

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО ОБРАЗОВАНИЮ

МОСКОВСКИЙ ИНЖЕНЕРНО-ФИЗИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ
(ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ)

ОСНОВЫ УЧЕТА, КОНТРОЛЯ И ФИЗИЧЕСКОЙ ЗАЩИТЫ ЯДЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Под редакцией Э.Ф. Крючкова

Рекомендовано УМО «Ядерные физика и технологии»
в качестве учебного пособия
для студентов высших учебных заведений

Москва 2007

УДК 621.039.53(075)

ББК 31.46я7

О75

Основы учета, контроля и физической защиты ядерных материалов: Учебное пособие / Под ред. Э.Ф. Крючкова. М.: МИФИ, 2007. – 544 с.

Авторы: А.В. Бушуев, В.Б. Глебов, Н.И. Гераскин, А.В. Измайлов, Э.Ф. Крючков, В.В. Кондаков.

Учебное пособие посвящено систематическому изложению основ учета, контроля и физической защиты ядерных материалов (УК и ФЗ ЯМ). В первой части рассматриваются задачи и условия развития УК и ФЗ ЯМ в контексте проблемы нераспространения ядерного оружия, дается обзор правового базиса и основных регулирующих документов, действующих в указанной области. Вторая часть пособия посвящена изложению основ современных систем учета и контроля ядерных материалов (СУиК ЯМ). Приводится последовательное описание элементов, входящих в состав СУиК ЯМ. Значительное внимание уделяется вопросам, связанным с автоматизацией операций по учету и контролю материалов. В третьей части книги рассматриваются вопросы обеспечения физической защиты ядерных материалов и установок.

Предназначено для студентов, обучающихся по специальности «Безопасность и нераспространение ядерных материалов» (направление «Ядерные физика и технологии») и специализирующихся в рамках магистерской образовательной программы «Физическая защита, учет и контроль ядерных материалов» (направление «Техническая физика»). Данное пособие может быть полезно студентам старших курсов и аспирантам при изучении систем учета и контроля ядерных материалов.

Пособие подготовлено в рамках Инновационной образовательной программы.

Рецензенты: канд. техн. наук, доцент ОИАТЭ Г.М. Пшакин,
нач. отдела ФГУП НИИА Н.В. Исаев

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие	7
Часть I. Ядерное нераспространение. Задачи и условия развития систем УК и ФЗ ЯМ.....	9
Глава 1. Проблема ядерного нераспространения.....	10
1.1. Понятие ядерного нераспространения. Международный режим нераспространения.....	10
1.2. Некоторые современные проблемы ядерного нераспространения.....	14
Глава 2. Основные технологии современного ядерного топливного цикла (ЯТЦ). Их значимость для обеспечения режима ядерного нераспространения	20
Глава 3. Международные гарантии нераспространения	61
3.1. Деятельность МАГАТЭ.....	61
3.2. Система экспортного контроля.....	88
Глава 4. Национальные гарантии нераспространения. Специальное обращение с ЯМ и его составляющие	94
Глава 5. Нормативно–правовые основы развития и функционирования УК и ФЗ ЯМ в Российской Федерации	100
5.1. Правовая основа деятельности в области УК и ФЗ ЯМ	100
5.2. Нормативные основы УК и ФЗ ЯМ.....	109
Глава 6. Человеческий фактор в УК и ФЗ ЯМ. Культура УК и ФЗ ЯМ.....	118
6.1. Современные угрозы безопасному обращению с ЯМ и система противодействия угрозам	118
6.2. Концепция культуры ядерной безопасности.....	120
6.3. Развитие культуры учета, контроля и физической защиты ЯМ	121
Часть II. Системы учета и контроля ядерных материалов.....	125
Глава 1. Государственная система учета и контроля ЯМ (ГСУК ЯМ)	126
1.1. Структура ГСУК ЯМ	126
1.2. Учет ЯМ на уровне эксплуатирующей организации	130
1.3. Тенденции развития систем учета ядерных материалов...	131

Глава 2. Основные понятия системы измеряемого материального баланса ядерных материалов	135
2.1. Принцип категоризации ядерных материалов	135
2.2. Формы ядерных материалов. Партия ядерных материалов	143
2.3. Зона баланса ядерных материалов (ЗБМ). Организация учета и контроля в ЗБМ	145
Глава 3. Информационные системы учета ЯМ	152
3.1. Задачи, решаемые информационной системой учета ЯМ ..	152
3.2. Основные требования к информационным системам учета ЯМ	153
3.3. Структура информационной системы учета ЯМ на уровне предприятия	153
3.4. Транзакция как основной элемент регистрации ЯМ в ЗБМ	157
3.5. Федеральная информационная система учета и контроля ядерных материалов	161
Глава 4. Статистические основы учета и контроля ЯМ	164
4.1. Основные понятия определения и сведения из теории вероятностей и статистики	166
4.2. Основные требования статистического характера к СУиК ЯМ	186
4.3. Погрешности, их модели и источники	193
4.4. Проверка гипотез и выборочные исследования	208
4.5. Контроль и обеспечение качества измерений	226
Глава 5. Измерения ЯМ, применяемые в целях их учета и контроля	238
5.1. Основные понятия, применяемые при измерении ядерных материалов	238
5.2. Неразрушающие методы анализа ЯМ. Калибровка, эталоны.	244
5.3. Разрушающие анализы	290
5.4. Комплексное применение методов измерений ЯМ	303
Глава 6. Главные учетные процедуры	306
6.1. Процедуры передачи ЯМ	306
6.2. Физическая инвентаризация и баланс ЯМ	310
Глава 7. Компьютеризированные СУиК ЯМ	330

7.1. Требования отраслевого стандарта к компьютеризированным системам учета и контроля ядерных материалов ...	330
7.2. Архитектура компьютеризированных систем учета ядерных материалов.....	333
7.3. Базовое программное обеспечение.....	341
7.4. Прикладное программное обеспечение	370
7.5. Разработка компьютеризированных СУиК ЯМ	405
Глава 8. Информационная безопасность компьютеризированных СУиК ЯМ.....	419
8.1. Защищенные системы обработки информации.....	419
8.2. Проблемы информационной безопасности в сфере учета и контроля ядерных материалов.....	421
8.3. Угрозы информационной безопасности и противодействие им	424
8.4. Стандарты в сфере обеспечения информационной безопасности в автоматизированных СуиК ЯМ	428
8.5. Влияние Федерального закона «О техническом регулировании» на обеспечение безопасности информационных технологий.....	450
8.6. Вопросы надежности компьютеризированных СуиК ЯМ и резервирования информации	452
Глава 9. Автоматизация учета ЯМ	458
9.1. Использование баркодной технологии для идентификации ЯМ.....	459
9.2. Автоматизация процессов измерения ЯМ	470
9.3. Системный подход к построению СУиК ЯМ на предприятии.....	472
Глава 10. Контроль ядерных материалов.....	475
10.1. Средства и меры контроля ЯМ на предприятиях	475
10.2. Внутригосударственный и международный контроль ЯМ.....	485
Часть III. Физическая защита ядерных материалов и установок ..	487
Глава 1. Общая характеристика задачи физической защиты.....	488
Глава 2. Нормативно–правовое обеспечение физической защиты	491
Глава 3. Структура и состав системы физической защиты (СФЗ)	493

Глава 4. Общая характеристика подсистем СФЗ.....	496
4.1. Комплекс технических средств физической защиты	496
4.2. Физические барьеры и организационная подсистема СФЗ	502
Глава 5. Общие принципы построения СФЗ.....	505
Глава 6. Процесс создания (совершенствования) СФЗ. Стадии и этапы	511
Глава 7. Анализ уязвимости ЯОО.....	514
Глава 8. Оценка эффективности СФЗ.....	519
Глава 9. Взаимодействие СФЗ с системой учета и контроля ЯМ.....	531
Список терминов	534

ПРЕДИСЛОВИЕ

Данная книга посвящена систематическому изложению основ учета, контроля и физической защиты ядерных материалов и является первым учебным пособием в методическом обеспечении подготовки специалистов по специальности 140309 «Безопасность и нераспространение ядерных материалов». Книга состоит из трех частей. В первой части рассмотрены задачи и условия развития систем учета, контроля и физической защиты ядерных материалов (УК и ФЗ ЯМ) в контексте проблемы нераспространения. Анализ основных технологий, форм и потоков ядерных материалов, обрабатываемых в рамках ядерного топливного цикла, является основой дальнейшего рассмотрения возможных методов и процедур их учета, контроля и защиты. В первой части пособия также дается обзор правового базиса и основных регулирующих документов, действующих в области УК и ФЗ ЯМ. Рассмотрены международные гарантии и их взаимосвязь с национальными программами гарантий нераспространения. Даются начальные знания относительно программы развития национальных гарантий нераспространения в России и ее основы – учета, контроля и физической защиты ядерных материалов. Уделяется особое внимание подходу категоризованных гарантий и концепции эшелонированной защиты ядерных материалов. Рассмотрены цели и формы интеграции учета, контроля и физической защиты.

Вторая часть учебного пособия посвящена изложению основ современных систем учета и контроля ядерных материалов (СУиК ЯМ). При этом рассмотрение ведется для двух уровней системы учета и контроля ядерных материалов: федеральном и эксплуатирующей организации. Одно из центральных мест книги занимает рассмотрение основных понятий современной системы измеряемого материального баланса и компонентов СУиК ЯМ на уровне предприятий. Раскрывается сущность статистической природы данных о ядерных материалах. По ходу изложения материала вводятся ключевые термины, дается их определение и разъясняется смысл на примерах. Приводится последовательное описание элементов, входящих в состав СУиК ЯМ. Значительное внимание уделяется вопросам, связанным с автоматизацией операций по учету и контролю материалов.

В третьей части книги кратко рассмотрен спектр вопросов обеспечения физической защиты ядерных материалов и установок.

Помимо студентов, изучающих безопасность и нераспространение ядерных материалов, данное пособие будет полезно всем студентам вузов, обучающихся по специальностям, связанным с ядерной инженерией, а также всем желающим приобрести начальные знания в области безопасного обращения с ядерными материалами.

Авторы выражают глубокую благодарность А.Н. Румянцеву, В.М. Шмелеву, В.А. Апсэ, А.Н. Шмелеву, Е.В. Петровой за помощь, ценные предложения и глубокие замечания. Авторы также выражают признательность Г.А. Бобровой за помощь в подготовке рукописи пособия к изданию.

Часть I

ЯДЕРНОЕ НЕРАСПРОСТРАНЕНИЕ. ЗАДАЧИ И УСЛОВИЯ РАЗВИТИЯ СИСТЕМ УЧЕТА, КОНТРОЛЯ И ФИЗИЧЕСКОЙ ЗАЩИТЫ ЯДЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ (УК и ФЗ ЯМ)

ГЛАВА 1

ПРОБЛЕМА ЯДЕРНОГО НЕРАСПРОСТРАНЕНИЯ

1.1. Понятие ядерного нераспространения. Международный режим нераспространения

Идеей безопасного обращения с ядерными материалами (ЯМ) проникнуто любое использование ядерной энергии, включая ядерную энергетику. Эта идея является основополагающей для международных соглашений и национальных законов. Она положена и в основу закона об использовании атомной энергии, принятого в нашей стране в 1995 г. Безопасность ЯМ с точки зрения общества – это контроль за использованием ЯМ и обеспечение исключительно мирного их использования.

Определим, что в дальнейшем будем понимать под термином ядерные материалы. Будем следовать терминологии, определенной в законе об использовании атомной энергии, в котором вводятся три основных вида материалов:

- ядерные материалы (ЯМ) – материалы, содержащие делящиеся вещества, или способные их воспроизвести (например, уран-238);
- радиоактивные вещества (РВ) – вещества, испускающие ионизирующее излучение (исключая ЯМ);
- радиоактивные отходы (РАО) – ЯМ + РВ, которые не предполагают в дальнейшем использовать (например, после радиохимической переработки облученного топлива).

Отметим, что нас будет, главным образом, интересовать первый вид материалов. В России четко определен список ядерных материалов, который будет в следующих главах подробно рассмотрен.

Противоречивая особенность ЯМ заключается в том, что наряду с глобальным распространением мирной ядерной энергетики сами ядерные материалы не подлежат свободному распространению в силу своей потенциальной опасности быть использованными для создания ядерного оружия (ЯО). Эта противоречивая особенность ЯМ лежит в основе так называемой проблемы нераспространения [1–3]. Угрозе распространения ЯО противодействуют международные и национальные системы гарантий нераспространения, системы экспортного контроля.

США и СССР были первыми ядерными державами, развивающими ядерный военный потенциал и ядерную энергетику. С начала 1960-х гг. постоянно расширялось сообщество ядерных государств.

В 1960 г. свое первое испытание провела Франция, затем в 1964 г. – Китай. Некоторые промышленно развитые страны значительно нарастили свой технологический уровень в ядерной области и были способны приступить к созданию ядерного оружия. Наблюдалось интенсивное строительство ядерных энергетических установок.

Распространение ядерных технологий в 1950–1960 гг. стало вызывать озабоченность мировой общественности относительно распространения ядерного оружия в мире. Многие страны были готовы отказаться от производства собственного ядерного оружия, но при условии, что другие государства (прежде всего соседние) тоже взяли бы на себя аналогичные обязательства. В этих условиях Ирландией был выдвинут проект резолюции ООН по нераспространению ядерного оружия. Генеральная Ассамблея ООН в 1961 г. единогласно приняла Ирландскую резолюцию, призывающую государства к всемерному противодействию распространению ядерного оружия в мире. Таким образом, эта резолюция показала, что в мировом сообществе сложилось понимание необходимости заключения глобального договора о нераспространении ядерного оружия. Однако прошло 9 лет, прежде чем эта резолюция нашла свое юридически обязательное воплощение – Договор о нераспространении ядерного оружия (1970 г.).

В 1960-годах мировым сообществом был предпринят ряд шагов в направлении ограничения распространения ЯО и усиления контроля над использованием ЯМ. В 1963 г. был заключен Договор о запрещении ядерных испытаний на земле и в атмосфере. Этот Договор стал знаменательной победой в истории обуздания гонки вооружений, так как явился эффективным средством в остановке распространения ЯО на неядерные государства.

Ядерная угроза, нависшая над миром во время кубинского кризиса, подтолкнула государства Центральной и Южной Америки к образованию зоны, свободной от ядерного оружия. Договор о запрещении ядерного оружия в Латинской Америке (Договор Тлателолко, заключен в 1967 г.) запрещает не только приобретение и разработку ядерного оружия в Латинской Америке, но также и размещение ядерного оружия в этом регионе иностранным державам.

Первой в 1958 г. предметно поставила перед ООН проблему предотвращения ядерного оружия Ирландия. С середины 1960-х гг. Соединенные Штаты и Советский Союз приступили к активному обсуждению вопросов создания всемирного договора о нераспространении, который мог бы стать основой международного режима

ядерного нераспространения. Эти переговоры вылились, в конечном итоге, в заключение Договора о нераспространении ядерного оружия (ДНЯО), который вступил в силу в 1970 г. ДНЯО сместил действующие постулаты эпохи свободной ядерной торговли в сторону введения конкретных и твердых обязательств в отношении использования ЯМ.

Признание подавляющим большинством мирового сообщества официальных обязательств не развивать и не приобретать ядерное оружие, было главным успехом ДНЯО. Не присоединились к Договору лишь Индия, Пакистан, Израиль и Куба. Поэтому, будучи всемирным договором, ДНЯО является правовой основой осуществления международных гарантий нераспространения. Договор позволил внедрить в международную и внутригосударственную жизнь нормы и правила ядерного нераспространения.

Начиная со времени вступления в действие (март 1970 г.), ДНЯО играл и продолжает играть ключевую роль в прекращении распространения ядерного оружия. Он является главным международным договором в области ядерного нераспространения. Благодаря нему международный режим нераспространения становится все более влиятельным и универсальным. Кратко остановимся на основных положениях этого Договора.

Первые две статьи являются ключевыми и содержат основные обязательства ядерных и неядерных государств по нераспространению. Ядерные государства обязуются не передавать ЯО и ЯВУ, а также осуществляют контроль над ними, а неядерные страны обязуются не приобретать и не производить их.

В ходе переговоров по ДНЯО участвующие стороны исходили из принципа обязательности контроля за соблюдением ДНЯО на территории неядерных государств. Этому условию посвящена статья III п. 1 Договора. Главное в этой статье, что международные гарантии применяются ко всем ЯМ во всей мирной ядерной деятельности государства в пределах территории такого государства, под его юрисдикцией или осуществляемой под его контролем, где бы то ни было.

Вторая часть статьи III Договора требует, чтобы неядерные страны-импортеры приняли международные гарантии на поставляемый им ЯМ и оборудование, что объективно способствует распространению гарантий МАГАТЭ. Фактически в статье III п.2 заложена международно-правовая основа для всей системы контроля за ядерным экспортом.

Статья IV посвящена проблеме мирного использования атомной энергии. Развитие ядерной энергии, так или иначе, создает основу для ее применения как в мирных, так и в военных целях. Поэтому в этой статье изложено обязательство участников Договора, что использование ядерной энергии в мирных целях должно проходить на основе соблюдения требований по нераспространению (статей I и II).

Статья V связана с мирными ядерными взрывами. Инициатором включения данной статьи в Договор была Мексика. Суть статьи заключается в том, что ядерные державы могут предоставить услуги неядерным государствам по проведению ядерных взрывов в мирных целях (МЯВ) при их международном контроле. Однако ни одно неядерное государство до сих пор не ставило официально вопрос о предоставлении услуг по МЯВ. Основными причинами являются определенный риск для окружающей среды и отсутствие убедительных потребностей в МЯВ.

Делегации Египта и Мексики предложили включить в договор специальную статью о ядерном разоружении. Вопрос о том, насколько определенные и твердые обязательства по ядерному разоружению взяли на себя ядерные державы согласно статье VI, был и остается предметом острых разногласий и споров. Многие неядерные страны считают, что эти положения договора, касающиеся переговоров об эффективных мерах по прекращению гонки ядерных вооружений, в удовлетворительной мере не выполнены.

Статья VII посвящена зонам, свободным от ядерного оружия (ЗСЯО). В ней подтверждается право государств на образование региональных ЗСЯО. В ЗСЯО должно запрещаться не только производство, приобретение или получение ЯО неядерными участниками, но и размещение ЯО, принадлежащего ядерным державам.

В 1995 г. состоялась конференция по продлению ДНЯО, так как к этому времени истек срок действия договора. Главным итогом конференции явилось принятие юридически обязательного решения о бессрочном продлении ДНЯО. Однако на конференции прозвучала озабоченность некоторыми нерешенными проблемами, среди них – проблема универсальности договора.

Как известно, режим ядерного нераспространения включает в себя ряд международных договоренностей и организаций, в которых участвуют как ядерные, так и неядерные государства. Режим закреплен в форме взаимосвязанных международных соглашений, центральное место среди которых занимает ДНЯО. Однако наряду с ДНЯО существуют другие важные соглашения:

- соглашение о гарантиях; Устав МАГАТЭ; конвенции, заключенные под эгидой Агентства и др.;
- внутреннее законодательство, регулирующее ядерную деятельность в странах–участниках режима;
- с режимом нераспространения связаны российско–американские договоры в области сокращения ядерного оружия;
- договоры о создании зон, свободных от ядерного оружия: Глаутелло, Раротонга, Пелиндаба и Бангкокский договор.

Неотъемлемой частью режима является целый ряд международных организаций. В том числе, значительную роль в поддержании режима нераспространения играет Международное агентство по атомной энергии. С помощью специально развитой системы мер, называемых гарантиями МАГАТЭ, Агентство контролирует и старается не допустить переключений ЯМ для немирного использования.

Большой вклад в решение проблемы нераспространения вносят международные режимы экспортного контроля (ЭК). Основным средством в осуществлении экспортного контроля являются ограничения на передачи материалов, оборудования и соответствующих технологий, входящих в специально составленные контрольные списки. Каждая страна–участник режима экспортного контроля выполняет следующие условия:

- создает национальную правовую базу, соответствующую принятым договоренностям;
- следует принципам режима ЭК в политике страны;
- участвует в форумах стран–участников.

В ядерной области существует три основных режима по экспортному контролю материалов, оборудования и технологий – один в рамках Комитета Цангера и два – в рамках Группы ядерных поставщиков (ГЯП). Но в ЭК входит также режим РКРТ (режим контроля над ракетными вооружениями), Австралийская группа (контроль экспорта товаров и технологий химического и биологического профиля) и Вассенаарские договоренности (контроль экспорта для обычных вооружений, товаров и технологий двойного использования).

1.2. Некоторые современные проблемы ядерного нераспространения

Почему существует озабоченность мировой общественности по поводу возможного немирного применения ЯМ в настоящее время?

К сожалению, решить проблему ядерного нераспространения полностью и окончательно не представляется возможным. На рис. 1.1 отмечены некоторые проблемы ядерного нераспространения. В процессе формирования международного режима ядерного нераспространения для части этих проблем были найдены приемлемые решения, другие еще требуют адекватных совместных действий для своего решения. Остановимся подробнее на некоторых из них:

1. Серьезной проблемой для сохранения режима нераспространения остается крайне медленное сокращение арсеналов ядерных вооружений. Неядерные государства усматривают в этом отсутствие желания ядерных держав предпринимать реальные значимые шаги в этом направлении. К тому же проблема усложняется тем обстоятельством, что сокращение ядерных вооружений – дорогостоящий процесс. Поэтому при обсуждении результатов действия Договора постоянно звучит критика в адрес ядерных держав по поводу слишком медленного выполнения обязательства о сокращении ядерных вооружений.

2. В настоящее время список государств, не относящихся к ядерным державам, весьма широк. Поэтому принятие общих решений относительно ядерного нераспространения часто встречает определенные трудности. Так, например, ряд стран имеют военные ядерные программы. Некоторые из них уже обладают ядерным оружием. К таким государствам относят Израиль, Индию и Пакистан. Эти государства находятся вне режима ядерного нераспространения, имея ядерное оружие, но воздерживаясь от его боевого развертывания. Другие государства являются в некотором смысле «пороговыми», так как в той или иной мере инициировали программы создания ядерного оружия, но по разным причинам ЯО не создали. К таким государствам относятся Ливия, Иран, КНДР, Бразилия, Аргентина. Среди пороговых государств особое место занимает Южно-Африканская Республика, создавшая, а потом (1990 г.) уничтожившая свой арсенал ЯО. В большинстве случаев стремление к обладанию ЯО вызвано регионально-политическими проблемами между государствами и попытками приобрести доминирующую роль в регионе.

Надо также не забывать, что некоторые государства (Япония, Германия, Швеция, Австралия и др.) обладают в полной мере экономическим и научно-техническим потенциалом для создания ЯО. Однако они твердо придерживаются добровольно принятого безъядерного статуса.

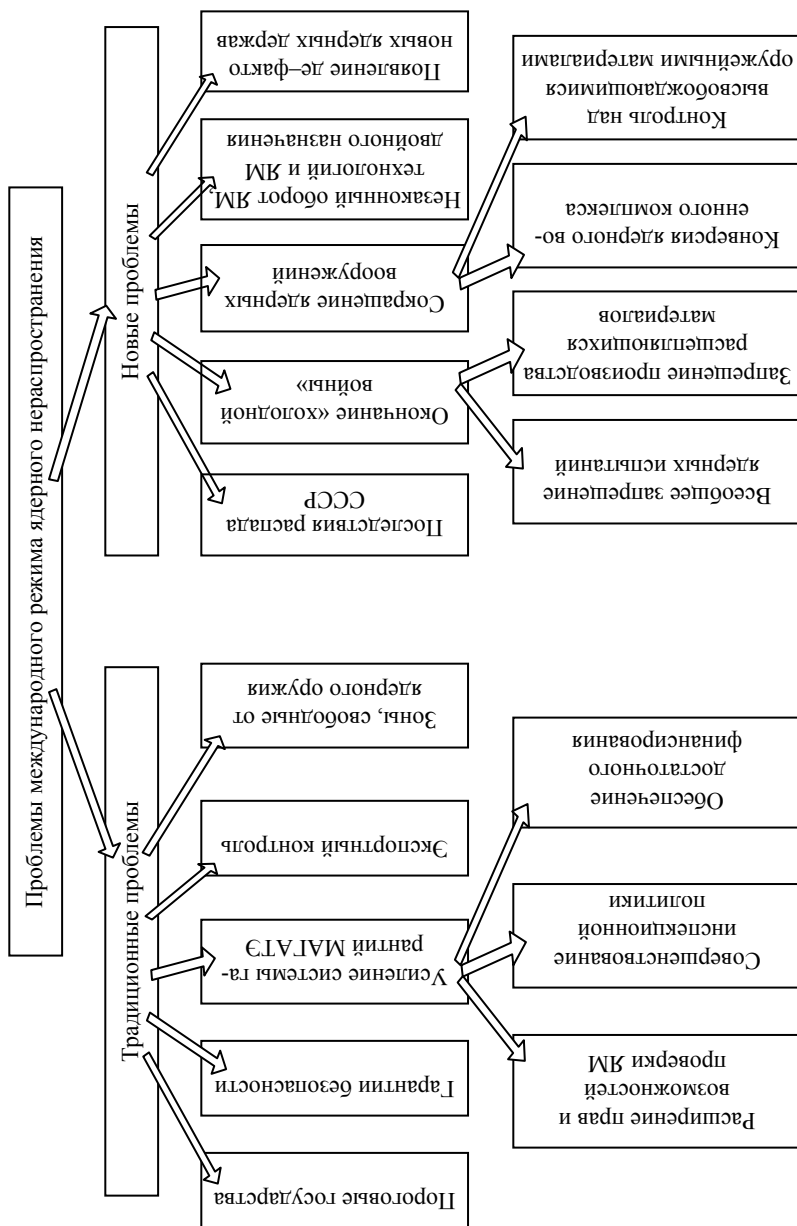


Рис. 1.1. Некоторые проблемы международного режима ядерного нераспространения

3. Распад СССР в 1991 году явился колоссальным ударом для мирового режима ядерного нераспространения. В Советском Союзе вопросу безопасности использования ядерных материалов всегда уделялось серьезное внимание, и достаточно хорошо обеспечивалась система соответствующих мероприятий. Но она обеспечивалась методами тоталитарного государства, которое являлось собственником ядерных материалов; к тому же внутри государства ЯМ практически не имели коммерческой ценности. Был обеспечен строгий режим секретности и дисциплины, когда все указания выполнялись беспрекословно, а за их невыполнение грозили серьезные наказания.

После распада Советского Союза, и реформ в стране, ситуация резко изменилась.

Во-первых, распалось единое ядерное хозяйство СССР. Налаженная система взаимодействия и связей предприятий Минсредмаша была во многом разрушена.

Во-вторых, явственно проявилась коммерческая ценность ядерных материалов.

В-третьих, границы стали более прозрачными, и поэтому усилились возможности бесконтрольного или контрабандного ввоза/вывоза ядерных материалов. Таким образом, появилась проблема незаконного оборота ЯМ, требующая ужесточения экспортного контроля ядерных материалов и предметов двойного назначения, а также усиления таможенного контроля ЯМ.

Наконец, сам подход к охране ядерных материалов был однобоким. Ядерные центры защищались в основном от внешнего нарушителя. В настоящее время ядерные материалы требуют защиты как от внешнего нарушителя, так и от внутреннего.

Все перечисленные выше обстоятельства вызвали необходимость серьезного пересмотра нашего отношения к специальному обращению с ЯМ, т.е. к обеспечению их учета, контроля и физической защиты. Различным аспектам этих трех элементов специального обращения с ядерными материалами и посвящен в целом.

Распределение потенциала ядерной индустрии бывшего СССР

В 1991 г. в результате распада Советского Союза перестало существовать его единое огромное ядерное хозяйство (табл. 1.1).

В свое время Советский Союз подписал Договор о нераспространении ядерного оружия. После распада Советского Союза, на Украине, в Белоруссии и в Казахстане осталось ядерное оружие. Означало ли это, что в мире появились новые ядерные государства?

Таблица 1.1

Потенциал ядерной индустрии СССР на момент его распада

	Россия	Украина	Белоруссия	Казахстан	Средняя Азия	Республики Закавказья	Прибалтика
Ядерное оружие	+	+	+	+	–	–	–
Транспортные ядерные установки	100 %	–	–	–	–	–	–
АЭС, энергетические блоки (мощность в ГВт)	28 (20,2)	14 (12,9)	–	1 (0,3)	–	2 (0,8)	2 (3,0)
Исследовательские реакторы	25	2	1	2	1	1	1
Добыча и первичная переработка урана	40 %	20 %	–	10 %	30 %	–	–
Производство твэлов	100 %						
Обогащение урана	100 %						
Переработка облученного топлива	100 %						

В этой ситуации все мировое сообщество и, прежде всего, Россия, проявили огромные усилия к тому, чтобы эти страны не стали ядерными государствам, и потому что это нарушило бы весь режим нераспространения ядерного оружия.

Россия вывезла все ядерное оружие с территории Белоруссии, Казахстана и Украины. На сегодняшний день все ядерное оружие бывшего СССР сосредоточено только в пределах границ России.

В результате предпринятых усилий Украина, Белоруссия, Казахстан и все остальные бывшие республики Советского Союза присоединились к Договору о нераспространении ядерного оружия. Таким образом, ситуация была спасена и наследницей Советского Союза с точки зрения участия в Договоре о нераспространении как ядерная держава стала Россия.

Транспортные установки – это, в первую очередь, подводные лодки и суда с ядерными реакторами – все 100 % находятся у нас в России (суда, например, в Мурманском морском пароходстве).

Атомные электростанции. В России осталось 29 блоков общей мощностью 21,2 ГВт (эл.). На Украине – 14 блоков мощностью 12,9 ГВт. В Казахстане была одна атомная электростанция с быстрым реактором БН–350 мощностью 350 МВт (эл.) Часть вырабатываемой им энергии тратилась на опреснение морской воды. В настоящее время реактор БН–350 остановлен и планируется его демонтаж.

В Закавказье только в Армении есть атомная электростанция с двумя реакторами ВВЭР–440. В 1989 году атомная станция была закрыта в результате популистских антиядерных выступлений, а также из соображений безопасности АЭС, находящейся в районе повышенной сейсмической активности. Однако после жесткого энергетического кризиса 1992–1995 гг. было принято решение о запуске реакторов. Правительство Армении обратилось в Минатом с просьбой восстановить АЭС, поскольку за то время, пока станция не работала, часть оборудования пришла в негодность. Один блок АЭС был успешно запущен, и уже к 1999 году АЭС давала 36 % электроэнергии этой страны.

В Литве (Игналина) была построена атомная электростанция. Там работали два энергетических блока с реакторами РБМК–1500.

Из других стадий ЯТЦ, приведенных в табл. 1.1, рассмотрим добычу урана. Только 40 % всех рудников и всей добычи урана находится в России, 20 % осталось на Украине, 10 % в Казахстане и 30 % в Таджикистане, Киргизии и Узбекистане. В среднеазиатских республиках Минсредмашем СССР были построены комбинаты, на которых добываемая руда проходила первичную переработку.

Важно отметить, что наиболее опасные (с точки зрения нераспространения) стадии ядерного топливного цикла остались на 100 % в России. Это комбинаты по обогащению урана и по переработке и выделению плутония.

Список литературы

1. Ядерное нераспространение / Под общ. ред. В.А. Орлова. М.: ПИР Центр, 2002.
2. Гарднер Г.Т. Ядерное нераспространение. М.: МИФИ, 1995.
3. Тимербаев Р.М. Россия и ядерное нераспространение. М.: Наука, 1999.

ГЛАВА 2

ОСНОВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ СОВРЕМЕННОГО ЯДЕРНОГО ТОПЛИВНОГО ЦИКЛА (ЯТЦ). ИХ ЗНАЧИМОСТЬ ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ РЕЖИМА ЯДЕРНОГО НЕРАСПРОСТРАНЕНИЯ*

Без ядерных материалов невозможно протекание двух самоподдерживающихся ядерных реакций, сопровождающихся выделением большого количества энергии, таких как:

цепная реакция деления ядер тяжелых изотопов. В этой реакции ядерными материалами являются изотопы урана и тория (из естественных элементов), изотопы искусственных трансурановых элементов (главным образом, изотопы плутония, а также нептуния, америция, кюрия, берклия и калифорния). Сюда же относится ^{233}U , искусственный изотоп урана, который может быть получен нейтронным облучением тория;

реакция термоядерного синтеза ядер легких изотопов, в которой ЯМ – это изотопы водорода (дейтерий и тритий). Природный водород содержит 0,015 % дейтерия и не содержит трития. К ядерным материалам отнесена также тяжелая вода (D_2O) и литий, поскольку его изотоп ^6Li способен интенсивно производить тритий в реакции $^6\text{Li}(n,\alpha)\text{T}$.

Таким образом, ЯМ включают:

исходные ЯМ – урановые и ториевые руды, природный уран и торий, обедненный уран (уран с пониженным содержанием ^{235}U);

специальные ЯМ – обогащенный уран (уран с повышенным содержанием ^{235}U), плутоний и ^{233}U ;

трансурановые элементы (Np, Am, Cm, Bk, Cf);

тяжелая вода, дейтерий, тритий, литий.

Ядерные технологии включают:

- технологии производства ЯМ;
- технологии хранения, транспортировки и использования ЯМ;
- технологии переработки и повторного использования ЯМ;
- технологии переработки и захоронения радиоактивных отходов.

* Глава подготовлена при участии В.А. Апсэ и А.Н. Шмелева по материалам книги Апсэ В.А., Шмелева А.Н. «Ядерные технологии». М.: МИФИ, 2001.

Ядерные технологии и безопасность обращения с ЯМ связаны между собой. Термин «безопасность» может трактоваться в широком смысле, включая радиационную безопасность, ядерную безопасность и др. Безопасность в отношении распространения ЯМ – защищенность от хищения ЯМ с целью создания ядерных взрывных устройств или другого несанкционированного использования.

Основное внимание в настоящем разделе будет уделено описанию ядерных технологий и их анализу с точки зрения обеспечения нераспространения ядерного оружия. Нераспространение ЯМ может быть гарантировано, если при работе с ними будут созданы такие условия, чтобы хищение и использование ЯМ в незаконных целях стало настолько затруднительно и опасно, а риск обнаружения подобных действий столь высок, что потенциальные нарушители вынуждены отказаться от своих намерений.

Ядерные технологии должны быть обеспечены такой системой физической защиты, учета и контроля ЯМ, чтобы:

- а) добраться до ЯМ и похитить их было практически невозможно;
- б) хищение малого количества ЯМ персоналом быстро обнаруживалось, а дальнейшие попытки хищений по данному каналу пресекались;

- в) переключение ЯМ, находящихся под международными гарантиями, легко обнаруживалось международными инспекционными органами.

Основная тема главы – ядерные технологии с точки зрения нераспространения ЯМ.

Концепция ядерного топлива

Ядерное топливо – это ЯМ, содержащий нуклиды, которые делятся при взаимодействии с нейтронами. Делящиеся нуклиды:

природные изотопы урана и тория;

искусственные изотопы плутония;

изотопы трансурановых элементов (Np, Am, Cm, Bk, Cf);

искусственный изотоп ^{233}U (продукт захвата нейтронов ^{232}Th).

Как правило, изотопы урана, плутония и тория с четным массовым числом (четные изотопы) делятся только под действием быстрых нейтронов (порог реакции деления – примерно 1,5 МэВ). В то же время, изотопы урана и плутония с нечетным атомным числом (нечетные изотопы) делятся нейтронами любых энергий, включая

тепловые нейтроны. Спектр нейтронов деления – это спектр быстрых нейтронов (средняя энергия $\sim 2,1$ МэВ), быстро замедляющихся ниже порога деления для четных изотопов. Поэтому цепная реакция деления на четных изотопах неосуществима из-за малой доли нейтронов с энергией выше порога деления. Для поддержания цепной реакции деления на нечетных изотопах замедление нейтронов играет положительную роль, поскольку сечения деления этих изотопов растут с уменьшением энергии нейтронов.

Первичное ядерное топливо содержит только природные делящиеся изотопы (^{235}U , ^{238}U , ^{232}Th). Вторичное ядерное топливо содержит искусственные делящиеся нуклиды (^{233}U , ^{239}Pu , ^{241}Pu).

Изотоп урана ^{238}U и изотоп тория ^{232}Th представляют собой природный ядерный материал, малопригодный для использования в качестве ядерного топлива, так как они делятся только быстрыми нейтронами. Однако эти изотопы могут быть с успехом использованы для получения искусственных делящихся нуклидов (^{233}U , ^{239}Pu), т.е. для воспроизводства вторичного ядерного топлива. Эти нуклиды часто называют воспроизводящими изотопами.

В настоящее время ядерная энергетика базируется на природном уране, который состоит из трех изотопов:

^{238}U ; содержание – 99,2831 %; период полураспада $T_{1/2} = 4,5 \cdot 10^9$ лет;

^{235}U ; содержание – 0,7115 %; период полураспада $T_{1/2} = 7,1 \cdot 10^8$ лет;

^{234}U ; содержание – 0,0054 %; период полураспада $T_{1/2} = 2,5 \cdot 10^5$ лет.

Изотоп ^{235}U – единственный природный ЯМ, который может делиться нейтронами любых энергий с образованием избыточного количества быстрых нейтронов. Именно благодаря этим нейтронам, цепная реакция деления становится осуществимой. Большинство энергетических реакторов работает на уране, обогащенном изотопом ^{235}U до 2–5 %. Быстрые реакторы используют уран с обогащением 15–25 %. Исследовательские реакторы используют уран среднего и высокого обогащения (20–90 %).

Обогащенный уран – это уран, содержащий ^{235}U в количестве, превышающем его концентрацию в природном уране (0,71 %). Принято считать:

низкообогащенный уран – $X_5 < 5$ %;

среднеобогащенный уран – X_5 от 5 до 20 %;
высокообогащенный уран – X_5 от 20 до 90 %;
сверхобогащенный (оружейный) уран – $X_5 > 90$ %.

При производстве обогащенного урана образуется обедненный уран, т.е. уран с содержанием ^{235}U ниже природного уровня (обычно 0,2–0,3 %).

В реакторах применяются следующие виды ядерного топлива:

чистые металлы, сплавы металлов, интерметаллические соединения;

керамика (оксиды, карбиды, нитриды);

металлокерамика (керметы – частицы металлического топлива диспергированы в керамической матрице);

дисперсное топливо (микрочастицы топлива в защитной оболочке диспергированы в инертной, например, графитовой, матрице).

Основная конструкционная форма ядерного топлива в реакторе – тепловыделяющий элемент (ТВЭЛ). ТВЭЛ состоит из активной части (сердечник, где содержатся топливные и воспроизводящие ЯМ) и наружной оболочки. Оболочки ТВЭЛОВ обычно изготавливаются из металла (нержавеющие стали, циркониевые сплавы). В шаровых ТВЭЛАХ топливные микрочастицы покрываются слоями карбида кремния и пиролитического углерода.

По геометрической форме ТВЭЛЫ могут быть стержневыми, кольцевыми, пластинчатыми, шаровыми. Топливная загрузка реактора размещается в большом количестве ТВЭЛОВ, так, например, количество ТВЭЛОВ реактора ВВЭР–1000 – 48 000 штук.

ТВЭЛЫ объединяются в тепловыделяющие сборки (ТВС): от нескольких штук до нескольких сотен ТВЭЛОВ в одной ТВС.

Все ТВС, размещенные в реакторе, образует активную зону, где происходит управляемая цепная реакция деления ядер нейтронами, сопровождающаяся преобразованием ядерной энергии в тепловую. Эта энергия отводится теплоносителем для дальнейшего преобразования в электричество. Активная зона реактора играет ту же роль, что и обычный тепловой котел, в котором сжигается органическое топливо. Эта аналогия позволяет использовать привычные термины «ядерное топливо», «сжигание топлива», «выгорание топлива», хо-

тя обычного горения или сжигания топлива в ядерном реакторе не происходит.

Концепция ядерного топливного цикла

Процессы изготовления, использования и переработки ядерного топлива могут быть объединены общим понятием ядерного топливного цикла (ЯТЦ).

Основные стадии ЯТЦ

1. Добыча урановой руды и извлечение из нее соединений урана.
2. Изготовление ядерного топлива.
3. Использование ядерного топлива в ядерных реакторах.
4. Временное хранение облученных ТВС (ОТВС) на АЭС.

Далее возможны два варианта – открытый ЯТЦ или замкнутый ЯТЦ.

5а. Захоронение ОТВС в геологических хранилищах – в случае открытого ЯТЦ.

5б. Химическая переработка ОТВС – в случае замкнутого ЯТЦ.

6. Выделение радиоактивных отходов (РАО), их переработка и захоронение.

7. Многократный возврат урана и плутония на стадию изготовления ядерного топлива и его использования в ядерных реакторах.

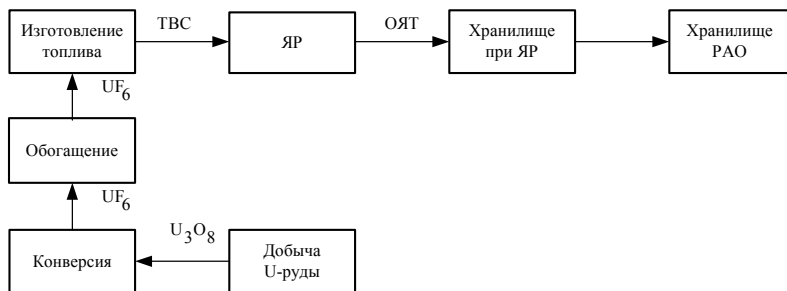
Существует две точки зрения на целесообразность замыкания ЯТЦ:

1. Замыкание ЯТЦ нецелесообразно. При химической переработке ОЯТ возникают технологические и политические проблемы:

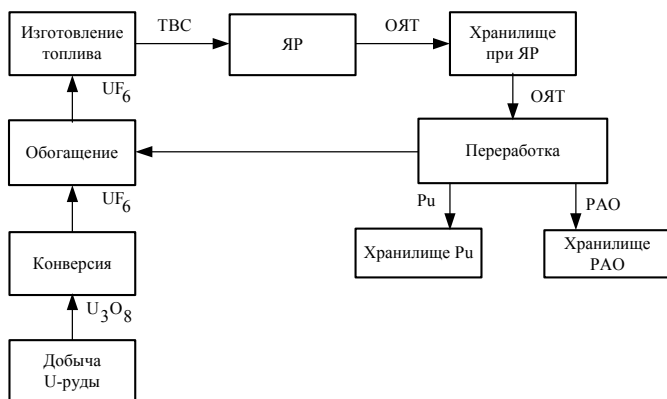
- а) возможность хищения ЯМ для создания ядерного оружия;
- б) сложность и опасность переработки ОЯТ;
- в) сложность и опасность переработки и захоронения РАО.

2. Замыкание ЯТЦ целесообразно. ОЯТ содержит ценные ЯМ, пригодные для изготовления ядерного топлива. Замкнутый ЯТЦ – это самообеспечение национальных энергетических потребностей.

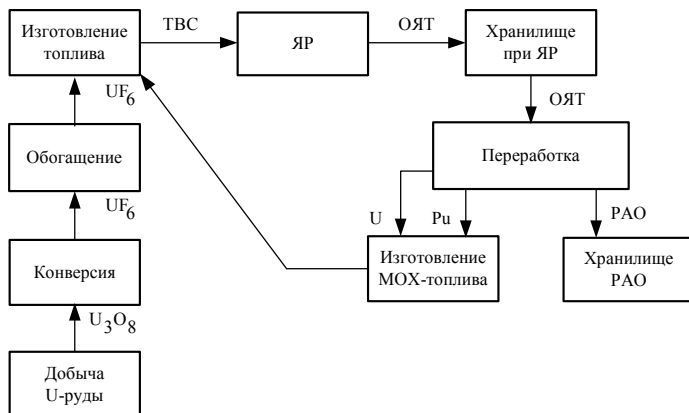
Существуют несколько вариантов ЯТЦ: один открытый и два замкнутых. Их схемы приведены на рис. 2.1.



А)



Б)



В)

Рис. 2.1. Схемы открытого (А) и двух вариантов замкнутого (Б, В) ЯТЦ

А. Открытый (разомкнутый) ЯТЦ

1. Добыча урановой руды.
2. Производство октаоксида урана U_3O_8 .
3. Конверсия U_3O_8 в UF_6 .
4. Обогащение UF_6 .
5. Изготовление ядерного топлива (ТВЭЛы и ТВС).
6. Использование ядерного топлива в ядерных реакторах.
7. Хранение ОЯТ в приреакторных хранилищах.
- Окончательное захоронение ОЯТ в геологических формациях.

Б. Замкнутый ЯТЦ с использованием регенерированного урана

1. Добыча урановой руды.
2. Производство октаоксида урана U_3O_8 .
3. Конверсия U_3O_8 в UF_6 .
4. Обогащение UF_6 .
5. Изготовление ядерного топлива (ТВЭЛы и ТВС).
6. Использование ядерного топлива в ядерных реакторах.
7. Хранение ОЯТ в приреакторных хранилищах.
8. Переработка ОЯТ с выделением урана, плутония и РАО.
9. Возвращение регенерированного урана на стадии конверсии и обогащения.
10. Размещение плутония в спец. хранилищах.
11. Окончательное захоронение РАО в геологических формациях.

В. Замкнутый ЯТЦ с использованием регенерированного урана и плутония

1. Добыча урановой руды.
2. Производство октаоксида урана U_3O_8 .
3. Конверсия U_3O_8 в UF_6 .
4. Обогащение UF_6 .
5. Изготовление ядерного топлива (ТВЭЛы и ТВС).
6. Использование ядерного топлива в ядерных реакторах.
7. Хранение ОЯТ в приреакторных хранилищах.
8. Переработка ОЯТ с выделением урана, плутония и РАО.
9. Возвращение регенерированного урана на стадии конверсии и обогащения.
10. Изготовление смешанного уран–плутониевого оксидного топлива (МОХ–топлива) на основе регенерированного урана и плутония.
11. Окончательное захоронение РАО в геологических формациях.

В настоящее время семь стран способны перерабатывать ОЯТ: США, Великобритания, Франция, Россия, Китай (ядерные державы), Япония и Индия. Одна из главных задач развития и эксплуатации ядерных технологий – контроль за ЯМ на всех стадиях ЯТЦ с целью недопущения их использования в незаконных целях.

Возможны три пути переключения ЯМ с энергетического использования на применение в военных целях:

1. Насильственное хищение после террористической атаки извне на ядерный объект или транспортное средство с ЯМ.

Для предотвращения создаются системы физической защиты ЯМ.

2. Ненасильственное, скрытое хищение ЯМ персоналом объекта.

Для предотвращения создаются системы учета и контроля ЯМ.

3. Скрытое переключение ЯМ, санкционированное национальным правительством.

Для предотвращения разрабатывается система международных гарантий и договоров о мирном использовании ЯМ:

а) Договор о нераспространении ядерного оружия (ДНЯО);

б) региональные договора о нераспространении ядерного оружия;

в) Комитет Цангера («Группа ядерных поставщиков») для контроля за экспортом ЯМ, технологий и оборудования.

Основной механизм контроля на государственном уровне – периодические инспекции ядерных объектов экспертами МАГАТЭ.

Рассмотрим факторы, характеризующие привлекательность ЯМ для хищения на различных стадиях ЯТЦ.

1. Количество и качество ЯМ, необходимых для создания ядерных взрывных устройств:

критмасса 100 % ^{235}U – 50 кг;

критмасса 100 % ^{239}Pu – 15 кг;

критмасса 100 % ^{233}U – 17 кг.

Критмассы приведены для металлической сферы без отражателя. Отражатель снижает критмассу примерно в 2 раза. МАГАТЭ ввело единицу количества ЯМ – «значимое количество» (ЗК) (Significant Quantity (SQ)). Обнаружение хищения 1 ЗК требует специального расследования и обращения в Совет Безопасности ООН. Величина ЗК примерно в 2 раза ниже критмассы ЯМ (металлическая сфера без отражателя):

$$1 \text{ ЗК } (^{239}\text{Pu}, ^{233}\text{U}) = 8 \text{ кг}; 1 \text{ ЗК } (^{235}\text{U}) = 25 \text{ кг}.$$

Риск распространения ядерного оружия (РР): низкий. Природный уран невозможно использовать в ядерном взрывном устройстве.

2. Перевод в ядерное топливо (необогащенный уран для реакторов типа CANDU) или в гексафторид урана для обогащения.

УК: мала, как и при добыче урановой руды.

УПП: зависит от постановки предприятий под гарантии МАГАТЭ.

РР: низкий. Природный уран невозможно использовать в ядерном взрывном устройстве.

3. Обогащение урана изотопом ^{235}U .

УК: велика. Для ядерного взрывного устройства достаточно 25 кг оружейного урана. Такой вес может унести один человек.

УПП: зависит от постановки предприятий под гарантии МАГАТЭ.

РР: высокий. Группа ядерных поставщиков наложила неофициальное эмбарго на экспорт обогатительных технологий.

4. Изготовление ядерного топлива (ТВЭЛы, ТВС).

УК: Низкая. Одна ТВС весит 300–500 кг. Потребуется специальный транспорт для перевозки ТВС.

УПП: Зависит от постановки предприятий под гарантии МАГАТЭ.

РР: От низкого до высокого в зависимости от обогащения топлива.

5. Использование ядерного топлива в ядерных реакторах.

УК: Низкая. Это связано с весом ТВС, ее радиоактивностью и размещением внутри корпуса ядерного реактора.

УПП: Зависит от постановки реактора под гарантии МАГАТЭ.

РР: От низкого до высокого в зависимости от обогащения топлива и от наличия установок для переработки ОЯТ.

6. Хранилище ОЯТ.

УК: низкая. Это связано с весом, радиоактивностью и остаточным тепловыделением ТВС.

УПП: зависит от постановки хранилища под гарантии МАГАТЭ.

РР: от низкого до высокого в зависимости от наличия установок для переработки ОЯТ.

7. Переработка ОЯТ.

УК: высокая. При переработке ОЯТ используется дистанционное оборудование, отделяющее персонал от ЯМ. Однако есть участки, где плутонийсодержащие материалы доступны для кражи.

УПП: зависит от постановки перерабатывающей установки под гарантии МАГАТЭ.

РР: высокий. На перерабатывающих заводах производится плутоний, который может быть использован в ядерных взрывных устройствах. Группа ядерных поставщиков наложила неофициальное эмбарго на экспорт перерабатывающих технологий.

8. Захоронение радиоактивных отходов.

УК: низкая. Это связано с высокой радиоактивностью и тепловыделением РАО, с малым содержанием делящихся материалов.

УПП: низкая из-за малого содержания делящихся материалов.

РР: низкий. Это связано с высокой радиоактивностью и тепловыделением РАО, с малым содержанием делящихся материалов.

Таблица 2.1

Относительная опасность стадий ЯТЦ

Стадия ЯТЦ	Уязвимость к краже	Уязвимость к переключению	Риск распространения
Добыча руды	Низкая	Высокая	Низкий
Конверсия в UF_6	Низкая	В/Н(МАГАТЭ)*	Низкий
Обогащение	Высокая	В/Н(МАГАТЭ)	Высокий
Изготовление ТВС	Низкая	В/Н(МАГАТЭ)	В/Н(обогащение)
Использование на АЭС	Низкая	В/Н(МАГАТЭ)	В/Н(обогащение)
Хранение ОТВС	Низкая	В/Н(МАГАТЭ)	В/Н(обогащение)
Переработка ОЯТ	Высокая	В/Н(МАГАТЭ)	Высокий
Захоронение РАО	Низкая	Низкая	Низкий

*В/Н(МАГАТЭ) – от высокого до низкого в зависимости от наличия контроля со стороны МАГАТЭ.

Различные типы ядерных реакторов также обладают разной привлекательностью для хищения ЯМ. Рассмотрим две характеристики ядерных реакторов, влияющие на их привлекательность (табл. 2.2):

- 1) количество и качество загружаемого ядерного топлива;
- 2) количество и качество производимого ядерного топлива.

Таблица 2.2

Загружаемое и производимое топливо ядерных реакторов

Тип реактора	Загружаемое топливо	Наработанное топливо, кг/ГВт·год	Примечание
ИРТ	5–10 кг (90 % ^{235}U)	–	Малая мощность
HTGR–770	8,1 т ^{232}Th 0,7 т ^{235}U (93 %)	200	–
ВВЭР–1000	100 т UO_2 (3–5 % ^{235}U)	200	–
РБМК–1000	150–180 т UO_2 (1,8–2 % ^{235}U)	250	Непрерывные перегрузки
CANDU–600	100 т UO_2 (0,7 % ^{235}U)	350	Непрерывные перегрузки
LMFBR–1000	10–15 т UO_2 (15–25 % ^{235}U)	1500–ОТЦ 250–ЗТЦ	–

1. Исследовательские реакторы

В ряде исследовательских реакторов до сих пор используется высокообогащенное урановое топливо. Однако тепловая мощность таких реакторов невелика (несколько мегаватт). Поэтому количество ^{235}U в них не превышает 5–10 кг.

По решению МАГАТЭ в настоящее время исследовательские реакторы переводятся на среднеобогащенное топливо с содержанием ^{235}U не более 20 %. Критмасса такого урана составляет 830 кг.

Вторичное топливо в исследовательских реакторах не производится из-за малого количества воспроизводящего материала и низких потоков нейтронов.

2. Высокотемпературные реакторы с газовым охлаждением

В них используется высокообогащенное дисперсное урановое топливо (93 % ^{235}U) и торий в качестве воспроизводящего материала. Топливные микрочастицы в оболочках из пиролитического углерода и карбида кремния диспергируются в графитовой матрице с последующей фабрикацией шаровых или стержневых твэлов.

Начальная загрузка реактора типа HTGR мощностью 770 МВт(э) состоит из 8,1 т ^{232}Th в виде ThO_2 и 0,7 т ^{235}U в виде UC . В конце облучения в реакторе находится: 7,5 т ^{232}Th , 40 кг ^{235}U и около 180 кг ^{233}U , т.е. реакторы HTGR производят ~ 200 кг ^{233}U /ГВт(э)·год.

3. Легководные реакторы

Корпусные реакторы (PWR, BWR, ВВЭР). Реакторы этого типа (вода – и замедлитель и теплоноситель) используют низкообогащенное (3–5 % ^{235}U) урановое оксидное топливо. Начальная загрузка реактора мощностью 1 ГВт(э) – примерно 100 т UO_2 . В реакторе нарабатывается примерно 200 кг плутония на ГВт(э)-год.

Канальные реакторы (РБМК). Реакторы типа РБМК (графитовый замедлитель и легкая вода как теплоноситель) используют низкообогащенное (1,8–2 % ^{235}U) урановое оксидное топливо. Начальная загрузка реактора мощностью 1 ГВт(э) – примерно 150–180 т UO_2 . В нем производится примерно 250 кг плутония на ГВт(э)-год.

Опасность реакторов типа РБМК с точки зрения нераспространения обусловлена возможностью поканальных перегрузок топлива без остановки реакторов.

4. Тяжеловодные реакторы типа CANDU

Реакторы типа CANDU используют природный уран в качестве топлива. Начальная загрузка реактора мощностью 1 ГВт(э) – примерно 100 т UO_2 . Ежегодная наработка плутония – 350 кг/ГВт(э)-год.

В реакторах CANDU реализован режим непрерывных перегрузок топлива без остановки реактора. Это может представлять определенные трудности для инспекционных органов, контролирующих использование первичного и накопление вторичного ядерного топлива.

5. Быстрые реакторы–размножители

Быстрые реакторы используют среднеобогащенное урановое оксидное топливо (15–25 % ^{235}U). Загрузка реактора мощностью 1 ГВт(э) составляет 10–15 т, т.е. в реакторе находится 2–3 т ^{235}U . Нарработка плутония составляет около 1500 кг/(ГВт(э)-год) в открытом топливном цикле. При замыкании топливного цикла около 80 % плутония будет рециклировано, и «чистая» наработка плутония составит примерно 250 кг/(ГВт(э)-год).

Добыча и первичная обработка природных ЯМ

Из-за высокой химической активности урана и тория они встречаются в природе только в виде химических соединений. Всего обнаружено около 200 урановых и ториевых минералов.

Известно сравнительно мало богатых месторождений урановых руд. Общие запасы урана в земной коре оцениваются в 10^{14} т. В во-

дах морей и океанов находится около $4 \cdot 10^9$ т урана (в среднем 3,3 мг/м³).

Урановые руды различаются по содержанию в них урана:

очень богатые руды – больше 1 % урана;

богатые руды: 0,5–1 % урана;

средние руды: 0,25–0,5 % урана;

рядовые руды: 0,09–0,25 % урана;

бедные руды: менее 0,09 % урана.

В среднем добываются руды с содержанием около 0,1 % урана, т.е. бедные и рядовые руды.

Запасы урана оцениваются по двум стоимостным категориям:

дешевый уран – менее 80 долларов за 1 кг U_3O_8 ;

дорогой уран – более 80 долларов за 1 кг U_3O_8 .

Пороговая цифра (80 долларов за 1 кг U_3O_8) была принята в то время, когда она разграничивала области конкурентоспособности АЭС и угольных ТЭС.

Более 80 % достоверных и вероятных запасов урана приходится на 8 стран мира, расположенных в Америке (США, Канада, Бразилия), Австралии и Африке (ЮАР, Нигер, Ангола, Намибия). Две страны (Канада и Австралия) производят более 50 % урана в мире. В странах СНГ сосредоточено примерно 15 % мировых запасов. Годовая добыча урана не покрывает потребности мировой ядерной энергетики. Дефицит покрывается из других источников (запасы, переработка отходов, рецикл).

Известны четыре способа добычи урана:

- подземная (шахтная) добыча;
- открытая (карьерная) добыча;
- подземное выщелачивание;
- добыча из морской воды.

После добычи руды осуществляется ее гидрометаллургическая переработка. Извлечение урана основано на хорошей растворимости оксидов урана в кислотных и щелочных растворах.

В результате гидрометаллургической переработки урановой руды получается сухой концентрат оксидов урана (в основном, U_3O_8). В концентрате находится весь уран, содержащийся в руде, и примеси (95–96 % – урановые оксиды, 4–5 % – примеси). Необходима очистка концентрата от этих примесей, главным образом от сильных поглотителей нейтронов: В, Cd, Hf, редкоземельных элементов (Eu, Gd, Sm).

Следующий этап – очистка уранового концентрата с помощью аффинажных процессов.

Наиболее развит экстракционный аффинаж с применением трибутилфосфата (ТБФ) как экстрагента. Плотность ТБФ (0.973 г/см³) чуть меньше плотности воды. Для снижения вязкости ТБФ растворяют в нейтральных органических соединениях. Важное свойство ТБФ – способность селективно экстрагировать соединения урана. ТБФ экстрагирует уранил–нитрат $\text{UO}_2(\text{NO}_3)_2$ из смеси в 10^4 раз более эффективно, чем примеси.

Изотопное обогащение урана

Ядерная энергетика базируется на обогащенном уране, в котором делящегося изотопа ^{235}U больше, чем в природном.

Рассмотрим принципиальную схему обогащения урана. В качестве исходного материала используется природный уран: его количество – F , обогащение по ^{235}U – X_F . В результате получают два материала: 1) уран, обогащенный изотопом ^{235}U (продукт), его количество – P , обогащение по ^{235}U – X_P ; 2) уран, обедненный изотопом ^{235}U (отвал): его количество – W , обогащение по ^{235}U – X_W .

Баланс ЯМ при этом описывается двумя уравнениями:

баланс массы урана: $F = P + W$;

баланс массы изотопа ^{235}U : $X_F \cdot F = X_P \cdot P + X_W \cdot W$.

Два уравнения с тремя неизвестными (F , P , W) могут быть преобразованы в два уравнения с двумя неизвестными (F/P , W/P):

$$\begin{aligned} F/P &= 1 + W/P; \\ X_F \cdot F/P &= X_P + X_W \cdot W/P. \end{aligned}$$

Решая эту систему, можно найти:

а) коэффициент расхода природного урана на единицу продукта

$$F/P = (X_P - X_W)/(X_F - X_W);$$

б) коэффициент образования отвалов на единицу продукта

$$W/P = (X_P - X_F)/(X_F - X_W);$$

в) коэффициент деления потока природного урана θ :

$$\begin{aligned} F &= P + W = \theta \cdot F + (1 - \theta) \cdot F; \\ \theta &= P/F = (X_F - X_W)/(X_P - X_W). \end{aligned}$$

Введем понятие относительной концентрации изотопа ^{235}U в бинарной смеси (^{235}U , ^{238}U): на входе $R = X_F / (1 - X_F)$; на выходе продукта $R' = X_P / (1 - X_P)$; на выходе отвала $R'' = X_W / (1 - X_W)$. Тогда: коэффициент разделения по обогащенной фракции:

$$\alpha = R' / R = [X_P / (1 - X_P)] / [X_F / (1 - X_F)];$$

коэффициент разделения по обедненной фракции:

$$\beta = R / R'' = [X_F / (1 - X_F)] / [X_W / (1 - X_W)];$$

коэффициент обогащения: $\varepsilon' = \alpha - 1$;

коэффициент обеднения: $\varepsilon'' = \beta - 1$;

коэффициент полного обогащения на одной ступени:

$$\varepsilon = \varepsilon' + \varepsilon''.$$

В табл. 2.3 приведены данные, характеризующие обогатительные технологии по коэффициенту разделения и по энергоемкости.

Таблица 2.3

**Коэффициенты разделения и энергоемкости
обогатительных технологий**

Обогатительные технологии	Коэффициент разделения α	Энергоемкость, кВтч/ЕРР
Электромагнитное разделение	Нет данных	4000
Газовая диффузия	1,0043	2300–2600
Газовое центрифугирование	1,25	100–300
Разделительное сопло	1,025	3000–3500
Лазерные методы	3–15	10–50
Химические методы	1,0025	400–700

В настоящее время наиболее распространенными методами, применяемыми в промышленных масштабах в ЯТЦ, являются газовая диффузия и газовое центрифугирование. Оба метода используют разницу в массах молекул газовых соединений урана (UF_6).

При обогащении урана в качестве исходного материала часто используют газообразный гексафторид урана UF_6 . Это соединение обладает целым рядом привлекательных свойств:

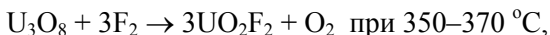
природный фтор содержит только один стабильный изотоп ^{19}F ;

гексафторид урана может находиться в твердом, жидком и газообразном состоянии при умеренных температурах и давлениях;

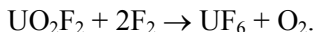
гексафторид урана может переходить из твердого состояния в газообразное, минуя жидкую фазу, и обратно.

Но у гексафторида урана есть и недостатки: высокая химическая активность. Гексафторид урана взаимодействует с воздухом, с парами воды, образуя тетрафторид урана UF_4 (порошок), осаждающийся в технологических контурах. Отсюда, необходимость герметичности контуров и контейнеров, их обезвоженности и обезжиренности. В контакте с UF_6 устойчивы Ni, Al, Mg, Cu и их сплавы, тефлон.

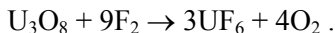
Конверсия оксидов урана в гексафторид урана. Для изотопного обогащения урановый концентрат U_3O_8 необходимо превратить в гексафторид урана UF_6 . Это осуществляется с помощью двухстадийного процесса. Сначала в реакции с газообразным фтором получают уранил-фторид UO_2F_2 :



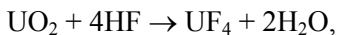
а затем гексафторид урана образуется в результате реакции уранил-фторида с фтором при пониженной температуре ($\sim 270\text{ }^\circ\text{C}$):



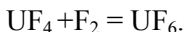
Одностадийный процесс (пламенный метод прямого фторирования) может осуществляться только в избытке фтора и при существенно более высокой температуре ($900\text{--}1000\text{ }^\circ\text{C}$):



Для производства гексафторида урана из диоксида UO_2 применяется другой двухстадийный процесс. На первом этапе диоксид урана UO_2 взаимодействует с плавиковой кислотой HF при температуре $500\text{--}600\text{ }^\circ\text{C}$ с образованием тетрафторида урана UF_4 :



а затем тетрафторид урана UF_4 реагирует с фтором при $400\text{ }^\circ\text{C}$:



1. Обогащение урана методом газовой диффузии (ГД)

Обогатительная ГД–технология основана на разных скоростях теплового движения тяжелых и легких молекул, на способности более легких молекул легче проходить через тонкие пористые перегородки.

В смеси двух газов, имеющих одинаковую температуру, средняя кинетическая энергия легких и тяжелых молекул одинакова:

$$m_{\text{Л}} \cdot V_{\text{Л}}^2 = m_{\text{Т}} \cdot V_{\text{Т}}^2 ,$$

а средняя скорость легких молекул выше, чем тяжелых:

$$V_{\text{Л}} = V_{\text{Т}} \cdot (m_{\text{Т}}/m_{\text{Л}})^{1/2} .$$

Идеальный коэффициент разделения α_0 смеси двух газов, диффундирующих через пористую перегородку:

$$\alpha_0 = (m_{\text{Т}}/m_{\text{Л}})^{1/2} \approx 1 + \Delta m/2m_{\text{Л}} .$$

Для гексафторидов урана $^{235}\text{UF}_6$ и $^{238}\text{UF}_6$ ($m_{\text{Л}} = 349$, $m_{\text{Т}} = 352$) коэффициент разделения α_0 и коэффициент обогащения ε_0 равны:

$$\alpha_0 = 1,0043; \varepsilon_0 = \alpha_0 - 1 = 0,0043 .$$

Длина свободного пробега молекул должна быть больше характерного размера пор, чтобы основными были взаимодействия молекул с порами в перегородке, а не друг с другом. Длина свободного пробега молекул обратно пропорциональна давлению. Для UF_6 длина свободного пробега при 1 атм. равна 1 мкм, при 1 мм рт.ст. – 700 мкм. Изготовление перегородок с микронными порами достаточно сложная задача. Это приводит к необходимости работать при пониженном давлении.

Перегородки должны быть:

тонкими (доли миллиметра);

прочными (противостоять перепаду давления $\sim 0,3$ атм.);

коррозионно–стойкими в атмосфере UF_6 .

Перегородки с микронными порами изготавливаются из:
 спеченных порошков окиси алюминия и никеля;
 спеченного никелевого порошка;
 алюминия с порами, полученными электрическим травлением;
 тефлона.

Коэффициент ГД-обогащения урана на одной ступени невелик (1,0043), поэтому необходимо многократное пропускание газового потока через многие обогатительные ступени. Последовательное соединение газодиффузионных ступеней образует каскад.

2. Обогащение урана в газовых центрифугах (ГЦ)

Пусть в трубе, вращающейся с угловой скоростью ω , находится смесь газов с молекулярными весами M_1 и M_2 . На их молекулы действуют центробежные силы, пропорциональные массе и радиусу:

$$F_{1,2} = M_{1,2} \cdot \omega^2 \cdot r.$$

Давление газа сильно нарастает от центра к периферии:

$$P_{1,2} = P_0 \cdot \exp(M_{1,2} \cdot \omega^2 \cdot r^2 / 2RT) \sim \exp(a \cdot V^2).$$

Тяжелая фракция испытывает большее давление и оттесняется на периферию ГЦ, а легкая фракция собирается в ее центральной части.

Коэффициент разделения в ГЦ:

$$\alpha = \exp(\Delta M \cdot \omega^2 \cdot r_0^2 / 2RT) = \exp(\Delta M \cdot V(r_0)^2 / 2RT);$$

$$\varepsilon = \alpha - 1 \approx \Delta M \cdot V(r_0)^2 / 2RT.$$

По расчетным оценкам в газовой центрифуге можно получить коэффициенты обогащения в зависимости от скорости вращения:

$$\varepsilon = 0,068 \text{ при } V = 330 \text{ м/с};$$

$$\varepsilon = 0,098 \text{ при } V = 400 \text{ м/с};$$

$$\varepsilon = 0,152 \text{ при } V = 500 \text{ м/с}.$$

Центрифуги изготавливаются из следующих материалов:

алюминиевые сплавы (при скоростях $V \leq 350$ м/с);
титановые сплавы (при скоростях $V \leq 450$ м/с);
легированные стали (при скоростях $V \leq 500$ м/с);
стеклопластики, армированные графитом (при $V = 500\text{--}700$ м/с).

3. Метод разделительного сопла

Метод основан на различном поведении изотопов урана в поле центробежных сил. Гексафторид урана подается в сильно искривленное сопло, где под действием центробежных сил происходит пространственное разделение легких и тяжелых изотопов.

Метод разделительного сопла выгодно отличается от ГЦ отсутствием вращающихся узлов, но требует точной механической сборки из-за малых размеров разделяющих щелей (доли миллиметра). Коэффициент обогащения урана в разделительном сопле $\varepsilon' = 0,025$.

4. Лазерные методы разделения

Лазерные методы обогащения урана основаны на различии в схемах возбужденных уровней электронов в атомах ^{238}U и ^{235}U . Это различие используется с помощью монохроматического лазера. Возбуждение электронных оболочек приводит к селективному усилению физических или химических процессов (усиленная ионизация возбужденных атомов или усиленная диссоциация возбужденных молекул). Условия лазерного обогащения:

1. Наличие возбужденного уровня электронов, характерного только для одного изотопа. Этот уровень должен быть достаточно удален от других линий спектра и от линий других изотопов.
2. Наличие лазера, настраиваемого на нужную частоту излучения.
3. Наличие процессов, отделяющих возбужденные атомы и молекулы.

Лазерное обогащение паров урана. Лазерное обогащение паров урана состоит из следующих этапов:

испарение атомов урана в вакууме (электронный пучок выбивает пары урана из сплава U-Re);

облучение ксеноновым лазером; происходит селективное возбуждение атомов ^{235}U ;

облучение криптоновым лазером; происходит селективная ионизация возбужденных атомов ^{235}U ;

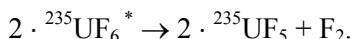
сбор ионизированных атомов ^{235}U на заряженной пластине.

Лазерное обогащение молекул UF_6 . Лазерное обогащение UF_6 состоит из трех стадий:

охлаждение смеси $\text{UF}_6 + \text{H}_2$ до 30 К, чтобы молекулы UF_6 находились в основном невозбужденном состоянии;

облучение инфракрасным лазером; происходит селективное возбуждение молекул $^{235}\text{UF}_6$;

облучение ультрафиолетовым лазером; происходит селективная диссоциация возбужденных молекул:

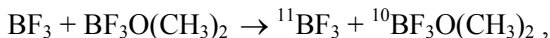


Из газовой смеси выпадает белый порошок $^{235}\text{UF}_5$ («лазерный снег»).

Коэффициент обогащения лазерных методов очень высок – от 3 до 15. Лазерные методы позволяют использовать отвалы ГД-заводов (содержание урана – 0,2–0,3 %) для производства урана, пригодного для энергетических легководных реакторов.

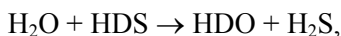
5. Химические методы обогащения урана

Химические методы основаны на разной устойчивости изотопов в соединениях. При контакте разновалентных химических соединений одного элемента происходит изотопный обмен. Например, бор может быть обогащен изотопом ^{10}B через реакцию изотопного обмена:



при которой ^{10}B накапливается в органической фазе.

Производство тяжелой воды основано на реакции изотопного обмена между легкой водой и сероводородом:



при которой дейтерий постепенно накапливается в водной фазе.

В США и Японии разрабатывается технология обогащения урана, использующая UF_6 и NOUF_6 в качестве контактирующих соеди-

нений. Это окислительно–восстановительная хроматография, осуществляемая чередованием окислительных (введение газообразного кислорода) и восстановительных реакций (введение газообразного водорода). Удастся разделить соединения с ионами UO_2^{++} (6–валентный ^{235}U) и U^{4+} (4–валентный ^{238}U). В экспериментах получены коэффициенты разделения до 1,08 и энергоемкости до 150 кВтч/ЕРР.

6. Плазменный метод

Метод основан на эффекте ионного циклотронного резонанса.

На заряженные частицы (ионы),двигающиеся в постоянном магнитном поле, действует сила

$$F = q \cdot [V \times B],$$

заставляющая их вращаться по спирали вокруг силовых линий магнитного поля. Радиус орбиты определяется из уравнения:

$$F = q \cdot V \cdot B = mV^2/R ; \\ R = m \cdot V / (q \cdot B) = (2m \cdot E)^{1/2} / (q \cdot B),$$

а частота вращения $\omega = V/R = q \cdot B/m$ – это ионная циклотронная частота (ИЦЧ).

Если приложить переменное электрическое поле с частотой, равной ИЦЧ данного изотопа, то только этот изотоп будет поглощать энергию поля. Повышение энергии ионов определенного изотопа увеличит радиус его вращения вокруг силовых линий магнитного поля. Создастся возможность пространственного разделения ионов разных изотопов и собирания ионов ^{235}U и ^{238}U селективно на соответствующим образом расположенных коллекторах.

Анализ технологий обогащения урана с точки зрения нераспространения ядерного оружия

Газовая диффузия:

- а) техническая сложность процесса;
- б) высокая энергоемкость (2300–2600 кВтч/ЕРР); в США один ГД–завод потребляет около 5 ГВт электрической мощности;

- в) сравнительно низкий коэффициент обогащения ($\epsilon' = 0,0043$);
г) маловероятно тайное создание ГД–производства.

Газовая центрифуга:

- а) техническая сложность процесса;
б) малая энергоемкость (100–300 кВтч/ЕРР) и высокий коэффициент обогащения ($\epsilon' = 0,2\text{--}0,3$) делают эту технологию опасной с точки зрения нераспространения ядерного оружия.

Разделительное сопло:

- а) менее сложный метод, чем ГД- и ГЦ-технологии;
б) низкий коэффициент обогащения ($\epsilon' = 0,025$) и большая энергоемкость (3000 кВтч/ЕРР) определяют меньшую опасность технологии разделительного сопла для режима нераспространения по сравнению с ГД- и ГЦ-методами.

Лазерные методы:

- а) рекордно высокий коэффициент обогащения ($\epsilon' = 3\text{--}15$) и рекордно низкая энергоемкость (10–50 кВтч/ЕРР);
б) наиболее сложная технология. Наиболее перспективная и наиболее опасная технология с точки зрения нераспространения ЯО.

Технологии изготовления твэлов и ТВС

Двуокись урана – наиболее распространенный и промышленно освоенный вид ядерного топлива для тепловых и быстрых реакторов.

Достоинства двуокиси урана:

- высокая температура плавления (2780 °С);
химическая устойчивость к основным теплоносителям (легкая и тяжелая вода, натрий, углекислый газ);
хорошая совместимость с материалами оболочек (нержавеющие стали, циркониевые сплавы) при рабочих температурах;
возможность изготовления таблеток высокой плотности;
приемлемая радиационная стойкость при нейтронных потоках ($\sim 10^{14}$ н/см²·с) и флюенсах ($\sim 10^{22}$ н/см², т.е. в течение 3 лет);
изотропность кристаллической решетки, что облегчает процесс высокотемпературного спекания.

Недостатки двуокиси урана:

- малая теплопроводность, резко уменьшающаяся с повышением температуры. Из-за этого в таблетках наблюдаются резкие перепады температур от центра к периферии ($\Delta T \sim 1000\text{--}1500$ °С);
легкая окисляемость на воздухе. Требуется инертная сухая атмосфера или вакуум. Иначе, происходит насыщение таблетки влагой и

адсорбция кислорода в поверхностном слое. Влага с поверхности таблетки может вызвать гидрирование оболочки и разрушение твэла; наличие кислорода смягчает нейтронный спектр быстрого реактора и снижает коэффициент воспроизводства.

Стадии производства таблеток двуокиси урана

1. Конверсия гексафторида урана в двуокись:

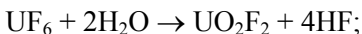
а) «Мокрая» технология АУК–процесса:

пропускание гексафторида урана через водный раствор карбоната аммония $(\text{NH}_4)_2\text{CO}_3$. Образуется твердый нерастворимый осадок аммоний–уранил–карбоната (АУК) – $(\text{NH}_4)_4\text{UO}_2(\text{CO}_3)_3$;

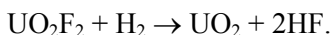
термообработка АУК при 550–650°C. Происходит термическое разложение АУК с образованием тонкодисперсного порошка UO_2 .

б) «Сухая» технология:

гидролиз гексафторида урана водяным паром при температуре 150–300°C. В результате образуется уранил–фторид UO_2F_2 :



пирогидролиз UO_2F_2 водяным паром и водородом при температуре $t \sim 550^\circ\text{C}$. В результате образуется тонкодисперсный порошок UO_2 и плавиковая кислота HF :



Полученный тонкодисперсный порошок UO_2 непригоден для прессования из–за очень малых размеров частиц (менее 0,6 мкм). Для того чтобы укрупнить порошок, производят следующие операции:

2. Смешивание с пластифицирующими добавками.

3. Гидропрессование: засыпка в каучуковую форму, помещение в контейнер с жидкостью, создание в контейнере высокого давления – равномерное обжатие, получение брикетов.

4. Гранулирование путем размола брикетов.

5. Отжиг для удаления пластификаторов.

6. Холодное прессование в таблетки.

7. Спекание таблеток.

8. Контроль качества таблеток и отбраковка по размерам, по содержанию углерода (пластификаторы), по стехиометричности.

Рассмотрим технологию изготовления смешанного оксидного топлива. Возможны три комбинации смешанного оксидного топлива:

$\text{PuO}_2 + {}^{238}\text{UO}_2$, где плутоний взят из оружейных ЯМ;

$\text{PuO}_2 + {}^{238}\text{UO}_2$, где плутоний получен в процессе переработки ОЯТ;

${}^{235}\text{UO}_2 + {}^{238}\text{UO}_2$, где ${}^{235}\text{U}$ взят из оружейных ЯМ.

Изготовление смешанного оксидного топлива предполагает наличие двух исходных материалов:

порошок ${}^{238}\text{UO}_2$ из обедненного или природного урана;

порошок PuO_2 из оружейного или реакторного плутония, или порошок ${}^{235}\text{UO}_2$ из оружейного урана.

Гомогенность смеси (Pu , ${}^{238}\text{U}$) или (${}^{235}\text{U}$, ${}^{238}\text{U}$) не гарантирована. Смешение порошков из различных источников – единственная стадия, отличающая технологию изготовления MOX–топлива от технологии изготовления уранового оксидного топлива. Гомогенность смеси важна для безопасности реактора. При повышении мощности сначала разогреваются делящиеся изотопы. Происходит доплеровское уширение захватных и делительных резонансов с суммарным положительным реактивным эффектом. Воспроизводящий изотоп нагревается с опозданием во времени и с отрицательным доплеровским эффектом реактивности. Временная задержка тем короче, чем выше гомогенность смеси. При плохом перемешивании положительный эффект реактивности делящихся изотопов может поднять мощность до неприемлемо высокого уровня, пока сработает стабилизирующий отрицательный реактивный эффект воспроизводящего изотопа.

Технологические стадии изготовления твэлов и ТВС

1. Подготовка ядерного топлива (конверсия UF_6 в UO_2 ; приготовление порошков; гранулирование и спекание таблеток).

2. Подготовка трубчатых оболочек твэлов и концевиков.

3. Подготовка комплектующих деталей для сборки ТВС.

4. Снаряжение твэлов: упаковка таблеток в оболочечные трубы; установка концевиков; заполнение гелием; герметизация концевиков; контроль качества твэла.

5. Сборка твэлов в ТВС, контроль качества, стендовые испытания. Изготовление твэлов и ТВС является:

высокоточным производством;

массовым и автоматизированным производством;

важным объектом физической защиты, учета и контроля ЯМ.

Для изготовления активной зоны необходимы сотни тысяч комплектующих деталей, миллионы топливных таблеток.

Технологии использования топлива в ядерных реакторах

Перед началом работы реактор является надкритическим, но запас реактивности подавлен органами регулирования (поглощающие стержни, борная кислота в теплоносителе, выгорающие поглотители в топливе). В результате выгорания топлива и накопления ПД реактор становится подкритичным ($K_{эфф} < 1$). Для продолжения работы реактора нужно снова поднять $K_{эфф}$ выше единицы. Первая и основная цель перегрузок – восстановление запаса реактивности.

Вторая цель перегрузок – равномерное энерговыделение для максимальной энерговыработки и равномерного выгорания топлива.

Возможные варианты для достижения этих целей:

полная или частичная замена выгоревшего топлива свежим;
перестановки ТВС с разным выгоранием в активной зоне;
комбинация двух первых способов.

Варианты перегрузок топлива ядерных реакторов:

Циклическая перегрузка – равномерное распределение топлива и его полная замена после исчерпания запаса реактивности.

Недостатки:

неравномерное поле энерговыделения в реакторе;
быстрое выгорание центральной части загрузки при сохранении реактивностного потенциала топлива на периферии реактора.

Частичная циклическая перегрузка

Из реактора выгружаются только ТВС, достигшие предельного выгорания, и заменяются на свежие. Активная зона разбивается на ряд концентрических зон. При очередной перегрузке выгоревшие ТВС заменяются на свежие в очередной зоне, от центра к периферии.

Преимущество – одинаковое выгорание выгружаемого топлива.

Недостаток – свежее топливо лишь постепенно смещается к периферии. Это повышает тепловыделение в центральных зонах и ухудшает равномерность поля тепловыделения.

Рассеянная перегрузка

Активная зона разбивается на группы ТВС одинакового количества. Например, по четыре ТВС в каждой группе. При первой перегрузке только ТВС с номером 1 заменяются на свежие. При второй перегрузке та же процедура осуществляется с ТВС номер 1 и 2 и т.д. Свежие ТВС равномерно распределяется по активной зоне. Это снижает неравномерность поля тепловыделения.

Перегрузки «от периферии к центру»

Активная зона разбивается на ряд концентрических областей с одинаковым количеством ТВС. При первой перегрузке выгружаются наиболее выгоревшие ТВС центральной подзоны. На их место перемещаются ТВС второй подзоны, место перемещенных ТВС второй подзоны занимают ТВС третьей подзоны и т.д. В освободившуюся последнюю подзону загружаются свежие ТВС.

В итоге в центре концентрируются ТВС с большим выгоранием, т.е. менее реактивные, чем ТВС периферии. Имеет место депрессия тепловыделения в центре и снижение эффективности органов регулирования реактора.

Модифицированная рассеянная перегрузка

Этот способ перегрузки предполагает:

1. Выделение на периферии активной зоны кольцевого слоя ТВС, содержащего, например, 1/5 часть всех ТВС реактора.
2. Разбиение ТВС центральной части на локальные группы, по четыре ТВС в каждой.
3. Во время первой перегрузки из каждой группы удаляются ТВС с номером 1, на их место загружаются ТВС из внешнего кольцевого слоя. Освободившийся внешний слой загружается свежими ТВС.

Преимуществом таких перегрузок является равномерное распределение тепловыделения без всплеска в центре, характерного для «частичной циклической» перегрузки и без депрессии в центре, характерной для перегрузки «от периферии к центру».

Технологии проведения перегрузок

Перегрузка топлива может осуществляться:

- после останова и расхолаживания реактора, со съемом крышки;
- после останова, но без расхолаживания и съема крышки;
- при пониженной мощности или на полной мощности.

В легководных реакторах используется схема с полным остановом. Раз в год реактор останавливается на 4–6 недель, крышка снимается, облученные ТВС выгружаются, производятся перестановки оставшихся ТВС, загружается свежее топливо. Все операции осуществляются под слоем воды.

В быстрых реакторах с жидкометаллическим теплоносителем топливо перегружается без съема крышки после останова реактора. Используется поворотная крышка с перегрузочным механизмом.

Две эксцентрически вращающиеся системы наводят механизм на нужную ТВС, позволяют захватить ее верхний концевик и переставить во внутриреакторное хранилище на периферии активной зоны. Там ТВС временно хранятся, а затем более простым механизмом удаляются из реактора без его останова.

Тяжеловодные реакторы типа CANDU могут перегружаться на ходу без останова реактора и снижения мощности. ТВС размещаются в горизонтальных каналах. При перегрузках применяется принцип «шлюза». На каждой стороне реактора располагается перегрузочная машина. Каждая машина имеет ствол, которые подсоединяются к топливному каналу с разных сторон, открываются пробки канала, давление в машинах и в канале выравнивается, производится перегрузка ТВС, и канал снова закрывается. Одна из машин вводит свежую ТВС, другая принимает выталкиваемую ТВС с другого конца.

Реакторы типа РБМК также непрерывно перегружаются на мощности. Используется специальная разгрузочно-загрузочная машина (РЗМ) и принцип «шлюза», как и в реакторах CANDU:

- РЗМ, заполненная конденсатом, стыкуется с каналом;
- в скафандре РЗМ устанавливается давление, как в канале;
- канал разгерметизируется, и туда подается холодный конденсат;
- производится захват и извлечение отработавшей ТВС;
- проходимость канала проверяется имитатором ТВС;
- свежая ТВС устанавливается в канал;
- канал герметизируется, давление в РЗМ уменьшается, РЗМ и канал расстыковываются.

Реакторы, допускающие перегрузки без снижения мощности и разгерметизации реактора, т.е. тяжеловодные реакторы типа CANDU и водографитовые реакторы типа РБМК, представляют наибольшую опасность для режима нераспространения ядерного оружия.

Удаленные ТВС временно (3–10 лет) хранятся в водном бассейне на АЭС для снижения активности и остаточного тепловыделения.

Бассейны для хранения ОЯТ имеют следующие системы:

- систему охлаждения воды;
- ионообменную установку для удаления радиоактивных веществ и общей очистки воды бассейна;
- вентиляционную систему для пропускания воздуха через фильтры и сброса газовых отходов в атмосферу.

Транспортировка облученного ядерного топлива

Облученные ТВС перевозятся в специальных контейнерах железнодорожным, автомобильным и водным транспортом. Контейнеры для перевозок ТВС имеют массу 80–110 т, доля ТВС составляет лишь 2–5 %. Остальное – системы безопасности.

Транспортный контейнер представляет собой:

1. Крупный полый толстостенный цилиндр (диаметр ~ 2 м; высота ~ 4–6 м, толщина стенки ~ 40 см). Ориентирован горизонтально или вертикально, изготовлен из стали, чугуна или бетона.
2. Внутренняя поверхность облицована нержавеющей сталью для усиления коррозионной стойкости. Во внутреннюю облицовку контейнера могут включаться слои замедлителя нейтронов.
3. Внешняя поверхность контейнера снабжена специальным ребрением для увеличения поверхности теплоотвода.
4. Во внутренней полости расположены металлические стеллажи для размещения ТВС. При транспортировке полость заполнена теплоносителем, отводящим тепло в режиме естественной конвекции или принудительной циркуляции.
5. Контейнер герметизируется крышками с усиленным уплотнением.
6. Контейнеры оснащены системой контроля параметров внутренней полости (активность, тепловыделение, температура, давление) и аварийной системой дезактивации.

Технологии переработки облученного ядерного топлива

Цели переработки ОЯТ:

- 1) выделение плутония и урана для повторного использования;
- 2) отделение продуктов деления (ПД) и трансурановых элементов как отходов.

В мире производится примерно 7000 т ОЯТ в год. Существующие установки могут переработать около 5100 т ОЯТ в год.

Классификация методов переработки ОЯТ

1. Водные («мокрые») методы переработки:
экстракционные технологии, основанные на извлечении урана и плутония из растворов органическими соединениями;

осадительные технологии, основанные на выпадении из растворов плохорастворимых соединений урана и плутония.

2. Неводные («сухие») методы переработки:

пирохимические процессы, например, газотфторидная технология, основанная на разной летучести и сорбционной способности фторидов урана, плутония и ПД;

пирометаллургические процессы, например, электрорафинирование, основанное на различии в переносе урана, плутония и ПД в расплавах металлов и солей.

Переработка облученного ядерного топлива производится на основе одной из указанных технологий на специальном предприятии – радиохимическом заводе (РХЗ). Наиболее развиты и промышленно освоены водные экстракционные технологии.

Основные стадии водной экстракционной технологии переработки ОЯТ (технология PUREX)

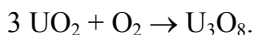
Разборка ТВС и резка твэлов.

1. Расчехловка ТВС (обрезка концевиков, разрезка чехлов дисковыми пилами, разборка решетки твэлов).

2. Резка твэлов, например, гильотинными ножницами или лазерами в инертной атмосфере (азот или аргон).

Предварительное окисление ОЯТ (волоксидация).

Волоксидация ОЯТ осуществляется в кислороде при повышенной температуре. Диоксид урана UO_2 переходит в октаоксид урана U_3O_8 :



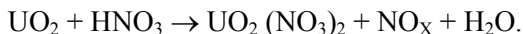
Это приводит к следующим эффектам:

разуплотнение топлива. Плотности UO_2 и U_3O_8 существенно различаются: $\gamma(\text{UO}_2) = 11 \text{ г/см}^3$, $\gamma(\text{U}_3\text{O}_8) = 8,3 \text{ г/см}^3$. Объем топлива увеличивается на 30 %, т.е. оно становится пористым и разрыхленным;

изменение кристаллической решетки;

интенсивный выход газовых ПД и трития.

