерий-дейтериевых реакций. Поскольку эта работа была первым опытом разборки большого радиоактивного термоядерного устройства в Японии, была проведена тщательная подготовка к осуществлению работ по разборке, включая обработку радиоактивированных материалов и мероприятия по обеспечению безопасности. Во время работ по разборке в течение трех лет принимались тщательные меры защиты от облучения и осуществлялся строгий контроль доз облучения; в результате накопленная коллективная эффективная доза облучения работников за 41 000 человеко-дней составила всего 22 мЗв, при этом внутреннее облучение обнаружено не было. Из торного зала были извлечены и помещены на надежное хранение в хранилищах около 13 000 элементов, разрезанных на части с обеспечением измерения контактной дозы. Общая масса образовавшихся в результате разборки элементов составила 5400 т. Большинство этих элементов по окончании демонтажа будут рассматриваться как нерадиоактивные после проведения проверки на соответствие требованию в отношении уровня освобождения от контроля в соответствии с регулирующими положениями Японии. Сборка JT-60SA началась в январе 2013 года, по окончании разборки тора JT-60 U [III–20].

III–5. ВОПРОСЫ, КАСАЮЩИЕСЯ ВЫВОДА ИЗ ЭКСПЛУАТАЦИИ ТЕРМОЯДЕРНЫХ УСТАНОВОК

Целью настоящего приложения не является предоставление всеобъемлющего руководства по выводу из эксплуатации термоядерных установок. Опыт вывода из эксплуатации этих установок ограничен несколькими прототипами. Однако важным фактором стабильности плазмы и энергетического баланса является размер плазмы (и, следовательно, размер машины); поэтому необходимы большие плазменные камеры и большие установки. Основными факторами, влияющими на вывод из эксплуатации термоядерных реакторов, являются [III–21]:

- a) наличие довольно больших количеств трития, а это обуславливает возможность возникновения загрязненных (тритиированных) материалов и необходимость детритизации;
- b) испускание (в результате реакций термоядерного синтеза) высокоэнергетических (14 МэВ) нейтронов с относительно высокой плотностью потока (свыше 10^{13} н·см⁻²·с⁻¹), приводящее к активации в материалах, обращенных к плазме;
- c) реакция термоядерного синтеза, не производящая остатков (таких как продукты деления и актиниды при ядерном делении), поскольку продуктом реакции является ⁴He, стабильный атом.

Основной поток массы отходов образуется на этапе вывода из эксплуатации. Радиоактивные нуклиды в отходах термоядерного синтеза представляют собой главным образом твердые металлические продукты активации (из основных элементов установки), активированный бетон биологической защиты и тритий.

Таким образом, отходы термоядерного синтеза сильно отличаются от отходов реакции деления как по типу материала, так и по изотопному составу. В настоящее время для минимизации количества радиоактивных материалов и, следовательно, отходов при выводе из эксплуатации термоядерных энергетических установок используется ряд подходов, которые в основном ограничиваются дейтерий-тритиевым топливным циклом. Общим элементом всех подходов является использование низкоактивируемых материалов. Примером таких материалов являются сплавы на основе ванадия. Применение низкоактивируемых материалов, позволяющих, во-первых, значительно снизить риск облучения персонала и, во-вторых, частично решить проблему долгоживущих отходов, является широко изученным решением для располагающихся близко к плазме компонентов в коммерческом реакторе. Вопросы, касающиеся термоядерных реакторов в сопоставлении с реакторами деления, а также образующихся отходов, подробно рассматриваются в [III–22 — III–24] с уделением особого внимания аспектам вывода из эксплуатации. Подходы, призванные облегчить вывод из эксплуатации, стали технически более осуществимыми в последние годы в результате разработки радиационно-стойкого оборудования для дистанционной работы, а также регламентирования МАГАТЭ и другими национальными ядерными агентствами категории освобождения от контроля для слабо радиоактивных материалов. Большая часть материалов, образующихся при выводе из эксплуатации (до 80%), имеет очень низкую концентрацию активности и может быть освобождена от регулирующего контроля, особенно когда ожидается период промежуточного хранения (до 100 лет). Остальные 20% активных материалов могут быть удалены в качестве низкоактивных отходов или, что предпочтительнее, рециклированы. Подходы к освобождению от контроля и рециклированию при обращении с отходами термоядерного синтеза подробно изложены в [III–25].

Опыт, накопленный на существующих токамаках, свидетельствует о том, что сохранение трития внутри камеры может представлять собой проблему при эксплуатации и выводе из эксплуатации ИТЭР. Поэтому для лучшего понимания процессов соосаждения слоев и сохранения трития в токамаках были проведены исследования по эрозии и осаждению. Кроме того, при проведении испытаний, связанных с процессами детритизации на месте, в частности лазерной и импульсной обработкой, необходимо оценить методы детритизации для внутрикорпусных компонентов в аналогичной ИТЭР конфигурации установки JET. В целях уменьшения ограничений в области удаления отходов были изучены специальные процедуры детритизации металлов, графита, композитов из углеродного волокна, технологических и бытовых отходов [III–26]. На рис. III–10 показан выведенный из эксплуатации исследовательский токамак, находящийся в Канадском музее науки и технологии в Оттаве.

На этапах эксплуатации и вывода из эксплуатации термоядерного реактора в результате многих процессов будет образовываться насыщенная тритием вода. Ключевые компоненты установки для детритизации воды ИТЭР были изучены в экспериментальном порядке с целью разработки полной конструкции, которую можно было бы реализовать и испытать на установке JET [III–26]. В будущем будет важно выбирать материалы, которые имеют низкое сродство к тритию или которые характеризуются низкой диффузией трития.

Другим вопросом, который может играть очень важную роль, является возможность рециклирования материалов, использованных для осуществления термоядерного синтеза. В случае материалов с очень низким уровнем радиоактивности их освобождение от контроля может обеспечить резкое сокращение объема радиоактивных отходов. Учитывая довольно короткий период полураспада активационных изотопов (при условии адекватного выбора материала), после периода хранения, необходимого для обеспечения распада радионуклидов (освобождения от контроля после распада), можно ожидать образования меньшего объема радиоактивных отходов. Это также привело к концепции (почти) нулевых отходов в случае, когда высокоактивированные

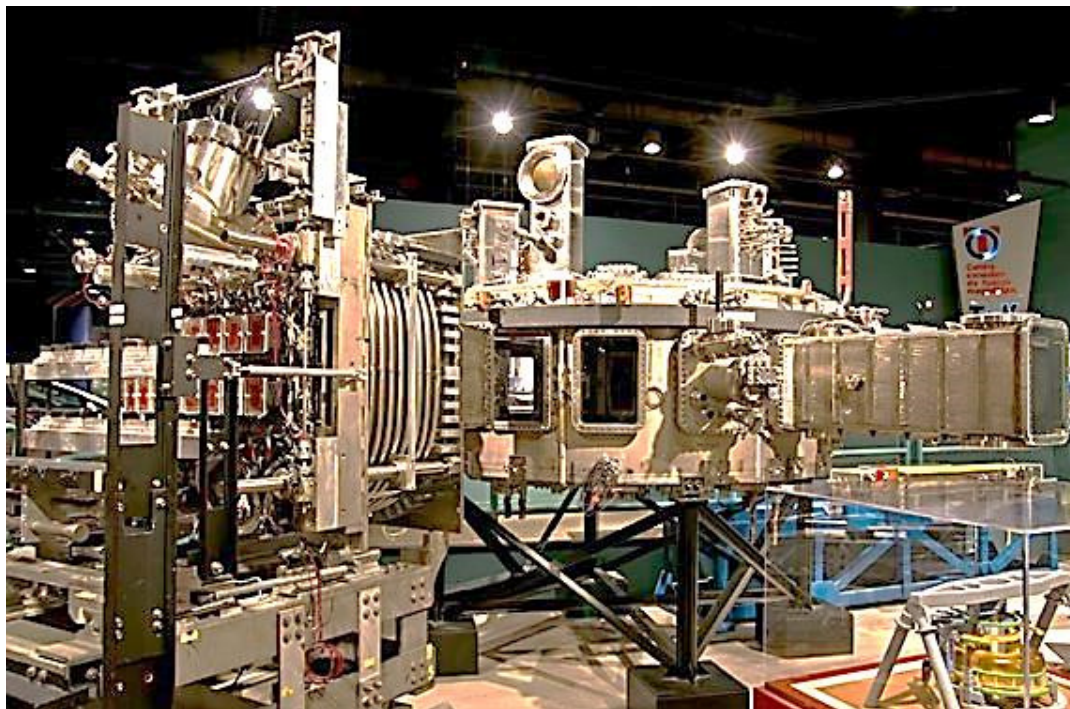


РИС. III–10. Выведенный из эксплуатации исследовательский токамак в Канадском музее науки и техники, Оттава (любезно предоставлено Канадским музеем науки и техники).