Растворение ОЯТ. Растворение ОЯТ происходит в кипящей азотной кислоте HNO_3 :



Циркониевые и стальные оболочки твэлов не растворяются. Они удаляются из раствора и обрабатываются как твердые РАО.

Подготовка раствора ОЯТ к экстракции происходит по следующим этапам.

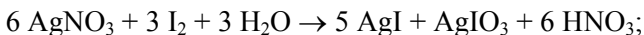
1. Осветление раствора:

фильтрация через металлокерамику или пористый полипропилен;

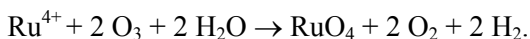
центрифугирование с добавлением коагулянтов.

2. Удаление из растворов летучих и газообразных ПД:

барботаж раствора воздухом для удаления йода в виде ионов I_2 , IO_3^- . Затем йод удаляется фильтрами с нитратом серебра $AgNO_3$:



барботаж раствора озоном для удаления рутения Ru^{4+} :



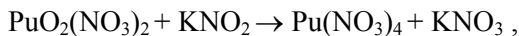
Летучая окись рутения RuO_4 удаляется из газов реакцией с $NaOH$;

удаление инертных газов Kr и Xe барботажем с сорбцией газов на цеолите или активированном угле при низких температурах.

Экстракция – это разделение вещества между двумя несмешивающимися фракциями: легкая органическая фракция (ТБФ + разбавитель) и тяжелая водная фракция (кислотный раствор ОЯТ). Существенный недостаток экстракции – радиоллиз органических экстрагентов, т.е. разложение под действием излучения.

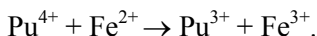
Отделение плутония от урана. Плутоний, содержащийся в растворе ОЯТ, находится в 3-, 4- и 6-валентном состояниях. Разделение урана от плутония основано на том, что U^{6+} , Pu^{6+} и Pu^{4+} хорошо растворимы как в водной фазе, так и в органической, а Pu^{3+} плохо растворим в органической фазе. При восстановлении плутония до 3-валентного состояния он полностью переходит в водный раствор и выводится из процесса, а уран остается в органической фазе.

При отделении плутония от урана 6-валентный плутоний восстанавливают сначала до 4-валентного состояния, а затем и до 3-валентного. Плутоний из 6-валентного переводится в 4-валентный с помощью реакции с нитритом калия KNO_2 :

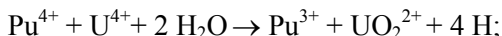


т.е. Pu^{6+} становится Pu^{4+} . Затем Pu^{4+} восстанавливается до Pu^{3+} с помощью:

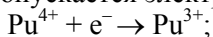
реакции с соединениями 2-валентного железа:



Железо отдает один валентный электрон плутонию;
реакции с соединениями 4-валентного урана:



электрохимического восстановления плутония. Через раствор пропускается электрический ток:



и 4-валентный уран действует как дополнительный восстановитель.

При промывке органической фазы восстановительным раствором в водную фазу уйдет 3-валентный плутоний, а уран останется в органической фазе. При реэкстракции органической фазы слабым раствором азотной кислоты уран перейдет в водную фазу (реэкстракт).

Этапы одного цикла экстракции–реэкстракции

1. Растворение ОЯТ в азотной кислоте.
2. Экстракция соединений урана и плутония из раствора с помощью ТБФ. Уран и плутоний переходят в органическую фазу.
3. Реэкстракция восстановительным раствором. 6- и 4-валентный плутоний переходит в 3-валентное состояние и уходит в водную фазу.
4. Реэкстракция урана из органической фазы разбавленной азотной кислотой. Уран уходит в водную фазу.

Контроль за нераспространением ядерных материалов на РХЗ

Радиохимический завод (РХЗ) – один из самых чувствительных участков ЯТЦ по контролю за нераспространением. Главная проблема РХЗ – контроль за плутонием. Выделим основные трудности контроля:

Большие количества плутония. Существующие РХЗ способны перерабатывать примерно 1000 т ОЯТ в год. Одна тонна ОЯТ легководных реакторов содержит 6–7 кг плутония, т.е. в год через РХЗ проходит 6–7 тонн плутония.

Высокая точность контроля. Значимое количество плутония SQ(Pu), принятое МАГАТЭ, составляет 8 кг. Предположим, плутоний на РХЗ должен контролироваться с точностью до 1 кг. Если в год РХЗ проходит 7 т плутония, то точность контроля должна быть на уровне $\sim 10^{-2}$ %. Реально достижимая точность измерения массы плутония составляет 0,1–1 %. Допускается плутониевый дисбаланс на уровне 0,1 %, т.е. на пределе измерительных возможностей. Как следствие, на РХЗ часто проводятся физические инвентаризации (несколько раз в год), завод разбивается на зоны материального баланса для локализации места хищения плутония.

Плутоний находится в разных фазовых состояниях (твердом, жидком, в органической фазе, в разных по валентности химических соединениях), участвует в периодических, непрерывных или полунепрерывных процессах.

При оценке привлекательности соединений плутония для хищения используются следующие факторы:

Фактор плотности f_1 определяет содержание плутония в его соединениях. Фактор f_1 рассматривается как функция объема ЯМ, в котором содержится 1 г плутония. Принято, что $f_1 = 1$ для металлического плутония. Плотность металлического плутония – 19,8 г/см³; т.е. его удельный объем составляет $\approx 5 \cdot 10^{-5}$ л/г. Исходная точка зависимости $f_1(V_{уд})$ это 1 при $V_{уд} = 5 \cdot 10^{-5}$ л/г. Другие Pu–содержащие материалы имеют повышенные удельные объемы и, соответственно, меньшие значения фактора привлекательности f_1 .

Фактор времени f_2 характеризует время, необходимое группе квалифицированных специалистов, располагающих современным оборудованием, для того, чтобы преобразовать Pu–содержащий материал в заряд ядерного взрывного устройства. Принято, что металлический плутоний может стать таким зарядом за неделю, т.е. фактор времени $f_2 = 1$ для металлического плутония при $t = 7$ сут. Для других Pu–содержащих материалов время изготовления заряда больше, а значения фактора времени f_2 ниже.

Радиационный фактор f_3 характеризует радиационную опасность Pu–содержащего материала по сравнению с металлическим плутонием. Радиационный фактор металлического плутония принят за единицу.

Факторы плотности $f_1(V_{уд})$ и активности $f_3(A)$ характеризуют трудность получения Pu–содержащего материала, а фактор времени $f_2(t)$ – трудность его превращения в ядерное взрывное устройство.

Обобщенный фактор привлекательности Pu–содержащих материалов определяется как произведение трех вышеуказанных факторов: $f_1(V_{уд})$, $f_2(t)$ и $f_3(A)$. В табл. 2.4 приведены факторы привлекательности различных Pu–содержащих материалов.

Факторы привлекательности Рn-содержащих материалов

Материал	$f_1(V_{уд})$	$f_2(t)$	$f_3(A)$	$f_1 \cdot f_2 \cdot f_3$
Рn-металл	1	1	1	1
PuO_2	0,70	0,90	1	0,63
$(U,Pu)O_2$	0,40	0,65	1	0,26
$Pu(NO_3)_4$	0,25	0,80	1	0,20
$(U,Pu)(NO_3)_x$	0,15	0,70	1	0,10
Раствор ОЯТ	0,06	0,35	0,004	$8 \cdot 10^{-5}$
TBC	0,08	0,10	0,004	$3 \cdot 10^{-5}$
Концентр. ВАО	0,025	0,35	0,001	$9 \cdot 10^{-6}$
Отвержд. ВАО	0,05	0,02	0,001	$1 \cdot 10^{-6}$

***Перспективные водные технологии переработки ОЯТ
с защитой от распространения ядерных материалов***

Водная SAFAR-технология переработки ОЯТ. Основная идея защиты от распространения в этой технологии – неполное разделение урана, плутония и ПД.

Отличия SAFAR-технологии от PUREX-технологии:

1. Плутоний не отделяется полностью от урана и ПД. Плутоний и уран выделяются совместно, только в двух циклах экстракции, т.е. плутоний сознательно загрязняется ураном и ПД (~1 % от исходного количества).

2. Чистые диоксиды урана и плутония не выделяются. Микросферы из MOX-топлива производятся по золь-гель технологии.

3. Повышенная радиоактивность окончательного продукта. Непривлекательность для хищения, легкий контроль за топливом, но дополнительные меры радиационной безопасности персонала.

Золь-гель процесс

Исходный материал – кислотный раствор ОЯТ после двух циклов отделения ПД. Затем выполняются следующие операции:

1. Добавление в раствор реагентов, понижающих кислотность.

2. Вливание раствора в органическое вещество, поглощающее воду, например в этилбензоат. Из смеси нитратов $(U,Pu)O_2(NO_3)_2$ получается $(U,Pu)O_2(OH)_{0.4}(NO_3)_{1.6}$ – коллоидное вещество.

3. Впрыскивание капель коллоидного вещества в органическую смесь на основе аммиака, которая продолжает убирать воду из кол-

лоида. Образуются желеобразные сферические гранулы (40–100 мкм).

4. Термическая обработка гранул с повышением температуры:

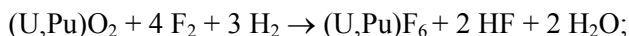
- при 95 °С – отщепление аммиака;
- при 125–200 °С – отщепление воды и образование $(U,Pu)O_2(OH)_4$;
- при 300–400 °С – испарение органических веществ, образование гранул;
- при 400–500 °С – прокаливание гранул MOX –топлива.

Неводные («сухие») технологии переработки ОЯТ

Пирохимическая газотригидная технология. Эта технология основана на различиях в температуре кипения, летучести и сорбционной способности тригидридов урана, плутония и ПД. При атмосферном давлении температуры кипения гексафтригидридов урана и плутония составляют 56 °С и 62 °С. При таких температурах основные ПД образуют нелетучие или малолетучие тригидриды.

Основные стадии газотригидной технологии:

- 1) термическое снятие оболочек твэлов при температуре 1600 °С;
- 2) тригидрирование топлива при 400 °С:



основная масса тригидридов ПД остается в нелетучем осадке. Уходят тригидриды U, Pu и некоторых ПД, а также газовые ПД (Xe, Kr, I);

3) вымораживание тригидридов ПД в форконтригидраторе при 27 °С. В цилиндрический резервуар сверху, под углом к оси, вводится газовый поток. Твердые частицы ударяются о стенки и выпадают в осадок;

4) пропускание газового потока через гранулы тригидрида натрия NaF. Используется разность в сорбционной способности NaF по отношению к тригидридам урана, плутония и ПД; при 100°С на гранулах NaF сорбируются тригидриды U, Np и Tc; при 400°С – тригидриды Pu, Ru, Zr, Nb;

5) десорбция гексафтригидрида урана UF_6 с поверхности гранул смеси «фтор(10 %)–азот(90 %)» при 400°С.

Недостатки газотригидной технологии:

неполная очистка UF_6 от тригидридов ПД;

плутоний хуже, чем уран, переходит в летучие фториды и размазывается по контурам;

технология непригодна для переработки МОХ–топлива из-за высокого содержания в нем плутония.

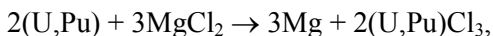
Пирометаллургическая переработка ОЯТ. Один из вариантов пирометаллургической технологии – метод электрохимического рафинирования.

Нижняя часть аппарата для электрохимического рафинирования заполняется жидким кадмием (анод). Над ним размещается слой расплавленных солей (смесь хлоридов К, Na, Са, Ва). Сверху в расплав солей вводится железный катод.

Основные этапы электрохимического рафинирования:

- 1) резка твэлов и загрузка кусков в графитовую перфорированную корзину. Корзина погружается в слой жидкого кадмия;
- 2) топливо растворяется в кадмии. Оболочки остаются в корзине;
- 3) топливо и ПД распределяются между Cd и расплавом солей: газообразные и летучие ПД уходят из расплава в газовую подушку; твердые ПД уходят в расплав солей; уран и плутоний находятся в обоих слоях;
- 4) пропускание тока. Уран, плутоний и цирконий переходят из жидкого кадмия и из расплава солей на железный катод.

Катодный осадок снимается и переплавляется в свежее топливо. Для более полной очистки урана и плутония от ПД проводится га-лоидное шлакование. Уран и плутоний переводятся в хлориды:



которые возвращаются в соляной расплав. Коэффициенты очистки топлива от ПД невелики (10^2 – 10^3 против 10^6 – 10^8 в PUREX–процессе).

Технология DUPIC. Технология DUPIC (Direct Use of spent PWR fuel in CANDU) является одним из вариантов переработки ОЯТ с повышенной защитой от распространения ЯМ.

Цель – повторное использование ОЯТ легководных реакторов типа PWR в тяжеловодных реакторах типа CANDU. ОЯТ реакторов PWR содержит уран с обогащением 0,9 % и 0,6 % плутония, в котором 70 % делящихся изотопов, т.е. примерно 1,3 % делящихся изо-

топов. Реакторы CANDU способны работать на природном уране (0,7 % ^{235}U), т.е. ОЯТ реакторов PWR можно использовать в реакторах CANDU.

Основные стадии технологии DUPIC:

- 1) разборка облученных ТВС, извлечение твэлов;
- 2) поперечная резка твэлов на куски размером ~ 20 см;
- 3) продольная разрезка оболочек;
- 4) волоксияция, т.е. термическая обработка в атмосфере кислорода при температуре 400°C . Диоксид урана UO_2 переходит в U_3O_8 , объем топливного сердечника увеличивается на 30 %, и топливо сбрасывает оболочку. Топливо становится пористым, из него уходят газовые ПД;

- 5) обработка по технологии OREOX–процесса. OREOX это окислительно–восстановительный процесс с чередованием окисления и восстановления оксидов урана:

- а) окисление на воздухе при 450°C ; диоксид урана UO_2 переходит в U_3O_8 , как и при волоксияции;

- б) восстановление в атмосфере $\text{Ar}+4\% \text{H}_2$ при 700°C ; октаоксид урана U_3O_8 переходит в диоксид урана UO_2 ; повторение циклов окисления–восстановления приводит к образованию дисперсного порошка UO_2 и к выходу всех газовых ПД;

- 6) изготовление таблеток UO_2 из порошка путем спекания;

- 7) изготовление твэлов и ТВС по стандартной технологии.

Особенности DUPIC–технологии

1. Отсутствие растворителей. Как следствие:

малый объем радиоактивных отходов;

компактность перерабатывающих установок и, отсюда, возможность их размещения на одной площадке с АЭС.

2. Нет разделения урана от плутония; неполная очистка от ПД.

DUPIC–технология обеспечивает повышенную защиту ядерного топлива от распространения за счет:

- повышенной радиоактивности топливных материалов;
- отсутствия стадий с разделением урана от плутония;
- отсутствие дальних перевозок при размещении перерабатывающей установки на одной площадке с АЭС.

Технологии переработки радиоактивных отходов

Все ядерные технологии связаны с использованием или сопровождаются образованием радиоактивных веществ. Свежие ТВС ядерных реакторов содержат радиоактивные изотопы урана, а облученные ТВС – радиоактивные изотопы урана, плутония, транс-урановых элементов и ПД. Часть этих изотопов может быть выделена и полезно использована. Оставшиеся радиоактивные вещества, полезное применение которых пока не представляется возможным, относят к радиоактивным отходам (РАО).

Специфическая особенность РАО заключается в невозможности их уничтожения традиционными методами (сжигание, перевод в другую химическую форму). В любой химической форме РАО сохраняют свою радиоактивность. Традиционными методами можно только преобразовать РАО в форму, удобную для окончательного захоронения в геологических формациях.

Наибольшую опасность для биосферы представляют РАО процесса химической переработки ОЯТ. При переработке ОЯТ из него извлекаются ПД. Количество ПД в ОЯТ составляет 30–40 кг/т ОЯТ тепловых и 100 кг/т ОЯТ быстрых реакторов. Соответствующие величины активности ПД: 6 МКи/т ОЯТ тепловых и 20 МКи/т ОЯТ быстрых реакторов.

Для сравнения:

- суммарный выброс радиоактивных веществ при аварии на Чернобыльской АЭС оценивается в 90 МКи;
- суммарный выброс радиоактивных веществ при Кыштымской аварии (взрыв хранилища жидких ВАО) оценивается в 20 МКи;
- активность РАО на предприятиях Минатома (1990 г.) – 2,3 ГКи;
- по состоянию на 1995 г. в России накоплено примерно 9400 т ОЯТ общей активностью – 4,65 ГКи (в среднем, удельная активность ОЯТ составляет 0,5 МКи/т). Поскольку, рано или поздно, ОЯТ будет переработано, и его активность перейдет в РАО, то потенциальная суммарная активность РАО России – 7 ГКи.

Цель переработки РАО – обеспечить защиту человека и окружающей среды от их негативного воздействия.

РАО классифицируются по агрегатному состоянию (жидкие, газообразные, твердые) и по уровню удельной активности (низкоактивные, среднеактивные, высокоактивные). Учитывая основные це-

ли данной главы, рассмотрим только особенности переработки высокоактивных и среднеактивных отходов.

Рассмотрим более подробно переработку высокоактивных отходов (ВАО).

Существуют две основные формы ВАО:

ВАО химической переработки ОЯТ. Это, главным образом, жидкие отходы, так как промышленная переработка ОЯТ основана на водных технологиях экстракции ЯМ из растворов;

облученные ТВС энергетических реакторов (ОТВС).

Основные этапы переработки ВАО включают в себя:

1. Контролируемое промежуточное хранение:

для жидких ВАО – размещение в резервуарах из нержавеющей стали. Контролируется тепловыделение и состав газовой подушки (удаление водорода, образующегося при радиолизе воды);

для ОТВС – размещение в бассейнах-хранилищах на АЭС;

2. Выпаривание жидких ВАО (150–200-кратное уменьшение объема). При этом происходит:

повышение удельной активности сконцентрированных ВАО;

усиленное газообразование из-за радиолиза воды. Как следствие, повышение опасности взрыва водородо-воздушной смеси;

повышение удельного тепловыделения, связанного с естественным распадом нуклидов. Как следствие, повышение температуры ВАО;

усиление коррозионной активности ВАО с повышенной концентрацией и с повышенной температурой.

3. Отверждение ВАО. Целью этого этапа является внедрение ВАО в устойчивую матрицу, препятствующую миграции ВАО в окружающую среду. Считается, что наиболее подходящей формой иммобилизации ВАО является их включение в состав стекол (стеклование).

Разработаны две технологии стеклования ВАО.

Одностадийная технология. Жидкие концентрированные ВАО загружаются в тигель, куда также вводятся стеклообразующие добавки. При разогреве смеси последовательно происходит окончательное выпаривание ВАО, прокаливание высушенных ВАО и плавление стекломассы.

После охлаждения тигель вместе со всем его содержимым отправляется на захоронение.

Двухстадийная технология:

- а) прокаливание исходных ВАО при температуре 300–400°C;
- б) смешивание кальцината со стеклообразующими добавками и пересыпание в плавильную печь;
- в) разогрев и стеклование массы при 1100–1150°C;
- г) периодический слив стекломассы в стальные контейнеры;
- д) промежуточное хранение и захоронение контейнеров.

Существуют альтернативные технологии иммобилизации ВАО. Это включение ВАО в другие устойчивые материалы (керамика, стеклокерамика, минералоподобные материалы типа SYNROC).

SYNROC – это сокращение от Synthetic Rock, т.е. синтетические скальные породы. Создание искусственных скальных пород и иммобилизация ВАО базируется на предположении, что эти материалы будут столь же устойчивы и долговечны, как и природные скальные породы.

Переработка жидких среднеактивных отходов

К среднеактивным отходам (САО) относятся растворы экстракционных циклов (кроме первого цикла), конденсат, получаемый при выпаривании низкоактивных РАО, и пар, получаемый при выпаривании высокоактивных РАО.

Основные этапы переработки САО:

- 1) осаждение и удаление САО из жидких фаз (отстаивание и фильтрация с применением коагулянтов);
- 2) ионообменная очистка оставшихся растворов;
- 3) упаривание для получения сухого остатка;
- 4) иммобилизация путем битуминизации – смешивание с битумной массой и затвердевание смеси;
- 5) контейнеризация битумной массы с САО;
- 6) временное хранение и окончательное захоронение.

Достоинства битума как материала для иммобилизации САО:

- слабое выщелачивание водой;
- пригодность для любых химических форм САО (соли, гидроксиды, органические соединения);
- хорошая радиационная стойкость.

К недостаткам битума следует отнести его горючесть (продукт переработки нефти) и размягчение при нагреве (асфальт).

Альтернативным вариантом иммобилизации САО является их цементирование, т.е. включение в состав бетона. Бетон, как материал для иммобилизации САО, обладает следующими достоинствами:

- дешевизна и простота обращения с бетоном;
- высокая радиационная стойкость;
- высокая теплопроводность;
- бетон не горюч и не размягчается при нагреве.

Однако бетон не обладает достаточной химической стойкостью к воздействию воды. Ниже приведены сравнительные данные по скорости выщелачивания различных материалов водой:

стекло:	$10^{-8} \div 10^{-7}$ г/(см ² ·сутки);
SYNROC:	$10^{-6} \div 10^{-5}$ г/(см ² ·сутки);
битум:	$10^{-6} \div 10^{-4}$ г/(см ² ·сутки);
бетон:	$10^{-3} \div 10^{-2}$ г/(см ² ·сутки).

Поэтому стекло и SYNROC–материалы преимущественно используются для иммобилизации высокоактивных РАО, а битум и бетон – для иммобилизации средне– и низкоактивных РАО.

Завершается топливный цикл окончательным захоронением специальных контейнеров с РАО в подземных, стабильных геологических формациях. Как кандидаты для этого обычно рассматриваются: соляные месторождения, глинистые осадочные породы и скальные породы.

ГЛАВА 3

МЕЖДУНАРОДНЫЕ ГАРАНТИИ НЕРАСПРОСТРАНЕНИЯ

3.1. Деятельность МАГАТЭ

На международном уровне проблемой нераспространения призвано заниматься Международное агентство по атомной энергии (МАГАТЭ [1]). С помощью развитой системы мер, называемых международными гарантиями, МАГАТЭ контролирует использование ЯМ только в мирных целях.

Основой для осуществления международных гарантий служит Договор о нераспространении ядерного оружия (ДНЯО). МАГАТЭ в своей контрольной деятельности использует разработанную систему мер (гарантии), изложенную в документе INFCIRC/153. Эта система мер во многом опирается на национальные системы гарантий нераспространения и позволяет осуществлять контроль всех ЯМ в государствах, подписавших ДНЯО.

Организация международного контроля ядерных материалов

МАГАТЭ, созданное в Вене в 1957 г., является международной межправительственной организацией, связанной особым соглашением с Организацией Объединенных Наций и в силу этого входящей в систему ООН. Отмеченное соглашение предусматривает, что Агентство действует как автономная международная организация, находящаяся в рабочих взаимоотношениях с ООН. МАГАТЭ представляет Генеральной Ассамблее ООН отчеты о своей деятельности. Агентство сотрудничает с Советом Безопасности ООН, предоставляя ему информацию и помощь, которые могут потребоваться для осуществления Советом Безопасности его функций по поддержанию мира и безопасности.

Цели Агентства определены в его Уставе:

- Агентство стремится к достижению более скорого и широкого использования атомной энергии для поддержания мира, здоровья и благосостояния во всем мире;
- Агентство также обязано содействовать исследованиям и разработкам в области использования ядерной энергии в мирных це-

лях, а также обеспечивать материалы, услуги, оборудование и технические средства для этой цели;

- МАГАТЭ должно устанавливать и применять нормы безопасности в связи с использованием ядерной энергии и излучений;

- Агентство уполномочено устанавливать и проводить в жизнь гарантии, обеспечивающие использование ядерных материалов только в мирных целях.

К 2007 г. членами МАГАТЭ стали 144 государства. Руководящими органами МАГАТЭ являются Генеральная конференция и Совет управляющих.

Генеральная конференция – высший орган Агентства. Она собирается один раз в год на сессии. Большая часть решений и постановлений Генеральной конференции принимается простым большинством голосов.

Совет управляющих – основной руководящий орган МАГАТЭ в период между сессиями Генеральной конференции. Его решения по основным вопросам деятельности Агентства подлежат утверждению Генеральной конференцией. Совет управляющих состоит из 35 членов. На постоянной основе в него входят десять государств, наиболее развитых в области атомной науки и техники: Россия, КНР, США, Великобритания, Франция, Германия, Япония, Италия, Канада, Индия. Кроме того, ежегодно в Совет назначаются сроком на один год три государства, наиболее развитые в области атомной технологии. Остальные члены избираются на два года от государств, не представленных постоянными членами Совета, из семи регионов: Латинской Америки, Западной Европы, Восточной Европы, Африки, Среднего Востока и Южной Азии, Юго-Восточной Азии и района Тихого океана, Дальнего Востока.

Кроме того, Совет управляющих периодически создает комитеты для решения крупных конкретных вопросов. Так, в связи с вступлением в 1970 г. в силу ДНЯО, Совет учредил в этом же году Комитет для разработки типового соглашения о гарантиях. Этот Комитет разработал типовое соглашение о гарантиях МАГАТЭ, именуемое INFCIRC/153.

Всю регулярную практическую деятельность Агентства осуществляет Секретариат МАГАТЭ. Он возглавляется генеральным директором, который осуществляет руководство и несет ответственность за исполнение программы работ Агентства. В настоящее вре-

мя генеральным директором МАГАТЭ является представитель Египта Мохамед эль Барадей.

Административно Агентство построено подобно крупному научному центру (рис. 3.1). Его структура отвечает целям деятельности Агентства. В состав МАГАТЭ входят шесть департаментов: технического сотрудничества; ядерной энергии; ядерной безопасности; управления; ядерных наук и применений; гарантий. Департаменты состоят из отделов, в каждом из которых образованы секции по определенным тематическим направлениям.

Основные направления деятельности МАГАТЭ

Все многообразие деятельности МАГАТЭ можно разделить на три генеральных направления: осуществление контроля за ядерными материалами; предоставление технической помощи странам; осуществление научных программ. Из шести департаментов МАГАТЭ функции осуществления научных программ возложены на три:

в департаментах ядерной энергии и безопасности проводятся исследования по двум направлениям:

- ядерная энергетика и топливный цикл;
- ядерная безопасность и радиационная защита;

в департаменте ядерных наук и применений изучаются глобальные проблемы, возникающие перед странами мира. Среди них проблема нехватки продовольствия и пресной воды, проблема здоровья человека и др.

Цель деятельности департамента технического сотрудничества состоит в содействии передачи странам (в первую очередь, развивающимся) знаний в области использования атомной энергии. Программа технической помощи включает:

- подготовку кадров (предоставление стажировочных стипендий, курсы переподготовки персонала);
- консультативные миссии экспертов в связи с проблемами, относящимися к использованию атомной энергии;
- исследовательские контракты. МАГАТЭ ежегодно выделяет на научно-исследовательскую деятельность 4÷5 млн. долл. При поддержке Агентства проводятся исследования в рамках ~ 1900 контрактов и соглашений в более чем 90 странах. Причем, основная часть этих контрактов относится к развивающимся странам.

Департамент гарантий является самым крупным подразделением МАГАТЭ. В департаменте работает ~ 366 сотрудников. Данное обстоятельство объясняется, прежде всего, тем, что на департамент возложено выполнение одной из основных задач, стоящих перед Агентством, а именно – осуществление международных гарантий, или системы мер, с помощью которых МАГАТЭ контролирует выполнение государствами обязательств, взятых ими в связи с Уставом Агентства и Договором о нераспространении ядерного оружия.

Для выполнения этой задачи департамент гарантий укомплектован штатом из ~ 250 инспекторов. Инспекционная деятельность включает независимые измерения ядерных материалов на установках и использование средств сохранения и наблюдения, позволяющих контролировать ядерные материалы между инспекциями. В распоряжении инспекторов Агентства имеются современная измерительная техника, совершенные системы наблюдения и сохранения. Данные по гарантиям эффективно обрабатываются на самых совершенных компьютерах.

В задачи департамента гарантий входит проведение инспекций на установках ядерного топливного цикла государств, разработка методов и средств контроля, обработка данных по гарантиям, взаимодействие со странами по вопросам применения гарантий. Департамент гарантий состоит из шести отделов (см. рис. 3.1). Три операционных отдела осуществляют непосредственную контрольную деятельность в различных регионах мира. Три других отдела департамента гарантий выполняют функции поддержки деятельности отделов операций.

Отдел информационной технологии по гарантиям обеспечивает анализ и оценку деятельности по осуществлению гарантий на основе сбора и обработки данных отчетов, вопросников по конструкции установок, результатов инспекций.

Отдел технических услуг отвечает за разработку и использование оборудования и приборов, компьютеров. Этот отдел обеспечивает инспекторов современными техническими средствами.

Отдел концепций и планирования разрабатывает и совершенствует процедуры и подходы по применению гарантий, разрабатывает пути повышения их эффективности, отвечает за вопросы стандартизации и статистической обработки результатов инспекций.

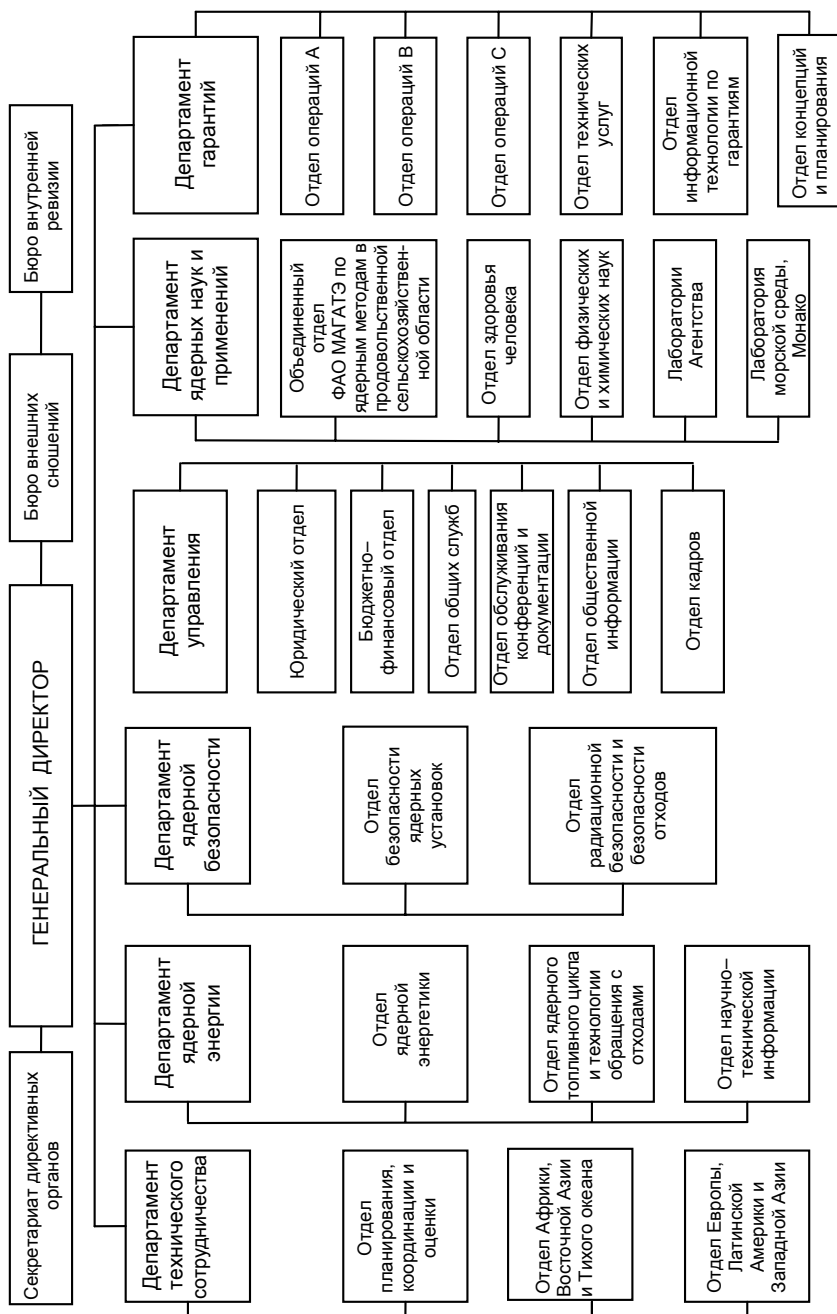


Рис. 3.1. Организационная структура МАГАТЭ

Международно–правовая основа развития и применения гарантий МАГАТЭ

Приведем некоторые определения, используемые в практике международных гарантий.

Исходный ядерный материал подразумевает уран (природный или обедненный), торий в форме металла, сплава, химического соединения или концентрата (не руда).

Специальный расщепляющийся материал означает плутоний–239; уран–233; уран, обогащенный изотопами 235 или 233; любой материал, содержащий одно или несколько из вышеуказанных веществ.

Гарантии МАГАТЭ – система технических мер, применение которых осуществляет МАГАТЭ согласно его Уставу и ДНЯО в целях нераспространения ядерного оружия.

1. Первоначально основой для применения гарантий МАГАТЭ являлся Устав этой организации. Основные требования и условия применения гарантий определялись статьей III.A.5 Устава МАГАТЭ. Эти требования можно охарактеризовать как минимальные. От государства требовался минимум усилий – обеспечить доступ к ядерным материалам на отдельных установках, выбранных для контроля по согласованию сторон.

2. На основе положений Устава МАГАТЭ в 1961 г. была разработана первоначальная система гарантий МАГАТЭ, изложенная в документе INFCIRC/26. На этом этапе контрольные процедуры Агентства применялись к небольшим исследовательским реакторам и лабораторным установкам.

3. По мере роста масштабов ядерной деятельности в странах потребовалось расширить и улучшить первоначальную систему гарантий. В 1965 г. система гарантий была пересмотрена и расширена в отношении ядерных реакторов, заводов по переработке облученного топлива, а также в отношении ЯМ, находящихся на заводах по обработке и изготовлению ТВС. Данная система – INFCIRC/66, дополненная в 1966 и 1968 гг., применяется до настоящего времени в качестве основы для заключения соглашений о гарантиях с государствами, не обладающим ядерным оружием и не являющимися участниками ДНЯО. Следует отметить, что, как и все более ранние системы гарантий, INFCIRC/66 была ориентирована на контроль

отдельных установок в государстве (пример — соглашение МАГАТЭ с Израилем).

4. Вступление в силу Договора о нераспространении ядерного оружия в 1970 г. значительно повысило роль МАГАТЭ в укреплении режима нераспространения ядерного оружия. Очень важным обстоятельством является то, что статья III.1 Договора требует принятия гарантий ко всей мирной деятельности государств, являющихся членами Договора. Таким образом, в отличие от гарантий в связи с Уставом Агентства, которые применяются к определенным объектам, гарантии в связи с Договором являются полномасштабными и ориентированными на весь ядерный топливный цикл государств, в которых они применяются. Данная система, нашедшая свое отражение в документе МАГАТЭ INFCIRC/153, была создана в 1971 г. и продолжает успешно функционировать по настоящее время.

5. Система гарантий INFCIRC/153. Документ INFCIRC/153 гласит, что основное обязательство, принимаемое государством в рамках соглашения о гарантиях, заключенных в связи с Договором о нераспространении, состоит в том, чтобы принять в соответствии с положениями соглашения, гарантии по всему исходному или специальному расщепляющемуся материалу во всей мирной ядерной деятельности в пределах его территории, исключительно с целью проверки того, чтобы такой материал не переключался на оружие или другие ядерные взрывные устройства.

Система INFCIRC/153 требует, чтобы государство представляло информацию Агентству. Более конкретно она требует, чтобы:

- государство представляло МАГАТЭ информацию о конструктивных особенностях установки и другую информацию, связанную с гарантиями;
- государство вело учетные документы для каждой зоны баланса материалов;
- представляло МАГАТЭ отчеты относительно ядерных материалов, основанные на ведущихся учетных документах.

Таким образом, необходимым условием применения эффективных международных гарантий является существование национальной системы учета и контроля ядерных материалов. Однако последнее не заменяет международные гарантии.

Соглашения, основанные на документе INFCIRC/153, содержат также требования, что:

- государство создает и ведет систему учета и контроля за всеми ядерными материалами, подлежащими гарантиям;

- национальная система учета и контроля ЯМ должна быть структурирована по зонам баланса материалов;

- национальная система должна предусматривать создание и применение измерительных систем и процедур для определения фактически наличного количества ядерных материалов (т.е. проводить физические инвентаризации на установках).

В соответствии с требованиями к установкам в МАГАТЭ направляются три типа отчетов, которые обязательно составляются на основе учетной документации:

- отчет об изменении инвентарного количества ядерных материалов (подробный перечень всех получений и отправок ЯМ);

- материально–балансовый отчет с указанием полученной величины инвентаризационной разницы и границ ее статистического разброса;

- список наличных количеств ядерных материалов.

Основы гарантий МАГАТЭ

Цели гарантий МАГАТЭ четко сформулированы в пункте 28 документа INFCIRC/153 и заключаются «в своевременном обнаружении переключения значимых количеств ядерного материала с мирной ядерной деятельности на производство ядерного оружия или ядерных взрывных устройств или на неизвестные цели, а также в сдерживании такого переключения в связи с риском раннего обнаружения». Включение выражения «на неизвестные цели» весьма важно для практического применения гарантий, так как оно означает, что МАГАТЭ не должно пытаться определить характер использования переключенного материала и, в частности, не должно определять, переключен ли ядерный материал на «производство ядерного оружия или других ядерных взрывных устройств».

Основной принцип системы гарантий МАГАТЭ состоит в сравнении информации, предоставляемой инспектируемой стороной, и результатов независимой проверки и наблюдений, выполненных Агентством.

В соответствии с этим принципом для достижения целей гарантий МАГАТЭ осуществляет контрольную деятельность, состоящую из трех основных этапов:

- изучения данных, предоставленных государством в сведениях о конструкции установок, отчетах в МАГАТЭ, предварительных уведомлениях о международных передачах;

- сбора информации во время инспекций по проверке информации о конструкции, обычных и специальных инспекций;

- оценки информации, предоставленной государством и собранной во время инспекций, для определения полноты, точности и правильности информации, предоставленной этим государством.

Следует особо подчеркнуть, что гарантии МАГАТЭ осуществляются таким образом, чтобы не создавалось препятствий экономическому и техническому развитию государств, их международному сотрудничеству в области мирного использования атомной энергии. Агентство избегает необоснованного вмешательства в мирную ядерную деятельность государств и эксплуатацию установок.

Статья XII Устава Агентства очерчивает виды деятельности по осуществлению гарантий МАГАТЭ. В соответствии с этой статьей Агентство имеет право:

- проверять информацию о конструкции ядерных установок;
- требовать от компетентных органов государства ведения необходимой документации для целей учета ядерного материала и доступа Агентства к ней;
- требовать представления отчетной документации Агентству;
- направлять инспекторов МАГАТЭ в те государства, которые приняли гарантии.

Как уже говорилось, для достижения целей гарантий МАГАТЭ проводит независимую проверку ЯМ во время инспекций. И здесь, в первую очередь, требуется знать, какой материал и сколько надо проверять, чтобы сделать заключение об отсутствии переключения ядерного материала. Для этого определяются три основных параметра:

- значимое количество;
- время обнаружения;
- вероятность обнаружения.

Значимое количество ЯМ

Для национальной системы гарантий, разработанной в основном для защиты ядерного материала от хищений или террористических

актов, «значимым» может считаться относительно небольшое количество ядерного материала, например, вследствие его высокой токсичности (плутоний). Однако международные гарантии предназначены, главным образом, для проверки того, что правительства не приобретают ядерное оружие или другие ядерные взрывные устройства (ЯВУ). Для создания даже единичного ядерного взрывного устройства требуется сравнительно большое количество ядерного материала.

На практике гарантии применяются к ядерным материалам, которые содержат различные концентрации плутония и урана и разного изотопного состава. Поэтому необходимо определить «значимое количество» (ЗК) для каждой категории материала, с тем, чтобы можно было указать количество данного материала, переключение которого должно быть обнаружено в результате применения гарантий.

В общем случае ЗК определяется как приблизительное количество ядерного материала, в отношении которого с учетом любого процесса конверсии нельзя исключить возможность создания ядерного взрывного устройства.

ЗК различается в зависимости от того, можно ли данный материал непосредственно использовать для создания ЯВУ, или вначале для этого требуется его дальнейшее превращение, например, обогащение (материал косвенного использования).

Для материала прямого использования значимые количества установлены следующими:

- 8 кг плутония (содержащего $< 80\%$ Pu-238);
- 8 кг U-233;
- 25 кг U-235, содержащегося в ВОУ.

Для материала косвенного использования значимые количества следующие:

- 75 кг U-235, содержащегося в НОУ (10 т природного урана);
- 20 т для обедненного урана и тория.

Значимое количество в практике инспекций

Фактическая цель инспекций в отношении конкретной установки не обязательно (а в некоторых случаях и не может быть) направлена на обнаружение переключения одного ЗК. Например, как от-

мечалось, проверка ядерного материала на реакторах состоит, главным образом, из подсчета, идентификации и измерения отдельных учетных единиц, т.е. ТВС. И при подсчете учетных единиц цель инспекции состоит в обнаружении отсутствия одной топливной сборки. Топливная сборка, например, исследовательского реактора типа ИРТ обычно содержит ~ 200 – 300 г ВОУ 90 % обогащения. То есть, цель инспекции при подсчете учетных единиц намного меньше одного ЗК (25 кг) для высокообогащенного урана.

С другой стороны, на крупных установках с ядерным материалом в балк-форме ситуация может быть обратной. На установках с ядерным материалом в балк-форме проверка требует измерения значительных количеств ЯМ в различной физической форме и разного химического состава, включая такие материалы, как отходы. Ориентировочно можно принять, что погрешности измерений ЯМ составляют порядка 1 % от общего количества измеренных ЯМ. Однако очевидно, что один процент инвентарного количества или производительности крупной установки с ядерным материалом в балк-форме может превышать (в некоторых случаях значительно) одно ЗК.

Например, под гарантиями МАГАТЭ находится несколько установок по изготовлению топлива, на которых в обработке находится значительное количество материала косвенного использования (низкообогащенный уран) в балк-форме. Вследствие погрешностей измерений и других факторов возникла необходимость установить цель инспекций на уровне пяти ЗК. Это означает, что на таких установках нельзя исключать возможность (с желаемой степенью достоверности 90–95 %) переключения одного ЗК для НОУ. Но это не означает, что переключение одного ЗК не может быть обнаружено вообще. Обнаружение возможно также и в этом случае, однако, с меньшей степенью вероятности. Кроме того, увеличение уровня обнаружения компенсируется применением таких дополнительных средств контроля, как сохранение и наблюдение. Наконец, следует иметь в виду, что переключенный НОУ может быть обнаружен на других стадиях его перевода в материал оружейного качества.

В государствах с развитым топливным циклом теоретически возможно переключить значимое количество материала путем

«разделения», то есть путем суммирования переключений менее одного ЗК на каждой из большого числа установок. Осуществление этой стратегии было бы связано с материалами различных типов и категорий и потребовало бы согласованных действий со стороны персонала большого числа установок. Поэтому МАГАТЭ рассматривает такой сценарий переключения ЯМ как непривлекательный для государства и связанный с большим риском. Кроме того, попытка противодействия таким гипотетическим сценариям переключения ЯМ потребовала бы режим инспекций неприемлемо громоздкий как для государства, так и МАГАТЭ.

Своевременность обнаружения

Своевременность обнаружения также представляет собой важное понятие для гарантий. Система гарантий Агентства основывается на предположении о том, что переключение значимого количества ядерного материала, осуществляется ли оно на основе стратегии разового или постоянного переключения, должно быть обнаружено своевременно.

Практическое толкование своевременного обнаружения зависит от типа ядерного материала, находящегося под гарантиями. Для того чтобы установить количественное выражение своевременности, рассмотрим понятие времени конверсии. Время конверсии ядерного материала представляется как период времени, необходимый в оптимальных условиях для конверсии данной формы ядерного материала компоненты ядерного взрывного устройства. По рекомендации Постоянной консультативной группы МАГАТЭ по осуществлению гарантий (ПКГОГ) установлены следующие типичные времена конверсии:

Pu, U ($U-235 \geq 20\%$) (в свежем топливе)	7 – 10 суток;
PUO ₂ , Pu(NO ₃) ₄	1 – 3 недели;
Pu, U ($U-235 \geq 20\%$) в отработавшем топливе	1 – 3 месяца;
U ($U-235 < 20\%$), Th	около 1 года.

Кроме того, по рекомендации ПКГОГ МАГАТЭ установило «время обнаружения» того же порядка величины, что и соответст-

вующее время конверсии. При этом под «порядком величины» понимается коэффициент, равный 1–3.

На практике МАГАТЭ иногда сталкивается с трудностями в обеспечении коротких времен обнаружения. Например, на некоторых установках с ядерным материалом в балк-форме существуют практические трудности в согласовании коротких значений времени обнаружения с требованиями нормальной эксплуатации. Относительно плутония и высокообогащенного урана (время конверсии 7–10 суток) цели инспекций устанавливаются на верхнем уровне допустимого временного диапазона (три недели). В тех же случаях, когда приемлемая частота инспекций недостаточна для достижения целей своевременности, применяются дополнительные меры для обеспечения желаемой способности обнаружения. Среди них – меры опечатывания и наблюдения.

Вероятность обнаружения

Своевременно обнаружить переключение ядерного материала со 100 % вероятностью в условиях глобальных масштабов деятельности МАГАТЭ – задача чрезвычайно трудная. Поэтому МАГАТЭ стремится к системе гарантий, которая с определенной вероятностью удовлетворяет этим целям. Степень вероятности, с которой необходимо удовлетворять эти цели, должна, в свою очередь, быть определена. Ни в документе INFCIRC/66, ни в документе INFCIRC/153 конкретно не упоминается концепция степени уверенности обнаружения, но МАГАТЭ интерпретировало эти документы как, безусловно, включающие в себя это понятие. С точки зрения Агентства, цель должна состоять в достижении достаточно высокой вероятности обнаружения с тем, чтобы удержать государство от принятия решения в отношении переключения, а также обеспечить необходимую степень уверенности международного сообщества. В Агентстве принят уровень вероятности обнаружения – $0,9 \div 0,95$.

Определение объема независимой инспекционной проверки ЯМ

Влияние вероятности обнаружения переключения значимого количества ЯМ на объем инспекционной деятельности МАГАТЭ можно проиллюстрировать на модельном примере.

Пусть имеется совокупность однотипных изделий $N = 12000$. Примем ЗК для рассматриваемого материала (например, плутоний) равным $M = 8$ кг. Масса каждого изделия равна $m = 80$ г. Определим количество изделий, которое должно быть проверено в ходе инспекции МАГАТЭ, если вероятность β достижения цели гарантий должна быть не менее 0,9?

Примем, что количество переключенных элементов x в выборке n является случайной величиной и распределяется по гипергеометрическому закону. Тогда объем выборки определяется соотношением:

$$n = N \times (1 - \alpha^{m/M}), \alpha = 1 - \beta, \quad (3.1)$$

если

$$(M/m) \ll N. \quad (3.2)$$

Условие (1.2) означает, что рассматриваются относительно крупные элементы. После проверки выполнения этого условия, пользуясь формулой (1.1), находим объем измерений во время инспекции:

$$n = 12000 \cdot (1 - 0,1^{1/100}) = 276.$$

Итак, видно, что объем выборочных измерений сокращается во много раз по сравнению с исходным количеством измерений ЯМ, если принятое ЗК значительно больше массы элемента, а вероятность достижения цели заметно меньше 1.

Технические средства осуществления гарантийной деятельности МАГАТЭ

Сложность и многообразие установок, содержащих ЯМ, требуют соответственно применять различные контрольные методы и технические средства [2]. В табл. 3.1 указаны главные верификационные процедуры, осуществляемые на этих установках Агентством.

С 1980–х гг. в инспекционной деятельности наблюдается тенденция расширенного использования средств сохранения и наблюдения, а также применение неразрушающих методов контроля материалов.

Таблица 3.1

**Основные типы установок, находящиеся под гарантиями МАГАТЭ
(данные на 2002 г.)**

Тип установки	Разделение изотопов	Изготовление топлива	Энергетические реакторы и хранилища	Переработка облученного топлива
Число установок	10	41	239 реакторов, 80 отдельных хранилищ	6
Контролируемые материалы	UF ₆	Оксиды U и Pu, MOX	Облученное топливо	Нитраты U и Pu
Главные контрольные процедуры	Взвешивание, γ-спектрометрия	γ-спектрометрия, нейтронные измерения, разрушающий анализ	Свечение Черенкова, гамма- и нейтронные измерения	Разрушающий анализ, нейтронные измерения

Масштабы применения технических средств можно приближенно охарактеризовать следующими статистическими данными, относящиеся к 2002 г.:

- на 550 установках, находящихся под гарантиями, Агентство разместило 700 систем неразрушающего контроля ЯМ;
- с помощью разрушающего анализа проверено 760 проб;
- на установках развернуто 400 систем видеонаблюдения;
- проверено 24500 пломб;
- в окрестностях 50 установок взято и проанализировано 230 проб.

Некоторые данные по техническим средствам, используемым в инспекционной практике МАГАТЭ, приведены в табл. 3.2 – 3.7.

Оптическое наблюдение. Технические средства оптического (видео) наблюдения играют важную роль в осуществлении гарантий МАГАТЭ. Средства наблюдения широко используются МАГАТЭ для обеспечения непрерывности знаний о ядерных материалах в период между инспекциями и являются мощной поддержкой и дополнением к средствам учета ЯМ. В настоящее время Агентством установлено около 800 действующих видеокамер (в рамках ~ 400 видеосистем), размещенных на 170 объектах по всему миру. В табл. 3.2 приведен перечень некоторых систем видеонаблюдения, которые Агентство использует в настоящее время.

Таблица 3.2

**Оптические системы наблюдения, используемые в практике гарантий
МАГАТЭ**

Обозначение системы	Название и тип системы	Применение и комментарий
Однокамерные системы наблюдения с записью на магнитную ленту		
SIDS	Sample Identification System	Система наблюдения применяется для идентификации МОХ-образцов на установках по производству МОХ-топлива. Имеет интерфейс с прибором измерения нейтронного потока (HLNC) и запускается в действие при превышении установленного порога потока нейтронов
STVS	Short Term TV System	Система построена на базе оборудования системы MXTV и предназначена для краткосрочных наблюдений. Включает одну камеру наблюдения и одно записывающее устройство
UWTV	Underwater TV	Портативная система подводного телевизионного наблюдения. Применяется, в основном, для проверки отработанных сборок реакторов типа CANDU, находящихся в бассейне хранилища. Система имеет вспомогательные приспособления для поворота камеры и подсветки объекта наблюдения. Камера находится внутри водозащитного кожуха, сохраняет работоспособность при высоких уровнях радиации и позволяет считывать мелкие буквы при ограниченных световых условиях. Система имеет встроенный монитор, позволяющий просматривать изображения на месте
Цифровые однокамерные системы наблюдения		
ALIP	All in One Surveillance Portable	Портативная однокамерная система наблюдения с питанием от батарей либо магистральным питанием. Включает камеру, видеотерминал, блок электроники DCM14, набор батарей. При полностью заряженных батареях система может работать до 100 суток. При наличии 660 Mb карты система ALIP может записывать 40÷50 тысяч изображений. Устанавливается в местах с легким доступом
ALIS	All in One Surveillance	Однокамерная система наблюдения с магистральным питанием на базе блока электроники DCM14. Имеет интерфейс с терминалом инспектора. Объемы хранимой информации – те же, что и ALIP. Устанавливается в местах с легким доступом
DSOS	Digital Single-Camera Optical Surveillance	Система наблюдения на основе DCM14 блока. Камера наблюдения может помещаться в труднодоступные места

Обозначение системы	Название и тип системы	Применение и комментарий
Многокамерные системы наблюдения с записью на магнитную ленту		
FTPV	Fuel Tranfer Video	Система подводного телевизионного наблюдения. Имеет замкнутый водозащитный контур. Используется для мониторинга движения топлива в бассейнах
MOSS	Multi-Camera Optical Surveillance System	Система может включать до 16 видеокамер. Запись информации – на магнитную ленту. К 2006 году планируется замена данной системы на более совершенную цифровую систему DMOSS
MXTV	Multiplex TV Surveillance System	Многокамерная система наблюдения (до 16 камер). Планируется замена данной системы на цифровую серверную систему SDIS
VSEU	Video System Multiplex	Многокамерная система наблюдения, используемая Евратомом
VSPC	Video System	Система с замкнутым контуром. Может подключаться до 4 видеокамер.
Цифровые многокамерные системы наблюдения		
DMOS	Digital Multi-Camera Optical Surveillance	Цифровая многокамерная (обычно от 6 до 16 камер) система для работы в необслуживаемом режиме, а также для удаленного мониторинга. Построена на основе блока DCM14 и имеет центральную консоль. Каждая камера опрашивается сервером. Изображения и данные хранятся на съемном носителе (магнитной ленте)
SDIS	Server Digital Image Surveillance	Цифровая серверная многокамерная система наблюдения. Осуществляет сбор изображений и данных от камер (до 6 штук) на основе блока DCM14. Может также использоваться для опрашивания электронных пломб VACOSS. Сервер может сортировать изображения и данные и передавать их в офисы Агентства. Система снабжена бесперебойником, который поддерживает непрерывную работу системы в течение 48 часов при отключенном магистральном электроснабжении
Системы обзора данных		
GARS	General Advanced Review Station Software	Современное программное обеспечение для просмотра видеозаписей. Широко используется для анализа записей многих видеосистем: ALIP, ALIS, DSOS, DMOS, SDIS и др. Обеспечивает дружественный интерфейс для просмотра видеозаписей и выполняет целый ряд вспомогательных функций. GARS помогает инспектору убедиться в истинности записей, одновременно просматривать изображения с нескольких камер, детектировать изменения видеобстановки, дешифровать данные и прочее
MORE	Multi-system Optical Review Station	Станция используется для просмотра инспекторами видеозаписей, полученных на MXTV и MOSS системах. Каждая такая станция включает компьютер для запуска программ системы MORE, монитора со средствами автоматического детектирования изменения обстановки, магнитофонов для просмотра видеоматериалов с магнитной ленты и принтера

Агентством разработана программа модернизации используемой видеоаппаратуры. Принято, что развитие систем наблюдения будет проводиться на базе блока электроники DCM14 (осуществляет оцифровывание изображений, контроль подлинности информации, шифрование данных и обеспечение конфиденциальности, компрессия данных, управление питания системы наблюдения и прочее), который наиболее отвечает требованиям МАГАТЭ к системам наблюдения. С 1998 г. начато создание 5 базовых цифровых систем наблюдения с использованием блока DCM14, отвечающих в полной мере специфике инспекционной деятельности МАГАТЭ с учетом возможных жестких условий среды при их функционировании.

Средства сохранения. Цель применения пломб – обеспечить доказательства любых несанкционированных попыток доступа к охраняемому материалу. Пломбы также обеспечивают средства уникальной идентификации охраняемых контейнеров. В зависимости от цели применения в Агентстве используются одноразовые металлические, клеящиеся, оптоволоконные, ультразвуковые пломбы и электронные пломбы многократного использования. Краткая характеристика этих типов пломб приведена в табл. 3.3.

Таблица 3.3

Средства опломбирования, применяемые в гарантийной деятельности МАГАТЭ

Обозначение пломбы	Тип пломбы	Применение и комментарий
CAPS	Металлическая, одноразовая	Широко используется для опечатывания контейнеров, шкафов и оборудования Агентства. Пломба проста по конструкции, недорогая, легко устанавливается и снимается с объекта. Ежегодно Агентство устанавливает ~ 20 тысяч таких пломб
VOID	Липкая одноразовая	Пломба выполнена из материала, который при снятии пломбы разрушается. Применяется с целью временного сохранения материала (несколько часов)
FBOS	Fibre Optic Seal, оптоволоконная, одноразовая	Характеризуется повышенной уникальностью за счет случайной картины волокон. Пломба общего назначения. Проверяется инспектором на месте
ULCS	Ultrasonic Seal, ультразвуковая, одноразовая	Повышенная уникальность. Проверяется на месте. Применяется для опечатывания контейнеров с топливом реакторов CANDU, находящихся под водой
USSB	Ultrasonic Sealing Bolt, ультразвуковая, одноразовая	Применяется для опечатывания контейнеров с отработавшими сборками реакторов LWR, находящихся под водой
VCOS	Variable Coding Seal, электронная, многократовая	Запоминающее устройство пломбы фиксирует каждое размыкание и замыкание оптоволоконной цепи. Применяется в случаях длительного наблюдения с возможностью периодического доступа к объекту

Неразрушающие измерения необлученных ядерных материалов. Большинство материалов, подпадающих под гарантии МАГАТЭ, обладает γ -активностью. В спектрах излучения имеются выраженные линии, характерные для определенных изотопов, испускающих γ -кванты. Фиксация энергий наблюдаемых линий спектра γ -излучения материала служит основанием для идентификации изотопов, а в сочетании с измерением интенсивностей линий позволяет давать оценки о количестве материала.

К настоящему времени разработаны коммерчески доступные эффективные инструменты для анализа спектра γ -излучения материалов. Многоканальный анализатор IMCA (Inspector Multichannel Analyser) построен на базе технологии цифровой обработки сигнала и может работать совместно с различными типами детекторов: германиевыми высокой чистоты HpGe, теллурид кадмиевые CdZnTe и иодид натрия NaI, которые допускают высокое, среднее и низкое энергетическое разрешение. Разработан также вариант миниатюрного многоканального анализатора MMCA (Miniature Multichannel Analyser). Этот анализатор значительно меньше и легче прежде используемого анализатора PMCA (Portable Multichannel Analyser) и, к тому же, имеет в три раза большее время непрерывной работы от батарей.

Международное Агентство использует для целей инспекций ряд γ -спектрометров, различающиеся, в основном, по разрешающей способности и возможностям дальнейшей обработки информации. Многие из них включают отмеченные выше многоканальные анализаторы. Данные о некоторых используемых приборах приведены в табл. 3.4.

Техника подсчета нейтронных совпадений является устойчивой, надежной и точной и широко используется для определения содержания Pu и U^{235} . Современные системы счета нейтронных совпадений колодезного типа способны обрабатывать импульсы в диапазоне скоростей счета, различающихся более чем на шесть порядков.

Пассивные системы счета нейтронных совпадений позволяют определять массу плутония, регистрируя нейтроны спонтанного деления в основном четных изотопов (^{238}Pu , ^{240}Pu , ^{242}Pu). Используя данные по изотопному составу плутония результат измерения – массу $^{240}\text{Pu}_{\text{eff}}$ можно перевести в полную массу Pu в образце.

Таблица 3.4

Гамма-спектрометры, используемые в практике гарантий МАГАТЭ

Обозначение системы	Название, тип системы	Применение и комментарий
HM-5	Hand-held Assay Probe	Современный ручной цифровой гамма-спектрометр позволяет определять мощность дозы, проводить поиск источников излучения, определять длину активных частей твэлов и ТВС, определять присутствие U и Pu. Базовый вариант прибора включает NaI-детектор. Для специальных приложений может быть подключен CdZnTe-детектор. Запоминает до 50 спектров (каждый по 1024 канала), которые передаются в компьютер для дальнейшей обработки
IMCN, IMCC, IMCG	На базе анализатора IMCA	При использовании HfGe-детектора (IMCG) представляет высокоразрешающую спектрометрическую систему. Применяется для определения обогащения урана, изотопного состава плутония
MMCN, MMCC, MMCG	На базе анализатора MMCA	В комбинации с CdZnTe-детектором (MCC) и ноутбуком (Palmtop) представляет портативную (помещаемую в обычный портфель), мощную и гибкую спектрометрическую систему, подходящую для многих инспекционных целей

Делящийся изотоп ^{235}U не подвержен в достаточной степени спонтанному делению, чтобы можно было его регистрировать с помощью пассивных систем. В этом случае регистрируют вторичное вынужденное нейтронное излучение, которое возникает в результате облучения нейтронами AmLi источника (активные системы). При этом для низкоэнергетических падающих нейтронов индуцированные деления в ^{238}U образца дают незначительный вклад в измеряемую скорость нейтронных совпадений.

Системы счета нейтронных совпадений имеют две основные геометрические конфигурации детекторов. Детекторы колодезного типа, которые полностью заключают образец внутри себя, и детекторы воротникового типа, охватывающие снаружи образец. Геометрия колодезных детекторов предпочтительнее, так как в этом случае имеется возможность регистрации всех испускаемых нейтронов. Однако альтернативный вариант с воротниковой геометрией позволяет проводить измерения образцов, которые слишком велики и не могут поместиться внутри колодезного детектора (например, ТВС). МАГАТЭ применяет в инспекционной деятельности более двадцати различных типов нейтронных приборов, характеризующихся различными кон-

структивными особенностями, и приспособленными для определенных размеров, форм образцов и диапазонов масс Pu, U. Некоторые из них отмечены в табл. 3.5.

Таблица 3.5

Приборы регистрации нейтронных совпадений для определения массы делящихся материалов

Обозначение прибора	Название, тип прибора	Применение и комментарий
Приборы счета нейтронных совпадений пассивного типа		
FAAS	Fuel Assembly/Capsule Assay System	Проверка массы плутония в необлученных MOX-топливных сборках
HLNC	High Level Neutron Coincidence Counter	Проверка массы плутония (от 20 г до 2 кг) в балк-материалах (таблетки, порошки, скрап и т.д.)
INVS	Inventory Sample Counter	Контроль массы плутония (в диапазоне от 0,1 г до 300 г) в образцах. Имеются варианты прибора для контроля масс плутония в перчаточных боксах
Приборы счета нейтронных совпадений активного типа		
AWCC	Active Well Coincidence Counter	Проверка содержания ^{235}U в образцах с высокообогащенным ураном
UNCL	Uranium Neutron Coincidence Collar	Проверка содержания ^{235}U в топливных сборках низкого обогащения
WCAS	Waste Crate Assay System	Проверка ядерных материалов в отходах

Неразрушающие измерения облученных ядерных материалов. Методы проверки облученного ядерного топлива включают регистрацию нейтронов, гамма-квантов, а также ультрафиолетовое свечение Черенкова. Продукты деления, находящиеся в облученном топливе, дают очень высокий радиационный фон. Это обстоятельство, в основном, и определяет тип приборов, применяемых для верификации отработанного топлива.

Главным источником нейтронов, излучаемых отработанным топливом, являются спонтанные деления изотопов ^{242}Cm и ^{244}Cm . Эти изотопы нарабатываются в реакторе за счет последовательных захватов нейтронов ядрами трансурановых элементов. Существует несколько подходов к регистрации нейтронов отработанного топлива в условиях интенсивного гамма-фона. Например, выбирают такие детекторы, которые либо нечувствительны к гамма-излучению, либо защищают детектор нейтронов от проникновения гамма-излучения, одновременно позволяя проходить через защиту

нейтронам. В табл. 3.6 приведены некоторые измерительные системы, применяемые Агентством для проверки отработанного топлива реакторов.

Таблица 3.6

Приборы проверки отработанного топлива

Обозначение прибора	Название, тип прибора	Применение и комментарий
FDET	Fork Detector Irradiated Fuel Measuring System	Детекторная головка прибора содержит нечувствительные к гамма-излучению нейтронные детекторы (четыре газонаполненных пропорциональных счетчика деления) и соответствующие интенсивному гамма-излучению две газонаполненные ионизационные камеры. Соотношение нейтронных и гамма-данных в сочетании с дополнительной информацией другого рода позволяет судить о полученном флюенсе, о начальном содержании делящегося материала и о числе циклов облучения в реакторе
SFAT	Spent Fuel Attribute Tester	Прибор включает многоканальный анализатор гамма-излучения и детектор на основе NaI или CdZnTe. Обеспечивает качественную проверку присутствия облученного топлива посредством детектирования характерных линий от продуктов деления ^{137}Cs , ^{144}Pr и продуктов активации ^{60}Co . Прибор особенно полезен в ситуациях, когда трудно использовать приборы анализа свечения Черенкова
ICVD, DCVD	Cerenkov Viewing Device, Digital Cerenkov Viewing Device	ICVD – ручной прибор, используемый для идентификации облученных топливных сборок легководных (в основном) реакторов посредством анализа свечения Черенкова. DCVD – высокочувствительное цифровое устройство для анализа свечения Черенкова. Применяется к топливу с длительной выдержкой и малых выгораний

Методы разрушающего анализа. Разрушающие измерения с целью определения как элементного, так и изотопного состава применимы ко всем формам балк-материалов, встречающихся на предприятиях ЯТЦ. Разрушающие измерения позволяют Агентству:

- убедиться в отсутствии переключений длительного характера материалов, находящихся под гарантиями;
- удостоверять качество рабочих стандартов, используемых для калибровки приборов неразрушающего анализа;

- проводить периодическую верификацию измерительных систем предприятия.

В общем случае разрушающие проверочные измерения, проводимые Агентством, включают следующие последовательные этапы:

- 1) взятие независимых проб;
- 2) их кондиционирование на месте с тем, чтобы во время транспортирования не изменялась их целостность;
- 3) пакетирование, опечатывание и отправка проб в лаборатории МАГАТЭ;
- 4) статистическая оценка результатов анализа.

Основные аналитические методы разрушающего анализа, применяемые в практике инспекционной деятельности Агентства приведены в табл. 3.7. В этой таблице даны оценки случайной и систематической составляющей погрешности результатов измерений материалов ядерного класса чистоты или подобной химической чистоты. Очевидно, что влияние самого пробоотбора, а также наличие примесей в материале могут сильно изменить приведенные в табл. 3.7 данные.

Таблица 3.7

Основные методы разрушающего анализа, используемые МАГАТЭ

Метод	Измеряемая величина	Тип анализируемого материала	Погрешность (% отн.) случайная и систематическая	
Элементный анализ				
Потенциометрическое титрование урана (метод Дэвиса–Грэя)	U	U, U–Pu, U–Th ^{а)}	0,05	0,05
Потенциометрическое титрование Pu (метод МакДональда–Сэвиджа)	Pu	Pu материалы ^{а)}	0,1	0,1
Калориметрия плутониевых растворов	Pu	Чистые Pu материалы	0,1	0,1
Гравиметрия с прокаливанием	U	Чистые окислы U	0,05	0,05
К–рентгеновский флуоресцентный анализ	Pu	Pu материалы ^{а)}	0,2	0,2
Рентгеновская флуоресцентная спектрометрия	Pu, U	Чистые U, Pu окислы и MOX ^{а)}	0,3	0,3
Масс–спектрометрия с изотопным разбавлением	U, Pu	Входные растворы отработанного топлива, Pu и U–Pu материалы	0,1	0,1

Метод	Измеряемая величина	Тип анализируемого материала	Неопределенность (% отн.) случайная систематическая	
Изотопный анализ				
Термоионизационная масс–спектрометрия	U, Pu изотопы	все Pu, U материалы, входные растворы отработанного топлива	0,05 ^{б)}	0,05 ^{б)}
Гамма–спектрометрия высокого разрешения (Ge детектор)	Pu изотопы, Am, Np	Чистые U, Pu материалы	0,5–2,0	0,5–2,0
Гамма–спектрометрия (NaI детектор)	²³⁵ U	Низкообогатщенные U материалы	0,2–0,5	0,2–0,5
Альфа–спектрометрия	²³⁸ Pu	Pu материалы	0,2	0,3

а) за исключением ОЯТ;

б) для отношений основных изотопов.

Деятельность МАГАТЭ в области гарантий

Инспекционная деятельность МАГАТЭ зависит от масштабов ядерных операций, осуществляемых государством. Эти операции относительно невелики в государствах, в которых действует, например, лишь небольшой исследовательский реактор, и могут быть весьма значительными в тех государствах, где существует много установок ядерного топливного цикла. Объем контрольной деятельности возрастает при увеличении количества предприятий ядерного топливного цикла в стране. В табл. 3.8 приведены примерные количества ЯМ, находящихся под гарантиями МАГАТЭ. Видно, что объем контролируемых ЯМ непрерывно возрастает.

Число установок, находящихся под гарантиями МАГАТЭ, непрерывно возрастает. При этом инспекционная деятельность, включающая независимые измерения ЯМ и их контроль с помощью средств сохранения и наблюдения, зависит в значительной мере от характера ядерных установок, находящихся под гарантиями. Для реакторов и хранилищ, где материалы содержатся в виде изделий, таких как топливные сборки, требуется меньше инспекторских усилий, чем для установок с материалами в балк-форме, где большая часть ЯМ обычно находится в движении или технологической обработке. В табл. 3.9 приведены количества установок различного типа, находящиеся под гарантиями МАГАТЭ.

Таблица 3.8

**Количества ЯМ, находящихся под гарантиями МАГАТЭ в государствах,
не обладающих ядерным оружием (по состоянию на 1996 г)**

Материал	Количество ЯМ, т					
	1995 г.		1997 г.		2002 г.	
	INFCIRC/153	INFCIRC/66	INFCIRC/153	INFCIRC/66	INFCIRC/153	INFCIRC/66
Плутоний	388	29	430–460*)	32–35	540–610	39–44
Высокообогащенный уран	10,0	0,4	10,0	0,4	10,0	0,4
Низкообогащенный уран	36900	2410	39200 – 41100	2700 – 2800	44900 – 50300	3400 – 3800
Исходный материал	70200	3980	80000 – 84000	4500 – 4700	108200 – 121200	5600 – 6300

*) прогнозные данные.

Таблица 3.9

**Установки, находящиеся под гарантиями МАГАТЭ в государствах,
не обладающих ядерным оружием (данные на 1999 г.)**

Тип установки	INFCIRC/153	INFCIRC/66
Энергетические реакторы	231	14
Исследовательские реакторы и критические сборки	173	11
Установки по конверсии	13	1
Установки по производству топлива	39	5
Установки по переработке	6	1
Установки по обогащению топлива	10	0
Отдельные хранилища	64	2
Прочие установки (> 1 эфф. кг)	76	2
Прочие установки (< 1 эфф. кг)	481	22
Неядерные установки	0	2
ВСЕГО:	1093	60

Можно сделать вывод, что по своим масштабам система гарантий МАГАТЭ приближается к глобальной, а бесконтрольных материалов остается совсем немного. Тем не менее существуют некоторые проблемы в реализации системы гарантий МАГАТЭ. В первую очередь, трудности выражаются в существовании пороговых государств и эффективности самих гарантий. В связи с этим МАГАТЭ предпринимает меры на пути укрепления режима гарантий. В 1995 г. Советом управляющих МАГАТЭ был создан Комитет по

повышению действенности и эффективности гарантий, которому было поручено разработать проект типового дополнительного протокола с целью повышения возможностей Агентства обнаруживать любую незаявленную ядерную деятельность. В 1997 г. Совет управляющих одобрил подготовленный Комитетом типовой дополнительный Протокол к всеобъемлющим соглашениям по гарантиям. Протокол вступает в силу после получения Агентством письменного уведомления от государства о приемлемости условий протокола, либо после его подписания представителями государства и Агентства.

В настоящее время государства-члены МАГАТЭ предоставляют заявления, включающие информацию о ЯМ, связанных с этими ЯМ процессах и о ядерных установках, содержащих ЯМ. Протокол предусматривает предоставление расширенного заявления о ядерной деятельности государства. Такое заявление в сочетании с определенной деятельностью по проверке должны сделать ядерный топливный цикл государства и связанную с ним деятельность более прозрачными. В дополнение к данным обо всех ядерных материалах расширенное заявление включает информацию обо всех других видах ядерной деятельности, в том числе:

- описание всех процессов и местонахождение всех объектов, относящихся к ядерной деятельности (производство, исследования и разработки, обучение персонала);
- идентификация промышленных, коммерческих и военных установок, расположенных в непосредственной близости от ядерных установок.

Любые процессы производства ЯМ или изделий, содержащих ЯМ, оставляют некоторые следы в окружающей среде. Размеры и характер этих следов зависят от целого ряда факторов, включая технологический процесс, материалы, меры по ограничению потерь и возможные пути миграции следов ЯМ за пределами ядерной площадки. Так результаты полевых испытаний (Швеция, 1993 г.) показали, что следы деятельности ядерных установок можно обнаружить в пробах воды и отложений на расстоянии до 20 км от установки в зависимости от местных условий переноса и перемешивания вод. Поэтому, дополнительным Протоколом предусматривается широкое использование чувствительных методов мониторинга окружающей среды на предмет обнаружения следов деятельности ядерных установок.

Обеспечение доступа инспекторов к материалам, оборудованию и установкам является важнейшим аспектом осуществления гарантий.

Для обычных инспекций в рамках соглашения INFCIRC/153 обеспечивается доступ к ключевым местам, признанным необходимыми для выполнения Агентством своих обязательств по гарантиям. Более широкий доступ – это ключевой фактор в укреплении системы гарантий. Это касается доступа к любому месту на площадке установок, находящихся под гарантиями МАГАТЭ. Расширенный доступ также подразумевает места, включенные в расширенное заявление, которые не содержат ЯМ или содержат небольшие количества ЯМ, освобожденные от гарантий, но если эти места относятся к ядерной деятельности, указанной в расширенном заявлении. Кроме того, в соответствии с дополнительным Протоколом для повышения прозрачности ядерной деятельности государство должно стремиться облегчить доступ к промышленным, коммерческим или военным установкам, находящимся в непосредственной близости от ядерных установок.

В отношении государства, имеющего соглашение о всеобъемлющих гарантиях и вступивший в силу дополнительный протокол, оценка всей доступной информации должна показать отсутствие не только свидетельств переключения ядерного материала, поставленного под гарантии, но и незаявленных ядерных материалов или деятельности. Поэтому, цель применения мер гарантий состоит в том, чтобы прийти к достоверному выводу, что весь ядерный материал в государстве поставлен под гарантии и по-прежнему используется в мирной ядерной деятельности или же соответствующим образом учтен. Чтобы быть в состоянии прийти к такому выводу, Агентству необходимо провести на уровне государства оценку всей информации, полученной в результате выполнения соглашений о всеобъемлющих гарантиях и дополнительного протокола, а также всей информации, доступной из других источников.

Уверенность Агентства и государств-членов в достоверности выводов по результатам применения гарантий напрямую зависит от качества мер, используемых для сбора, анализа, и оценки значимой информации. Эти меры должны быть исчерпывающими, детальными и эффективными. Заявления в соответствии с дополнительным протоколом предоставляют большой объем информации о ядерных программах государств. Дополнительную информацию получают в результате реализации мер расширенного доступа на местах. Агентство собирает значительную информацию из широкого спектра открытых источников, одновременно оценивая ее надежность, и применяет новые технологии, такие как использование изображений с коммерческих спутников. МАГАТЭ получает также информацию, доброволь-

но предоставляемую государствами—членами об экспорте ядерных материалов, о случаях незаконного оборота материалов и др. Оценка ядерной деятельности государства проводится тогда на основе трех составляющих:

- оценка ядерной программы государства на основе данных о переключении заявленного ядерного материала. Эта оценка служит базой для последующих оценок;
- оценка делается после осуществления мер дополнительного протокола. Рассматривается информация, содержащаяся в первоначальных расширенных заявлениях государства, а также результаты применения мер дополнительного протокола;
- третья составляющая включает выводы, полученные в результате постоянного мониторинга ядерной программы государства.

Реализация мер дополнительного Протокола позволяет МАГАТЭ сделать более прозрачной ядерную деятельность государств, одновременно признавая за государствами право на применение мер защиты информации о чувствительных местах.

3.2. Система экспортного контроля

Экспортный контроль является одним из основных инструментов по предотвращению распространения ЯО [3]. Он включает комплекс мер, обеспечивающих выполнение принятых международных норм и правил торговли материалами, оборудованием и технологиями, которые могут быть использованы при создании ЯО. Система экспортного контроля основывается на лицензионном порядке экспорта товаров и технологий, входящих в специально разработанные контрольные списки. Экспортный контроль реализуется на двух принципиально разных уровнях: в виде международных режимов и национальных систем государств.

Международный режим экспортного контроля является объединением усилий государств на основе взаимных договоренностей, направленных на осуществление контроля над экспортом товаров, имеющих отношение к разработке и производству ЯО. Международные режимы экспортного контроля базируются на требованиях Договора о нераспространении ядерного оружия. Статья III.2 Договора не разрешает передачу в любое неядерное государство исходного или специального расщепляющегося материала и оборудования, предназначенного для производства специального расщепляющегося материала, если на них не распространяются гарантии МАГАТЭ.

Однако требования статьи III.2 Договора не являются полными, и ряд вопросов оставался нерешенным, например:

не определены конкретно оборудование и материалы, предназначенные для производства специального расщепляющегося материала;

не рассмотрены условия контроля передачи ядерных технологий;

не было требования принятия полномасштабных гарантий МАГАТЭ. В результате минимальным условием международных передач ЯМ в неприсоединившиеся неядерные государства на долгие годы стала неполная система гарантий МАГАТЭ INFCIRC/66.

Комитет Цангера

Необходимость разрешения этих проблем стимулировала возникновение международных организаций, таких как Комитет Цангера и Группа ядерных поставщиков (Лондонский клуб), которые разрабатывали механизмы и рекомендации по контролю за международными передачами ЯМ, ядерных технологий и оборудования. Список государств, входящих в эти международные режимы, приведен в табл. 3.10.

Таблица 3.10

Международные режимы экспортного контроля

Государство	Комитет Цангера	ГЯП	Государство	Комитет Цангера	ГЯП
Австралия	+	+	Люксембург	+	+
Австрия	+	+	Нидерланды	+	+
Аргентина	+	+	Новая Зеландия		+
Белоруссия		+	Норвегия	+	+
Бельгия	+	+	Польша	+	+
Болгария	+	+	Португалия	+	+
Бразилия		+	Россия	+	+
Великобритания	+	+	Румыния	+	+
Венгрия	+	+	Словакия	+	+
Германия	+	+	Словения	+	+
Греция	+	+	США	+	+
Дания	+	+	Турция	+	+
Израиль			Украина	+	+
Ирландия	+	+	Финляндия	+	+
Исландия			Франция	+	+
Испания	+	+	Чехия	+	+
Италия	+	+	Швейцария	+	+
Канада	+	+	Швеция	+	+
Кипр		+	ЮАР	+	+
Китай	+		Япония	+	+
Корея, Южная	+	+			
Латвия		+	ИТОГО	35	39

В период с 1971 по 1974 гг. группа государств, наиболее продвинутых в ядерной области (первоначально 15 государств), провела серию совещаний в Вене. Возглавлял эти встречи профессор из Швейцарии – Клод Цангер. Целью этих встреч было достижение договоренностей по вопросам:

- более конкретного определения оборудования и материалов, которые предназначены для обработки, использования или производства специального расщепляющегося материала;
- выработки условий для регулирования экспорта такого оборудования и материалов в соответствии со статьей III.2 ДНЯО.

Были достигнуты следующие условия экспорта ЯМ и оборудования:

- при передаче исходного или расщепляющегося материала требуется, чтобы поставляемый материал находился под гарантиями МАГАТЭ;

- оборудование и материалы, входящие в «Исходный список» и предназначенные для производства специального расщепляющегося материала, могут поставляться только при условии, что полученный на этом оборудовании расщепляющийся материал будет находиться под контролем МАГАТЭ;

- реэкспорт материалов и оборудования может осуществляться только при условии, что этот материал (оборудование) будет находиться под контролем МАГАТЭ.

Комитет составил Исходный список (Trigger List) предметов ядерного экспорта. Этот исходный список оборудования и материалов включает:

- исходный и специальный расщепляющийся материал;
- реакторы и реакторное оборудование;
- неядерные материалы для реакторов;
- установки для переработки облученных топливных элементов и соответствующее оборудование;
- установки для изготовления топливных элементов;
- установки для разделения изотопов урана и соответствующее оборудование;
- установки для производства тяжелой воды, дейтерия и дейтериевых соединений и соответствующее оборудование.

В 1974 г. договоренности Комитета Цангера и «Исходный список» оборудования и материалов, требующих при передачах международного контроля, был опубликован МАГАТЭ в виде документа INFCIRC/209.

Группа ядерных поставщиков

После ядерного испытания, произведенного Индией в 1974 г., стало ясно, что договоренности Комитета Цангера не смогли полностью перекрыть пути распространения ядерного оружия. В 1974 г. страны – основные поставщики ядерных материалов и оборудования – организовали Группу ядерных поставщиков (ГЯП) для того, чтобы дополнить и усилить условия ядерного экспорта, сформулированные в рамках Комитета Цангера. ГЯП подобно Комитету Цангера является добровольным коллективным политическим соглашением стран-участников. С 1991 г. у ГЯП нет официальных связей с МАГАТЭ.

В 1976 г. эта Группа разработала и опубликовала основополагающий документ «Руководящие принципы ядерного экспорта» (INFCIRC/254). ГЯП дополнила Список по сравнению с версией списка, составленного Комитетом Цангера (конверсионные технологии урана) и усилила требования при их передаче в другие страны, а также ввела ограничения на поставку предметов двойного использования.

Условия поставок предметов исходного списка

Часть 1 Руководящих принципов ГЯП содержит условия поставки и исходный список материалов, установок, оборудования и компонентов, которые могут быть использованы для производства специального расщепляющегося материала. В отличие от исходного списка Комитета Цангера, список ГЯП контролирует также технологии производства объектов, указанных в исходном списке.

В понимании ГЯП «технология» означает технические данные в материализованной форме, являющиеся важными для конструирования, сооружения и эксплуатации ядерных установок: по обогащению, переработке и производству тяжелой воды.

В качестве условия поставок предметов исходного списка требуется обеспечение их физической защиты не ниже уровня, рекомендованного МАГАТЭ. Руководство ГЯП запрещает экспорт исходного и специального расщепляющегося материала, а также продукции и соответствующей технологии из исходного списка:

- в любую неядерную страну, у которой нет юридических обязательств по полномасштабным гарантиям МАГАТЭ;
- если экспортирующая страна не уверена, что экспорт будет использован в мирных целях.

Исключение может быть сделано лишь в случае:

- если экспорт считается важным для безопасной эксплуатации существующей установки, находящейся под гарантиями МАГАТЭ;
- если экспорт осуществляется в соответствии с соглашениями, достигнутыми до 4 апреля 1992 г. (встреча участников ГЯП в Варшаве).

Предметы двойного использования и условия их поставки

Часть 2 Руководящих принципов ГЯП содержит условия поставки и исходный список материалов и оборудования двойного использования, подпадающих под экспортный контроль.

Материалами и оборудованием двойного использования являются те, которые могли бы существенным образом способствовать деятельности по созданию ядерных взрывных устройств.

Список предметов двойного использования включает:

промышленное оборудование: радиально– и линейно–обкатные станки; блоки инструментов с ЧПУ; вакуумные печи; прессы; роботы; оборудование для вибрационных испытаний;

материалы: алюминий; бериллий; висмут; вольфрам; цирконий и т.д.;

оборудование для разделения изотопов урана;

оборудование для установок по производству тяжелой воды (не включенное в Исходный список);

оборудование для разработок подрывных систем;

оборудование для проведения взрывов;

компоненты и оборудование для проведения испытаний ЯО;

другие предметы экспорта (тритий).

Руководящие принципы запрещают экспорт продукции и технологий двойного использования, подпадающих под действие экспортного контроля (из списка), в любую неядерную страну для использования в деятельности, связанной с ядерными взрывами, или в установках ЯТЦ, не обеспеченных гарантиями МАГАТЭ.

Экспортный контроль в России

Участие страны в международных режимах экспортного контроля подразумевает:

- создание национальной правовой базы, соответствующей принятым договоренностям;
- следование принципам режимов в политике страны;
- участие в форумах стран–участников режимов.

Закон об экспортном контроле

С 1999 г. в нашей стране действует Закон «Об экспортном контроле». В нем определены основные методы правового регулирования внешнеэкономической деятельности:

- идентификация контролируемых товаров и технологий;
- разрешительный порядок осуществления внешнеэкономических операций с контролируемыми товарами и технологиями (лицензирование);
- таможенный контроль;
- применение мер государственного принуждения в отношении лиц, нарушивших порядок внешнеэкономической деятельности.

Характерной чертой этого закона является расширительное толкование понятия экспорта (статья 1). Внешнеэкономическая деятельность – внешнеторговая, инвестиционная и иная деятельность, включая производственную кооперацию в области международного обмена товарами, информацией, работами, услугами, результатами интеллектуальной деятельности.

Внутрифирменные программы экспортного контроля (ВПЭК)

Закон обязывает (статья 16) создавать ВПЭК все организации, осуществляющие научную или производственную деятельность в области поддержания обороноспособности и безопасности РФ и получающих доходы от операций с контролируемыми товарами и технологиями. Организации создают ВПЭК в целях обеспечения установленного российским законодательством и нормативными актами порядка осуществления внешнеэкономической деятельности в отношении товаров, информации, услуг, результатов интеллектуальной деятельности, которые могут быть использованы при создании оружия массового поражения. В ГНЦ РФ «Физико–энергетический институт» разработан «Типовой проект ВПЭК для предприятий Минатома РФ».

Список литературы

1. Бабаев Н.С., Адамов Е.О., Рыжов М.Н., Соболев И.А. МАГАТЭ. Грин Лон, 1997.
2. Safeguards Techniques and Equipment. /International Nuclear Verification Series, No.1 (Revised). - IAEA, Vienna, 2003.
3. Владимирова С.В., Зябкин М.В., Ключко Г.Г., Левченко В.М. и др. Учебный курс по ядерному экспортному контролю. Обнинск: ГНЦ РФ ФЭИ, 2003.

ГЛАВА 4

НАЦИОНАЛЬНЫЕ ГАРАНТИИ НЕРАСПРОСТРАНЕНИЯ. СПЕЦИАЛЬНОЕ ОБРАЩЕНИЕ С ЯМ И ЕГО СОСТАВЛЯЮЩИЕ

Причины специального обращения с ядерными материалами

Обеспечение безопасности ЯМ требует соответствующих условий обращения с ними. Эти условия являются результатом применения специально разработанных мер. Совокупность мер, направленных на обеспечение безопасности при обращении с ЯМ (термин «безопасность» включает ядерную, радиационную, техническую, пожарную безопасность, сохранность ЯМ, обеспечение знаний об ЯМ), и представляет **специальное обращение с ЯМ**.

Значительные усилия в мире прилагаются к тому, чтобы обеспечить специальное обращение с ядерными материалами. В том числе, специальное обращение направлено на обеспечение сохранности и полного знания о ЯМ. Это подразумевает три главные составляющие специального обращения: физическая защита, учет и контроль за ядерными материалами (ФЗУК ЯМ). Эти три составляющие специального обращения являются основой национальных гарантий нераспространения у нас в стране.

Выделим несколько факторов особого (специального) обращения с ядерными материалами.

1. Ядерные материалы, по крайней мере, часть из них представляют достаточную коммерческую и энергетическую ценность. Для того чтобы это проиллюстрировать, достаточно упомянуть подписанное в 1993 г. соглашение, в соответствии с которым Россия поставит в Соединенные Штаты 500 т высокообогащенного урана в течение 20 лет. Этот высокообогащенный уран предварительно разбавляется до низкообогащенного и затем поставляется в США. По условиям контракта корпорация США «United States Enrichment Corporation» перерабатывает его в топливо ядерных реакторов и реализует на мировом рынке. За эти 500 т урана американцы должны будут заплатить ~ 8 млрд. долларов. Получается цена около 16 долларов за грамм высокообогащенного урана. Чем ниже качество материала, тем, конечно, меньше его цена. На мировых рынках 1 кг природного урана стоит \$60–80 (стоимость меняется со временем).

Об энергетической ценности ЯМ говорить не требуется, так как вся ядерная энергетика мира построена на этом свойстве ЯМ. Феноменально высокая теплотворная способность ядерного топлива связана с тем, что при каждом акте деления выделяется энергия ~ 200 МэВ, для сравнения в акте химического взаимодействия кислорода с углеродом (сгорание органического топлива) ~ 4 эВ.

2. Второй фактор – это то, что ядерные материалы (практически все) представляют радиационную или химическую опасность и обращение с ними должно быть соответствующее. Авария на комбинате «Маяк» на Южном Урале (Кыштым) 29 сентября 1957 г. явилась следствием нарушения в системе охлаждения емкости, в которой хранилось 70–80 т высокоактивных отходов радиохимического производства. Озеро Карачай было превращено в огромную радиоактивную свалку, полная ликвидация которой представляет собой большую проблему в настоящее время.