материалы могут быть рециклированы. Это, по сути, цель, к которой стремятся проектировщики будущих термоядерных электростанций. Даже если эта цель не будет достигнута, при эксплуатации будущих термоядерных электростанций будут образовываться радиоактивные отходы, не требующие геологического захоронения [III–21].

СПРАВОЧНЫЙ МАТЕРИАЛ ДЛЯ ПРИЛОЖЕНИЯ III

- [III–1] UNITED STATES ENERGY INFORMATION ADMINISTRATION, International Energy Outlook 2016, Rep. DOE/EIA-0484, EIA, Washington, DC (2016).
- [III–2] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Fusion Physics (KIKUCHI, M., LACKNER, K., TRAN, M.Q., Eds), IAEA, Vienna (2012).
- [III–3] EL-GUEBALY, L.A., Fifty years of magnetic fusion research (1958–2008), *Energies* **3** 6 (2010) 1067–1086.
- [III–4] ONGENA, J., KOCH, R., WOLF, R., ZOHN, H., Magnetic-confinement fusion, *Nature Physics* **12** (2016) 398–410.
- [III–5] SHIRAI, H., BARABASCHI, P., KAMADA, Y., JT-60SA TEAM, Recent progress of the JT-60SA project, *Nucl. Fusion* **57** 10 (2017) 102002.
- [III–6] TOBITA, K., et al., Compact DEMO, SlimCS: Design progress and issues, *Nucl. Fusion* **49** 7 (2009) 075029.
- [III–7] HOGAN, W.J., MOSES, E.I., WARNER, B.E., SOREM, M.S., SOURES, J.M., The National Ignition Facility, *Nucl. Fusion* **41** 5 (2001) 567–574.
- [III–8] MOSES, E., The National Ignition Facility: An experimental platform for studying behaviour of matter under extreme conditions, *Astrophys. Space Sci.* **336** 1 (2011) 3–7.
- [III–9] CASEY, D.T., et al., Thermonuclear reactions probed at stellar-core conditions with laser-based inertial-confinement fusion, *Nature Physics* **13** 12 (2017) 1227–1231.
- [III–10] MOSES, E.I., The national ignition campaign: Status and progress, *Nucl. Fusion* **53** 10 (2013) 104020.

- [III-11] LINDL, J.D., et al., Progress towards ignition on the National Ignition Facility, *Nucl. Fusion* **51** 9 (2011) 094024.
- [III-12] HURRICANE, O., et al., Approaching a burning plasma on the NIF, *Phys. Plasmas* **26** 5 (2019).
- [III-13] AZECHI, H., et al., “Fast Ignition Realization EXperiment (FIREX) and prospect to inertial fusion energy in Japan”, *Proc. 25th IAEA Fusion Energy Conf.*, St. Petersburg, 2014, IAEA, Vienna (2014) 117.
- [III-14] GENTILE, C.A., et al., “The first decommissioning of a fusion reactor fuelled by deuterium–tritium”, *Proc. 9th Int. Conf. on Environmental Remediation and Radioactive Waste Management*, Oxford, 2003, ASME, New York (2003).
- [III-15] PERRY, E., CHRZANOWSKI, J., GENTILE, C., PARSELLS, R., RULE, K., STRYKOWSKY, R., VIOLA, M., Decommissioning of the Tokamak Fusion Test Reactor, Rep. PPPL-3895, USDOE, Washington, DC (2003).
- [III-16] PERRY, E., et al., Decontamination and Decommissioning of the Tokamak Fusion Test Reactor, Rep. PPPL-3395, Princeton Plasma Physics Laboratory, Princeton, NJ (1999).
- [III-17] INTERNATIONAL THERMONUCLEAR EXPERIMENTAL REACTOR ORGANIZATION, Decommissioning Procedures, Plant Description Document, ITER, St. Paul-lez-Durance, France (2013).
- [III-18] Plasma Physics and Controlled Nuclear Fusion Research (Proc. 11th IAEA Int. Conf. Kyoto, 1986), IAEA, Vienna (1987).
- [III-19] IKEDA, Y., et al., Safe disassembly and storage of radioactive components of JT-60U torus, *Fusion Eng. Des.* **89** 9–10 (2014) 2018–2023.
- [III-20] EL-GUEBALY, L., MASSAUT, V., TOBITA, K., CADWALLADER, L., Goals, challenges, and successes of managing fusion activated materials, *Fusion Eng. Des.* **83** 7–9 (December 2008) 928–935.
- [III-21] ZUCCHETTI, M., BONAVIDO, L., “Advanced fuel fusion reactors: Towards a zero-waste option”, *Proc. 1st Int. Nucl. and Renewable Energy Conf.*, Amman, 2010, IEEE, Piscataway, NJ (2010).
- [III-22] DI PACE, L., EL-GUEBALY, L., KOLBASOV, B., MASSAUT, V., ZUCCHETTI, M., “Radioactive waste management of fusion power plants”, *Radioactive Waste*, IntechOpen, London (2012) 303–328.
- [III-23] ZUCCHETTI, M., et al., The back end of the fusion materials cycle, *Fusion Sci. Technol.* **55** 2 (2009) 109–139.
- [III-24] EL-GUEBALY, L., MASSAUT, V., TOBITA, K., CADWALLADER, L., Goals, challenges and successes of managing fusion activated materials, *Fusion Eng. Des.* **83** 7–9 (2008) 928–935.
- [III-25] PEREVEZENTSEV, A.N., et al., Experimental trials of methods for metal detritiation for JET, *Fusion Sci. Technol.* **52** (2007) 84–99.
- [III-26] ROSANVALLON, S., et al., “Tritium related studies within the JET fusion technology work programme”, *Proc. 7th Int. Conf. on Tritium Science and Technology*, Baden-Baden, Germany, 2004, *Fusion Sci. Technol.* **48** (2005) 268–273.

ГЛОССАРИЙ

активация. Процесс наведения радиоактивности. Чаще всего это относится к наведению радиоактивности в замедлителях, теплоносителях, а также конструкционных и экранирующих материалах вследствие облучения нейтронами или другими ядерными частицами.

вывод из эксплуатации. Административные и технические меры, осуществляемые в целях обеспечения возможности отмены некоторых или всех мер регулирующего контроля в отношении установки (за исключением пункта захоронения (хранилища) или некоторых ядерных установок, используемых для захоронения остатков от добычи и обработки радиоактивного материала, которые «закрываются», а не «выводятся из эксплуатации»).

демонтаж. Разборка и удаление конструкций, систем или элементов при выводе из эксплуатации; демонтаж может выполняться сразу после окончательного вывода ядерной установки из эксплуатации или может быть отложен.

дифференцированный подход. В случае системы контроля, такой как регулирующая система, или системы безопасности, это — процесс или метод, в котором строгость мер контроля и применяемых условий соответствует, насколько это практически осуществимо, вероятности и возможным последствиям утраты контроля, а также уровню риска, связанного с этим.

заинтересованная сторона. Сторона, у которой есть определенный интерес, заинтересованность.

за пределами площадки / на площадке. Вне территории площадки / в пределах территории площадки (объекта).

захоронение. Размещение отходов в соответствующей установке (соответствующем пункте) без намерения их последующего извлечения.

источник светового излучения. Ускоритель, производящий исключительно интенсивные пучки рентгеновского и ультрафиолетового и инфракрасного излучения, используемые как в фундаментальных, так и в прикладных исследованиях.

коллайдер. Ускоритель частиц на встречных пучках, в котором происходит столкновение ускоренных частиц.

конструкции, системы и элементы (КСЭ). Общий термин, охватывающий все компоненты (детали) установки или деятельности, которые вносят вклад в обеспечение защиты и безопасности, кроме человеческого фактора. Конструкции — это пассивные элементы: здания, корпуса, защитные экраны и т.п. Система состоит из нескольких элементов, смонтированных таким образом, чтобы выполнять конкретную (активную) функцию. Элемент представляет собой отдельную составную часть системы. Примерами элементов являются провода, транзисторы, интегральные схемы, двигатели, реле, соленоиды, трубопроводы, арматура, насосы, резервуары и клапаны.