3. Ядерные материалы представляют ядерную опасность. Многие из них представляют опасность с точки зрения возникновения критичности. В случае плохого учета и неправильных действий могут возникать неконтролируемые цепные реакции, которые приводят к тяжелым последствиям. Катастрофа на четвертом блоке Чернобыльской АЭС – пример неправильных действий персонала.

4. Четвертым фактором является то, что существует реальная угроза использования ядерных материалов в военных или террористических целях, т.е. ЯМ могут применяться для изготовления ядерного оружия и ядерных взрывных устройств. Последний фактор вызывает все большую и большую озабоченность как в мире, так и у нас в России. Это является основной причиной создания системы национальных гарантий нераспространения, противодействующей беспрепятственному распространению ядерного оружия в мире.

Национальные гарантии нераспространения

На уровне отдельного государства нераспространение обеспечивается целым рядом факторов, среди которых отметим следующие:

1. Профессиональная культура людей, работающих с ЯМ, и пропаганда идей нераспространения в целях осознания важности проблемы нераспространения широкими слоями населения. Среди таких мероприятий можно выделить подготовку высококвалифици-

рованных специалистов, переподготовку специалистов отрасли, деятельность центров связи с общественностью и др. Все это вместе можно назвать **культурой нераспространения**.

2. Меры и средства, обеспечивающие нераспространение ЯМ. К таким мерам относятся:

- нормативно–правовые (законы, правила, указы, положения и распоряжения);
- организационные (персонал, формы, обеспечение и управление деятельности в области нераспространения);
- технические меры и средства (оборудование, приборы, информационное обеспечение).

Совокупность этих мер и средств представляет собой национальные гарантии нераспространения. Национальные гарантии осуществляет государство через органы управления использованием атомной энергии.

Главные составляющие специального обращения с ЯМ

Схематично системы УК и ФЗ ЯМ представлены на рис. 4.1. Видно, что каждая из систем включает множество различных мер и средств. В области УК и ФЗ ЯМ Россия широко сотрудничает с США и западноевропейскими странами. Пример – сотрудничество МИФИ с национальными лабораториями США.

В настоящее время СФЗ и СУиК ЯМ активно совершенствуются и развиваются на российских ядерных объектах. Работа проводится по следующим направлениям:

- совершенствование правовой и нормативной базы на федеральном, отраслевом и объектовом уровнях;
- разработка, производство и применение современных технических средств и систем;
- разработка и применение передовых методов анализа и проектирования СФЗ и СУиК ЯМ;
- совершенствование системы экспортного контроля;
- проведение мероприятий по обучению и повышению квалификации персонала.

Хотя СФЗ и СУиК ЯМ являются отдельными системами, их взаимозависимость при функционировании является достаточно очевидной. Например, эту зависимость легко видеть на рис. 1.5, если предположить отсутствие одной из ветвей специального обращения с ЯМ.

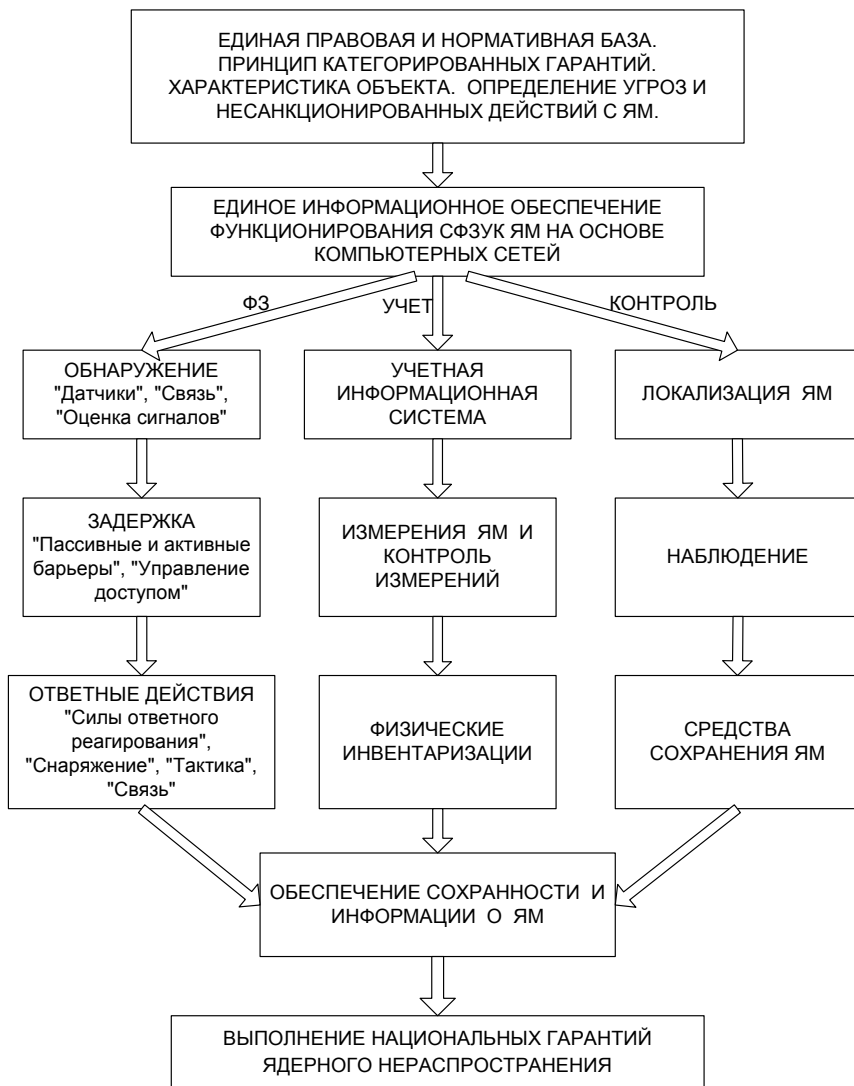


Рис. 4.1. УК и ФЗ ЯМ

Для того чтобы надежно выполнить цели национальных гарантий, необходимо создать эшелонированную защиту ЯМ. Эшелонированная защита означает, что если какая-то из мер не будет выполнена должным образом, это не повысит значительно риск переключения или кражи ЯМ. Учет, контроль и физическая защита ЯМ в определенных ситуациях являются взаимодополняющими и, таким образом, создают эшелонированную защиту ЯМ. Такая ситуация имеет место, если строится защита от несанкционированных действий различных нарушителей в условиях их сговора (например, при сговоре внутреннего нарушителя и охранников объекта). Или при существовании малых утечек ЯМ с охраняемого объекта. Физическая защита обеспечивает сохранность ЯМ в реальном масштабе времени. Однако обнаружение малых утечек ЯМ является проблематичным из-за существования порога чувствительности у аппаратуры, детектирующей ЯМ. В этом отношении система учета и контроля ЯМ естественно дополняет физическую защиту, так как малые утечки ЯМ в течение достаточно длительного времени диагностируются при проведении периодических инвентаризаций ЯМ на объекте.

Условия функционирования систем УК и ФЗ на объектах

Условия функционирования систем УК и ФЗ ЯМ определяются спецификой технологических процессов с ЯМ на объекте и их информационного обеспечения. Среди них можно выделить:

- привлекательность и количество ЯМ (категория ЯМ), находящихся на объекте;
- формы локализации ЯМ на объекте;
- способы информационного обеспечения работ с ЯМ на объекте.

Здесь важно отметить, что создание эффективно действующих систем УК и ФЗ ЯМ возможно лишь на основе максимального учета основных условий их функционирования на объекте. В зависимости от имеющихся ЯМ, их количества, технологических операций с ЯМ и информационного обеспечения работ, строятся соответствующие системы СФЗ и СУиК ЯМ.

Как отмечалось выше, уровень обеспечения физической защиты, учета и контроля ЯМ зависит от привлекательности и количества находящихся на объекте материалов. Максимальный уровень защиты и контроля обеспечивается тем ЯМ, потеря, кража, либо пере-

ключение которых может нанести наибольший урон национальной безопасности, здоровью людей или окружающей среде. Такой подход можно назвать принципом категоризированных гарантий. Концепция локализации ЯМ выражается в максимально компактном размещении ЯМ и обеспечении их безопасности за счет создания барьеров на пути к ним. Обычно локализация заключается в нахождении ядерных материалов внутри охраняемых зон, зданий, помещений, технологического оборудования, сейфов и контейнеров. При этом, чем выше степень локализации, тем проще осуществлять защиту, контроль и учет ЯМ. Подробнее вопросы локализации ЯМ рассмотрены во второй части книги. Работы с ЯМ на ядерных объектах проводятся в рамках концепции информационной безопасности. Эта концепция ориентирована на обеспечение полноты информационного описания работ с ЯМ для нужд управления технологическими процессами и, одновременно, строго целевого использования информации при условии защиты от несанкционированного доступа. Использование компьютерных сетей закладывает хорошие предпосылки для развития и совершенствования систем УК и ФЗ ЯМ на объектах. Информационная система учета ЯМ и ее компьютеризированные варианты рассматриваются во второй части книги. Таким образом, в условиях разделения выполняемых функций системы УК и ФЗ ЯМ активно развиваются, взаимодействуя в процессе своего функционирования и усиливая эшелонированную защиту ЯМ от потенциальных несанкционированных действий нарушителей.

ГЛАВА 5

НОРМАТИВНО–ПРАВОВЫЕ ОСНОВЫ РАЗВИТИЯ И ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ УК и ФЗ ЯМ В РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

5.1. Правовая основа деятельности в области УК и ФЗ ЯМ

В данном разделе мы рассмотрим, как упорядочена в России деятельность по использованию атомной энергии (АЭ), отношения, возникающие в процессе этой деятельности и место в этом порядке систем УК и ФЗ ЯМ.

Одной из фундаментальных основ в ядерной области является Закон об использовании атомной энергии, принятый в 1995 г. [1]. Правовые основы, изложенные в Законе, составляют достаточно полную картину системы обращения и управления ЯМ в Российской Федерации. Закон также дает возможность легко ориентироваться в вопросах упорядочения спектра всей деятельности (и соответствующих отношений) по использованию АЭ. Понятие права (и его диалектического антипода – обязанности) позволяет определенным образом упорядочить деятельность по использованию АЭ, включая всю деятельность с ЯМ.

В Законе отражен почти 50–летний опыт работы с ЯМ в России. Поэтому, по сути, он является главным регулирующим документом для безопасного обращения с ЯМ. Все статьи Закона проникнуты, в первую очередь, идеей обеспечения безопасного развития ядерной индустрии России. Это подразумевает правовое регулирование отношений, возникающих при осуществлении ядерной деятельности, которое включает:

- создание правовых основ системы государственного управления использованием АЭ и системы государственного регулирования безопасности;
- установление прав и обязанностей граждан и организаций, ответственности должностных лиц.

В современном мире безопасность обращения с ЯМ требует, чтобы любой ядерный материал был защищен от несанкционированных действий и достоверно представлен в информационных системах разного уровня. Этому служат меры УК и ФЗ ЯМ, яв-

ляющиеся главными составляющими специального обращения с ЯМ. Поэтому в Законе большое внимание уделяется системам УК и ФЗ ЯМ.

В документе рассматриваются три вида материалов: ядерные материалы, радиоактивные вещества и радиоактивные отходы. Нас будет интересовать, главным образом, ядерные материалы.

На рис. 5.1 показаны области деятельности с ЯМ, которые регулирует Закон об использовании АЭ. Надо отметить, что практически все значительные области деятельности с ЯМ, так или иначе, отражены и регулируются Законом. Однако следует подчеркнуть, что Законом регулируется деятельность с ЯМ в мирных целях. Деятельность, связанная с ядерным оружием и ЯЭУ военного назначения, осуществляется на основании иных документов.

Рассмотрим, как осуществляется регулирование деятельности с ЯМ (и ядерной деятельности, в целом) в нашей стране.

1. Фактически, все установки ядерной индустрии России являются объектами применения этого закона. В том числе:

- ядерные установки;
- радиационные источники – аппараты и оборудование, в которых содержатся радиоактивные вещества или генерируется ионизирующее излучение;
- пункты хранения ядерных материалов и радиоактивных веществ, хранилища радиоактивных отходов;
- ядерные материалы;
- радиоактивные вещества;
- радиоактивные отходы.

Таким образом, можно считать Закон об использовании атомной энергии всеохватывающим.

2. В зависимости от ядерной деятельности Закон в разных формах осуществляет ее регулирование. Надо отметить, что любая ядерная деятельность должна быть разрешенной, т.е. она должна быть лицензирована. Закон вменяет в обязанность проводить некоторые виды деятельности. Это относится, в первую очередь, к обеспечению безопасности использования атомной энергии. Другие виды деятельности Закон регулирует с помощью понятия права.

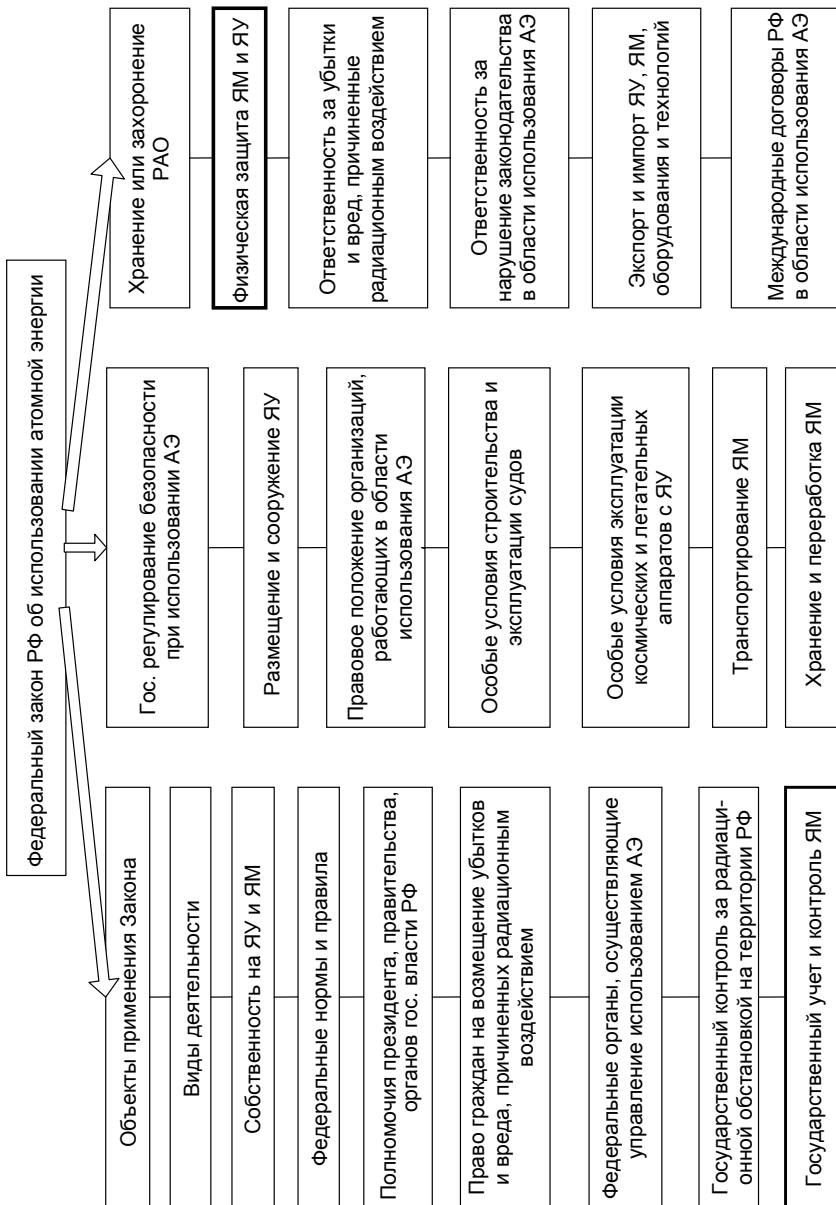


Рис. 5.1. Регулирование ядерной деятельности в соответствии с Законом об использовании атомной энергии

Законом вменяется в обязанность проведение следующих видов деятельности:

- физическая защита ядерных установок;
- учет и контроль ядерных материалов и радиоактивных веществ;
- государственный контроль за радиационной обстановкой;
- контроль за обеспечением ядерной, технической и пожарной безопасности;
- подготовку специалистов.

Закон регулирует следующие виды деятельности:

- размещение, проектирование, сооружение, эксплуатацию ядерных установок;
- обращение с ядерными материалами и радиоактивными веществами, в том числе при производстве, использовании, переработке, транспортировании и хранении ядерных материалов и радиоактивных веществ;
- проведение научных исследований;
- экспорт и импорт ядерных установок, оборудования, технологий, ядерных материалов.

До настоящего времени все ЯМ, ядерные установки, радиоактивные вещества, радиоактивные отходы, радиационные источники, пункты хранения находились в федеральной собственности. Допускалась лишь их передача в пользование юридическим лицам, имеющим лицензию на ядерную деятельность.

В настоящее время вступили в силу основополагающие правовые акты, которые изменили ситуацию с собственностью на ЯМ в нашей стране. А именно, статья 4 Федерального закона от 5 февраля 2007 г. № 13-ФЗ говорит, что ядерные материалы, принадлежащие РФ и находящиеся в пользовании государственных унитарных предприятий атомного комплекса, могут быть включены в состав имущества указанных унитарных предприятий, подлежащих приватизации.

Таким образом, ЯМ будут находиться в собственности ОАО и Федеральной собственности.

3. Развитие общих федеральных норм и правил является обязательным условием использования атомной энергии в нашей стране. Эти нормы и правила устанавливают требования к безопасному использованию атомной энергии. Их выполнение является обязательным при осуществлении любого вида деятельности.

Порядок разработки норм и правил должен предусматривать их предварительное опубликование в официальном печатном органе с целью широкого обсуждения.

Нормы и правила должны учитывать рекомендации международных организаций, например, МАГАТЭ. Наконец, нормы и правила публикуются в официальных печатных органах для упрощения доступа к ним.

В настоящее время в России разработаны и действуют: правила ядерной и радиационной безопасности, основные правила по учету и контролю ЯМ, правила физической защиты ЯМ и ЯУ и другие.

4. Закон определяет права органов власти, организаций и граждан по отношению к использованию атомной энергии.

Полномочия органов власти заключаются в следующем.

Президент РФ определяет основные направления государственной политики в области использования атомной энергии (АЭ) и принимает решения по чрезвычайным ситуациям.

Федеральное собрание (Дума и Совет федерации) принимает федеральные законы и утверждает бюджетное финансирование деятельности в области использования атомной энергии.

Правительство РФ:

- осуществляет управление находящимися в федеральной собственности ЯМ, ядерными установками, радиационными источниками, пунктами хранения и радиоактивными веществами;

- определяет функции и порядок деятельности органов управления использованием АЭ и органов государственного регулирования безопасности;

- принимает решения о проектировании, сооружении, эксплуатации, выводе из эксплуатации ядерных установок, радиационных источников и пунктов хранения;

- устанавливает порядок экспорта и импорта ядерных установок, оборудования, технологий и ЯМ;

- решает вопросы ввоза в страну отработавшего ядерного топлива в целях его переработки, включая временное хранение;

- определяет порядок организации системы государственного учета и контроля ЯМ;

- обеспечивает физическую защиту ЯМ, ядерных установок, радиационных источников, пунктов хранения и радиоактивных веществ;

- издает на основании федеральных законов постановления и распоряжения в области использования АЭ;

- организует разработку и обеспечивает выполнение федеральных целевых программ;

- обеспечивает выплату сумм по возмещению ущерба от радиационного воздействия в той части, в которой причиненные убытки и

вред превышают предел ответственности эксплуатирующей организации;

- координирует международное сотрудничество.

С выходом данного закона в свет граждане и организации получили ряд новых прав, среди которых отметим следующие.

Право на получение информации. Организации и граждане имеют право запрашивать и получать от органов исполнительной власти информацию по безопасности ядерных установок. Граждане имеют право бесплатно получать информацию о радиационной обстановке.

Право на возмещение убытков и вреда. Граждане, которым причинены убытки и вред в результате радиационного воздействия, имеют право на возмещение указанных убытков и вреда в полном объеме. Пример реализации этого права – Чернобыльская авария.

Права граждан при проведении медицинских процедур. В ходе проведения медицинских процедур право на принятие решения о применении ионизирующего излучения предоставляется гражданину.

5. Государственное управление использованием атомной энергии осуществляют специально уполномоченные правительством РФ органы управления – министерства: Минатом, Минобороны, Минтранс и другие.

В компетенцию этих органов управления входят:

- проведение государственной научно-технической, инвестиционной и структурной политики;
- разработка и реализация мер по обеспечению безопасности при использовании АЭ;
- разработка норм и правил;
- государственный учет и контроль ЯМ;
- физическая защита ядерных установок, ЯМ, радиоактивных веществ и пунктов их хранения;
- государственный контроль за радиационной обстановкой;
- формирование и реализация программ по обращению с радиоактивными отходами и другие функции.

6. Для своевременного выявления изменений радиационной обстановки, оценки, прогнозирования и предупреждения возможных негативных последствий радиационного воздействия для населения и окружающей среды на территории РФ осуществляется государственный контроль за радиационной обстановкой. Порядок организации и функционирования системы государственного контроля за радиационной обстановкой на территории РФ определяется Правительством РФ. Каждая эксплуатирующая организация, имеющая

ядерные материалы, радиоактивные вещества или радиоактивные отходы, обеспечивает радиационный контроль в санитарно-защитной зоне и зоне наблюдения. Например, в МИФИ есть служба радиационной безопасности, которая контролирует радиационную обстановку на территории института и в прилегающем районе.

7. Как было отмечено выше, виды деятельности, связанные с обеспечением безопасности использования АЭ, Законом определяются как обязательные. Среди них государственный учет и контроль ЯМ с целью определения наличного количества этих материалов в местах их нахождения, предотвращения потерь, несанкционированного использования и хищений, предоставления данных о ЯМ органам государственного управления и регулирования безопасности (статья 22). Ядерные материалы подлежат учету и контролю на федеральном и ведомственных уровнях в системе государственного учета и контроля ЯМ.

В силу своей важности в Законе отдельно вынесены вопросы государственного регулирования безопасности при использовании АЭ. Государственное регулирование безопасности при использовании АЭ предусматривает деятельность специально уполномоченного для этого правительством органа – Ростехнадзора РФ. Ростехнадзор осуществляет регулирование ядерной, радиационной, технической и пожарной безопасности. Ростехнадзор не зависит от других государственных органов, а также от организаций, деятельность которых связана с использованием атомной энергии. Ростехнадзор:

- участвует в разработке норм и правил использования АЭ;
- осуществляет лицензирование деятельности организаций;
- осуществляет надзор за физической защитой ядерных установок и ЯМ;
- осуществляет надзор за системой государственного учета и контроля ЯМ;
- проводит инспекции установок;
- применяет меры административного воздействия (например, штрафы) при нарушениях условий лицензии и правил безопасности.

8. Вопросы размещения и сооружения ядерных установок в ряде случаев вызывали негативное отношение определенных слоев населения. Поэтому в Законе специально оговорено, кто решает эти вопросы и на основании каких соображений. В том числе:

- решение о сооружении ядерных установок принимаются Правительством РФ;
- решение о месте размещения ЯУ принимаются совместно Правительством РФ и органами местной государственной власти;

• решение о размещении и сооружении ЯУ принимается с учетом потребности в ней и наличия необходимых для размещения ЯУ условий.

9. Закон определяет основные требования к эксплуатирующим организациям, т.е. тем организациям, которые признаны пригодными осуществлять деятельность с ядерными материалами. Эксплуатирующая организация должна иметь лицензию на право ведения работ. Она должна обладать достаточными материальными ресурсами для осуществления своих функций. Наконец, эксплуатирующая организация несет всю полноту ответственности за безопасность обращения с ЯМ и обеспечивает:

- учет индивидуальных доз облучения работников объектов;
- меры по защите работников и населения в случае аварии на ядерной установке;
- учет и контроль ЯМ;
- осуществление физической защиты установок и ЯМ;
- радиационный контроль;
- подбор, подготовку и поддержание квалификации работников ядерных установок.

На территории ядерных установок и их санитарно-защитных зон запрещается проведение несанкционированных общественных мероприятий, например, митингов и забастовок.

10. При обращении с ЯМ (хранение, переработка ЯМ) должна обеспечиваться надежная защита работников объектов, населения и окружающей среды от радиационного воздействия. При транспортировании ЯМ они приравниваются к особо опасным грузам.

11. Физическая защита ядерных установок обеспечивается эксплуатирующими организациями и специально уполномоченными государственными органами, а на действующих судах – их экипажами.

Требования к физической защите устанавливаются правилами физической защиты ядерных материалов и установок. Запрещается эксплуатация ядерной установки, использование ядерных материалов, если не приняты меры к обеспечению их физической защиты (статьи 49, 50).

Ограничение прав лиц, находящихся на территории ядерной установки. В интересах обеспечения физической защиты ЯУ работники объекта, граждане, посещающие объект в ознакомительных целях, а также их вещи и транспортные средства могут быть досмотрены, в том числе с применением специальных средств.

Допуск лиц к работе. К работе на ядерной установке допускаются лица, удовлетворяющие квалификационным требованиям и

получившие соответствующий допуск к работе, связанной с обеспечением государственной тайны.

Не допускаются к работе лица, подпадающие под перечень медицинских противопоказаний.

12. Ответственность за убытки и вред, причиненные радиационным воздействием, несет эксплуатирующая организация. Эксплуатирующие организации имеют предел ответственности за убытки и вред. Предел ответственности должен иметь финансовое обеспечение, которое складывается из собственных средств организации, страхового полиса, государственной гарантии и др. Наличие документального подтверждения финансового обеспечения является необходимым условием для получения эксплуатирующей организацией лицензии.

Правительство РФ обеспечивает выплату сумм по возмещению убытков и вреда, которые причинены радиационным воздействием в той части, в которой причиненные убытки и вред превышают установленный для данной эксплуатирующей организации предел ответственности.

13. Ответственность должностных лиц. Нарушение должностными лицами законодательства РФ в области использования атомной энергии влечет за собой дисциплинарную, административную или уголовную ответственность. К нарушениям относятся:

- нарушение требований к обеспечению ФЗ ЯУ;
- нарушение установленного порядка учета и контроля ЯМ;
- хищение, незаконное приобретение, хранение и продажа ЯМ;
- нарушение норм и правил использования АЭ;
- нарушение условий лицензии;
- приемка в эксплуатацию ЯУ без реализации мер по обеспечению защиты работников и населения прилегающих районов;
- невыполнение своих должностных обязанностей работниками ЯУ;
- самовольное оставление ЯУ;
- допуск к работе на ЯУ работников без соответствующих документов, удостоверяющих квалификацию; работников, имеющих медицинские противопоказания, а также лиц моложе 18 лет;
- прямое или косвенное принуждение работников указанными должностными лицами к нарушению регламента и инструкций по эксплуатации ядерной установки;
- направление должностным лицом работников в радиационно-опасные зоны;
- необоснованный сброс радиоактивных веществ в атмосферу, водную среду и недра;

- сокрытие факта аварии;
- отказ в предоставлении информации, или искажение информации по вопросам безопасности ЯУ;
- вовлечение в хозяйственный оборот продукции, загрязненной радиоактивными веществами;
- нарушение установленного порядка экспорта и импорта.

14. Экспорт и импорт ядерных установок, оборудования, технологий и ЯМ осуществляется в соответствии с международными обязательствами РФ о нераспространении ядерного оружия и международными договорами. Экспорт и импорт осуществляются на основании лицензий на право ведения таких работ.

Ввоз из иностранных государств на территорию РФ отработавшего ядерного топлива осуществляется в порядке, устанавливаемом законодательством РФ и международными договорами РФ. Если международным договором РФ установлены иные правила, чем те, которые предусмотрены Законом об использовании АЭ, то применяются правила международного договора РФ (статьи 64, 65).

5.2. Нормативные основы учета, контроля и физической защиты ядерных материалов

Нормативными основами деятельности с ЯМ являются правила, по которым эта деятельность должна проводиться. В части учета и контроля ЯМ разработан ряд нормативных документов международного и внутригосударственного уровней.

1. Рекомендации МАГАТЭ по развитию государственной системы учета и контроля ядерных материалов [2].
2. Концепция системы государственного учета и контроля ядерных материалов [3].
3. Основные правила учета и контроля ядерных материалов [4].

В нашей стране принята концепция системы государственного учета и контроля ЯМ (ГСУК ЯМ), в которой практически полностью учтены международные рекомендации.

Концепция ГСУК ЯМ определяет систему учета и контроля ЯМ как важный элемент системы государственного управления использованием атомной энергии. В этом документе определены структура задачи и основные принципы функционирования ГСУК ЯМ.

Задачи, принципы построения и функционирования систем учета и контроля ЯМ более детально рассматриваются в последнем документе – Основных правилах учета и контроля ядерных материалов (ОПУК).

ОПУК является центральным нормативным документом, устанавливающим требования и критерии учета и контроля ЯМ. Эти

правила обязательны для всех юридических и физических лиц, осуществляющих деятельность с ЯМ.

Основные правила устанавливают перечень и количественный порог для ЯМ, подлежащих учету и контролю. В Правилах сформулированы основные принципы учета и контроля – непрерывности знаний о ЯМ, категоризации ЯМ, измеряемого материального баланса ЯМ.

Учетные и подтверждающие измерения

В новой нормативной системе только объективные данные, а именно результаты количественных измерений, могут являться основой для учета и контроля ЯМ. То есть центральным элементом системы является условие регулярного измерения ЯМ. Естественно, что при этом масштабы измерений ЯМ резко возрастают. Поэтому принято разделять цель измерений: либо измерение направлено на получение ранее не имеющихся данных, как, например, это имеет место на заводах–производителях изделий с ЯМ; либо цель измерения заключается в подтверждении уже имеющихся данных о ЯМ. Соответственно измерения могут быть учетные или подтверждающие.

Учетные измерения – это измерения параметров партии ЯМ, результаты которых (включая погрешность измерений) вносятся в учетные документы как паспортные значения. Последующее учетное измерение отменяет результат предыдущего. При учетных измерениях измеряют все ЯМ (100 % выборка).

Подтверждающие измерения – это измерения параметров партии ЯМ или атрибутивных признаков ЯМ с целью подтверждения полученных ранее учетных данных. При таких измерениях требования к точности результата измерений могут быть снижены.

Подтверждение данных означает, что значение разности между подтверждающим измерением и учетными данными находится в пределах границ допустимого статистического разброса. Как правило, допустимый разброс разницы измерений определяется 99 %-ным доверительным интервалом. Если расхождение выходит за рамки этого доверительного интервала, выполняется новое учетное измерение ЯМ.

Средства контроля доступа (СКД)

В Основных правилах отражена тенденция усиления приборного контроля ЯМ. Так, важное место в Правилах отводится техническим средствам контроля доступа к ЯМ. В местах нахождения ЯМ

должны применяться СКД–средства. СКД – технические средства, предназначенные для подтверждения достоверности ранее проведенных измерений количественных характеристик и атрибутивных признаков ЯМ или для обнаружения несанкционированных действий с ЯМ. СКД–средства сами по себе не обеспечивают сохранности ЯМ, но они позволяют обнаружить попытки доступа к ЯМ или констатировать, что доступа к ЯМ не было. В последнем случае в целях учета могут быть использованы результаты ранее проведенных измерений ЯМ и, тем самым, сокращены затраты на их проведение.

Таким образом, для современных СУиК ЯМ в качестве необходимого элемента вводятся инструментальные методы обнаружения и сдерживания попыток несанкционированных действий с ЯМ.

Применение выборочных измерений ЯМ

Если с материалом никаких операций не совершали, и он находился под СКД–средствами, то допускается применение выборочных подтверждающих измерений. Объем выборочных подтверждающих измерений должен быть таким, чтобы обеспечить заданную доверительную вероятность обнаружения аномалии. Вероятность обнаружения аномалии определяется в зависимости от объема применения СКД–средств. Аномалия определяется исходя из следующих значений пороговых количеств ЯМ:

а) для ЯМ категорий 1, 2 и 3 пороговые количества составляют:

- 3 кг – для плутония, урана–233;
- 8 кг – для урана–235;

б) для урана с обогащением менее 20 % (категория 4) пороговое количество составляет 70 кг по урану–235.

Если ядерные материалы представлены в форме очехлованных изделий, целостность которых обеспечена их конструкцией, то для этих ядерных материалов также применяются выборочные подтверждающие измерения. Объем выборок определяется аналогично материалам с устройствами индикации вмешательства.

Программы измерений ЯМ на предприятиях

На каждом предприятии разрабатывается программа проведения измерений в целях учета и контроля ЯМ. Эта программа включает в себя:

- используемые методики измерений, которые проходят государственную аттестацию. Для измерений ЯМ используют разрушающие и неразрушающие методы, которые обладают своими дос-

тоинствами и недостатками. У каждого из этих направлений имеется своя область применения. И, в целом, они дополняют друг друга;

- перечень ключевых точек измерений (КТИ) и применяемых технических средств в каждой КТИ;
- организацию и описание процедур проведения измерений;
- требуемые точности измерений и др.

Контроль качества измерений

Если на предприятии существует измерительное оборудование и есть своя метрологическая служба, то это вовсе не означает, что с качеством измерений ЯМ все в порядке. На практике для обеспечения качества измерений ЯМ оказалось необходимым создавать специальную технологию контроля качества и соответствующие документы. Кратко все это можно назвать программой контроля качества измерений. Эта программа подразумевает мероприятия для определения возможностей измерительной аппаратуры по точности и разработки процедур ее поддержания в пределах допустимых отклонений.

ОПУК требует наличия программы контроля качества измерений, обеспечивающей возможность использования результатов измерений в СУиК ЯМ. Программы контроля качества измерений развертываются и действуют во многих организациях и предприятиях России.

В основу программы контроля качества измерений положен принцип непрерывного контроля за погрешностями применяемой измерительной аппаратуры и применяемых методов измерений. Непрерывность обеспечивается, прежде всего, тем, что на регулярной основе (еженедельно, ежедневно или несколько раз в день) осуществляется калибровка оборудования с помощью различных эталонных образцов: массы образцов, содержащих уран известного обогащения, образцов плутония известного изотопного состава и других. Таким образом, составными частями программы контроля качества измерений являются государственные сертифицированные образцы ЯМ, используемые для калибровки и контроля вторичных эталонов и методы контроля измерений.

Измерения на эталонных образцах позволяют:

- оценивать погрешности отдельных измерений;
- рассчитывать случайную и систематическую компоненты погрешности измерительной системы и при возможности устранять систематическую погрешность;

- рассчитывать контрольные пределы работоспособности прибора. При этом, если результаты измерений превысили аварийный предел, прибор выводится из эксплуатации.

В целях скорейшего внедрения программ контроля качества измерений на предприятиях рекомендуется:

- внедрять программы, требующие минимального объема контроля измерений;
- устанавливать допуски на практически необходимом уровне;
- включать процедуры контроля измерений в качестве элементов измерительных процедур.

Учетные процедуры

Особое внимание в Основных правилах уделяется главным учетным процедурам, включающим измерения ЯМ: передаче и физической инвентаризации ЯМ. Их правильное исполнение (в том числе соответственно Правилам) является, во многом, залогом успешного функционирования системы УиК ЯМ.

Требования Основных правил относятся также и к информационной системе УиК ЯМ, в том числе к системе учетных и отчетных документов. Эти требования унифицируют формы представления информации и позволяют легко перейти к компьютеризированному информационному обеспечению функционирования СУиК ЯМ. Последнее, как известно, резко повышает возможности СУиК ЯМ.

В следующих главах учебника мы будем неоднократно обращаться к Основным правилам с целью более подробного ознакомления с различными требованиями к системам учета и контроля ядерных материалов.

Важным вопросом является наличие нормативной базы в области физической защиты ЯМ. Ниже приведены документы различных уровней, входящие в эту базу.

1. Международные:

- INFCIRC /225/ rev. 4 «Методические рекомендации по ФЗ ЯМ» (МАГАТЭ);
- INFCIRC /274/ rev. 2 «Конвенция по физической защите ЯМ» (МАГАТЭ).

2. Российские – федеральный уровень:

«Правила по физической защите ядерных материалов, ядерных установок и мест хранения ядерных материалов» утверждены Постановлением Правительства РФ от 07.03.97 № 264.

3. Российские – ведомственный и межведомственный уровень (пакет документов).

4. Российские – объектовый уровень (пакет документов).

Физическая защита ядерных установок обеспечивается эксплуатирующими организациями и специально уполномоченными государственными органами. Требования к обеспечению физической защиты устанавливаются «Правилами физической защиты ядерных материалов, ядерных установок (ЯУ) и пунктов хранения (ПХ) ядерных материалов». Правила разработаны на основе законодательства Российской Федерации в области обеспечения безопасности при осуществлении ядерной деятельности и с учетом международных обязательств России и рекомендаций МАГАТЭ по физической защите ядерных материалов, ядерных установок и пунктов хранения ядерных материалов. Правила устанавливают требования по обеспечению физической защиты ЯМ, ЯУ и ПХ ЯМ на всей территории РФ, обязательные для выполнения всеми юридическими лицами независимо от форм собственности, источников финансирования и ведомственной принадлежности, осуществляющими ядерную деятельность, а также федеральными органами исполнительной власти, координирующими и контролирующими ядерную деятельность.

Правила регулируют отношения, возникающие в процессе обеспечения безопасности при осуществлении ядерной деятельности. Ядерная деятельность без обеспечения физической защиты ядерных материалов, ядерных установок и пунктов хранения ядерных материалов в соответствии с требованиями настоящих Правил запрещается.

Рассматривают: функции федеральных органов исполнительной власти и организаций по обеспечению физической защиты; основные требования к организации физической защиты при транспортировке ядерных материалов и ядерных установок; государственный надзор и ведомственный контроль за обеспечением физической защиты; вопрос порядка уведомления о несанкционированных действиях. В настоящее время важнейшей задачей является доведение основных идей этих документов до сознания каждого работника ядерного предприятия, с тем, чтобы они стали действенным инструментом и надежным звеном при специальном обращении с ЯМ.

Детальное раскрытие вопросов построения физической защиты ядерно-опасных объектов сделано в приказе № 550 Минатома России от 01.09.2001г. «Об утверждении Положения об общих требованиях к системам физической защиты ядерно-опасных объектов Минатома России». Приказ является отраслевым нормативным документом, определяющим порядок организации работ по физической защите ядерных материалов, ядерных установок и пунктов хранения ядерных материалов в Минатоме России и общие функ-

циональные требования к СФЗ, их структурным компонентам и элементам.

Общие требования разработаны в соответствии с Федеральным законом «Об использовании атомной энергии», а также другими федеральными законами, регламентирующими вопросы безопасности и охраны объектов; «Правилами физической защиты ядерных материалов, ядерных установок и пунктов хранения ядерных материалов», утвержденными постановлением Правительства Российской Федерации №264 от 07.03.97; Положением о Министерстве Российской Федерации по атомной энергии, утвержденным постановлением Правительства Российской Федерации №392 от 05.04.97, с учетом международных обязательств, вытекающих из «Конвенции о физической защите ядерного материала», а также другими нормативными правовыми актами в области физической защиты.

«Общие требования к СФЗ ЯОО» устанавливают:

- порядок организации и обеспечения работ по физической защите на отраслевом уровне;
- перечень направлений нормотворческой деятельности по физической защите отраслевого уровня;
- состав основных нормативных документов по физической защите объектового уровня;
- цели, задачи и принципы построения СФЗ;
- критерии и порядок категорирования ЯОО и предметов физической защиты;
- порядок проведения анализа уязвимости ЯОО;
- структуру СФЗ;
- функциональные требования к структурным компонентам и элементам ИТСФЗ;
- общие требования к оснащению охраняемых зон ИТСФЗ;
- требования к созданию и совершенствованию СФЗ;
- требования к планированию и организации функционирования СФЗ;
- требования к организации эксплуатации ИТСФЗ;
- требования к обеспечению физической защиты при транспортировке ЯМ;
- требования к организации и проведению учений по проверке и отработке взаимодействия в рамках СФЗ;
- требования к персоналу СФЗ, его обучению и повышению квалификации.

«Общие требования к СФЗ ЯОО» конкретизируют требования и положения «Правил физической защиты ядерных материалов,

ядерных установок и пунктов хранения ядерных материалов» применительно к организации работ по физической защите в Минатоме России, к СФЗ ЯОО, их структурным компонентам и элементам.

Требования к СФЗ конкретных ЯОО, их структурным компонентам и элементам определяются на основании «Общие требования к СФЗ ЯОО» с учетом результатов анализа уязвимости ЯОО, категории и особенностей функционирования конкретных ЯОО, оценки эффективности СФЗ и предъявляются при создании, функционировании и совершенствовании СФЗ.

Требования к количественным характеристикам ИТСФЗ предъявляются в нормативной документации по стандартизации федерального или отраслевого уровня.

«Общие требования к СФЗ ЯОО» предназначены для использования администрацией и персоналом ЯОО, а также других организаций отрасли, осуществляющих деятельность в области физической защиты при:

- организации работ по физической защите;
- создании и совершенствовании СФЗ;
- обеспечении функционирования СФЗ;
- осуществлении контроля соответствия СФЗ установленным требованиям.

Требования настоящего документа распространяются на СФЗ ЯОО Минатома России, а также на обеспечение физической защиты ЯМ и изделий на их основе при транспортировке. На основании требований и положений настоящего документа разрабатывается новая или уточняется действующая нормативная документация по физической защите отраслевого и объектового уровней.

Постановление Федерального надзора по ядерной и радиационной безопасности (Госатомнадзор России) № 3 от 16.01.2002 об утверждении и введении в действие федеральных норм и правил в области использования атомной энергии «Правила физической защиты радиационных источников, пунктов хранения, радиоактивных веществ».

Данный нормативный документ устанавливает требования к обеспечению физической защиты радиационных источников, пунктов хранения, радиоактивных веществ и подготовлен на основе федеральных законов «Об использовании атомной энергии», «О радиационной безопасности населения», «Основных правил обеспечения радиационной безопасности», «Правил физической защиты ядерных материалов, ядерных установок, пунктов хранения ядерных материалов», рекомендации МАГАТЭ «Физическая защита ядерного материала и ядерных установок» INFCIRC/225/Rev/4.

Постановление раскрывает: требования к обеспечению физической защиты радиационных источников, пунктов хранения, радиоактивных веществ; порядок определения состава и требований к системе физической защиты радиационных источников (РИ), пунктов хранения, радиоактивных веществ (РВ); порядок уведомления о несанкционированных действиях в отношении радиационных источников, пунктов хранения, радиоактивных веществ.

В постановлении рассматриваются: организационные мероприятия системы физической защиты; документы по вопросам организации и обеспечения физической защиты РИ, РВ, ПХ; требования к инженерно-техническим средствам системы физической защиты; требования к действиям подразделений охраны; классификация РИ, ПХ, РВ по их потенциальной радиационной опасности.

Список литературы

1. Ядерное нераспространение / Под ред. В.А. Орлова. В 2 т. М.: ПИР Центр, 2002. Т. II.
2. IAEA Safeguards: Guidelines for States' Systems of Accounting for and Control of Nuclear Materials. – IAEA/SG/INF/2, IAEA, Vienna (1980).
3. Концепция системы государственного учета и контроля ядерных материалов: Постановление Правительства РФ от 14 октября 1996 г. №1205.
4. Основные правила учета и контроля ядерных материалов. НП-030-05. Утверждены постановлением Ростехнадзора России от 26 декабря 2005 г. № 19, Москва, 2005.

ГЛАВА 6

ЧЕЛОВЕЧЕСКИЙ ФАКТОР В УК и ФЗ ЯМ.

КУЛЬТУРА УК и ФЗ ЯМ

6.1. Современные угрозы безопасному обращению с ЯМ и системы противодействия угрозам

В качестве основных угроз ядерному объекту рассматриваются:

- хищение ЯМ, изделий на их основе, либо информации о ЯМ и ядерных технологиях;
- террористический акт или диверсию на ядерной установке или в пункте хранения ЯМ;
- ядерный шантаж;
- возникновение аномалий с ЯМ в процессе их обращения или хранения на объекте.

Аномалия – это установленное несоответствие фактически наличного количества ЯМ данным учетных документов в ЗБМ. К аномалиям относятся:

- недостача (излишек) ЯМ;
- ошибки в учетных, отчетных документах;
- повреждения изделия с ЯМ или УИВ;
- нарушение порядка использования, передачи ЯМ;
- превышение допустимых значений ИР.

«Проводниками» или исполнителями отмеченных угроз могут быть различные типы нарушителей. Нарушитель – лицо, совершившее или пытающееся совершить несанкционированное действие, а также лицо, оказывающее в этом содействие. Как правило, защита ядерно-опасного объекта строится против двух типов нарушителей: внешнего и внутреннего. Особенно опасны внутренние нарушители, так как они могут обладать не только знанием уязвимых мест объекта и СФЗ, но и иметь право доступа к ним и к соответствующей информации.

Отмеченные выше угрозы могут иметь тяжелые последствия, включая создание ядерных взрывных устройств и непредсказуемого его дальнейшего применения. Системы УК и ФЗ ЯМ являются средствами противодействия угрозам со стороны как внешних, так и внутренних нарушителей. Возросшая активизация террористиче-

ских организаций в мире резко повышает значимость системы УК и ФЗ ЯМ на ядерно-опасных объектах.

Следует особо упомянуть о неосознанных нарушителях. Такими могут быть:

- персонал ЯОО, халатно относящийся к своим служебным обязанностям;
- сотрудники ЯОО, не обладающие достаточным уровнем знаний для осуществления своих служебных обязанностей и др.

Этот тип нарушителей не имеет мотивов действий, однако негативные последствия могут быть не менее масштабными.

Влияние человеческого фактора на безопасность ЯОО

Человеческий фактор представляет собой интегральные характеристики человека–машины, проявляющиеся в конкретных условиях их взаимодействия в системе «человек–машина», функционирование которой определяется достижением поставленной цели. Персонал отвечает за эксплуатацию систем, обеспечивает их техническое обслуживание и управляет ими, реагирует на генерируемые системами сигналы, принимает решения о выделении ресурсов на УК и ФЗ ЯМ. Вместе с такой сильной зависимостью от человеческого фактора возникает и соответствующий риск. Анализ причин происшествий в системах «человек–машина» показывает, что от 30 до 60 процентов всех происшествий были вызваны ошибками персонала объектов. Более того, неопровержимым фактом является то, что вероятность ошибки оператора возрастает после возникновения аномальной или аварийной ситуации.

Даже некоторые специалисты не полностью осознают, насколько велика доля происшествий и проблем, возникающих под воздействием человеческого фактора. Однако статистика происшествий показывает, что это так. В 2001 г. было рассмотрено 16 стационарных отчетов о нарушениях, связанных с ошибками персонала на российских АЭС. Например, анализ событий на АЭС в 2001 году показал, что во всех происшествиях проявился недостаточный уровень культуры безопасности. Причины нарушений были связаны:

- с недостатками или отсутствием регламентов на административные и технологические процессы;
- с недостатками в распределении обязанностей и ответственности;

- с недостатками станционных систем профессиональной подготовки и поддержания квалификации персонала.

6.2. Концепция культуры ядерной безопасности

Анализ Чернобыльской катастрофы привел к пересмотру отношения к вопросам безопасной эксплуатации АЭС во всем мире. Среди всевозможных факторов риска в качестве важнейшего экспертами МАГАТЭ выделен человеческий фактор. Поэтому эксперты МАГАТЭ ставят в качестве главного условия развития ядерной энергетики стран концепцию культуры безопасности [1]. Принципы культуры безопасности применимы ко всем ядерно-опасным объектам.

Согласно определению, данному экспертами МАГАТЭ, культура безопасности – это такой набор характеристик и особенностей деятельности организаций и поведения отдельных лиц, который устанавливает, что проблемам безопасности ЯОО (в том числе АЭС), как обладающим высшим приоритетом, уделяется внимание, определяемое их значимостью.

Наличие культуры безопасности характеризуется, в первую очередь, созданием такой атмосферы в коллективе, когда обеспечение безопасности ЯОО становится главной целью и внутренней потребностью каждого и приводит к самоконтролю, вниманию и ответственности при выполнении любых работ, влияющих на безопасность.

Таким образом, относительно каждого работника ЯОО культура безопасности подразумевает:

- его квалификационную и психологическую подготовленность для работы с ЯМ и ядерными установками;

- строгое соблюдение регламента работ (трудовая дисциплина).

Относительно коллектива ЯОО культура безопасности подразумевает создание атмосферы:

- внимания и поддержки инициативы в вопросах безопасности ЯОО (внимание к безопасности);

- в которой персонал не боится открыто заявлять об ошибках, которые он совершил, и поощряется за сообщение об условиях, которые могут привести к снижению безопасности (критическая позиция);

- открытости персонала, при которой информация, касающаяся безопасности ЯОО, становится легко доступной для всех (коммуникативность).

Обеспечение безопасности при функционировании ЯОО – главная и общая задача всех специалистов, связанных с деятельностью ЯОО. Поэтому культура безопасности должна проявляться на всех уровнях деятельности, то есть в действиях как организаций различного уровня (министерство, эксплуатирующая организация, предприятие и т.д.), так и каждого работника в отдельности.

6.3. Развитие культуры учета, контроля и физической защиты ЯМ

Рассматривая культуру УК и ФЗ ЯМ как конкретизацию понятия культуры безопасности, дадим определение культуры УК и ФЗ ЯМ, согласующееся с приведенным ранее.

Культура УК и ФЗ ЯМ может быть определена как совокупность отношений и ценностных ориентиров организаций и отдельных лиц, устанавливающая, что, обладая высоким приоритетом, вопросы УК и ФЗ ядерных материалов получают адекватное внимание, определяемое их значимостью.

Эксперты МАГАТЭ предложили включить в итоговый документ Технического совещания следующее определение:

культура безопасности – это совокупность качеств, принципов, отношений и поведения отдельных лиц, организаций и институтов, которая служит средством поддержания и совершенствования ядерной безопасности.

Понятие культуры включает в себя целый ряд факторов, среди которых можно отметить: наличие квалифицированных кадров (носителей культуры); развитую организационную систему и др. Решение задачи повышения культуры (снижения роли человеческого фактора) возможно только при комплексном подходе, включающем, среди прочих, формирование определенной организационной структуры, воспитание и обучение.

Принципы культуры ядерной безопасности

- **Ответственность** – УК и ФЗ обладает наибольшей эффективностью там, где каждый специалист принимает на себя персональную ответственность за эксплуатацию системы, а также за свои действия при выполнении служебных обязанностей.

- **Руководство** – УК и ФЗ наиболее эффективны там, где руководители организации на всех уровнях повседневно проявляют и на словах и на деле свою приверженность обеспечению сохранности ядерных материалов.

- **Мотивация** – исполнители добиваются высоких производственных показателей, если для этого существуют причины, в том числе созданные руководством и коллегами.

- **Профессионализм и компетентность** – системы УК и ФЗ оптимально работают там, где сотрудники обладают высокой квалификацией, знаниями и навыками, достаточными для эффективного выполнения всех аспектов своей работы, правильного и быстрого реагирования на все нештатные и чрезвычайные ситуации.

- **Обучение и совершенствование** – уменьшение вероятности происшествий и достижение высоких результатов возможно за счет повышения уровня квалификации, уровня общего образования и интеллекта, применения на практике передового опыта и ранее полученных знаний.

Совершенствование правовой базы обращения с ЯМ в государстве

Практически все статьи Закона об использовании атомной энергии проникнуты идеей обеспечения безопасного развития ядерной индустрии России, включая и человеческий фактор. Влияние человеческого фактора на безопасность ЯОО особо выделяется в Законе в виде положений о правах и обязанностях граждан, организаций и должностных лиц.

Закон в разных формах осуществляет правовое регулирование ядерной деятельности, причем некоторые виды деятельности влекутся как обязательные. К ним относятся физическая защита, учет и контроль ЯМ.

Совершенствование нормативной базы обращения с ЯМ в государстве

Законом предусматривается также развитие общих федеральных норм и правил, которые устанавливают требования к безопасному использованию атомной энергии. В соответствии с Законом об использовании атомной энергии у нас разработаны и введены в действие общедофедеральные правила физической защиты, учета и кон-

троля ЯМ. Эта нормативная база позволяет регулировать обращение с ЯМ, делая это обращение безопасным для общества.

Поэтому в настоящее время важнейшей задачей является доведение основных идей этих документов до сознания каждого работника ЯОО, с тем, чтобы они стали действенным инструментом и надежным звеном при специальном обращении с ЯМ и обеспечении гарантий нераспространения.

Воспитание специалистов высокой профессиональной культуры

Идеология безопасного обращения с ЯМ должна являться элементом профессиональной культуры всех работников предприятий ядерной отрасли. Такое сознательное отношение к ЯМ исключает благодушное отношение к вопросам безопасности ЯМ и предусматривает стремление к совершенствованию процедур обращения с ЯМ.

Воспитание специалистов с приоритетно ориентированным на безопасность мышлением является задачей образовательной системы в стране, а также специализированных учебных программ.

Пропаганда идей нераспространения в обществе

Эффективность мер ядерного нераспространения в государстве зависит от осознания жизненной важности проблемы нераспространения всеми слоями общества. Понимание важности этой проблемы в обществе, включая представителей власти, определяет ее общественный рейтинг и соответствующее материальное обеспечение для ее решения. Поэтому так важна деятельность организаций по пропаганде идей ядерного нераспространения среди населения страны.

В нашей стране этой деятельностью занимается целый ряд организаций, среди них – Ядерное общество России и Центр политических исследований в России. Эти организации издают популярные журналы, книги, проводят научные конференции, семинары, на которые приглашаются представители широких кругов общественности.

Культура УК и ФЗ ЯМ на предприятиях Росатома

Программа учета, контроля и физической защиты ядерных материалов достигла значительных успехов в снижении риска распро-

странения ядерного оружия. На всех российских ядерно-опасных объектах установлено оборудование физической защиты и внедрены новые технологии учета ядерных материалов. Однако необходимый уровень безопасности не может поддерживаться только за счет оборудования и технологии. Не только поддержание работоспособности, но и эффективность систем УК и ФЗ ЯМ во многом зависит от человеческого фактора.

В настоящее время общепризнанна важность человеческого фактора и имеется ряд программ, нацеленных на подготовку персонала объектов в вопросах повышения безопасности при обращении с ЯМ, в том числе, на повышение уровня профессиональной культуры персонала, занятого в области учета, контроля и защиты ЯМ.

Одной из важнейших частей российской программы развития УК и ФЗ ЯМ является проект «Культура УК и ФЗ ЯМ», который направлен на максимальное снижение риска, присущего человеческому фактору при работе с ЯМ, и повышению культуры УК и ФЗ ЯМ в деятельности предприятий и организаций ядерной индустрии.

В рамках проекта «Культура УК и ФЗ ЯМ» установлены следующие конкретные цели:

- усиление понимания работниками объекта важности УК и ФЗ ЯМ и их обязанностей в отношении поддержания высокого уровня культуры УК и ФЗ ЯМ;
- усиление внимания руководства к вопросам УК и ФЗ ЯМ и к вкладу организации в культуру УК и ФЗ ЯМ;
- снижение количества происшествий и проблем в области УК и ФЗ ЯМ, возникающих из-за человеческого фактора.

Одной из основных проблем, имеющих отношение к культуре УК и ФЗ ЯМ, является отсутствие специальной инфраструктуры (организации, персонала, технологий или установившейся практики) для повышения культуры УК и ФЗ ЯМ на объектах. Поэтому, в рамках проекта «Культура УК и ФЗ ЯМ» планируется создание подобной структуры. Звеньями такой структуры должны стать лица на предприятиях, ответственные за культуру УК и ФЗ ЯМ (координаторы по вопросам культуры УК и ФЗ ЯМ).

Список литературы

1. Культура безопасности: Доклад международной консультативной группы по ядерной безопасности (INSAG) // Серия безопасности No 75-INSAG-4, МАГАТЭ, Вена, 1990.

Часть II

СИСТЕМЫ УЧЕТА И КОНТРОЛЯ ЯДЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ

ГЛАВА 1

ГОСУДАРСТВЕННАЯ СИСТЕМА УЧЕТА И КОНТРОЛЯ ЯДЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ (ГСУК ЯМ)

1.1. Структура ГСУК ЯМ

Учет ядерных материалов – определение количества ЯМ, составление, регистрация и ведение учетных и отчетных документов. Учет основывается на результатах измерений количественных характеристик ЯМ. При этом допускается:

- использование результатов предыдущих измерений ЯМ, если их достоверность подтверждена надлежащим состоянием примененных средств контроля доступа, соответствующими изменениями;
- применение расчетных методов, основанных на результатах предварительных измерений, экспериментальных исследований.

Таким образом, количественные характеристики ЯМ в местах их нахождения, потоков ЯМ как внутри эксплуатирующих организаций, так и между организациями подлежат тщательному учету. Потому, что информация о ЯМ составляет основу современных систем управления и безопасности на всех уровнях обращения с ядерными материалами.

Эта глава знакомит с тем, как организован и развивается учет ЯМ в нашей стране.

Нормативно–правовые и организационные основы для государственного учета ядерных материалов

Правовая база государственного учета ЯМ. Закон об использовании атомной энергии в России был принят в 1995 г. До этого у нас не было закона в области атомной энергии и все решалось на уровне распоряжений Министерства среднего машиностроения (сейчас это Росатом). Таким образом, с 1995 г. главным документом в ядерной области в России стал Закон об использовании атомной энергии (часть I глава 5), и все обращение с ядерными материалами строится в соответствии со статьями этого документа.

Организационная база учета ЯМ. В Законе об использовании атомной энергии прямо предусматривается, что для ядерных материалов должна быть создана государственная система их учета и контроля (ГСУК ЯМ), которая бы позволяла достаточно точно и с

высокой степенью надежности вести учет данных по нахождению и перемещениям ЯМ. При этом Правительство Российской Федерации определяет порядок организации ГСУК ЯМ, а также органы, осуществляющие государственный учет и контроль ядерных материалов. Среди поручений Правительства государственным органам, уполномоченным по использованию атомной энергии, важное место занимает разработка положений и правил ведения государственного учета и контроля ядерных материалов. К настоящему времени большая часть этих документов разработана и введена в действие.

Нормативная база – Основные правила по учету и контролю ЯМ (НП–30–05 [1]) – главный документ, который кратко был рассмотрен в части I главе 5.

Структура государственной системы учета и контроля ядерных материалов

Государственная система учета и контроля ЯМ включает несколько уровней. Это, прежде всего, федеральный общегосударственный уровень. То есть Президент, Премьер–министр, Правительство РФ должны иметь данные по ядерным материалам в стране для того, чтобы принимать стратегические решения относительно них (как, например, соглашение по ВОУ–НОУ между Россией и США). Но только требуются очень сжатые данные.

Второй уровень – это ведомственный уровень. Сюда входят те министерства, которые имеют ядерные материалы.

Как известно, все ядерные материалы в России находятся в федеральной собственности. Однако допускается передача ЯМ в пользование юридическим лицам, имеющим соответствующие лицензии на ядерную деятельность. Главные распорядители этой собственности у нас в стране – Росатом, Министерство транспорта, Министерство обороны, Министерство образования и науки, Академия наук России и другие.

Росатом является главным ведомством, занимающимся управлением ядерными материалами атомной энергетики нашей страны. Министерство обороны – это то ведомство, которое строило атомные подводные лодки и военные корабли с ядерными двигателями. В ведении Министерства транспорта находится Мурманское морское пароходство, в котором есть атомные ледоколы. Все эти мини-

стерства занимаются управлением имеющихся ядерных материалов. Для эффективного и безопасного управления они должны располагать точными сведениями об имеющихся в наличии ЯМ.

В целом, можно отметить, что учет и контроль ядерных материалов является необходимой составляющей государственного управления ЯМ. Поэтому разные структуры государственных систем управления и учета ЯМ являются близкими.

В каждом ведомстве имеются эксплуатирующие организации, т.е. комбинаты, ядерные центры или концерны, которые эксплуатируют непосредственно ядерные установки. На этих предприятиях производятся, обрабатываются, используются ядерные материалы. Скажем, на комбинате «Маяк» на Урале есть завод по химпереработке отработавшего ядерного топлива. Так называемый завод РТ–1. И есть хранилище выделенного на этом заводе плутония из топлива реакторов ВВЭР–440. На заводе РТ–1 из отработавших сборок с атомных электростанций извлекают плутоний, и он хранится в этом хранилище. Это сложные и довольно большие объекты.

Есть в Росатоме концерн Росэнергоатом, которому принадлежат все атомные электростанции. Это – Балаковская, Белоярская, Кольская, Калининская, Смоленская, Курская, Ново–Воронежская и другие атомные электростанции со значительным количеством энергоблоков.

Среди организаций Росатома выделяются крупные научные центры. Например, ГНЦ «Физико–энергетический институт» (г. Обнинск) – большой научный ядерный центр, где имеется целый ряд крупных установок, включая первую в мире атомную электростанцию, реактор БОР–10, критические сборки БФС–1,2.

Другой крупный научный центр – РНЦ «Курчатовский институт» относится к Министерству образования и науки. Курчатовский институт – старейший и крупнейший ядерный центр в России. Вся история развития ядерной индустрии СССР (а впоследствии России) отражена в разработках этого центра. Он работает с сороковых годов, и за время работы в нем накопилось огромное количество ядерных материалов всех сортов, форм, обогащений. В Курчатовском институте около 30 ядерных установок. Это – ядерные реакторы, критические и подкритические сборки и т.д.

Одной из эксплуатирующих организаций Министерства обороны является Военно–морской флот. В его распоряжении находятся атомные подводные лодки, атомные надводные военные корабли, хранилища ядерного топлива для этих лодок и кораблей, а также перегрузочные морские баржи, платформы и т.д.

Мурманское морское пароходство является эксплуатирующей организацией Министерства транспорта РФ. Весь гражданский атомный флот, созданный для обеспечения грузоперевозок в ледовых условиях, находится в ведении этой организации. В настоящее время Мурманское морское пароходство имеет пять линейных (двухреакторных) ледоколов типа «Арктика», два ледокола типа «Таймыр» (однореакторных) и один лихтеровоз усиленного ледового класса «Севморпуть». Ледокол «Пятидесятилетие Победы» недавно достроен на Балтийском судостроительном заводе, а ледокол «Сибирь» находится в режиме с выгруженным топливом. В Мурманском морском пароходстве есть также плавтехбазы, с помощью которых осуществляется загрузка свежего топлива и выгрузка отработавшего.

До последнего времени система учета и контроля ядерных материалов ограничивалась уровнем установок. С установок отправлялись все бухгалтерские данные о ЯМ. Но по новой системе материально–балансового учета вводятся еще и зоны баланса материалов, где на основе измерений формируются все необходимые данные о ЯМ.

Структура потоков информации. В соответствии с требованиями федеральных правил по учету и контролю ядерных материалов НП–030–05 устанавливается единая система отчетности для всех уровней государственного учета и контроля ЯМ. Потоки информации в рамках такой системы формируются следующим образом. На уровне зон баланса материалов (ЗБМ) должны производиться все измерения, должны регистрироваться все поступления, все отправки и результаты всех измерений и подводиться балансы ядерных материалов. Таким образом, в ЗБМ накапливается первичная, наиболее точная, проверенная подведением баланса информация относительно всех имеющихся ЯМ. Вся эта информация составляет элементарную автономную подсистему федеральной информационно–системы учета и контроля ЯМ. Далее эта информация анализируется, обрабатывается и представляется в сводном виде.

На уровне эксплуатирующей организации уже не нужны все данные измерений и вся исходная информация по зоне баланса. Требуется некоторые сводные данные. Например, для учета ЯМ на АЭС требуется знать на определенную дату все поступления свежего и отправки облученного топлива, количества хранимого на станции свежего и облученного топлива. И, соответственно, с ЗБМ отправляются только такие данные.

Дальше все эти данные в еще более сжатом виде концентрируются на ведомственном уровне, т.е. в Росатоме, Министерстве транспорта, Министерстве образования и науки и т.д. Там формируются сводные данные по ведомству. И уже очень небольшое количество данных поступает на высший (федеральный) уровень, для того чтобы высшее руководство знало распределение ЯМ в стране. Детали, как материал распределен по организациям, тем более по зонам баланса материалов, для государственного руководства, скорее всего, не нужны. Однако если возникает необходимость узнать все детали о ЯМ, то их можно запросить непосредственно от соответствующей ЗБМ.

1.2. Учет ЯМ на уровне эксплуатирующей организации

Организационные и научно–технические меры по учету ЯМ на предприятиях

У нас в стране большое количество организаций, в которых используются ЯМ в разных формах. Это атомные электростанции, промышленные комбинаты, научные центры и т.д. И главная тяжесть в развитии систем учета падает именно на эти организации. И если общие государственные системы по учету и контролю ЯМ большей частью уже подготовлены и введены в действие, то в отношении развития практических систем учета и контроля ЯМ на предприятиях предстоит решить многие серьезные задачи. В целом, надо навести с ЯМ такой порядок, который отвечал бы требованиям сегодняшнего дня и международным нормам и правилам в этой области. Такой порядок с ЯМ подразумевает, что должны быть:

- организационные мероприятия (включая назначения административно–ответственных лиц, ведущих учет ядерных материалов);

- разработаны технологические правила учета ЯМ, отвечающие специфике предприятия;

- далее, предприятие необходимо оснастить необходимыми техническими средствами для выполнения учета на самом современном уровне. А это, в первую очередь, подразумевает внедрение компьютерных сетей для ведения учета ЯМ и средства измерения ЯМ;

- наконец, нужно обучить персонал новым правилам, по которым сейчас строится система учета, и обращению с техническими средствами.

Основные компоненты системы учета ЯМ на предприятии

Система учета ЯМ любого ядерного предприятия включает три главных компонента:

- собственно систему учета ЯМ (информационную систему);
- измерения ЯМ и контроль измерений;
- физические инвентаризации.

Как отмечалось выше, система учета обеспечивает знания о ЯМ (состояние, местонахождение и перемещение). Причем, эти знания должны быть полными, достоверными и своевременными. Эти характеристики наших знаний о ЯМ достигаются, в том числе, с помощью отмеченных выше средств учета ЯМ. Так, за счет измерений ЯМ и контроля качества измерений обеспечивается достоверность. Полнота знаний достигается с помощью проведения физических инвентаризаций всех имеющихся ЯМ. Своевременность – использованием компьютеризированной информационной системы.

1.3. Тенденции развития систем учета ядерных материалов

Система бухгалтерского учета ЯМ

Системы учета ядерных материалов были введены давно. Но они основывались на так называемом бухгалтерском учете. Этот подход, применяемый для учета материальных ценностей, существует везде. Для бухгалтерского подхода в применении к ЯМ характерно следующее.

1. Измерения ядерных материалов проводились тогда, когда это требовал технологический процесс. А когда технологический процесс этого не требовал, велся только бумажный учет. Если материал не претерпевал каких-то технологических изменений, не был включен в технологический процесс, а просто перемещался, то весь учет этого ЯМ велся по тем сопроводительным документам, которые были к нему приложены и передавались вместе с ним.

2. Эта система учета является детерминистской. В паспортные данные ЯМ не заносилась погрешность измерений ЯМ. В результате достоверность данных об этих ЯМ становилась неизвестной. Повторные измерения приводили зачастую к несоответствию имеющихся и новых данных. Проблемы несоответствия данных о ЯМ снимались с помощью понятия нормы технологических потерь. То есть считалось, что при обработке и обращении с ЯМ часть их безвозвратно теряется. Эта доля определялась директивно исходя из опыта функционирования предприятий ядерной индустрии.

В результате за 50 лет работы с ЯМ произошло большое расхождение между документами на ЯМ и реальностью.

Система измеряемого материального баланса ЯМ

Другая система учета ЯМ, лишенная отмеченных выше недостатков, находит все большее признание. Это система так называемого измеряемого материального баланса [2–4]. В отличие от бухгалтерского учета ЯМ система материального баланса основана на измерениях ЯМ. Ядерные материалы измеряются при любой значительной операции с ними, включая, например, операцию их передачи. И при этом учитывается статистическая природа всех результатов измерений ЯМ. В следующих главах мы рассмотрим основы этой системы учета ЯМ.

Компьютеризация учета ЯМ

В настоящее время различные варианты компьютеризированных систем учета и контроля ядерных материалов (ЯМ) применяются во многих организациях ядерной отрасли нашей страны. Причины широкого внедрения компьютерных информационных технологий в учете и контроле ЯМ достаточно просты. Без компьютеров на крупном предприятии довольно трудно оперативно определить с большой точностью где, какое количество и в каком состоянии на-

ходятся ядерные материалы. Более того, требования Федеральной информационной системы определяют постепенный переход к отчетности по зонам баланса материалов. Такой объем информации невозможно собрать и обработать без использования автоматизированных систем. Именно из-за недостатка развитых компьютеризированных СУиК ЯМ в настоящее время используется упрощенная форма отчетности – по предприятию в целом. Наконец, отчуждение и обобществление информации о наличных количествах и перемещениях ЯМ от непосредственных исполнителей в виде централизованных баз данных, получения независимых балансов и др. характеристик служат важным сдерживающим фактором в отношении потенциальных несанкционированных действий с ЯМ и информацией о них. Таким образом, отмеченные выше причины, способствуя достижению высокого уровня непрерывности и достоверности знаний о ЯМ, служат серьезным стимулом к широкому внедрению компьютеризированных систем обработки информации о ЯМ на предприятиях, ведомствах и федеральном уровне.

Обеспечение непрерывности знаний о ядерных материалах

Необходимость контроля за материалами оружейного класса вынуждает вести их непрерывный мониторинг. Проблема непрерывности знаний о наличных количествах ЯМ, прежде всего, оружейного качества, является ключевой, и ее решение пытаются найти с помощью технических средств различного рода.

Для обеспечения непрерывности знаний о нахождении и состоянии ЯМ идеальным является нахождение ЯМ под постоянным визуальным и приборным контролем. Для ЯМ, находящихся в состоянии покоя, такой контроль обеспечивается средствами контроля доступа (СКД–средства). СКД–средства находят широкое применение в системах учета и контроля ЯМ. Они включают меры сохранения и наблюдения (пломбы, печати, телевизионный мониторинг). В последние годы наблюдается интенсивное развитие и совершенствование СКД–средств. Вопросы применения СКД–средств для контроля ЯМ будут рассмотрены подробнее в главе 10.

Однако если ЯМ не находятся в состоянии покоя, то СКД–средства не могут решить всей проблемы обеспечения непрерывных знаний о ЯМ. Ядерный материал может быть украден персоналом, имеющим доступ к нему. Но кража эта может быть не обнаружена в течение длительного времени до момента следующей физи-

ческой инвентаризации. И даже при проведении физической инвентаризации небольшие кражи также могут быть не обнаружены, вследствие неизбежной неопределенности в балансе ядерных материалов.

Именно отсутствие надежных технологий постоянного мониторинга за ядерным материалом в условиях, когда с ним работают, приводит к тому, что ядерный материал становится уязвимым в отношении несанкционированных действий персонала с ним. Это относится, в первую очередь, к тем установкам, где есть большое количество материалов в виде небольших элементов (например, БФС с его большим количеством дисков).

Реальным технологическим приемом, который в значительной мере обеспечивает решение проблемы непрерывности знаний о перемещениях ядерных материалов, является компьютерный учет операций с ядерными материалами почти в реальном масштабе времени с максимальным использованием средств сохранения и наблюдения.

В 1991 г. специалисты Лос-Аламосской национальной лаборатории первыми реализовали концепцию учета ЯМ в почти реальном масштабе времени в виде унифицированной компьютеризированной системы учета и контроля ЯМ LANMAS (Local Area Network Material Accountability System). В настоящее время в ряде организаций нашей страны также создаются, либо находятся в эксплуатации компьютеризированные системы учета и контроля ЯМ, работающие в режиме почти реального масштаба времени.

Список литературы

1. Основные правила учета и контроля ядерных материалов. НП-030-05. Утверждены Постановлением Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору N 19 от 26 декабря 2005 года. М., 2005.

2. Глебов В.В., Измайлов А.В., Румянцев А.Н. Введение в системы учета, контроля и физической защиты ядерных материалов. М.: МИФИ, 2001.

3. Основы учета и контроля ядерных материалов: Методические материалы / Под редакцией Б.Г. Рязанова. Обнинск: УМЦУК, 2000.

4. Training Course on the Fundamentals of MC&A. – ORNL, Oak Ridge, 1997.

ГЛАВА 2

ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ СИСТЕМЫ ИЗМЕРЯЕМОГО МАТЕРИАЛЬНОГО БАЛАНСА ЯДЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ

2.1. Принцип категоризации ядерных материалов

Относительно ядерных материалов одним из основных является понятие учетной категории ядерных материалов. Если материал подпадает под учетную категорию, то к нему должны применяться определенные правила учета, контроля и физической защиты. Если материал не подпадает под учетную категорию, то таких жестких правил к нему не применяется. Вопрос в связи с учетной категорией материалов возникает следующий: какие материалы следует относить к учетным?

Ядерные материалы, подлежащие учету и контролю

Согласно ОПУК учету и контролю подлежат ядерные материалы, представленные в табл. 2.1.

Таблица 2.1

Перечень ядерных и специальных неядерных материалов, подлежащих учету и контролю

Материалы	Наименование
Ядерные	Плутоний Уран Уран–233 Уран–235 Торий Нептуний–237 Америций–241 Америций–243 Калифорний–252
Специальные неядерные	Литий–6 Тритий Дейтерий, за исключением дейтерия, содержащегося в тяжелой воде, применяемой в качестве замедлителя в ядерных реакторах Тяжелая вода

Помимо основных элементов уран–плутониевого и ториевого циклов в этот список входят трансурановые элементы. Кроме этого, в список включены некоторые специальные неядерные материалы в силу их значимости и использования при производстве оружейных материалов и ядерных взрывных устройств. Например, калифорний–252, литий–6, тритий используются при производстве ядерного и термоядерного оружия. Тяжелая вода применяется в качестве замедлителя в ядерных реакторах–наработчиках оружейного плутония.

Предметом международных гарантий со стороны МАГАТЭ является список ядерных материалов, который близок к рассмотренному выше.

Количественные критерии постановки и снятия с учета ядерных материалов

Ядерные материалы подлежат государственному учету и контролю, если значения их масс, находящихся на предприятии, транспортируемых на одном транспортном средстве, равны или превышают минимальные количества, указанные в табл. 2.2. Из этой таблицы следует, что для основных элементов уран–плутониевого и ториевого циклов их минимальные учетные количества составляют 15 г. Для урана и тория природного изотопного состава учетное количество начинается с 500 кг.

Если на предприятии находится совокупность ядерных материалов, продукты, изделия, содержащие смесь приведенных в табл. 2.1 ядерных материалов, то правила не распространяются на них лишь в случаях непревышения всех перечисленных в табл. 2.2 ограничений.

Государственному учету и контролю не подлежат:

- уран, содержащийся в руде, а также в промежуточных продуктах, перерабатываемых на горно–металлургических предприятиях;
- торий, содержащийся в руде, а также в промежуточных продуктах, перерабатываемых на горно–металлургических предприятиях;
- ядерные материалы, содержащиеся в закрытых источниках ионизирующего излучения;
- нептуний–237, америций–241,243, калифорний–252 в облученных продуктах;
- литий–6, если его содержание в литии не превышает 7,5 % атомных;

- дейтерий, содержащийся в водородсодержащих материалах, если относительное изотопное содержание дейтерия не превышает 50 % атомных;

- ядерные материалы, содержащиеся в радиоактивных отходах (РАО), находящихся в пунктах хранения РАО.

Если масса ядерных материалов на предприятии меньше указанных в табл. 2.2 значений, то они подлежат учету и контролю в соответствии с требованиями, предъявляемыми к учету радиоактивных веществ.

Таблица 2.2

Минимальные количества ядерных материалов, начиная с которых они подлежат государственному учету и контролю

№ п/п	Ядерный материал	Минимальное количество	Последняя значащая цифра массы ЯМ в отчетных документах
1	Плутоний	15 г	1 г
2	Уран-233	15 г	1 г
3	Уран с обогащением по изотопу U-235 больше 10 %	15 г по изотопу U-235	1 г
4	Уран с обогащением по изотопу U-235 не больше 10 %, но больше природного	15 г по изотопу U-235	0,1 кг
5	Нептуний-237	15 г	1 г
6	Совокупность ядерных материалов, перечисленных в п.п. 1 – 5 таблицы	15 г по сумме масс Pu, U-233, Np-237 и U-235	1 г
7	Америций-241	1,0 г	0,1 г
8	Америций-243	1,0 г	0,1 г
9	Калифорний-252	0,001 г	0,000001 г
10	Уран с содержанием изотопа U-235 не больше 0,72 %	500 кг	1 кг
11	Торий	500 кг	1 кг
12	Литий – 6	1,0 кг	0,1 кг
13	Тритий	0,2 г	0,01 г
14	Дейтерий, за исключением дейтерия в тяжелой воде	2 г	0,1 г
15	Тяжелая вода	200 кг	1 кг

Категоризация ядерных материалов и установок

Для чего нужна категоризация ядерных материалов? Ядерные материалы классифицируют по категориям в целях обеспечения дифференцированного подхода к определению методов и средств их учета, контроля и защиты. Это позволяет сосредоточить внимание, прежде всего, на ядерных материалах, которые можно достаточно просто переводить в оружейные формы.

Рассмотрим, по каким правилам строится категоризация ядерных материалов в мире на примере системы категоризации ядерных материалов в США, разработанной для использования на предприятиях Министерства энергетики.

В распоряжении Министерства энергетики США имеется сеть национальных лабораторий и промышленных предприятий. Оно также занимается вопросами вооружений (ядерное оружие). Вот именно к ним имеет отношение эта категоризация.

Категоризация установок, относящихся к Министерству энергетики США, осуществляется в соответствии с двумя параметрами. Первый параметр – количественный. В зависимости от количества ядерных материалов установка, содержащая определенное количество ЯМ, относится к I, II, III, IV категории. А второй параметр используется для характеристики привлекательности ядерных материалов. Привлекательность оценивается с точки зрения скорости перевода ядерного материала в форму, пригодную для изготовления ядерного оружия.

Следует обратить внимание на то, что облученное топливо имеет наименьший уровень привлекательности. Причина проста. Его самозащищенность, по сути, исключает возможность хищений или возможность какого-то неправильного использования. То же относится и к низкообогащенному урану, так как для его непосредственного использования в ядерном оружии требуется значительное обогащение.

Категоризация ядерных материалов в России (НП–030–01 [1])

Категории ядерных материалов устанавливаются в зависимости от формы продукта, содержащего ЯМ, типа ЯМ и их массы (табл. 2.3 – 2.6). В соответствии с категоризацией ядерных материалов у нас в стране устанавливаются требования к их физической защите, учету и контролю.

Возможны случаи, когда в рассматриваемой зоне находятся различные продукты, различные типы ЯМ. В этой ситуации, определяя категорию имеющихся ЯМ, следует исходить из суммарной массы ядерных материалов каждого продукта и указанных в табл. 2.3 – 2.6 количественных пределов масс ядерных материалов тех продуктов, которые попадают в более высокую категорию.

Таблица 2.3

Ядерные материалы категории I

Продукты	Ядерный материал	Масса ядерного материала, кг, не менее
Металлические продукты: металлические изделия, заготовки; слитки, крупка, их сплавы и смеси; топливные элементы и сборки, содержащие металлическое и интерметаллидное топливо; бракованные изделия и отходы, перерабатываемые путем переплавки без растворения	Pu , U-233	2 по сумме масс Pu и U-233
	ВОУ	5 по изотопу U-235
	Смесь, совокупность Pu, U-233, ВОУ и других ядерных материалов	2 по сумме масс Pu, U-233, U-235, Np-237, Am, Cf
Продукты с высоким содержанием ядерных материалов: карбиды, оксиды, хлориды, нитриды, фториды, их сплавы и смеси; топливные элементы и сборки, содержащие топливо из вышеупомянутых соединений, а также другие продукты с концентрацией (содержанием) ядерных материалов не менее 25 г/л (25 г/кг)	Pu , U-233	6 по сумме масс Pu и U-233
	ВОУ	20 по изотопу U-235
	Смесь, совокупность Pu, U-233, ВОУ и других ядерных материалов	6 по сумме масс Pu, U-233, U-235, Np-237, Am, Cf

Таблица 2.4

Ядерные продукты категории II

Продукты	Ядерный материал	Масса ядерного материала, кг
Металлические продукты: металлические изделия, заготовки, слитки, крупка, их сплавы и смеси; топливные элементы и сборки, содержащие металлическое и интерметаллидное топливо; бракованные изделия и отходы, перерабатываемые путем переплавки без растворения	Pu, U-233	$\geq 0,5$, но < 2 по сумме масс Pu и U-233
	ВОУ	≥ 1 , но < 5 по изотопу U-235
	Смесь, совокупность Pu, U-233, ВОУ и других ядерных материалов	$\geq 0,5$, но < 2 по сумме масс Pu, U-233, U-235, Np-237, Am, Cf
Продукты с высоким содержанием ядерных материалов: карбиды, оксиды, хлориды, нитриды, фториды, их сплавы и смеси; топливные элементы и сборки, содержащие топливо из вышеупомянутых соединений, а также другие продукты с концентрацией (содержанием) ядерных материалов не менее 25 г/л (25 г/кг)		≥ 2 , но < 6
	Pu, U-233	по сумме масс Pu и U-233
	ВОУ	≥ 6 , но < 20 по изотопу U-235
	Смесь, совокупность Pu, U-233, ВОУ и других ядерных материалов	≥ 2 , но < 6 по сумме масс Pu, U-233, U-235, Np-237, Am, Cf
Продукты с низким содержанием ядерных материалов: продукты, требующие сложной обработки; продукты с концентрацией (содержанием) ядерных материалов от 1 до 25 г/л (от 1 до 25 г/кг)	Pu, U-233	≥ 16 по сумме масс Pu и U-233
	ВОУ	≥ 50 по изотопу U-235
	Смесь, совокупность Pu, U-233, ВОУ и других ядерных материалов	≥ 16 по сумме масс Pu, U-233, U-235, Np-237, Am, Cf

Таблица 2.5

Ядерные материалы категории III

Продукты	Ядерный материал	Масса ядерного материала, кг
Металлические продукты: металлические изделия, заготовки, слитки, крупка, их сплавы и смеси; топливные элементы и сборки, содержащие металлическое и интерметаллидное топливо; бракованные изделия и отходы, перерабатываемые путем переплавки без растворения	Pu, U-233	$\geq 0,2$, но $< 0,5$ по сумме масс Pu и U-233
	ВОУ	$\geq 0,5$, но < 1 по изотопу U-235
	Смесь, совокупность Pu, U-233, ВОУ и других ядерных материалов	$\geq 0,2$, но $< 0,5$ по сумме масс Pu, U-233, U-235, Np-237, Am, Cf
Продукты с высоким содержанием ядерных материалов: карбиды, оксиды, хлориды, нитриды, фториды, их сплавы и смеси; топливные элементы и сборки, содержащие топливо из вышеупомянутых соединений, а также другие продукты с концентрацией (содержанием) ядерных материалов не менее 25 г/л (25 г/кг)	Pu, U-233	$\geq 0,5$, но < 2 по сумме масс Pu и U-233
	ВОУ	≥ 2 , но ≤ 6 по изотопу U-235
	Смесь, совокупность Pu, U-233, ВОУ и других ядерных материалов	$\geq 0,5$, но < 2 по сумме масс Pu, U-233, U-235, Np-237, Am, Cf
Продукты с низким содержанием ядерных материалов: продукты, требующие сложной обработки; продукты с концентрацией (содержанием) ядерных материалов от 1 до 25 г/л (от 1 до 25 г/кг)	Pu, U-233	≥ 3 , но < 16 по сумме масс Pu и U-233
	ВОУ	≥ 8 , но < 50 по изотопу U-235
	Смесь, совокупность Pu, U-233, ВОУ и других ядерных материалов	≥ 3 , но < 16 по сумме масс Pu, U-233, U-235, Np-237, Am, Cf

Таблица 2.6

Ядерные материалы категории IV

Продукты	Ядерный материал	Масса ЯМ, кг, не более
Металлические продукты: металлические изделия, заготовки, слитки, крупка, их сплавы и смеси; топливные элементы и сборки, содержащие металлическое и интерметаллидное топливо; бракованные изделия и отходы, перерабатываемые путем переплавки без растворения	Pu, U-233	0,2 по сумме масс Pu и U-233
	ВОУ	0,5 по изотопу U-235
	Смесь, совокупность Pu, U-233, ВОУ и других ядерных материалов	0,2 по сумме масс Pu, U-233, U-235, Np-237, Am, Cf
Продукты с высоким содержанием ЯМ: карбиды, оксиды, хлориды, нитриды, фториды, их сплавы и смеси; топливные элементы и сборки, содержащие топливо из вышеупомянутых соединений, а также другие продукты с концентрацией (содержанием) ядерных материалов не менее 25 г/л (25 г/кг)	Pu, U-233	0,5 по сумме масс Pu и U-233
	ВОУ	2 по изотопу U-235
	Смесь, совокупность Pu, U-233, ВОУ и других ядерных материалов	0,5 по сумме масс Pu, U-233, U-235, Np-237, Am, Cf
Продукты с низким содержанием ЯМ: продукты, требующие сложной обработки; продукты с концентрацией (содержанием) ядерных материалов от 1 до 25 г/л (от 1 до 25 г/кг)	Pu, U-233	3 по сумме масс Pu и U-233
	ВОУ	8 по изотопу U-235
	Смесь, совокупность Pu, U-233, ВОУ и других ядерных материалов	3 по сумме масс Pu, U-233, U-235, Np-237, Am, Cf
Все другие продукты, включая: а) продукты, содержащие Pu, U-233, ВОУ с концентрацией (содержанием) менее 1 г/л (1 г/кг); б) любые соединения урана с содержанием U-235 в уране менее 20 %; в) любые продукты с мощностью поглощенной дозы на расстоянии 1 м без защиты не менее 1 Гр/ч = 100 рад/ч; г) любые соединения: плутония с содержанием изотопа плутония-238 более 80 %; тория, нептуния-237, америция-241, америция-243 и калифорния-252; д) специальные неядерные материалы и любые их соединения		Суммарная масса всех ядерных материалов не менее минимальных количеств

Упражнения по определению категории ядерных материалов

Определить категорию имеющихся материалов, если в зоне содержатся:

- свежие ТВС активной зоны исследовательского реактора (решетка реактора состоит из 16 ТВС, каждая ТВС содержит 90 %-ный уран в виде сплава урана и алюминия. В одной ТВС находится 300 г урана–235);
- одна свежая ТВС исследовательского реактора;
- свежие ТВС легководного энергетического реактора в количестве 1/3 от полной загрузки реактора (используется топливо UO_2 с обогащением 4,4 %, одна ТВС содержит 19 кг урана–235. В реакторе 160 ТВС. Общая загрузка реактора – 80 т UO_2);
- одна облученная ТВС;
- металлические отходы, содержащие 250 г плутония и контейнер с PuO_2 весом нетто 6,5 кг;
- 450 кг природного урана.

2.2. Формы ядерных материалов. Партия ядерных материалов

Формы ядерных материалов

Все ядерные материалы можно отнести к одной из следующих форм.

Штучная форма ЯМ – это очехлованные материалы. Они имеют собственный уникальный идентификационный номер. Примерами штучной формы ЯМ являются твэлы, тепловыделяющие сборки.

Ядерные материалы в балк–форме – это любые ЯМ, которые не очехлованы, т.е. находятся в форме, не имеющей оболочки: газы, жидкости, порошки, таблетки. Постоянная идентификация таких материалов невозможна, поскольку, при нахождении в контейнерах их количество и состав могут быть изменены.

В зависимости от имеющейся формы ЯМ для их учета применяют различные средства измерения и идентификации. Например, к ядерным материалам в балк–форме применимы разрушающие методы с взятием образцов и их дальнейшим аналитическим исследованием. А к ЯМ в форме учетных единиц эти методы не применимы. Зато, для их измерения часто используют неразрушающие методы.

Партия ядерных материалов

Исключительно важное понятие, которое используется и в старой (бухгалтерской), и в новой системе, – это партия ядерных материалов. С помощью этого понятия в новой системе учета (как, впрочем, и в старой) осуществляется регистрация ЯМ в штучной и в балк–форме.

Партия ЯМ – это группа однотипных изделий, содержащих ЯМ, параметры которых определяются единым комплексом измерений. Однотипность означает, что, например, в одной партии не допускаются изделия с разными обогащениями.