лиnak (линейный ускоритель). Сокращение от «линейного ускорителя» (англ. **linear accelerator**); устройство, предназначенное для ускорения заряженных частиц в течение их однократного прохождения по прямой траектории через линейную ускоряющую структуру.

лицензия. Юридический документ, выдаваемый регулирующим органом, который дает официальное разрешение на выполнение конкретных видов работ, связанных с установкой или деятельностью. Обладатель действующей лицензии называется «лицензиатом».

магнит. Устройство, создающее магнитные поля, которые действуют на заряженные частицы для обеспечения поворота, фокусировки или коррекции траектории их движения.

мишень. Объект, поверхность или материал, которые подвергаются бомбардировке ядерными частицами в ускорителях.

накопительное кольцо. Кольцо магнитов, обладающих способностью накапливать частицы, выходящие из ускорителя, в течение определенных периодов времени.

неограниченное использование или освобождение от контроля. Использование территории или материалов без каких-либо радиологических ограничений.

ограниченное использование (освобождение от контроля). Использование территории или материалов при условии соблюдения ограничений, введенных в целях обеспечения радиационной защиты и безопасности. Ограничения, как правило, сводятся к запрещению конкретных видов деятельности (например, жилищного строительства, производства или добычи определенных пищевых продуктов) или к предписанию конкретных процедур (например, материалы могут рециклироваться или повторно использоваться только в пределах установки).

оператор (эксплуатирующая организация). Любая организация или любое лицо, которые подают заявление на получение официального разрешения или получили официальное разрешение и/или несут ответственность за обеспечение ядерной безопасности, радиационной безопасности, безопасности радиоактивных отходов или безопасности перевозки при осуществлении деятельности или в отношении любых ядерных установок или источников ионизирующих излучений. В их число входят, в частности, частные лица, государственные (правительственные) органы, грузоотправители или перевозчики, лицензиаты, лечебные учреждения и лица, осуществляющие собственную предпринимательскую деятельность.

освобождение от контроля. Отмена осуществляемого регулирующим органом дальнейшего регулирующего контроля в отношении радиоактивных материалов или радиоактивных предметов, используемых в практической деятельности, для которой получено официальное разрешение.

перевозка (транспортировка). Преднамеренное физическое перемещение радиоактивного материала (кроме материала, входящего в состав движительной установки) из одного пункта в другой.

потери пучка. Потери частиц или излучения из пучковой камеры.

пучок. Тонкий однонаправленный поток частиц или излучения.

радиоактивное загрязнение. Радиоактивные вещества, находящиеся на поверхности или в твердом теле, жидкости или газах (в том числе в теле человека), где их присутствие является непредумышленным или нежелательным, или процесс, приводящий к их присутствию в таких местах.

разность потенциалов. Разница в электрическом заряде (в вольтах) в двух точках цепи.

регулирующий орган. Компетентный орган или система компетентных органов, назначенных правительством государства и наделенных юридическими полномочиями для осуществления процесса регулирования, включая выдачу разрешений, и для регулирования тем самым ядерной безопасности, радиационной безопасности, безопасности радиоактивных отходов и безопасности перевозки.

резонатор. Основной компонент любого ускорителя.

синхротрон. Циклотрон, в котором напряженность магнитного поля увеличивается с ростом энергии частиц, чтобы сохранить постоянным их орбитальный радиус.

скалывание. Ядерная реакция, в ходе которой множество частиц выбивается из атомного ядра падающими частицами достаточно высокой энергии.

смешанные отходы. Радиоактивные отходы, которые также содержат нерадиоактивные токсичные или опасные вещества.

тандемный ускоритель. Электростатический ускоритель, в котором отрицательные ионы водорода, генерируемые в специальном источнике ионов, ускоряются при прохождении от потенциала земли до высоковольтной клеммы; оба электрона затем отрываются от отрицательного иона при прохождении через очень тонкую фольгу или газовую ячейку, и протон снова ускоряется, когда он подходит к потенциалу земли.

ускоритель. Научный аппарат, используемый для ускорения заряженных частиц (электронов, протонов или ионов) так, чтобы они достигали высокой энергии.

ускоритель Ван-де-Граафа. Электростатический генератор, в котором электрический заряд либо удаляется, либо переносится быстро движущейся лентой к большому полюсу сферическому электроду, благодаря чему достигается ускорение частиц до энергий порядка 10 МэВ.

циклотрон. Ускоритель частиц, в котором частицы движутся в постоянном магнитном поле по спирали и энергия частиц увеличивается за счет приложения переменного электрического поля неизменной частоты.

шикана. Резкое изменение направления движения пучка с помощью поворотных магнитов. Шиканы используются в качестве энергетических фильтров для передачи только части желаемого спектра или для устранения частиц с неправильным зарядом. Мощность поворотных устройств рассчитывается для передачи определенной энергии пучков.

СОКРАЩЕНИЯ

БАК	Большой адронный коллайдер
ИТЭР	Международный термоядерный экспериментальный реактор
КЕК	Kō Enerugi Kasokuki Kenkyū Kikō (Организация по изучению высокоэнергетических ускорителей)
КСЭ	конструкции, системы и элементы
ЛБНЛ	Национальная лаборатория им. Лоуренса в Беркли
линал	линейный ускоритель
МЭ США	Министерство энергетики Соединенных Штатов Америки
ОВОС	оценка воздействия на окружающую среду
ПХД	полихлорированные дифенилы
ПЭТ	позитронно-эмиссионная томография
СИЗ	средства индивидуальной защиты
ЦЕРН	Европейская организация ядерных исследований
ALARA (принцип)	на разумно достижимом низком уровне
CD	важное решение
CLIC	Компактный линейный коллайдер
CLS	Канадский источник синхротронного излучения
FLUKA	флуктуирующий каскад (код для моделирования переноса излучения методом Монте-Карло)
HPGe	сверхчистый германий
IPNS	интенсивный импульсный источник нейтронов
JET	Объединенный европейский тор (токамак)
LEP	Большой электрон-позитронный коллайдер
MCNP	Monte Carlo N-Particle Transport Code (код моделирования переноса Н-частиц методом Монте-Карло)
MCNPX	Monte Carlo N-Particle X (код моделирования переноса Н-частиц X методом Монте-Карло)
NIF	Национальный комплекс зажигания (термоядерных реакций)
PEP	позитрон-электронный проект
TFTR	Испытательный реактор термоядерного синтеза типа токамак
VKTA	Verein für Kernverfahrenstechnik und Analytik (Исследовательский центр ядерных технологий и аналитики)