Каждая партия ЯМ включает пять элементов данных:

- имя партии ЯМ. Наименование партии – идентификатор, содержащий определенное количество символов. В идентификаторе указывается код изготовителя, порядковый номер партии и др. Таким образом, с помощью имени предусматривается уникальная идентификация партии ЯМ;

- количество однотипных изделий, находящихся в партии. Часто количество изделий равно 1. Для обозначения партии ЯМ в этом случае используют термин «учетная единица». Примеры партий: твэл – количество изделий в партии равно 1. Контейнер с UF_6 – количество изделий в партии также 1. Пять контейнеров с порошком UO_2 . Под партией понимается эта группа контейнеров, каждый из которых рассматривается как изделие;

- лигатурная масса ЯМ ($M_{\text{лиг}}$) – масса материала, содержащего химическую или физическую композицию ЯМ с некоторым инертным веществом. Например, под лигатурной массой ЯМ, находящихся в сплаве U-Al , используемого в качестве топлива некоторых исследовательских реакторов (типа ИРТ), понимается масса сплава U-Al . Под лигатурной массой ЯМ, находящихся в виде химического соединения двуокиси урана (топливо легководных энергетических реакторов), понимается масса соединения UO_2 ;

- масса элемента ($M_{\text{эл}}$). Например, для соединения UO_2 имеем элементные массы: $M_{\text{эл}} = M_{\text{U}}$, $M_{\text{эл}} = M_{\text{O}}$;

- масса изотопа ($M_{\text{из}}$). При учете, в первую очередь, рассматривают делящиеся изотопы: для урана – изотоп U-235 , а для плутония изотопы Pu-239 , 241 . Иногда, вместо массы U-235 рассматривается аналогичный параметр – обогащение.

Отмеченные пять параметров партии ЯМ являются ключевыми для учета и подведения баланса ЯМ. Эти параметры применяются к ЯМ как в форме штучных единиц, так и в балк-форме. Однако для материалов в штучной форме все данные, которые сопровождают необлученный материал – это данные завода-изготовителя, а для материалов в балк-форме данные со временем, как правило, меняются.

2.3. Зона баланса ядерных материалов (ЗБМ). Организация учета и контроля ядерных материалов в ЗБМ

Зона баланса материалов

Зона баланса материалов (ЗБМ) – центральное понятие в новой системе учета и контроля ЯМ. ЗБМ является элементарной структурной единицей государственной системы учета и контроля ЯМ.

В бухгалтерской системе этого понятия нет, и баланс ЯМ ведется на уровне всего предприятия. Понятие ЗБМ, введенное американцами в 1959 г. и «узаконенное» МАГАТЭ в документе «Рекомендации для государственных систем учета и контроля ядерных материалов» (1980 г. [2]), нашло свое отражение в «Концепции системы государственного учета и контроля ядерных материалов», утвержденной Правительством РФ в октябре 1996 г. [3].

Определение ЗБМ: Административно установленная замкнутая область, где на основании измеренных величин определяют все входящие и выходящие потоки ядерных материалов и на периодической основе – их наличное количество.

Таким образом, в ЗБМ четко определены контролируемые вход–выход, а наличное (инвентарное) количество ЯМ подлежит определению на периодической основе во время физической инвентаризации (ФИ) ЯМ.

Конструирование ЗБМ. Для обеспечения должного функционирования системы учета и контроля ЯМ на предприятии важной задачей является правильный выбор структуры зон баланса ЯМ. Однако определение размеров и границ ЗБМ является зачастую не простой задачей. Например, на рис. 2.1 представлена упрощенная технологическая схема завода по производству топлива энергетических реакторов.

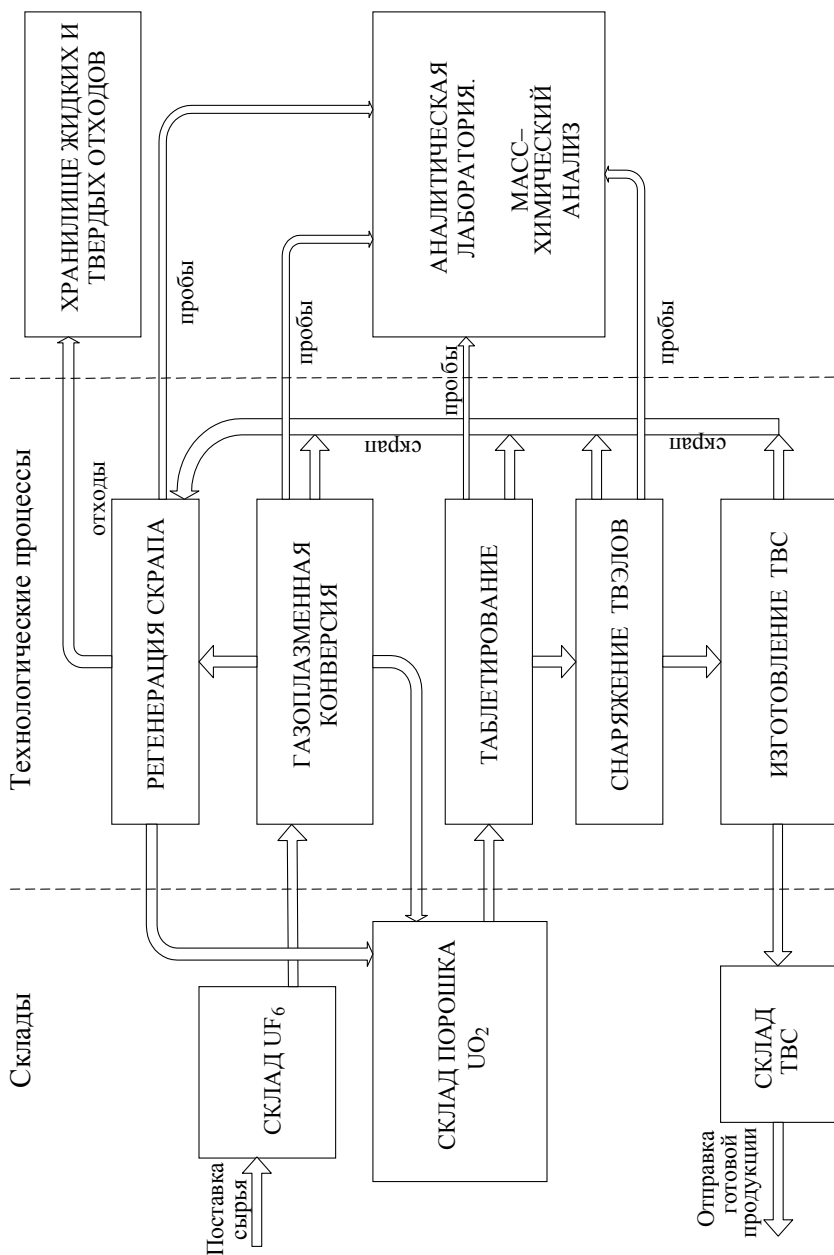


Рис. 2.1. Производство топлива для АЭС. Схема основных технологических участков

Здесь много различных технологических участков. А ЗБМ должны быть такими, чтобы было легко измерять входные и выходные потоки и проводить физические инвентаризации без больших экономических потерь из-за остановки производства.

Таким образом, задача определения размеров ЗБМ носит оптимизационный характер, так как решение выбирается из ряда противоречивых требований. Например:

а) если ЗБМ – крупная, то меньше документации по предприятию и легче отчитываться. Однако в ЗБМ труднее и дороже проводить ФИ, так как надо останавливать производство;

б) если ЗБМ – маленькая, легче проводить ФИ. Однако по всему предприятию потребуется готовить большое количество отчетных документов.

Каждое предприятие выбирает структуру ЗБМ, исходя из такого рода противоречивых условий и придерживаясь некоторых общих рекомендаций по выбору ЗБМ. Отметим здесь следующие рекомендации:

- количество ЗБМ на предприятии выбирают так, чтобы их было достаточно для обеспечения учета и контроля всех ЯМ. При этом каждая ЗБМ документально оформляется и утверждается вышестоящей организацией. В конечном счете, количество и границы ЗБМ согласовываются с Росатомом, осуществляющим учет и контроль ЯМ на федеральном уровне;

- каждая ЗБМ должна представлять собой единый неделимый участок (односвязная область);

- при определении структуры зон баланса ЯМ на предприятии необходимо, чтобы границы ЗБМ были четко выраженными и соответствовали (не пересекались) границам охраняемых зон. Границы ЗБМ и охраняемых зон могут совпадать;

- если границы ЗБМ не уменьшают возможности умышленного или непреднамеренного смешивания материалов из разных ЗБМ, то контроль ЯМ в такой зоне может потерять всякое значение;

- при определении границ ЗБМ целесообразно учитывать наличие физических барьеров. Физическими барьерами являются строительные конструкции (стены, перекрытия, ворота, двери), специально разработанные конструкции (заграждения, противотаранные устройства, решетки, усиленные двери, контейнеры);

- функциональные подразделения, такие как заводские лаборатории, склады, а также участки предприятий, требующие специальной защиты информации, выделяются в отдельные ЗБМ.

В МАГАТЭ и в некоторых российских организациях разработан и используется способ конструирования ЗБМ на основе проектной информации. Проектная информация о конструкции любой установки – это вопросник. Ответы на эти вопросы позволяют получить набор данных, необходимый для определения границ ЗБМ.

Определение потоков и инвентарных количеств ЯМ в ЗБМ

Определение входных и выходных потоков ЯМ, а также наличного количества ЯМ в ЗБМ проводится в ключевых точках измерения (КТИ).

Ключевая точка измерений (КТИ) представляет собой место, оборудованное для измерения параметров ЯМ и его атрибутивных признаков.

Способы определения инвентарного количества в отношении очехлованных изделий (ТВС, отдельные тепловыделяющие элементы и др.) – это штучный учет (идентификация изделий плюс их пересчет) и измерения ЯМ неразрушающими методами.

А в отношении материалов в балк-форме – это комплекс измерительных методов, применяемых для определения наличного количества с учетом возможного пробоотбора. Измерения химического и изотопного состава производят на отобранных пробах. В связи с этим важной задачей является обеспечение представительности проб ЯМ.

На рис. 2.2 приведен пример измерений различных форм ЯМ (балк-форма и штучные изделия) в ключевых точках для участка снаряжения твэлов в производстве топлива АЭС. Видно, что для учета ЯМ используются как разрушающие методы (входной поток ЯМ), так и неразрушающий анализ ЯМ.

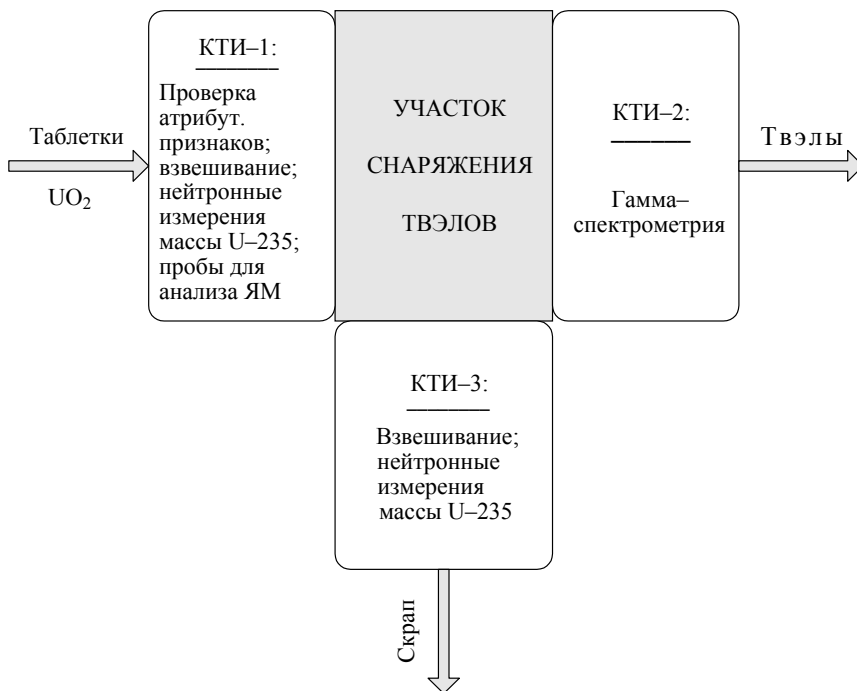


Рис. 2.2. Примеры измерений в КТИ потоков ЯМ

Атрибутивные признаки – данные, однозначно определяющие наличие, либо отсутствие какого-либо свойства ЯМ.

Примеры атрибутивных признаков.

- В данной учетной единице имеется в наличии ЯМ или нет?
- Устройство индикации вмешательства подтверждает отсутствие несанкционированного доступа к ЯМ или нет?
- ЯМ того типа, который указан в паспорте или нет?
- Масса-брутто ЯМ не отличается от паспортных данных в пределах погрешности измерений или нет?
- Число учетных единиц в контейнере совпадает с данными документов или нет?
- Учетная единица с данным идентификатором находится в определенном для нее месте или нет?

Атрибутивные признаки особенно полезны при выполнении основных учетных процедур. Например, при передаче ЯМ, когда требуется достаточно быстро принять поступивший материал. Входной контроль материала, прежде всего, осуществляют по его атрибутивным признакам.

Другим примером эффективного применения атрибутивных признаков является процедура физической инвентаризации ЯМ в ЗБМ. Во время проведения этой процедуры определяют все наличные количества ЯМ в ЗБМ путем проведения:

- проверки наличия и целостности ЯМ;
- проверки целостности и идентификации пломб и печатей;
- подсчета имеющихся учетных единиц;
- взвешивания учетных единиц;
- учетных и подтверждающих измерений.

Во время физической инвентаризации проверяется учетная документация, и составляются списки имеющихся ЯМ (список наличных количеств (СНК)). Ядерные материалы измеряют и находят фактически наличное количество ЯМ в ЗБМ (список фактически наличных количеств (СФНК)).

Сохранность ЯМ и качество их учета анализируется по соответствию между фактически наличными и документально зарегистрированными ЯМ в ЗБМ. Установление этого соответствия называется подведением баланса ЯМ в ЗБМ. Формально баланс ЯМ в ЗБМ можно записать в виде следующего уравнения:

$$\text{ИР} = \text{КК} - \text{ДК} = \text{КК} - \text{УВ} + \text{УМ} - \text{НК}, \quad (2.1)$$

где ИР – инвентаризационная разница; КК – фактически наличное количество ЯМ в ЗБМ, определенное в результате данной ФИ; ДК – документально зарегистрированное количество ЯМ в ЗБМ на начало инвентаризации; УВ – определенное и документально зарегистрированное увеличение количества ЯМ за данный межбалансовый период (МБП); УМ – определенное и документально зарегистрированное уменьшение количества ЯМ за данный МБП; НК – наличное количество ЯМ в ЗБМ, определенное и документально зарегистрированное на начало данного МБП. Подробнее процедуры физической инвентаризации и подведения баланса ЯМ по ЗБМ рассмотрены в главе 6.

Основные требования к организации учета и контроля ЯМ в ЗБМ

При организации ЗБМ устанавливают:

- виды, формы и количества ЯМ, которые могут находиться в ней (т.е. категория ЯМ);
- система санкционированных положений ЯМ. Каждое положение должно иметь уникальный идентификатор;
- персонал, допущенный к ЯМ в данной ЗБМ;
- в ЗБМ определяют ключевые точки измерения ЯМ, которые обеспечиваются необходимым измерительным оборудованием;
- разрабатывается методика проведения физической инвентаризации;
- устанавливаются формы учетной документации и порядок ее ведения.
- ответственность за хранение всего ЯМ внутри ЗБМ возлагается на одно материально ответственное лицо (МОЛ), с которым заключается договор о материальной ответственности в соответствии с Кодексом законов о труде РФ.

Основные функции, которые выполняет МОЛ, связаны с:

- оформлением документов на отправление – получение ЯМ и осуществление всех внешних передач ЯМ из ЗБМ и в ЗБМ;
- ведением учетных документов и подготовкой отчетов в выше-стоящие организации;
- участием в проведении физической инвентаризации;
- информированием руководства предприятия обо всех случаях обнаружения недостат ЯМ.

Список литературы

1. Основные правила учета и контроля ядерных материалов. НП–030–05. Утверждены Постановлением Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору N 19 от 26 декабря 2005 года. М., 2005.
2. IAEA Safeguards: Guidelines for States Systems of Accounting for and Control of Nuclear Material, IAEA/SG/INF/2, IAEA, Vienna (1980).
3. Концепция системы государственного учета и контроля ядерных материалов. – Постановление Правительства РФ от 14 октября 1996 г. № 1205.

ГЛАВА 3

ИНФОРМАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ УЧЕТА ЯМ

Информационная система является центральной в учете и контроле ЯМ, так как именно здесь формируются и хранятся все данные, необходимые для планирования и деятельности с ЯМ на всех уровнях: государственном, ведомственном, эксплуатирующей организации.

В этой главе рассмотрено как строятся информационные системы учета ЯМ на федеральном уровне и уровне эксплуатирующей организации.

3.1. Задачи, решаемые информационной системой учета ЯМ

Информационная система учета ЯМ позволяет решать целый ряд задач, связанных с обращением с ЯМ.

1. Задачи управления. В первую очередь, надо отметить, что без надежной информации о ЯМ невозможно эффективно планировать деятельность и управлять ЯМ в процессе этой деятельности. Поэтому информация о ЯМ составляет основу современной системы управления ЯМ на всех уровнях: государственном, ведомственном, предприятий.

2. Задачи контроля ЯМ. Информационная система обеспечивает данные для контрольной деятельности, проводимой как внутренними подразделениями (например, административный контроль ЯМ на предприятии), так и внешними организациями (например, контрольные меры со стороны Ростехнадзора РФ).

3. Защитные задачи. Точная и быстро реагирующая на изменения состояния с ЯМ информационная система играет также защитную роль, так как позволяет выявлять аномалии с ЯМ. Кроме того, компьютеризация процессов обработки информации, отчуждение и обобществление информации о наличных количествах и перемещениях ядерных материалов в виде централизованной базы данных на сервере способствуют сдерживанию несанкционированных действий с ЯМ. В централизованную базу данных могут входить ответственные лица и сравнивать то, что происходит на установке, с тем, что материально ответственное лицо сообщает в базу данных. Таким образом, повышается прослеживаемость ЯМ.

3.2. Основные требования к информационным системам учета ЯМ

Качество предоставляемой информации по ЯМ. Информация относительно ЯМ, предоставляемая информационной системой учета любого уровня, должна отвечать следующим требованиям: быть достоверной, полной и своевременной. Принятый в настоящее время подход в учете и контроле ЯМ основан на измеряемом материальном балансе ЯМ и направлен на обеспечение этих требований. А именно, данные о ЯМ формируются на основе их измерений. В каждой ЗБМ регулярно проводится тотальная проверка всех ЯМ (процедура физической инвентаризации). В настоящее время учет ЯМ осуществляется с помощью современных технологий обработки информации, основанных на использовании компьютерных систем.

Защита информации. Защита информации о ЯМ, условия и разграничение доступа к ней являются принципиальными требованиями к информационным системам учета ЯМ и содержатся в ОПУК. В рамках современных компьютеризированных систем учета активно развиваются средства обеспечения этих и других нормативных требований к информационной системе учета ЯМ.

3.3. Структура информационной системы учета ЯМ на уровне предприятия

Элементарной автономной структурной единицей, в рамках которой функционирует информационная система предприятия, является ЗБМ. Именно в ЗБМ формируется первичная, наиболее полная информация о ЯМ. А далее эта информация анализируется, обрабатывается и представляется в сводном виде. Сводные результаты направляются на вышестоящие уровни. Таким образом, информационная система учета ЯМ по предприятию объединяет сводные данные по каждой ЗБМ.

Структура информационного описания ЯМ в ЗБМ

В ЗБМ документально фиксируют атрибутивные признаки и основные параметры всех имеющихся в наличии ЯМ. В том числе, регистрируют тип, форму и количество ЯМ. С помощью идентификаторов однозначно документируют ЯМ, их санкционированные

положения в ЗБМ. Регистрируются все произведенные измерения ЯМ и данные об использованной аппаратуре. Отсутствие несанкционированного доступа к ЯМ характеризуют идентификационными признаками УИВ. Кроме того, все значимые операции, выполняемые с ЯМ, также документально фиксируются.

В результате всех учетных операций в ЗБМ формируется наиболее детальная информация относительно каждой учетной единицы с ЯМ. Максимальная детализация информационного описания в сочетании с локализацией до уровня ЗБМ позволяют подводить балансы по этим областям и выявлять на уровне ЗБМ значимую разницу между документальным и фактическим количествами ЯМ, контролируя качество информационного описания обращения с ЯМ в пределах каждой ЗБМ.

Регистрация отмеченных выше данных производится в специальных журналах записи операций с ЯМ, ведомостях (общей и вспомогательных) учета ЯМ по ЗБМ, в виде электронных баз данных. Таким образом, информационная система реализуется в двух формах: бумажной и электронной. Эти две формы ведения учетной информации взаимно дополняют друг друга и позволяют оперативно и надежно хранить и обрабатывать данные по ЯМ.

Относительно ЯМ в ЗБМ в рамках информационной системы хранятся и генерируются два вида информации: учетная (исходные и регистрационные документы) и отчетная информация по ЯМ.

Система учетных документов в ЗБМ

Информационная система учета ЯМ в ЗБМ ведется в соответствии с общими требованиями к учетной документации по ЯМ (в соответствии с основными правилами – НП–30–01). Учетные документы, ведущиеся в ЗБМ, содержат данные о каждом виде ЯМ включая: количество ЯМ в ЗБМ; изменения количества ЯМ в ЗБМ; корректировки записей в учетных документах. В соответствующих документах отражаются также дополнительные данные: результаты калибровки, проверки и поверки всех измерительных средств; данные об отборе проб и результат их анализа; результаты контроля качества измерений и др.

Никакая информация в учетных документах не должна уничтожаться. Она всегда должна быть доступной для последующего анализа. Ошибочно сделанные записи и последующие внесения новых

записей за новыми учетными номерами должны сохраняться в учетных документах.

Система учетных документов ЗБМ представляет собой набор:

- исходных документов по ЯМ;
- регистрационных документов;
- бухгалтерского субсчета ЗБМ на счету предприятия.

Исходная документация в ЗБМ

Совокупность всех сопроводительных документов к ЯМ, поступающих в ЗБМ, а также все результаты проведенных измерений ЯМ (например, во время физических инвентаризаций) образуют исходную документацию. Эта документация является необходимой и важной частью всей информационной системы. Затем эти исходные данные регистрируются, обрабатываются и анализируются. Поэтому проверка достоверности информации, содержащейся в исходных документах, и их надежное хранение являются главными задачами по отношению к ним.

Регистрационная документация в ЗБМ и на предприятии

Регистрация ЯМ в ЗБМ производится в журналах записи ежедневных операций с ЯМ, в журнале передач ЯМ, общей и вспомогательной ведомостях учета ЯМ по ЗБМ и др. Операции, меняющие баланс материалов на предприятии, регистрируются в главной учетной книге. Эта информация дает общее представление о состоянии ЯМ в целом на предприятии и ведется отделом УиК ЯМ.

Эти учетные документы велись и раньше, но теперь изменились условия:

- обязательные регулярные измерения ЯМ с указанием не только результатов измерений, но и их точности;
- ведение электронной версии учетных данных в виде баз данных на серверах. В базах данных регистрируются изменения с ЯМ в форме транзакций.

Здесь важно отметить, что множественная фиксация ЯМ в документах различного уровня позволяет легче находить ошибки учета (путем сличения различных ведомостей и списков наличных ЯМ) и, одновременно, усложняет возможность фальсификации записей операций с ЯМ.

Учет ЯМ на бухгалтерском счету

Каждая организация, имеющая ЯМ, отражает их на своем бухгалтерском счету. Организация счета предприятия может быть различной в зависимости от многих факторов. Как правило, ЗБМ имеет субсчет на бухгалтерском счету предприятия, где регистрируются для каждого вида ЯМ: наличные количества, поступления и убыль ЯМ в ЗБМ, а также учетные измерения ЯМ. Вместе по всем ЗБМ эти субсчета образуют счет для данного вида ЯМ на предприятии. Однако субсчет позволяет иметь более подробные данные о ЯМ, упрощает их нахождение и является зоной внутреннего бухгалтерского контроля ЯМ.

Внутренний бухгалтерский контроль счетов и документов является важным элементом поддержания работоспособности всей информационной системы учета ЯМ. Он включает:

- соответствующую установленному на предприятии порядку четко определенную структуру существующих документов и распределение полномочий и ответственности между персоналом при работе с ними;
- периодический пересмотр документов и порядок их сверки;
- оценка текущего состояния системы;
- контроль логичности данных в потоке поступающей информации о ЯМ;
- контроль доступа к информации.

Система отчетных документов ЗБМ и предприятия

Выходная информация из ЗБМ – отчетные документы в бумажной и электронной формах. Каждая ЗБМ должна периодически готовить отчеты для их дальнейшей отправки в вышестоящую организацию (а далее в Росатом, Ростехнадзор т.д.).

В настоящее время приняты три вида отчетной информации:

- отчет об изменении инвентарного количества ЯМ (это перечень всех получений и отправлений);
- материально–балансовый отчет (где указывается полученная инвентаризационная разница), который составляется после проведения физической инвентаризации;

- перечень всех фактически наличных ЯМ в ЗБМ (полный список всех материалов с указанием их количественных характеристик).

В табл. 3.1, 3.2 приведены примеры форм отчетов о наличных количествах и изменениях инвентарного количества ЯМ сводных по предприятию. С 2002 года по этим сводным формам предприятия Росатома отчитываются о состоянии с ЯМ перед государством в рамках федеральной информационной системы учета ЯМ.

Кроме того, на основе своих счетов предприятие осуществляет финансовую отчетность перед государством, направляя в вышестоящие организации периодически (например, раз в год) сводные данные о ЯМ в их стоимостном выражении.

3.4. Транзакция как основной элемент регистрации ЯМ в ЗБМ

Центральное место в электронном учете ЯМ в ЗБМ занимает понятие транзакции. Транзакция – это запись в базе данных факта изменения состояния ЯМ, либо информации о ЯМ. Эти изменения (например, инвентарного количества, химической, физической формы ЯМ, данных о ЯМ) соответствуют операциям (процессам), производимым с материалами, либо информацией о ЯМ. Таким образом, среди всего множества выполняемых операций регистрируют наиболее значимые.

Например, важной характеристикой является общее количество ЯМ в ЗБМ на определенный момент времени, называемое инвентарным количеством ЯМ. Все операции, приводящие к изменению инвентарного количества ЯМ в ЗБМ регистрируются как транзакции. Сюда входят все отправки ЯМ из данной ЗБМ и получение материалов в ЗБМ; списываемые отходы с ЯМ, потери ЯМ, наработка и выгорание нуклидов, изменение ЯМ при обогащении и другие. Другим примером транзакций служат записи результатов измерений, выполненных с ЯМ. Операции с информацией о материалах, например корректировки в описи ЯМ, также регистрируются в виде транзакций.

Таблица 3.1

Отчет об изменении инвентарного количества ядерных материалов, сводный по организации

№ строки	Код типа изменения	Код программы	Код вида материала	% обогащения	Идентификатор от- четной партии	Описание материала			Лигатурная масса		Элемент			Изотоп		
						Физическая форма	Химическая форма	Чистота и об- лученность	Единица изме- рения	Масса	Код	Единица изме- рения	Масса	Код	Единица изме- рения	Масса
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
1																
2																
3																
4																
5																
...																
...																

Таблица 3.2

Список наличного количества ядерных материалов, сводный по организации

№ строки	Код программы	Код вида материала	% обогащения	Идентификатор от- четной партии	Описание материала			Лигатурная масса		Элемент			Изотоп		
					Физическая форма	Химическая форма	Чистота и об- лученность	Единица изме- рения	Масса	Код	Единица изме- рения	Масса	Код	Единица изме- рения	Масса
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1															
2															
3															
4															
5															
...															
...															

В дальнейшем в целях упрощения изложения мы не будем различать транзакцию и соответствующую ей операцию, приводящую к изменению отмеченных характеристик ЯМ в ЗБМ.

Все транзакции документируются в соответствующих базах данных. На практике все множество транзакций сводится к трем типам:

внешние передачи – отправка или получение ЯМ с другого предприятия;

внутренние передачи – передачи ЯМ между ЗБМ внутри одного предприятия. Для внутренних передач, как правило, требуется меньше сопроводительных документов и разрешений, чем для внешних. Например, не требуется предварительного уведомления о планируемой передаче материала;

другие инвентарные изменения, не связанные с физическим перемещением материала. Этот тип транзакций отличается от первых двух типов, поскольку речь идет об «односторонних» операциях, когда нет отправителя и получателя, а делается запись об изменении состояния ЯМ только в пределах одной ЗБМ.

К ним относятся:

- ядерное производство и выгорание;
- обогащение изотопами;
- изменение химической и физической формы;
- измеренные сбросы отходов;
- случайные потери и обнаружения избыточных ЯМ;
- корректировки в описи ЯМ;
- согласования наличного количества ЯМ после повторных измерений, учета отложений ЯМ, утвержденное списание инвентаризационной разницы.

При документировании транзакций, соответствующих «односторонним» операциям, требуется указывать модель оценки изменения количества ЯМ, например, модель выгорания топлива в реакторе.

Таким образом, электронный учет ЯМ означает последовательную фиксацию транзакций в базах данных. По любой транзакции документируются следующие данные:

- идентификатор единицы, являющейся объектом операции;
- вид перемещаемого материала (U, Pu и т.д.);
- общий вес или объем материала;

- вес элементов (U, Pu и т.д.);
- вес расщепляющегося изотопа (для урана);
- физическая форма материала;
- химическая форма материала;
- пункт назначения (при передаче);
- вид производимой операции;
- дата операции;
- дата физического перемещения материала;
- фамилия лица, записавшего операцию в журнал;
- фамилия лица, утвердившего проведение операции.

Как видно, эти данные включают все параметры партии ЯМ.

Документирование транзакций в отмеченной выше форме позволяет подводить баланс ЯМ в ЗБМ, оценивать разницу отправитель–получатель ЯМ, следовать нормативным требованиям к системе учета и контроля ЯМ.

3.5. Федеральная информационная система учета и контроля ядерных материалов

Федеральная автоматизированная информационная система учета и контроля ядерных материалов (ФИС) является составной частью ГСУК ЯМ и предназначена для информационной поддержки руководящих органов, занимающихся планированием и управлением ядерными материалами. В том числе ФИС должна:

- обеспечивать информационную поддержку Росатома России, который уполномочен осуществлять учет и контроль ядерных материалов на федеральном уровне;
- осуществлять информационное взаимодействие с ведомственными информационными системами.

Задачи ФИС:

- создание и ведение государственного регистра ЯМ;
- предоставление информации о ЯМ заинтересованным потребителям;
- информационная поддержка задач, связанных с экспортом–импортом ЯМ;
- информационная поддержка задач, связанных с транспортировкой ЯМ.

Структура ФИС определяется взаимодействием конкретных поставщиков и потребителей информации. Это взаимодействие координируется Информационно–аналитическим центром (ИАЦ ФИС, рис. 3.1).

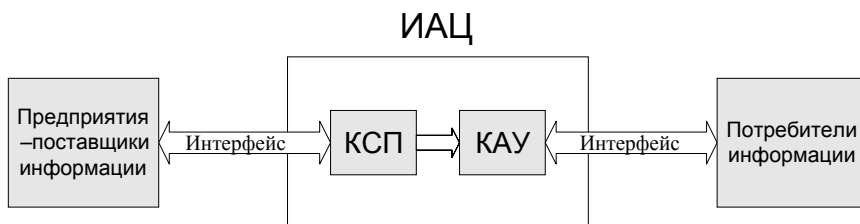


Рис. 3.1. Структура федеральной информационной системы: ИАЦ – Информационно–аналитический центр; КСП – Комплекс сбора и подготовки информации; КАУ – Комплекс аналитической обработки информации и управления

В свою очередь Информационно–аналитический центр, с точки зрения выполнения функциональных задач, состоит из Комплекса сбора и подготовки информации (КСП) и Комплекса аналитической обработки информации и управления (КАУ).

КСП поддерживает непрерывную связь с предприятиями – поставщиками информации в ФИС. Именно в КСП информационные системы предприятий направляют отчетные материалы о количествах и движении ЯМ. КСП осуществляет сбор отчетной информации о ЯМ, проверяет ее на соответствие определенным требованиям и правилам, проводит различные виды тестирования информации, и в случае соответствия установленным требованиям помещает ее в базу данных. Таким образом, в КСП формируется массив отчетных данных о ЯМ, ведутся справочные массивы, поддерживаются актуальные версии классификаторов, осуществляется активное взаимодействие с поставщиками информации. На данном этапе развития ФИС круг поставщиков информации ограничен российскими предприятиями. Для этих целей на них создаются автоматизированные СУИК ЯМ, которые обеспечивают ведение учета ЯМ на предприятии, формируют и направляют в ФИС регламентные отчеты о ЯМ.

Функции информационного обеспечения пользователей ФИС возложены на КАУ, который призван взаимодействовать с потре-

бителями информации ФИС и определять необходимый объем и качественный состав отчетной информации. Основными потребителями информации ФИС являются, прежде всего, руководство Росатома и различные его департаменты. В настоящее время не предусматривается интерактивный доступ пользователей к базе данных ФИС. Однако такой режим работы планируется к реализации на последующих этапах развития ФИС при условии решения вопросов защиты информации.

Схема передачи информации об ЯМ в ФИС основывается на представлении данных от всех ЗБМ каждого предприятия. Однако при всей привлекательности данной схемы следует понимать, что она осуществима лишь при выполнении ряда условий, в том числе, наличии автоматизированных информационных СУиК ЯМ на предприятиях. Кроме того, само подключение СУиК предприятий к ФИС является достаточно длительным этапом.

Федеральная информационная система находится на одном из начальных этапов своего развития. И поэтому в ФИС в настоящее время реализована достаточно простая схема подключения предприятий. С 2000 г. в Росатоме проводятся работы по созданию в рамках ФИС подсистемы сбора и обработки сводных отчетов о наличии ЯМ в организациях. Сводные формы «Список наличного количества ЯМ (СНКс)» и «Отчет об изменении инвентарного количества ЯМ (ОИКс)» находятся в стадии ввода в действие как нормативные документы. С 2002 г. все организации России, работающие с ЯМ, отчитываются по этим формам.

Отчеты СНКс/ОИКс должны готовиться предприятием в виде бумажного документа или его электронного варианта, подготовленного с помощью текстового редактора на компьютере. Передача в ФИС отчетов организаций может осуществляться фельдсвязью на дискете. Поступивший в ИАЦ ФИС отчет организации идет на входную обработку, по результатам которой генерируется отчет о принятых данных, об ошибках, направляемый в эту организацию. Если отчет организации не содержит ошибок, то отчетные данные записываются в БД ФИС. В случае ошибок коррекция данных, содержащихся в отчетах СНКс/ОИКс, может осуществляться персоналом ИАЦ ФИС по согласованию с предприятием и соответствующим департаментом Росатома.

ГЛАВА 4

СТАТИСТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ УЧЕТА И КОНТРОЛЯ ЯМ

Если попытаться кратко сформулировать главную цель развиваемой системы физической защиты, учета и контроля ядерных материалов (ФЗУ и К ЯМ), то можно сказать, что она заключена в обеспечении достоверного прослеживания ЯМ на всех стадиях ЯТЦ. Обеспечение достоверности – безусловно, задача математической статистики [1].

Рассмотрим схему триады учета и контроля (У и К), а также физической защиты (ФЗ) ядерного материала (ЯМ), обеспечивающую достижение поставленной цели (рис. 4.1).



Рис. 4.1. Схема триады ФЗУ КЯМ

Совершенно очевидно, что эффективное решение задачи достижения обеспечения нераспространения и достоверного прослеживания ЯМ зависит от эффективности и достаточности каждой из составляющих триады физической защиты учета и контроля ядерных материалов. Возникают следующие вопросы, ответы на которые можно получить, только зная вероятностные и статистические методы:

- как количественно оценить эффективность системы физической защиты ядерно-опасных объектов и ядерных материалов;
- как часто и с какой допустимой точностью проводить контроль ядерного материала;

- как правильно и достаточно организовать учетные измерения ядерных материалов?

Необходимость использования статистических методов при проведении инспекций и физических инвентаризаций возникает в связи с временными и финансовыми ограничениями. Бывает невозможно или невыгодно с экономической точки зрения провести проверку всех учетных единиц, или всех ядерных материалов, находящихся в данной зоне баланса материалов. Однако с помощью статистических методов можно спланировать объем и последовательность выборки, чтобы по части измеряемого материала достоверно утверждать о характеристиках всей совокупности.

Анализ и оценка неопределенностей результатов измерений и поиск путей их снижения, планирование объема и последовательности выборки, оценка статистической значимости расхождений результатов измерений, чтобы достичь основной цели – обеспечить достоверную прослеживаемость ЯМ.

Действительно, как правило, результат контрольного измерения отклоняется от заявленного значения измеряемой характеристики контролируемого ядерного материала. Причиной расхождения может быть либо погрешность результата измерения, определяемая статистически, либо действительно наблюдаемое различие между измеренным и заявленным значениями. Окончательный вывод невозможен без соответствующего статистического анализа.

Вероятностные и статистические методы не только позволяют количественно оценить эффективность системы учета и контроля, но и предоставляют единственную возможность количественно оценить уязвимость ЯМ – важнейшую характеристику эффективности системы физической защиты, безусловно, имеющую вероятностную природу.

Осуществляемая в настоящее время широкомасштабная модернизация и совершенствование государственной системы учета и контроля ЯМ подразумевает, что одной из существенных характеристик государственной системы У и К ЯМ должно стать широкое применение методов математической статистики.

4.1. Основные понятия определения и сведения из теории вероятностей и статистики

Теория вероятностей (ТВ) и математическая статистика (МС) выступают в роли единой математической дисциплины. Предметом этой математической дисциплины являются методы решения прямой и обратной задачи о прогнозе и принятии решения. Что представляет собой предмет МС? Одно из самых простых определений основано на сравнении, связанном с понятием выборки из конечной генеральной совокупности. Зная состав генеральной совокупности, можно получить распределение для состава случайной выборки. Это типичная прямая задача теории ТВ.

Однако часто приходится решать обратные задачи, когда известен состав выборки, и по нему требуется определить, какова была генеральная совокупность. Такого рода задачи и составляют предмет МС. Можно сказать: с помощью ТВ мы, зная природу некоего явления, выясняем, как будут себя вести (как распределены) те или иные изучаемые нами характеристики, которые можно наблюдать в эксперименте. В статистике наоборот – исходными являются экспериментальные данные (как правило, это наблюдения над случайными величинами), а требуется вывести то или иное суждение (или принять решение) о природе рассматриваемого явления.

Вероятность

Общее понятие вероятности события есть абстракция, ведущая свое начало от идеи относительной частоты, с которой событие встречается в последовательности повторений эксперимента (испытания) при «данной совокупности условий».

Представим себе относительную частоту события в неограниченно длинном ряду повторений нашего эксперимента, и будем недалеко от разумной интерпретации вероятности события. Однако возникнут серьезные трудности, если пытаться основать ТВ на строгой формализации такой интерпретации. Более простая и глубокая формулировка была предложена А.Н. Колмогоровым [2]. Она сводится к следующим предположениям:

- в качестве вероятности события в некотором начальном классе относительно простых событий могут быть выбраны числа интервала $[0,1]$;

• эти начальные вероятности вместе с аксиомами и правилами определения вероятностей более сложных событий дают возможность определить вероятность любого события.

Примечание. Таким образом, в процессе выбора вероятности события обычно руководствуются гипотетическими данными, основанными на прогнозировании относительных частот. Можно поинтересоваться, а правильно ли мы выбрали вероятность в той или иной конкретной задаче. Формально постановка этого вопроса приводит нас к одной из задач теории проверки статистических гипотез. Решение этой задачи и позволит получить ответ о выборе вероятности. Введем эти аксиомы и правила.

1. Каждому событию A соответствует определенное число $P(A)$, удовлетворяющее условию $0 \leq P(A) \leq 1$, которое называется вероятностью.

2. Вероятность достоверного события равна единице.

3. Вероятность суммы несовместимых событий равна сумме их вероятностей (так называемая аксиома сложения вероятностей).

Еще раз заметим, что система аксиом не определяет принцип выбора числового значения вероятности. Его устанавливают так, чтобы выполнялись все аксиомы, и чтобы оно отражало закономерности возникновения события.

Вероятность – объективная мера и существует (может быть известна!) до опыта, а относительная частота – только в результате опыта.

Событие A будем называть независимым от события B , если вероятность события A не изменяется при наступлении события B . Таким образом, введенную парную независимость можно обобщить до независимости в совокупности для достаточно большого ряда событий.

Формула полной вероятности и формула Байеса

Вероятность события F , которое наступает только с каждым из событий $A_1, A_2, \dots, A_n$, образующих полную систему, если известны их вероятности и условные вероятности события F относительно каждого из них $P_{A_1}(F), P_{A_2}(F), \dots, P_{A_n}(F)$ и т.д., рассчитывается по формуле полной вероятности:

$$\begin{aligned} P(F) &= P(A_1)P_{A_1}(F) + P(A_2)P_{A_2}(F) + \dots + P(A_n)P_{A_n}(F) = \\ &= \sum_{i=1}^n P(A_i)P_{A_i}(F). \end{aligned}$$

Формулу Байеса (формулу гипотез) можно получить, обобщая правило умножения вероятностей и учитывая, что поскольку

$P(AB)=P(A)P_A(B)=P(B)P_B(A)$; то $P_A(B)=P(B)P_B(A)/P(A)$, или обобщая на n событий и используя формулу полной вероятности, имеем:

$$P_F(A_i) = \frac{P(A_i)P_{A_i}(F)}{\sum_{j=1}^n P(A_j)P_{A_j}(F)}.$$

Формулу Байеса часто называют формулой гипотез, так как она может использоваться для переоценки вероятности гипотез о наступлении событий $A_1, A_2, A_3, \dots, A_n$ после того, как стало известно, что событие F произошло.

Случайные величины и их распределения и характеристики

Случайной величиной будем называть переменную, которая может принимать те или иные значения в зависимости от обстоятельств. Случайная величина есть любая переменная x , значения которой образуют множество элементарных событий или обозначают точки в пространстве выборок.

Соответствующее распределение вероятностей называется распределением случайной величины x . По своей природе все случайные величины можно разделить на дискретные и непрерывные.

Дискретная случайная величина – множество ее значений конечно или счетно (количество единиц хранения, число твэлов, количество контейнеров с ЯМ и т.д.).

Функция $p(x)$, связывающая значение случайной величины с соответствующими вероятностями, называется законом распределения случайной величины. Закон распределения можно представить в виде таблицы, или графически. Однако составить полное представление о случайной величине по ее закону весьма трудно. Поэтому используют некоторые постоянные характеристики ее закона распределения. Это так называемые моменты различных порядков. Они характеризуют случайную величину наиболее полно. Важнейшими моментами являются математическое ожидание (начальный момент первого порядка) и дисперсия (центральный момент второго порядка) [3].

Математическое ожидание дискретной случайной величины

Математическим ожиданием дискретной случайной величины называется сумма произведений всех ее значений на соответствующие вероятности:

$$M(X) = x_1 p_1 + \dots + x_i p_i + \dots = \sum_{i=1}^n x_i p_i. \quad (4.1)$$

Математическое ожидание случайной величины – постоянная величина, показывающая, какое значение случайной величины следует ожидать (в среднем) при испытаниях или наблюдениях.

Рассмотрим основные свойства математического ожидания.

1. Математическое ожидание постоянной величины равно этой постоянной: $M(k) = k$, где $k = \text{const}$.

2. Математическое ожидание суммы (разности) конечного числа случайных величин равно сумме (разности) их математических ожиданий:

$$M(X \pm Y) = M(X) \pm M(Y).$$

3. Математическое ожидание произведения конечного числа независимых случайных величин равно произведению их математических ожиданий:

$$M(XY) = M(X)M(Y).$$

4. Если все значения случайной величины X уменьшить (увеличить) на $K = \text{const}$, то математическое ожидание уменьшится (увеличится) на K :

$$M(X - K) = M(X) - K.$$

Дисперсия случайной величины

Наиболее распространенной мерой (характеристикой) отклонения, рассеяния (разброса) случайной величины является дисперсия и получаемое из нее среднее квадратическое отклонение (СКО).

Поскольку очевидно, что линейными разностями охарактеризовать разброс (отклонение) значений случайной величины от мате-

математического ожидания нельзя, то принято оценивать квадраты отклонений.

Тогда дисперсией случайной величины X будем называть математическое ожидание квадрата отклонения ее значения от математического ожидания:

$$D(X) = y^2(X) = M[X - M(X)]^2, \quad (4.2)$$

для дискретных случайных величин имеем:

$$D(X) = \sum (x_i - a)^2 p_i, \quad (4.3)$$

где $a = M(X)$.

СКО равно:

$$y(X) = \sqrt{D(X)}. \quad (4.4)$$

Дисперсия случайной величины – постоянная величина. Если дисперсия мала, то малы и все числа суммы (4.3). Поэтому если существуют x_i , сильно отклоняющиеся от a , то они маловероятны. Если же дисперсия велика, то это указывает на значительную вероятность сильно удаленных от a значений случайной величины.

Удобство среднего квадратического отклонения $\sigma(X)$ в том, что, характеризуя степень отклонения (разсеяния), оно имеет размерность измеряемой величины.

Рассмотрим основные свойства дисперсии.

1. Дисперсия постоянной величины равна нулю: $D(k) = 0$; $k = \text{const}$.

2. $D(kx) = k^2 D(x)$, где $k = \text{const}$.

3. Дисперсия случайной величины равна математическому ожиданию ее квадрата без квадрата математического ожидания:

$$D(X) = M(X^2) - M^2(X). \quad (4.5)$$

4. Дисперсия суммы (разности) независимых случайных величин равна сумме их дисперсий:

$$D(X \pm Y) = D(X) + D(Y). \quad (4.6)$$

Из свойства 4 следует, что среднее квадратическое отклонение суммы независимых случайных величин равно корню квадратному из суммы квадратов их средних квадратических отклонений:

$$\sigma(x) = \sqrt{\sum_{i=1}^n \sigma_i^2} . \quad (4.7)$$

Рассмотрим n одинаково распределенных случайных величин:

если $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$ – одинаково распределенные случайные величины, математическое ожидание каждой из которых равно a , то математическое ожидание их суммы равно na , а математическое ожидание среднего арифметического равно a :

$$M\left(\frac{x_1 + x_2 + \dots + x_n}{n}\right) = \frac{1}{n} M(x_1 + x_2 + \dots + x_n) = \frac{1}{n} na = a ;$$

если $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$ – одинаково распределенные независимые случайные величины, дисперсия каждой из которых σ^2 , дисперсия их суммы $n\sigma^2$, а дисперсия среднего арифметического $\frac{\sigma^2}{n}$:

$$D(x_1 + x_2 + \dots + x_n) = D(x_1) + D(x_2) + \dots + D(x_n) = n\sigma^2 , \quad (4.8)$$

$$D\left(\frac{x_1 + x_2 + \dots + x_n}{n}\right) = \frac{1}{n} D(x_1 + x_2 + \dots + x_n) = \frac{\sigma^2}{n} . \quad (4.9)$$

Функция распределения

Случайную величину можно считать полностью охарактеризованной, если для каждого значения x известна функция распределения $F(x)$:

$$F(x) = P(X \leq x). \quad (4.10)$$

В отличие от закона распределения, однозначно связывающего значения p и x , функция распределения несколько иначе, более

универсально характеризует случайную величину. Вероятность того, что случайная величина примет какое-нибудь значение, удовлетворяющее неравенству $x_1 \leq x < x_2$, равна приращению ее функции распределения на этом интервале:

$$P(x_1 \leq x < x_2) = F(x_2) - F(x_1).$$

Непрерывная случайная величина

Введем понятие непрерывной случайной величины.

Случайная величина называется непрерывной, если ее функция распределения всюду непрерывна со своей производной (за исключением конечного числа точек на конечном интервале).

Плотность вероятности непрерывной случайной величины

Плотностью вероятности $\varphi(x)$ непрерывной случайной величины называется производная ее функции распределения:

$$\varphi(x) = F'(x). \quad (4.11)$$

Вероятность того, что непрерывная случайная величина X примет какое-либо значение из интервала (a, b) , равна определенному интегралу от ее плотности вероятности в пределах a, b :

$$\begin{aligned} P(a < X < b) &= \int_a^b \varphi(x) dx = F(b) - F(a), \\ \int_{-\infty}^{+\infty} \varphi(x) dx &= 1. \end{aligned} \quad (4.12)$$

Плотность вероятности $\varphi(x)$ случайной величины X и ее функция распределения $F(x)$ взаимно определяют друг друга. Действительно,

$$F(x) = P(-\infty < X < x) = \int_{-\infty}^x \varphi(x) dx. \quad (4.13)$$

Геометрическая интерпретация полученных формул вполне очевидна. Кривой распределения непрерывной случайной величины называется график ее плотности вероятности.

Математическое ожидание $M(X)$ непрерывной случайной величины:

$$M(X) = \int_{-\infty}^{+\infty} x\varphi(x)dx. \quad (4.14)$$

Дисперсия $D(X)$ непрерывной случайной величины:

$$D(X) = \int_{-\infty}^{+\infty} (x-a)^2 \varphi(x)dx, \quad \text{где } a = M(X). \quad (4.15)$$

Все установленные ранее свойства математического ожидания и дисперсии справедливы и в случае непрерывной случайной величины. Например, свойство (4.5), для непрерывной случайной величины:

$$D(X) = \int_{-\infty}^{+\infty} x^2 \varphi(x)dx - [M(X)]^2.$$

Кроме математического ожидания и дисперсии, применяется еще ряд числовых характеристик, отражающих те или иные особенности распределения. Рассмотрим следующие важнейшие характеристики распределений.

Моменты

Среди числовых характеристик случайной величины особое значение имеют начальные и центральные моменты. Известно, что математическое ожидание и дисперсия являются моментами, а точнее, математическое ожидание – начальный момент первого порядка, а дисперсия – это центральный момент второго порядка. Все основные распределения связаны с моментами первых двух порядков (они являются параметрами этих распределений). Однако если возникает задача детально охарактеризовать случайную величину, то можно использовать моменты более высоких порядков.

Назовем начальным моментом порядка k :

$$\nu_k = M(X^k), \quad (4.16)$$

а центральным моментом порядка k –

$$\mu_k = M[(X - M(X))^k]. \quad (4.17)$$

Медиана

Используется в качестве показателя центра группирования значений случайной величины наряду с математическим ожиданием. Для непрерывной случайной величины медиана – граница, левее и правее которой находятся значения случайной величины с вероятностью 0,5. Для нормального распределения: $Me(X) = M(X) = a$.

Мода

Для непрерывной случайной величины мода – точка локального максимума функции плотности вероятности. Для нормального распределения $Mo(X) = M(X) = a$.

Квартили

Квартили – границы, которые делят все распределение на четыре равные по вероятности части. Квартилей всего три. Очевидно, что центральный квартиль – медиана.

Квантили

Квантилем уровня q (или q -квантилем) называется такое значение x_q случайной величины, при котором функция ее распределения принимает значение, равное q :

$$F(x_q) = P(X < x_q) = q. \quad (4.18)$$

Некоторые квантили получили особые названия. Очевидно, что введенная выше медиана есть квантиль уровня 0,5, т.е. $Me(X) = x_{0,5}$.

С понятием квантиля тесно связано понятие процентной точки.

Под $100q$ %-ной точкой подразумевается квантиль x_{1-q} , т.е. такое значение случайной величины X , при котором справедливо следующее условие:

$$P(X \geq x_{1-q}) = q. \quad (4.19)$$

Биномиальный закон распределения

Закон распределения числа наступления x события A в n независимых испытаниях, в каждом из которых оно может наступить с постоянной вероятностью p , подчиняется биномиальному закону распределения, выражением которого является формула Бернулли:

$$P(x = m) = C_n^m p^m q^{n-m}, \quad m = 0, 1, 2, \dots, n. \quad (4.20)$$

При этом математическое ожидание случайной величины, распределенной по биномиальному закону равно np , а дисперсия равна npq :

$$M(X) = np; \quad D(X) = npq.$$

Типичное толкование биномиального распределения:

- вероятность появления события точно m раз в n независимых испытаниях (схема Бернулли) при условии, что вероятность постоянна и равна p ;
- поскольку испытание можно трактовать как выборку, то это вероятность того, что повторная случайная выборка объема n содержит ровно m элементов данного типа, если генеральная совокупность объема N содержит pN элементов данного типа.

Гипергеометрический закон распределения

Обобщением биномиального закона является гипергеометрический закон распределения:

$$P(X = m) = \frac{\binom{N_1}{m} \binom{N - N_1}{n - m}}{\binom{N}{n}} = \frac{C_{N_1}^m C_{N - N_1}^{n - m}}{C_N^n}, \quad (4.21)$$

где $N \geq n$, $N \geq N_1 = pN$;

$$M(X) = \frac{nN_1}{N^2} = pn; D(X) = \frac{nN_1(N - N_1)}{N^2} \left(1 - \frac{n - 1}{N - 1}\right) = np(1 - p) \left(1 - \frac{n - 1}{N - 1}\right).$$

Типичное толкование гипергеометрического закона распределения: $P(X = m)$ в (4.21) есть вероятность того, что случайная бесповторная выборка объема n содержит m элементов данного типа, если эта выборка производится из генеральной совокупности N элементов, среди которых $N_1 = pN$ элементов данного типа.

Справедлив следующий предельный переход: очевидно, что если $N \rightarrow \infty$, в то время, как n и $p = N_1 / N$ остаются фиксированными – гипергеометрический закон стремится к биномиальному. Действительно, бесповторная выборка мало отличается от повторной, если отношение n/N мало. Данная аппроксимация справедлива, если $n/N < 0,1$.

Заметим, что математическое ожидание относительной частоты события A в n независимых испытаниях, в каждом из которых оно может наступить с вероятностью p , равно этой вероятности, а дисперсия равна pq/n .

Итак, $M(X/n) = p$, $D(X/n) = pq/n$. Следовательно:

$$\sigma = \sqrt{\frac{pq}{n}}. \quad (4.22)$$

Таким образом, при увеличении числа испытаний относительная частота события все менее и менее рассеяна около его вероятности.

Закон Пуассона

Если, случайная величина X может принимать только целые неотрицательные значения $m = 0, 1, 2, 3, \dots$ с вероятностью:

$$P(X = m) = \frac{\lambda^m e^{-\lambda}}{m!}, \quad (4.23)$$

где λ – параметр, то говорят, что она распределена по закону Пуассона.

Это закон редких событий, вероятность которых p мала, а число n велико, например тяжелые аварии, рождение трех близнецов и т.д.

Распределение Пуассона аппроксимирует гипергеометрическое и биномиальное, когда $pN \rightarrow \infty$; $n \rightarrow \infty$; $p \rightarrow 0$ при условии, что pn имеет конечный предел $pn = \lambda$. Это приближение обычно применяется при условии, что $p < 0,1$.

Математическое ожидание и дисперсия случайной величины, распределенной по закону Пуассона, совпадают и равны значению параметра $\lambda = pn$.

Нормально распределенные случайные величины

Большинство полученных опытным путем, измеренных или наблюдаемых непрерывных случайных величин распределены по нормальному закону:

$$\varphi_n(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(x-a)^2}{2\sigma^2}\right). \quad (4.24)$$

Величины σ и a являются параметрами нормального распределения. Графиком этого распределения является нормальная кривая или гауссиана (рис. 4.2).

Нормальная кривая с параметрами $a = 0$ и $\sigma = 1$ называется стандартной. Функция $\varphi_n(x)$ имеет следующие свойства:

- существует при всех действительных значениях аргумента;
- имеет экстремум при $x = a$, $\varphi_n(a) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}}$;
- симметрична относительно оси, проходящей через $x = a$;
- имеет две точки перегиба, слева и справа от $x = a$ с абсциссами, соответственно, $x = a - \sigma$ и $x = a + \sigma$.

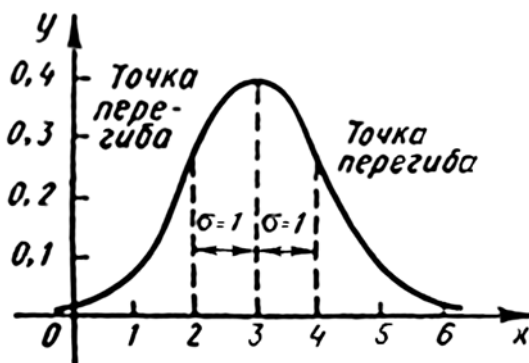


Рис. 4.2. Нормальная кривая

Легко убедиться, что параметры нормального распределения имеют смысл математического ожидания и среднего квадратического отклонения:

$$a = M(X) \quad \text{и} \quad \sigma = \sqrt{D(X)}.$$

Можно показать, что нормальные кривые, с совпадающими σ , имеют одинаковую форму и различаются только сдвигом координаты максимума. Значение дисперсии, а точнее σ (СКО), существенно влияет на форму нормальной кривой. При уменьшении σ кривая «сужается», вытягивается вверх и становится иглообразной, при увеличении σ кривая снижается, становится более «широкой» и приближается к оси абсцисс.

Если случайная величина X распределена по нормальному закону, то

$$P(x_1 < X < x_2) = 0,5 \cdot \left[\Phi\left(\frac{x_1 - a}{\sigma}\right) - \Phi\left(\frac{x_2 - a}{\sigma}\right) \right], \quad (4.25)$$

где $\Phi(x) = \frac{2}{\sqrt{2\pi}} \int_0^x \exp\left(-\frac{t^2}{2}\right) dt$ – интеграл вероятностей, значения

которого затабулированы.

Формула (4.25) упрощается, если границы интервала симметричны относительно математического ожидания:

$$P(|X - a| \leq \Delta) = \Phi\left(\frac{\Delta}{\sigma}\right). \quad (4.26)$$

Логнормальное распределение

Непрерывная случайная величина X имеет логнормальное распределение, если ее логарифм подчинен нормальному закону. Плотность вероятности для логнормального распределения:

$$\varphi(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}x} \exp\left(-\frac{(\ln x - \ln a)^2}{2\sigma^2}\right). \quad (4.27)$$

Можно доказать, что числовые характеристики случайной величины, распределенной по логнормальному закону, имеют вид:

$$\begin{aligned} M(X) &= a \exp(\sigma^2/2), \quad Me(X) = a, \\ D(X) &= a^2 \exp(\sigma^2)(\exp(\sigma^2) - 1). \end{aligned} \quad (4.28)$$

Логнормальное распределение используется достаточно широко, например, для описания распределения доходов, для описания распределения примесей в сплавах и минералах, для описания долговечности изделий в режиме износа и старения и т.п.

Распределения, связанные с нормальным распределением

Наиболее часто в математической статистике используются χ^2 (Пирсона), t (Стьюдента) и F (Фишера) распределения. Все эти распределения связаны с нормальным. В свою очередь, широкое распространение нормального распределения обусловлено, как мы увидим, исключительно центральной предельной теоремой (см. раздел 4.6). Ввиду их особой важности, все названные распределения затабулированы и содержатся в различных статистических таблицах, учебниках и справочниках [3].

Ранее мы ввели одномерное стандартное нормальное распределение, как распределение с математическим ожиданием $a = 0$ и дисперсией $\sigma^2 = 1$, его плотность

$$\varphi(x) = \Phi'(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{x^2}{2}}. \quad (4.29)$$

В общем случае, одномерное нормальное распределение характеризуется математическим ожиданием a и дисперсией σ^2 . Тогда любое одномерное нормальное распределение можно трактовать как распределение случайной величины:

$$\eta = a + \xi \sqrt{\sigma^2},$$

где случайная величина ξ подчинена стандартному нормальному закону.

Распределение Пирсона. Пусть $\xi_1, \dots, \xi_n$ – независимые случайные величины, распределенные по стандартному нормальному закону. Распределение случайной величины:

$$\chi^2 = \xi_1^2 + \dots + \xi_n^2$$

носит название χ^2 –распределения (распределения Пирсона) с n степенями свободы. χ^2 –распределение имеет плотность

$$h(x) = H'(x) = \frac{1}{2^{\frac{n}{2}} \Gamma\left(\frac{n}{2}\right)} x^{\frac{n}{2}-1} e^{-\frac{x}{2}} \quad (x > 0), \quad (4.30)$$

где $\Gamma(n)$ – гамма-функция.

В дальнейшем нам будет полезно следующее свойство. Пусть $\xi_1, \dots, \xi_n$ – независимые случайные величины, распределенные по нормальному закону с одинаковыми параметрами a и σ^2 . Положим

$$\eta = \frac{1}{n}(\xi_1 + \dots + \xi_n).$$

Тогда случайная величина

$$\chi^2 = \frac{1}{\sigma^2} [(\xi_1 - \eta)^2 + \dots + (\xi_n - \eta)^2] \quad (4.31)$$

имеет χ^2 -распределение, но с $n-1$ степенями свободы.

Или еще одна трактовка (схема) распределения Пирсона. Пусть производится n независимых испытаний (полиномиальная схема или схема Бернулли), в каждом из которых с вероятностью p_i может произойти одно из событий A_i ($i = 1, \dots, L$). Обозначим через m_i число появлений события A_i . Тогда из многомерного аналога интегральной теоремы Муавра–Лапласа следует, что случайная величина:

$$\chi^2 = \frac{(m_1 - np_1)^2}{np_1} + \dots + \frac{(m_L - np_L)^2}{np_L}$$

при $n \rightarrow \infty$ асимптотически распределена по закону χ^2 с $L - 1$ степенями свободы.

t -распределение. Пусть ξ и χ^2 – независимые случайные величины, причем ξ распределена по стандартному нормальному закону, а χ^2 имеет распределение Пирсона с n степенями свободы. Распределение случайной величины $\tau = \xi / \sqrt{\chi^2 / n}$ называется t -распределением с n степенями свободы (распределение Стьюдента).

Это распределение имеет плотность

$$t(x) = T'(x) = \frac{1}{\sqrt{\pi n}} \frac{\Gamma\left(\frac{n+1}{2}\right)}{\Gamma\left(\frac{n}{2}\right)} \left(1 + \frac{x^2}{n}\right)^{-\frac{n+1}{2}}, \quad (4.32)$$

где $\Gamma(m)$ – гамма-функция.

Пусть $\xi_1, \dots, \xi_n$ – независимые случайные величины, одинаково распределенные по нормальному закону со средним a . Положим

$$\eta = \frac{1}{n}(\xi_1 + \dots + \xi_n), \quad \varsigma = (\xi_1 - \eta)^2 + \dots + (\xi_n - \eta)^2.$$

Тогда случайные величины ζ и η независимы, а случайная величина

$$\tau = \frac{\sqrt{n}(\eta - a)}{\sqrt{\frac{\varsigma}{n-1}}}$$

имеет t -распределение с $n - 1$ степенями свободы.

F -распределение связано с распределением Пирсона следующим образом. Пусть χ_1^2, χ_2^2 — две независимые случайные величины, имеющие χ^2 распределение с n_1 и n_2 степенями свободы соответственно. Распределение случайной величины

$$w = \frac{n_2 \chi_1^2}{n_1 \chi_2^2}$$

носит название F -распределения (распределение Фишера) с параметрами n_1 и n_2 . Плотность F -распределения:

$$\psi(x) = \Psi'(x) = \frac{\Gamma\left(\frac{n_1 + n_2}{2}\right)}{\Gamma\left(\frac{n_1}{2}\right)\Gamma\left(\frac{n_2}{2}\right)} n_1^{\frac{n_1}{2}-1} n_2^{\frac{n_2}{2}-1} x^{\frac{n_1+n_2}{2}-1} (n_2 + n_1 x)^{-\frac{n_1+n_2}{2}}, \quad (4.33)$$

$x > 0$.

Ковариация и коэффициент корреляции

Если случайные величины X и Y зависимы (или нам ничего не известно об их независимости), то дисперсия суммы или разности должна быть записана в следующем виде:

$$\begin{aligned} D(X \pm Y) &= D(X) + D(Y) \pm 2M((X - M(X))(Y - M(Y))) = \\ &= D(X) + D(Y) \pm 2M(XY) - M(X)M(Y). \end{aligned}$$

Очевидно, что для независимых величин: $M(X-M(X))(Y-M(Y)) = M(XY) - M(X)M(Y) = 0$.

Для зависимых величин вводится понятие ковариации (совместной вариации) случайных величин X и Y :

$$\text{cov}(X, Y) = M((X-M(X))(Y-M(Y))) = M(XY) - M(X)M(Y). \quad (4.34)$$

А дисперсия в этом случае определяется, как

$$D(X \pm Y) = D(X) + D(Y) \pm 2\text{cov}(X, Y). \quad (4.35)$$

Отметим, что по сути ковариация это совместный центральный момент первых порядков.

Из (4.34) следует, что ковариация имеет следующее свойство:

$$\text{cov}(X, X) = M((X-M(X))(X-M(X))) = D(X).$$

Действительно, ковариация (коэффициент ковариации) в известной степени является мерой связи (зависимости) случайных величин, поскольку обладает следующими свойствами:

- для независимых случайных величин ковариация равна нулю;
- для случайных величин X и Y , имеющих тенденцию колебаться в одну сторону, он положителен; для имеющих противоположную тенденцию – отрицателен.

Однако этот коэффициент может принимать значения на всей числовой оси, поэтому не вполне пригоден и удобен для измерения степени зависимости. В этом смысле более удобен нормированный коэффициент ковариации (так называемый коэффициент корреляции) который обычно вводится, как

$$\rho(X, Y) = \frac{\text{cov}(X, Y)}{\sigma(X)\sigma(Y)}, \quad \text{где } \sigma(X) = \sqrt{D(X)}. \quad (4.36)$$

Действительно:

- для независимых случайных величин x и y , $\rho(x, y) = 0$, так как ковариация равна нулю;
- для линейно зависимых случайных величин $|\rho| = 1$;

- для всех остальных коэффициент корреляции меняется от -1 до $+1$ ($-1 < \rho < +1$).

Заметим, что чем ближе $|\rho|$ к 1 , тем с большим основанием можно считать, что X и Y находятся в линейной зависимости.

Строго говоря, если коэффициент корреляции равен нулю, то это не всегда означает независимость случайных величин. В этом случае говорят, что величины некоррелированы (или не коррелируют). Из независимости строго вытекает некоррелированность, но наоборот – не всегда. Однако строго показано, что для нормально распределенных случайных величин свойства некоррелированности и независимости эквивалентны.

Таким образом, полностью охарактеризовать функцию от случайных величин или многомерную случайную величину можно только ковариационной матрицей, например для случая X_1 и X_2 :

$$\begin{pmatrix} \sigma_1^2 & \rho_{12}\sigma_1\sigma_2 \\ \rho_{21}\sigma_1\sigma_2 & \sigma_2^2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sigma_1^2 & \text{cov}(x_1, x_2) \\ \text{cov}(x_2, x_1) & \sigma_2^2 \end{pmatrix}, \quad (4.37)$$

где $\sigma_1^2 = D(X_1)$, а $\rho_{12} = \rho(X_1 X_2)$.

Закон больших чисел

Давно замечено, что среднее арифметическое значение числовых характеристик случайных событий (относительная частота) в большом числе таких однородных событий подвержено незначительным изменениям. В среднем как бы проявляется закономерность, присущая существу явлений, в ней взаимно погашаются влияния отдельных факторов, которые делали случайными результаты единичных наблюдений.

Неравенство Чебышева

Одной из математических форм закона больших чисел является неравенство Чебышева: вероятность того, что отклонение случайных величин от ее математического ожидания превзойдет по абсолютной величине $\varepsilon > 0$, будет не больше отношения ее дисперсии к ε^2 .

Пусть X – случайная величина, a – ее математическое ожидание, $D(x)$ – дисперсия, тогда

$$P(|X - a| > \varepsilon) \leq \frac{D(X)}{\varepsilon^2},$$

или

$$P(|X - a| \leq \varepsilon) \geq 1 - \frac{D(X)}{\varepsilon^2}. \quad (4.38)$$

Неравенство Чебышева дает нетривиальную оценку вероятности события $|X - a| \leq \varepsilon$ лишь в случае, если $D(X) < \varepsilon^2$, в других случаях оценка тривиальна и не информативна.

Следствие. Если независимые случайные величины имеют одинаковые, равные a , математические ожидания, дисперсия ограничена одной и той же константой c , число велико, то для $\forall \varepsilon > 0$ вероятность отклонения среднего арифметического этих случайных величин от a сколь угодно близка к единице:

$$P\left(\left|\frac{x_1 + x_2 + \dots + x_n}{n} - a\right| \leq \varepsilon\right) > 1 - \delta. \quad (4.39)$$

Данное следствие является наиболее простой формой закона больших чисел. На практике это значит, что за приближенное значение неизвестной случайной величины принимают среднее арифметическое результатов измерений. При условии, что число измерений достаточно велико, это и будет обоснованием с точки зрения (4.39) важного практического вывода. Требование равенства математического ожидания одной и той же величине a необходимо для того, чтобы показать отсутствие так называемой систематической составляющей погрешности измерений.

Предельные теоремы

Если число случайных величин велико и удовлетворяет некоторым весьма общим условиям, то, как бы они не были распределены, практически достоверно, что их среднее арифметическое сколь угодно мало отклоняется от постоянной величины – среднего арифметического их математических ожиданий, т.е. является практически постоянной величиной.

Так, широко применяемый выборочный метод, позволяющий делать выводы о генеральной совокупности по результатам исследования ограниченной выборки, находит свое научное обоснование в законе больших чисел:

число зерен в пробе (мере) – n достаточно для того, чтобы судить о всей партии зерна – N , число исследованных учетных единиц (например, ТВС) – n достаточно для того, чтобы судить о всей партии ТВС – N , т.е. достаточно для проявления закона больших чисел с удовлетворительной точностью, хотя $n < N$, но n – достаточно велико и закон срабатывает.

Можно показать, что сумма любого конечного числа нормально распределенных независимых случайных величин распределена нормально. Тогда, если независимые случайные величины не распределены по нормальному закону, или вообще распределены не известно как, то оказывается можно наложить на них некоторые весьма нежесткие ограничения так, что **их сумма будет распределена нормально**. Это и есть суть так называемых предельных теорем. Теорема Ляпунова является одной из форм центральных предельных теорем [3].

4.2. Основные требования статистического характера к СУи К ЯМ

Модернизация и развитие системы учета и контроля ЯМ предусматривает существенное повышение роли измерений в определениях и подтверждениях наличных количеств ЯМ. Выводы о количествах ЯМ на фоне неопределенностей, присущих измерениям, возможны лишь при использовании статистических методов и применении статистических критериев [4].

Рассмотрим основные виды неопределенностей, присущие У и К ЯМ:

- неопределенность, присущая применяемым методам измерений;
- неопределенность, присущая объектам измерений;
- неопределенность, присущая расчетным методам;
- неопределенность вследствие применения процедуры выборки;
- неопределенность, присущая «документальным» данным о ЯМ.

Подчеркнем еще раз, при всех операциях по проверке наличия и сохранности ЯМ решающее значение имеют измерения. При этом

принципиально важно достичь требуемого уровня точности результатов измерений, что обеспечит контроль за ядерными материалами на необходимом уровне. Анализ неопределенностей и оценка погрешности результатов измерений и поиск путей ее снижения – одна из важнейших задач МС. Как правило, результат контрольного измерения отклоняется от заявленного значения измеряемой характеристики контролируемого ЯМ. Причиной расхождения может быть либо статистически оцененная неопределенность – погрешность результата измерения, либо действительно наблюдаемое различие между измеренным и заявленным значениями. Окончательное суждение о причине расхождения можно сделать только с помощью статистического анализа на основе принятых статистических критериев.

Необходимость использования статистических методов при проведении инспекций возникает также в связи с временными и финансовыми ограничениями. На период проведения инспекции приходится останавливать производство, что ведет к экономическим потерям. В подобных случаях прибегают к выборочной проверке, когда измерения проводят лишь с частью единиц. Для рационального планирования объема и последовательности выборки также применяют МС.

Основная цель учета и контроля ЯМ – достоверная прослеживаемость ЯМ – может быть достигнута только путем широкого применения статистических и вероятностных методов.

Основой как для определения наличных количеств ЯМ в ЗБМ, так и для выявления аномалий в использовании ЯМ, являются физические инвентаризации ЯМ. В процессе физических инвентаризаций ЯМ выполняются проверки данных бухгалтерского учета и измерения фактически наличных количеств ЯМ в зонах материального баланса. Подведение баланса, определение инвентаризационной разницы (ИР) и оценки ее погрешности для каждого ЯМ.

Выводы об отсутствии аномалий в использовании ЯМ, недостатков в системе их учета и контроля делаются на основе статистических критериев – статистических правил принятия решений, исходя из полученной величины ИР, ее погрешности и установленных правилами величин вероятностей, обнаружения недостачи/излишка пороговых количеств ЯМ. Выделим еще раз те прин-

ципы учета и контроля ядерных материалов, которые определяют требования статистического характера:

- ЯМ подлежат государственному учету и контролю, начиная с минимальных количеств;

- ЯМ классифицируются по категориям в зависимости от количества, вида и формы продукта, содержащего ЯМ;

- на предприятиях организуются ЗБМ;

- в каждой ЗБМ определяются ключевые точки измерений (КТИ);

- к ЯМ применяются средства контроля доступа (СКД), продлевающие достоверность результатов ранее выполненных измерений;

- учет ЯМ основывается на результатах измерений количественных характеристик и атрибутивных признаков ЯМ;

- измерения могут быть учетными или подтверждающими.

Статистические критерии применяются для:

- определения аномалий при подтверждающих измерениях;

- выборочных проверок устройств индикации доступа в промежуток между инвентаризациями;

- определения аномалий в учете ЯМ посредством анализа инвентаризационной разницы;

- определения аномалий при операциях передачи ЯМ;

- ограничения (сверху) неопределенности подтверждающих измерений выборок ЯМ;

- подтверждения достоверности учетных записей.

Уточним некоторые специальные понятия и дадим соответствующие определения.

Принцип практической уверенности и доверительная вероятность

Если в определенных условиях вероятность события мала, то при однократном их выполнении можно быть уверенным, что событие не произойдет. Таким образом, в практической деятельности можно считать такое событие невозможным. Однако нельзя на практике вывести такую верхнюю границу вероятности, при которой можно считать события невозможными. Важно учитывать и размер последствий рассматриваемых событий. Вероятность, кото-

рой решено пренебрегать в данном исследовании, будем называть уровнем значимости.

В статистике уровень значимости обычно принимается:

~ 0,05 при предварительных оценках;

~ 0,001 при окончательных выводах.

Понятие уровня значимости тесно связано с понятием доверительной вероятности: доверительной вероятностью назовем такую вероятность α , при которой события вероятности $1-\alpha$ можно считать невозможными.

Доверительный интервал

Введем понятие доверительного интервала, которое тесно связано с введенным ранее понятием доверительной вероятности.

Вследствие случайности результатов измерений невозможно установить достаточно узкие пределы, из которых погрешность оценки (т.е. отклонение оценки от оцениваемой характеристики) не выходила бы с полной гарантией. Поэтому возникает задача определения таких пределов, из которых погрешность оценки не выходила бы с заданной вероятностью. Например, если P – оценка вероятности события p , необходимо установить по результатам тех же измерений такую границу возможных отклонений P от p , которую модуль ошибки $|P - p|$ не превосходил бы с заданной вероятностью α . Эта граница будет тоже случайной в силу случайности результатов измерений.

Таким образом, речь идет о нахождении по результатам измерений такого случайного интервала (т.е. интервала со случайными границами), который с заданной вероятностью α содержал бы неизвестное значение вероятности p . Такой случайный интервал, полностью определяемый результатами измерений, называется доверительным интервалом для данной характеристики, соответствующим доверительной вероятности α . Величина $1-\alpha$ называется уровнем значимости отклонения оценки.

Для каждой величины массы ЯМ определяются с помощью учетных измерений (а при их невозможности – с помощью расчетно–экспериментальных оценок на основе предыдущего опыта эксплуатации) и документально регистрируются среднее значение массы ЯМ, значение доверительного интервала случайной погрешности ее измерения и границ неисключенной систематической по-

грешности измерения, исходя из доверительной вероятности, равной 0,99.

Эти значения могут использоваться при выполнении учетных процедур (физических инвентаризаций, передач ЯМ и др.) только в тех случаях, когда их достоверность с момента их определения до момента их использования была продлена надлежащим применением СКД и подтверждена в процессе выполнения учетной процедуры измерениями количественных параметров ЯМ и/или атрибутивных признаков ЯМ (т.е. результатами подтверждающих измерений).

Доверительными границами погрешности результата измерений будем называть наибольшее и наименьшее значения погрешности измерений, ограничивающие интервал, внутри которого с заданной вероятностью находится искомое значение погрешности результата измерений.

Учетные измерения – измерения количественных характеристик и атрибутивных признаков ЯМ, учетных единиц, продуктов, результаты которых, включая погрешность измерений, вносятся в учетные документы как паспортные значения. Последующее учетное измерение отменяет результат предыдущего.

Подтверждающие измерения – измерения, результаты которых используются для подтверждения всех или некоторых количественных характеристик и/или атрибутивных признаков ЯМ, учетных единиц, продуктов, полученных ранее в учетных измерениях, а затем достоверно сохраненных путем применения средств контроля доступа к ЯМ. Если разность величин измеряемой количественной характеристики для подтверждающего и учетного измерений не превосходит стандартные погрешности ее измерения, принимается паспортное значение характеристики. В противном случае выполняется расследование расхождения и проводятся учетные измерения этого ЯМ. Подтверждающие измерения могут проводиться выборочно или для всего ЯМ.

Объем применения подтверждающих измерений определяется в зависимости от объема применения СКД и результатов проверки их состояния, исходя из вероятностей обнаружения недостачи/излишка пороговых количеств для каждого ЯМ.

Статистическая значимость разницы между результатами учетных и подтверждающих измерений количественных параметров ЯМ, учетных единиц, продуктов устанавливается, исходя из дове-

рительной вероятности 0,99. В случае установления статистически значимой разницы между результатами учетных и подтверждающих измерений, об этом сообщается администрации ЗБМ и ядерного объекта, также выполняются специальные расследования по выяснению причин возникновения этой разницы. При необходимости выполняются новые учетные измерения и вносятся изменения в учетные документы.

Статистические критерии обнаружения аномалий

Каждое измерение количества ЯМ выполняется с некоторой погрешностью, что приводит к расхождению между данными отправителя и получателя, результатами, полученными инспектором, и учетными записями. Решение о приемлемости или неприемлемости расхождений принимается на основе их статистического анализа.

Если в течение межбалансового периода (МБП), предшествующего данной инвентаризации, в ЗБМ выполнялись учетные измерения данного ядерного материала при его производстве, получении, переработке, отправке, или таковые производились в процессе инвентаризации, то критерием обнаружения аномалий в использовании этого ЯМ является превышение модулем инвентаризационной разницы либо ее утроенной среднеквадратической погрешности, либо *любой* из следующих величин при доверительной вероятности 0,95:

- 2 % от суммы зарегистрированного количества данного ЯМ и всех увеличений его количества за МБП – для промышленных ядерных установок;
- 3 % от такой же величины – для исследовательских ядерных установок;
- 3 кг – по плутонию, урану-233 для ЗБМ, содержащих ЯМ категорий I, II;
- 8 кг – по урану-235 для ЗБМ, содержащих ЯМ категорий I, II и III;
- 70 кг по урану-235 – для урана с обогащением менее 20 %.

Если в течение МБП в процессе проведения инвентаризации учетные измерения данного ЯМ не выполнялись, а достоверность результатов предыдущих учетных измерений была обеспечена применением СКД, то выводы об отсутствии аномалий в учете и контроле делаются на основе результатов выборочных подтвер-

ждающих измерений, объем которых определяется, исходя из следующих значений пороговых количеств ЯМ для обнаружения недостачи/излишка ЯМ и вероятностей обнаружения недостачи/излишка этого порогового количества.

Для ЯМ категорий I, II и III пороговые количества составляют:

- 3 кг – для плутония, урана–233;
- 8 кг – для урана–235;
- для урана с обогащением менее 20 % (категория 4) пороговое количество составляет 70 кг по урану–235.

Вероятность обнаружения недостачи/излишка порогового количества ЯМ для расчета объема выборки подтверждающих измерений приведены в табл. 4.1.

Таблица 4.1

Вероятность обнаружения недостачи/излишка порогового количества ЯМ

Объем применения СКД к ЯМ	Вероятность обнаружения, %	
	I,II,III категория ЯМ	IV категория ЯМ
Только УИВ	50	30
Только система наблюдения	50	30
Одновременно два вида разнообразных СКД	25	10
Одновременно n видов разнообразных СКД	100 (0,5) ⁿ	100 (0,3) ⁿ

На уровне эксплуатирующей организации процедуры проведения физических инвентаризаций основываются на ряде действий:

- сверке учетных и отчетных документов;
- проверке состояния СКД;
- учетных и подтверждающих измерениях фактически наличных количеств ЯМ;
- определении разницы в данных отправителя и получателя;
- оценке случайных и систематических погрешностей измерений, в том числе при поступлениях и отправлениях;
- оценке величины безвозвратных потерь технологических процессов;
- определении ИР, ее случайной и систематической погрешностей для каждого ЯМ.

Данные о результатах измерений параметров ЯМ, полученные ранее на различных этапах технологического процесса, могут ис-

пользоваться для целей физической инвентаризации только в случае применения к ним (ЯМ) дополнительных технических мер (СКД, систем наблюдения, пломб, печатей, и т.д.). При наличии большого сортамента и/или количества ЯМ допускается использовать статистические выборки для подтверждения данных оперативно-технического учета и составления отчетных документов. При определении объема случайной выборки необходимо исходить из требования обнаружения дефекта (повреждения, удаления или замены) хотя бы одного из вышеупомянутых средств с вероятностью не менее 0,95.

Если в результате анализа баланса ЯМ не установлена аномалия в учете и контроле ЯМ, то документально зарегистрированное количество ЯМ в ЗБМ используется в качестве наличного количества (НК) ЯМ в ЗБМ на начало следующего межбалансового периода.

4.3. Погрешности, их модели и источники

Для получения значений наличного количества, прихода и ухода необходимы данные о массе, объеме, концентрации урана, обогащении. Эта информация может быть получена только из измерений.

Типы измерений

На рис. 4.3 приведена классификация измерений.

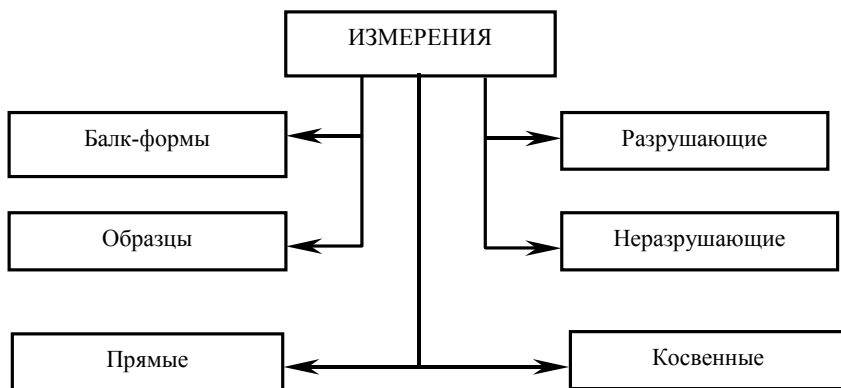


Рис. 4.3. Классификация измерений

В системе учета и контроля измерения подразделяются на несколько типов:

в зависимости от измеряемых объектов: измерения балк-форм (объемных образцов) для определения массы и объема и измерения образцов материала (для определения изотопного и/или элементного состава);

в зависимости от обращения с измеряемыми материалами: разрушающие измерения (когда часть материала, подвергаемая анализу, существенно изменяется в процессе измерений либо химически, либо физически, либо тем и другим образом) и неразрушающие измерения (количественное или качественное определение вида и/или количества ЯМ в образце без изменения образца или проникновения в него);

по способу определения измеряемой величины измерения подразделяются на прямые и косвенные.

Любое измерение проводится, как уже упоминалось, с некоторой погрешностью. Таким образом, при формулировании решения, которое принимается на основе данных учета, необходимо учитывать эти погрешности. Что они собой представляют, каковы их возможные источники будет рассмотрено дальше.

При прямых измерениях измеряемая и определяемая величина сравнивается с единицей измерения непосредственно или при помощи измерительного прибора, проградуированного в соответствующих единицах.

При косвенных измерениях измеряемая величина определяется (вычисляется) из результатов прямых измерений других величин, которые связаны с измеряемой величиной определенной функциональной зависимостью.

Погрешность измерения

Будем считать, что погрешность – отклонение оценки от истинного значения оцениваемой характеристики. Тогда применительно к измерениям – это отклонение результата измерения от истинного (действительного) значения измеряемой величины. Заметим, что истинное значение нам, как правило, не известно, из-за существующих неопределенностей, а для правильного описания и оценки погрешности необходимо выбрать подходящую математическую модель погрешности. Следовательно, фактически погрешность –

это полученная нами оценка соответствующих неопределенностей (см. п. 4.2.).

Наиболее простой моделью при однократном измерении является

$$X = T + E, \quad (4.40)$$

где X – результат измерения; T – истинная величина; E – погрешность измерения [5].

Уже говорилось о многочисленных источниках погрешностей, которые могут влиять на результат измерений. Все погрешности можно подразделить на две категории: случайные и систематические (иногда вводят и так называемые краткосрочные систематические погрешности).

Действительно, величину E можно представить как случайную, имеющую некоторое математическое ожидание $M(E) = S$. Тогда (4.40) запишется в виде

$$X = T + S + R, \quad (4.41)$$

где R – случайная величина с нулевым математическим ожиданием $M(R) = 0$, которую принято называть случайной погрешностью; S – так называемая систематическая погрешность, которую часто можно трактовать как неизвестное постоянное смещение измеренной величины относительно истинного значения.

Рассмотрим несколько примеров, чтобы лучше понять это разделение.

Случайная погрешность связана с действием ряда случайных факторов на каждое отдельное измерение, например, случайной природой процесса распада ядер, движением воздуха, положением образца и т.д.

Рассмотрим шесть таблеток UO_2 номинально одного состава, которые надо исследовать на концентрацию урана. Обозначим: x_{ij} – результат j -го измерения концентрации урана в i -й таблетке; μ – номинальное (заявленное) содержание урана в таблетках; ρ_i – отклонение содержания урана от заявленной величины в i -й таблетке; ε – отклонение, обусловленное аналитической погрешностью j -го измерения. Используя мультипликативную модель, получим

$$x_{11} = \mu + \rho_1 + \varepsilon_1,$$

$$x_{22} = \mu + \rho_2 + \varepsilon_2,$$

$$\dots\dots\dots$$

$$x_{66} = \mu + \rho_6 + \varepsilon_6.$$

Поскольку ρ_i и ε_j различны для каждого из шести результатов, то это – случайные погрешности. В соответствии с нашей классификацией, ρ_i – случайная погрешность статистической выборки. Если ее рассматривать как случайную переменную со средним значением, равным нулю и дисперсией σ_ρ^2 , тогда σ_ρ^2 называется дисперсией случайной погрешности статистической выборки. Аналогично, ε_j по нашей классификации – аналитическая случайная погрешность, а σ_ε^2 называется дисперсией аналитической случайной погрешности.

Во–первых, поскольку с каждой таблеткой проделали только одно измерение, и ε , и ρ вошли в уравнение с одним индексом, то в данном случае не представляется возможным разделить эти две погрешности. В такой ситуации их можно учесть как одну «случайную погрешность измерения». Если бы провели с каждой таблеткой два и более измерений, тогда погрешности можно было бы разделить. Во–вторых, характерная особенность модели случайной погрешности состоит в том, что ее индекс меняется с каждым измерением, и при увеличении числа измерений ее влияние на конечный результат снижается. По этой причине случайные погрешности сравнительно легко контролировать.

Систематическая погрешность – погрешность, связанная с ограниченной точностью прибора, неправильной установкой прибора, методикой обработки данных, влиянием некоторых внешних факторов. Систематические погрешности влияют на группу измерений. К систематическим относятся погрешности, обусловленные неправильной установкой весов на нуль, и с округлением численных величин.

Немного расширим приведенную модель, добавив еще одно слагаемое: Δ – отклонение от номинального значения, обусловленное аналитическим методом. Оно будет одинаковым для всех измерений, проделанных данным методом. Тогда

$$\begin{aligned}x_{11} &= \mu + \Delta + \rho_1 + \varepsilon_1, \\x_{22} &= \mu + \Delta + \rho_2 + \varepsilon_2, \\&\dots\dots\dots \\x_{66} &= \mu + \Delta + \rho_6 + \varepsilon_6.\end{aligned}$$

Величина Δ , не имеющая индекса и общая для всех измерений, называется систематической погрешностью или смещением. Обычно эти термины используются на равных, но между ними есть небольшое различие. Если результаты измерений корректируются на известную величину Δ , оцененную каким-то образом, тогда Δ называют смещением. Однако если Δ точно не известна и может быть оценена лишь приблизительно, тогда результаты измерений не могут быть скорректированы именно на Δ . Таким образом, появляется остаточное смещение, равное разности между значением Δ и его оценкой. Вот это остаточное смещение и называют систематической погрешностью. Не все делают такое различие между систематической погрешностью и смещением, но важно понимать, что именно вы подразумеваете под Δ .