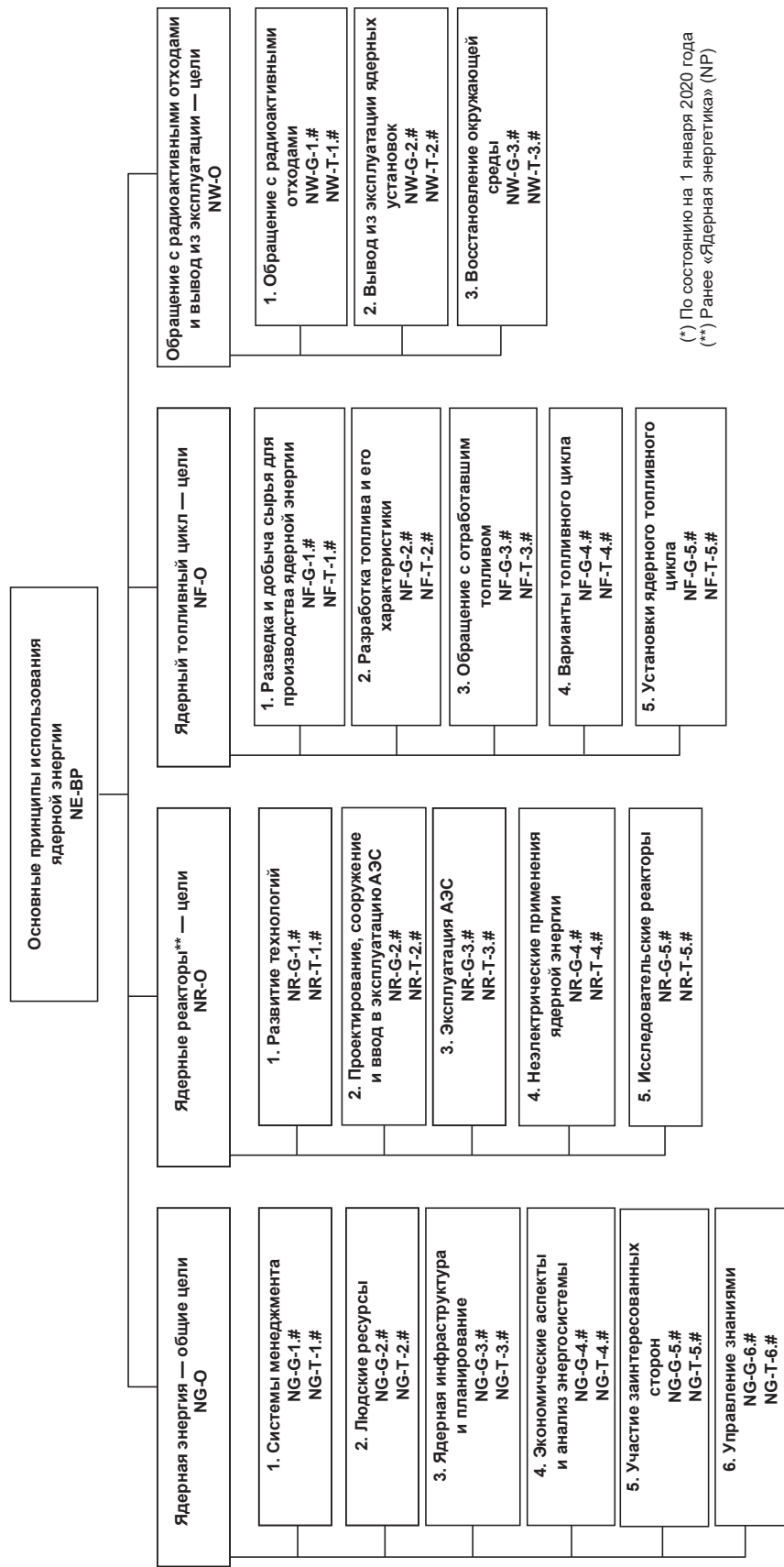
СОСТАВИТЕЛИ И РЕЦЕНЗЕНТЫ

Fourie, E.	Южноафриканская ядерно-энергетическая корпорация, Южная Африка
Griffiths, C.	консультант, Соединенное Королевство
Kinal, N.	Wismut GmbH, Германия
Laraia, M.	консультант, Италия
Marengo, M.	Университетская клиника, Болонья, Италия
Masumoto, K.	Организация по изучению высокоэнергетических ускорителей, Япония
Michal, V.	Международное агентство по атомной энергии
Prollius, M.	Gamma-Service Recycling GmbH, Германия
Ulrici, L.	Европейская организация ядерных исследований
Visagie, A.	Южноафриканская ядерно-энергетическая корпорация, Южная Африка
Vylet, V.	Лаборатория Джефферсона, Соединенные Штаты Америки
Яковенко, С.	Объединенный институт ядерных исследований, Российская Федерация

Совещания консультантов

Вена, Австрия: 18–22 июня 2012 года, 22–26 июня 2013 года, 18–22 августа 2014 года

Структура Серии изданий МАГАТЭ по ядерной энергии*



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

Обозначения

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

Примеры

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

**IAEA**

Международное агентство по атомной энергии

№ 26

ЗАКАЗ В СТРАНАХ

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

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

СЕВЕРНАЯ АМЕРИКА

Bernan / Rowman & Littlefield

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

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

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

ОСТАЛЬНЫЕ СТРАНЫ

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

Eurospan Group

Gray's Inn House

127 Clerkenwell Road

London EC1R 5DB

United Kingdom

Торговые заказы и справочная информация:

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

Эл.почта: eurospan@turpin-distribution.com

Индивидуальные заказы:

www.eurospanbookstore.com/iaea

Дополнительная информация:

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

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

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

Группа маркетинга и сбыта (Marketing and Sales Unit)

Международное агентство по атомной энергии

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

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

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