Если Δ – случайная переменная со средним значением, равным нулю и с дисперсией σ_Δ^2 , тогда σ_Δ^2 называется дисперсией систематической погрешности.

Во многих разделах учета и контроля влияние систематической погрешности имеет доминирующее значение по сравнению со случайной. Это связано с тем, что в отличие от случайной погрешности, эффект систематической погрешности не уменьшается с увеличением числа измерений, снижая эффективность мер учета ЯМ.

Источники погрешности

Погрешность данного измерения является результатом наложения (суперпозицией) нескольких погрешностей. Рассмотрим некоторые источники погрешности, которые могут влиять на результаты измерения.

1. *Погрешность статистической выборки.* Рассмотрим совокупность N учетных единиц, например, контейнеров с ЯМ, каждая из которых имеет истинное значение какой-либо характеристики (вес нетто, массу урана, обогащение и т.д.). Если случайным обра-

зом выбрано несколько единиц (выборка) из совокупности, то среднее значение некоторой характеристики, рассчитанное для этих единиц будет отличаться от среднего значения этой характеристики для всей совокупности (например, от среднего значения обогащения). Определим погрешность статистической выборки как разность между средним значением некоторой характеристики для случайно полученной выборки и средним значением этой характеристики для всей совокупности.

В ряде случаев эта погрешность не учитывается, например, при проведении инвентаризации сравниваются результаты измерений какой-либо учетной единицы, полученные инспектором и данные оператора, так что истинное значение измеряемой характеристики роли не играет, оно сокращается в разности.

В случае проведения атрибутивной (качественной) инвентаризации истинное значение для каждой единицы равно либо 1, в случае дефекта, либо 0, в случае его отсутствия. А среднее значение для исследуемой группы равно отношению числа дефектных единиц в группе к полному числу единиц: $0 < N_{\text{деф}}/N_{\text{полн}} < 1$. Таким образом, в этом случае погрешность статистической выборки есть у каждой отобранной учетной единицы. Влияние этой погрешности на результаты инвентаризации (а значит, и необходимость ее учитывать) пропадет только в том случае, если будут проверены все единицы.

Вне зависимости от того проводим ли мы измерения для всего ядерного материала (генеральной совокупности) или только его части (выборки), учет материала основан на трех измерительных операциях:

- 1) определение веса нетто или объема материала (балк–измерения);
- 2) пробоотбор материала;
- 3) анализ отобранного материала на элементный и/или изотопный состав. Поэтому обычно удобно разделить полную погрешность измерения на составляющие, соответствующие этим трем основным операциям.

2. *Погрешность измерений в балк–форме* (балк–измерений) определим как разность между истинным весом (или объемом) учетной единицы и его измеренным значением. Если рассматривать только это определение, создается впечатление, что погрешность

балк–измерений – простая величина, которую можем получить напрямую. Однако она может быть и даже, скорее всего, будет результатом наложения очень многих погрешностей, связанных с балк–измерениями, причем некоторые из них могут компенсировать друг друга.

3. *Погрешность пробоотбора материала* определяется по отношению к измеряемой характеристике. Это может быть концентрация урана, плутония; обогащение и др.

Погрешность пробоотбора материала – разность между средним значением характеристики для отобранного образца и соответствующим средним значением этой характеристики для всего материала. Важно понимать, что значит «весь материал». Если нас интересует концентрация урана, которая должна быть определена для данного контейнера, тогда погрешность пробоотбора – разница между концентрацией урана в малом образце, отобранном из этого контейнера, и концентрацией урана в этом контейнере. Это можно назвать «погрешностью пробоотбора для одного контейнера». Если же результаты измерения образца, отобранного из данного контейнера с данной концентрацией урана, надо распространить на другие, номинально такие же контейнеры, тогда изменение концентрации от контейнера к контейнеру включается в погрешность пробоотбора вместе с «погрешностью для одного контейнера».

4. *Погрешность анализа.* Как и погрешность пробоотбора материала, аналитическая погрешность (погрешность анализа) определяется для исследуемой характеристики. Аналитическая погрешность измерений – разность между истинным значением исследуемой характеристики пробы и измеренным значением этой характеристики. Заметим, что эта погрешность относится к пробе, а не ко всему материалу, который она характеризует. Погрешность определения значения некоторой характеристики для всего материала будет комбинацией аналитической погрешности и погрешности пробоотбора материала.

В случае использования неразрушающих измерений без пробоотбора погрешность измерения какой–либо характеристики и будет аналитической погрешностью измерения; если неразрушающие

измерения проводятся не со всей единицей, а с пробой и должна быть учтена погрешность пробоотбора.

Как уже отмечалось, данная определяемая погрешность – результат наложения многих погрешностей. Например, при проведении взвешивания на погрешность может оказать влияние то, как единица лежит на весах, тип весов, конкретные весы данного типа, оператор, условия окружающей среды (температура воздуха, влажность и т.д.). Степень внимания, которое стоит уделять поиску и оценке факторов, влияющих на погрешность, зависит от ряда обстоятельств. Например, если погрешность взвешивания в интересующей нас точке измерений не оказывает существенного влияния на качество данных учета, то нет особой необходимости идентифицировать и оценивать каждый источник, дающий вклад в эту погрешность. И наоборот, если оказывается, что наблюдаемые значения веса в некоторой точке измерений имеют погрешность выше желаемого уровня, следует провести специальное исследование, чтобы выяснить, почему это случилось. И при проведении такого исследования должны быть идентифицированы хотя бы несколько из вышеупомянутых источников погрешности, и оценен их индивидуальный вклад в погрешность. Под «специальным исследованием» понимается, например, калибровка.

Модели погрешностей

Мы обсудили некоторые из многочисленных источников погрешностей. И хотя больше всего нас интересует их суммарный эффект, часто удобно, а то и необходимо, составить приемлемую математическую модель для того, чтобы идентифицировать сами погрешности, и выяснить, как они связаны друг с другом. Таким образом, модель помогает правильно суммировать погрешности и находить их суммарный эффект, идентифицировать источники погрешностей и страхует от возможного пропуска некоторых источников. Рассмотрим этот вопрос подробнее и введем две основных модели: аддитивную и неаддитивную (так называемую мультипликативную) модель погрешности.

Аддитивная модель. Это простейшая модель (4.40), которой мы уже пользовались. Несмотря на свою простоту, аддитивная модель

часто используется в практической деятельности, и во многих случаях обеспечивает результаты, близкие к действительности. Следует помнить, что любая модель – математическое описание действительности. Опыт показывает, что человек в своей практике предпочитает более простые модели, иногда даже в ущерб более подробному и адекватному описанию действительности. Поэтому простые модели очень широко применяются.

Пусть, например, x – измеренное значение веса брутто контейнера с порошком UO_2 , г; μ – истинное значение этой величины; ε – погрешность, тогда $x = \mu + \varepsilon$.

Таким образом, сумма истинного значения и погрешности дала бы измеренное значение. Если проводить ряд измерений со стандартными образцами известной массы μ , записывая их измеренное значение x , то по результатам этих измерений можно сконструировать функцию распределения ε .

Мультипликативная модель. Описание результата измерений простой суммой истинного значения и погрешностей очень часто дает приемлемое описание реальной ситуации, но не всегда. Если абсолютная погрешность измерения растет с увеличением измеряемого значения, то применяется так называемая мультипликативная модель.

Допустим, y – измеренное значение концентрации урана в UO_2 , α – истинная величина, η – погрешность измерения.

Тогда $y = \alpha + \eta$. Пусть нас интересует чистый вес урана в контейнере из предыдущего примера, а не вес оксида. Перемножив x и y , получим $xy = \mu\alpha + \mu\eta + \alpha\varepsilon + \varepsilon\eta$, что уже не является простой аддитивной моделью.

В этом случае удобнее воспользоваться мультипликативной моделью:

$$x = \mu(1+\varepsilon), \quad y = \alpha(1+\eta).$$

Тогда выражение для массы урана будет выглядеть следующим образом: $xy = \mu\alpha(1+\eta)(1+\varepsilon)$. Очевидно, последнее выражение гораздо проще, нагляднее и удобнее с точки зрения вычисления погрешности. Таким образом, хотя аддитивная модель часто удобна в использовании, не следует применять ее абсолютно во всех ситуа-

циях, так как суммарный эффект нескольких погрешностей не всегда является простой их суммой.

Оценка погрешностей измерений ЯМ

Достоверная оценка погрешностей измерений ядерных материалов необходима для оценки значимости выявленных инвентаризационных разниц. Эта оценка зависит от принятых моделей расчета погрешностей и интерпретации «случайной» и «систематической» погрешностей.

Результаты контрольных измерений должны удовлетворять требованиям по точности и прецизионности. Прецизионность характеризуется *повторяемостью* и *воспроизводимостью* результатов измерений.

Повторяемость определяется дисперсией (разбросом) результатов, полученных одним оператором при измерениях одного образца в одинаковых условиях. *Воспроизводимость* определяется дисперсией результатов измерений одного образца, проведенных несколькими операторами в течение нескольких дней в разных условиях.

Точность результата определяется величиной систематической погрешности измерений. Величина систематической погрешности может быть оценена как средняя (в смысле математического ожидания) разность между измеренными значениями и истинным значением (4.40). Малая величина систематической погрешности результата равносильна его высокой точности.

Основные принципы расчета погрешности результатов измерений:

- 1) полную погрешность результата измерений следует вычислять, как сумму случайной и систематической погрешностей, приведенных к одинаковой доверительной вероятности;
- 2) значения всех погрешностей обычно приводятся к доверительной вероятности 0,95;
- 3) при вычислении случайной погрешности результата следует считать, что соответствующие величины распределены по нормальному закону;

4) систематическую погрешность результата измерений следует считать в предположении равномерного (равновероятного) закона распределения составляющих величин.

Принятые обозначения.

1. Согласно ГОСТу для погрешностей величины x , приведенной к доверительной вероятности 0,95, следует использовать следующие обозначения: случайная погрешность – $S(x)$, систематическая – $\theta(x)$, полная – $\delta(x)$.

2. При выборе доверительной вероятности p , не равной 0,95, следует применять запись $^p S(x)$, $^p \theta(x)$, $^p \delta(x)$.

3. Абсолютную погрешность результата измерений следует обозначать Δ_s , Δ_θ , Δ .

4. Окончательный результат измерений следует представлять в виде: $x = X$, $\delta = \dots \%$, $\theta = \dots \%$, $p = 0,95$, где X – средневзвешенное значение измеренной величины x , θ – максимальная граница неисключенного остатка систематической погрешности определяемой величины x .

Прямые измерения

1. Оценка результата при большом ($n > 3$) числе измерений величины x :

$$X = \frac{\sum_{i=1}^n w_i x_i}{\sum_{i=1}^n w_i}, \quad (4.42)$$

где $w_i = \frac{1}{S^2(x_i)}$ – вес результата i измерения;

$$S(x) = \frac{1}{x} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n w_i (x_i - X)^2}{(n-1) \cdot \sum_{i=1}^n w_i}}, \quad (4.43)$$

где ${}^P S(x) = {}^P t_s \cdot S(x)$ – коэффициент приведения к доверительной вероятности P , коэффициент Стьюдента (табл. 4.2), [3] и [8].

Таблица 4.2

Коэффициенты Стьюдента

N	P				
	0,9	0,95	0,98	0,99	0,999
2	6,31	12,71	31,82	63,66	636,62
3	2,92	4,30	6,96	9,92	31,60
4	2,35	3,18	4,54	5,84	12,94
5	2,13	2,78	3,75	4,60	8,61
6	2,02	2,57	3,36	4,03	6,86
7	1,94	2,45	3,14	3,71	5,96
8	0,90	2,36	3,00	3,50	5,40
10	1,83	2,26	2,82	3,25	4,78

2. Оценка результата при единичных измерениях величины x ($n \leq 3$). Единичным измерениям величины x должно предшествовать метрологическое исследование применяемого средства измерения. При таком исследовании проводят многократные ($N > 20$) замеры некоторой величины a , аналогичной величине x , и определяют σ для полученного набора значений a_i :

$$\sigma = \frac{1}{A} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (a_i - A)^2}{N - 1}}, \quad (4.44)$$

где $A = \frac{\sum_{i=1}^N a_i}{N}$.

При последующих измерениях величины x результат оценивают следующим образом:

$$X = \frac{\sum_{i=1}^N \omega_i x_i}{\sum \omega_i}, \quad S(x) = \frac{\sigma}{\sqrt{n}} K_{\sigma}, \quad (4.45)$$

где K_σ – коэффициент, учитывающий различные статистические значимости результатов при исследовании измеряющего средства и при измерении величины x :

$$K_\sigma = \sqrt{\frac{\omega_\sigma}{\omega_x}}, \quad \omega_\sigma = \frac{1}{\sigma^2}, \quad \omega_x = \frac{1}{\sigma_x^2} \quad - \text{ веса результатов измерений}$$

при исследовании средства измерений и при определении x .

Косвенные измерения

1. Оценка результата измерений величины $y = f(x_1, x_2, \dots, x_n)$ в единичном опыте:

- исходные данные – измеренные значения x_i , а также случайная и систематическая погрешности составляющих величин $S(x_k)$ и $\theta(x_k)$;
- погрешности составляющих величин, входящих в формулу для определения величины y , но не измеренные в данном эксперименте (константы, коэффициенты, результаты аттестаций), следует трактовать как $\theta(x_k)$;
- оценку результата Y выполняют по следующей формуле:

$$Y = y, \\ S(Y) = \sqrt{\sum_{k=1}^m S_y^2(x_k)}, \quad (4.46)$$

где

$$S_y(x_k) = \frac{x_k}{Y} \cdot \frac{\partial f}{\partial x_k} \cdot S(x_k), \quad (4.47)$$

$\frac{\partial Y/Y}{\partial x/x}$ – коэффициент чувствительности функции Y – к вариации величины x_k ;

$$\theta(Y) = 1,1 \sqrt{\sum_{k=1}^m \theta_y^2(x_k)}, \quad (4.48)$$

где

$$\theta_y(x_k) = \frac{x_k}{Y} \cdot \frac{\partial f}{\partial x_k} \cdot \theta(x_k). \quad (4.49)$$

Полная погрешность результата измерений $\delta(Y) = S(Y) + \theta(Y)$.

Часто либо $S(Y) \gg \theta(Y)$, либо $\theta(Y) \gg S(Y)$. В этих случаях формула для расчета погрешностей упрощается.

2. Оценка результата измерений величины $y = f(x_1, x_2, \dots, x_n)$ в многократном опыте:

- исходными данными для оценки величины Y являются значения y_i , полученные в результате измерений, а также случайные погрешности $S(y_i)$ и систематическая погрешность $\theta(Y)$, рассчитанная в одном из опытов;

- результат определения величины Y следует оценивать следующим образом:

$$Y = \frac{\sum_{i=1}^n \omega_i \cdot y_i}{\sum_{i=1}^n \omega_i}, \text{ где } \omega_i = \frac{1}{S^2(y_i)}, \quad (4.50)$$

$$S(Y) = \frac{1}{Y} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \omega_i (y_i - Y)^2}{(n-1) \sum_{i=1}^n \omega_i}}, \quad (4.51)$$

$$\delta(Y) = S(Y) + \theta(Y),$$

в последнем равенстве расчет $\theta(Y)$ проводится как в предыдущем случае.

Расчет погрешности ИР

Система учета ЯМ, как и любых других материалов и ценностей, основана на составлении баланса, а одной из важнейших задач является проведение инвентаризации, обработка и статистический анализ полученных результатов – определение статистической значимости. Сделаем основные предположения, необходимые для анализа значимости ИР:

- можно с хорошей степенью достоверности считать, что ИР подчиняется нормальному закону распределения с математическим ожиданием равным нулю и дисперсией $\sigma_{\text{ИР}}^2$;

- доверительный интервал должен быть выбран в соответствии с нормативными документами и требованиями [4]. Таким образом, для принятия решения о возможных аномалиях достаточно рассчитать значение ИР и дисперсию $\sigma_{\text{ИР}}^2$.

Однако в связи с важностью задачи рассмотрим более подробно порядок и методологию оценивания статистической значимости ИР для целей обнаружения аномалий при подведении материального баланса в ЗБМ.

Определение ИР и оценивание ее статистической значимости проводят по результатам физической инвентаризации и, говоря об аномалии, в данном случае мы будем понимать только аномалию в виде превышения модулем ИР предельных значений установленных в ОПУК [4].

Для расчета дисперсии ИР уравнение представляют в виде функции:

входных величин – результатов прямых или косвенных измерений (расчетов или иного определения) параметров ядерных материалов (концентраций, объемов, содержаний, весов, масс и т.д.) $x_1, \dots, x_n$;

случайных отклонений этих параметров $r_1, \dots, r_n$, обусловленных случайными погрешностями измерений параметров;

систематических отклонений параметров $s_1, \dots, s_n$, обусловленных неисключенными составляющими систематических погрешностей измерений параметров:

$$\text{ИР} = f(x_1, \dots, x_n; r_1, \dots, r_n; s_1, \dots, s_n).$$

Дисперсия ИР будет определяться следующим выражением:

$$\sigma_{\text{ИР}}^2 = \sum_{i=1}^n \left(\frac{df}{dr_i} \right)^2 \sigma_{r_i}^2 + \sum_{i=1}^n \frac{df}{ds_i} \sigma_{s_i} \sum_{j=1}^n \frac{df}{ds_j} \sigma_{s_j} \rho_{s_i s_j}.$$

Дисперсию или суммарную среднеквадратическую погрешность ИР получают разложением в ряд Тейлора функции ИР около математических ожиданий входных величин, ограничиваясь только ли-

нейными членами этого разложения. Частные производные берутся в точке $x_1, \dots, x_n$. Причем отклонения и дисперсии измерений параметров, фактически наличных на момент инвентаризации ЯМ в продуктах, оставшихся неизменными с момента предыдущей инвентаризации и не подвергавшихся учетным измерениям в течение данного меж балансного периода, не учитывают. Оценивание статистической значимости ИР заключается в проверке выполнения двух условий [4]:

непревышение модулем ИР значения утроенной среднеквадратической погрешности ИР;

непревышение значением ИР установленных пороговых количеств (G) при доверительной вероятности 0,95.

Превышение модулем ИР утроенной среднеквадратической погрешности ИР:

$$|\text{ИР}| > 3\sigma_{\text{ИР}},$$

свидетельствует о том, что в системе учета и контроля присутствует аномалия. Нарушение второго условия:

$$|\text{ИР}| > G + 2\sigma_{\text{ИР}},$$

свидетельствует о том, что в системе учета и контроля присутствует аномалия, выраженная в превышении пороговых количеств ядерных материалов.

4.4. Проверка гипотез и выборочные исследования

В процессе измерений периодически приходится принимать решения по значимости полученных результатов измерений. Например, расходятся или нет результаты нескольких серий измерений, согласуются или нет результаты измерений в нескольких лабораториях, значимо или нет значение ИР.

Окончательное решение о значимости может быть вынесено после проверки гипотезы. Например, значительно ли ИР превышает нуль в течение данного периода времени на данной установке.

Пусть H_0 – нулевая гипотеза, состоящая в том, что $\text{ИР} \leq 0$; H_1 – альтернативная гипотеза, состоящая в том, что $\text{ИР} > 0$.

Статистическая проверка некоторой гипотезы относительно набора экспериментальных данных сама по себе не дает доказательств, правильна или ложна эта гипотеза. Подобная проверка лишь указывает степень согласия гипотезы с результатами эксперимента.

Проверка гипотезы заключается в вычислении некоторого критерия и сравнении его значения с табличным. Таким образом, при проверке нулевой гипотезы H_0 возможны следующие ситуации:

- 1) справедлива гипотеза H_0 и критерий допускает H_0 ;
- 2) справедлива гипотеза H_0 , но критерий отвергает H_0 ;
- 3) справедлива гипотеза H_1 и критерий отвергает H_0 ;
- 4) справедлива гипотеза H_1 , но критерий допускает H_0 .

Только в случаях 1 и 3 проверка гипотезы приводит к правильному результату. Вероятность ошибки первого рода (случай 2) численно равна уровню значимости α , задаваемому при проверке гипотезы. Если вероятность ошибки второго рода (случай 4) равна β , то величину $1-\beta$ называют мощностью критерия. Часто мощность критерия удастся увеличить лишь за счет увеличения α . Иными словами, возможен компромисс между уровнем значимости и мощностью критерия, причем иногда большая мощность оказывается существеннее малого α .

Обычно проверяются несколько основных типов гипотез.

1. Описываются ли результаты измерений данным распределением?
2. Значимо ли различие между двумя средними значениями?
3. Являются ли значимо различными дисперсии нескольких серий измерений?

Критерий χ^2

Иногда бывает необходимо для заданной случайной выборки x_i ($i = 1, 2, \dots, n$) случайной величины X проверить гипотезу о том, что функция $f(x)$ является плотностью вероятности для X . Для получения меры отклонения имеющихся данных от ожидаемых согласно гипотетическому распределению используется величина χ^2 . Критерием для проверки гипотезы служит сопоставление χ^2 с таблич-

ным значением χ^2_p , которое соответствует заданному p -процентному уровню значимости.

Прежде всего, весь диапазон значений X в данной выборке разбивается на m неперекрывающихся интервалов; m определяется по одной из следующих формул:

$$\begin{aligned} m &= \log_2 n + 1; \\ m &= 5 \lg n; \\ m &= \sqrt{n}; \\ m &= 1,9 n^{0,4}, \end{aligned}$$

или из табл. 4.3.

Таблица 4.3

Рекомендуемое число интервалов разбиения в зависимости от числа событий

N	50	100	500	1000	10000
M	8	10	13	15	20

$$\text{Длина интервала: } d = 1,02 \frac{X_{\max} - X_{\min}}{m}.$$

Границы интервалов определяются следующим образом:

$$\begin{aligned} X_{\min} - D; \quad X_{\min} + d - D; \\ \dots\dots\dots \\ X_{\min} + (j-1)d - D; \quad X_{\min} + jd - D; \\ X_{\min} + (m-1)d - D; \quad X_{\min} + md - D, \end{aligned}$$

где $D = 0,01d$.

Число значений, попадающих в i интервал, равно v_i . Если $v_i < 5$, то интервалы объединяются. Пусть p_i – гипотетическая вероятность того, что X принимает значение, относящееся к i интервалу. Тогда

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^m \frac{(v_i - np_i)^2}{np_i}, \quad (4.52)$$

где n – объем выборки, а

$$\sum_{i=1}^m (v_i - np_i) = 0. \quad (4.53)$$

Если предполагаемое число значений в каждом интервале больше 10 (т.е. $np_i > 10$), то величина $\frac{v_i - np_i}{\sqrt{np_i}}$ распределена асимптотически нормально.

Пусть существует некоторое χ_p^2 , для которого $\chi^2 > \chi_p^2$ с вероятностью p в случае $n-1$ степеней свободы, тогда следует считать, что данная выборка обнаруживает значимое отличие от гипотетического распределения, и тогда гипотеза H_0 отвергается. В противном случае ($\chi^2 < \chi_p^2$) гипотеза принимается. Согласно этому правилу, вероятность отвергнуть правильную гипотезу равна p .

t-критерий (Стьюдента)

Этот критерий обычно используется для проверки, отлично ли среднее значение, полученное в результате расчетов, от некоторой заданной величины ($\bar{X} = \mu$).

Для этого используется следующий критерий:

$$t = \frac{|\bar{X} - \mu|}{\sigma/\sqrt{n}}. \quad (4.54)$$

Если гипотеза справедлива, то величина t подчиняется распределению Стьюдента с $(n-1)$ степенью свободы.

Пример. Пусть имеется группа людей со следующим ростом: 160, 160, 167, 170, 173, 176, 178, 178, 181, 181.

Пусть гипотеза H_0 состоит в том, что эти значения распределены по нормальному закону со средним значением 167 см, а гипотеза H_1 – в том, что $\bar{X} > 167$.

Решение:

$$\bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^{10} x_i}{10} = 172,4 \text{ см};$$

$$\sigma^2 = \frac{\sum_{i=1}^{10} (x_i - 172,4)^2}{9} = 62,9; \quad \sigma = 7,93 \text{ см};$$

$$\frac{\sigma}{\sqrt{n}} = \sqrt{\frac{62,9}{10}} = 2,51 \text{ см};$$

$$t = \frac{172,4 - 167,0}{2,51} = 2,15 \quad (p = 0,90, \quad n - 1 = 9);$$

$$t_p = 1,83.$$

Таким образом, гипотеза отвергается.

Критерий Фишера

Критерий Фишера используется для проверки, не являются ли значимо различными дисперсии двух нормальных выборок.

При сравнении двух дисперсий удобно подвергать проверке отношение:

$$F_{v_1, v_2} = \frac{\sigma_1^2}{\sigma_2^2}, \quad (4.55)$$

и сравнить эту величину с табличной для числа степеней свободы v_1 и v_2 и уровня значимости p .

Пример. Пусть имеются данные по трем лабораториям (табл. 4.4):

$$\bar{X} = \frac{1}{30} \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^{10} x_{ij}, \quad (4.56)$$

$$\bar{X}_i = \frac{1}{10} \sum_{j=1}^{10} x_{ij}. \quad (4.57)$$

Таблица 4.4

Данные измерений трех лабораторий

Номер измерения	Номер лаборатории		
	1	2	3
1	$X_{1,1}$	$X_{2,1}$	$X_{3,1}$
2	$X_{1,2}$	$X_{2,2}$	$X_{3,2}$
4	$X_{1,3}$	$X_{2,3}$	$X_{3,3}$
.....			
10	$X_{1,10}$	$X_{2,10}$	$X_{3,10}$
$\bar{X}_i$	$\frac{1}{10} \sum_{j=1}^{10} x_{1,j}$	$\frac{1}{10} \sum_{j=1}^{10} x_{2,j}$	$\frac{1}{10} \sum_{j=1}^{10} x_{3,j}$

Критерий

$$F = \frac{\sigma_{\text{между группами}}}{\sigma_{\text{внутри групп}}} < F_{p, \nu_{\text{внутри}}, \nu_{\text{между}}}, \quad (4.58)$$

где $\nu_{\text{внутри}} = \sum_{i=1}^k n_i - k = 27$; $\nu_{\text{между}} = k - 1 = 2$, n_i – число измерений в i лаборатории, k – число лабораторий.

Формулы для расчета числа степеней свободы и дисперсии представлены в табл. 4.5.

Таблица 4.5

Основные формулы для расчета числа степеней свободы и дисперсии

Параметр	Всего	Внутри групп	Между группами
Число степеней свободы	$N-1$	$\sum_{i=1}^k n_i - k$	$k-1$
Дисперсия	$\frac{\sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^{n_i} (x_{ij} - \bar{X})^2}{N-1}$	$\frac{\sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^{n_i} (x_{ij} - \bar{X}_i)^2}{\sum_{i=1}^k n_i - k}$	$\frac{\sum_{i=1}^k n_i (\bar{X}_i - \bar{X})^2}{k-1}$

Выборочные исследования

Выборочное исследование применяется в тех случаях, когда проведение сплошного наблюдения невозможно или экономически нецелесообразно. В частности, когда проверка качества отдельных видов продукции или материалов связана с ее уничтожением (для ЯМ – разрушающий контроль).

Та проба или часть единиц, которая отбирается для исследования, называется выборкой (или выборочной совокупностью), а вся совокупность единиц, из которых производится отбор – генеральной совокупностью.

Цель выборочного контроля – сделать заключение о характере совокупности, основываясь на репрезентативной выборке, взятой из совокупности.

Наблюдения и измерения будут вестись только для выборки из генеральной совокупности. Очевидно, что качество результатов выборочного исследования зависит, в первую очередь, от того, насколько состав выборки представляет генеральную совокупность, иначе говоря, от того, насколько выборка репрезентативна (представительна).

Для обеспечения репрезентативности выборки необходимо соблюдение принципа случайности отбора единиц и проб. Принцип случайности предполагает, что на включение или исключение объекта из выборки не может повлиять какой-либо иной фактор, кроме случая.

Существуют различные способы формирования выборки (выборочной совокупности) в зависимости от ее характеристик и характеристик генеральной совокупности [6].

Характеристики совокупности

Количественные:

- общее количество ядерного материала;
- средний уровень обогащения по ^{235}U .

Качественные:

- правильное применение устройств контроля несанкционированного доступа;
- номера на контролируемых единицах, которые должны совпадать с базой данных.

Для того чтобы выборка была репрезентативной, надо понимать, каким образом интересующая нас характеристика распределяется внутри совокупности:

- равномерно по всей совокупности;

- равномерно в пределах кластеров;
- равномерно внутри слоев;
- неизвестно.

План выборочного контроля включает следующие пункты.

1. Цель проведения выборочного контроля.
2. Анализ совокупности, которая будет объектом контроля, и ее характеристик.

3. Анализ ограничений и проблем статистического характера.
4. Анализ ограничений и проблем нестатистического характера.
5. Вычисление размера выборки.
6. Выбор стратегии проведения выборки.

Рассмотрим все пункты более подробно.

Цель проведения выборочного контроля:

- проверка ранее выполненных измерений;
- определение количества СЯМ, описанного в данном инвентарном перечне;
- проверка соответствия между записями в базе данных и инвентарным перечнем;
- выяснение правильности применения устройств индикации несанкционированного доступа.

Определение совокупности, которая будет объектом контроля. При анализе совокупности следует определить характеристики, которые могут повлиять на выборку:

- определить, однородна ли совокупность с точки зрения данной характеристики;
- если совокупность неоднородна, однородны ли ее слои;
- как хранятся интересующие нас предметы;
- есть ли проблемы с точки зрения радиационной безопасности.

Статистические характеристики. *Качественные* (дискретные) характеристики:

- размер совокупности;
- распределение данной характеристики внутри совокупности;
- необходимый уровень значимости;
- допустимое число дефектов.

Например, необходимо, чтобы исследование гарантировало нам с 95 % вероятностью, что не более 1 % элементов совокупности дефектны.

Количественные (непрерывные) характеристики:

- какое количество потерь надо считать значимым при их обнаружении;
- неопределенность, связанная с оценками;

- допустимое количество ошибок первого и второго рода (ошибка первого рода – ложное обнаружение потерь (отвергаем истинную гипотезу), ошибка второго рода – пропуск реальных потерь (принимая ложную гипотезу)).

Все вышеизложенное в той или иной степени определяет размер необходимой выборки.

Нестатистические ограничения:

- а) нормативные требования;
- б) требования безопасности;
- в) ограничения, связанные с материальными ресурсами, в том числе с финансированием;
- г) временные ограничения.

Размер выборки определяется следующими параметрами:

- размером исследуемой совокупности;
- максимальным допустимым количеством дефектов;
- уровнем значимости.

При проведении инспекции по проверке систем индикации не-санкционированного доступа (ИНД) проверяют выполнение двух условий надежности.

Условие 1. Система записи должна точно отображать местонахождение и идентификацию по меньшей мере 99 % устройств ИНД.

Условие 2. Устройства ИНД должны правильно применяться не менее чем в 95 % случаев.

При проведении выборочного контроля доверительная вероятность берется 95 %.

Пример. Рассмотрим совокупность, состоящую из 2000 единиц. Попробуем определить минимальный размер выборки, при котором с 95 % (т.е. $\alpha = 0,05$) вероятностью можно проверить второе условие: не более 5 % элементов (т.е. не более 100) имеют дефекты.

Функция распределения вероятности наблюдения x дефектных элементов в выборке n элементов из совокупности, состоящей из N единиц, и имеющей всего D дефектных единиц, описывается гипергеометрическим распределением (4.21):

$$p(x) = \frac{\binom{D}{x} \binom{N-D}{n-x}}{\binom{N}{n}},$$

где в нашем случае: $x = 0, 1, 2, \dots, \min(D, n)$.

Очевидно, что наименьшая выборка будет для случая, когда допускается 0 дефектных единиц, тогда:

$$p(x=0) = \frac{\binom{D}{0} \binom{N-D}{n}}{\binom{N}{n}} = \left(1 - \frac{n}{N}\right) \cdot \left(1 - \frac{n}{N-1}\right) \cdot \left(1 - \frac{n}{N-2}\right) \times$$

$$\times \left(1 - \frac{n}{N-D+1}\right) \leq \left(1 - \frac{n}{N}\right)^D = 0,05;$$

$$0,05 \leq (1 - n/N)^D;$$

$$0,05 \leq (1 - n/2000)^{100} \rightarrow 1 - n/2000 \geq \sqrt[100]{0,05} \Rightarrow n = 2000 \cdot (1 - 0,97).$$

Получим $n = 60$.

Аналогично, можем определить размер выборки для проверки первого условия:

$$p = 0,05, N = 2000, d < 1 \% = 20, x = 0.$$

$$N = 278,2 \text{ или, округляя до целых, } n = 279.$$

Если число элементов в совокупности достаточно велико, то нужно продолжать проводить исследование, даже если обнаружена одна дефектная единица. Какова должна быть выборка, если допускаем наличие одного дефекта? Выборка должна быть такой, при которой с вероятностью 95 % при наличии 0 дефектов или одного дефекта можно было сказать, что общее число дефектов не превышает 1 %, то есть

$$p(x \leq 1) = p(x=0) + p(x=1) \leq 0,05;$$

$$p(x=0) = \left(1 - \frac{n}{N}\right)^D;$$

$$p(x=1) = \frac{\binom{D}{1} \binom{N-D}{n-1}}{\binom{N}{n}} =$$

$$= \frac{D \cdot n}{(N-D+1)} \cdot \left(1 - \frac{n}{N}\right) \cdot \left(1 - \frac{n}{N-1}\right) \cdots \left(1 - \frac{n}{N-(D-2)}\right) \leq$$

$$\leq \frac{D \cdot n}{(N-D+1)} \cdot \left(1 - \frac{n}{N}\right)^{D-1} \leq 0,05.$$

В результате вычислений получим следующие результаты ($N = 2000$) табл. 4.6 и 4.7.

Таблица 4.6

Минимальный размер выборки для проверки первого и второго условия

Проверка первого условия		Проверка второго условия	
Максимальное число дефектов	Выборка	Максимальное число дефектов	Выборка
0	279	0	60
1	432	1	93
2	564	2	122

Таблица 4.7

Определение минимального размера выборки для проверки второго условия в зависимости от допустимого числа дефектов в выборке

Максимально допустимое число дефектов	Минимальный размер выборки
0	60
1	93
2	122
3	150
4	177
5	203
6	228
7	253
8	277
9	302
10	325

Если же все-таки дефекты были найдены, то надо принять корректировочные меры и повторить процесс выборочного исследования или провести 100 %-ную инвентаризацию.

Что касается размера выборки, то совершенно очевидно, небольшие выборки требуют меньших затрат, но менее информативны и имеют меньшие уровни значимости, в то время, как большие выборки достаточно информативны, имеют большие уровни значимости, но требуют значительно больших затрат.

Стратегия проведения выборки

Существует несколько вариантов проведения выборки, из которых необходимо выбрать тот, который даст максимум информации при минимуме затрат:

- простая случайная выборка;
- систематическая случайная выборка;
- гнездовая (кластерная) выборка;
- стратифицированная случайная выборка;
- вероятностная выборка.

Сравним эти варианты.

Простая случайная выборка. Все элементы совокупности заносятся в список и нумеруются $1, \dots, N$, где N – размер совокупности. Затем из этого списка случайным образом (например, с помощью генератора случайных чисел) выбираются n номеров, после чего из совокупности отбираются учетные единицы, соответствующие выбранным номерам.

Достоинства (+) и недостатки (–):

- выбор предметов из списка не представляет трудности (+);
- несмещенная оценка среднего и дисперсии (+);
- необходимо, чтобы элементы совокупности были идентифицированы и обозначены до проведения выборочного контроля (–);
- поиски выбранной единицы могут потребовать много времени (–);
- могут быть неадекватно представлены важные, но немногочисленные подгруппы (–).

Систематическая случайная выборка. В этом случае отбирается каждый k -й элемент совокупности.

Достоинства (+) и недостатки (–):

- выбор предметов не представляет трудности (+);
- не требует знания общего количества всех элементов совокупности (+);
- может потребоваться упорядочивание элементов совокупности (–).

Кластерная выборка. Кластеры ядерных материалов – скопления, обусловленные методом хранения ЯМ. Например, контейнеры, как правило, находятся на полках, стеллажах, или других специально приспособленных для этого местах, естественным образом

группируясь. Часто записи в журнале о каком-либо контейнере содержат информацию только о кластере, в котором он расположен, например, о номере помещения, полки, и т.п. Таким образом, рассмотрение кластеров как элементов совокупности, из которой необходимо сделать выборку, с последующей проверкой контейнеров в каждом отобранном кластере, может оказаться очень выгодным с точки зрения временных и материальных затрат.

Существует много вариантов кластерной выборки. Наиболее популярны одноэтапная и двухэтапная выборки.

При одноэтапной кластерной выборке собственно выборка проводится среди кластеров, а внутри каждого кластера проводится сплошная проверка. При двухэтапной кластерной выборке выборка проводится как между кластерами, так и внутри кластеров. В последнем случае проверяется меньше учетных единиц в каждом кластере, но зато контролируется больше кластеров. К недостаткам можно отнести необходимость иметь информацию о каждом контейнере в каждом кластере.

Достоинства (+) и недостатки (–):

- может сэкономить время и финансы, особенно для больших совокупностей с выраженной гнездовой структурой (+);
- могут выпасть из поля зрения важные кластеры (–);
- если элементы кластера однородны, то неопределенность параметров будет занижена (–).

Стратифицированная выборка. Страта – однородный материал. ЯМ можно стратифицировать по обогащению и содержанию урана, физической или химической форме, по способу измерения. Процедуру стратификации можно разделить на пункты:

1) получить полную информацию по всем учетным единицами генеральной совокупности: типы ЯМ, приблизительное количество ЯМ (по элементу или изотопу), обогащение; информацию о местоположении контейнеров, ожидаемые погрешности измерений;

2) сгруппировать единицы по некоторому количественному признаку, например по обогащению, содержанию определенного изотопа, по концентрации урана и т.п.;

3) если в генеральной совокупности присутствуют разные типы ЯМ (UF_6 , UO_2), разделить группы, получившиеся в п.2, на подгруппы по типу материала;

4) если внутри подгрупп п.3 имеются материалы, к которым будут применены различные методы измерений с различными погрешностями, разделить получившиеся подгруппы на меньшие группы по типу измерений;

5) после п.4 стратификация завершена, и можно проводить выборку.

Достоинства (+) и недостатки (–):

- в выборке представлен, по меньшей мере, один элемент каждого слоя, что обеспечивает лучший охват ЯМ (+);
- существует возможность оценки параметров как для каждого слоя, так и для всей совокупности (+);
- элементы в пределах слоя должны быть однородными (–);
- может потребоваться выборка большего размера, чем в случае применения других методов (–).

Вероятностная выборка. Выбор из совокупности проводится в соответствии с относительной мерой важности (с приданием весов), пропорционально значимости контролируемых элементов.

Достоинства (+) и недостатки (–):

- наибольшее внимание будет уделено наиболее привлекательным с точки зрения хищения материалам (+);
- размер выборки зависит от выбранной меры важности (–).

Определение размера выборки по переменным, среднего значения и его погрешности

Простая случайная выборка. Размер простой случайной выборки по переменным определяется по следующей формуле:

$$n = \frac{t^2 \cdot \Delta^2 \cdot N}{(N-1)\varepsilon^2 + t^2 \cdot \Delta^2}, \quad (4.59)$$

где $\Delta = \frac{\sigma_x}{\bar{x}}$ – коэффициент вариации исследуемой характеристики в генеральной совокупности (определяется по данным экспертов или по результатам предыдущих измерений); $\varepsilon = \frac{|\bar{x} - \bar{X}|}{\bar{X}}$ – допустимая разница между средним (истинным) значением характери-

стики в генеральной совокупности и средним значением выборки; t_N – величина нормированного отклонения для нормального распределения вероятностей (определяется вероятностью того, что относительное различие между оценкой выборки и значением совокупности не превышает ε) (табл. 4.8).

Таблица 4.8

Величина нормированного отклонения

t_N	p
1,0	0,683
1,5	0,866
1,96	0,95
2,0	0,954
2,5	0,988
3,0	0,997
3,5	0,999

Среднее значение выборки определяется по следующей формуле:

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}, \quad (4.60)$$

$$\sigma^2(\bar{x}) = \left(\frac{N-n}{N} \right) \cdot \frac{\hat{\sigma}^2}{n}, \quad \text{где} \quad \hat{\sigma}^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}. \quad (4.61)$$

Для суммарных значений имеем:

$$\begin{aligned} X &= N \cdot \bar{x}; \\ \sigma(X) &= N \cdot \sigma(\bar{x}). \end{aligned} \quad (4.62)$$

Здесь и далее: n – размер выборки, N – размер генеральной совокупности, x_i – результат измерения i -го элемента выборки, $\bar{x}$ – среднее значение исследуемой характеристики для выборки (и для генеральной совокупности), X – суммарное значение исследуемой характеристики для генеральной совокупности.

Кластерная выборка. Одноэтапная. Размер кластерной выборки по переменным определяется по следующей формуле:

$$n = \sum_{i=1}^m N_i, \quad (4.63)$$

$$m = \frac{t^2 \cdot \Delta^2 \cdot M}{(M-1)\varepsilon^2 + t^2 \cdot \Delta^2},$$

где $\Delta = \frac{\sigma_{\text{класт}}}{\bar{X}_{\text{класт}}}$ – коэффициент вариации исследуемой характеристики между кластерами (определяется по данным экспертов или

по результатам предыдущих измерений); $\sigma_{\text{класт}}^2 = \frac{\sum_{i=1}^M (X_i - \bar{X}_{\text{класт}})^2}{M}$ – межкластерная (расчетная) дисперсия; M – число кластеров в генеральной совокупности;

$X_i = \sum_{j=1}^{N_i} x_{ij}$ – суммарное значение характеристики в i -м кластере; x_{ij} – величина исследуемой характеристики (переменной) для j -го контейнера в i -м кластере;

$\bar{X}_{\text{класт}} = \sum_{i=1}^M X_i / M$ – истинное среднее значение исследуемой характеристики по всем кластерам;

$\varepsilon = \frac{|\bar{x} - \bar{X}|}{\bar{X}}$ – допустимая разница между средним (истинным) значением характеристики в генеральной совокупности и средним значением выборки;

t – величина нормированного отклонения для нормального распределения вероятностей (определяется вероятностью того, что относительное различие между оценкой выборки и значением совокупности не превышает ε).

Среднее значение выборки определяется по следующим формулам:

$$\bar{x} = \frac{M \cdot \sum_{i=1}^m X_i}{m \cdot N}, \quad (4.64)$$

$$\sigma^2(\bar{x}) = \left(\frac{M-m}{M-1} \cdot \frac{M}{N\sqrt{m}} \right) \cdot \sigma_{\text{клат}}^2, \quad (4.65)$$

где $\sigma_{\text{клат}}^2 = \frac{\sum_{i=1}^m (X_i - \bar{X}_{\text{клат}})^2}{m-1} \cdot \frac{M-1}{M}$, а $\bar{X}_{\text{клат}} = \frac{\sum_{i=1}^m X_i}{m}$ – среднее суммарное значение характеристики в кластере.

Для суммарных значений имеем:

$$\begin{aligned} X &= N \cdot \bar{x}; \\ \sigma(X) &= N \cdot \sigma(\bar{x}). \end{aligned} \quad (4.66)$$

Здесь m – размер выборки; M – число кластеров в совокупности; X – оценка суммарного значения исследуемой характеристики в совокупности; x_{ij} – величина исследуемой характеристики (переменной) для j -го контейнера в i -м кластере; N_i – число контейнеров в кластере i ; $N = \sum_{i=1}^M N_i$ – размер генеральной совокупности (полное число контейнеров); x_i – результат измерения i -го элемента выборки, $\bar{x}$ – среднее значение исследуемой характеристики для выборки (и для генеральной совокупности).

Стратифицированная выборка. Среднее значение выборки определяется следующим образом:

$$\bar{x} = \sum_{i=1}^L \frac{N_i}{N n_i} \sum_{j=1}^{n_i} x_{ij}, \quad (4.67)$$

$$\sigma^2(\bar{x}) = \sum_{i=1}^L \left(\frac{N_i}{N} \right)^2 \frac{s_i^2}{n_i} \frac{N_i - n_i}{N_i}, \quad (4.68)$$

где

$$s_i^2 = \frac{\sum_{j=1}^{n_i} (x_{ij} - \bar{x}_j)^2}{n_i - 1} - \quad (4.69)$$

дисперсия внутри страты, а

$$\bar{x}_i = \frac{\sum_{j=1}^{n_i} x_{ij}}{n_i} - \quad (4.70)$$

среднее значение исследуемой характеристики в i -й страте.

Для суммарных значений имеем:

$$\begin{aligned} X &= N \cdot \bar{x}; \\ \sigma(X) &= N \cdot \sigma(\bar{x}). \end{aligned} \quad (4.71)$$

Здесь n_i – число контейнеров, отобранных из i -й страты; L – число страт в совокупности; X – оценка суммарного значения исследуемой характеристики в совокупности; x_{ij} – величина исследуемой характеристики (переменной) для j -го контейнера в i -й страте; N_i – число контейнеров в страте i , $N = \sum_{i=1}^M N_i$ – размер генеральной совокупности (полное число контейнеров); $\bar{x}$ – среднее значение исследуемой характеристики для выборки (и для генеральной совокупности).

Размер кластерной выборки по переменным, необходимый для того, чтобы обеспечить заданный уровень точности может быть оценен из следующей формулы:

$$\varepsilon^2 = t^2 \sum_{i=1}^L N_i^2 \frac{\sigma_i^2 (N_i - n_i)}{n_i (N_i - 1)}, \quad (4.72)$$

где $\varepsilon = \frac{|\bar{x} - \bar{X}|}{\bar{X}}$ – допустимая разница между средним (истинным)

значением характеристики в генеральной совокупности и средним значением выборки; t – величина нормированного отклонения для нормального распределения вероятностей (определяется вероятностью того, что относительное различие между оценкой выборки и

значением совокупности не превышает ε); $\sigma_i^2 = \frac{\sum_{j=1}^{N_i} (x_{ij} - \bar{X}_i)^2}{N_i}$ –

дисперсия (вариация) исследуемой характеристики внутри i -й страты.

Следует отметить, что X и σ_i неизвестны. Существует несколько наборов n_i , удовлетворяющих условию (4.72). Определить n_i можно исходя из требования минимизации дисперсии среднего выборочного и суммарного значения характеристики в выборке:

$$n = \sum_{i=1}^L n_i, \quad n_i = n \frac{N_i \cdot \sigma_i}{\sum_{i=1}^L N_i \cdot \sigma_i}, \quad (4.73)$$

где

$$n = \frac{t^2 \cdot \left[\sum_{i=1}^L \frac{N_i^2 \cdot \sigma_i^2}{N_i - 1} \right] \cdot \left[\sum_{i=1}^L N_i \cdot \sigma_i \right]}{\varepsilon^2(X) + t^2 \cdot \left[\sum_{i=1}^L \frac{N_i^2 \cdot \sigma_i^2}{N_i - 1} \right]}, \quad (4.74)$$

а вместо X и σ_i подставляются соответствующие оценки.

4.5. Контроль и обеспечение качества измерений

Под обеспечением качества будем понимать систематические действия, направленные на обеспечение удовлетворительной работы какой-либо структуры, системы или компонент системы.

Обеспечение качества измерений складывается из двух видов деятельности контроля качества и оценки качества.

1. Контроль качества включает в себя процедуры и действия, разработанные и применяемые для того, чтобы проводить измерения требуемого качества.

2. Оценка качества – процедуры и действия, выполняемые для того, чтобы убедиться в том, что система контроля качества работает нормально.

Контроль измерений (КИ) ЯМ – одна из оставляющих программы обеспечения качества. КИ – система процедур слежения и

оценки источников погрешностей. КИ включает непрерывное наблюдение за работой измерительных приборов с использованием эталонов и оценку непостоянства погрешности отдельных измерений (которая влияет на дисперсию полученного значения и на результаты расчета ИР).

Цели контроля качества измерений:

- получить количественные данные о неопределенности результатов измерений;
- обеспечить неизменность измерительного процесса;
- выявить нештатные ситуации и принять меры по их исправлению.

Функциональные элементы системы контроля измерений ЯМ:

- применение эталонов;
- аттестация метода измерений;
- межлабораторные сличения результатов измерений;
- составление контрольных карт;
- калибровки;
- другие опыты для оценки неопределенности результата измерений (дополнительные измерения).

Уточним некоторые понятия.

Эффект – фактор, не являющийся измеряемой величиной и оказывающий воздействие на результат измерений. КИ предполагает выявление и описание эффектов, которые присущи используемой измерительной системе. Так погрешность (разница между истинным и измеренным значениями) рассматривается как результат суммарного воздействия различных эффектов.

Рабочий эталон – материал, устройство или прибор, значение которого известно по отношению к государственным эталонам или метрологическим системам.

Эталон должен быть репрезентативен в отношении всего, что влияет на измерения. Обычно предполагается, что эталон и материалы, подлежащие измерению, имеют сходные размеры, форму, физический и химический состав. Иерархия эталонов представлена на рис. 4.4.

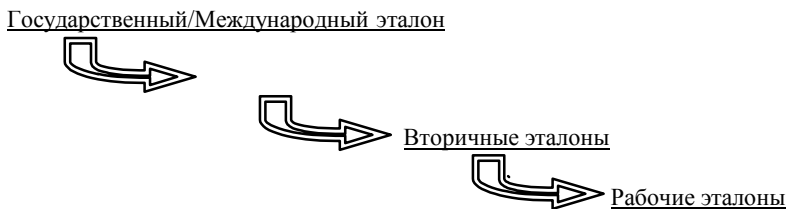


Рис. 4.4. Иерархия эталонов

При аттестации эталона нижнего уровня производят многократные измерения его значения по отношению к эталону более высокого уровня. Среднее арифметическое значение результатов измерений будет определять значение эталона нижнего уровня. Неопределенность значения эталона нижнего уровня получают как сумму неопределенности значения эталона высокого уровня и статистической погрешности результатов многократных измерений.

Аттестованный эталонный материал – образец материала, аттестованный по специальной методике и снабженный сертификатом с указанием неопределенности значений его параметров. Образцы аттестованных эталонных материалов рассылаются по предприятиям для КИ.

Метрологический контроль на предприятии включает:
исходную аттестацию оборудования;
периодическую переаттестацию (поверку) и перекалибровку;
регулярный контроль с применением эталонов.

Проводятся и измерения эталона, так при контроле партии изделий, прежде всего, измеряют эталон. Результаты измерений должны находиться в пределах неопределенности данных эталона. Для анализа применяют контрольные карты (карты статистического контроля).

Контроль качества крайне важен и с точки зрения оценки погрешностей. Для оценки погрешностей, рассмотренных ранее, обычно используют следующие источники исходной информации:

- технические данные предприятия–изготовителя;
- результаты целевых исследований;
- отраслевые эксплуатационные критерии;
- данные калибровки;

- данные метрологического контроля;
- результаты межлабораторных сличений.

Последние четыре пункта непосредственно относятся к программе контроля качества измерений.

Рассмотрим процедуры контроля качества измерений для некоторых методов.

Взвешивание

Несмотря на простоту процедуры и достаточно малую погрешность единичного измерения, взвешивание требует тщательного контроля, поскольку оно является основной измерительной процедурой в системе учета и контроля ЯМ. Минимальный необходимый контроль включает в себя следующие процедуры:

- частые проверки, осуществляемые оператором с помощью эталонов;
- периодическую инспекцию, технический уход и перекалибровку всех весов и разновесов;
- независимое повторное взвешивание материалов в технологическом процессе;
- контроль за условиями окружающей среды.

Проводится контроль за условиями окружающей среды (в данном случае за температурой, влажностью и давлением воздуха), так как в процессе взвешивания учитывается выталкивающая сила, действующая на контейнер, которая зависит от упомянутых выше параметров.

Пробоотбор

Как уже упоминалось, процедуры пробоотбора иногда могут вносить существенный, если не основной вклад в суммарную погрешность, поскольку контролировать пробоотбор достаточно сложно. Обычно контроль за качеством пробоотбора включает следующие процедуры:

- тестирование смешивания и отбора проб при установлении рабочих процедур для выборки, свободной от систематической погрешности;

- периодическое повторение отбора проб с помощью независимых процедур для проверки на наличие систематической ошибки пробоотбора;

- анализ независимых повторных проб для оценки совокупной случайной ошибки пробоотбора и анализа.

Разрушающий анализ

Разрушающие анализы, в первую очередь альфа–спектрометрия и масс–спектрометрия, – очень сложные и трудоемкие процедуры, требующие высокой квалификации персонала. Учитывая, что пробоотбор является неотъемлемой частью разрушающих измерений, контроль качества этих процедур столь важен, столь же и сложен. Приведем набор стандартных контрольных процедур для разрушающих измерений:

- калибровка, стандартизация всех приборов и реагентов;
- анализ эталонных образцов, которые моделируют образцы, находящиеся в технологическом процессе, для оценки систематического смещения;
- проведение и анализ независимого повторного пробоотбора из материала, находящегося в технологическом процессе, для оценки совокупной случайной ошибки выборки и анализа;
- повторный анализ выборки для оценки случайной ошибки анализа;
- документирование и описание всех измерительных методик;
- подготовка и повышение квалификации персонала.

Неразрушающие анализы (НРА)

Неразрушающие измерения значительно проще, чем разрушающие. Тем не менее контроль за качеством НРА в ряде случаев достаточно сложен [7]. В первую очередь, это связано с необходимостью использования эталонов и стандартных образцов. Следует отметить, что создать репрезентативный эталон для НРА иногда очень трудно (например, при измерении отложений в трубах или контейнеров с низкоактивными отходами). Если свойства эталона и анализируемого материала сильно различаются, то эталон может быть основным источником погрешности измерения.

Программа контроля качества неразрушающих измерений в целом очень похожа на аналогичные программы для других измерительных процедур и включает в себя:

- калибровку;
- периодическое проведение измерений эталонов;
- своевременную перекалибровку эталонов;
- аттестацию методик и лабораторий;
- документирование и описание методик;
- подготовку персонала.

Для облегчения работы операторов и повышения качества измерений широко применяется внутренний контроль измерений, встроенный в программное обеспечение измерительной установки. При этом автоматически проверяется каждое измерение.

Так, программа MGA, использующаяся для неразрушающих измерений изотопного состава плутония, содержит следующие контрольные процедуры:

- контроль разрешающей способности детектора (если ширина пиков превысит некоторое значение, программа не станет обрабатывать спектр, или выдаст сообщение о возможной ошибке);
- контроль положения пиков в спектре;
- учет и введение поправки на «мертвое» время измерительной системы;
- учет неравновесного состояния ^{241}Pu – ^{237}U при измерении изотопов плутония.

Контрольные карты (карты статистического контроля)

Одним из важнейших инструментов в арсенале статистических методов контроля качества являются контрольные карты. Принято считать, что идея контрольной карты принадлежит американскому статистику У. Шухарту. Первоначально карты использовались для регистрации результатов измерений требуемых (контролируемых) свойств продукции [9]. Выход параметра за границы поля допуска свидетельствовал о необходимости корректировки процесса производства. Карта также позволяла получить информацию и о том, где причина брака. Однако в этом случае решение о корректировке принималось тогда, когда брак уже был получен. Поэтому важно было найти процедуру, которая накапливала бы информацию не только для ретроспективного исследования, но и для использова-

ния при принятии решений. Такую процедуру получения и использования при принятии решений кумулятивных карт предложил статистик И. Пейдж в 1954 г.

Контрольная карта обычно состоит из центральной линии (CL), соответствующей заданному значению исследуемой характеристики, двух контрольных пределов: верхнего (UCL) и нижнего (LCL) и нанесенных на карту значений контролируемой характеристики.

Пример контрольной карты приведен на рис. 4.5. Точки на графике – результаты измерений контролируемого параметра технологического процесса, среднего значения какой-либо характеристики, значения инвентаризационной разницы и т.п. Если какая-либо точка на графике выходит за контрольные пределы, это означает, что процесс «вышел из-под контроля». Кроме того, если даже все результаты находятся внутри контрольных пределов, но наблюдаются тренды или другая неслучайная организация данных, это значит: необходимо провести дополнительное исследование, чтобы избежать более серьезных проблем.

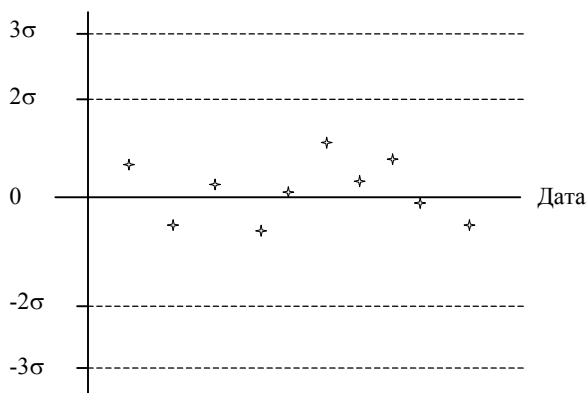


Рис. 4.5. Пример контрольной карты

Таким образом, сигналом о том, что процесс «вышел из-под контроля» могут служить:

- выход точки за контрольные пределы;
- расположение группы последовательных точек около одной контрольной границы, но не выход за нее;

- сильное рассеяние точек на контрольной карте относительно средней линии, что свидетельствует о снижении точности.

Рассмотрим лишь наиболее часто используемые виды контрольных карт, так называемые карты Шухарта и карты накопленной суммы.

Контрольная карта Шухарта

Контрольная карта Шухарта рассчитывается и строится по следующей схеме: пусть $Y_1, \dots, Y_n$ – набор значений случайной величины Y ; μ_Y – среднее значение для этой выборки; σ_Y – стандартное отклонение среднего, тогда

$$\begin{aligned} \text{UCL} &= \mu_Y + 3\sigma_Y, \\ \text{CL} &= \mu_Y, \\ \text{LCL} &= \mu_Y - 3\sigma_Y. \end{aligned} \tag{4.75}$$

На рис. 4.6 приведен пример контрольной карты.

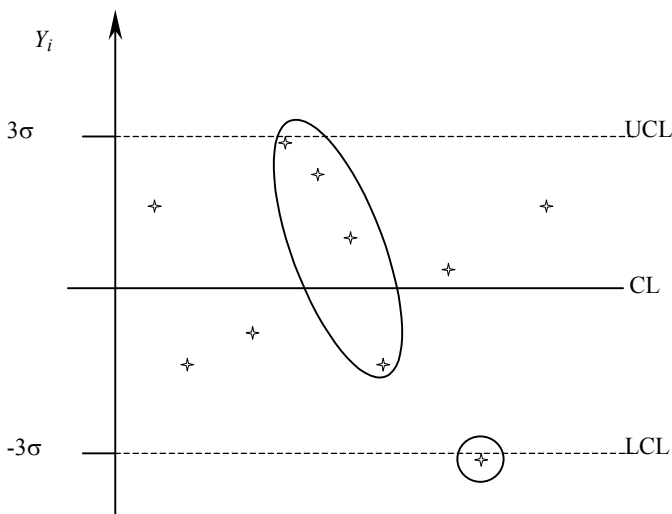


Рис. 4.6. Контрольная карта Шухарта

Случайная величина Y может иметь, вообще говоря, любое распределение, в зависимости от этого следует выбирать и контроль-

ные пределы. Так, среднее значение выборки имеет нормальное распределение, число дефектных элементов в выборке – биномиальное, а скорость счета событий (число событий в единицу времени) – пуассоновское распределение (табл. 4.9).

Таблица 4.9

Контрольные пределы для разных статистик

Статистика Y	Распределение	UCL	CL	LCL
Среднее выборочное $\bar{X}$	Нормальное	$\mu + 3\sigma / \sqrt{n}$	μ	$\mu - 3\sigma / \sqrt{n}$
Число дефектных элементов в выборке X	Биномиальное	$np + 3\sqrt{np(1-p)}$	np	$np - 3\sqrt{np(1-p)}$
Скорость счета C	Пуассоновское	$\mu + 3\sqrt{\mu}$	μ	$\mu - 3\sqrt{\mu}$

Контрольная карта (график) накопленной суммы

Контрольные карты Шухарта позволяют, главным образом, ретроспективно контролировать разовые и достаточно большие аномалии в процессе. Однако в технологическом процессе могут иметь место небольшие, но постоянные смещения, которые желательно контролировать оперативно, а не ретроспективно. Графики накопленной суммы (CUSUM) позволяют достаточно оперативно выявлять такие отклонения (рис. 4.7).

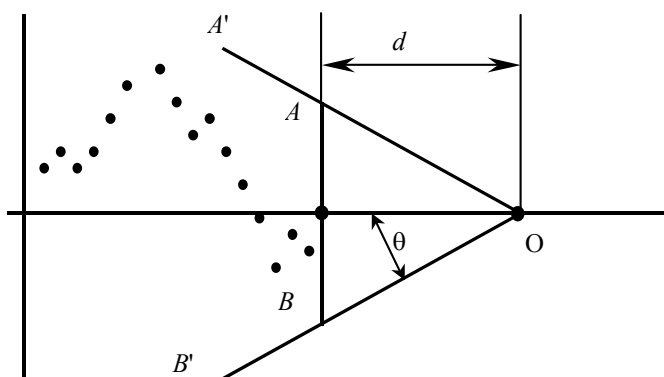


Рис. 4.7. Пример контрольной карты накопленной суммы

При построении графика накопленной суммы по оси абсцисс откладывается номер подгруппы, а по оси ординат вместо значений случайной величины – значение накопленной суммы отклонений от среднего значения (или некоторой стандартной величины):

$$T_m = \sum_{i=1}^m (Y_i - \mu_0). \quad (4.76)$$

Если процесс находится под контролем, и нет систематических смещений и/или хищений, T_m должно колебаться около нуля. Если же в процессе появляются какие-либо систематические факторы (точки на карте Шухарта в этом случае лежат по одну сторону от центральной линии), кривая накопленной суммы пойдет вверх или вниз.

Особенно следует отметить, что при построении графика накопленной суммы важную роль играет масштаб. Чтобы точки были хорошо различимы и для облегчения построения так называемой V -маски, рекомендуется выбирать расстояние между точками на оси абсцисс в диапазоне $\sigma Y \div 2,5 \sigma Y$. Соблюдение масштаба очень важно, поскольку от этого зависит угол маски. Выбор приемлемого масштаба позволяет получить угол маски θ в диапазоне $30\text{--}60^\circ$, что, в свою очередь, обеспечивает получение наилучших результатов и позволяет исключить ошибки, неизбежные при выборе слишком большого или слишком малого угла.

Процедура контроля процесса заключается в следующем. Маска (процедуру построения V -маски рассмотрим дальше) накладывается на график таким образом, чтобы точка P попадала на последнюю точку графика, а линия OP была параллельна оси абсцисс. Если ни одна из точек графика не выходит за пределы угла $A'OB'$, то считается, что процесс находится под контролем.

Для построения V -маски необходимы два элемента: угол θ и расстояние d :

$$\operatorname{tg} \theta = \frac{D}{2y} = \frac{\delta \sigma}{2y}, \quad (4.77)$$

где σ – средневывборочная дисперсия; D – величина смещения (либо в ту, либо в другую сторону), которая должна быть выявлена с заданной вероятностью; δ – величина этого смещения в единицах

σ , $y = \frac{\text{цена деления по оси } Y}{\text{цена деления по оси } X}$ – масштабирующий коэффициент,

определяющий геометрию контрольной карты и размеры маски;

$$d = OP = E(\alpha) \left(\frac{\sigma}{D} \right)^2 = \frac{E(\alpha)}{\delta^2}, \quad (4.78)$$

где $E(\alpha)$ – коэффициент, являющийся функцией α – вероятности ошибки первого рода. Значения этого коэффициента приведены в табл. 4.10.

Таблица 4.10

Значения коэффициента $E(\alpha)$ в зависимости от вероятности ошибки первого рода

α	0,0027	0,010	0,020	0,050	0,100
$E(\alpha)$	13,215	10,597	9,210	7,378	5,9911

Итак, построение графика накопленной суммы и оценка стабильности процесса состоит из следующих шагов:

1) выбор подходящего масштаба осей, нанесение экспериментальных точек на график накопленной суммы;

2) выбор α и δ , расчет σ , определение параметров V -маски (θ и d), построение маски;

3) маска помещается на контрольную карту как уже описывалось, и проверяются все точки, лежащие слева от точки P маски, при этом **верхний** луч маски является **нижним** контрольным пределом, а **нижний** луч – **верхним** контрольным пределом.

Таким образом, контрольные карты являются мощным средством для выявления и анализа определенной (но не случайной!)

причины отклонения, смещения или нарушения стабильности процесса, например организованного хищения ЯМ.

На сегодняшний день существует достаточно много компьютерных программ, позволяющих проводить автоматизированный анализ данных с помощью контрольных карт.

Список литературы

1. Гераскин Н.И., Петрова Е.В. Теория вероятностей и прикладная математическая статистика в задачах физической защиты ядерно-опасных объектов, учета и контроля ядерных материалов. М.: МИФИ, 2001.
2. Колмогоров А.Н. Основные понятия теории вероятностей. М.: Наука, 1974.
3. Вентцель Е.С. Теория вероятностей. М.: Высшая школа, 1998.
4. Основные правила по учету и контролю ядерных материалов (ОПУК). НП–030–05. Утверждены Постановлением Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору N 19 от 26 декабря 2005 года. М., 2005.
5. Кассандрова О.Н., Лебедев В.В. Обработка результатов наблюдений. М.: Наука, 1970.
6. Deming W.E. Some Theory of Sampling. Dover Publications Inc. New York, 1998.
7. Reilly D., Ensslin N., Smith H., Jr., Kreiner S. Passive Non-Destructive Assay of Nuclear Materials. NUREG/CR–5550, LA–UR–732.
8. Худсон Д. Статистика для физиков. М.: Мир, 1970.
9. Ильенкова С.Д., Ильенкова Н.Д. и др. Управление качеством. М.: ЮНИТИ, 1998.

ГЛАВА 5

ИЗМЕРЕНИЯ ЯДЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ, ПРИМЕНЯЕМЫЕ В ЦЕЛЯХ ИХ УЧЕТА И КОНТРОЛЯ

Данная глава посвящена рассмотрению и изучению методов и аппаратуры, применяемых для учета и контроля ядерных материалов (ЯМ). Перечисляются подлежащие контролю ЯМ, обсуждаются их свойства, условия проведения контрольных измерений.

Даются сведения о наиболее распространенных методах разрушающего и неразрушающего контроля ЯМ, пассивных и активных анализах. Большинство методов контроля основано на регистрации гамма- и нейтронного излучений. Приводятся данные о применяемых детекторах и аппаратуре, о процессах калибровки и эталонах. Обсуждаются источники погрешностей измерений и меры по их снижению. В заключение приводятся примеры комплексного применения методов измерений ЯМ на производстве.

5.1. Основные понятия, применяемые при измерении ядерных материалов

До начала 1990-х годов на российских предприятиях измерения ЯМ в первую очередь преследовали цели управления технологическими процессами. Неразрушающие анализы (кроме взвешивания) играли второстепенную роль.

В 1990-е годы стали предприниматься всесторонние меры по ускоренному внедрению НРА в российскую систему УИК ЯМ, включая оснащение предприятий и организаций современной аппаратурой, разработку и аттестацию ГСО для НРА, создание соответствующих нормативных документов, подготовку кадров с использованием различных форм обучения. Важное значение в проведении указанных мер имело и имеет международное сотрудничество.

Требования к государственному учету и контролю ядерных материалов при их производстве, использовании, переработке, хранении и транспортировке установлены в России основными правилами учета и контроля ядерных материалов НП-030-05 (ОПУК-2005).

Самыми распространенными оружейными ЯМ являются уран и плутоний. Оружейный уран (Weapon Grade Uranium – WGU) содержит 93% или более ^{235}U .

Оружейный плутоний (Weapon Grade Plutonium – WGPu) представляет собой чистый металлический плутоний, который содержит не более 7% изотопа ^{240}Pu .

Реакторный плутоний (Reactor Grade Pu – RGPu) накапливается в топливе энергетических реакторов и содержит 19% или более изотопа ^{240}Pu , примерные изотопные композиции плутония в отработавшем топливе разных реакторов представлены в табл. 5.1.

Таблица 5.1

Изотопный состав плутония, накапливаемого в топливе энергетических реакторов

Тип реактора	Выгорание топлива, (ГВт·сут/т)	Изотопная композиция, %			
		^{239}Pu	^{240}Pu	^{241}Pu	^{242}Pu
AGR	18,0	53,7	30,8	9,9	5,0
RBMK	20,0	50,2	33,7	10,2	5,4
BWR	27,5	59,8	23,7	10,6	3,3
PWR	33,0	56,0	24,1	12,8	5,4

Как известно, изотопный состав ЯМ определяет его свойства. От него зависят:

- критическая масса;
- генерация нейтронов спонтанного деления, которые влияют на конструкцию и мощность взрывного устройства. Для плутония их число прямо зависит от концентрации ^{240}Pu и ^{242}Pu ;
- генерация тепла (для плутония прямо зависит от концентрации ^{238}Pu);
- радиоактивное излучение.

Химическая форма ЯМ может оказывать значительное влияние на методы и результаты их измерений. В зависимости от степени окисления изменяется массовая доля ядерного материала в образце, что нужно учитывать при анализе результата взвешивания.

Ядерные материалы разделяются на категории. Категория ядерного материала – количественная характеристика значимости ядерного материала с точки зрения учета и контроля ядерных материалов. От категории расположенных на объекте ЯМ зависят требования к точности контрольных измерений при подведении баланса ЯМ – относительные стандартные отклонения в процентах от инвентарных количеств (табл. 5.2).

Погрешности результатов при контрольных измерениях ЯМ имеют принципиальное значение. Например, при определении массы десятикилограммового плутониевого образца с погрешностью 0,5% в доверительном интервале 68% (1,5% в доверительном интервале 99%) потеря или хищение менее 150 г плутония не может быть обнаружено.

Таблица 5.2

Требования к точности измерений ЯМ

№ п/п	Тип установки	Относительное стандартное отклонение, %
1	Обогащение урана	0,2
2	Химические превращения: конверсия урана и изготовление топлива	0,3
3	Конверсия плутония и изготовление топлива	0,5
4	Химическая переработка урана	0,8
5	Химическая переработка плутония	1,0
6	Отдельное хранилище скрапа*	4,0
7	Отдельное хранилище отходов	25

* Скрап – отбракованный ЯМ, удаленный из технологического процесса и предназначенный для переработки.

Баланс ядерных материалов – итог сравнения зарегистрированного и имеющегося в наличии количества ядерных материалов в зоне баланса материалов (ЗБМ).

Количество ядерных материалов, находящихся в каждой ЗБМ, должно определяться путем измерения количества и состава ядерных материалов, контролироваться путем учета и контрольных проверок ядерных материалов и проверяться путем проведения физической инвентаризации. Физическая инвентаризация должна завершаться подведением баланса для каждого ядерного материала за период времени между предыдущей и данной физической инвентаризацией, определением инвентарной разницы и ее погрешности.

Физические инвентаризации для каждой ЗБМ выполняются периодически, а межбалансовые периоды (МБП) устанавливаются в

зависимости от категории ядерных материалов в ЗБМ, технологических и других особенностей предприятий.

Аномалией в учете и контроле ядерных материалов называют недостатку (излишек) ядерных материалов, ошибки в учетных и отчетных документах, повреждения, отказы средств контроля доступа к ядерным материалам, нарушения порядка производства, использования, передачи ядерных материалов.

Для каждой ЗБМ должна быть разработана программа измерений, включающая в себя перечень методик выполнения измерений, технических средств, процедур пробоотбора, сведения о периодичности проведения измерений, требуемой точности измерений, сроках и форме представления результатов измерений.

Методики выполнения измерений должны быть метрологически аттестованы в соответствии с требованиями действующих государственных или отраслевых стандартов.

Стандартные образцы (эталоны) для градуировки приборов и проверки правильности результатов измерений должны быть метрологически аттестованы в соответствии с требованиями действующих государственных или отраслевых стандартов и иметь свидетельство об аттестации.

На каждом предприятии должна быть разработана и внедрена программа контроля качества измерений в рамках системы измерений ядерных материалов. Целью программы является обеспечение качества измерений.

При выборе метода контроля исходят из свойств материала и условий измерений: физического состояния, чистоты, требуемой точности определения, расхода времени на отдельный анализ, числа анализов (один в месяц, сто в неделю), объема анализируемого образца, имеющегося оборудования и эталонов, квалификации персонала, бюджета.

Отметим, что контрольные измерения ЯМ – не прямые: массу материала или его изотопный состав определяют по результатам измерений скорости счета электрических импульсов, изменению силы тока, деформации пружины и т.д. Измеренный эффект (N) и искомая величина (F) связаны с помощью коэффициента k , который получают с помощью калибровки, проводя измерения эталонов (образцов ЯМ с хорошо известными характеристиками $F_{\text{эт}}$) на кон-

трольной измерительной установке: $k = F_{\text{эт}} / N_{\text{эт}}$, где $N_{\text{эт}}$ – измеренный эффект для эталона.

Погрешность определения массы ЯМ зависит от погрешности результата контрольного измерения и неопределенности калибровочного коэффициента k , причем во многих случаях вторая составляющая доминирует. В свою очередь, результат контрольного измерения обычно требует коррекции для учета ряда влияющих факторов, обусловленных особенностями образца ЯМ, искажениями информации в электронном измерительном тракте и др.

Уравнение баланса ЯМ имеет следующий вид: $ID = BI + R - S - EI$, где ID – инвентарная разница; BI – начальное инвентарное количество; R – ЯМ, поступившие на склад за период между инвентаризациями; S – ЯМ, вывезенные за тот же период; EI – конечное инвентарное количество. $EI = k \cdot N$, где N – число отсчетов; k – калибровочный коэффициент, связывающий определяемую величину с результатом измерений.

Суждения о результате инвентаризации выносятся из сравнения ID и $3\Delta ID$.

На разных этапах ядерного топливного цикла (рис. 5.1) изменяются физические и химические формы ЯМ, происходят его потери. Различные физические и химические формы ЯМ требуют различных технологий измерений для учета материалов. Результаты измерений ЯМ, кроме контроля их наличия и сохранности, служат для управления технологическими процессами, а также для обеспечения норм ядерной и радиационной безопасности. При выборе методик и аппаратуры для измерений руководствуются целью комплексного решения всех перечисленных задач.

Таким образом, измерениям подлежат ЯМ, находящиеся в разных состояниях и формах, в разных сочетаниях с другими материалами, с разным уровнем радиоактивности. Соответственно, для выполнения этих задач применяются различные методы и аппаратура.

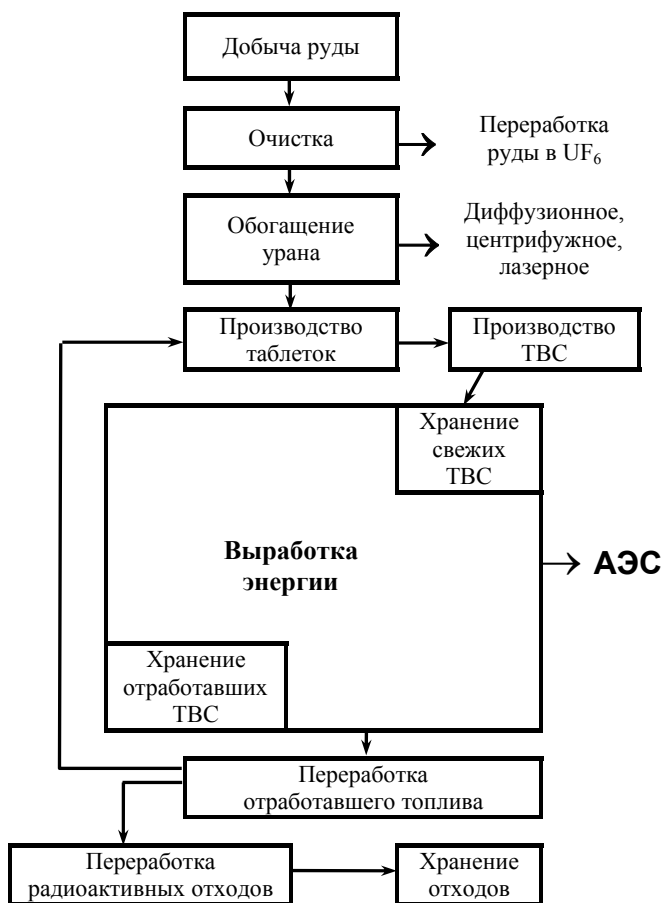


Рис. 5.1. Схема превращений ЯМ в топливном цикле

При надзоре за учетом и контролем ЯМ выполняют два вида измерений:

- **учетные измерения** – измерения количественных характеристик ЯМ и продуктов, результаты которых вносятся в учетные документы;
- **подтверждающие измерения** – измерения, результаты которых используются для подтверждения количественных характеристик или атрибутивных признаков ЯМ или учетных единиц.

Контрольные измерения обычно проводят с целью определения численного значения количества ЯМ. При этом стремятся обеспечить наивысшую точность результата. Однако существует ряд задач контроля, требующих лишь качественной информации об образцах. К их числу относятся:

- определение характеристик немаркированных или ошибочно маркированных образцов;
- установление присутствия ЯМ в образцах по принципу «да/нет»;
- проведение быстрой инвентаризации;
- подтверждение получателем данных поставщика и др.

5.2. Неразрушающие методы анализа ЯМ.

Калибровка, эталоны

Проверка ядерных материалов проводится путем подсчета учетных единиц, идентификации учетных единиц (баркоды), взвешивания, измерения объема, отбора образцов для химических анализов и с помощью неразрушающих анализов.

Неразрушающий анализ (НРА) – определение вида и/или количества ЯМ в образце без изменения характеристик образца или проникновения в него.

Методы неразрушающего анализа наиболее часто применяются в случаях:

- когда требуется провести быстрые контрольные исследования;
- контроля за протеканием технологических процессов;
- когда невозможно произвести представительную выборку (например, при контроле отходов производства, лома и др.);
- когда разрушающие исследования невыполнимы.

Разрушающие анализы непригодны в случаях:

- когда необходимо большое число измерений (например, при инвентаризации);
- когда информация нужна немедленно (например, при внеплановой инспекции);
- когда запрещен отбор образца контролируемого предмета (например, ядерный заряд);
- когда материал недоступен для отбора образца (например, отложения в трубопроводах);

- когда стоимость анализа слишком велика.

Методы НРА делятся на активные и пассивные.

Активный анализ включает облучение подлежащих контролю предметов внешним источником радиации (нейтронами, рентгеновским излучением, гамма-излучением) с целью вызвать вторичное излучение ЯМ. Испускаемые излучения (нейтроны, рентгеновские кванты) интерпретируются как «подписи» для определения количества и состава присутствующего делящегося материала.

Пассивный анализ основан на измерении самопроизвольного излучения (гамма, рентгеновского, нейтронного) материала, служащего его «подписью».

В настоящее время создан широкий набор приборов и методов для обнаружения, идентификации, анализа и проверки ЯМ, находящихся в разных физических и химических формах. Оборудование для НРА различается как по размерам, так и по сложности: от портативных приборов, используемых инспекторами для проверок ЯМ, до больших заводских систем, применяемых операторами в их повседневной работе.

НРА чаще всего проводят путем измерений гамма- и нейтронного излучения ЯМ. Для калибровки аппаратуры НРА и подтверждения результатов анализов применяют стандартные разрушающие методы (радиохимия, масс-спектрометрия). Материалы, участвующие в технологических процессах, анализируют в лабораториях НРА с помощью автоматизированной измерительной аппаратуры. Отложения в технологическом оборудовании оценивают с помощью переносных приборов.

Применение НРА дает важные преимущества:

- анализы, как правило, не требуют много времени;
- их стоимость невелика (без учета стоимости приборов);
- нет отходов, не требуются реактивы.

Недостатками НРА являются:

- относительно большие погрешности результатов (обычно 3–10% и даже больше) – выше, чем при разрушающих анализах;
- трудности получения подходящих эталонов (крупные эталоны из ЯМ либо дороги, либо их не существует).

Для обеспечения качества измерений при использовании НРА применяются следующие процедуры контроля измерений:

- калибровка аппаратуры – для того, чтобы гарантировать точность (избежать смещений результатов) и оценить стандартные от-

клонения результатов калибровки. Калибровки связывают результаты измерений с национальной (международной) системой единиц;

- частые проверки с использованием рабочих эталонов;
- независимые повторные измерения образцов для оценки случайных погрешностей анализа;
- периодический сравнительный анализ образцов с помощью принятых стандартных разрушающих методов;
- межлабораторный обмен образцами, который гарантирует, что данные измерений согласуются с данными других лабораторий.

Для калибровки приборов и методов, применяемых для НРА, требуются эталоны. Подготовка эталонов зависит от метода, который выбран для измерения. Качество любого результата анализа зависит от качества калибровки, которое определяется качеством эталонов.

С помощью калибровочных измерений с эталонами устанавливают зависимость между показанием контрольного прибора и массой ЯМ в образце. Эталоны используют также для проведения испытаний, проверки или нормировки показаний измерительных приборов и систем.

«Истинные» значения параметров эталонов обычно определяют с помощью разрушающих анализов (РА). Подготовка эталонов является дорогим и длительным процессом. Правильно понимая принципы, на которых основаны методы НРА, можно свести к минимуму число требуемых эталонов.

Некоторые эталоны трудно изготовить и хранить. Со временем свойства эталона могут измениться так, что он уже не будет относиться к категории контролируемого ЯМ. По этой причине требуется изготовить новый эталон вместо старого.

Существует две категории эталонов:

- аттестованные справочные материалы (CRM – Certified Reference Materials) – их изготавливают из высокочистых ЯМ. Эталоны CRM аттестовывают с использованием наиболее точных измерительных методов в нескольких лабораториях. Такие эталоны снабжают сертификатами;
- рабочие справочные материалы (WRM) – их характеристики не столь точны как CRM. Эталоны WRM обычно изготавливают для калибровки конкретных приборов НРА на том предприятии, где они требуются.

Эталоны CRM для конкретного применения на предприятии далеко не всегда имеются, поэтому в лаборатории или на заводе существует необходимость изготовления рабочих эталонов.

Российское регулирование проведения калибровок, сертификации методик, требований к стандартным образцам изложено в соответствующих документах: ГОСТ 8.315–97 «Стандартные образцы состава и свойств вещества и материалов», ГОСТ 8.563–96 «Методики выполнения измерений» и др.

Государственные российские стандартные образцы (ГСО) изотопного состава и массы плутония выпущены в 2000 г. (рис. 5.2). Количество ГСО в комплекте 10 штук. Изотопные составы в разных комплектах ^{238}Pu , ^{239}Pu , ^{240}Pu , ^{241}Pu , ^{242}Pu равны 1,82:60,47:22,20:10,59:4,84 и 0,12:97,20:2,27:0,061:0,10. Относительная погрешность определения массовой доли плутония в ГСО составляет $\pm 0,30\%$ при доверительной вероятности 95%. Масса плутония в разных ГСО от 1 г до 2,5 кг.

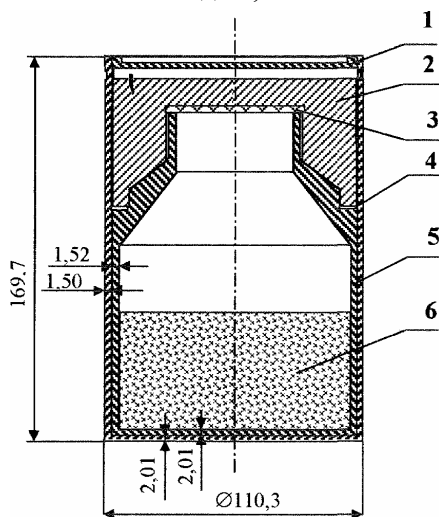


Рис. 5.2. Схема упаковки российского плутониевого ГСО с массой плутония 502,26 г: 1 – крышка стакана; 2 – крышка ампулы; 3 – прокладка; 4 – корпус стакана; 5 – корпус ампулы; 6 – PuO_2 плотностью $3,1 \text{ г/см}^3$

Математическое моделирование методом Монте-Карло дает возможность существенно уменьшить потребность в эталонах. Опре-

делив таким способом форму калибровочной кривой, можно ее отнормировать с помощью физических эталонов.

Еще одна возможность уменьшить необходимое число эталонов – перекрестная калибровка. Основная идея перекрестной калибровки заключается в проведении тщательной калибровки одного прибора из ряда аналогичных приборов с перекрытием широкого диапазона изменений контролируемого параметра (например, массы ЯМ в образцах). Полученные из калибровки характеристики этого «справочного» прибора фиксируют и используют для интерпретации результатов измерений с другими аналогичными приборами. При этом предполагают, что форма калибровочной кривой $K = f(m)$ отображает свойства всего ряда аналогичных приборов.

Используемое МАГАТЭ оборудование для НРА главным образом основано на измерениях γ -излучений и нейтронов, испускаемых разными ЯМ (табл. 5.3 и рис. 5.3).

Таблица 5.3

**Данные о наиболее интенсивных γ -излучениях ЯМ,
используемых для неразрушающих анализов**

Изотоп	Энергия, кэВ	Активность, $\gamma/\text{г}\cdot\text{с}$	Средний свободный пробег, мм	
			Высокие Z, ρ	Низкие Z, ρ
^{234}U	120,9	$9,35 \cdot 10^4$	0,23	69
^{235}U	143,8	$8,40 \cdot 10^3$	0,36	73
	185,7	$4,32 \cdot 10^4$	0,69	80
^{238}U	766,4	$2,57 \cdot 10^1$	10,0	139
	1001,1	$7,34 \cdot 10^1$	13,3	159
^{238}Pu	152,7	$5,90 \cdot 10^6$	0,40	75
	766,4	$1,387 \cdot 10^5$	9,5	139
^{239}Pu	129,3	$1,436 \cdot 10^5$	0,27	71
	413,7	$3,416 \cdot 10^4$	3,7	106
^{240}Pu	45,2	$3,80 \cdot 10^6$	0,07	25
	160,3	$3,37 \cdot 10^4$	0,45	76
	642,5	$1,044 \cdot 10^3$	7,4	127
^{241}Pu	148,6	$7,15 \cdot 10^6$	0,37	74
	208,0	$2,041 \cdot 10^7$	0,86	83
^{241}Am	59,5	$4,54 \cdot 10^{10}$	0,14	38
	125,3	$5,16 \cdot 10^6$	0,26	70

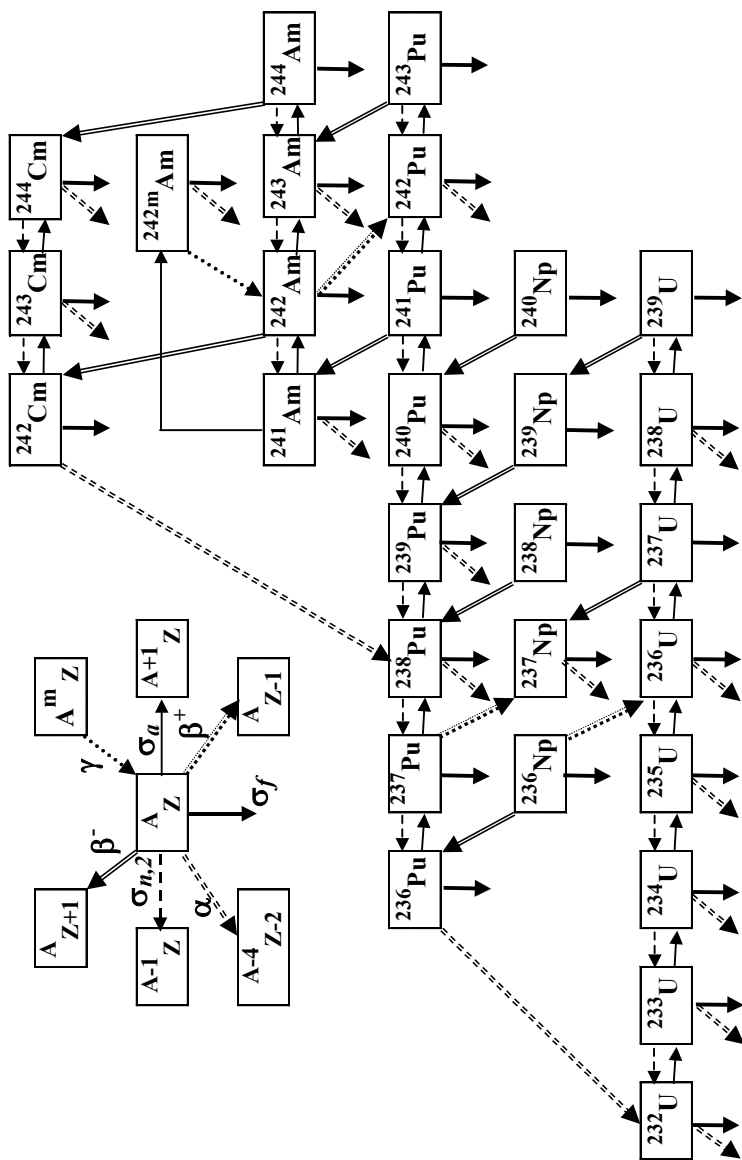


Рис. 5.3. Изотопные превращения в уран-плутониевом цикле

Гамма-измерения обладают рядом преимуществ:

- они осуществляются малочисленным персоналом;
- во многих случаях для расшифровки результата анализа не требуется калибровка;
- результат получают сразу после окончания измерения;
- погрешности результатов относительно малы.

Гамма-спектрометрия служит для определения обогащения урана, изотопного состава плутония, а также для денситометрии растворов нитрата плутония на К-крае поглощения, проверки глубины выгорания отработавших ТВС легководных реакторов и др.

Неразрушающий γ -анализ состоит из следующих этапов:

- измерение скорости счета импульсов в пиках полного поглощения γ -квантов в детекторе;
- внесение поправок на искажения в электронном тракте;
- внесение поправки на поглощение γ -квантов в образце и по пути в детектор;
- расчет скорректированной скорости счета.

Если требуется, с помощью калибровки определяется коэффициент пропорциональности между результатом измерений и определяемой величиной ЯМ.

Определение содержания ЯМ путем измерения их собственных гамма-излучений

Факторы, влияющие на результаты неразрушающих измерений

Обычно растворы ЯМ однородны, и, используя подходящий сосуд, можно просто получить образец для измерений. Содержание ЯМ в образце определяют по интенсивности его излучения из образца. Однако часть гамма-излучения поглощается внутри образца на пути в детектор. Поправочный коэффициент $CF(AT)$, учитывающий **самопоглощение излучения ЯМ внутри образца**, можно определить с помощью внешнего источника, испускающего гамма-лучи с энергией, близкой к энергии излучения ЯМ. Для этого измеряют пропускание T пучка гамма-лучей внешнего источника через образец:

$$T = \frac{N}{N_0} = \exp(-\mu_l \cdot x), \quad (5.1)$$

где N_0 – число гамма-квантов, испускаемых внешним источником, попавших на образец; N – число гамма-квантов, испускаемых внешним источником, прошедших через образец; μ_l – линейный коэффициент ослабления гамма-лучей; x – толщина образца. При условии плоской геометрии поправку вычисляют по формуле:

$$CF(AT) = \frac{\mu_l \cdot x}{[1 - \exp(-\mu_l \cdot x)]} = \frac{-\ln(T)}{(1 - T)}. \quad (5.2)$$

Для коррекции **просчетов**, обусловленных мертвым временем измерительной системы, используют дополнительный источник, прикрепленный вблизи детектора. Применение радиоактивного источника упрощает схему коррекции и повышает ее надежность по сравнению с аппаратурным способом коррекции, основанным на использовании генератора импульсов. Наблюдения за скоростью счета импульсов в пике, создаваемом этим источником, дают информацию о потерях счета при измерениях с образцами. Выбирают такой источник, чтобы его пик не мешал измерениям излучения ЯМ из образцов.

Для контроля растворов урана применяют метод пассивных измерений гамма-лучей с энергией 185,7 кэВ ^{235}U с коррекцией результатов по результатам измерений пропускания излучения с энергией 136,0 кэВ источника ^{75}Se и коррекцией просчетов с использованием источника ^{109}Cd (энергия излучения 88 кэВ).

Диапазон измеряемых концентраций охватывает семь порядков величин. Размеры образцов меньше, чем при использовании других методов.

Контроль отходов. Сегментированное гамма-сканирование

Этот метод применяют для контроля контейнеров и резервуаров с твердыми и жидкими отходами, содержащими ЯМ. Условия измерений при этом достаточно сложны: ЯМ присутствуют в малых концентрациях и неравномерно распределены по высоте и по радиусу контейнера. Объемы же контролируемых образцов сильно различаются: от маленьких ампул до 200-литровых металлических бочек. Плотность матрицы относительно низкая.

Отходы с ЯМ на предприятиях располагаются в контейнерах слоями, и их неоднородность по горизонтали меньше, чем неоднородность по вертикали. Влияние горизонтальной неоднородности может быть ослаблено путем вращения образца во время анализа, влияние вертикальной неоднородности – путем анализа материала по сегментам. Каждый сегмент измеряют индивидуально, и все полученные значения суммируют. Основное допущение состоит в том, что ЯМ равномерно распределены внутри каждого сегмента и что ослабление гамма-излучений внутри сегмента может быть определено из измерений пропускания.

Сегментированное сканирующее устройство (ССУ) сочетает передвижение контейнера с измерением излучения. Возможно, ССУ является самым распространенным прибором для неразрушающих измерений, основанным на измерении γ -излучения.

Анализируемые излучения

При контроле содержания урана проводится измерение γ -излучения с энергией 185,7 кэВ.

При контроле ^{239}Pu обычно измеряют γ -излучение с энергией 413,7 кэВ.

Полученные результаты, искаженные из-за поглощения γ -лучей в контейнере, корректируются с помощью поправочных коэффициентов, получаемых из измерений пропускания через контейнер γ -излучений источника ^{75}Se с энергиями 136,0 кэВ, 264,6 кэВ, 279,5 кэВ и 400,6 кэВ. Для получения поправки к результату измерений излучения 185,7 кэВ ^{235}U производят интерполяцию между значениями пропускания для гамма-линий с энергиями 136,0 кэВ и 264,6 кэВ, а поправку к измерениям излучения 413,7 кэВ ^{239}Pu определяют с помощью экстраполяции.

Еще один источник ^{109}Cd ($E_\gamma = 88,0$ кэВ) служит для коррекции просчетов импульсов.

Проведение измерений и обработка результатов

Чтобы получить результат, характеризующий среднее содержание ЯМ в контейнере, производят его вращение и вертикальное перемещение. При сканировании вертикальных сегментов контейнер постепенно поднимается, что позволяет усреднить разницу в ос-

лаблениях излучений из отдельных горизонтальных сегментов. Схема установки представлена на рис. 5.4.

Скорость счета импульсов в пике полного поглощения n_p получают из измерений, используя формулу:

$$n_p = (n'_p - R_B) \cdot \frac{R_{ref}}{R_{RL}}, \quad (5.3)$$

где n'_p – измеренная скорость счета в интервале, содержащем нужный пик; (R_{ref}/R_{RL}) – поправка на просчеты, полученная из измерений с ^{109}Cd без образца и с образцом; R_B – скорость счета фона под пиком.

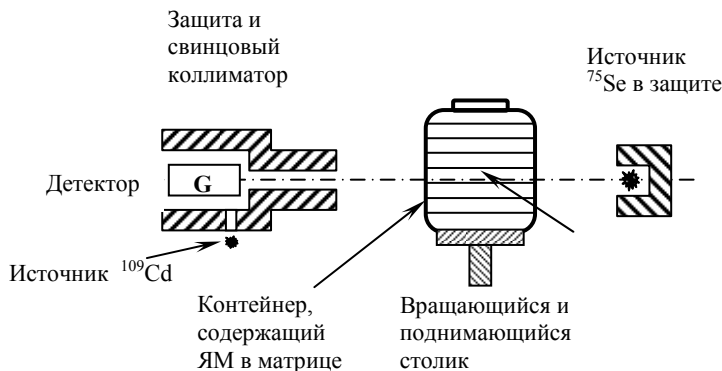


Рис. 5.4. Схема установки для сегментированного сканирования

Измеренная и откорректированная скорость счета импульсов в гамма-пике n_p связана с массой определяемого изотопа калибровочным коэффициентом, который определяют с помощью эталона. Вклад калибровочного коэффициента в систематическую и случайную погрешности измерения должен быть относительно мал.

Несколько факторов могут влиять на результаты измерений с эталоном: однородность его материала, величина пропускания (должна быть больше 10%), размер частиц ЯМ и др.

Метод сегментированного сканирования применим для многих материалов низкой плотности, содержащих ЯМ: бумаги, песка, пластика, золы, жидкостей.

Контроль отложений

Отложением называют ЯМ, остающийся внутри технологического оборудования, который нельзя извлечь путем обычной промывки. Он осаждается в резервуарах, накапливается в технологических трубах, в вентиляционных системах. Величина отложений может составлять от 0,1 до 0,2% полной производительности установки даже после тщательной зачистки оборудования. На первом этапе эксплуатации новой установки доля отложений может составлять от 1 до 10 % от произведенного продукта.

Большинство измерений отложений урана и плутония основано на регистрации пика 185,7 кэВ ^{235}U и совокупности пиков ^{239}Pu с энергиями 375 кэВ и 414 кэВ. Для измерений этих гамма-квантов чаще всего применяют портативные сцинтилляционные NaI-детекторы. При измерениях их окружают свинцовым экраном с коллимационным отверстием, пропускающим излучение только с определенного направления.

План работ по измерению массы отложений состоит из следующих этапов.

1. Анализ возможных мест отложений в оборудовании.
2. Быстрое обследование с использованием коллимированных приборов для определения зон, в которых отложено наибольшее количество ЯМ.
3. Градуировка детекторов с использованием стандартных образцов. Каждый детектор градуируется для зоны отложений в виде точки, линии или плоскости.
4. Выбор модели для отложения в каждом узле оборудования. Отложения характеризуются как точка, линия или плоскость, и с ним проводятся количественные измерения.
5. Количественные измерения. Большая часть времени отводится на зоны, где находится основная масса ЯМ.
6. Для оценки неопределенности результата измерения проводят измерения отложений с разных направлений и с разного расстояния, используя различные модели для описания геометрии. Оцени-

вают и вводят поправки на ослабление излучения из-за самопоглощения в отложении и поглощения на пути в детектор.

Процедура градуировки

Градуировку для точки, линии или плоскости можно провести с помощью одного перемещаемого точечного источника из 1–5 г ^{235}U или ^{239}Pu . Следует помнить, что самопоглощение гамма-квантов в уране или плутонии может быть очень большим.

Если стандартный точечный источник содержит m_0 граммов ЯМ, то масса точечного отложения m (г) определяется по формуле:

$$m = m_0 \cdot \frac{C}{C_0} \cdot \frac{r^2}{r_0^2}, \quad (5.4)$$

где C – скорость счета при измерении отложения, r – расстояние между детектором и отложением.

В случае линейного распределения отложения масса ЯМ на единицу длины отложения m_L (г/м) определяется из выражения:

$$m_L = \frac{m_0}{L_{\Sigma}} \cdot \frac{C}{C_0} \cdot \frac{r}{r_0}. \quad (5.5)$$

Если выбрана плоская модель распределения отложения, массу ЯМ на единицу площади зоны отложения m_A (г/м²) находят по формуле:

$$m_A = \frac{m_0}{A_{\Sigma}} \cdot \frac{C}{C_0}. \quad (5.6)$$

Гамма-спектрометрические измерения обогащения урана

Существуют два определения обогащения урана изотопом ^{235}U :

- обогащение (массовые проценты) $E_1 = (\text{масса } ^{235}\text{U} / \text{общая масса U}) \cdot 100\%$;

• обогащение (атомные проценты) $E_2 = (\text{число атомов } ^{235}\text{U} / \text{общее число атомов U}) \cdot 100\%$.

Анализы обогащения урана, основанные на предположении, что интенсивность гамма-излучения ^{235}U из образцов урана достаточной толщины пропорциональна их обогащению ^{235}U , получили широкое распространение. Гамма-кванты с энергией 185,7 кэВ при распадах ^{235}U испускается с вероятностью $(57,5 \pm 0,9)\%$ (квантовый выход излучения*, число квантов указанного излучения достигает $4,6 \cdot 10^4$ квант/(с·г)).

Длины свободного пробега и «бесконечные» толщины для квантов 185,7 кэВ в соединениях урана приведены в табл. 5.4.

Таблица 5.4

Длины свободного пробега и «бесконечные» толщины для гамма-излучения с энергией 185,7 кэВ в соединениях урана

№ п/п	Соединение	Плотность, г/см ³	Длина свободного пробега, см	Бесконечная толщина, см
1	Металл	18,7	0,04	0,26
2	UF ₆ (тверд.)	4,7	0,20	1,43
3	UO ₂ (спечен.)	10,9	0,07	0,49
4	UO ₂ (порошок)	2,0	0,39	2,75
5	Нитрат уранила	2,8	0,43	3,04

Описание метода

Детектор (рис. 5.5) регистрирует излучение, прошедшее через фильтр и коллиматор. С помощью коллиматора устанавливается площадь видимой детектором поверхности. Фильтр поглощает излучение в области энергий ниже 185,7 кэВ, что позволяет разгрузить измерительный тракт, повысить долю сигналов 185,7 кэВ в полном потоке сигналов через тракт. Фильтры изготавливаются из материалов среднего веса (Cd, Ni и др.).

Скорость счета импульсов в фотопике $n_p = S_\phi / t$, где S_ϕ – счет импульсов в фотопике, t – время измерения, определяется следующим выражением:

* В иностранной литературе часто используется термин «коэффициент ветвления».

$$n_p = (\Omega_d / 4\pi) \varepsilon \lambda_{235} (N_A / A_U) \rho_U E I \theta \exp(-\mu_\phi \rho_\phi d_\phi) \times \int_0^D \exp(-\mu_\kappa \rho_\kappa d_\kappa) \exp(-\mu_\ell x) dx, \quad (5.7)$$

где Ω_d – телесный угол, ограниченный отверстием коллиматора; ε – эффективность детектора при $E\gamma=185,7$ кэВ; N_A – число Авогадро; A_U – атомная масса урана в образце; ρ_U – плотность урана в образце; E – обогатение; I – квантовый выход (коэффициент ветвления) излучения 185,7 кэВ; θ – площадь отверстия коллиматора; μ_ϕ , ρ_ϕ , d_ϕ – массовый коэффициент ослабления, плотность и толщина фильтра; μ_κ , ρ_κ , d_κ – массовый коэффициент ослабления, плотность и толщина стенки контейнера; μ_ℓ – коэффициент ослабления гамма-излучения в образце урана; λ_{235} – постоянная распада ^{235}U .

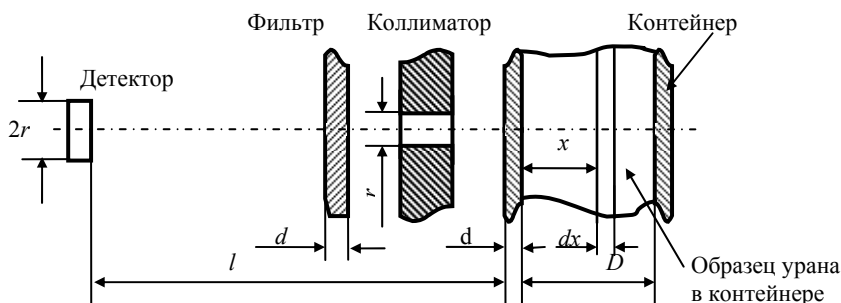


Рис. 5.5. Схема геометрии измерения обогатения урана по гамма-излучению образца

После вычисления интеграла и преобразований (и более подробного представления состава образца) формула (5.7) приводится к следующему виду:

$$n_p = K \cdot \frac{E \cdot T_K \cdot T_\phi \cdot (1 - T_{\text{обр}})}{[1 + (\mu_M / \mu_U) \cdot (\rho_M / \rho_U)]}, \quad (5.8)$$

где $K = [(\Omega_d / 4\pi) \cdot \varepsilon \cdot \lambda_{235} \cdot I \cdot A_U \cdot T_\phi]$; $T_{обр}$ – коэффициент пропускания для исследуемого образца; T_K – коэффициент пропускания для стенки контейнера; T_ϕ – коэффициент пропускания фильтра; μ_U , ρ_U – массовый коэффициент ослабления и плотность урана; μ_M , ρ_M – массовый коэффициент ослабления и плотность матрицы.

Член $[1 + (\mu_M / \mu_U) \cdot (\rho_M / \rho_U)]$ учитывает разбавление урана в образце другими материалами (кислород, фтор, плутоний и др.). Он зависит от состава измеряемого материала.

K определяют с помощью физического эталона, и его значение становится калибровочным коэффициентом. Таким образом, искомое значение обогащения получают по формуле:

$$E = \frac{n_p \cdot [1 + (\mu_M / \mu_U) \cdot (\rho_M / \rho_U)]}{K \cdot T_K \cdot T_\phi \cdot (1 - T_{обр})}. \quad (5.9)$$

Теперь сравним измерения с NaI- и Ge-спектрометрами. Часть спектра, полученного на NaI-спектрометре, в области пика 185,7 кэВ ^{235}U показана на рис. 5.6.

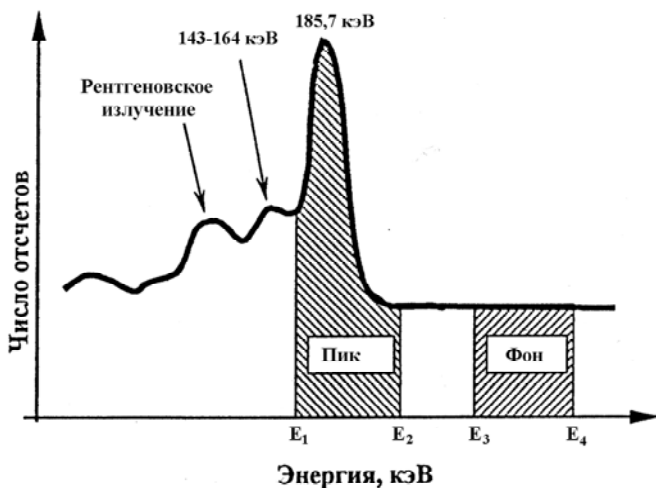


Рис. 5.6. Спектр гамма-излучения, измеренный на NaI-детекторе

Счет импульсов в фотопике $S_{\phi} = p - f \cdot b$, где p – суммарный счет импульсов в заданном диапазоне энергий $E_1 - E_2$, включающем фотопик 185,7 кэВ; b – суммарный счет импульсов фона в диапазоне выше пика (см. рис. 5.6); f – коэффициент пересчета между измеренным фоном и фоном в области пика. Фон оценивается путем экстраполяции по числам отсчетов в каналах выше пика.

При анализах бесконечно толстых образцов $E = n_p / K = A \cdot p + B \cdot b$, где A и B ($B = -f \cdot A$) – калибровочные коэффициенты, определенные из измерений с эталоном.

При измерениях на полупроводниковых Ge-детекторах нет проблем с вычитанием фона. Пики примерно в 20 раз уже, чем при измерениях на NaI-детекторах, соответственно выше отношение пик/фон.

Измерения относительной интенсивности гамма-излучений ^{235}U и ^{238}U

Главный недостаток метода измерения обогащения урана, основанный на регистрации излучения 185,7 кэВ, – необходимость калибровки измерительной системы для каждого нового контейнера с образцом урана. Этого недостатка лишен метод измерения обогащения по относительной интенсивности гамма-излучений ^{235}U и ^{238}U .

Существует три диапазона энергии в спектре гамма-излучения, которые можно использовать для подобных измерений: 53–68 кэВ, 84–130 кэВ и 185–1001 кэВ.

Область 84–130 кэВ включает ряд γ - и ХК-линий изотопов урана. Излучения ^{235}U и ^{238}U в этой области очень близки по энергии, и поэтому регистрируются с почти одинаковой эффективностью.

Соотношение между концентрациями изотопов в образце получают по формуле:

$$N_i / N_k = n_p^i / n_p^k \cdot T_{1/2}^i / T_{1/2}^k \cdot I_{\gamma}^k / I_{\gamma}^i \cdot \varepsilon_{\gamma}^k / \varepsilon_{\gamma}^i, \quad (5.10)$$

где N_i , N_k – число атомов i -го и k -го изотопов в образце соответственно; $T_{1/2}^i$, $T_{1/2}^k$ – период полураспада i -го и k -го изотопов соответственно; ε_{γ}^i , ε_{γ}^k – эффективности регистрации излучений в анали-

зируемых пиках i -го и k -го изотопов соответственно, которые в данном случае включают эффективность детектора, геометрию измерений, самопоглощение излучений в образце и их ослабление в материалах между образцом и детектором; I_{γ}^i , I_{γ}^k – квантовые выходы излучений, регистрируемых в анализируемых пиках i -го и k -го изотопов соответственно.

Скорость счета n_p^i и концентрация i -го изотопа соотносятся следующим образом:

$$\frac{n_p^i}{I_{\gamma}^i} = \left(\frac{N^i \cdot \ln 2}{T_{1/2}^i} \right) \cdot \varepsilon_{\gamma}^i. \quad (5.11)$$

Член в скобках имеет одинаковое значение для всех гамма-излучений, испускаемых одним изотопом. Поэтому отношение (n_p^i / I_{γ}^i) пропорционально эффективности ε_{γ}^i .

Процедура измерений относительной эффективности включает:

- определение скоростей счета n_p^i в ряде пиков, принадлежащих одному изотопу, и вычисление значений n_p^i / I_{γ}^i , характеризующих эффективность ε_{γ}^i . Величины I_{γ}^i известны для каждой группы квантов, образующих эти пики S_i ;

- полученные значения ε_{γ}^i для ряда пиков используют для построения зависимости ε_{γ} от E_{γ} .

Основная трудность работы в диапазоне 84–130 кэВ – близость измеряемых излучений по энергиям – преодолевается путем применения Ge-детекторов с высоким разрешением и специальной программы разложения спектра MGAU (рис. 5.7).

Для определения относительного содержания ^{235}U используют рентгеновские пики 89,95 кэВ (Th $\text{XK}_{\alpha 2}$) и 93,35 кэВ (Th $\text{XK}_{\alpha 1}$), а для ^{238}U – дуплет перекрывающихся гамма-пиков 92,37 кэВ и 92,79 кэВ (^{234}Th).

Содержание ^{234}U определяется по гамма-линии 121 кэВ. Погрешность определения обогащения составляет не более нескольких процентов для образцов урана от обедненного до высокообогащенного (от 0,3% до 93% ^{235}U).

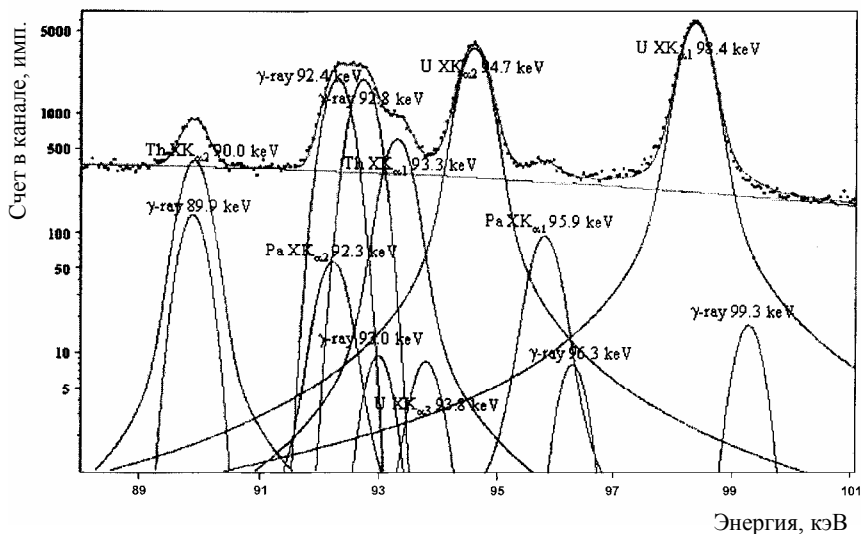


Рис. 5.7. Спектр излучения урана в энергетическом диапазоне 88–100 кэВ и результат его математического разложения на отдельные компоненты

Ограничения: гамма-дуплет 92,37 кэВ и 92,79 кэВ, используемый для определения относительного содержания ^{238}U , принадлежит ^{234}Th – продукту α -распада ^{238}U . Поэтому дочерний ^{234}Th в образце должен быть в равновесии с материнским ^{238}U , которое наступает лишь приблизительно через 5 месяцев после химического выделения урана. Толщина стенок контейнера влияет на точность анализа: 16 мм стенка стального контейнера с UF_6 ослабляет излучение 90–100 кэВ приблизительно в 250 раз.

Неразрушающие измерения изотопного состава плутония с помощью гамма-спектрометрии

Большинство образцов Pu содержат ^{238}Pu , ^{239}Pu , ^{240}Pu , ^{241}Pu и ^{242}Pu . Кроме того, в них всегда присутствуют ^{241}Am и ^{237}U – продукты распада ^{241}Pu . Данные о распадах перечисленных изотопов представлены в табл. 5.5.

Таблица 5.5

Данные о распадах некоторых изотопов

Изотоп	$T_{1/2}$, лет	Активность, расп/с·г
^{238}Pu	$87,74 \pm 0,04$	$6,33 \cdot 10^{11}$
^{239}Pu	24119 ± 26	$2,2942 \cdot 10^9$
^{240}Pu	6564 ± 11	$8,3971 \cdot 10^9$
^{241}Pu	$14,348 \pm 0,022$	$3,8244 \cdot 10^{12}$
^{242}Pu	376300 ± 900	$1,4522 \cdot 10^8$
^{241}Am	$433,6 \pm 1,4$	$1,2655 \cdot 10^{11}$
^{237}U	6,75 сут	$9,4080 \cdot 10^7*$

* При условии равновесия с ^{241}Pu .

При гамма-измерениях определяют изотопные отношения: f_{238}/f_{239} , f_{240}/f_{239} , f_{241}/f_{239} , f_{242}/f_{239} , причем сумма $f_{238} + f_{239} + f_{240} + f_{241} + f_{242} = 1$, где f_i – доля i -го изотопа плутония. Возможные композиции изотопов Pu представлены в табл. 5.6.

Таблица 5.6

Возможные изотопные составы плутония

Изотоп	^{238}Pu	^{239}Pu	^{240}Pu	^{241}Pu	^{242}Pu
Низкое выгорание, %	0,01	94	5,5	0,5	0,03
Высокое выгорание, %	2	57	25	11	5

Если измерить интенсивности гамма-излучений присутствующих в образце изотопов, то можно с помощью самокалибровки определить относительные эффективности их регистрации. Метод самокалибровки основан на использовании ряда пиков одного изотопа, присутствующего в анализируемом образце, и информации о квантовых выходах.

Масса образца может составлять от менее 100 мг* до пределов, накладываемых ядерной безопасностью. Матрица – любая (твердая, жидкая, порошок, неоднородная). Геометрия – без ограничений. Возраст с момента химического выделения Pu – любой. Для измерений применимы как планарный, так и коаксиальный Ge-детекторы.

Существуют разные диапазоны энергий гамма-лучей, содержащие излучения изотопов плутония. Во всех диапазонах полезная информация содержится в близких по энергии пиках разных изотопов. При измерениях в высокоэнергетических диапазонах можно измерять Pu, находящийся внутри толстостенных контейнеров, без извлечения образца наружу. В результате повышается безопасность работы операторов и появляется возможность инспекций опломбированных контейнеров, используемых для длительного хранения ЯМ.

При измерениях образцов с большой массой можно использовать излучения с энергиями 642,5 кэВ ^{240}Pu , 646,0 кэВ ^{239}Pu и 766,4 кэВ ^{238}Pu , которые обладают большой проникающей способностью и приходят в детектор со всей толщины образца.

Измерения образцов в тонкостенных контейнерах проводят в низкоэнергетических диапазонах с помощью планарных Ge-детекторов. Коаксиальные детекторы используют как в случае тонкостенных, так и толстостенных контейнеров.

Часто применяют планарные детекторы площадью 200–500 мм² и толщиной 10–13 мм. Такие размеры являются компромиссом, позволяющим получать хорошее разрешение и приемлемую эффективность.

Применение планарных детекторов ограничено областью ≤ 400 кэВ. Для измерений в области более высоких энергий требуется коаксиальный детектор с разрешением $\leq 1,7$ кэВ для пика калибровочного источника ^{60}Co с энергией 1332 кэВ.

Контрольные измерения плутониевых образцов проводят с помощью программ MGA и FRAM.

MGA (многогрупповой анализ) – программа для определения изотопного состава Pu по результатам гамма-спектрометрических измерений в диапазоне энергий 99–104 кэВ. Используются все интенсивные гамма-пики и рентгеновские пики в этом диапазоне. Не

* Минимальное подотчетное количество.

требуется ввода данных (они поступают с аналого-цифрового преобразователя – АЦП) и калибровки эффективности.

Основные ограничения программы:

- существует проблема определения ^{242}Pu , который не поддается прямому измерению из-за очень малой интенсивности его гамма-излучения. Полный анализ состава плутония требует либо применения разрушающего анализа (масс-спектрометрического метода), либо оценки содержания ^{242}Pu методом изотопных корреляций;

- она неприменима при сильном фоне осколков деления и для измерений образцов в толстостенных контейнерах.

Для применения программы FRAM требуется спектр гамма-излучения образца, измеренный на аппаратуре с высоким энергетическим разрешением, и набор параметров, которые будут использоваться при анализе. Параметры управляют поиском пиков, задают диапазоны анализа и изотопы, подлежащие определению.

Применение программы FRAM характеризуется следующими особенностями:

- легкой приспособляемостью к условиям различных измерений без необходимости перепрограммирования;

- возможностью для пользователя редактировать параметры анализа;

- возможностью проводить анализы самых разных образцов при содержаниях 2–38 % ^{240}Pu , 0,01–50% ^{241}Am , образцов в толстостенных контейнерах.

В табл. 5.7 приведены сведения о точности неразрушающих измерений изотопного состава плутония.

Таблица 5.7

Точность неразрушающих измерений изотопного состава плутония, %

Диапазон $E\gamma$, кэВ	$T_{\text{изм}}$	^{238}Pu	^{239}Pu	^{240}Pu	^{241}Pu
40–60	10–300 мин	0,3–5,0	0,05–0,5	0,2–1,0	0,2–1,0
90–105	30–60 мин	0,3–5,0	0,05–0,5	0,2–1,0	0,2–0,8
>120	1–4 ч	1–10	0,1–0,5	1–5	0,3–0,8

FRAM также можно использовать для исследований урановых образцов, в частности для контроля обогащения изделий из урана, находящихся внутри контейнера. Дело в том, что широко распро-

страненные анализы с помощью программы MGAU основаны на измерениях мягкого излучения и не подходят для контроля защищенных образцов. Применение же FRAM дает возможность использовать для анализов более жесткие излучения, измеряя их спектр с помощью коаксиального HPGe-детектора. На рис. 5.8 представлены спектры излучения образцов урана с разным обогащением, полученные с помощью коаксиального HPGe-детектора.

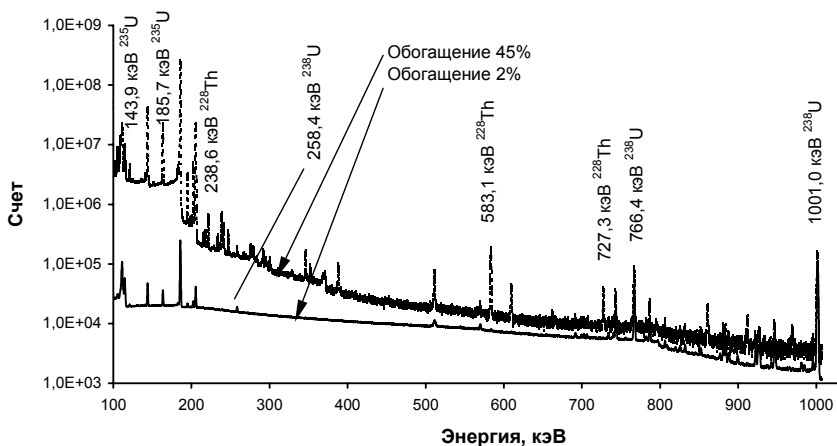


Рис. 5.8. Спектры излучения образцов урана

Роль эталонов при гамма-спектрометрических измерениях изотопного состава Pu (и U) существенно отличается от их роли в других методах неразрушающего контроля. При гамма-спектрометрии искомые значения получают, используя известные физические константы и результаты самокалибровки. Эталоны используют лишь для контроля качества измерений.

Анализы растворов ЯМ. Денситометрия

Денситометрия на К-крае или L-крае поглощения (ККД или ЛКД) основана на измерении пропускания через образец раствора ЯМ сильно коллимированного пучка фотонов или гамма-квантов от внешнего источника. Метод практически нечувствителен к излучению, испускаемому самим образцом (например, допустимо высокое содержание в растворе продуктов деления). Коллиматор ограничивает наблюдение только малой частью образца. По этой причине

состав образца должен быть строго однороден во всем его объеме. Денситометр на К- или L-крае поглощения – прибор для неразрушающего анализа концентраций ЯМ в растворах (рис. 5.9).

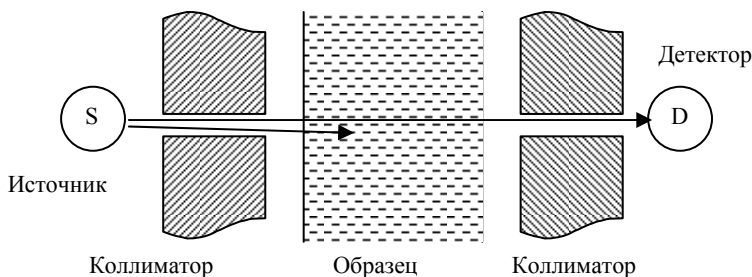


Рис. 5.9. Схема денситометрических измерений

Коэффициент поглощения каждого элемента изменяется скачками при энергиях, равных энергиям связи электронов на К- и L-оболочках атомов (табл. 5.8).

Измерения пропускания излучения одной энергии через образец могут дать информацию о содержании одного материала или одной компоненты смеси. Использование излучения двух разных энергий дает возможность контролировать состав двухкомпонентной смеси.

Таблица 5.8

Энергии связи электронов на К- и L-оболочках в разных ЯМ, кэВ

Элемент	Th	U	Np	Pu	Am
К-край	109,56	115,61	118,68	121,82	125,03
L-край	16,3	17,2	17,6	18,0	18,5

Измерение пропускания при двух энергиях E_1 и E_2 дает систему уравнений для двух неизвестных концентраций:

$$\left. \begin{aligned} (-\ln T_1)/x &= M_1 = \mu_1^1 \cdot \rho_1 + \mu_2^1 \cdot \rho_2 \\ (-\ln T_2)/x &= M_2 = \mu_1^2 \cdot \rho_1 + \mu_2^2 \cdot \rho_2 \end{aligned} \right\}. \quad (5.12)$$

Решение уравнений выглядит так:

$$\left. \begin{aligned} \rho_1 &= (M_1 \cdot \mu_2^2 - M_2 \cdot \mu_1^2) / D \\ \rho_2 &= (M_2 \cdot \mu_1^1 - M_1 \cdot \mu_1^2) / D \end{aligned} \right\}, \quad (5.13)$$

где $D = \mu_1^1 \cdot \mu_2^2 - \mu_2^1 \cdot \mu_1^2$.

Решение тем точнее, чем сильнее величина D отличается от нуля. Это условие выполняется, если использовать два излучения вблизи и по разные стороны от K -края (или L -края) поглощения тяжелой компоненты смеси. Если даже коэффициенты поглощения легкой компоненты при этих энергиях различаются слабо, разность D будет достаточно велика.

Подробно рассмотрим изменения $\mu(E)$ вблизи K -края поглощения (рис. 5.10).

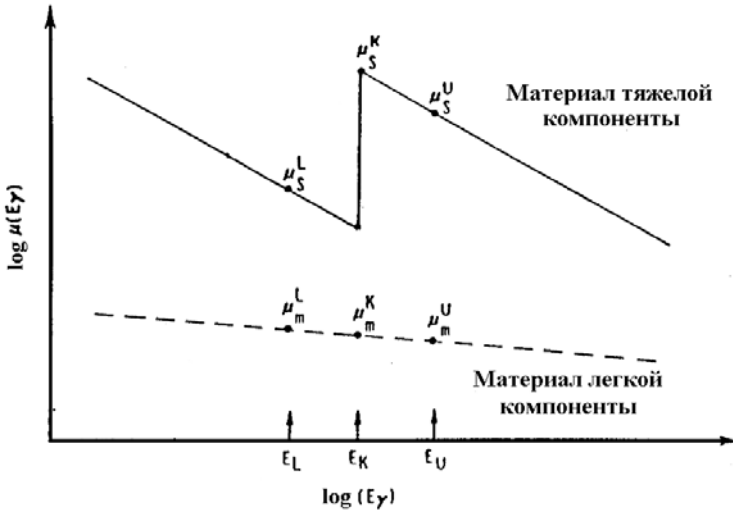


Рис. 5.10. Изменения коэффициентов поглощения легкой и тяжелой компонент ЯМ вблизи K -края

Измерив пропускания γ -излучений с энергиями E_L и E_U , находим искомую концентрацию ЯМ в растворе ρ_s :

$$\rho_s = \frac{1}{\Delta\mu_s \cdot x} \ln\left(\frac{T_L}{T_U}\right) + \rho_m\left(\frac{\Delta\mu_m}{\Delta\mu_s}\right), \quad (5.14)$$

где $\Delta\mu_s = \mu_s^U - \mu_s^L > 0$, $\Delta\mu_m = \mu_m^U - \mu_m^L < 0$.

Если E_L и E_U очень близки к E_K , то $\Delta\mu_m$ стремится к нулю, и результат измерения нечувствителен к поглощению в матрице.

Дополнительные измерения (калибровку) выполняют с эталонными растворами, помещенными в стандартные контейнеры.

При малых концентрациях ЯМ (десятки г/л) применяют денситометрию на L-крае поглощения, при более высоких (сотни г/л) – на K-крае поглощения.

Применяют источники излучений двух типов: первый – генераторы рентгеновского излучения, производящие фотоны с непрерывным широким спектром. Их применяют в измерениях и на K-крае, и на L-крае поглощения. Примеры спектров представлены на рис. 5.11. Отношение спектра образца к спектру сравнения дает пропускание.

Второй тип используемых источников – радиоактивные γ -источники моноэнергетических излучений. Например, для измерения растворов плутония ($E_K=121,82$ кэВ) используют два источника: ^{75}Se ($T_{1/2}=120$ дней, $E_\gamma=121,1$ кэВ) и ^{57}Co ($T_{1/2}=270$ дней, $E_\gamma=122$ кэВ). При измерениях с этими источниками влияние на результат поглощения в легкой матрице пренебрежимо мало, однако нужно учитывать разные скорости их распадов.

Для измерения растворов урана ($E_K = 115,61$ кэВ) применяют γ -источник иттербий-196 (^{169}Yb) с периодом полураспада $T_{1/2} = 32$ дня. В этом случае вводить поправки на распад не требуется: один источник испускает обе группы квантов. Однако значительное различие в их энергиях ($E_L = 109,8$ кэВ, $E_U = 130,5$ кэВ) вызывает большую чувствительность к поглощению в матрице (большое $\Delta\mu_m$).

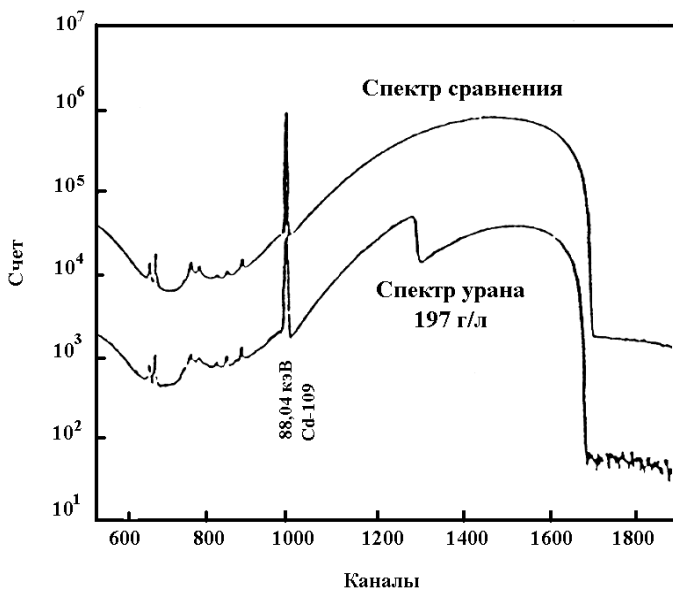


Рис. 5.11. Спектр растворов, полученных с помощью рентгеновского генератора: верхняя кривая – спектр сравнения, измеренный с помощью денситометрического детектора К-края поглощения в растворе без ЯМ (3-мольный раствор HNO_3); нижняя кривая – спектр образца раствора урана с концентрацией 197 г/л; источник ^{109}Cd используется для коррекции просчетов, обусловленных мертвым временем

Анализы на L-крае применяют для образцов меньшей толщины, что обусловлено меньшей проникающей способностью измеряемых излучений. Обычно ЛКД применяют для контроля растворов с более низкими концентрациями ЯМ, а ККД – для более высоких концентраций (табл. 5.9). При более низких концентрациях ЯМ в растворах для их контроля используют рентгено-флуоресцентный анализ.

Таблица 5.9

Характерные концентрации ЯМ в растворах при денситометрических анализах

Характерные концентрации, г/л	Уран	Плутоний
ρ_s (ККД)	270	294
ρ_s (ЛКД)	18	19

Анализы растворов ЯМ. Рентгено-флюоресцентный анализ (РФА)

Все атомы обладают упорядоченными системами электронных оболочек, характеризующимися определенными значениями энергии связи. При появлении вакансии на электронной оболочке ее заполняет другой электрон, переходящий с более высокой оболочки (рис. 5.12). Разница потенциальных энергий выделяется в виде рентгеновского кванта с энергией, равной разности энергий связи на нижней и верхней оболочках. Спектры характеристического излучения достаточно просты, что облегчает их анализ.

Чтобы освободить электрон с оболочки, нужно передать ему энергию, превышающую $E_{\text{связи}}$. Для этого используют внешние источники возбуждения.

Вероятность возбуждения рентгеновского излучения К (или L) серии зависит от разности между энергией квантов источника возбуждения E_0 и энергией связи электронов на К-(или L)-оболочке $E_{\text{связи}}$. Вероятность возбуждения максимальна, когда энергия гамма-кванта лишь немного превышает энергию связи электрона.

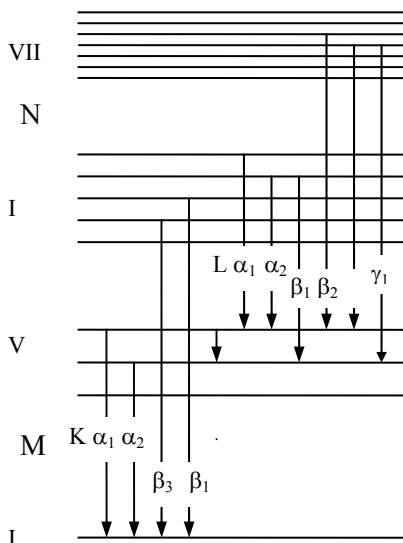


Рис. 5.12. Схема электронных переходов в атоме

Для возбуждения характеристического излучения используют радиоактивные источники или рентгеновские трубки. Преимущества радиоактивных источников заключается в простоте их устройства и стабильности энергии возбуждающего излучения. Спектр возбуждающего излучения должен быть как можно проще. В случае сложного спектра присутствуют «неработающие» высокоэнергетические линии, создающие фон в области пиков измеряемого рентгеновского излучения или даже интерферирующие с ними.

В табл. 5.10 даны значения энергии и выходы X -лучей Pu и U.

Таблица 5.10

Значения энергий переходов и выходы рентгеновских излучений Pu и U

Линия	Переход	Уран, %	Плутоний, %
$K_{\alpha 1}$	K-L ₃	98,44 (100)	103,76 (100)
$K_{\alpha 2}$	K-L ₂	94,66 (61,9)	99,55 (62,5)
$K_{\beta 1}$	K-M ₃	111,31 (22,0)	117,26 (22,2)
$K_{\beta 3}$	K-M ₂	110,43(11,6)	116,27 (11,7)
$L_{\alpha 1}$	L ₃ -M ₅	13,62 (100)	14,28 (100)
$L_{\alpha 2}$	L ₃ -M ₄	13,44 (10)	14,08 (10)
$L_{\beta 2}$	L ₃ -N ₅	16,43 (20)	17,26 (20)
$L_{\beta 1}$	L ₂ -M ₄	17,22 (50)	18,29 (50)

Для наблюдения характерных пиков важно правильно выбрать геометрию измерений. Наблюдениям может мешать фон, создаваемый квантами, возникающими при комптоновском рассеянии излучения источника.

Скорость регистрации квантов рентгеновского излучения i -го элемента $n_{\Phi i}$ связана с содержанием этого элемента N_i в образце и с квантовым выходом его излучения I_i^X , следующим соотношением:

$$n_{\Phi i} = N_i \cdot I_i^X \cdot W_i^X \cdot \varepsilon_i^X, \quad (5.15)$$

где W_i^X – функция возбуждения рентгеновского излучения, которая представляет собой произведение сечения фотоэффекта $\sigma_{\Phi}^i(E)$

и потока квантов источника на образец $\Phi_\gamma(E)$; ε_i^X – эффективность регистрации рентгеновского излучения детектором:

$$W_i^X = \int_{E_i}^{\infty} \sigma_{\Phi}^i(E) \cdot \Phi_\gamma(E) \cdot dE = (Z_i)^5 \cdot \int_{E_i}^{\infty} [\Phi_\gamma(E)/(E - E_i)^3] \cdot dE, \quad (5.16)$$

где E_i – пороговая энергия фотоэффекта на соответствующей электронной оболочке (К или L) i -го элемента; Z_i – атомный номер i -го элемента.

Очевидно, функция возбуждения сильно зависит от Z элемента и тем больше, чем ближе энергия излучения источника к пороговой энергии фотоэффекта (энергии связи электрона на оболочке).

Радиоактивные гамма-источники имеют малые размеры, просты в эксплуатации и пригодны для многих РФА. Главный их недостаток – распад со временем и необходимость периодической замены. Существует проблема их транспортировки. Поскольку мощность таких источников больше 1 мКи, при работе с ними необходима защита как персонала, так и детектора. Схема установки для РФА представлена на рис. 5.13.

Как и при пассивных гамма-измерениях, точность результатов РФА может быть ограничена поглощением внутри образца. Этот эффект нужно учитывать как для измеряемого характеристического излучения, так и для возбуждающего излучения внешнего источника. Поглощение в больших и твердых образцах настолько велико, что РФА не пригоден для их анализа. Поэтому его используют для контроля жидких однородных образцов.

Излучение источника поглощается сильнее, поскольку его энергия выше порога поглощения анализируемого ЯМ. Ослабление зависит также от материала и толщины стенок контейнера. РФА по L-излучению требует применения не металлических, а пластмассовых контейнеров.

Измерительную систему РФА калибруют, используя набор эталонных растворов с разной концентрацией ЯМ в контейнерах аналогичных тем, которые применяются для исследуемых растворов.

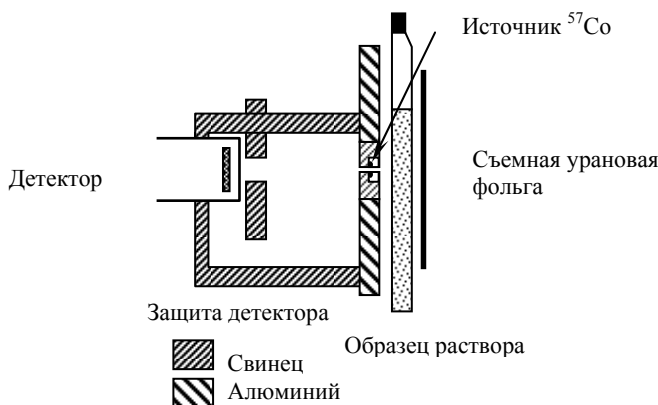


Рис. 5.13. Схема установки для РФА

Генератор рентгеновского излучения – более мощный излучатель, чем радиоактивные источники. Он производит 10^{12} фотонов/с и более. Основные проблемы, связанные с применением генераторов, – необходимость поддержания высокой стабильности их параметров и относительно большие габариты, затрудняющие их перемещение.

Измерение рентгеновской флуоресценции позволяет определить отношение концентраций ЯМ в растворе. На рис. 5.14 представлен спектр раствора, содержащего уран и плутоний.

Весовое отношение U/Pu можно определить по площади пиков $\text{XK}_{\alpha 1}$ урана (S_U) и $\text{XK}_{\alpha 1}$ плутония (S_{Pu}):

$$U/Pu = \frac{A_U}{A_{Pu}} \cdot \frac{S_U}{S_{Pu}} \cdot \frac{\varepsilon_{Pu}}{\varepsilon_U} \cdot \frac{1}{R_U/R_{Pu}}, \quad (5.17)$$

где A_U и A_{Pu} – атомные массы урана и плутония, $(\varepsilon_{Pu}/\varepsilon_U)$ – относительная эффективность детектирования урана и плутония; (R_U/R_{Pu}) – коэффициент, учитывающий различие вероятностей возбуждения излучений урана и плутония с применением данного источника.

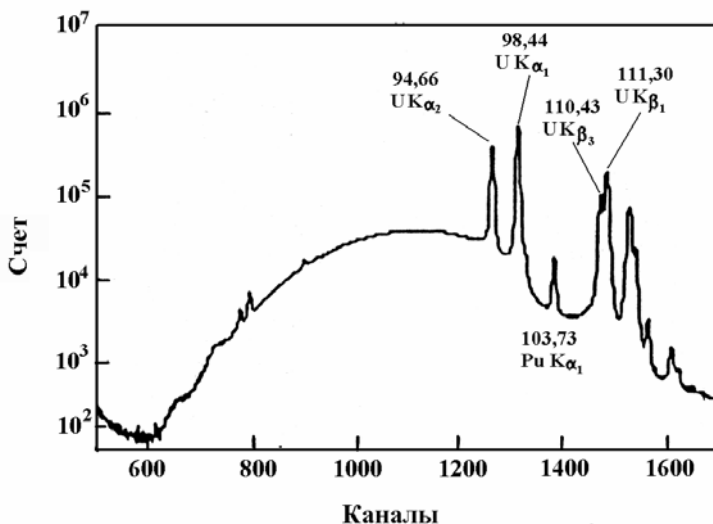


Рис. 5.14. Спектр флюоресценции растворов урана и плутония

Нейтронные измерения ЯМ

Существует три процесса, вызывающих нейтронное излучение образцов ЯМ:

- спонтанное деление ЯМ;
- вынужденное деление ЯМ;
- (α, n) – реакция под действием α -излучения ЯМ.

Нейтроны – сильно проникающие частицы. Они выходят наружу из всего объема образца и легко проходят через стенки контейнера, содержащего образец.

Спонтанное деление наиболее вероятно для изотопов с четным массовым числом (^{238}Pu , ^{240}Pu , ^{242}Pu и др.). Относительная вероятность деления ^{240}Pu с испусканием разного числа нейтронов показана на рис. 5.15. Среднее число нейтр/дел составляет около 2. Всего в 1 г ^{240}Pu происходит 473 спонтанных деления в секунду.

Количество нейтронов, образовавшихся в результате одного деления, называют множественностью. Всего в 1 г ^{240}Pu происходит 473 спонтанных деления в секунду.

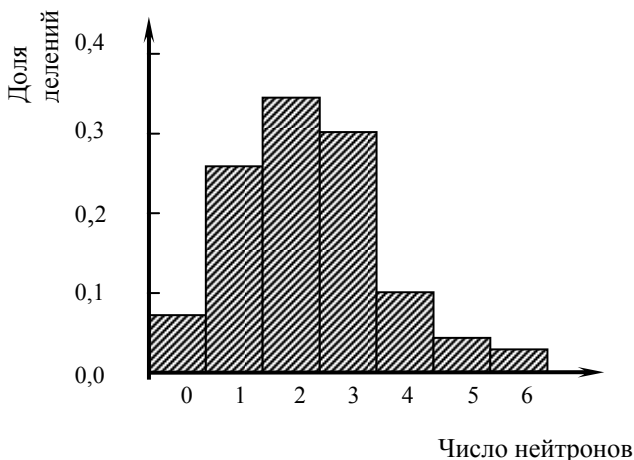


Рис. 5.15. Относительная вероятность делений с испусканием разного числа нейтронов

Метод, основанный на регистрации самопроизвольно испускаемых образцом нейтронов, называют пассивным.

При обработке результатов пассивных нейтронных измерений часто используют понятие «эффективного» ^{240}Pu , которому приписывают все нейтронное излучение образца плутония:

$$^{240}\text{Pu}_{\text{эфф}} = 2,52 \cdot f_{238} + f_{240} + 1,68 \cdot f_{242}, \quad (5.18)$$

где f_i – доля i -го изотопа плутония в образце.

Вызванное (или вынужденное) деление наиболее вероятно для делящихся изотопов (^{235}U , ^{239}Pu , ^{241}Pu). При вызванном делении испускается 0–8 нейтр./дел. Их среднее число в случае ^{239}Pu около 3. Метод нейтронных измерений с использованием внешнего источника называется активным.

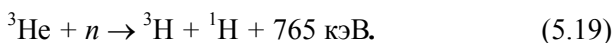
Число нейтронов, рожденных при спонтанном или вынужденном делении, может увеличиваться в результате их размножения в образце. (α, n)-реакция является дополнительным источником нейтронов, затрудняющим нейтронные измерения ЯМ. Радиоактивные распады изотопов урана и плутония чаще всего сопровождаются испусканием α -частиц. Энергии испускаемых α -частиц составляют

от 4 до 6 МэВ. Кроме того, сильным источником α -частиц является ^{241}Am .

Альфа-частицы, испускаемые ураном и плутонием, вступают в реакцию с 11 элементами с малым порядковым номером Z , включая кислород, фтор, углерод, алюминий.

В результате (α, n) -реакции рождается один нейтрон. Случаи единичных $((\alpha, n)$ -реакции) и множественных (спонтанное и вынужденное деление) рождений нейтронов можно разделить путем регистрации совпадений нейтронов по времени.

Для детектирования нейтронов при контрольных измерениях ЯМ чаще всего используются гелиевые счетчики. В таких счетчиках идет (n, p) -реакция:



Сечение реакции $^3\text{He}(n, p)$ для тепловых нейтронов достигает 5330 барн и в широком диапазоне энергии (от 10^{-2} до 10^5 эВ) изменяется по закону $1/\sqrt{E}$.

Для увеличения эффективности счета быстрых нейтронов счетчик окружают замедлителем. Обычно ^3He -счетчик помещают в блок полиэтилена толщиной 10 см.

^3He -счетчики пригодны для нейтронных измерений в сильных полях. Их показатели по надежности, стабильности, ресурсу работы очень высоки.

Для активных анализов содержания в образцах делящихся изотопов (^{235}U , ^{239}Pu , ^{241}Pu) нужен источник нейтронов с энергией ниже порогов деления четно-четных изотопов (^{238}U , ^{240}Pu). Такие нейтроны испускает $^{241}\text{AmLi}$ -источник. На рис. 5.16 показан спектр нейтронов $^{241}\text{AmLi}$ -источника. Мощность используемых для неразрушающего контроля $^{241}\text{AmLi}$ -источников составляет 10^4 – 10^5 н/с.

В большинстве реальных случаев число фоновых нейтронов от (α, n) -реакций, испускаемых образцом, слишком велико, что делает невозможным определение содержания ЯМ путем счета одиночных нейтронов. При активных анализах столь же сильный фон создают нейтроны от (α, n) -реакций в источнике.

Как уже отмечалось, нейтроны, возникшие при делении изотопов в образце ЯМ можно отделить от нейтронов (α, n) -реакций путем регистрации совпадающих по времени импульсов.

Если число нейтронов, испущенных при одном делении, равно n , то вероятность регистрации k нейтронов дается уравнением:

$$P(n, k) = \frac{n!}{(n - k)!k!} \cdot \varepsilon^k \cdot (1 - \varepsilon)^{n-k}. \quad (5.20)$$

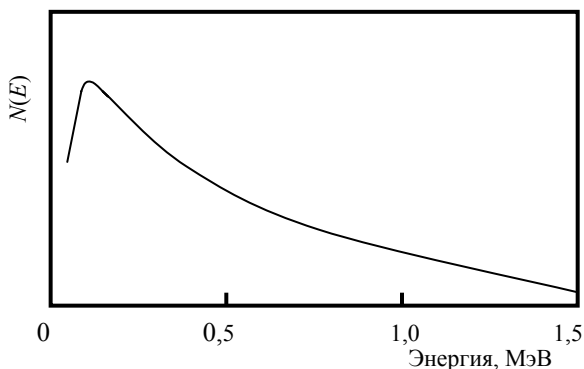


Рис. 5.16. Спектр нейтронов $^{241}\text{AmLi}$ -источника

Если испущено два нейтрона, то вероятность $P(2,0)$ не зарегистрировать ни одного нейтрона равна 0,64; вероятность зарегистрировать один нейтрон $P(2,1) = 0,32$; два нейтрона $P(2,2) = 0,04$. Таким образом, вероятность регистрации действительного совпадения двух нейтронов одного деления относительно мала. Многие совпадения, наблюдаемые в последовательности импульсов, будут случайными, вызванными совпадениями между нейтронами (α , n)-реакций, нейтронами (α , n)-реакций и нейтронами деления или нейтронами разных делений.

Для того чтобы выделить и определить число истинных и случайных совпадений используют распределение Росси-альфа. Такое распределение получается при запуске таймера в момент прихода какого-либо импульса. Таймер отсчитывает время, а каждый последующий импульс запоминается в ячейке, соответствующей времени его прихода. Когда заданное время отсчетов заканчивается, таймер останавливается и включается снова, когда новый импульс за-

пустит процесс счета. На рис. 5.17 представлено распределение Росси-альфа. Вероятность счета совпадений после акта деления уменьшается со временем экспоненциально. Если совпадают нейтроны (α, n)-реакций или фоновые нейтроны, то вероятность таких случайных совпадений в любом временном интервале одинаковая.

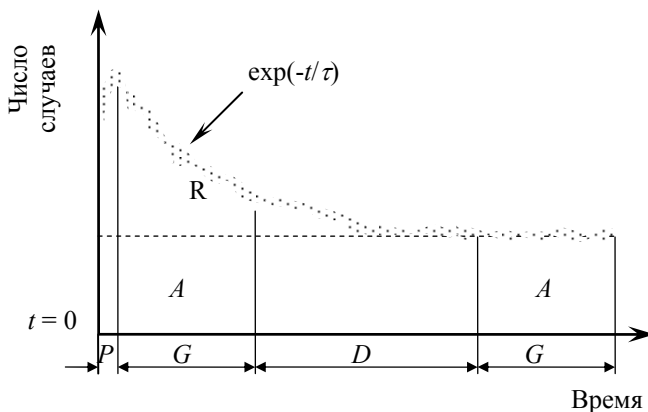


Рис. 5.17. Распределение Росси-альфа представляет число случаев детектирования нейтронов как функцию времени, прошедшего после регистрации первого нейтрона деления

Число истинных двойных совпадений определяется по формуле:

$$R = \frac{(R + A)_{\text{счет}} - A_{\text{счет}}}{\exp(-P/\tau) \cdot [1 - \exp(-G/\tau)] \cdot [1 - \exp(-(D + G)/\tau)]} \exp(G \cdot T), \quad (5.21)$$

где R – число истинных совпадений; A – число случайных совпадений; P – время предварительной задержки счета импульсов, G – время счета совпадений; D – длительная задержка; τ – время жизни нейтрона в детекторе, $D \gg \tau$, T – общая скорость счета нейтронов.

Принцип построения схемы счета нейтронных совпадений показан на рис. 5.18.

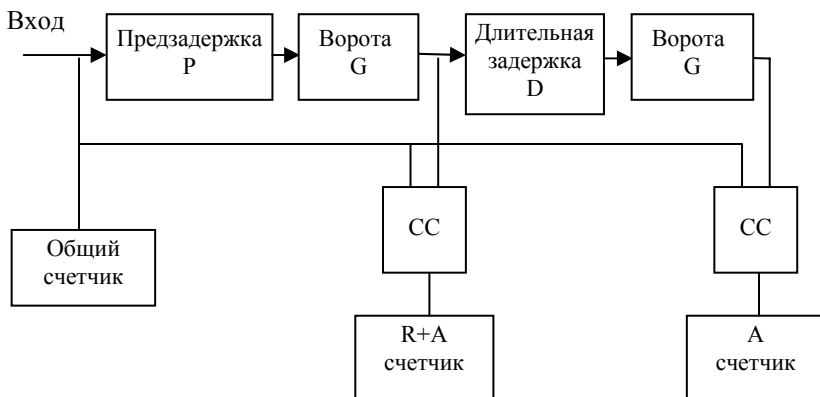


Рис. 5.18. Схема для выделения совпадений нейтронов деления

Практическое применение таких схем ограничено скоростями счета менее 20–30 кГц из-за необходимости больших коррекций, учитывающих мертвое время электроники. Дальнейшее развитие измерительной техники было основано на применении сдвигового регистра.

Сдвиговый регистр состоит из набора управляемых таймером триггеров. Последовательность импульсов, приходящих за время G , запоминается. Каждый последующий импульс открывает свои собственные ворота так, что нет необходимости ждать пока закроются одни ворота, чтобы открыть другие. Это позволяет работать при скоростях счета в несколько сотен килогерц и выше. Регистрация совпадений не начинается сразу, а лишь через короткий интервал после прихода импульса P (предварительная задержка). В течение этого времени (3–6 мкс) из-за наложений импульсов и мертвого времени электроники искажается скорость счета источника совпадений. После предварительной задержки сдвиговый регистр открывает $R+A$ ворота, ширина которых составляет обычно 32–64 мкс. В это время регистрируются истинные и случайные совпадения. Затем после длительной задержки D открываются ворота A . Поскольку величина D обычно равна 1000 мкс, что много больше времени жизни нейтронов в детекторе (30–100 мкс), пересчетное устройство A регистрирует только случайные совпадения.

Упрощенная схема сдвигового регистра дана на рис. 5.19.

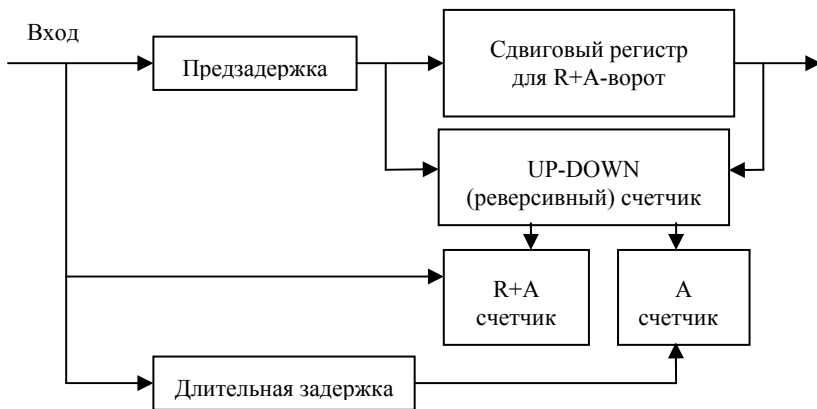


Рис. 5.19. Схема сдвигового регистра

При измерениях с помощью представленного выше сдвигового регистра можно получить только две величины: случайные и истинные двойные совпадения. Для некоторых загрязненных или неоднородных образцов необходимы измерения третьей величины – скорости счета тройных совпадений (триплетов).

По результатам измерений одиночных нейтронов, дуплетов и триплетов можно определить величину эффективной массы ^{240}Pu , коэффициент размножения нейтронов в образце и выходы (α, n) -нейтронов без калибровки измерительной системы.

Приборы для нейтронных измерений ЯМ

Для различных применений были разработаны разные измерительные системы, пригодные для анализов разнообразных типов образцов: контейнеров с порошком PuO_2 , таблеток и стержней, заполненных смешанным уран-плутониевым топливом, металлических блочков, целых топливных сборок, бочек со скрапом и отходами. В противоположность химическим анализам, где пробу приспособливают к средству измерения, в неразрушающем анализе аппаратуру приспособливают к образцу.

Нейтронный анализ используют для контроля ЯМ с высокой плотностью, при этом результат анализа может существенно зависеть от материала матрицы.

Результаты счета совпадений используют для определения количества ЯМ в образцах при пассивных и активных нейтронных измерениях.

Пассивные нейтронные методы широко применяют для контроля плутониевых образцов, которые испускают собственные нейтроны в результате спонтанного деления и при (α , n)-реакциях (табл. 5.11), в различных формах: в топливных блочках, стержнях, порошках, гранулах, в скрапе и отходах, в смесях $\text{PuO}_2 + \text{UO}_2$. Для интерпретации результата таких измерений надо знать состав изотопной композиции плутония (спонтанное деление идет, в основном, в четных изотопах Pu: ^{238}Pu , ^{240}Pu , ^{242}Pu).

Активный нейтронный метод служит для контроля урановых образцов на содержание ^{235}U , поскольку скорости спонтанного деления изотопов урана малы. С помощью AmLi-источника в образце вызывают вынужденное деление, число делений определяют путем счета нейтронных совпадений. Высокая проникающая способность нейтронов дает возможность определить полное содержание ^{235}U во всем объеме.

Таблица 5.11

Выход нейтронов, испускаемых ЯМ

Изотоп	Период спонтанного деления, лет	Выход нейтронов спонтанного деления, н/с·г	Период α -распада, лет	Выход α -частиц, $\alpha/\text{с·г}$	α, n выход в оксиде, н/с·г
^{238}U	$8,2 \cdot 10^{15}$	$1,36 \cdot 10^{-2}$	$4,47 \cdot 10^9$	$1,2 \cdot 10^4$	$8,3 \cdot 10^{-5}$
^{238}Pu	$4,77 \cdot 10^{10}$	$2,59 \cdot 10^3$	87,74	$6,33 \cdot 10^{11}$	$1,34 \cdot 10^4$
^{239}Pu	$5,48 \cdot 10^{15}$	$2,18 \cdot 10^{-2}$	$2,41 \cdot 10^4$	$2,3 \cdot 10^9$	$3,81 \cdot 10^1$
^{240}Pu	$1,16 \cdot 10^{11}$	$1,02 \cdot 10^3$	$6,56 \cdot 10^3$	$8,4 \cdot 10^9$	$1,41 \cdot 10^2$
^{242}Pu	$6,84 \cdot 10^{10}$	$1,72 \cdot 10^3$	$3,76 \cdot 10^5$	$1,4 \cdot 10^8$	2,0

Основные принципы пассивного счета совпадений состоят в следующем:

- образец ЯМ помещают в полость, окруженную нейтронными счетчиками;
- регистрируют совпадения импульсов, создаваемых нейтронами спонтанного деления;
- скорость счета совпадений прямо пропорциональна массе делящегося вещества:

$$R = {}^{240}\text{Pu}_{\text{эфф}} (473 \text{ дел/с} \cdot \text{г}) \varepsilon^2 \exp(-P/\tau) \times \\ \times [1 - \exp(-G/\tau)] \sum_{\nu} P(\nu) \frac{\nu(\nu-1)}{2}, \quad (5.22)$$

где P – время предварительной задержки счета импульсов, G – время счета совпадений; τ – время жизни нейтрона в детекторе, ε – эффективность регистрации нейтронов, ν – количество нейтронов, испускаемых при делении, $P(\nu)$ – вероятность того, что при делении будет испущено ν нейтронов.

Схема пассивного счетчика нейтронных совпадений для измерений малых образцов показана на рис. 5.20.

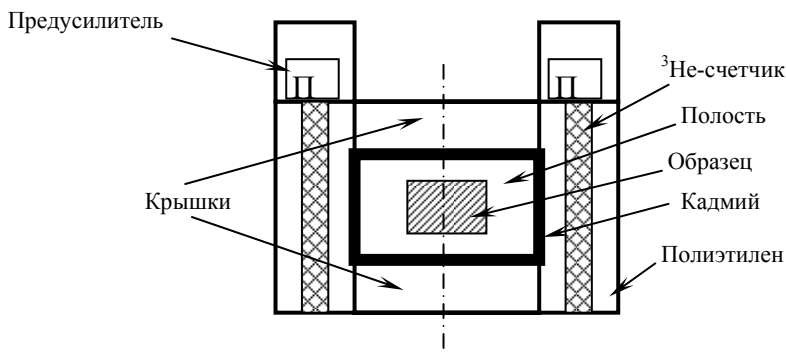


Рис. 5.20. Схема пассивного счетчика нейтронных совпадений для измерений малых образцов

Нейтроны, испускаемые образцом, замедляются в полиэтилене и регистрируются ^3He -счетчиками. Полость для образцов защищена кадмием от медленных нейтронов, возвращающихся из полиэтилена, с целью снижения самоэкранирования образца.

Счетчик может работать в двух режимах: на тепловых и на быстрых нейтронах. При режиме счета быстрых нейтронов стенки полости для образца покрывают кадмием. Измерения в режиме на быстрых нейтронах лучше подходят для образцов с большой массой, на тепловых – для образцов с малой массой. Измерения в режиме на тепловых нейтронах позволяют уменьшить статистическую погрешность контроля малых образцов. Для больших образцов большая величина сечения ведет к экранированию внутреннего объема и искажению результата.

Для расшифровки результатов анализов производят калибровку счетчика. Калибровочные кривые для быстрого и теплового режимов сильно различаются. Калибровочная кривая для режима на быстрых нейтронах имеет два различных участка: участок, где влияет самоэкранирование (образцы массой до $500 \text{ г } ^{235}\text{U}$), и расположенный дальше участок с размножением, где масса ^{235}U достаточно велика, чтобы за счет вторичных делений скомпенсировать самоэкранирование. Для калибровки интервала $150\text{--}900 \text{ г } ^{235}\text{U}$ требуется несколько эталонов. Для каждого типа материалов требуется особая кривая (рис. 5.21).

В табл. 5.12 даны характеристики активного счетчика совпадений типа «колодец» (AWCC).

Приборы контроля, основанные на счете нейтронных совпадений, отличаются большим разнообразием, но все они основаны на стандартной электронике.

Как при нейтронных, так и при гамма-измерениях существует проблема измерений протяженных образцов ЯМ. При пассивных измерениях протяженных образцов возникает задача обеспечения условия одинаковой вероятности регистрации нейтронов, испущенных из всех элементов поверхности образца, а при активных – еще и одинаковое облучение всех этих элементов нейтронами источника. Поэтому при конструировании нейтронных измерительных систем прилагают все усилия, чтобы обеспечить равномерную чувствительность и равномерное поле нейтронов внешнего источника в полости для образцов.

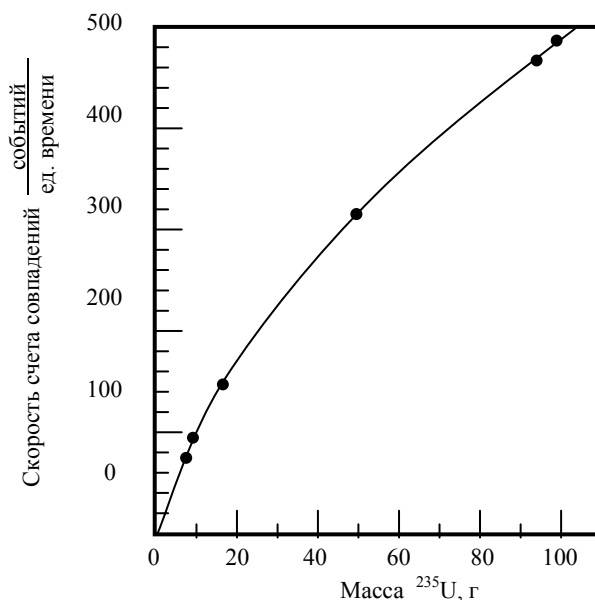


Рис. 5.21. Скорость счета совпадений в зависимости от массы ^{235}U для образцов U_3O_8 низкого обогащения в режиме регистрации тепловых нейтронов

Таблица 5.12

Характеристики активного счетчика совпадений типа «колодец» (AWCC)

Характеристики	Тепловой режим	Быстрый режим
Масса измеряемых образцов	до 100 г ^{235}U	100–20000 г ^{235}U
Скорость счета совпадений от слабообогатщенного образца U_3O_8	11 отсчет/(с·г ^{235}U)	0,18 отсчет/(с·г ^{235}U)
Абсолютная погрешность измерений больших образцов за 1000 с	0,3 г ^{235}U	18 г ^{235}U

Калориметрия

Калориметрия – пассивный неразрушающий метод контроля ЯМ (плутония и трития), основанный на точных измерениях температуры. В целом этот метод более точен, но требует хорошей темпе-

ратурной стабильности и ее контроля, менее быстр и портативен по сравнению с другими методами неразрушающих измерений ЯМ.

Калориметр – прибор для измерения количества тепла, выделяемого предметом.

Преимущества калориметрии состоят в том, что результаты измерений не зависят от геометрии образцов, от материала матрицы, от распределения ЯМ внутри образца. Для калибровок не требуются идентичные образцам эталоны. Результаты калориметрических анализов сравнимы по точности с результатами химических анализов*.

Описание метода

Вся энергия α -распадов превращается в тепло. Каждый α -распад сопровождается выходом энергии $Q = (M_{240\text{Pu}} - M_{236\text{Pu}} - M_{\alpha})c^2 = 5,25578$ МэВ. При β -распаде ^{241}Pu выделяется $Q_{\beta} = 20,81$ кэВ, при β -распаде ^3H $Q_{\beta} = 18,59$ кэВ.

При радиоактивных распадах ^{240}Pu выделяется мощность, равная $P = \lambda \cdot N \cdot Q$, где N – число атомов ^{240}Pu , λ – постоянная распада ^{240}Pu . При α -распаде ^{240}Pu выделяемая мощность равна $0,00707 \pm \pm 0,00002$ Вт/г. Полная мощность, производимая всеми изотопами плутония: $P_{\text{эфф}}(\text{Вт/г}) = \sum f_i P_i$, где f_i – массовая доля отдельного изотопа.

В табл. 5.13 приведен пример вклада отдельных изотопов в $P_{\text{эфф}}$. При увеличении выгорания Pu $P_{\text{эфф}}$ увеличивается. Характеристикой глубины выгорания служит содержание ^{240}Pu .

Таблица 5.13

Вклад отдельных изотопов в $P_{\text{эфф}}$ для одного из образцов

Изотоп	Содержание, масс. доли	Вклад в тепловыделение, %
^{238}Pu	0,0006	11,0
^{239}Pu	0,8567	53,3
^{240}Pu	0,1211	27,7
^{241}Pu	0,0194	2,1
^{242}Pu	0,0022	0,0
^{241}Am	0,0016	5,9

* При измерениях гомогенных образцов выгоревшего Pu точность 0,1%, как при химических анализах и взвешивании. При измерениях отходов, содержащих Pu однородного изотопного состава, точность 1%.

Измерив тепловыделение из образца плутония, и зная его изотопный состав, можно найти содержание Pu.

Тепло, производимое образцом, регистрируют тепловым датчиком из чувствительной проволоки, расположенной кольцами вокруг полости с образцом. Двойной калориметрический мост с двумя идентичными термостатами показан на рис. 5.22.

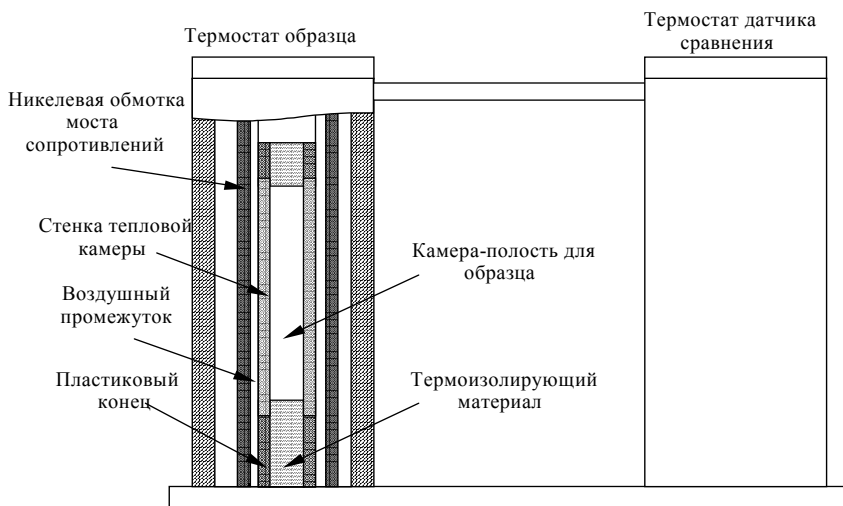


Рис. 5.22. Схема двойного калориметрического моста с двумя идентичными термостатами

Измерения проводятся с помощью потенциометра или цифрового вольтметра, который включен в электрическую схему, называемую мостом Уитстона (рис. 5.23). Измеренное напряжение пропорционально разности между температурой в полости образца и температурой датчика сравнения, который находится в воздушной или водяной «бане» с постоянной температурой (ее поддерживают с точностью $\pm 0,001$ °C).

Если температура в обоих термостатах одинаковая, т.е. образец отсутствует, то мост Уитстона находится в сбалансированном состоянии. При помещении образца в термостат температура изменяется, и мост становится несбалансированным.

Показания вольтметра устанавливаются спустя некоторое время после помещения образца в термостат. Время установления равновесия зависит от размеров образца и составляет несколько часов (рис. 5.24). С помощью предварительного подогрева камеры термостата для образца время достижения равновесия может быть уменьшено в несколько раз.

Чтобы по измеренной разности потенциалов определить мощность, выделенную образцом в термостате, обычно используют график чувствительности.

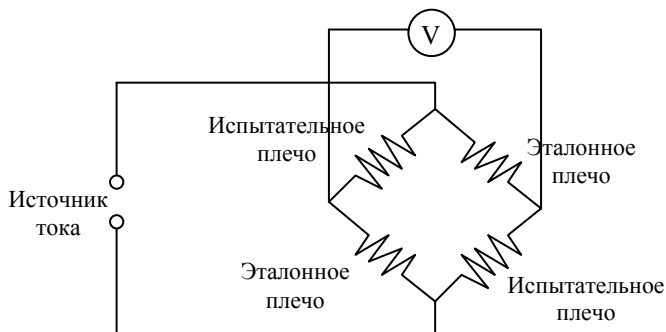


Рис. 5.23. Мост Уитстона, служащий для измерений потока тепла

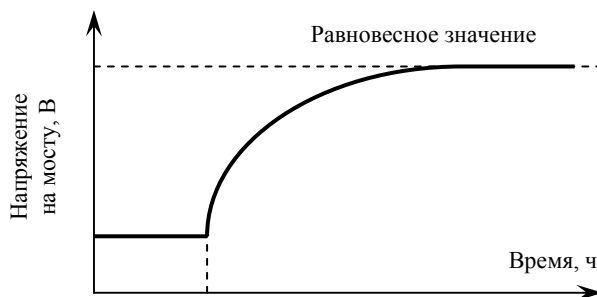


Рис. 5.24. Показания вольтметра в зависимости от времени

Для этого строят кривую чувствительности термостата к мощности, выделяемой образцом. На рис. 5.25 показана одна из возможных форм графика чувствительности калориметра.

В процессе калибровки включают калориметр и измеряют разность потенциалов на концах моста (BP_0) без образца или какого-либо другого источника тепла. Затем устанавливают в камере образца плутониевый стандарт, измеряют равновесное значение разности потенциалов BP_s и рассчитывают чувствительность калориметра по формуле:

$$S = (BP_s - BP_0)/W_s, \quad (5.23)$$

где W_s – мощность, выделяемая стандартом (известна).

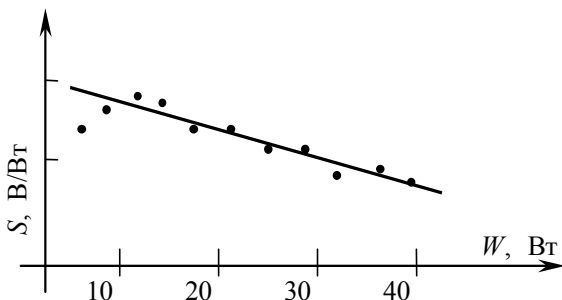


Рис. 5.25. График чувствительности калориметр

Обычно существует слабая зависимость величины S от мощности источника тепла. Например, при измерениях образцов с мощностью от 0,1 до 10 Вт наблюдалось уменьшение чувствительности на 1,6%.

Как показывает график на рис. 5.25, в рассматриваемом случае чувствительность не является константой и зависит от мощности, выделяемой образцом.

В целом, погрешности лучших калориметрических анализов таковы: погрешность измерения мощности $<0,1\%$, погрешность определения эффективного удельного энерговыделения $<0,2\%$.

Типичные параметры калориметра: диаметр – 120 мм, высота – 275 мм, диапазон – 0–6 Вт.

Для калибровок калориметров применяют эталонированные образцы или электрические стандарты (зонды):

1) эталоны тепловыделения – образцы ^{238}Pu . Особенности:

- малые размеры позволяют определить ошибки, обусловленные распределением тепла по объему камеры;

- точность аттестации 0,02%;

- распад можно точно учитывать;

2) электрические стандарты тепловыделения. Особенности:

- нет радиоактивного излучения;

- не надо учитывать распад;

- электроника может быть независимой от калориметрической системы;

- электронику нужно прокалибровать.

При конструировании калориметра учитывают следующие обстоятельства.

- Размер образца, который задает размеры камеры для образца. Плотный тепловой контакт образца с калориметром позволяет минимизировать время анализа. Диаметр камеры у существующих калориметров находится в диапазоне от 1 до 30 см.

- Тепловую мощность образца. Для образцов высокой мощности нужны низкочувствительные калориметры с низким тепловым сопротивлением, а для образцов малой мощности – высокочувствительные, с высоким тепловым сопротивлением.

- Способы градуировки. Конструкция калориметра зависит от того, какие источники теплоты применяются для градуировки: радиоизотопный или электрический.

- Производительность. Выбор типа калориметра зависит от времени требуемого для анализа.

- Точность. При выборе типа калориметра и режима его работы точность анализа планируется с учетом расхода времени и других условий работы.

- Условия использования. На выбор конструкции калориметра оказывает влияние окружающая среда и площадь рабочего помещения для его размещения.

5.3. Разрушающие анализы

Обычно разрушающий анализ (РА) включает этапы отбора пробы, химической подготовки образца и измерений. Контролируемые материалы могут находиться как в штучной (учетные единицы), так и в балк-форме. Результаты разрушающих анализов отличаются, как правило, более высокой точностью, чем при неразрушающих измерениях. Однако трудоемкость и стоимость РА выше, чем неразрушающих.

Разрушающие анализы проводят в следующих случаях:

- для проверки результатов неразрушающих измерений;
- для проведения особо важных контрольных измерений;
- для аттестации эталонов.

Отбор проб

При разрушающих анализах исследуется малая часть всего материала подлежащего контролю и требуется отобрать для анализа представительную пробу (образец). Ее состав должен строго соответствовать среднему составу всего материала, а масса (объем) пробы должна быть точно определена.

Если проба поддается растворению, в большинстве случаев необходимо растворить ее. Иногда уран или плутоний необходимо отделить от интерферирующих элементов.

При отборе пробы необходимо учитывать возможную неоднородность ЯМ, которая может быть трех типов:

- неоднородность материала в объеме контейнера;
- различия между контейнерами;
- различия между группами контейнеров.

Некоторые дисперсные и порошковые материалы, такие как зола и прокаленный скрап, трудно поддаются перемешиванию. При этом существует ряд факторов, требующих гомогенизации сухих порошков и дисперсных композиций. Например:

- вариации состава в зависимости от размеров частиц и их плотности;
- различия формы частиц;
- сцепление или слипание частиц между собой.

В ядерной промышленности часто встречаются недостаточно однородные материалы, что ограничивает возможность пробоотбо-

ра путем зачерпывания из каждой партии контейнеров материала для его сравнения. Поэтому используют случайный пробоотбор, что требует увеличения числа проб в каждом случае, чтобы учесть возможные различия.

Выбор способа и техники пробоотбора зависит от природы контролируемого материала, требований к точности результатов, объема измерений, его доступности для взятия проб и безопасности работ по пробоотбору.

На разных предприятиях ядерного топливного цикла используются разные методы отбора и подготовки проб для анализа. Погрешности, связанные с пробоотбором, относятся к двум категориям. Погрешность пробоотбора следует отделять от аналитической погрешности:

$$\sigma_s = (\sigma_t^2 - \sigma_a^2)^{1/2}, \quad (5.24)$$

где σ_s – случайная погрешность пробоотбора; σ_t – общее случайное отклонение результатов всех анализов всех образцов; σ_a – случайное отклонение, оцененное из повторных анализов каждого образца.

Однако на некоторых предприятиях повторные анализы с каждым образцом не выполняют и не отделяют случайную погрешность пробоотбора от случайной аналитической погрешности. В этом случае погрешность отбора пробы можно оценить из разброса результатов анализов стандартов, который приблизительно равен случайной аналитической погрешности:

$$\sigma_s = (\sigma_1^2 - \sigma_{st}^2)^{1/2}, \quad (5.25)$$

где σ_s – оцениваемая случайная погрешность пробоотбора; σ_1 – случайный разброс, основанный на единичных анализах всех образцов; σ_{st} – случайный разброс, основанный на повторных анализах стандарта.

Рассмотрение полученных результатов приводит к двум выводам: растворы на обогатительном и перерабатывающем предприятиях достаточно однородны, поэтому с помощью относительно простых операций пробоотбора можно получать представительные

пробы. Скрап и отходы ЯМ неоднородны, и следует ожидать больших погрешностей пробоотбора. В этом случае нужно проводить предварительную гомогенизацию и применять случайный метод отбора проб для получения представительного результата.

Растворение образцов ядерных материалов

Всегда следует стремиться к полному растворению исследуемого материала. Образование даже незначительных осадков может привести к значительным потерям целевого элемента. Растворение чистых препаратов урана является довольно простой задачей.

В случае плутония и его соединений (а также и тория) может возникать проблема, связанная с образованием и разрушением чрезвычайно химически стойкого диоксида, обладающего еще и чрезвычайно высокой температурой плавления.

Смешанные диоксиды урана и плутония показывают высокую стойкость к химическому воздействию, но все же скорость их растворения выше, чем у чистых плутониевых препаратов.

Экстракция ЯМ из раствора

Уран может быть достаточно селективно выделен из раствора методом экстракции его в органический раствор, не смешивающийся с исходным водным раствором.

Экстракция является вспомогательным методом очистки для аналитической химии, в частности для определения урана. Несмотря на то, что ряд элементов, включая плутоний и торий, тоже способны экстрагироваться, выбор правильных условий выделения позволяет исключить помехи, вызванные этими элементами, на последующих стадиях определения. Например, изменяя степень окисления плутония, удается достаточно легко управлять его экстракцией.

Наиболее широкое применение при переработке облученного ядерного горючего получил так называемый пурекс-процесс – экстракционный процесс с использованием растворов трибутилфосфата ($(\text{n-C}_4\text{H}_9\text{O})_3\text{PO}$ (ТБФ) в предельных углеводородах (гидрированный керосин).

Коэффициенты очистки урана от продуктов деления (ПД) после трех циклов составляет примерно 10^7 , а коэффициент очистки урана от плутония $3 \cdot 10^5$.

Ионообменное разделение

Ионообменное разделение применяют для селективного выделения анализируемого элемента из многокомпонентной смеси. По существу все работы по ионообменному выделению и разделению урана стараются проводить с его растворами в шестивалентной форме. В водных растворах уран, плутоний и многие другие элементы могут находиться в составе катионных и/или анионных комплексов.

Ионообменными свойствами обладают нерастворимые вещества, в состав которых входят прочно связанные с ним кислотные (катионит) или основные группы (анионит). Примером катионита может служить Дауэкс-50 (отечественный КУ-2), стиролдивинилбензойный полимер с привитыми –SO₃H группами. Примером сильно-основного анионита может служить Дауэкс-1 (отечественный аналог АВ-17), стиролдивинилбензойный полимер с привитыми заряженными –CH₂N⁺(CH₃)₃ группами.

Ионы урана могут быть поглощены путем катионного обмена из относительно разбавленных растворов серной кислоты (<0,5 н). При этом происходит очистка от несорбируемых примесей. Однако большинство методов разделения и очистки урана с помощью катионообменников основаны на стадии десорбции, путем промывания колонки раствором реагента, который с ураном образует анионный комплекс. Сорбция урана (VI) из раствора на катионите из кислых растворов усиливается в следующем ряде кислот H₃PO₄<H₂SO₄<HCl<HNO₃<HClO₄. В аналитической практике катиониты обычно используют для удаления мешающих анализу анионов, типа фосфатов, арсенатов и т.п.

Использование анионитов позволяет сорбировать анионные комплексы урана с такими анионами как нитрат, хлорид, фторид, ацетат, сульфат или карбонат.

Гравиметрия

Гравиметрия является самым старым и одним из наиболее точных методов аналитической химии. Сущность гравиметрического метода анализа состоит в измерении масс (взвешивании) анализируемого вещества. В этом методе взвешенная порция материала при прокаливании на воздухе переходит в черно-зеленый U₃O₈ с последующим взвешиванием полученного чистого продукта. Изме-

ренный вес U_3O_8 можно откорректировать с учетом присутствия нелетучих примесей, определяемых с помощью других методов, например спектрометрических.

U_3O_8 используется в качестве весовой формы, то есть стабильного соединения с постоянным соотношением уран – кислород. Для получения точного результата нужно контролировать стехиометрию образца после прокаливания (постоянство соотношения уран – кислород). Оно зависит от начального химического состава, соотношения поверхность/объем в анализируемом образце, температуры и времени сжигания. Установлено, что для получения однородной U_3O_8 из всего образца требуется медленное сжигание в контролируемых условиях.

Концентрацию урана в анализируемом образце рассчитывают по формуле:

$$U_A = \frac{W \cdot (F - C) \cdot G}{S}, \quad (5.26)$$

где U_A – концентрация урана в образце, г(U)/г(образца); W – вес прокаленного оксида (вес оксида урана и примесей), г; F – фактор нестехиометрии (отношение стехиометричного оксида урана, содержащего оксиды примесей, к нестехиометричному оксиду урана с примесями, полученному при прокаливании) г/г; C – количество граммов оксидов примесей, содержащихся в грамме прокаленного оксида г/г; G – гравиметрический (стехиометрический) фактор (U/U_3O_8), скорректированный с учетом изотопного состава урана, г(U)/г(U_3O_8); S – навеска образца, отобранного для анализа, г.

Гравиметрию применяют и для анализов плутониевых образцов, хотя реже чем для урана. Весовая форма в случае плутония – PuO_2 . Чтобы реализовать высокую точность, которую может обеспечить гравиметрия, нужно точно знать и учитывать содержание в образце кислорода и примесей.

Титрование по методу Дэвиса–Грэя для количественного анализа содержания урана

При потенциометрическом окислительно-восстановительном титровании к определенному объему исследуемого раствора известной концентрации добавляют из бюретки титрующий раствор

известной концентрации. В ходе титрования измеряют ЭДС и строят кривую титрования $E=f(V_T)$, где V_T – объем титранта. Измерительная система состоит из двух электродов, опущенных в исследуемый раствор, и прибора, регистрирующего ЭДС (рис. 5.26). В цепи один электрод, так называемый электрод сравнения, имеет постоянное значение потенциала, а потенциал второго, индикаторного, электрода изменяется в процессе титрования, причем в эквивалентной точке происходит резкий его скачок.

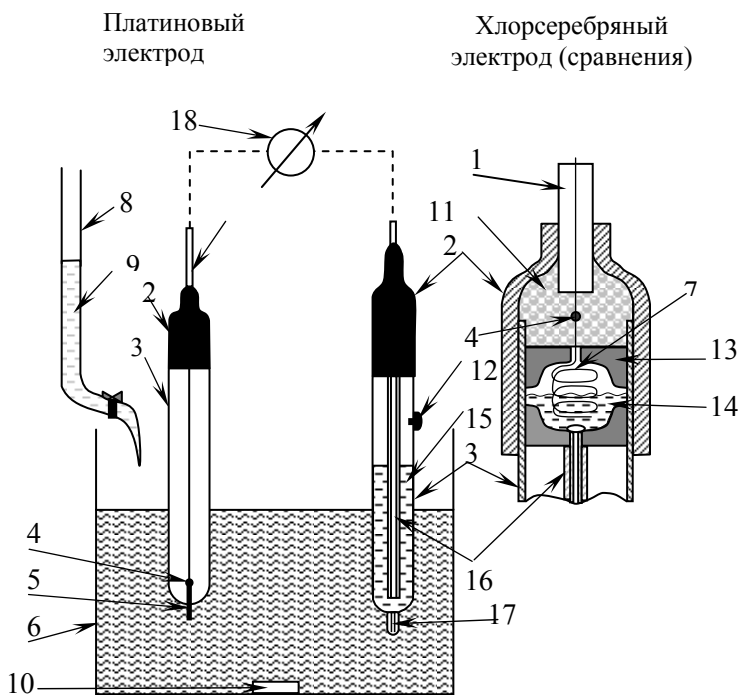


Рис. 5.26. Электродная система для потенциометрического титрования:
 1 – соединительный провод; 2 – пластмассовый колпачок; 3 – стеклянный корпус;
 4 – припой; 5 – платина; 6 – стакан с исследуемым раствором (pH_x); 7 – серебряная
 проволока, покрытая AgCl; 8 – бюретка; 9 – Cr(VI); 10 – перемешивающий стержень
 магнитной мешалки; 11 – герметик; 12 – отверстие с резиновой пробкой;
 13 – резиновые уплотнители; 14 – смесь KCl и AgCl; 15 – насыщенный раствор
 KCl; 16 – трубка с асбестом; 17 – асбестовая нить; 18 – pH-метр (милливольтметр)

При построении кривой потенциометрического титрования по оси абсцисс откладывают добавленный объем титрирующего раствора V_T , а по оси ординат – значения ЭДС. Для точного определения точки эквивалентности строят дифференциальную кривую титрования $\frac{\Delta E}{\Delta V_T} = f(V_T)$. Точка эквивалентности – это момент при

титровании, когда число грамм-эквивалентов титрирующего вещества равно числу грамм-эквивалентов титрируемого компонента.

Перечислим операции анализа и используемые химические реакции потенциометрического варианта метода Дэвиса–Грэя.

1. Отбор образца.
2. Растворение образца.
3. Предварительная обработка (очистка и др.).
4. Перевод шестивалентного урана в четырехвалентное состояние. Необходимо, чтобы весь уран оказался в четырехвалентном состоянии, поддающимся титрованию.

В точке эквивалентности весь находящийся в растворе уран переходит в шестивалентное состояние, и его количество характеризуется объемом использованного окислителя:

$$U = \frac{(NV + 6W/M \cdot A/100) \cdot [\text{атомный вес урана}/2]}{\text{вес образца, г}}, \quad (5.27)$$

где U – концентрация урана в анализируемом образце; N – нормальность* титранта (бихромата калия); V – объем использованного титранта (в литрах); W – вес добавленного твердого бихромата калия (при высокоточных измерениях или при титровании большого количества $U(IV)$); A – чистота бихромата калия, приведенная в сертификате (в %/100); M – молекулярный вес бихромата калия (294,19 г/моль).

Метод Дэвиса–Грэя (NBS) применим для анализа различных растворов урана: нитро-, сульфат-, перхлорат. Анализируемые растворы получают при растворении образцов оксида урана, металли-

* Нормальность – число грамм-эквивалентов растворенного вещества в 1 литре раствора. Например, 2N-раствор N_2SO_4 , в каждом литре которого содержится 98 г кислоты.

ческого урана, солей и сплавов урана, фрагментов ядерного топлива в оболочках из алюминия, стали, циркония.

Информация о точности титриметрических анализов по методу Дэвиса–Грэя представлена в табл. 5.14.

Таблица 5.14

Погрешности результатов измерений содержания урана методом Дэвиса–Грэя

№ п/п	Материал	Случайная погрешность, %	Систематическая погрешность, %
1	Металлический уран	0,06	0,018
2	Металлические частицы – топливо реактора TRIGA	0,06	0,017
3	Сплав UAl	0,074	0,018
4	Порошок UO ₂	0,11	0,035
5	Растворы урана	0,10	0,060

Масс-спектрометрия

Траектории движения заряженных частиц в магнитных полях зависят от их масс и скоростей. Уравнение, описывающее движение ионов, имеет вид:

$$m \frac{d\vec{v}}{dt} = q_e \vec{E} + q_e [\vec{v} \cdot \vec{B}], \quad (5.28)$$

где m – масса иона, q_e – электрический заряд, $\vec{v}$ – скорость иона, $\vec{E}$ – напряженность электрического поля, $\vec{B}$ – вектор индукции магнитного поля.

Если пучок моноэнергетических одинаково заряженных ионов направить в поперечное магнитное поле, то их траектории будут представлять собой круговые орбиты с радиусом, пропорциональным массам ионов. Поэтому ионы разных масс имеют разные траектории, что позволяет их разделять и идентифицировать.

Не все ионные источники производят строго моноэнергетические ионы. В статическом магнитном поле ионы разделяются и по массам, и по энергиям, что затрудняет их анализ. Подобрав подходящее сочетание электрического и магнитного полей (в том числе переменных), можно скомпенсировать разделение ионов по энер-

гии. Приборы, построенные по этому принципу, называют спектрометрами с двойной фокусировкой.

Масс-спектрометр состоит из источника ионов (в нем получают и ускоряют ионы, формируют пучок или пакеты ионов), масс-анализатора (служит для разделения ионов по массам) и детектирующей системы. В результате измерения получают распределение ионов по массам – масс-спектр.

Интенсивность линий в масс-спектре связана с содержанием отдельных компонент в исследуемом образце:

$$H_i = k_i \cdot P_{i0}, \quad (5.29)$$

где H_i – высота (или площадь) пика в масс-спектре, P_{i0} – весовое или относительное количество i -й компоненты в образце, k_i – коэффициент пропорциональности.

Величина k_i зависит от того, какая часть анализируемой компоненты образца попала в детектор и была зарегистрирована. Коэффициент k_i является характеристикой чувствительности прибора и для каждого вида атомов имеет свое значение. Требуется, чтобы k_i оставался неизменным в течение измерения. Для проведения количественных измерений прибор калибруют с целью определения величины k_i .

Для получения ионов из атомов твердых летучих веществ используют процесс испарения. Для тугоплавких веществ применяют искровой разряд, лазерное облучение, ионную или электронную бомбардировку.

Количество материала в образце ограничено, так как:

- экспериментальная установка обычно обслуживается вручную, ее радиоактивное загрязнение не должно превышать нормы безопасной работы персонала;
- результат опыта может быть искажен из-за попадания в образец веществ из окружающей среды, в том числе оставшихся после предыдущих анализов.

Снижение массы вещества в образце уменьшает загрязнение прибора, что позволяет поддерживать его высокую чувствительность*.

В тонком источнике атомы образца превращаются в ионы, которые с помощью электрического поля направляют в анализатор. Для исследования образцов тяжелых элементов широко используются термоэмиссионные источники ленточного типа. В таком источнике анализируемое вещество наносят на ленту-испаритель, ионизация происходит вблизи ленты-ионизатора.

В настоящее время используются источники магазинного типа, в которые одновременно помещают несколько образцов для их последовательных анализов. При этом достигается экономия времени на замену и откачку.

В начале анализа, при разогреве образца, в результате преимущественного испарения легких изотопов состав элемента в паре отличается от его состава в образце (так называемая дискриминация по массе, эффект усиливается для малых образцов). Лишь спустя некоторое время в паре устанавливаются истинные изотопные отношения. Из-за выгорания образца ток ионов уменьшается со временем. Эти факторы могут вносить систематические ошибки в результаты анализов.

Для контроля за дискриминацией по массе к анализируемому веществу можно подмешать индикатор, содержащий два различающихся по массе и отсутствующих в образце изотопа: $^{233}\text{U} + ^{236}\text{U}$ при анализе уранового образца и $^{242}\text{Pu} + ^{244}\text{Pu}$ при анализе плутониевого. Измерив масс-спектр смеси, можно по относительной интенсивности линий указанных изотопов оценить эффект дискриминации и откорректировать результат анализа.

Ионы из источника попадают в анализатор, где сканирование масс-спектра можно производить магнитным полем. В зависимости от изменений поля меняются траектории движения ионов, так что в неподвижный детектор попеременно попадают ионы разных масс. Вместо медленного сканирования магнитным полем можно применить быстрое сканирование с помощью изменений ускоряющего ионы электрического поля в источнике. Сканирование электриче-

* Изотопическая чувствительность – отношение фонового тока ионов в интервале спектра масс $M \pm 1$ к току ионов с массой M .

ским полем чаще применяют, когда диапазон различий масс ионов мал, магнитным полем – когда широк.

Для регистрации ионов применяют разные детекторы и режимы измерений: токовый – при анализах больших образцов, импульсный – малых. В качестве детекторов часто используют электронные умножители (ВЭУ) с коэффициентом усиления сигнала $\sim 10^6$, а также цилиндры Фарадея.

В настоящее время получили распространение многоколлекторные детектирующие системы. Каждый детектор в них настроен на определенную массу ионов, система одновременно измеряет в образце содержание нескольких изотопов (до 9). Например, при анализах Pu сразу определяют содержание в нем изотопов с массами 238–244. Анализ проводится без сканирования. Применение многоколлекторной системы позволяет в несколько раз ускорить измерения.

Масс-спектрометрический анализ изотопного состава урана

Чистая фракция урана наносится на ленту. Ленты помещают внутри ионного источника масс-спектрометра, из объема источника откачивают воздух. При разогреве ленты образец испаряется, полученные путем термоионизации однозарядные ионы ускоряют и фокусируют с помощью электростатических ионных линз в масс-анализаторе. Задавая соответствующие изменения магнитного поля (полей) и/или ускоряющего потенциала, пучки ионов разной массы последовательно фокусируют на детектор.

Используя автоматический режим сканирования, один шлюз для введения образцов, высокоскоростную систему откачки и цифровую обработку данных, два оператора могут проанализировать 12–16 образцов за день, однако более реально 7–9 образцов за день.

Для контроля качества измерений необходимо, по крайней мере, один раз на протяжении серии анализов проводить анализ эталонного образца с обогащением, близким к обогащению измеряемого материала.

Масс-спектрометрия – наиболее предпочтительный и широко используемый метод контроля изотопной композиции урана. Для анализа требуется от 10^{-8} до 10^{-5} г U в зависимости от чувствительности инструмента.

Поверхностно-ионизационная масс-спектрометрия является наиболее распространенным методом и для разрушающих анализов изотопного состава Pu. Количество плутония, требуемое для анализов, составляет от 10^{-9} до 10^{-6} г. Случайные погрешности анализа изотопного состава образца Pu представлены в табл. 5.15.

Таблица 5.15

Случайные погрешности анализа изотопного состава образца Pu методом масс-спектрометрии

Относительная концентрация, %	Относительная погрешность, %
0,01 ^{238}Pu	20
93,8 ^{239}Pu	0,10
5,8 ^{240}Pu	0,26
0,3 ^{241}Pu	0,81
0,03 ^{242}Pu	7,1

Метод изотопного разбавления

Для определения количества m_x элемента Z в образце исследуемого вещества используют метод изотопного разбавления. Изотопный состав этого элемента x_i должен быть известен (ранее измерен).

Метод основан на применении индикатора-навески того же элемента, но с изотопным составом, отличающимся от состава элемента в исследуемом образце. В раствор образца исследуемого материала добавляют определенное количество индикатора m_0 с изотопным составом x_i^0 . После их смешивания берут пробу. Изотопный состав элемента в пробе $\bar{x}_i$ отличается от состава в образце x_i и индикаторе x_i^0 :

$$\sum_i x_i = \sum_i x_i^0 = 1; \quad (5.30)$$

$$\bar{x}_i = \frac{1}{A_i} \cdot [m_x x_i + m_0 x_i^0] \Big/ \sum_i \frac{1}{A_i} \cdot [m_x x_i + m_0 x_i^0], \quad (5.31)$$

где A_i – атомная масса i -го изотопа элемента Z .

Отношение содержаний изотопов i и j в смеси равно:

$$\bar{x}_i / \bar{x}_j = \frac{1}{A_i} \cdot [m_x x_i + m_0 x_i^0] \Big/ \frac{1}{A_j} \cdot [m_x x_j + m_0 x_j^0], \quad (5.32)$$

откуда получают формулу для определения m_x :

$$m_x = m_0 x_i^0 \left(1 - \frac{\bar{x}_i x_j^0 A_i}{\bar{x}_j x_i^0 A_j} \right) \Big/ x_i \left(\frac{\bar{x}_i x_j A_i}{\bar{x}_j x_i A_j} - 1 \right). \quad (5.33)$$

Для смешивания образца и индикатора применяют операции, которые необходимы, чтобы U (Pu) из образца и индикатора приобрели одинаковые свойства и в последующих превращениях вели себя идентично. Для этого применяют многократные окислительно-восстановительные циклы.

Масс-спектрометрия изотопного разбавления (IDMS) наиболее часто используется для определения U и Pu (и их изотопных композиций) при переработке топлива.

Memod Resin-bead

Этот метод специально приспособлен для определения U и Pu в высокоактивных растворах отработавшего реакторного топлива. Его применяют для случаев, когда образец должен быть перемещен на большое расстояние из лаборатории в лабораторию. При этом не требуется защиты от излучения образца. Процедура проведения анализа представлена на рис. 5.27.

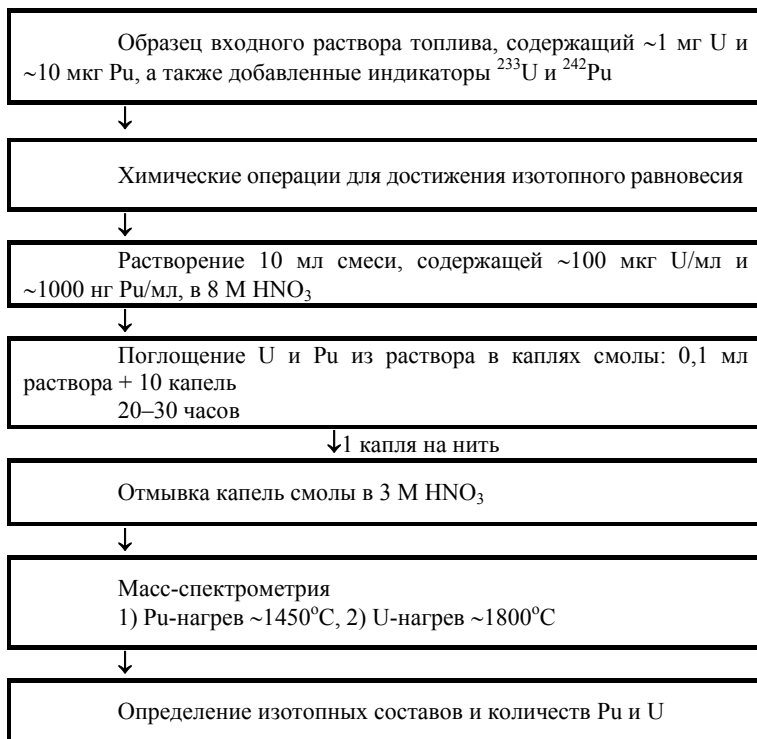


Рис. 5.27. Схема анализа по методу Resin-bead. Точность результатов может достигать 0,6% для U, 0,9% для Pu

5.4. Комплексное применение методов измерений ЯМ

Ранее были рассмотрены наиболее часто применяемые методы измерений ЯМ. Область применения каждого метода ограничена. Для решения каждой задачи существует несколько различных способов.

Все методы можно условно разделить на взаимозаменяющие и взаимодополняющие. Так для определения содержания урана в образце ЯМ можно использовать титрование по методу Дэвиса–Грэя, масс-спектрометрию с изотопным разбавлением, денситометрию, РФА.

Взаимодополняющими являются методы гамма-спектрометрии и счета нейтронных совпадений, которые совместно позволяют определить содержание плутония в образцах ЯМ. Еще один пример – с помощью метода титриметрии изготавливают эталоны для калибровки систем неразрушающих измерений методом денситометрии и РФА.

Применение нескольких разных методов для измерения какого-либо параметра ЯМ позволяет повысить достоверность общего результата за счет взаимной компенсации возможных методических погрешностей (см. схему комплексного анализа плутония на заводе в Селлафилде на рис. 5.28).

Одновременное применение нескольких методов ведет к объединению их оборудования в одной установке, к созданию измерительных комплексов–станций.

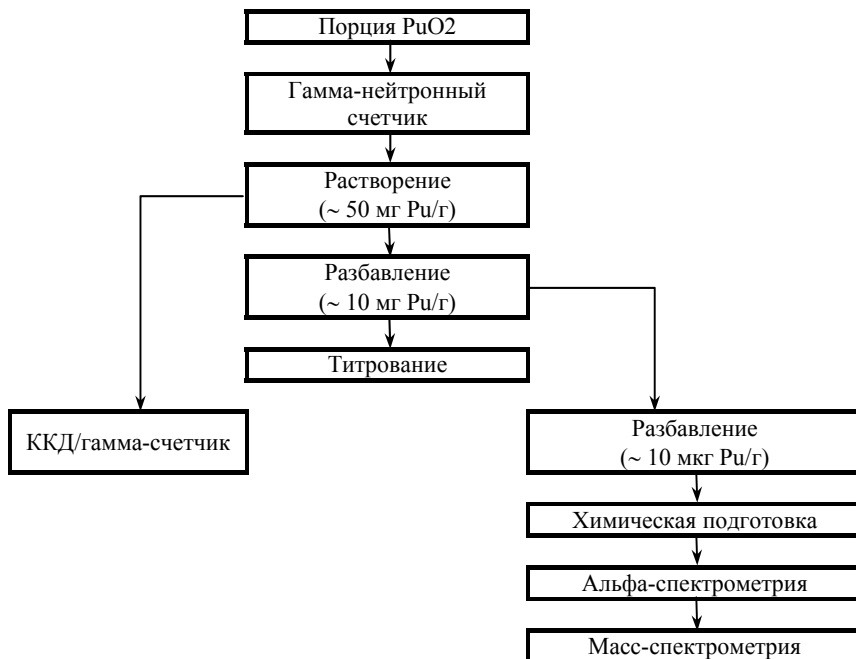


Рис. 5.28. Схема комплексного анализа плутония

В заключение приводится перечень применяемых в настоящее время методов измерения ядерных материалов (табл. 5.16).

Таблица 5.16

Основные методы анализа ЯМ, используемые в аналитических лабораториях

Метод анализа	Анализируемый элемент или изотоп	Тип материала	Погрешность, %	
			случайная	систематическая
Элементный анализ				
Титрование по методу Дэвиса–Грэя	U	U, U–Pu, U–Th	0,05	0,05
Титрование по методу Макдональда–Саваджа	Pu	Pu материалы	0,1	0,1
Кулонометрия	Pu	Материалы из чистого Pu	0,05	0,05
Гравиметрия со сжиганием	U, Pu	Оксиды U, оксиды Pu	0,05	0,05
Денситометрия на К-крае поглощения	U, Th, Pu	U, Pu, U–Pu, U–Th	0,2	0,2
РФА	Pu	Pu материалы	0,2	0,2
РФА с разделением фотонов по длине волны	Pu, U	Оксиды чистого U и Pu, MOX-топливо	0,3	0,3
Изотопный анализ				
Масс-спектрометрия с изотопным разбавлением	U, Pu	Растворы отработавшего топлива, Pu и U–Pu материалы	0,1	0,1
Термоионизационная масс-спектрометрия	Изотопы U и Pu	Все Pu и U материалы, растворы отработавшего топлива	0,05	0,05
Гамма-спектрометрия с детекторами высокого разрешения (Ge-детекторы)	Am, Np, изотопы Pu	Чистые U и Pu материалы	0,5–2,0	0,5–2,0
Гамма-спектрометрия (NaI-детекторы)	²³⁵ U	Низкообогащенные U материалы	0,2–0,5	0,2–0,5
Альфа-спектрометрия	²³⁸ Pu	Pu материалы	0,2	0,3
Лазерная флуориметрия	<u>Np</u>	Pu материалы	2,0	2,0
Спектрофотометрия Pu	Pu	Pu, U–Pu	0,2	0,2

ГЛАВА 6 ГЛАВНЫЕ УЧЕТНЫЕ ПРОЦЕДУРЫ

6.1. Процедуры передачи ЯМ

Разница отправитель–получатель

Существует классическая задача: пусть имеется брус масла весом 28 кг. Требуется разделить это масло на 280 кусков по 100 г, используя весы, на которых 100-граммовые массы измеряются с погрешностью плюс–минус 5 г. Вопрос: можно ли это сделать? То есть, можно ли из 28 кг масла нарезать 280 кусков по 100 г, имея такие весы.

Эта задача приводится во многих высших коммерческих учреждениях мира в качестве демонстрации существования разницы данных отправителя и получателя.

Для решения этой задачи проводились эксперименты на различных продавцах: опытных и начинающих. Ответ на этот вопрос оказался следующим. На весах с ценой деления 5 г не профессионал нарезает, как правило, несколько меньше, чем положено: 274–278 кусков. А профессионал, наоборот, нарезает чуть больше требуемого: 282–286 кусков.

Причина такого расхождения заключается в разном поведении людей, решающих эту задачу, а именно: продавец–профессионал понимает, что при взвешивании имеются погрешности, в том числе систематические, т.е. параметры самого измерительного оборудования во времени меняются. Весы стареют, ржавеют (окисление, например, происходит), или еще что–нибудь. Понимание этого приводит к тому, что продавец–профессионал для того, чтобы сделать 280 кусков кладет в каждый кусок чуть–чуть меньше, чем сто граммов, но в рамках разрешенных пяти граммов.

А непрофессионал старается сделать точно сто, немножечко перекладывая сначала, так как если сделать меньше 100 г – могут наказать. А дальше получается приведенная выше статистика.

Подобного рода эксперименты можно поставить и у себя. После чего вы убедитесь, что там, где есть неопределенность данных (как, например, цена деления в 5 г), на результат измерения воздействуют вторичные факторы, в том числе, менталитет человека, произ-

водящего измерения. Менталитет продавца заключается в том, что он не может продавать себе в убыток.

Вот эта задача (и соответствующие эксперименты) связаны с понятием разницы в данных отправителя и получателя (так называемая, *shipper–receiver difference*). Правильный отправитель всегда отправляет больше, чем получает правильный получатель. У них разный менталитет.

Ситуация в этой области такова. Существует это правило как некий закон человеческой природы, который бухгалтерской системой не учитывается. А, по сути, это правило реализуется через нормы технологических потерь. То есть узаконенные проценты ядерных материалов, которые можно списать с баланса.

Правильной же является система, в которой всегда материала отправителя больше, нежели его получает получатель. Причем этот материал, естественно, в пути не расхищается, с ним ничего не делается. Это мера определенности знаний о том, что происходит на самом деле. Необходимо считаться с тем, что знания не абсолютны. А разница является случайной величиной и определяется качеством систем измерений, используемых отправителем и получателем.

Масштаб эффекта разницы «отправитель–получатель»

Если проанализировать технологический цикл изготовления ядерных материалов для ядерной энергетики и соответствующие передачи, можно получить, что только на разности данных отправителя и получателя должно было «деваться в никуда» ориентировочно до 1 % материалов, используемых как топливо ядерных реакторов.

Оценим, например, в этих условиях масштаб эффекта разницы «отправитель – получатель» для топлива реакторов типа ВВЭР. Примем ориентировочно, что загрузка каждого реактора ВВЭР порядка 70 т двуокиси урана с обогащением немногим выше 4 %, а их число ~ 10. Тогда абсолютный масштаб эффекта разницы «отправитель–получатель» только по этим реакторам составит ~ 200 кг по урану-235. Спрашивается, где весь этот материал? Это мера неопределенности наших знаний.

Допустимые расхождения данных отправителя и получателя

Какая же разница между отправителем и получателем допустима у нас в стране?

Расхождение данных отправителя и получателя о массе ядерных материалов при их передачах определяется как разница между значениями масс, указанных отправителем (паспортных данных) и полученных в процессе подтверждающих измерений получателем.

Напомним, что доверительный интервал – это интервал, который с заданной вероятностью покрывает интересующий нас параметр (случайная величина).

Пусть S – отгруженная величина ЯМ, а R – полученная величина. S и R являются случайными величинами, измеренными отправителем (shipper) и получателем (receiver) и имеют соответствующие погрешности σ_S и σ_R .

Для разницы отправитель – получатель ($S-R$) среднеквадратичное отклонение от его математического ожидания

$$\sigma_{S-R} = (\sigma_S^2 + \sigma_R^2)^{1/2},$$

если считается, что измерения S и R независимые.

Если $S-R$ нормально распределенная случайная величина, $M(S-R)$ – ее математическое ожидание, то интервал $M(S-R) \pm 3\sigma_{S-R}$ является 99 %-ным доверительным интервалом.

Согласно правилам ОПУК, если разница ($S-R$) отличается от нуля в пределах ее 99 %-ного доверительного интервала, то можно ее рассматривать как следствие погрешностей систем измерения ЯМ отправителя и получателя. При этом ЯМ ставятся на учет получателем по данным поставщика. Это связано с тем, что, как правило, данные поставщика являются результатом учетных измерений ЯМ, а получателя – подтверждающих измерений.

Если разница ($S-R$) выходит за пределы 99 %-ного доверительного интервала, то должны быть приняты меры: либо по согласованию этих данных, либо в случае подтверждения значимых расхождений поставщика и получателя по выявлению причин утраты/появления излишков ЯМ. При этом получатель направляет специальные отчеты в государственные органы управления использования атомной энергии и в орган регулирования безопасности использования атомной энергии.

Как осуществляют передачу ядерных материалов

При передачах ЯМ выполняют следующие операции (ОПУК).

1. Передача ЯМ должна допускаться только при наличии у отправителя и получателя лицензии на обращение с ЯМ и договора с Росатомом на передачу ЯМ в пользование.

2. Отправитель направляет получателю предварительное уведомление об отправке ЯМ, которое является обязательным, поскольку любые размещения ЯМ связаны с вопросами обеспечения ядерной и радиационной безопасности.

3. Отправитель prepares и измеряет отправляемый материал и готовит соответствующие приходно–расходные и накладные документы. В накладных документах указываются атрибутивные признаки ЯМ, масса брутто контейнеров и др. Сведения о характеристиках ЯМ (паспортные данные) отправляются специальной почтой, либо совместно с грузом.

4. Передача ЯМ осуществляется в присутствии представителей поставщика и получателя. Представитель получателя осуществляет проверку атрибутивных признаков ЯМ:

- внешний осмотр и проверку количества контейнеров с ЯМ;
- проверку устройств индикации вмешательства, примененных к транспортному средству и контейнерам с ЯМ;
- соответствие идентификаторов контейнеров и устройств индикации вмешательства накладным документам.

5. При необходимости получатель осуществляет подтверждающие измерения веса–брутто контейнеров с ЯМ и других параметров ЯМ.

Необходимость, вид и объем подтверждающих измерений определяются получателем, учитывая вид передачи (между ЗБМ одного предприятия, между предприятиями, экспорт–импорт), категорию передаваемых ЯМ, тип контейнеров и УИВ, качество измерений отправителя.

6. Если подтверждающие измерения не выполнены в полном объеме, производится предварительная приемка ЯМ и их оформление в приходно–расходных документах (постановка на учет).

Окончательная приемка и постановка на учет ЯМ производится не позднее 10 суток после получения ЯМ. За этот срок должны быть выполнены все требуемые подтверждающие измерения ЯМ, соотнесены с данными поставщика и оценена значимость ($S-R$) разницы.

6.2. Физическая инвентаризация и баланс ЯМ

Знания относительно ядерных материалов предполагают, что мы располагаем данными о наличных количествах ЯМ, находящихся в ЗБМ, и о входных и выходных потоках ЯМ в течение определенного периода времени, называемого межбалансовым периодом. Передачи ЯМ и физические инвентаризации ЯМ являются главными учетными процедурами, обеспечивающими такие знания о ЯМ. Эти процедуры подразумевают, что в течение межбалансового периода измеряют все входные и выходные потоки ЯМ, а в конце межбалансового периода измеряют все наличные ЯМ.

Процедуры передачи ЯМ рассмотрены в первой части главы 6. В данном разделе рассмотрена процедура физической инвентаризации (ФИ) ЯМ и построение баланса ЯМ в ЗБМ [1].

Детальное изучение процедуры ФИ должно дополняться практическими занятиями, на которых моделируются отдельные стадии ФИ. При этом моделирование ФИ можно проводить, не обязательно используя ядерные материалы (например, при взвешивании вместо ЯМ можно использовать речной песок). Далее процедура ФИ охарактеризована в целом.

Некоторые вводные определения

Стратификация – группирование учетных единиц с близкими характеристиками.

Вид ядерного материала – ядерный материал, обладающий одинаковым или близким изотопным составом (уран одинакового или близкого обогащения, плутоний одинакового или близкого изотопного состава).

Список наличных количеств (СНК) ЯМ – перечень наличных ЯМ на момент данной ФИ с указанием их количеств, составленный на основании учетных данных.

Список фактически наличных количеств (СФНК) ЯМ – перечень фактически наличных ядерных материалов с указанием их количеств, определенный в результате физической инвентаризации.

Отрезок времени между двумя последовательными ФИ называется межбалансовым периодом.

Для удобства согласования результатов физической инвентаризации любой материал, поступивший или отправленный из ЗБМ,

образованный, имевшийся в начале или оставшийся в конце межбалансового периода, относится либо к активным, либо пассивным материалам. К активным относятся продукты, проходившие за последний межбалансовый период или во время выполнения инвентаризации учетные измерения. В частности, к активным ядерным материалам относятся продукты, подвергшиеся в данный межбалансовый период переработке; произведенные продукты; отходы, образовавшиеся в данный межбалансовый период; продукты, для которых потребовались учетные измерения, чтобы создать новый паспорт и т.д. Если активные ЯМ проходили учетные измерения до текущей ФИ, то они подлежат подтверждающим измерениям во время инвентаризации.

К пассивным относятся продукты, оставшиеся к моменту инвентаризации в неизменном состоянии с момента предыдущей инвентаризации; учетные измерения для которых не проводились; находящиеся под средствами контроля доступа (СКД), или имеющие такую оболочку, которая сама может рассматриваться как СКД, и СКД подтвердили отсутствие доступа. В том числе, к пассивным относятся материалы, поступившие в ЗБМ в межбалансовый период, которые приняты на учет по данным поставщика и находятся под средствами контроля доступа с момента поступления до момента инвентаризации. Во время инвентаризации пассивные материалы подлежат подтверждающим измерениям.

Цели физической инвентаризации

В новой системе учета (система измеряемого материального баланса) является обязательным периодическое проведение физических инвентаризаций в ЗБМ.

Физическая инвентаризация (ФИ) – определение фактически наличного количества ЯМ путем измерений. Таким образом, цель физической инвентаризации сформулирована в ее определении. Кроме того, во время ФИ проверяют учетные документы, подводят баланс по каждому виду ЯМ и, в конечном итоге, устанавливают есть ли аномалии либо недостатки и нарушения в учете и контроле ЯМ.

Физическая инвентаризация является, по сути, масштабным физическим экспериментом и включает целый ряд этапов:

- организационные меры по проведению ФИ;

- планирование инвентаризации;
- подготовка ЗБМ к проведению физической инвентаризации;
- проведение ФИ;
- анализ и оформление результатов физической инвентаризации.

В качестве основных элементов, входящих в процедуру ФИ, можно отметить следующие:

- составление СНК на момент инвентаризации и его выверка с учетными документами;
- измерение атрибутивных признаков и параметров ЯМ;
- оценка величины неизмеренных потерь и ее погрешности;
- определение инвентаризационной разницы и ее погрешности для каждого вида ядерного материала.

Имеются в виду следующие измерения:

- проверка наличия и целостности ЯМ;
- идентификация ЯМ;
- проверка целостности и идентификации пломб и печатей;
- подсчет имеющихся учетных единиц;
- взвешивание учетных единиц;
- проведение неразрушающего анализа ЯМ;
- отбор проб и их анализ.

Виды физических инвентаризаций ЯМ

Физическая инвентаризация может быть начальной, периодической (с определенной частотой их проведения) и специальной. При начальной либо периодической ФИ определяют фактическое количество всех видов ЯМ, находящихся в ЗБМ (в том числе ЯМ, полученных во временное пользование).

При специальной ФИ могут определять фактически наличное количество отдельных видов ЯМ, либо фактически наличное количество ЯМ в части ЗБМ (по всем или по некоторым видам ЯМ). Специальные ФИ проводят в ЗБМ при:

- смене МОЛ;
- коллективной (бригадной) материальной ответственности, а именно при смене руководителя коллектива (бригадира), при выбытии из коллектива (бригады) более 50 % его членов, а также по требованию хотя бы одного члена коллектива;
- по решению руководства предприятия;

- обнаружении аномалий в учете и контроле ЯМ;
- возникновении нештатной ситуации (недостача единицы хранения, несанкционированный доступ в ЗБМ, авария и другие чрезвычайные обстоятельства);
- реорганизации предприятия со сменой МОЛ.

Частота инвентаризаций

В основе подхода к определению частоты ФИ лежат представления о привлекательности и общих количествах ядерных материалов, то есть категории ЯМ.

Так, частота проведения физических инвентаризаций для разных ядерных материалов, скажем, плутония в металлической форме в значительном количестве и низкообогащенного урана в форме двуокиси (или ядерного материала в облученном топливе) будут разные. В частности, в отношении ядерных материалов высшей категории на участках их переработки физическая инвентаризация по рекомендации Министерства энергетики США должна применяться не реже, чем раз в два месяца. То есть каждые два месяца должен осуществляться 100 %-ный контроль фактически наличных ядерных материалов.

Применительно к зонам баланса материалов, которые могут быть определены в хранилищах отработанного топлива атомных станций, требования, конечно, гораздо менее жесткие. И связано это с тем, что отработанное топливо само по себе обладает свойством самозащитности вследствие достаточно высокой активности.

У нас в стране принята следующая частота инвентаризаций в зависимости от категории ядерных материалов, находящихся в ЗБМ (ОПУК):

- для ЗБМ с материалами категории 1 – 1 календарный месяц;
- для ЗБМ с материалами категории 2 – 3 календарных месяца;
- для ЗБМ с материалами категории 3 – 6 календарных месяцев;
- для ЗБМ с материалами категории 4 – 12 календарных месяцев;
- по всем ядерным материалам предприятия – 12 календарных месяцев.

Частота физических инвентаризаций для ЗБМ, содержащих ядерные материалы, инвентаризация которых требует больших дозовых нагрузок для персонала, может быть уменьшена по согласованию с Ростехнадзором и Росатомом России на основании пред-

ставленного обоснования. При этом, как правило, применяют дополнительные технические меры контроля доступа к ядерным материалам (например, БФС–1,2 в ГНЦ ФЭИ).

Организационные меры на предприятии по проведению ФИ

Перед началом каждой ФИ издается приказ руководителя предприятия об ее проведении. Приказ содержит основные организационные мероприятия, необходимые для проведения физической инвентаризации на предприятии. В том числе определяются:

- ЗБМ, в которых проводится ФИ;
- персональный состав инвентаризационной комиссии;
- сроки подготовки оборудования и приборов, необходимых для проведения инвентаризации;
- сроки подготовки инвентаризируемых объектов для проверки;
- сроки проведения инвентаризации и дата представления отчетных документов с результатами ФИ.

Для подготовки, проведения и анализа результатов ФИ ЯМ на предприятии создаются инвентаризационные комиссии: центральная инвентаризационная комиссия (ЦИК) и рабочие инвентаризационные комиссии (РИК) в подразделениях предприятия.

РИК планирует ФИ, готовит ЗБМ и проводит в установленные сроки физическую инвентаризацию. В ходе инвентаризации члены РИК:

- выявляют и регистрируют недостатки, допущенные при учете, хранении, использовании ЯМ, и вносят предложения по их устранению;
- доводят до ответственных руководителей выявленные недостатки по учету и хранению ЯМ.

ЦИК осуществляет методическое руководство организацией и проведением инвентаризаций в зонах баланса ЯМ предприятия (координация деятельности и консультации). При проведении ФИ особенно важны меры ядерной и радиационной безопасности. Поэтому эти меры должны быть определены в соответствующей инструкции по проведению инвентаризации и согласованы со службой ЯБ и РБ организации.

В состав РИК подразделения включаются подготовленные сотрудники, имеющие допуск к работам с ЯМ, а также к учетной и технической документации. Как правило, в состав РИК входят:

- председатель (руководитель подразделения);
- представители служб ядерной безопасности и дозиметрического контроля;
- представители службы компьютерного учета СУиК;
- специалисты по измерениям и обеспечения их качества;
- специалисты по статистическому анализу;
- представитель ЦИК;
- представители службы безопасности и другие.

Материально ответственное лицо присутствуют при работе комиссии, однако в состав инвентаризационной комиссии не включается.

Планирование ФИ

Процедура проведения физических инвентаризаций на предприятиях – чрезвычайно серьезная и она предполагает обязательное наличие плана проведения работ. В отношении ФИ хорошо подходит фраза, которая по-английски звучит так: *Failing to plan is planning to fail* (отсутствие планирования – это планирование провала).

Инвентаризационная комиссия оценивает объем работ по ФИ и разрабатывает план ее проведения. План ФИ представляет собой полное описание последовательности всех операций с ЯМ, используемые средства и представляемые результаты. Таким образом, план представляет собой временной график производства работ с указанием ответственных исполнителей по каждому разделу плана. Планирование проведения ФИ включает следующие важные этапы:

- получение зарегистрированных в учетной документации инвентарных количеств ЯМ в ЗБМ для выверки с данными из других источников (сопроводительных листов, накладных, паспортов, сертификатов);
- распределение совокупности пассивных ЯМ на страты и расчет объема случайной выборки для каждой страты для подтверждающих измерений;
- определение прогнозируемых требований по измерениям;
- определение ответственных исполнителей работ и распределение обязанностей среди них;
- определение потребности в персонале;

- отбор ЯМ для учетных измерений;
- для подтверждающих измерений в плане указывают размеры выборок в зависимости от стратегии измерений и характеристик измерительных приборов;
- временной график и последовательность проведения измерений;
- расчет контрольных пределов значений инвентаризационной разницы и др.

План проведения ФИ – это большой пакет документов. Первые эксперименты, которые были проведены в РНЦ «Курчатовский институт» в этой области, показали, что разработка плана ФИ – серьезная и длительная процедура. Например, документация, описывающая всю процедурную часть, связанную с проведением начальной физической инвентаризации для одной установки, которая работает с балк-материалами (высокообогащенный уран), заняла том объемом несколько сот страниц. К сожалению, опыт проведения ФИ приводит к заключению, что создание некоего типового документа, который бы расписывал процедуры, достаточные для практического применения на установке, вряд ли возможно. Каждая установка требует создание своих процедурных документов на основе общих регламентов. Таким образом, требуется очень большая работа, связанная с планированием ФИ на установках. В этой связи важно отметить, что в настоящее время подготовлены рекомендации по порядку проведения ФИ на установках [1] и «Руководство и комментарии по применению ОПУК».

Подготовка предприятия к проведению физической инвентаризации

После получения приказа о проведении инвентаризации (до начала ФИ) в ЗБМ выполняются подготовительные работы. Они включают подготовку документации, ядерных материалов, технологического оборудования и приборов к проведению ФИ.

Все ЯМ, находящиеся в работе, приводят к виду, удобному для проведения инвентаризации. Например, упаковки с ЯМ приводят в положение, не затрудняющее осмотр оттисков пломб, прочтение их заводских номеров, номеров партий и т.д.

ЯМ, требующие проведения учетных измерений их количества и состава, формируются в виде отдельных учетных единиц.

Подготавливаются бланки инвентаризационной ведомости (табл. 6.1), необходимые для проведения инвентаризации. Пример бланка инвентаризационной ведомости приведен ниже. Готовятся бирки для обозначения материалов, прошедших инвентаризацию.

Производится зачистка оборудования и коммуникаций.

Подготавливается учетная и сопроводительная документация на имеющиеся в наличии ЯМ (паспорта, формуляры, сертификаты и др.). МОЛ сверяет данные по ЯМ в СНК с данными оперативных и учетных документов.

Метрологи производят проверку готовности всех приборов, предназначенных для измерений при проведении ФИ.

Измерения при проведении физической инвентаризации

Получаемая в результате проведения ФИ информация должна основываться на результатах измерений. Для проведения учетных и подтверждающих измерений состава и количества ЯМ применяют действующие на предприятии аттестованные методики с использованием поверенных средств измерений.

Таблица 6.1

Пример бланка инвентаризационной ведомости

№. бирки	Шифр учетной единицы	Идентификатор	Пломба/ печать	Учетный номер документа	Вес брутто	Вес тары	Вес нетто

Подтверждающие измерения (проверки) выполняются в отношении пассивных ядерных материалов, а также активных, которые проходили учетные измерения до текущей инвентаризации и с тех пор находившихся под средствами контроля доступа.

Подтверждающие измерения следующих атрибутивных признаков:

- наличие УЕ с соответствующим идентификатором (заводским номером, штриховым кодом);

- местоположение;
- целостность упаковки (контейнера);
- целостность УИВ и его идентификация.

Последние два атрибутивных признака свидетельствуют об отсутствии несанкционированного доступа к ЯМ.

Подтверждающие измерения направлены на выявление дефектных УЕ. Под дефектными УЕ понимают учетные единицы с характеристиками, которые не соответствуют учетным данным. Принимается, что измерения атрибутивных признаков подтверждают заявленные данные, если:

- УЕ с ЯМ находятся на местах, указанных в учетной документации;
- отсутствуют внешние повреждения УЕ;
- отсутствуют нарушения УИВ;
- информация, содержащаяся в штриховых кодах, совпадает с соответствующей информацией, содержащейся в учетной документации.

Как правило, измерения атрибутивных признаков ЯМ выполняют для всех учетных единиц в ЗЕМ.

Проверка наличия и соответствия учетным данным в пределах погрешности измерений материала УЕ:

- массы брутто/нетто;
- объема продукта;
- концентрации элемента и изотопа;
- массы ЯМ в продукте.

Проверка параметров двух последних позиций, обычно, выполняется с привлечением методов неразрушающего анализа.

Если при проверке разность измеренного значения и учетной величины не выходит за границы 99 % доверительного интервала, то принимается, что учетное значение указанной характеристики подтверждено. В противном случае учетная единица, содержащая данный ЯМ, рассматривается как дефектная. В этом случае проводится анализ и расследование полученного аномального расхождения и выполняются учетные измерения ЯМ.

Если к ЯМ применялись средства контроля доступа, то подтверждающие измерения материалов проводятся выборочно с использованием статистических методов расчета объема выборки.

Объем и вид подтверждающих измерений определяется в документах предприятия.

Учетные измерения. Во время инвентаризации выполняются учетные измерения тех характеристик активных ЯМ, которые не были выполнены до инвентаризации.

Порядок проведения физических инвентаризаций

Физическая инвентаризация – это процесс:

- нахождения всех учетных единиц;
- подтверждения их идентификации;
- подтверждения отсутствия несанкционированных действий с ЯМ;
- подтверждения/определения учетных значений параметров ЯМ.

При этом отсутствие подтверждения свидетельствует о наличии аномалии. В результате физическая инвентаризация не только подтверждает, что все материалы, учтенные в документации, имеются в наличии, но и удостоверяет, что все материалы, имеющиеся в наличии, учтены в документации.

Процедуры и способы проведения ФИ на предприятиях зависят от типа технологического процесса, количества и вида ядерных материалов в ЗБМ и определяются в плане проведения ФИ. Однако можно отметить некоторые общие условия. А именно:

- На время проведения ФИ работы в проверяемой ЗБМ, связанные с отправкой, получением, списанием (снятием с учета) ЯМ, а также с формированием новых УЕ, приостанавливают.

- Измерения во время инвентаризации должны проводиться в соответствии с разработанным временным графиком и последовательностью проведения измерений.

- Работы по инвентаризации ядерных материалов в ЗБМ проводятся не менее чем двумя лицами одновременно.

- Ядерные материалы при проведении инвентаризации должны находиться под контролем МОЛ данной ЗБМ.

В порядке регистрации учетных единиц в описи (СНК) ЯМ, находящихся в ЗБМ, РИК проверяет соответствие фактического наличия ЯМ учетным данным:

- проверяют фактическое наличие УЕ с ЯМ в ЗБМ;

- проверяют отсутствие внешних повреждений УЕ и отсутствие нарушения УИВ;

- выверяют идентификационные номера (если баркодные метки, то с применением считывателя) УИВ и УЕ;

- определяют фактическое количество ЯМ в ЗБМ путем их измерений (учетные и подтверждающие измерения);

- оценивают величину безвозвратных потерь и ее погрешность.

По результатам проведенной работы РИК составляет список фактически наличного количества ядерных материалов (СФНК ЯМ). Обо всех выявленных в процессе работы расхождениях (недостача, излишки, неправильное списание или оформление использованных в технологических процессах материалов и т.д.) РИК сообщает руководству предприятия.

Инвентаризацию заканчивают подведением материального баланса, оценкой ИР и погрешности ее определения для каждого вида ЯМ. Если в результате ФИ не установлена аномалия в учете и контроле ядерных материалов, то документально зарегистрированное наличное количество ядерного материала в ЗБМ используется в качестве наличного количества ядерного материала в ЗБМ на начало следующего межбалансового периода.

Оформление результатов физической инвентаризации

По результатам ФИ составляются СФНК ЯМ, акты инвентаризации, содержащие заключение и рекомендации РИК, а также материально–балансовый отчет (МБО).

В СФНК для ЯМ в форме изделий, учитываемых по заводским номерам, указывают:

- номер бирки УЕ;
- обозначение изделия;
- идентификационный номер;
- учетный номер документа (паспорта, формуляра).

В СФНК для ЯМ в балк–форме, учитываемых по массе, указывают:

- номер бирки контейнера;
- шифр материала;
- идентификационный номер контейнера;
- масса (лигатурная и чистая);

- источник информации о массе ЯМ (номер паспорта, формуляра, акта взвешивания и др.).

В акт инвентаризации вносятся факты обнаружения аномалий (если в ходе инвентаризации они были обнаружены). При этом инвентаризационная комиссия формулирует рекомендации по их устранению. Установленная РИК аномалия подробно описывается в пояснительной записке, которая прикладывается к комплекту документов по проведению ФИ. В акте инвентаризации делаются выводы о значимости ИР. Акт подписывают председатель и все члены комиссии, проводившие инвентаризацию. С актом знакомятся руководитель подразделения и МОЛ.

По завершении инвентаризации составляется материально-балансовый отчет, который содержит данные по балансу ЯМ за межбалансовый период, включая значение инвентаризационной разницы и ее погрешности.

Стоимость проведения ФИ. Проблема начальных ФИ

Проведение физических инвентаризаций – чрезвычайно дорогостоящая процедура. Например, Министерство энергетики США, в ведении которого находится шесть национальных лабораторий и еще примерно три десятка ядерных производств, включая сборочно-разборочные производства в Pantex, промышленное ядерное производство в Hanford и другие, тратит на проведение физических инвентаризаций ежегодно миллионы долларов. И это в условиях, когда значительное количество материалов в американской ядерной промышленности на сегодняшний день находится именно в контейнерах, опечатанных, проверяемых на периодической или постоянной основе. Они тратят такие суммы в условиях, когда не весь материал нужно измерять и когда начальные инвентаризации были проведены много лет назад.

Масштабы затрат на ФИ в России, когда требуются начальные физические инвентаризации, а количества ЯМ не менее грандиозные, чем в США, трудно переоценить.

Во время начальной ФИ необходимо промерять все ядерные материалы. В России большое количество организаций, где требуется проведение начальных ФИ.

Эксперименты специалистов РНЦ «Курчатовский институт», показали [2], что проведение начальных физических инвентариза-

ций только на двух установках этого института потребовало около года работы. При этом встает много различных проблем. А суммарные затраты труда на проведение начальной физической инвентаризации в РНЦ «Курчатовский институт» могут быть на уровне 60–70 человеко–лет. Таким образом, первоначальная ФИ в Курчатовском институте – это процесс, который может длиться несколько лет.

Надо сказать, что решающий путь к существенному снижению затрат труда на проведение ФИ заключается в максимальном применении СКД–средств (средства сохранения и наблюдения). Оценки показывают, что при использовании СКД–средств к ядерному материалу на установках Курчатовского института объем работ по проведению рутинных физических инвентаризаций (не начальной) может уменьшиться в несколько раз. Например, уменьшение этой величины в пять раз означает, что бригадой в 6–7 человек всю эту работу можно уже выполнить в течение ~ 2 лет.

Проблема кадров

Проблема кадров существует на многих предприятиях ядерного топливного цикла России. Поэтому надо признать, что кадровое обеспечение проведения в ближайшем будущем физических инвентаризаций ЯМ является достаточно тревожным вопросом. Правда, в дальнейшем, она может быть несколько смягчена за счет того, что после завершения начальных ФИ будет снижение общих затрат труда при условии применения СКД–средств.

В процессе проведения первых физических инвентаризаций выяснилось, что даже специалисты, которые создавали и создают реально действующие экономичные и безопасные ядерные установки, оказались не в состоянии без предварительного специального обучения разработать и применить процедуры, связанные с проведением физической инвентаризации. И это потому, что физическая инвентаризация фактически является своеобразным глобальным физическим экспериментом. Поэтому организованная система подготовки и повышения квалификации кадров в области СФЗУК ЯМ чрезвычайно важна для нашей страны.

Баланс ядерных материалов

Предположим, что на рассматриваемом объекте осуществляются периодические физические инвентаризации ЯМ (рис. 6.1). Пусть время T есть межбалансовый период.

Предположим, что мы знаем фактически наличное количество НК материала в данной зоне баланса материалов на момент проведения предыдущей физической инвентаризации. За межбалансовый период T в данной ЗБМ получено УВ материалов. Это то количество материалов, получение которых зарегистрировано в документах.

Аналогично, УМ – это количество материала, которое отправлено из данной зоны баланса материалов в период между физическими инвентаризациями.

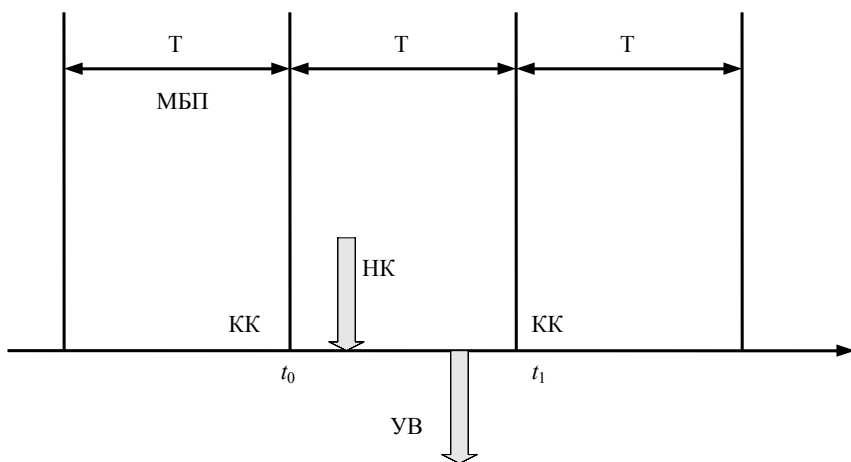


Рис. 6.1. Цикл подведения баланса ЯМ в ЗБМ

Зарегистрированное количество ядерных материалов – это количество ядерных материалов, которое должно находиться в ЗБМ по документам на конкретную дату. Очевидно, что конечное зарегистрированное количество ЗК материалов в данной зоне баланса материалов на момент проведения текущей физической инвентаризации есть:

$$\text{ЗК} = \text{НК} + \text{УВ} - \text{УМ}. \quad (6.1)$$

Фактически наличное количество КК ядерных материалов – это количество материалов, зафиксированное в процессе проведения текущей физической инвентаризации путем измерений и подсчета.

Разница между фактическим наличным количеством КК и зарегистрированным количеством материала ЗК на момент текущей ФИ называется инвентаризационной разницей (ИР). Подведение баланса ядерных материалов заключается в нахождении ИР.

Следующее уравнение дает формальное определение инвентаризационной разницы ИР:

$$\text{ИР} = \text{КК} - \text{ЗК} = (\text{КК} + \text{УМ}) - (\text{НК} + \text{УВ}). \quad (6.2)$$

Уравнение (6.2) является основным балансным соотношением. Это уравнение должно решаться на периодической основе для каждой зоны баланса материалов.

Статистическая интерпретация баланса ядерных материалов

Инвентаризационная разница неизбежна вследствие неизбежных погрешностей системы измерений. Она может быть как со знаком плюс, так и со знаком минус.

В общем случае значения НК, КК, УВ, УМ в уравнении (6.2) определяются экспериментальным путем и содержат систематические и случайные ошибки измерений. Измеренные значения НК, КК, УВ, УМ являются неотрицательными случайными величинами, имеющими некоторые распределения плотности вероятностей. Итоговое значение ИР также является случайной величиной, которая может быть положительной, отрицательной или равной нулю, обладающей некоторым распределением плотности вероятности, порожденным композицией распределений плотности вероятностей величин НК, КК, УВ, УМ.

Для определения величины среднеквадратичной погрешности ИР предпочтительно использовать метод «переноса погрешностей измерений», состоящего в расчете погрешности инвентаризационной разницы, исходя из погрешностей измерения величин, входящих в уравнение баланса ЯМ. При этом принимаются во внимание случайные и систематические составляющие погрешностей и возможные корреляции погрешностей измерений характеристик ЯМ.

Подведение баланса по пассивным ядерным материалам

Подведение баланса означает установление соответствия по числу продуктов, по атрибутивным признакам и параметрам ЯМ.

Аномалией в учете и контроле пассивных ЯМ является:

- недостаток/излишек учетной единицы;
- нарушение соответствия заявленного и реального атрибутивного признака ЯМ;
- неподтверждение в результате выполнения измерения параметра ЯМ.

Об отсутствии аномалий у пассивных ядерных материалов свидетельствует совпадение всех позиций в списках СНК и СФНК на момент инвентаризации. Совпадение позиций автоматически подтверждает баланс пассивных ЯМ как в штуках УЕ, так и в единицах массы, а также равенство нулю ИР и погрешности ИР для них.

Подведение баланса по активным ядерным материалам и определение инвентаризационной разницы

В общем случае для активных ЯМ заключение о выполнении баланса на основании совпадения СНК и СФНК по каждой УЕ сделать невозможно, так как в течение МБП активные ЯМ подвергаются изменениям. Поэтому, в случае активных ЯМ рассматривается интегральный критерий соответствия учетного и физического остатка ЯМ в ЗБМ на момент текущей ФИ. Таким критерием выступает величина инвентаризационной разницы.

Подведение баланса активных ЯМ подразумевает установление соответствия СНК и СФНК как по числу продуктов, так и по атрибутивным признакам. Кроме того, для активных ядерных материалов должна быть определена инвентаризационная разница и ее предельные значения. Для корректной оценки величины инвентаризационной разницы следует учитывать отходы, потери, безвозвратные потери, отложения ЯМ в технологическом оборудовании.

Уравнение (6.2) позволяет подводить баланс по совокупности активных ЯМ в единицах массы ядерного материала. При этом баланс надо подводить по каждому виду ядерного материала: уран, уран-235, уран-233, плутоний и т.д.

Вывод об отсутствии аномалий в учете и контроле ядерных материалов делается на основании проверки числа и атрибутивных

признаков всех активных ЯМ и величины ИР, полученной в данной инвентаризации.

Для активных ЯМ аномалией является расхождения СНК и СФНК по количеству УЕ или их атрибутивным признакам. А интегральным критерием обнаружения аномалии является превышение модулем инвентаризационной разницы, либо ее утроенной среднеквадратической погрешности, либо значений любой из следующих величин (при доверительной вероятности 0,95):

- 2 % от суммы зарегистрированного количества данного ядерного материала и всех увеличений его количества за МБП – для промышленных ядерных установок;
- 3 % от такой же величины – для исследовательских ядерных установок;
- 3 кг – по плутонию, урану-233 для ЗБМ, содержащих ядерные материалы категорий 1, 2;
- 8 кг – по урану-235 для ЗБМ, содержащих ядерные материалы категорий 1, 2 и 3;
- 70 кг по урану-235 – для урана с обогащением менее 20 %.

Пределы допустимых отклонений ИР на основе учета погрешностей измерений ЯМ

Предположим, что ИР характеризуется нормальным распределением. Обозначим

$$S = \sigma_{\text{ИР}} = (\text{Var}(\text{ИР}))^{1/2} = (\sigma_{\text{НК}}^2 + \sigma_{\text{КК}}^2 + \sigma_{\text{УВ}}^2 + \sigma_{\text{УМ}}^2)^{1/2}. \quad (6.3)$$

Для анализа допустимых отклонений ИР рассматриваются два интервала. Интервал $(-2 \sigma_{\text{ИР}}, +2 \sigma_{\text{ИР}})$ является 95 %-ным доверительным интервалом. А интервал $(-3 \sigma_{\text{ИР}}, +3 \sigma_{\text{ИР}})$ является 99 %-ным доверительным интервалом:

а) 95 %-й доверительный интервал. Принято считать значения ИР, выходящие за диапазон $(\pm 2 \sigma_{\text{ИР}})$, статистически значимыми. Границы этого интервала обычно используются в качестве предупредительных границ (warning limit) разброса ИР. Для такого интервала частота появления ложной тревоги – 5 %;

б) 99 %-й доверительный интервал. Границы этого интервала обычно используются в качестве предельного уровня для подачи

сигнала тревоги (alarm limit). Для такого интервала частота появления ложных сигналов – 1 %.

Графическая иллюстрация понятия предела допустимых отклонений ИР приведена на рис. 6.2, где дан пример карты контроля ИР по допустимым отклонениям. Выход за границу «Alarm» рассматривается как аномалия и говорит о необходимости подробного анализа причин.

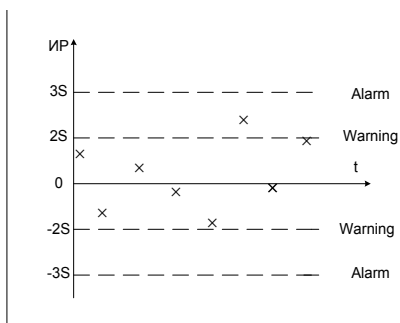


Рис. 6.2. Карта контроля баланса ЯМ в ЗБМ (S – одна сигма ИР)

Модели определения допустимых отклонений ИР на основе учета погрешностей измерений ЯМ

Для определения результирующей погрешности в балансе ЯМ, то есть погрешности ИР, требуется модель, соответствующая условиям проведения данной физической инвентаризации в рассматриваемой ЗБМ (модель должна «чувствовать» имеющиеся неопределенности).

На рис. 6.3 приведены примеры моделей расчета пределов, которые неадекватны имеющемуся статистическому разбросу ИР.

Рис. 6.3,а демонстрирует случай завышенной оценки допустимой статистической неопределенности ИР, когда существуют чрезмерно большие пределы для объявления тревоги. При этом реальная кража или потеря ЯМ может не вызвать тревоги. В результате, все затраченные усилия окажутся напрасными.

Рис. 6.3,б показывает случай заниженной оценки допустимой статистической неопределенности ИР. Из-за заниженных допусти-

мых пределов наблюдается высокая интенсивность ложных тревог, хотя никаких недостатков или излишков ЯМ не наблюдается. На эти ложные тревоги каждый раз приходится реагировать, что приводит к существенным расходам времени и средств. Частые ложные тревоги могут привести к тому, что к реальной краже или утрате ЯМ не будет проявлено серьезного отношения.

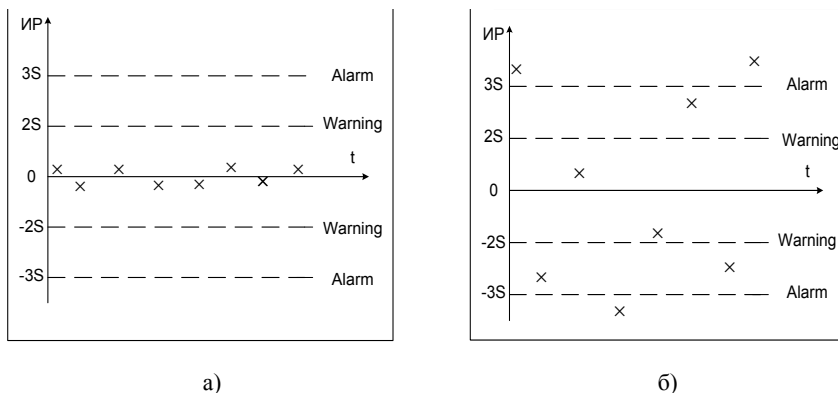


Рис. 6.3. Примеры неадекватных моделей расчета пределов разброса ИР:
 а – модель с завышенной оценкой неопределенности ИР;
 б – модель с заниженной оценкой неопределенности ИР

Таким образом, модель построения допустимых пределов статистического разброса ИР должна быть выверенной.

Определение предела допустимых отклонений ИР на основе архивных данных

Для установившихся производств допускается также использование ранее наблюдавшихся значений инвентаризационной разницы. Устанавливаемые пределы определяются зарегистрированным разбросом значений ИР на предыдущих физических инвентаризациях в данной ЗБМ. При этом предполагается, что во время предыдущих ФИ не было обнаружено аномалий с ЯМ. Есть положительные стороны такого подхода – значения пределов легко получаются

без привлечения компьютерных моделей. При этом не требуются детальные данные о погрешностях измерений. Все погрешности системы учета и измерения ЯМ могут влиять на пределы допустимых отклонений.

В России так же, как и в США, общие правила разрешают применение подхода с определением предела допустимых отклонений ИР на основе архивных данных. Однако в этом случае необходимо провести обоснование применимости такого подхода для прогноза ИР. Это имеет место в случаях, когда структура образования погрешности ИР не меняется существенно со временем.

Подход с использованием архивных данных также полезен для выверки компьютерных моделей, при их использовании в расчете допустимых пределов ИР. Архивные данные дают качественный критерий проверки расчетной погрешности ИР. А именно, наблюдавшийся статистический разброс ИР должен соответствовать интервалу статистически незначимых значений ИР: $(-2s_{\text{ИР}}, +2s_{\text{ИР}})$.

Список литературы

1. Методические рекомендации по проведению физической инвентаризации ядерных материалов на ядерных установках и пунктах хранения ядерных материалов. – РБ–026–04. Утверждено постановлением Федеральной службы по атомному надзору от 29.03.2004, № 1, М., 2004.

2. Глебов В.В., Измайлов А.В., Румянцев А.Н. Введение в системы учета, контроля и физической защиты ядерных материалов. М.: МИФИ, 2001.

ГЛАВА 7

КОМПЬЮТЕРИЗИРОВАННЫЕ СУиК ЯМ

Основная цель мероприятий по учету ядерного материала (ЯМ) – своевременное обнаружение недостат или излишков ЯМ, случаев потерь, хищений и несанкционированного использования ЯМ, а также выявления причин и источников появления таковых. Учет – одно из мероприятий, обеспечивающих выполнение этой цели, наряду с контролем и физической защитой. Другой обязанностью систем учета есть предоставление органам государственной власти и другим официальным уполномоченным органам информации, необходимой для выполнения ими своих обязанностей.

Полноценное достижение этих целей невозможно без автоматизации процессов сбора и обработки информации.

Требования, предъявляемые Федеральной информационной системой (ФИС) к отчетности предприятий ядерной отрасли, как по объему информации, так и по времени ее предоставления, не могут быть удовлетворены без использования современных информационных технологий.

Компьютеризированные (автоматизированные) системы учета и контроля ядерных материалов, создаваемые на предприятиях, имеющих в обращении или на хранении ядерные материалы, вместе с центральной компьютеризированной системой сбора и обработки информации должны образовать Федеральную информационную систему (ФИС). Все требования, которые предъявляет ФИС к отчетности, детализации информации и периодичности ее предоставления, накладывает жесткие ограничения на функциональность и программное обеспечение компьютеризированных СУиК на предприятиях.

7.1. Требования отраслевого стандарта к системам учета и контроля ядерных материалов

Назначение систем учета материалов и требования, предъявляемые к ним, собраны в отраслевом стандарте ОСТ 95 10537–97 Минатома Российской Федерации [1]. В процессе рассмотрения различных компонент систем учета и контроля мы будем обращаться к этому документу, и анализировать его требования к изучаемым разделам. Действующий стандарт является первым отраслевым

стандартом, регламентирующим назначение, свойства, порядок разработки и требования к компьютеризированным СУиК ЯМ. За время прошедшее с момента его принятия накоплен большой опыт создания и эксплуатации такого рода систем, поэтому выпуск новой редакции отраслевого стандарта представляется актуальной задачей.

Стандарт определяет назначение систем учета и контроля (СУиК) следующим образом:

- СУиК осуществляет информационное обеспечение учета и контроля ядерных материалов, имеющихся на предприятии, поступающих, убывающих с него и уничтожаемых на основе правовой ответственности предприятия;

- учитывает любое перемещение материалов между зонами балланса материалов, любое изменение вида и формы материала;

- предоставляет своевременную и достоверную информацию для осуществления деятельности по учету и контролю.

Для реализации этих положений в каждой ЗБМ и на предприятии в целом СУиК должна обеспечивать:

- информационную запись всех измерений в ключевых точках по количеству и иным характеристикам ЯМ;

- информационное сопровождение любых изменений в виде, форме и месте положения ядерных материалов, включая внешние операции (отправка/получение);

- определение количества материала в каждой ЗБМ и предприятии в целом;

- ведение учетной и отчетной документации;

- контроль своевременности и корректности операций с ЯМ;

- контроль и учет персонала и его доступа к информации;

- поддержка работ по инспекции и инвентаризации;

- оперативный поиск местонахождения продукции;

- информационную связь с системой физической защиты предприятия;

- защиту, циркулирующей в системе информации;

- связь с СУиК других предприятий и с Федеральной информационной системой.

Стандарт выделяет две функциональные области СУиК: администрирование и управление базами данных. Приводятся три административные функции:

- обслуживание информационных запросов потребителей и администрации о состоянии работ на предприятии;
- обеспечение контроля и управления разрешительной системой допуска к данным СУиК ЯМ;
- информационная поддержка расследований нештатных ситуаций. Управление базами данных включает в себя функции:
 - получение и обработка информации по всем перемещениям ядерных материалов на предприятии и между предприятиями;
 - формирование баз данных предприятия;
 - формирование отчетной информации в требуемых форматах и на требуемых носителях;
 - контроль за взаимной согласованностью информации;
 - оперативный поиск и выдача информации;
 - ведение архивации и создание резервных копий.

Стандарт проводит требования объективности, согласованности, своевременности, полноты, последовательности и преемственности информации о ЯМ. Под этими требованиями понимается следующее. **Объективность** информации означает, что все записи в базе данных должны иметь документальное подтверждение, вся документация должна составлять единую систему и не содержать противоречий. **Своевременность** заключается в том, что изменения состояния учетных единиц должны обновляться своевременно (почти в реальном времени) и во всей **полноте** – не должно быть не зарегистрированных изменений. Под **последовательностью** понимается требование – раз введенная информация не может быть изменена или стерта, любое исправление учетных записей должно осуществляться по определенной процедуре и фиксироваться. Под **преемственностью** понимается согласованность вновь создаваемой компьютеризированной системы с уже существующей системой учета и контроля ядерных материалов на предприятии.

Информационная подсистема СУиК должна содержать полную информацию о ЯМ, документацию по учету и контролю, сведения о планируемых мероприятиях, информацию по правам доступа персонала, сведения о технических характеристиках ядерной установки, необходимые для учета и контроля, и сведения о характеристиках контрольной измерительной аппаратуры.

Очень важное требование стандарта – информационная подсистема должна быть системой нормального функционирования, т.е.

аварийный выход ее из строя или отключение не должны наносить ущерба учету ЯМ на предприятии.

В разделе, касающемся требований, предъявляемых к информационному обеспечению, стандарт определяет необходимость включения всех видов отчета требуемых стандартами предприятий, федеральной системы и, где того требуют международные обязательства, МАГАТЭ. Причем система должна генерировать бумажную отчетность в требуемом формате. Требования ФИС к отчетности уточняют эти положения стандарта.

Особые требования налагаются на безопасность информации. Причем принимаются во внимания оба аспекта безопасности: сохранность информации при аварии и сбоях системы и предохранение ее от несанкционированного доступа. При этом накладываются требования:

- создания и регулярного обновления резервных копий баз данных;
- хранения истории каждой учетной единицы, прошедшей через предприятия, для возможного восстановления последовательности действий;
- ведения раздельного учета ЯМ для мирных и оборонных целей;
- использования защищенных каналов связи, локальных сетей, бумажных и магнитных носителей.

Более подробно проблемы обеспечения информационной безопасности компьютеризированных СУиК, их компоненты и требования к разработке такого рода систем будут обсуждены в главе 8.

7.2. Архитектура компьютеризированных систем учета ядерных материалов

История систем учета ядерных материалов началась одновременно с началом ядерной эры в истории человечества в сороковых годах двадцатого века. В развитии систем учета ядерных материалов можно выделить ряд этапов.

На начальном этапе деятельности с ядерными материалами в 1940 – 1950–х гг. использовались ручные системы обработки информации. В эту эпоху вычислительной техники еще не существовало, а объемы используемых материалов позволяли вручную заносить информацию в инвентарные книги, содержащие записи о каждой единице хранения. Главный недостаток таких систем – трудности систематизации информации о конкретных единицах хранения

и сложность поиска информации. В журналах возможно упорядочивание информации только по одному критерию – времени поступления. По мере усложнения операций и увеличения числа единиц хранения, время, затрачиваемое на обработку информации и информационного поиска, многократно возрастает. Тем не менее такого рода системы могут существовать и в настоящее время, например, в учебных лабораториях, где число единиц хранения ограничивается штуками. Кроме того, отраслевые требования обязывают предприятия наряду с компьютеризированным учетом осуществлять учет на бумажных носителях.

После появления первых электронно–вычислительных машин в 1960–х годах прошлого столетия создавались системы, основанные на обработке компьютеризированных пакетов. Работа с такой системой заключалась в создании пакетов задач на перфокартах или других носителях информации и обновлении баз данных путем пропускания этих пакетов. На этом этапе развития информационных технологий практически не была разработана теория баз данных. Информация хранилась в виде так называемых плоских файлов. Главные характеристики таких систем – примитивные базы данных и крайне медленное обновление информации. Все это приводило к тому, что системы были медленны и ненадежны. Практически всегда информация дублировалась ручными системами.

Существенный прорыв в использовании информационных технологий для развития систем учета и контроля произошел, когда были созданы системы универсальных электронно–вычислительных машин, связанных с терминалами на пользовательских местах. К этому времени (в 70–х гг. двадцатого века) появились первые системы управления базами данных (СУБД). Сочетание достаточно мощных ЭВМ с преимуществами интерактивного ввода информации привели к созданию эффективных систем, которые до сих пор используются на некоторых предприятиях. Недостатки таких систем заключаются, во–первых, в необходимости передачи больших объемов информации по сети, во–вторых, в обработке всей информации от всех пользователей на центральной машине. Поэтому требования к центральной ЭВМ и сетевому оборудованию достаточно высоки, а это, в свою очередь, приводит к удорожанию всей системы.

Появление персональных компьютеров изменило все человеческие технологии. Их использование в системах учета может быть организовано различным образом. Персональный компьютер может быть использован, в качестве:

- терминала в сети с универсальной машиной;
- в качестве компьютера, обрабатывающего всю информацию, поступающую с центральной машины в системах файловых серверов;
- в качестве клиента и сервера базы данных в системах клиент/сервер.

В зависимости от архитектуры системы, использование персональных компьютеров имеет определенные преимущества и недостатки. Практически все современные системы создаются для использования на персональных компьютерах, поэтому рассмотрим этот этап более подробно.

Определим понятие архитектуры «клиент/сервер» [2]. Одно из основных назначений такой архитектуры – достижение высокоэффективного использования имеющейся в компьютерной сети вычислительной техники путем разбиения задач на более мелкие уровни и распределение работы на этих уровнях между компьютерами, составляющими сеть. Некоторые задачи, составляющие уровень, требуют дополнительных операций, выполняемых на другом уровне. Тогда говорим, что программа заявитель является «клиентом», а вспомогательная задача обслуживает ее, то есть является «сервером». Программное приложение клиент/сервер можно определить, как состоящее из важных частей других приложений, выполняемых на разных компьютерах. Правильно построенное приложение клиент/сервер предполагает, что процессы протекают именно там, где наиболее эффективно выполняется работа, специфичная для данного процесса.

В рамках программных приложений в существующих системах компьютеризированного учета существует несколько уровней приложения, которые могут быть объединены в три глобальных логических уровня с точки зрения их функционального назначения:

- логика, связанная с представлением данных пользователю. В основном, она заключена в программном обеспечении, обеспечивающем пользовательский интерфейс;

- логика, связанная с обеспечением деловых правил. В нашем случае она должна реализовывать стандарты и правила учета ЯМ и функциональность системы;

- логика доступа к базе данных. Сюда обычно включаются механизмы, обеспечивающиеся конкретной СУБД, связанные с хранением, обновлением и доступом к данным, обеспечением их целостности.

В зависимости от того, как распределяются приложения, обеспечивающие логику действий, можно сконструировать различные типы систем клиент/сервер.

При реализации всех уровней системы на одном компьютере, мы все равно будем работать в модели клиент/сервер, поскольку идет внутреннее разделение процессов на клиентские и серверные. Такое объединение характерно для большинства систем с использованием универсальных машин. Перечислим основные характеристики такой организации вычислительного процесса:

- на терминал поступают только данные прикладной программы, обработка остальных уровней происходит на базовом компьютере;

- если используется графическая информация, то она вся идет по сети. Таким образом, в зависимости от способов обработки информации сетевой трафик может быть как незначительным, так и перегруженным;

- существенным недостатком таких систем является отсутствие удобного интерфейса, зачастую отсутствуют графические средства, ограничены возможности в создании отчетов;

- стоимость мощных универсальных ЭВМ (мейнфремов) высока.

В последнее время стоимость универсальных ЭВМ снижается, а, с другой стороны, резко возросла производительность рабочих станций. Одновременно с этим эволюция архитектуры клиент/сервер привела к созданию систем с очень «тонким» клиентом. В таких системах большинство процессов, связанных с обработкой информации, осуществляется на центральном компьютере. Очевидно, что архитектура таких систем близка к традиционной.

Системы файловых серверов основаны на архитектуре, реализующей другую крайность. В этом случае сервер используется как простое хранилище данных. При этом вся логика приложения реализуется на рабочей станции. Основное достоинство такой системы – простота. Недостатков больше. Главный недостаток заключается в

том, что вся информация, предназначенная для обработки должна передаваться по сети от сервера к рабочей станции. Такие системы обычно реализуются на базе персональных компьютеров и обладают удобным пользовательским интерфейсом с развитой графикой (графическая информация при этом создается и обрабатывается на клиенте).

Для реализации собственно архитектуры клиент/сервер необходимо провести разделение уровней задач, выполняемых на компьютере клиенте и на сервере таким образом, чтобы использование вычислительных возможностей локальной сети и сетевой трафик были бы оптимальны. Такое разделение характерно для систем, называемых сервером базы данных. При такой организации достигается баланс в использовании возможностей клиентской и серверной компьютерных систем. Главное преимущество заключается в снижении нагрузки на передачу данных: в сети перемещается информация, необходимая только конкретному приложению.

Экономические показатели систем клиент/сервер также демонстрируют преимущества. Системы, основанные на универсальных машинах, очень дороги и имеют дорогое техническое обслуживание. Системы клиент/сервер дешевы, используют доступную технику и коммерческие программные продукты. Низка стоимость обслуживания и модернизации.

Сформулируем основные преимущества и недостатки архитектуры клиент/сервер. Преимущества:

- рабочая загрузка естественным образом распределяется на множестве компьютеров;

- пользователи легко совместно пользуются данными;
- данные защищены в централизованном порядке;
- лучший показатель «стоимость/эффективность».

Вместе с тем такая архитектура имеет и определенные недостатки:

- большая нагрузка на создателя приложений;
- сложная сетевая топология;
- изменения в программном обеспечении сервера касаются всех клиентов.

Модель вычислительного процесса клиент/сервер является основной парадигмой информационных технологий (ИТ). Начало ее развития было положено, когда компьютерная индустрия в 80-х

годах начала переход от централизованных систем к системам, состоящим из объединенных в сеть персональных компьютеров.

Самой простой архитектурой клиент/сервер, которая была реализована в первых приложениях такого рода, является архитектура представленная на рис. 7.1. Такая архитектура называется двусвязной, поскольку организует связь двух компьютеров – сервера и клиента [3]. Сама по себе она может быть представлена в двух вариантах. Первый вариант, в котором основная нагрузка ложится на компьютер–клиент. При этом говорят о «толстом» клиенте и «тонком» сервере. На сервере располагается СУБД, которая реализует логику доступа к данным. На каждом из компьютеров–клиентов располагаются приложения, реализующие деловую и представительскую логику.

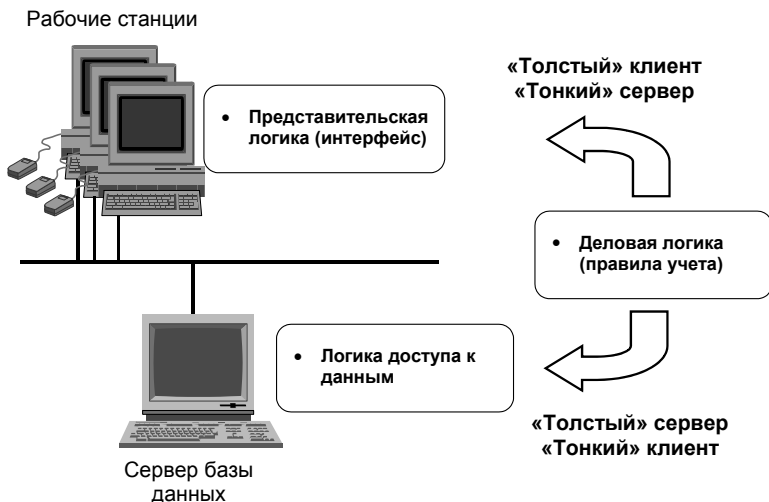


Рис. 7.1. Схема двусвязной модели клиент/сервер

Такой подход прост. Вместе с тем, такая архитектура имеет и некоторые недостатки:

- она требует достаточно мощного компьютера в качестве рабочей станции и достаточного дискового пространства;

- в случае если в результате выполнения запроса генерируется достаточно большой ряд данных, дальнейшая обработка которых будет производиться на клиенте, он может серьезно загрузить сеть;

- каждое соединение рабочей станции с сервером требует достаточно большой оперативной памяти сервера; так MS SQL Server 6.5 (относительно не самая затратная в этом отношении СУБД) требует 37К памяти на каждое соединение, для крупных сетей это может вылиться в проблему;

- любое изменение в деловой логике приводит к необходимости изменения программного обеспечения на всех рабочих станциях.

Такая модель, вследствие своей простоты, очень удобна для ограниченного количества рабочих станций. Существует некий оптимум, после которого начинают возникать проблемы, перечисленные выше.

Альтернативная двусвязная схема – модель с «тонким» клиентом и «толстым» сервером. Она отличается от предыдущей тем, что деловая логика перенесена на сервер. Это можно реализовать разными путями с использованием разного программного обеспечения. В частности MS SQL Server предполагает возможность написания, так называемых, сохраняемых процедур на языке запросов. Эти процедуры могут реализовывать деловую логику. Различные СУБД имеют дополнительные возможности, включающие проверку на допустимость изменений и включение определенных правил и ограничений на значения данных. При этом никакой лишней информации по сети не передается. Тем не менее такие системы по-прежнему требуют оперативной памяти сервера на каждое соединение, и, кроме того, появляются новые недостатки. Во-первых, требуется достаточно мощная СУБД. Например, если первая модель может быть реализована на MS Access, то вторая требует MS SQL Server. Кроме того, продукты различных фирм имеют несколько отличный синтаксис языков запроса. Поэтому такой подход несколько ограничивает возможности развития системы и требует использования более мощных СУБД, например Oracle.

Дальнейшее развитие модели клиент/сервер движется в сторону децентрализации вычислительного процесса. В этом направлении реализованы многосвязные системы клиент/сервер. На рис. 7.2 представлена схема трехсвязной модели клиент/сервер.

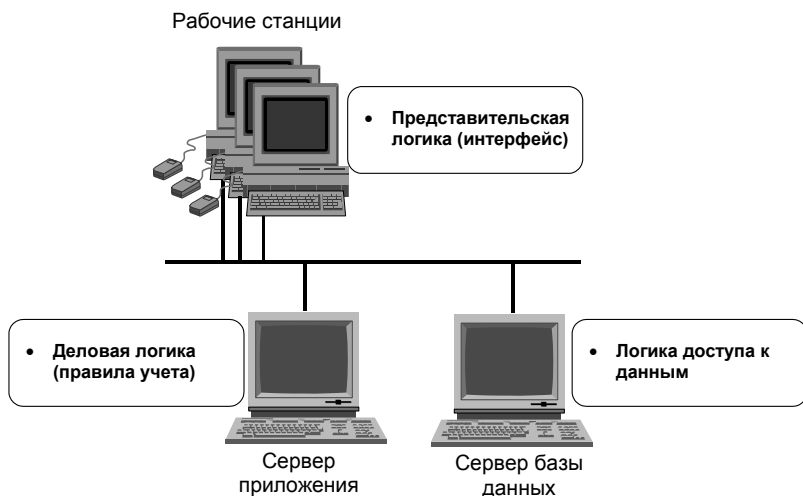


Рис. 7.2. Схема трехсвязной модели клиент/сервер

Такая архитектура включает в себя дополнительную связь между «тонким» клиентом и «тонким» сервером. Связи между компонентами организуются через стандартные сетевые протоколы, например, TCP/IP. Это дополнительное включение содержит базовую деловую логику. Особенность таких систем в том, что не требуется оперативной памяти на сервере базы данных для поддержания каждого соединения с клиентом.

При организации трехсвязных систем полностью разделяются все три уровня приложения: презентационная логика, деловая логика и логика доступа к данным. Этим достигается большая гибкость системы, более простой становится модернизация того или иного уровня. В такую систему легко подключать дополнительные сервисы, например, связь с Интернетом, электронной почтой или телефоном и факсом.

Физически серверы базы данных и приложений для небольших сетей и ненапряженных приложений могут быть совмещены на одном компьютере. Тем не менее это по-прежнему будет трехсвязная система, поскольку логика принципиально разделена.

Дальнейшее развитие многосвязной модели идет в направлении так называемых n -связных систем клиент/сервер. Такого рода системы сохраняют все преимущества трехсвязной модели. Деловая логика в таких системах распределена на нескольких серверах, клиент может выбирать нужную ему в данный момент. Связь установлена с различными серверами баз данных. Такая система обеспечивает превосходную гибкость, легкость модификации и включения новых приложений. Составные части системы могут быть разнесены территориально. Глобальный пример системы такого рода это сама глобальная сеть Интернет. Любой пользователь может использовать деловую логику огромного числа поисковых серверов, выбирать информацию из требуемых источников данных.

Последней по времени технологией реализации многосвязной модели являются Web-сервисы или Web-службы. Эта технология позволяет получать необходимые данные в стандартных форматах без специального программного или аппаратного обеспечения.

Специалисты фирмы Майкрософт так определяют Web-сервис: Web-сервисы, основанные на XML, служат для обмена данными между приложениями и позволяют вызывать другие приложения независимо от того, как они устроены, на какой платформе они работают и какие устройства используются для доступа к ним.

Запросы к Web-сервисам поступают с помощью стандартных сетевых протоколов от приложений, реализованных на базе различных программных и аппаратных платформ, а результат возвращается в стандартной кодировке XML. Большие приложения разбиваются на независимые части, которые существуют на серверах приложений в качестве Web-сервисов.

7.3. Базовое программное обеспечение

Отраслевой стандарт [1] делит базовое программное обеспечение на три раздела:

- операционные системы;
- системы управления базами данных;
- инструментальные средства разработки.

Базовое программное обеспечение, используемые в компьютеризированных СУиК ЯМ, должны быть обязательно сертифицированы на соответствующий класс защиты информации от несанкционированного доступа. Требования к средствам защиты инфор-

мации изложены в Руководящем документе Гостехкомиссии РФ, регулирующем вопросы классификации АСУиК ЯМ [4]. Подробно классификации базового программного обеспечения и требования к безопасности информации в зависимости от установленного класса обсуждаются в главе 8. Специальных требований к инструментальным средствам разработки не предъявляется.

Рассмотрим более подробно каждый из типов базового программного обеспечения. Перечислим требования, предъявляемые к ним в отраслевом стандарте, кратко рассмотрим ПО, используемое в настоящее время, и рассмотрим перспективное ПО.

7.3.1. Операционные системы

Операционная система (ОС) – важная часть ПО необходимого для формирования рабочей среды СУиК ЯМ. Параметры ОС в значительной степени определяют защищенность информационной системы от несанкционированного доступа и ее надежность.

Требования к операционным системам содержатся в отраслевом стандарте и требованиях Гостехкомиссии РФ по защите информации от НСД. Операционная система по требованиям отраслевого стандарта должна содержать и обеспечивать:

- средства работы в сети;
- средства защиты данных от несанкционированного доступа;
- контроль доступа при входе в систему;
- защиту памяти;
- разделение и учет доступа к ресурсам;
- средства обработки ошибок;
- средства поддержки работоспособности;
- развитые средства доступа к базам данных;
- поддержку распространенных сетевых протоколов;
- устойчивость к сбоям аппаратуры;
- возможности сбора статистики о работе системы.

ОС может содержать:

- поддержку технологии клиент/сервер;
- многозадачность с наличием системы приоритетов;
- возможность сетевой загрузки рабочих станций;
- поддержку источника бесперебойного питания (ИБП).

Требования стандарта достаточно общие и не содержат конкрет-

ных нормативов. Конкретные требования, предъявляемые к ОС в соответствии с вводимой классификацией СУиК ЯМ, перечислены в руководящем документе Гостехкомиссии РФ [4]. В этом документе приводятся требования к различным подсистемам, обеспечивающим безопасность информации, а также сертификационные и аттестационные требования в соответствии с классом системы.

Одной из основных технических проблем, с которыми сталкиваются разработчики компьютеризированных СУиК ЯМ, является отсутствие операционных систем, сертифицированных на классы выше третьего. В настоящее время Гостехкомиссией РФ сертифицированы к использованию в автоматизированных СУиК ЯМ ряд модификаций операционной системы Microsoft Windows NT 4.0. Она сертифицирована по 3-му классу защищенности от НСД. Действие сертификата неоднократно продлевалось.

ОС, сертифицированное на 3-й класс защиты от несанкционированного доступа, не позволяют обрабатывать информацию, имеющую различные степени секретности, что затрудняет их использование на большинстве предприятий, имеющих в обращении ядерные материалы. К тому же Windows NT 4.0 морально устаревшая система. Microsoft объявил о прекращении поддержки этой ОС в 2004 г. Поэтому одна из первоочередных задач, стоящих перед Федеральной информационной системой, является сертификация новой ОС для использования в системах 3-го класса и выбор системы для создания СУиК ЯМ 2-го класса.

В настоящее время существует две точки зрения на решение этой проблемы. Первый путь заключается в использовании программного обеспечения производства Microsoft. Существуют предпосылки использования в качестве перспективной операционной системы Windows 2000. Эта операционная система была сертифицирована на 4-й уровень согласно международным общим критериям [5–7], поэтому сертификация ее на 3-й класс по требованиям Гостехкомиссии для СУиК ЯМ не должна вызвать значительных трудностей. Она является развитием операционных систем основанных на технологии NT, что позволит безболезненно перевести уже созданное прикладное программное обеспечение на новую систему. Наконец, корпорация Microsoft, в ответ на критику ее позиции в области открытости программного обеспечения, объявила программу GSP (Government Security Program). GSP создана специ-

ально в ответ на потребности государств в области создания защищенных информационных систем. Партнерство в рамках GSP дает организациям России право просмотра исходного кода Windows. Кроме того, GSP позволит российским разработчикам проводить совместные работы со специалистами Microsoft в целях верификации функций защиты, а также выполнения других исследований, намеченных участниками программы. Помимо доступа к исходному коду, участники GSP получают детальную техническую информацию о платформе Windows, что позволит проектировать и создавать еще более защищенные вычислительные системы. Специалисты отрасли полагают, что в рамках GSP возможно доведение продуктов Microsoft, в частности Windows 2000, до уровня 2-го класса защищенности [8]. Другой подход основывается на использовании базового программного обеспечения на основе открытого кода. Имеется в виду использование операционной системы, построенной на основе популярной ОС Linux. Этот подход основан на том, что лицензионное соглашение Linux позволяет свободно модифицировать систему, что позволяет создать и сертифицировать дистрибутив Linux на 2-й класс защищенности. Сторонники этого подхода апеллируют к относительной дешевизне программного обеспечения на основе открытого кода.

На момент подготовки данного пособия к изданию сложилась следующая ситуация с сертификацией операционных систем. Из-за организационных проблем, возникших отчасти из-за реформирования руководящих органов отрасли, доступ к кодам операционной системы Windows 2000 был получен только в конце 2006 г. К этому времени данная операционная система уже морально устарела. Возникает необходимость сертификации операционных систем производства Microsoft следующего поколения – Windows XP и Windows 2003 Server. Соответственно, никаких работ по доведению операционных систем семейства Windows NT до требований, удовлетворяющих 2-му классу защиты от несанкционированного доступа для СУиК ЯМ не ведется.

Одновременно специалистами НПО «Луч» г. Подольск была создана защищенная операционная система Yanux 2.0 [9] на основе операционной системы Linux. Эта система в 2005 г. была сертифицирована на защиту от несанкционированного доступа согласно

документу [10] на класс, соответствующий 2-му классу согласно требованиям для СУиК ЯМ [4].

Далее перечислим основные свойства, которыми должна обладать защищенная операционная система, и рассмотрим их реализацию на примере операционных систем семейства Windows NT.

Защищенная ОС должны обладать [11]:

- возможностью идентификации и аутентификации;
- управлением и контролем доступа ко всем ресурсам системы;
- аудитом событий;
- способностью и средствами восстановления работоспособности;
- контролем за скрытыми каналами утечки информации.

Большинство защищенных операционных систем работает на базе микроядра. Микроядро постоянно загружено в оперативную память и управляет потоками информации между компонентами системы. Любая прикладная программа обращается к микроядру для получения разрешения на исполнение команд. Микроядро с помощью специальных серверных процессов проверяет правомочность выполнения команды и либо санкционирует ее исполнение, либо запрещает. Такой подход реализует архитектуру «клиент/сервер». Если запрашиваемый запрос разрешен, то микроядро вызывает соответствующий серверный процесс для его реализации.

В основу системы безопасности Windows NT положена объектная модель защиты. Под объектом понимается любой ресурс ОС (файл, устройство, программа, область памяти).

Каждый пользователь Windows NT должен быть зарегистрирован в системе. При этом он имеет входное имя (login) и пароль, которые заносятся в базу данных.

При входе пользователя в систему обязательно осуществляются процессы идентификации и аутентификации (рис. 7.3). Под идентификацией понимается подтверждение существования записи о пользователе, пытающемся войти в систему, в базе данных бюджетов зарегистрированных пользователей. Эта процедура сводится к проверке существования имени пользователя (login). Под аутентификацией понимается подтверждение того, что пользователь, входящий в систему, является именно тем лицом, за которое он себя выдает. Эта процедура заключается в проверке правильности вводимого пароля. Пользователь вводит свой login и пароль. Диспетчер бюджетов безопасности проверяет существование пользователя

с указанными параметрами и допускает его в систему, либо отключает доступ. При этом генерируется так называемый маркер доступа, содержащий ту информацию о пользователе, которая необходима для получения доступа к ресурсам (объектам). При этом любой процесс, который будет в дальнейшем инициирован пользователем, получает копию этого маркера. Такой процесс называется субъектом бюджета пользователя и обладает теми же правами доступа к объектам, как и сам пользователь.

Во многих современных ОС идентификация и аутентификация носят достаточно формальный характер, что позволяет субъектам сравнительно легко выдавать себя за другой субъект и пользоваться его полномочиями доступа к информации. В сетях Интернет в силу необходимости соблюдать требования по совместимости в глобальном масштабе вообще не предусматривается аутентификация при сетевых взаимодействиях.

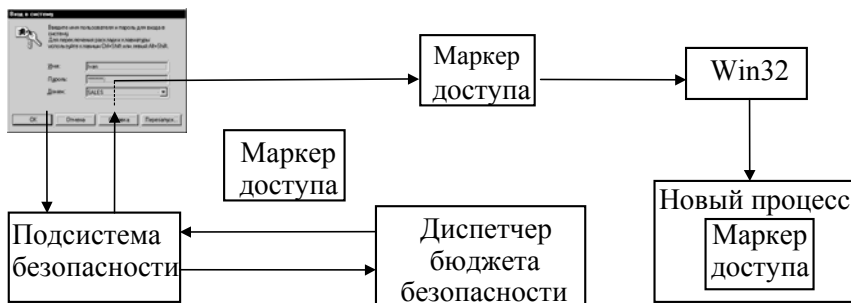


Рис. 7.3. Процесс создания маркера доступа при входе в систему

Управление доступом к ресурсам системы подразумевает, что при запросе ресурса ОС проверяет правомочность субъекта на пользование данным объектом. Существует ряд моделей, реализующих эту функцию. Рассмотрим принципы организации двух моделей – дискреционной и мандатной [11]. Дискреционная модель управления доступом реализована в Windows NT [12], а реализация мандатной модели является необходимым условием сертификации ОС на второй класс защиты от несанкционированного доступа.

В рамках дискреционной модели каждый объект ОС имеет так называемый дескриптор безопасности, который включает в себя информацию о владельце объекта, и список контроля доступа, который осуществляет проверку на право доступа к объекту. По умолчанию владельцем объекта становится его создатель, право владения может быть передано. Владелец имеет возможность формировать и изменять права доступа к объекту. Список контроля доступа состоит из элементов управления доступом, которые специфицируют разрешения на обращение к объекту для пользователя. Элементы управления доступом содержат маску доступа, определяющую возможные действия с объектом. Например, для файла маска доступа содержит операции: «нет доступа», «полный доступ», «чтение», «запись», «изменение», «выполнение». При обращении к объекту монитор безопасности проверяет список контроля доступа объекта и либо санкционирует доступ, либо ограничивает его согласно маске доступа, либо отвергает (рис. 7.4).



Рис. 7.4. Процесс процедуры доступа пользователя к ресурсу

Мандатная модель управления доступом основана на правилах секретного документооборота. Всем объектам и пользователям присваивается специальная метка, называемая уровнем безопасности. Устанавливаются отношения доминирования между уровнями. Так уровень «совершенно секретно» доминирует над уровнем «сек-

ротно». Контроль доступа к информации устанавливается на основании двух простых правил:

1. Пользователь имеет право получать только ту информацию, уровень безопасности которой не превышает его собственный.
2. Пользователь имеет право заносить информацию в те объекты, уровень безопасности которых не ниже его собственного.

Первое правило обеспечивает защиту информации от доступа со стороны низкоуровневых пользователей. Второе правило (более важное) предотвращает утечку информации со стороны высокоуровневых пользователей.

Мандатное управление доступом не различает сущностей и для достижения большей гибкости обычно используется наряду с некоторой дискреционной моделью.

Наряду с управлением доступом защищенные операционные системы должны предоставлять средства аудита событий. Обычно эти средства реализуются в виде журналов событий безопасности, просматривая которые системный администратор может получить информацию о действиях пользователя по отношению к информационной безопасности.

Поскольку компьютеризированные СУиК ЯМ принципиально являются системами, функционирующими в локальных компьютерных сетях предприятий, операционные системы, используемые для их функционирования, должны обладать встроенной поддержкой работы в компьютерной сети. Так операционные системы семейства Windows NT обладают поддержкой распространенных сетевых протоколов, позволяют организовывать персональные компьютеры в логические группы – домены. Внутри домена регистрация пользователей осуществляется только в одном месте – на главном контроллере домена. При входе пользователя на любой рабочей станции права доступа проверяются централизованно. Это позволяет легко организовывать и проводить единую политику безопасности на всех компьютерах домена.

В состав операционных систем, созданных на основе NT технологии входит компонент, называемый Internet Information Services. Данный компонент при установке позволяет создавать на компьютере Web – сервер, что делает возможным использование в локальных корпоративных сетях СУиК ЯМ технологий глобальной сети Интернет.

7.3.2. Системы управления базами данных

Ядром любой компьютеризированной системы учета и контроля является база данных. Под компьютеризированной базой данных понимается набор информации организованной определенным образом. Для работы с базой данных, для обеспечения компьютерной поддержки хранения и обработки информации используются системы управления базами данных (СУБД). Выбор СУБД во многом определяет дальнейшие пользовательские характеристики создаваемой СУиК ЯМ, включая быстродействие, объем хранимой информации и свойства защищенности информации как от НСД, так и от объективных причин.

Отраслевой стандарт предъявляет следующие требования к СУБД. СУБД должна содержать удобные средства создания резервных копий и восстановления данных. При необходимости СУБД может содержать удобный интерфейс пользователя и средства автоматической репликации БД.

СУБД должна обеспечивать:

- поддержку работы в сети;
- высокое быстродействие и производительность.

При необходимости:

- наличие ODBC драйвера;
- обеспечение защищенности данных и разграничение доступа к ним;

- поддержку языка запросов SQL.

Из всех этих требований конкретными являются два: СУБД должна иметь средства резервирования информации и обеспечивать сетевую работу. Остальное – либо не конкретно (понятие высокой производительности), либо не обязательно («при необходимости»). СУБД также обязательно сертифицируются по защите информации от НСД. На момент написания данной главы были сертифицированы на третий класс защиты от НСД три СУБД: Microsoft SQL Server 6.5 и две версии популярного продукта Oracle. Эти СУБД представляют собой системы, обеспечивающие архитектуру клиент/сервер и работающие с реляционными базами данных. В настоящее время эти два требования, по сути, являются признанным стандартом в отрасли. Архитектура клиент/сервер рассматривалась выше. Положение дел с сертификацией современных СУБД

в целом соответствует ситуации с сертификацией операционных систем.

Что касается базового программного обеспечения с открытым кодом, то специалисты НПО «Луч» одновременно с сертификацией ОС Y Unix 2.0 сертифицировали СУБД PostgreSQL 7.4.6. Таким образом, в рамках использования программного обеспечения с открытым кодом, в настоящее время существует полный комплект сертифицированного программного обеспечения, необходимого для разработки и эксплуатации компьютеризированных СУиК ЯМ.

Реляционные базы данных

Существует ряд требований, которым должна удовлетворять реляционная СУБД:

- представлять информацию в виде таблиц;
- поддерживать логическую структуру данных, независимо от их физического представления;
- использовать язык высокого уровня для выполнения запросов и изменения информации в базах данных;
- поддерживать основные реляционные и теоретико–множественные операции;
- поддерживать виртуальные таблицы для обеспечения альтернативного способа просмотра данных;
- различать неизвестные значения, нулевые значения и пропуски в данных;
- обеспечивать механизмы поддержки целостности, авторизации, транзакций и восстановления данных.

Таблицы содержат столбцы (поля) и строки (записи). При этом каждая запись описывает некоторую сущность, информация о которой хранится в таблице. Поля записи содержат свойства (атрибуты) этой сущности. Для однозначной идентификации сущности (записи) таблица содержит особое поле, называемое первичным ключом. Значение этого поля должно быть уникальным в данной таблице. В качестве первичного ключа может использоваться не одно поле, а несколько (композиционный ключ). В практике СУиК ЯМ для использования в качестве первичного ключа обычно вводят специальное поле, содержащие идентификационный номер. Для связи с другими таблицами таблица содержит поля, называемые внешними ключами. Внешний ключ является первичным ключом

другой таблицы. Посредством внешних ключей запись таблицы связывается отношениями с конкретным объектом (записью) другой таблицы (рис. 7.5).

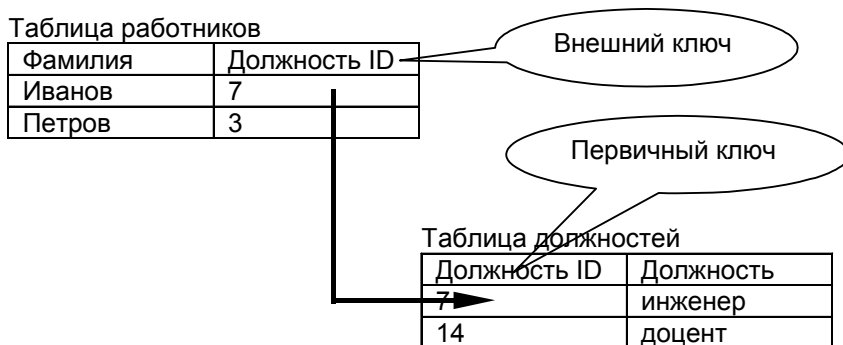


Рис. 7.5. Организация связи между таблицами с помощью ключевых полей

При проектировании базы данных ключевым моментом является выделение сущностей и организация связей между ними. При этом необходимо учитывать, какие операции в дальнейшем будут осуществляться над хранимой информацией.

После выбора сущностей необходимо обеспечить нормализацию данных – такое состояние базы данных, которое препятствует нарушению целостности данных и облегчает процесс манипулирования данными. Существует набор правил, выполнение которых обеспечивает различные уровни «нормальности» данных – нормальные формы. Считается, что база данных работоспособна при достижении третьей нормальной формы. Каждая последующая нормальная форма включает в себя требования предыдущей. Основная цель нормализации – увеличить скорость доступа к данным и улучшить целостность данных. Эти цели могут противоречить друг другу. Хорошо нормализованная база данных – необходимый компромисс между этими тенденциями. Перечислим правила первых трех нормальных форм.

Первая нормальная форма должна удовлетворять единственному требованию атомарности: каждое поле данных должно содержать

единственный элемент данных и ни один отдельный элемент не должен повторяться.

Вторая нормальная форма дополнительно должна удовлетворять еще двум правилам:

- каждая таблица содержит данные только об одном объекте;
- каждая таблица содержит уникальное поле, или набор полей, называемое первичным ключом, однозначно идентифицирующее запись.

И, наконец, третья нормальная форма требует, чтобы все поля в таблице, не определяемые ключом были взаимонезависимыми.

Иногда проектировщик может сознательно нарушать правила третьей нормальной формы для повышения производительности создаваемого приложения. Этот процесс называется денормализацией и должен подчиняться определенным правилам:

- Обоснованность денормализации. Единственная причина, по которой возможна денормализация – это повышение производительности приложения.

- Отладка и тестирование программного кода, созданного для предотвращения проблем, связанных с возможным нарушением целостности данных. Если, например, вводится вычисляемое поле, то должен быть написан код, выполняющий эти действия.

- Полная документированность производимых действий.

В реляционной базе данных различают различные типы отношений между таблицами:

- Отношение «один к одному». При этом каждая запись в одной таблице связана с одной записью в другой таблице. Обычно, если существует такое отношение, то имеет смысл объединить таблицы. Тем не менее бывают случаи, когда это отношение реализуется.

- Отношение «один со многими» используется для связи записи в одной таблице со многими записями в другой таблице. Это наиболее часто встречающийся вид отношения.

- Отношения «многие со многими». Каждая запись из одной таблицы связана с несколькими записями в другой и наоборот. В соответствии с правилами реляционных баз данных такое отношение должно представляться специально создаваемой таблицей. Дополнительная таблица содержит в качестве внешних ключей первичные ключи обеих таблиц. Она связана с основными таблицами

отношением «один со многими», что в результате реализует отношение «многие со многими» исходной таблицы.

Говоря о безопасности информации, в качестве отдельного аспекта необходимо обеспечивать целостность данных. Под целостность данных понимается корректное и непротиворечивое состояние базы данных. То есть информация в отдельных таблицах должна составлять единое целое и не должна содержать противоречий. Реляционные СУБД позволяют поддерживать целостность данных автоматически без необходимости написания программного кода для проверки вводимой информации. Целость данных при этом обеспечивается рядом процедур.

Так разделение сущности по таблицам и организация связи между таблицами через первичные и вторичные ключи позволяет исключить дублирование одинаковой информации и ошибки, которые при этом могут возникнуть. СУБД позволяют задавать типы данных в конкретных полях таблицы, что пресекает попытку ввода заведомо неправильных данных, возможно введение ограничений на значения полей.

Поддержка транзакций

Любое изменение в базе данных в компьютеризированных СУиК ЯМ осуществляется с помощью транзакций. Транзакция – это набор преобразований в базе данных, в результате которого она переходит из одного непротиворечивого состояния в другое непротиворечивое состояние. Транзакции должны удовлетворять четырем требованиям «ACID»: атомарности (Atomicity), постоянства (Consistency), изолированности (Isolation), устойчивости (Durability).

- Под атомарностью понимается то, что транзакция может быть выполнена только целиком, но не частично.

- Условие постоянства означает, что транзакция не должна оставлять за собой след. Прерванные транзакции должны возвращать систему в исходное состояние. Эта операция называется «откат транзакции» (rollback).

- Понятие изолированность означает, что транзакции не должны влиять друг на друга. Если транзакции пытаются оперировать одними и теми же данными в базе одновременно, то до завершения первой транзакции эти данные должны быть заблокированы для всех остальных транзакций.

- Устойчивость транзакции означает, что, если транзакция завершена и ее цель достигнута, она становится завершенной, даже если с системой что-то произойдет.

СУБД с поддержкой транзакций должны содержать дополнительные таблицы. Таблицы независимых значений описывают один объект, но в разное время. Эти таблицы используются до полного завершения транзакции, сохраняя информацию, которая может потребоваться в случае ее отката.

Необходимо наличие специальных журналов транзакции, которые регистрируют все транзакции в базе данных. Наличие этих журналов, наряду с резервными копиями базы данных, позволяет рассматривать транзакцию в качестве единицы восстановления данных. При восстановлении данных СУБД анализирует информацию журнала транзакций и последовательно осуществляет все транзакции, осуществленные с момента последнего резервирования данных.

Язык структурированных запросов SQL

Язык структурированных запросов SQL является языком высокого уровня для манипулирования данными и объектами в реляционных базах данных. Наличие такого языка является необходимым условием, предъявляемым к базе данных, чтобы она могла считаться реляционной. Реляционная модель была разработана фирмой IBM в 70-е годы двадцатого века. Одновременно с этим появилась первая версия структурированного языка запросов. Последний стандарт SQL был принят в 2003 г.

Различные производители СУБД обычно расширяют стандарт языка, вводя в него дополнительные возможности. Обычно, если эти изменения оказались удачными, они включаются в следующий стандарт языка. Тем не менее практически все версии SQL поддерживают базовые запросы и функции стандарта. Следование стандарту позволяет создавать приложения, не зависящие от конкретной СУБД. При этом для манипуляции данными используются стандартные запросы. Для связи с базами данных используются специальные механизмы (ODBC или OLE DB), позволяющие переводить эти запросы в форматы соответствующих СУБД.

Использование SQL позволяет освободить программиста от написания многих рутинных операций по выборке и объединению информации. При этом в архитектуре клиент/сервер операции, вы-

полняемые с помощью SQL запросов, будут осуществляться на сервере, снижая нагрузку на компьютере клиенте.

Приведем форматы основных запросов языка, позволяющих манипулировать данными. Использование конструкций языка SQL будем демонстрировать на конкретных примерах.

Основная команда SQL это команда выборки информации – SELECT. Ее синтаксис достаточно сложен и позволяет составлять запросы для осуществления большого количества операций по предоставлению пользователю информации из базы данных. Приведем несколько примеров иллюстрирующих его возможности:

```
SELECT title, price FROM titles  
WHERE price >= 5 AND price <=10
```

В данном примере из таблицы titles выбираются значения полей, озаглавленных title, и price для всех записей, в которых значения поля price лежат в интервале от 5 до 10. Ключевые слова SELECT и FROM в запросе необходимы, так как они специфицируют таблицу, в которой осуществляется выборка, и поля, значения которых необходимо представить пользователю. Ключевое слово WHERE определяет условие осуществляемой выборки. Если оно отсутствует, то выборка будет осуществлена по всем записям таблицы.

Поскольку предикат в предложении WHERE принимает значение «истина»/«ложь», то для его формирования можно использовать операторы булевой алгебры. В булевом выражении единственный предикат может использовать любое количество условий, что позволяет формировать исключительно мощные предикаты. SQL может использовать операторы сравнения: равно, больше, меньше, больше или равно, меньше или равно, не равно. Последний имеет вид <>.

Помимо операторов сравнения SQL различает основные операторы булевой алгебры, которые связывают между собой несколько булевых выражений и в результате получают опять булево выражение. SQL различает следующие булевы операторы:

- AND – логическое И. Оператор берет два булевых выражения (A AND B) и выдает в результате «истина», если они оба истинны или «ложно» в противном случае;
- OR – логическое ИЛИ. Оператор берет два булевых выражения (A OR B) и выдает в результате «истина» в том случае, если хотя бы одно из них имеет значение «истина»;

- NOT – логическое отрицание. В качестве аргумента используется одно выражение (NOT A). Этот оператор меняет значение на противоположное.

Используя предикаты с булевыми операторами, можно значительно увеличить их избирательную мощь.

При обсуждении особенностей реляционной модели базы данных указывалось, что поля в таблицах должны быть независимыми. Тем не менее часто требуется информация, которую можно получить на основе этих полей, используя некоторые процедуры – суммирования, усреднения и т.п. SQL выполняет эти операции с помощью функций агрегирования.

- COUNT – определяет количество строк или полей, выбранных посредством запроса и не являющимися NULL значениями.

- SUM – вычисляет арифметическую сумму всех выбранных значений данного поля.

- AVG – вычисляет среднее значение всех выбранных значений данного поля.

- MAX – вычисляет наибольшее из всех выбранных значений данного поля.

- MIN – вычисляет наименьшее из всех выбранных значений данного поля.

Приведем пример использования функций агрегирования:

```
SELECT AVG(price) FROM titles
```

В данном примере пользователь получает единственное число, равное среднему значению величин, содержащихся в столбце price таблицы titles.

Команда выборки SELECT способна осуществлять выборку из нескольких таблиц, связывая данные с использованием первичных и внешних ключей. Существуют команды группировки информации и ряд других возможностей. Однако их рассмотрение выходит за рамки данного обзора. Литература, посвященная языку запросов, обширна и заинтересованный читатель всегда может получить требуемую информацию.

Для вставки информации в таблицу базы данных используется команда INSERT. Приведем пример вставки в таблицу Users кон-

кретных значений в столбцы, озаглавленные F_name, L_name, U_login, U_password

```
INSERT INTO Users (F_name, L_name, U_login, U_password)
VALUES ('Сергей', 'Иванов', 'Sergey', 'HM235YPAH')
```

Здесь используются ключевые слова INSERT INTO, за которыми следуют название таблицы и в скобках перечисление вставляемых полей. Далее ключевое слово VALUES, за которым в скобках следуют конкретные значения вставляемой информации.

Для изменения данных в существующих строках используется команда UPDATE. В качестве примера напишем команду изменения входного имени у пользователя с идентификационным номером 1034:

```
UPDATE Users
SET U_login='master'
WHERE user_id=1034
```

Здесь после ключевого слова UPDATE указывается таблица, в которой производятся изменения. Затем вслед за ключевым словом SET указывается само изменение. И, наконец, предикат вслед за ключевым словом WHERE специфицирует запись, для которой осуществляется это изменение.

Синтаксис команды удаления достаточно прост. Приведем пример:

```
DELETE FROM Users
WHERE user_id=1002
```

В данном случае из таблицы USERS удаляется запись, содержащая информацию о пользователе с идентификационным номером 1002.

Следует понимать, что здесь приведены наиболее простые запросы, иллюстрирующие использование языка SQL для манипулирования данными. Возможности языка значительно шире, и позволяют создавать сложные запросы, удовлетворяющие практически все потребности пользователей. Для детального изучения SQL существует обширный выбор литературы.

Во многих СУБД существуют объекты, представляющие собой заранее откомпилированные и оптимизированные запросы SQL. Примером таких объектов являются хранимые процедуры MS SQL Server. Такие запросы выполняются очень быстро. К тому же, можно организовать процесс взаимодействия пользователя с данными таким образом, чтобы он имел доступ только к хранимым процедурам, но не к данным, с которыми оперируют эти процедуры. Так появляется дополнительный барьер защиты информации от несанкционированного доступа.

СУБД, используемые в компьютеризированных СУиК ЯМ

Во время написания этой главы выбор разработчика был ограничен двумя SQL серверами, сертифицированными по третьему классу защиты от НСД. Это SQL Server производства компании Microsoft версии 6.5 и СУБД Oracle двух версий. Использование продуктов семейства Oracle ограничено их высокой стоимостью. MS SQL Server имеет относительно более доступную стоимость и приемлемую мощность для предприятий различного уровня. В настоящий момент Федеральная информационная система и ряд крупных предприятий отрасли используют СУБД Oracle. Большинство же остальных продуктов работает с использованием MS SQL Server 6.5 [13]. Так же как и в случае с операционными системами, производится сертификация новых программных продуктов. В ближайшее время планируется сертификация по третьему классу защиты от НСД MS SQL Server 2000 [14] и Oracle 10. Помимо СУБД, предназначенных для работы под управлением ОС Windows, вместе с защищенным дистрибутивом Linux, сертифицирована СУБД PostgreSQL.

7.3.3. Инструментальные средства разработки

Инструментальные средства разработки представляют собой третью составляющую базового программного обеспечения компьютеризированных СУиК ЯМ. Они выполняют две основных функции при проектировании систем и их эксплуатации. Прежде всего, с их помощью разработчик создает графический пользовательский интерфейс (ГИП). Без развитого и удобного интерфейса представить себе коммерческий продукт в наше время невозможно. Вторая функция прикладного программного обеспечения – про-

граммно обеспечивать целостность и безопасность информации. В зависимости от типа СУБД, на базе которой создается СУиК, эта функция может становиться главной. Например, в популярной СУБД MS Access большая часть функций обеспечения целостности данных ложится на формы, то есть на прикладное программное обеспечение. MS SQL Server, напротив, реализует эти функции на сервере. К средствам разработки не предъявляются требования обязательной сертификации.

Отраслевой стандарт накладывает следующие требования на инструментальные средства. Они должны предоставлять разработчику:

- удобные средства разработки программ;
- возможность визуального программирования;
- хорошие средства отладки;
- развитый аппарат обработки ошибок;
- поддержку многооконности;
- удобные средства связи с базами данных.

Часть этих требований неконкретна, но есть два вполне определенных требования, сокращающих круг претендентов на удовлетворение стандарту. Это требования наличия средств визуального программирования и связи с базами данных.

Под визуальным программированием понимается наличие возможностей формирования пользовательского интерфейса путем использования готовых графических объектов управления. Программист просто переносит их на рабочую форму, определяя затем их функциональность. Такого рода системы резко упрощают труд по формированию интерфейса и позволяют даже малоквалифицированным разработчикам получать профессионально выглядящие программные продукты в среде Windows.

Связь с базами данных в программной среде можно организовать разным путем, но существуют профессиональные системы, имеющие в своем составе специальные объекты и средства доступа к данным, позволяющие пользователю получать доступ к данным в различных форматах.

В настоящее время систем разработки программного обеспечения, имеющих такие возможности, достаточно много. Лидерами популярности являются продукты фирмы Microsoft – Visual Basic и Visual C++ и продукт фирмы Borland – Delphi и C++ Builder.

По материалам исследования, проведенного в отрасли в 2001 г., около трети разработчиков использовали Visual Basic и около 15 % разработчиков – Delphi. Популярность VB в среде российских разработчиков компьютеризированных СУиК ЯМ объясняется, главным образом, влиянием опыта разработчиков LANL (США), чей продукт CoreMAS, хотя и не был взят на вооружение предприятиями отрасли, но использовался в качестве образца при создании многих российских систем. Наконец, VB достаточно простая и удобная система программирования, различные версии которой имеют в своем составе многочисленные средства доступа к данным.

Следует же указать еще на одну особенность систем разработки приложений, которая хотя и не указана в стандарте отрасли, но давно уже является стандартом любой профессиональной системы разработки программных приложений. Используемое для разработки средство должно поддерживать объектно–ориентированное программирование (ООП). Рассмотрим кратко его принципы [15].

Объектно–ориентированное программирование

Основное отличие ООП от традиционного процедурного программирования заключается в следующем. При объектно–ориентированном подходе программа представляет собой набор определенных объектов, обладающих свойствами, осуществляющими действия и реагирующими на действия пользователя. Программа, по сути, превращается в процесс взаимодействия пользователя и объектов программы. Реагируя на те или иные действия пользователя, программа, а точнее объекты, включенные в программу, будет работать тем или иным образом. Такой подход делает программирование более гибким, позволяет избежать многих трудностей при отладке, так как отладка сводится к проверке методов и свойств объекта, а не всей огромной программы.

Что такое объект в ООП? Рассмотрим последовательность программных единиц. Идентификатор – определяет одно какое–либо значение, например цвет. Далее, во всех современных языках программирования есть понятие записи как совокупности идентификаторов. Может быть создана запись, содержащая место положения прямоугольника на экране (четыре числа), цвет (одно число), надпись (символьная строка), положение – кнопка нажата или не нажата (булевская переменная). Такая запись полностью определяет

кнопку меню на форме. Объектно–ориентированное программирование идет еще дальше. В объект включается процедура, реализующая некоторое действие, которое будет осуществляться при нажатии кнопки. Эта процедура называется методом. Причем доступ к ней возможен только из объекта. Таким образом, объект включает в себя не только данные, но и программный код. Если будет создано несколько кнопок, метод каждой из них будет связан с параметрами, т.е. свойствами именно этой кнопки.

Сформулируем основные понятия, связанные с ООП.

Объект – единица программы, содержащая в себе полное описание некоторой программируемой сущности, включая данные и программный код, позволяющий реализовывать определенные действия, свойственные объекту.

Свойства объекта – определяют суть объекта, для визуальных объектов это внешний вид, для объектов, связанных с базами данных – источник данных, например.

События – действие или ситуация, связанная с объектом. Для графического объекта, например, нажатие кнопки – событие, связанное со щелчком мышки, направленной на кнопку. Событие может возникать не в результате действий пользователя, а в результате действия программы или операционной системы – наступление определенного времени или сходимость итерационного процесса.

Метод – программный модуль (процедура, подпрограмма, функция), который выполняет обработку событий, связанных с объектом.

Класс – это шаблон для объекта. Конкретный объект с заполненными значениями свойств является экземпляром класса.

ООП характеризуется следующими понятиями:

инкапсуляция – объединение данных и программного кода в объекте и сокрытие способов их реализации от пользователя. Доступ к объекту пользователь может иметь только через соответствующие методы и события;

наследование – классы можно создавать на базе существующих классов, при этом методы и свойства передаются по наследству;

полиморфизм – порожденные объекты знают, какому именно методу надо передавать обработку события. Так потомок может иметь метод, имеющий название, совпадающее с названием метода родителя, но отличающееся в свойствах. Например – объект пло-

ская кнопка и 3D-кнопка могут иметь метод обработки события «нажим» одного имени, но графика отображения нажатия различна. Тогда если 3D-кнопка потомок, то будет вызываться именно его метод.

В настоящее время существует достаточно много систем программирования, использующих объектно-ориентированный подход. Это прежде всего системы, использующие в качестве языка программирования C++. Система программирования Delphi реализует Object Pascal. Microsoft Visual Studio.NET имеет в своем составе Visual Basic 7, который, наконец, приобрел все свойства объектно-ориентированного языка программирования.

При выборе системы разработки программного обеспечения необходимо, прежде всего, руководствоваться внутренними стандартами предприятия или отрасли. При этом обычно на предприятии существуют квалифицированные программисты, хорошо владеющие привычными средствами разработки. Переход на новые средства разработки должен быть обусловлен необходимостью: перехода на новую технику, требующую специальных приемов программирования; использования СУБД, имеющую в своем составе средства разработки; перехода на другую операционную систему.

Так, в условиях сертификации базового программного обеспечения на основе открытого кода появилась возможность использования средств разработки, функционирующих в этой среде. В качестве такого рода средств разработки может быть использована платформа программирования J2EE (Java2 Platform Enterprise Edition), использующая язык программирования Java. Рассмотрим далее понятие платформы программирования, возможности, которые она дает разработчику приложений баз данных.

Платформы программирования

В настоящее время существуют две конкурирующие платформы программирования: J2EE (Java2 Platform Enterprise Edition) [16], созданная Sun Microsystems, и .NET [17] (читается «дот нет») производства Microsoft. Обе платформы дают возможность создания пользовательских приложений различной архитектуры. Прежде всего, это классические приложения клиент/сервер. Большинство

существующих компьютеризированных СУиК ЯМ используют именно такую архитектуру. Другая возможность – создание Web-приложений. При этом на рабочих станциях необходимо разместить только программу браузер, которая входит в большинство операционных систем. На Web-сервере осуществляется работа приложения, организуется связь с данными и формируются Web-страницы, которые передаются пользователю. Наконец, обе платформы программирования предлагают новую технологию разработки приложений, заключающуюся в создании и использовании Web-служб. Краеугольным камнем Web-служб является их способность передавать данные от поставщика к потребителю, используя стандартный HTTP протокол. В качестве формата данных используется XML. Использование стандартных средств форматирования и передачи данных позволяет создавать приложения не зависящие от аппаратных платформ. Пользовательское приложение осуществляет запрос, который передается Web-службе с помощью протокола HTTP. Результат выполнения запроса преобразуется в XML формат и передается пользователю. Язык разметки данных XML специально создан для передачи данных и легко преобразуется в форматы, которые могут быть просмотрены через браузеры. Обращение к Web-службам может быть осуществлено как из Web-приложения, так и из обычного программного приложения, функционирующего на рабочей станции.

Обе платформы программирования обладают примерно схожей функциональностью. Основные различия заключаются в межплатформенной переносимости приложений и поддержке различных языков программирования. Единственной средой разработки, обеспечивающей в настоящее время многоплатформенность, является J2EE. Microsoft практически всегда ориентируется на ОС своего производства.

С другой стороны, J2EE использует единственный язык разработки – Java, в то время как средство разработки Visual Studio.NET. включает в свой состав Visual Basic, C++, C# и Java. Если на предприятии используется базовое программное обеспечение производства Microsoft, то .NET дает возможность перехода на новые технологии с минимальными затратами. Программисты, использующие Visual Basic для разработки приложений баз данных, без труда пе-

рейдут к программированию Web-служб с помощью VB.NET, оставаясь в привычной среде разработки.

Переход же на операционные системы с открытым кодом требует использования иных средств разработки. При этом выбор платформы программирования J2EE делается естественным.

Обеспечение связи прикладной программы с данными

Одним из основных требований отраслевого стандарта к инструментальным средствам программирования, требующимся для создания компьютеризированных СУБД, является наличие специальных средств доступа к базам данных. Microsoft разработал целый ряд коллекций объектных классов, которые моделируют структуру базы данных и позволяют как непосредственно обрабатывать хранящиеся в базе данные, так и посылать на выполнение SQL запросы. Указанные коллекции объектов постоянно модернизируются, появляются новые. Одной из первых коллекций классов такого рода была DAO (Data Access Objects) [17]. С помощью этой коллекции классов программное приложение получало возможность манипулировать данными, с которыми возможно организовать взаимодействие с использованием языка запросов SQL. На рис. 7.6 представлена объектная иерархия, реализованная в DAO.

С помощью данной коллекции объектов, приложение, созданное с использованием Microsoft Visual Studio, способно напрямую взаимодействовать с данными в форматах некоторых популярных СУБД и электронных таблиц, например Access и Excel. При этом открывается соединение с базой данных, которое поддерживается открытым весь сеанс работы приложения. Данные из таблиц или с помощью запросов SQL копируются в наборы данных – объект Recordset. Объекты Recordset имеют в своем составе достаточное количество методов, которые позволяют осуществлять навигацию по набору данных, осуществлять поисковые функции, модифицировать их, т.е. осуществлять все действия необходимые для работы с данными.

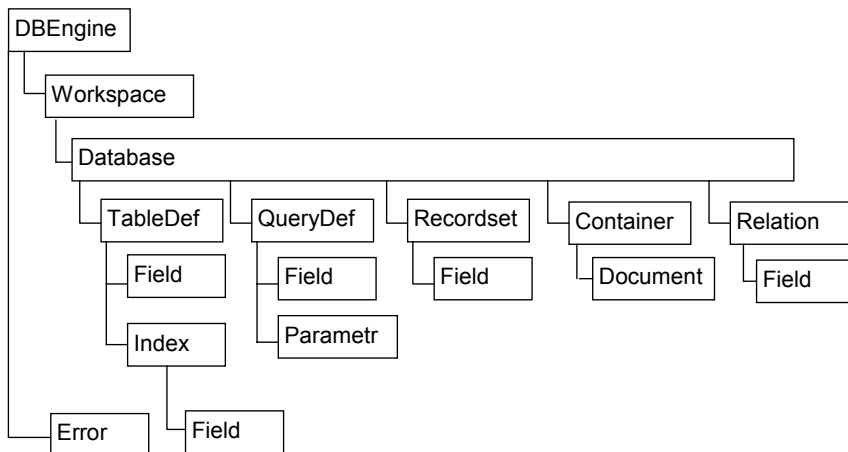


Рис. 7.6. Иерархия объектов в коллекции
объектных классов доступа к данным DAO

Тем не менее многие источники данных, например сертифицированные для использования в СУиК ЯМ MS SQL Server и Oracle, недоступны для прямой работы с DAO. Для доступа к данным в этих форматах существует более общий метод доступа к данным. В качестве стандарта работы с данными в различных форматах Microsoft использует ODBC (Open Database Connectivity).

ODBC представляет собой набор драйверов и интерфейсов, позволяющий связывать различные платформы и использовать стандартный язык запросов для различных типов организации данных. Для реализации доступа к данным, хранящимся в различных форматах, в операционной системе устанавливаются нужные драйверы, и конкретной базе данных в выбранном формате присваивается логическое имя набора ODBC. В дальнейшем разработчик приложения может не думать о конкретном представлении данных, ему достаточно использовать стандартные запросы SQL для создания в DAO наборов Recordset из баз данных любого формата. В дальнейшем приложение может манипулировать данными с помощью средств языка высокого уровня и, при необходимости, с помощью стандартных запросов SQL изменять данные в базе данных или добавлять новые.

С использованием коллекции DAO было создано огромное количество приложений баз данных. В частности, компьютеризированные СУиК ЯМ, разработанные в Лос–Аламосской Национальной Лаборатории, LANMAS и ее локализованная для России и СНГ версия COREMAS при работе с данными используют DAO.

Говоря об объектах, предназначенных для организации доступа к базам данных, надо упомянуть также о коллекции классов RDO (Remote Database Objects), которая оптимизирована для работы в приложениях клиент/сервер. Она так же как и DAO, использует ODBC для связи с удаленными источниками данных. С использованием этой коллекции объектных классов разработчиками Курчатовского института создана компьютеризированная СУиК ЯМ КИМАКС.

По мере развития информационных технологий менялись архитектуры информационных систем. И, прежде всего, появились программные приложения доступные через Интернет. Потребовались новые объекты доступа к данным, которые могли бы быть использованы в Web–приложениях. Кроме того, развитие электронных средств поддержки бизнеса потребовало возможности доступа к нереляционным данным – электронным документам, письмам и т.п. Для обеспечения этих возможностей была разработана новая технология доступа к данным разного рода – OLE DB (Object Linking and Embedding) и новая коллекция объектных классов ADO (ActiveX Data Objects) [17]. В отличие от ODBC, OLE DB способен связывать приложения с данными в любом формате. В частности, он так же может использовать драйвера ODBC для связи с реляционными базами данных. Чтобы использовать OLE DB, необходимо воспользоваться услугами OLE DB–провайдера, который должен быть установлен для каждого типа источников данных. OLE DB–провайдеры поставляются вместе с операционной системой и СУБД. Таким образом, используя ADO с OLE DB–провайдером для ODBC можно получить ту же функциональность, что и с помощью DAO и RDO. Вместе с тем, объекты ADO не образуют такой жесткой иерархической структуры, как DAO, и позволят более гибко работать с данными различных форматов. На рис. 7.7 представлена схема классов коллекции ADO.

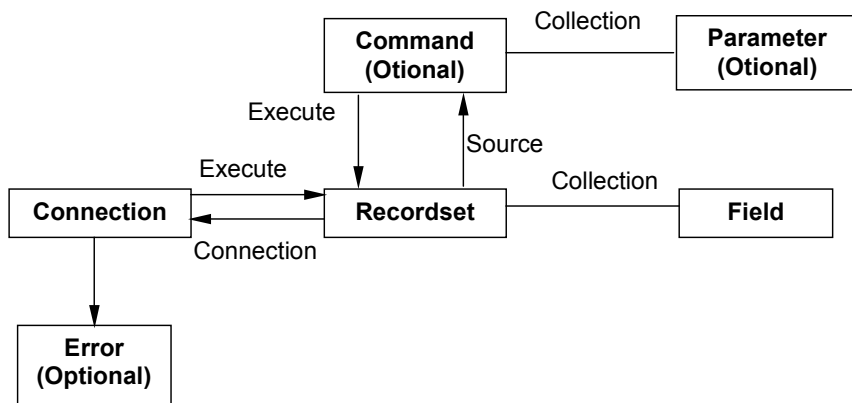


Рис. 7.7. Коллекция объектных классов доступа к данным ADO

До последнего времени ADO являлась основным компонентом доступа к данным в приложениях, работающих на платформе Windows. Эти компоненты поддерживались рядом программных продуктов сторонних разработчиков, например Borland Delphi. Ввиду важности этих компонент для создания приложений баз данных, рассмотрим их более подробно.

Все объекты ADO, за исключением Error и Field, могут быть открыты независимо. Объекты Command, Error и Parameter являются не обязательными. Объект Connection инкапсулирует в себе связь с источником данных. Он обладает методом Execute, который возвращает в результате выполнения запроса объект Recordset, содержащий выборку данных. Объект Recordset является сердцевинной ADO. Он может быть создан также независимо от других объектов. Он позволяет осуществлять навигацию по наборам записей, добавлять, удалять, редактировать записи, осуществлять поиск и фильтровать информацию. Основные методы объекта рассмотрим на примерах.

Пусть в ODBC сконфигурирован источник данных, имя которого хранится в строковой переменной myDSN. Тогда следующая последовательность команд на VB установит соединение с указанным набором данных. Далее, с помощью запроса SQL создается объект Recordset, содержащий данные таблицы Titles:

```
Dim myADOConnection As New ADODB.Connection
Dim myRecordset As ADODB.Recordset
```

```
MyADOConnection.Open myDSN
Set myRecordset = MyADOConnection.Execute(«Select * from titles»)
```

Далее, используя методы и свойства объекта Recordset, можно манипулировать выбранной информацией. В табл. 7.1 приведены методы объекта Recordset, а в табл. 7.2 его основные свойства.

Таблица 7.1

Методы объекта Recordset

Метод	Описание
AddNew	Добавление записи в набор
Close	Закрывает текущий набор
Delete	Уничтожает текущую запись
GetRows	Возвращает количество строк
Move	Переводит на специфицированную запись
MoveFirst	Переводит на первую запись
MoveLast	Переводит на последнюю запись
MoveNext	Переводит на следующую запись
MovePrevious	Переводит на предыдущую запись
NextRecordset	Возвращает следующий набор, если результатом выполнения запроса являются множественные наборы
Update	Сохраняет изменения в текущей записи

Таблица 7.2

Свойства объекта Recordset

Свойство	Описание
BOF	Возвращает True, если текущая запись на начале
Bookmark	Устанавливает или возвращает значение записи в качестве закладки
CursorType	Устанавливает или определяет тип курсора: 3 – статичный курсор, не позволяет видеть изменения, вносимые другими пользователями; 2 – динамичный курсор, показывает изменения, вносимые другими пользователями; 1 – keyset курсор, изменения и удаления других пользователей видны, добавления нет
EOF	Возвращает True, если текущая запись в конце
Filter	Специфицирует значение фильтра
RecordCount	Возвращает число записей в наборе

Дальнейшее развитие технология ADO получила при создании платформы программирования Microsoft.NET в виде ADO.NET [18]. При разработке этой модели доступа к данным упор делался на ее использовании в Web-приложениях, хотя она будет столь же успешно функционировать и в традиционных Windows приложениях. ADO.NET отличается от своей предшественницы двумя основными чертами: во-первых, она способна работать с данными в отрыве от источника данных; во-вторых, для обмена данными используется язык XML.

Первое свойство чрезвычайно важно при работе с данными в Интернете. Каждое соединение с сервером потребляет его ресурсы. При определенном количестве пользователей, обратившихся к серверу, существует возможность резкого снижения его эффективности. Интернет-приложения, где потенциальное число пользователей велико, должно учитывать это обстоятельство. По этой причине ADO.NET подключает приложение к базе данных на короткое время, необходимое для получения выборки информации или обновления базы данных. После предоставления набора данных или выполнения команды связь прерывается, и дальнейшая обработка полученных данных происходит на клиенте без связи с сервером.

Использование XML в качестве формата для передачи данных делает приложения, созданные с использованием ADO.NET более гибкими, поскольку XML является техническим стандартом для передачи данных. Если приложение функционирует в сетях Интернет/Инtranет, оно делается независимым от платформы клиента. На рис. 7.8 приводится схема модели доступа к данным в ADO.NET.

Для реализации концепции обработки данных в отрыве от источника данных, в отличие от ADO, ADO.NET формирует не Recordset, а DataSet. RecordSet представлял собой выборку из одной или нескольких таблиц базы данных, осуществленную с помощью запроса SQL. DataSet представляет собой частичную копию базы данных, может состоять из нескольких таблиц с установленными отношениями.

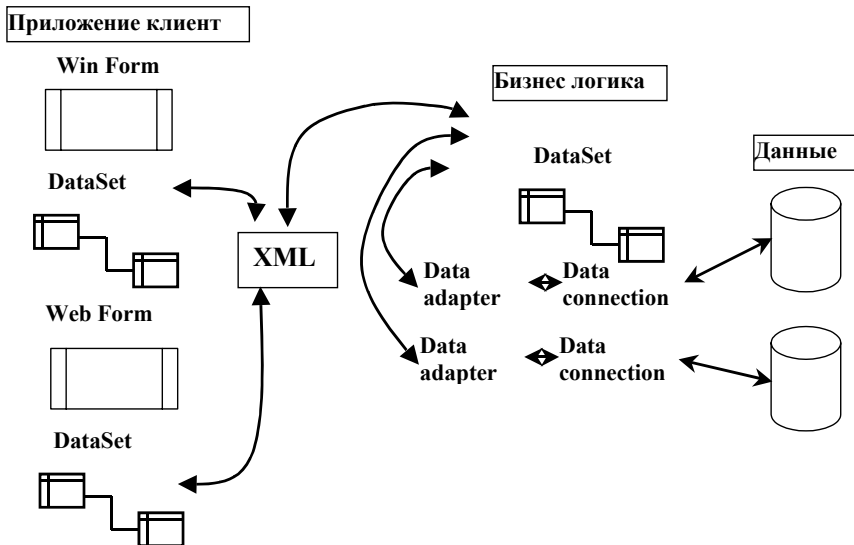


Рис. 7.8. Модель доступа к данным в ADO.NET

В заключение обзора средств доступа к данным следует остановиться на вопросах выбора объектов доступа к данным при модернизации существующих и создании новых приложений. При создании новых приложений на базе новых информационных технологий естественно использовать современные объекты доступа к данным. Вместе с тем, при модернизации существующих приложений не следует без крайней необходимости менять объектную модель доступа к данным. Эта модель составляет основу логики общения приложения с данными, и ее изменение приведет к необходимости практического переписывания кода всего приложения.

7.4. Прикладное программное обеспечение

Рассмотрим современное состояние дел с созданием компьютеризированных СУиК ЯМ на предприятиях, имеющих в обращении ядерные материалы. Модернизация учета, контроля и физической защиты ЯМ в РФ начались в 1996 г. при финансовой и организационной поддержке Департамента энергетики США в рамках межправительственного соглашения. Со стороны РФ в сотрудничестве

принимали участие российские предприятия топливного цикла (СХК, ГХК, «Маяк» и др.) и ведущие научно-исследовательские институты (ФЭИ, КИ). В качестве базы подготовки специалистов был выбран МИФИ. С американской стороны в сотрудничестве принимали участие ведущие национальные лаборатории LANL, SN, BNL, PNNL, ORNL.

Партнером в деле разработки и внедрения компьютеризированных систем учета и контроля с американской стороны выступала Лос-Аламосская Национальная лаборатория (LANL). Она разработала и адаптировала для использования на территории СНГ два программных продукта: CoreMAS и E\ZMAS. В рамках этого сотрудничества были сертифицированы в России операционная система Windows NT 4.0 и СУБД MS SQL Server 6.5 и Oracle 7. Многие российские разработки в области создания компьютеризированных СУиК ЯМ вследствие изначальной ориентации на стандарты США были выполнены на том же программном обеспечении и в похожей архитектуре. При финансовой поддержке США была создана сетевая инфраструктура на предприятиях отрасли, осуществлены поставки средств ВТ, проведено обучение персонала, профинансировано создание прикладного ПО.

За прошедшее с тех пор десятилетие в отрасли были сформированы отечественные команды разработчиков программного обеспечения для СУиК ЯМ. В сентябре 2006 г. состоялся 7-й международный семинар «Разработка федеральной автоматизированной системы учета и контроля ядерных материалов России». На семинаре прозвучали следующие данные, касающиеся развития компьютеризированных СУиК ЯМ в отрасли [19].

На федеральном уровне введена в действие нормативная база учета и контроля ЯМ, Росатомом определена система отчетности о ядерных материалах, создан информационно-аналитический центр ФИС, организован сбор информации от предприятий. На ведомственном уровне созданы отдельные информационные системы, решающие, в том числе, задачи учета и контроля ЯМ. На уровне организаций, как показали результаты информационного обследования, за последние годы заметно активизировались работы по созданию и внедрению автоматизированных систем УК ЯМ.

На 17 % предприятий ядерной отрасли компьютеризированные СУиК созданы на всех ЗБМ. На 27 % предприятий компьютеризи-

рованные системы созданы для части ЗБМ. Оставшиеся 12 % предприятий планируют создание и развертывание КСУиК ЯМ в ближайшее время. Однако 44 % предприятий не планируют создания систем такого рода.

Трудности с вводом компьютеризированных СУиК ЯМ на других предприятиях объясняются недостаточным финансированием и поздним сроком начала работ на этих объектах. Кроме того, трудности с аттестацией систем возникают вследствие того, что на начальных этапах развития ФИС не были четко сформулированы требования к системам. Эти требования периодически менялись в процессе разработки. В настоящее время создаются системы на российских АЭС, ведутся работы по компьютеризации учета и контроля ядерных материалов практически на всех предприятиях отрасли.

Все аттестованные системы имеют оригинальную архитектуру, созданы с использованием различных средств разработки. В целом в отрасли создано и продолжает развиваться первое поколение компьютеризированных СУиК ЯМ. Оно характеризуется использованием базового программного обеспечения сертифицированного по третьему классу защиты от НСД. Это исключает возможность использования инфраструктуры компьютерной сети для любых других целей предприятия, что значительно повышает стоимость эксплуатации всей системы.

Единственная система, которая аттестована на класс защиты от НСД 1Б по требованиям Гостехкомиссии 1992 г. (глава 8 часть II), что позволяет обрабатывать информацию различных степеней секретности, это КИМАКС производства Курчатовского института [20]. Эта возможность была достигнута благодаря созданию собственной системы безопасности информации, которая функционирует независимо от системы безопасности Windows NT 4.0.

При разработке систем практически не используется объектно-ориентированное программирование и технологии управления качеством разработки. За исключением отдельных систем, практически не используются Web-приложения. Дальнейшее развитие ФИС должно идти как вширь, то есть в перспективе охватить все предприятия, имеющие в обращении ядерный материал, так и вглубь. Под последним понимается создание компьютеризированных СУиК по второму классу защищенности от НСД. Это связано, прежде всего, с переходом на новое базовое программное обеспечение.

Для создания систем нового поколения, помимо перехода на новое базовое программное обеспечение, необходимо выработать отраслевые стандарты разработки программного обеспечения, гарантирующие высокое качество, простоту модернизации и экономическую эффективность. Что требует использования последних достижений информационных технологий в области разработки приложений баз данных. В этом направлении отрасль находится только в начале пути. В перспективе должна выделиться группа разработчиков программного обеспечения, которая на коммерческой основе будет создавать и поддерживать СУиК ЯМ на всех предприятиях отрасли.

В связи с этим поднимается вопрос о необходимой номенклатуре программных продуктов, которые покрывали бы потребности различных предприятий в компьютеризированных СУиК ЯМ. Периодически возникают дискуссии о создании единого продукта, который мог бы использоваться на всех площадках. Первой попыткой внедрения такого рода программного приложения была поставка американской стороной СУиК ЯМ CoreMAS. Эта попытка закончилась ничем, поскольку данный продукт не получил признания на российских предприятиях и не используется в настоящее время.

Представляется, что из-за существенных различий в технологиях обращения с ЯМ на предприятиях России, отличии в самих материалах, создание такого универсального продукта невозможно. Для большинства предприятий он будет обладать чрезмерными возможностями, а, соответственно, станет необоснованно дорогим и сложным в освоении. Далее приводится анализ потребностей предприятий в компьютеризированных СУиК в зависимости от объемов ядерного материала на предприятии и используемых операций с ним.

Требования к компьютеризированным СУиК ЯМ в зависимости от типа предприятия

Специалисты ЛАНЛ провели анализ типов предприятий, имеющих дело с ЯМ, классифицировали их и высказали предложения по соответствию типа предприятия и типа СУиК. Сложность СУиК определяется сложностью и количеством операций с ЯМ. Рассматриваемый спектр предприятий распространяется от маленького

хранилища до высокотехнологичного предприятия по переработке. Предприятия делятся на пять типов.

Тип 1. Маленькое хранилище с числом учетных единиц меньше 50. Не производится сложных операций. Материал статичен, единицы находятся на хранении длительное время (менее 10 перемещений в месяц). Имеется одна ЗБМ площадью порядка 100 м².

Тип 2. Среднее предприятие с числом учетных единиц меньше 500. Без сложных операций и переработки. Основная функция хранение и умеренная активность (до 100 перемещений в месяц). Имеет одну или две ЗБМ.

Тип 3. Большое хранилище с числом учетных единиц от 500 до 10000. Имеется несколько ЗБМ. Производится большое число измерений и инспекций. Перемещения производятся в основном внутри предприятия (до 1000 в месяц). Не производится переработка, нет механизма потерь.

Тип 4. Среднее производственное предприятие с большим инвентарным количеством и существенной активностью. Число учетных единиц от 10000 до 20000. Число перемещений до 10000 в месяц. Предприятие располагается в нескольких зданиях и имеет множество ЗБМ. Операции с материалом носят сложный характер и существует несколько механизмов потери материалов.

Тип 5. Большое сложное предприятие с инвентарным количеством учетных единиц от 20000 до 100000. Наличный материал очень динамичен (до 50000 перемещений в месяц). Существует множество механизмов потери материала.

На предприятиях первого типа не происходит обработка материала. Учетных единиц очень мало. Для такого предприятия подойдет простейшая система учета с использованием бумажной технологии. Достаточно одного материально ответственного, который должен делать записи в журналы.

На предприятиях второго типа материал большую часть времени проводит в хранилище, но может возникнуть необходимость в перемещении материала для анализа методами неразрушающего контроля. Операции простые и требуют простую систему учета. Можно использовать бумажную, но лучше – простую компьютеризированную базу данных, способную создавать отчеты с сортировкой. Достаточно одного материально ответственного на ЗБМ.

На предприятиях третьего типа учетных единиц больше, чем неавтоматизированная система может обработать. Главное, что на этих предприятиях появляется функция изменения ядерного материала. Для этого случая подходит компьютеризированная система с одной – тремя рабочими станциями. База данных должна быть расположена на одном центральном компьютере, объединенном в сеть с компьютерами на рабочих местах.

Предприятия четвертого типа – в основном предприятия научно-исследовательского характера и операции с материалом производятся не промышленные. У каждой ЗБМ должен быть материально ответственный, имеющий доступ к рабочей станции. Подразумевается использование системы типа клиент/сервер. Требуется хорошо спроектированная база данных и система управления, поддерживающая достаточно сложные функции. Система учета должна обслуживать действия с материалом в балк-форме. Активность до 800 перемещений в день. Разнообразны функции отчетности. Обслуживать систему должны несколько человек.

На предприятиях пятого типа работает несколько материальных ответственных, на каждой ЗБМ может быть своя специфика, но необходима центральная база данных. Масштаб работ больше, чем в четвертом случае, но функции те же. При такой сложной работе требуется держать синхронизированный резервный сервер.

Вследствие такого анализа стало понятно, что для отрасли требуется не менее трех – четырех типов компьютеризированных СУиК ЯМ. Главный фактор, который влияет на сложности системы, это наличие переработки материала и, следовательно, возникновения механизмов естественных технологических потерь.

При реализации такого подхода в LANL были созданы две компьютеризированные СУиК. Для предприятий 1-го и 2-го типа, а так же для части предприятий 3-го типа была создана облегченная СУиК ЯМ – E/Z MAS. В дальнейшем функции системы были расширены, так что при некоторой доработке система может использоваться и на более сложных предприятиях. Более сложная и универсальная система CoreMAS способна обслужить предприятия четвертого и пятого типа.

В качестве примера компьютеризированных СУиК ЯМ рассмотрим эти две системы, поскольку они реализуют различные техноло-

гии и покрывают практически весь спектр операций, которые должны выполнять системы.

CoreMAS – СУиК ЯМ на основе технологий клиент/сервер

Система компьютеризированного учета и контроля ЯМ CoreMAS создана в Лос–Аламосской Национальной лаборатории США на основе классической архитектуры клиент/сервер [21]. В качестве объекта изучения данная система выбрана по следующим причинам:

- это достаточно современная система, построенная на идеологии клиент/сервер с использованием современного программного обеспечения;
- в силу идеологии создания системы, предусматривающей ее расширение и адаптацию на каждой новой площадке, она поставляется полностью документированной, снабженной учебными пособиями и текстами всех программных кодов;
- в России в настоящее время нет ни одной СУиК такого уровня документированности и являющейся эталонной для отрасли, вместе с тем CoreMAS поставлена на ряд предприятий России и оказала большое влияние на выбор программных средств и идеологию создаваемых отечественных СУиК ЯМ;
- наконец, эта система была поставлена в МИФИ на безвозмездной основе американской стороной в рамках программы подготовки специалистов данной квалификации.

Основная задача изучения системы – продемонстрировать использование возможностей ПО, рассмотренного нами ранее; на примере реальной системы рассмотреть дизайн базы данных, ориентированной на предприятия, связанные с обработкой и хранением ядерных материалов.

Ключевая концепция СУиК ЯМ CoreMAS

CoreMAS – Core Material Accountability System является дочерним продуктом, построенном на основе системы LANMAS – Local Area NETwork Material Accountability System. Из самого названия следует, что данная система предназначена для использования в локальных сетях вычислительных машин на соответствующих предприятиях. Обе системы созданы в Лос–Аламосской Нацио-

нальной Лаборатории. LANMAS – СУиК предназначена для работы на предприятиях США. CoreMAS адаптирована для использования на предприятиях ядерного цикла СНГ.

CoreMAS снабжена полным набором документации. Каждое программное средство, в соответствии с требованиями стандарта США, в процессе создания, сопровождения и поддержки должно сопровождаться определенным набором документов. Перечислим их:

- Спецификация требований к программному обеспечению – SRS (Software Requirements Specification). Данный документ описывает основные понятия, функции, соотношения между частями программного обеспечения. Этот документ является наиболее важным и лежит в основе проектирования интерфейсов.

- Описание дизайна программного обеспечения – SDD (Software Design Description) – создается на основе SRS.

- План проверки программного обеспечения – STP (Software Test Plan) – формируется на базе SRS.

- Руководство пользователя.

- Материалы для курсов обучения.

При постановке системы на предприятии на компакт-диске передаются практически все документы данного перечня. Пользователю передаются тексты сохраняемых процедур и кодов на Visual Basic.

Ключевая концепция СУиК CoreMAS заключается в создании функционального ядра, которое может быть расширено на каждой внедряющей систему площадке с учетом потребностей предприятия и местных стандартов.

Ядро системы должно удовлетворять нормативным правительственным и неправительственным требованиям. Это ядро непосредственно готово к использованию. При установке системы пользователи получают все исходные коды для облегчения процесса создания собственных средств.

При анализе конструктивных особенностей CoreMAS выделяют три уровня системы (рис. 7.9). Верхним уровнем является уровень интерфейса. На этом уровне ядро содержит образцовые формы для ввода/вывода информации, на основании которых пользователь может создавать свои формы, используемые вместо или наряду с формами CoreMAS. При этом могут быть добавлены функции проверки правильности вводимых данных до установления связи с

функциональными программами ядра. Интерфейс реализуется на языке программирования Visual Basic, что позволяет легко реализовывать интерфейс на экране компьютера.

Уровень пользователя	CoreMAS Примеры форм	Формы для конкретной площадки
Функциональный уровень	Транзакции Администрация Поддержка	Код для конкретной площадки
Уровень базы данных	База данных ядра	Таблицы для конкретной площадки

Рис. 7.9. Дизайн высокого уровня СУиК ЯМ CoreMAS

На функциональном уровне ядро содержит программные коды, выполняющие функции поддержки необходимых операций (транзакций):

- выполнение транзакций с материалами и единицами хранения;
- функции администрации пользователей и баз данных системы;
- поддержка административных функций хранения ядерных материалов.

Наряду с кодами и подпрограммами, реализующими функции ядра, используются коды, созданные для конкретных площадок, реализующие специфические функции, свойственные данной площадке или специфическим образом, реализующие основные функции.

Уровень базы данных содержит базу данных, состоящую из таблиц, необходимых для полноценной работы системы учета.

Обзор дизайна CoreMAS

CoreMAS использует в своей работе архитектуру клиент/сервер. На клиентских компьютерах выполняются интерфейсы пользовате-

лей, проходят предварительную проверку некоторые данные. Сервер управляет доступом ко всей базе данных. На рис. 7.10 представлено типичное рабочее окружение, в котором может функционировать CoreMAS. В центре системы расположен компьютер-сервер, доступ к нему имеют рабочие станции-клиенты, соединенные двумя способами: по локальной сети EtherNET и посредством модемов через телефонную линию. Работа системы обеспечивается следующим программным обеспечением:

- Операционная система Windows NT 4.0;
- СУБД MS SQL Server 6.5;
- Система визуального программирования Visual Basic 5.0.

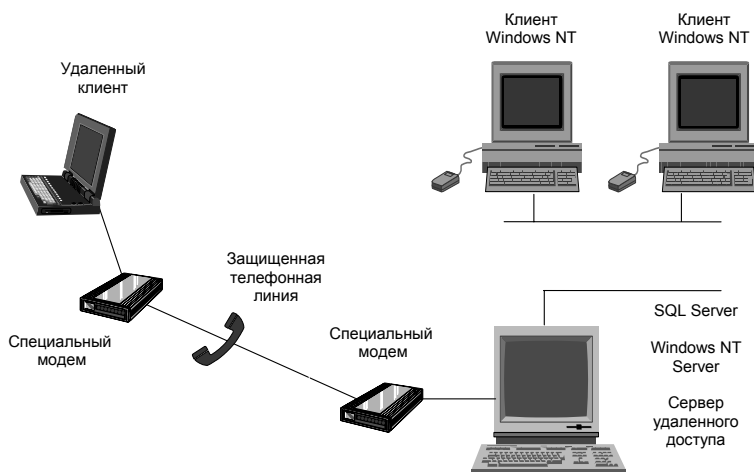


Рис. 7.10. Типичная эксплуатационная среда CoreMAS

Спецификация требований к программному обеспечению (SRS) приводит следующие технические характеристики системы CoreMAS:

- Способность генерации и распечатки инвентарной книги для всех материалов не более чем за 3 часа. Это один из основных параметров предъявляемых к СУиК стандартами DOE.
- Точное отражение состояния и места расположения единиц хранения не менее чем в 99 % случаев, при условии адекватного

ввода информации оператором, поскольку система физически не идентифицирует место расположения единицы хранения.

- Выполнение, по меньшей мере, 150000 транзакций в месяц.
- Одновременное обслуживание до 30 пользователей со временем задержки не более 3 секунд.
- Поддержка, по меньшей мере, 500000 инвентарных единиц.
- Поддержка, по меньшей мере, 10 000 000 транзакций.

Такие параметры системы подразумевают возможность ее использования на предприятиях, которые характеризуются как большие и сложные с большим количеством и существенной активностью материалов. Наличный материал очень динамичен, имеется большое количество ЗБМ, существует множество механизмов потери материала. Такие параметры СУиК CoreMAS затрудняют ее использование для небольших научных учреждений, что и привело к последующему созданию «облегченной» СУиК ЯМ E/Z MAS.

Как система учета CoreMAS обладает рядом свойств, характеризующих его эксплуатационные возможности. Разработчики системы выделяют следующие его свойства:

- полный набор функций учета;
- поддержка специальных отчетов;
- экономичная (в сравнении с системами, основанными на других архитектурах);
- поддерживаемая и масштабируемая (устанавливается на различные площадки с различными масштабами сетей и требований);
- базируется только на коммерческом программном обеспечении;
- обеспечение высокой степени безопасности;
- не предусматривает физического ограничения перемещений, нет функции контроля входов и дверей.

Разработчики системы считают, что использование коммерческого программного обеспечения повышает уровень информационной безопасности системы в целом. Однако взгляд российских специалистов в корне отличен. Надо учитывать, что базовое программное обеспечение, используемое при разработке COREMAS, изначально создавалось не для использования в системах, в которых будет функционировать информация, составляющая гостайну. Эти продукты созданы скорее для использования в малом и среднем бизнесе. Поэтому говорить вслед за разработчиками из LANL,

что COREMAS обладает высокой степенью защищенности, по меньшей мере, некорректно.

Был разработан тест для проверки быстродействия системы. Тест был рассчитан на 10000 учетных единиц хранения, каждая из которых имела бы 100 записей предыстории. Предполагалось, что за 1–2 минуты система должна выдать список инвентарных единиц для произвольного выбранного места хранения. Конкретная база данных, на основе которой проводился тест, имела 16000 учетных единиц, 160 записей предыстории у каждой. На получение инвентарного списка для заданного места ушло 3 секунды.

Рассмотрим основные особенности конструкции системы. Начнем этот обзор с дизайна базы данных.

Дизайн базы данных CoreMAS

Дизайн базы данных – самый важный фактор в системе компьютеризованного учета. Все другие компоненты системы зависят от качества дизайна базы данных. Качество итогового продукта в огромной степени определяется теми решениями, которые были приняты на этапе проектирования базы данных. База данных CoreMAS использует в основном третью нормальную форму, отклоняясь от нее только по обоснованным причинам, связанным с эффективностью.

Основной технологией CoreMAS является технология клиент/сервер – ядро базы данных находится на сервере, в то время как интерфейс пользователя работает на клиентском компьютере и связан с сервером через сеть доверительными отношениями «trusted connection». Для обеспечения безопасности информации используется интегрированная система защиты SQL Server и операционной системы Windows NT. Для подключения клиента к базе данных используется механизм ODBC.

Выделим основные объекты базы данных и опишем решения, которые использовались для описания информации об этих объектах.

Главный объект СУиК ЯМ – ядерный материал. База данных проектировалась таким образом, чтобы охватить все его необходимые атрибуты. Каждый имеющийся в наличии материал может быть охарактеризован по любому числу элементов. Каждый элемент может быть охарактеризован по любому числу изотопов. Обладая полной информацией о химической природе материала, база

данных позволяет удовлетворить разнообразные запросы пользователя.

Важными понятиями базы данных являются места расположения и счета материала. От каждой площадки требуется, чтобы она имела в своем составе, по меньшей мере, одну ЗБМ. Во многих подразделениях каждому «месту учета» в СУиК соответствует определенное физическое местоположение, однако есть и такие подразделения, в которых ЗБМ может располагаться в более чем одном физическом местоположении, так же как и более чем одна ЗБМ может располагаться в одном физическом местоположении. CoreMAS рассматривает счет материала (принадлежность к ЗБМ) и местоположение материала как отдельные концепции. Большая часть подразделений обращаются к местоположению посредством названия местоположения. Например, названием местоположения может быть номер здания, комнаты или шкафа. Места расположения рассматриваются как физические местоположения, а не как конструкции для учета. Каждому материалу соответствует уникальный счет материала. Уникальность требуется для того, чтобы помочь в организации данных в базе данных ядра CoreMAS. Точно так же название местоположения требует от CoreMAS предоставить обозначение местоположения для его идентификации. Для этого предусмотрен уникальный идентификатор местоположения. От названия местоположения не требуется, чтобы оно было уникальным, однако при утверждении в конкретном подразделении такое правило может быть принято.

Ядро базы данных CoreMAS принимает концепцию учетной единицы. «Учетная единица» определяет учитываемый материал при делении его вплоть до самых малых частей, имеющих один тип материала, относящегося к «учетной единице», или более одного, в дополнение к неучитываемым элементам или изотопам. Идентификатор учетной единицы должен быть уникальным, от названия же учетной единицы уникальности не требуется.

Контейнеризация исходит из логической концепции, что учетные единицы часто сгруппированы вместе. Эта группировка может быть в физическом контейнере, в смонтированном узле, или в комбинации другого рода. Физический контейнер может содержать смонтированный узел, другой контейнер, один тип упаковки или более, или одну учетную единицу или более. Это ведет к следую-

щему обобщению: контейнер может содержать контейнер(ы), упаковку или материал. Таким способом физический контейнер или собранный узел можно трактовать с помощью логической концепции контейнеризации. Учетная единица в контейнере теряет способность перемещаться отдельно от контейнера. Например, если физический контейнер содержит учетные единицы А, В и С, не имеет смысла учитывать возможность перемещения учетной единицы В без одновременного перемещения единиц А и С. Идентификатор описания контейнера используется с тем, чтобы однозначно определить контейнер. CoreMAS требует предоставлять уникальный идентификатор контейнера для каждого контейнера. От названий и типов контейнеров не требуется, чтобы они были уникальными, однако при утверждении в конкретном подразделении такое правило может быть принято. Если технологически требуется, то база данных CoreMAS может ограничить число уровней вложенности контейнеров.

База данных CoreMAS поддерживает понятие материала в балк-форме. Она создается тогда, когда учетные единицы смешиваются таким образом, что становится невозможно различить отдельные предметы. Например: растворы, россыпь и т.п. Балк-материалы обычно находятся в цистернах или на технологических линиях в виде растворов. Когда они перемещаются через учетные или физические границы, они измеряются, для того чтобы определить количество учитываемого материала в данный момент. Идентификатор описания балк-материала используется для того, чтобы однозначно определить балк-материал.

Характеристики пользователя CoreMAS

Так как СУиК ЯМ должны разграничить доступ к информации в зависимости от статуса пользователя, база данных должна содержать концепцию пользователя. Пользователи CoreMAS по выполнению функций разделяются на несколько групп:

- учет ядерного материала: эти лица вводят данные об операциях с материалом для персонала, не имеющего доступа к системе учета материала. Они вводят данные об операциях для внешнего отправления и получения материалов;

- обращение с ЯМ: все лица, которые непосредственно работают с ядерным материалом. Это включает тех, кто имеет дело с мате-

риалом в технологическом процессе, в хранилище, а также с материалом, подготовляемом для отгрузки;

- охрана ЗБМ: лица, ответственные за материал, размещающийся на их ЗБМ;
- измерительные операции: лица, измеряющие материал;
- инвентаризация: лица, которые сравнивают результаты физической инвентаризации с зарегистрированным инвентарным количеством;
- управление материалами: лица, готовящие стандартные и специальные отчеты и ответы на запросы для внутреннего и внешнего использования;
- администрирование системы: лица, которые отвечают за конфигурацию и обслуживание CoreMAS.

В зависимости от статуса пользователя наделяются теми или иными правами и допусками к информации.

Таблицы базы данных CoreMAS

Ядро базы данных включает в себя все основные таблицы, необходимые для функционирования системы учета. Рассмотрим основные группы таблиц базы данных и схему связей между ними. Каждая таблица в реляционной базе данных описывает одну сущность, будь то субъект или объект. Связь между сущностями устанавливается с помощью ключей – первичных и внешних (РК и FK). Некоторые таблицы CoreMAS могут вообще не иметь связей с другими таблицами – это архивные таблицы, таблицы постоянных величин и некоторые другие. Например, таблица «Номер контейнера» хранит значение ConID, содержащее следующий номер контейнера, который будет присвоен следующему контейнеру, заведенному в базу данных.

Всего CoreMAS содержит около ста таблиц. Полная ERD очень сложна и не может быть здесь приведена. Организационно все таблицы сгруппированы по функциональному назначению. Приведем для каждой такой группы описание функционального назначения и перечень основных таблиц. Выделяют следующие группы таблиц:

- санкционирование;
- вычисление;
- измерение;

- контейнеризация;
- транзакция;
- материал;
- отчетность.

Санкционирование. Эта группа таблиц контролирует процесс выдачи санкций на возможность работать с теми или иными опциями меню в CoreMAS. Тем самым определяются доступные функции учета и контроля для данного пользователя. Наименования таблиц, входящих в эту группу: Users, Usergroup, Groups, GroupAuth, Authorization, Operation, и UserOpNameAcct.

Корректировка. Группа таблиц корректировки имеет дело с алгоритмическими шагами, которые требуются для вычисления или определения количества материала, основанного на измерении. Например, имеется бак с жидкостью и надо рассчитать объем по уровню жидкости, для чего применяется формула объема цилиндра. В группу входят следующие таблицы: MatlTransformNumber, MtMatlOutput, MtIsoAmountOutput, MtInput, MtElementToOutput, MtMeasurement, и Decay. Таблицы Decay (распад) следят за скоростью распада изотопов и их производных изотопов. Таблицы MT – временные таблицы, куда заносятся промежуточные разделения, соединения и изменения материалов на время до утверждения результатов транзакции, после чего информация сохраняется в таблицах Material (NETWt), Element (ElementWt), или Isotope (IsoWt).

Измерение. Группа таблиц «Измерение» хранит результаты измерений и единицы их измерения. В группу входят следующие таблицы: MTMeasurement, MeasMatl, MeasElem, MeasIso, MeasType, UnitConversion, Unit, MeasNumber, Instrument, и InstrumentNumber. Таблица MTMeasurement связывает результаты измерений с транзакцией, в ходе которой были обновлены количественные характеристики материала при вычислении.

Таблицы группы **Контейнеризация** организованы таким образом, что обеспечивают неограниченные:

- 1) вложенность контейнеров;
- 2) упаковку, связанную с контейнерами;
- 3) количество индикаторов целостности (пломб) на контейнере, материале или месте нахождения.

В группу входят: Container, ContainerNumber, ConType, ConTypeNumber, Packaging, PackageType, PackageTypeNumber, TID, TIDType, TIDNumber, и TempConMovement.

Транзакция. Группа таблиц «Транзакция» описывает транзакции в CoreMAS. Таблицы Transfer и TransferNumber описывают связи с функцией отчетности. Таблица Terminal содержит информацию о машине–клиенте, с которой была введена транзакция. Таблицы StatusType, StatusOpType и OpType содержат типы транзакций, которые могут быть проделаны с материалом в различных состояниях (например, ожидаемый, неизмеренный, списанный). В группу входят: Transaction, Terminal, AcctPeriod, TransactionNumber, AcctPeriodNumber, StatusType, StatusOpType, OpType и TIC.

В группу **Материал** входят все остальные таблицы за исключением таблиц отчетности, STPError и TableVer. Эти таблицы содержат описание материала, элементов и изотопов; логику учета (логически, к какой зоне баланса материала (ЗБМ), физическому местоположению, материальным формам, детальным и общим типам материалов данный материал относится); физические элементы и изотопы; описание формы и процессов, связанных с элементами и материалами; классификацию материалов для функции отчетности (таблицы COEI). Вот некоторые из таблиц: Material, Element, IsoAmount, ElemType, IsoType, ElemForm, MatlForm, COEIProfile, COEICode, Project, DetlMatlType и SumMatlType.

В группу **Отчетность** входит ряд таблиц, характерных для государственной системы отчетности (разумеется системы Соединенных Штатов). Эти таблицы включены в COREMAS с посылкой, что каждая страна, в которую будет поставлен COREMAS, выработает свой государственный стандарт отчетности. Вот некоторые из таблиц: TransactionEvent741, TransferNumber, Transfer, TransactionDetail741, ShipRecMatlDiff, ShipRecElemDiff, ShipRecIsoDiff, Comment, TransportPackaging, TmpProject, TmpCOEIDetail, TmpMBRSubtotal, TmpCOEI, TmpIntAdjust и TmpCOEISumIso.

Работая с базой данных, добавляя и удаляя строки, необходимо следить за тем, чтобы внешние ключи таблиц всегда указывали на существующие первичные ключи. Этот принцип называется *согласованностью ссылок* и должен все время соблюдаться. Большинство современных реляционных баз данных автоматически делают проверку, когда поля таблиц объявляются первичными или внеш-

ними ключами. Это свойство обеспечивается в SQL Server 6.5, однако CoreMAS начинал разрабатываться для версии 4.21, которая не обеспечивала слежения за согласованностью ссылок. Поэтому CoreMAS имеет разнообразные механизмы программного обеспечения этой согласованности.

Хранимые процедуры базы данных CoreMAS

Следующими объектами базы данных, имеющими большое значение для функционирования СУиК, являются хранимые процедуры. Пользователь CoreMAS получает доступ к базе данных только через них. Этим значительно увеличиваются возможности, эффективность и гибкость базы данных и достигается резкое повышение быстродействия запросов SQL.

Хранимые процедуры – это оттранслированные и оптимизированные запросы на языке Transaction SQL, хранящиеся и обрабатываемые непосредственно на сервере. По сети передается только имя процедуры и формальные параметры, в обратную сторону – результат запроса. Это обеспечивает быстроту обработки и снижение сетевого трафика.

Вторая черта такого подхода – обеспечение высокодифференцированного контроля доступа. Хотя в SQL Server 6.5 существует возможность выдачи разрешений пользователям на уровне столбцов, использование сохраняемых процедур позволяет делать это без использования механизмов учета допуска SQL Server.

Всего CoreMAS использует более 300 сохраняемых процедур, и они обеспечивают самые разнообразные функции СУиК ЯМ.

Общие требования к транзакциям

Основные функциональные операции СУиК организуются через транзакции. Напомним, что транзакция – это действия с информацией в базе данных, осуществляемые как единое целое. При невозможности выполнить их все производится «откат» транзакции, т.е. восстановление состояния базы данных на период до ее начала. Любая транзакция в CoreMAS разбита на пять этапов:

- вход – то, что должен предоставить пользователь, чтобы успешно начать требуемую транзакцию,

- нормальная обработка – то, что прикладная программа ядра CoreMAS должна выполнять,
- обработка исключений – обработка исключительных ситуаций,
- санкционирование пользователя – определение того, какая транзакция может быть введена данным пользователем для материалов на данном счету,
- выход – результат, который должен быть получен в результате успешной транзакции.

При входе в транзакцию требуется уникальный идентификатор, который способен выделить ту запись данных, которая представляет интерес. Это могут быть идентификаторы описания материала, контейнеров, месторасположения материала или идентификаторы измерительных приборов. Как только идентификатор отождествлен, требуются элементы данных, специфицирующие тип требуемых транзакций.

В процессе нормальной обработки транзакции во всех случаях, когда происходят изменения в материале, соответствующая транзакция будет зарегистрирована, и тем самым эти изменения будут идентифицированы. Запись о транзакции не может быть стерта или обновлена ни в коем случае. Если найдена ошибка после произведения регистрации транзакции, должны быть созданы исправляющие ошибку входные данные и проведена отдельная корректирующая транзакция. Для таблиц, содержащих информацию об учетных единицах, контейнерах и местоположении, обновление или стирание данных описания физически не допускается. Необходимо сохранение каждого изменения каждой записи о материале для обеспечения ревизии при различных ситуациях.

Если при выполнении транзакции возникает ситуация ошибочного указания того или иного идентификатора, такая ситуация трактуется как исключительная, и процедура должна ответить кодом с указанием обработанной ошибки.

При попытке доступа к несанкционированному счету, прикладная программа ядра должна выдать код исключения, не разрешить доступ и зафиксировать попытку несанкционированного доступа.

Функциональность СУиК CoreMAS

С помощью многообразных сохраняемых процедур пользователь реализует функции СУиК. Прикладная программа ядра CoreMAS включает следующие функции и стандартные программы:

- перемещения материала, включая изменение местоположения внутри ЗБМ, перемещения между ЗБМ, а также получение и отправление с внешним знаком идентификации отчетности;
- трансформации материалов – разделение на части, комбинирование, распад, уточнения и изменения номеров проектов;
- контейнеризацию материала;
- пример государственной системы отчетности;
- функции обеспечения физической инвентаризации;
- снабжение данными для составления стандартных и специальных отчетов, а также для ответов на запросы. Со специальными отчетами и запросами будут оперировать сторонние программы;
- полную историю транзакций для каждой учетной единицы;
- обеспечение деятельности по подведению итогов в учетном периоде;
- обеспечение слежения за устройствами регистрации вмешательства;
- сохранение показаний приборов;
- обслуживание системы и административные функции;
- пример встроенных функций помощи пользователю.

Рассмотрим некоторые из функций СУиК более подробно.

Перемещение материала. Они разделяются на внутренние, на объекте, и внешние. Материалы передаются кому–то и получаются от кого–то. При перемещении материала сначала искомая единица хранения переводится в состояние транзита, после перемещения выводится из состояния транзита и фиксируется новое положение. При отправке/получении вовне CoreMAS обеспечивает механизм регистрации, идентификации и создание соответствующих документов – отчетов.

Трансформация материалов. Эта функция обеспечивает описание трансформации существующего материала. Под трансформацией понимают разделение материала на части, корректировку записей и объединение материалов. Она не применима к контейнерам. При проведении этой транзакции необходимо определить:

- идентификатор материала, который трансформируется;
- идентификатор нового материала;
- тип выполняемой транзакции.

Контейнеризация. Эта функция обеспечивается двумя транзакциями – помещение материала, упаковки или контейнера внутрь контейнера и изъятие их из контейнера. Для них требуется определить следующие входные данные: материал, упаковка или контейнер, которые нужно поместить внутрь контейнера или изъять из контейнера, и получающий или отдающий контейнер.

Слежение за пломбами. Ведется учет пломб и генерируется отчетность по их месторасположению и связывает пломбы с контейнерами.

Радиоактивный распад. Данная функция учитывает изменение с течением времени количества определенных ядерных материалов. Чтобы точно провести учет этих материалов, необходимо обновлять массы этих материалов с учетом радиоактивного распада материала. CoreMAS рассчитывает распад ежемесячно для всех ядерных материалов, для которых учетные величины могут измениться из-за радиоактивного распада. Эти расчеты и коррекции применяются для всех учетных единиц материала типов 44 (америций 241), 47 (берклий), 48 (калифорний), 83 (плутоний 238) и 87 (третий).

Контроль измерений. CoreMAS поддерживает контроль измерительных приборов. Каждое измерение записывается в историю контроля измерений, которая содержит всю информацию относительно измерений. Если значения показаний измерительного прибора не попадают в установленные пределы, определенные независимыми расчетами, то прибор может быть переведен в состояние «не работает». Такой прибор не может быть использован для проведения измерений по учету. Снова ввести его в работу может только санкционированный персонал. Данная функция задается двумя транзакциями: вывод измерительного прибора из работы и ввод его в работу.

Любая СУиК должна работать как справочная система. Следовательно, ядро CoreMAS должно обеспечивать ответы на запросы. В ответ на запросы должны быть выданы требуемые данные. Ожидается, что каждое внедряющее подразделение будет создавать свои собственные способы представления результатов в ответ на запросы. Ядро системы предусматривает ответы на следующие запросы:

- запрос по месту расположения;
- запрос по счету;
- список содержимого контейнеров;
- список состояния материала;
- список материалов в состоянии перемещения;
- сообщение о деталях транзакции.

Для генерации отчетов CoreMAS использует программное средство Crystal Report.

Требования к безопасности

Далее приведены требования, предъявляемые DOE США к СУиК. Здесь описаны только те требования, которым удовлетворяет ядро CoreMAS. Удовлетворение специфическим требованиям лежит на разработчиках, адаптирующих систему к национальному использованию.

- Программное обеспечение CoreMAS, полученное из коммерческих источников, должно быть изучено перед его использованием, чтобы гарантировать, что оно не содержит каких-либо особенностей, которые могли бы нанести ущерб безопасности.

- Все коммерческое программное обеспечение должно иметь надлежащую лицензию, прежде чем его можно будет вводить в среду разработки ядра CoreMAS.

- Каждый пользователь должен быть определен идентификатором пользователя.

- Пароль должен использоваться в купе с идентификатором пользователя.

- Ядро CoreMAS должно разрешать доступ только пользователям, обладающим утвержденным идентификатором пользователя и паролем.

- Доступ должен быть отказан после максимум пяти безуспешных попыток войти в систему при одном и том же идентификаторе пользователя.

- Максимальный срок действия пароля должен быть не более 12 месяцев. После этого срока пароль должен быть переведен в разряд недействующих.

- Хранимые в памяти пароли должны быть защищены контролем доступа, шифрованием или тем и другим.

- Должны быть приняты меры контроля доступа, для того чтобы защитить базу данных паролей от несанкционированной модификации или раскрытия.
- Должны быть приняты меры для того, чтобы предохранить пароль от отображения его на экране.
- Операционная система компьютера должна сохранять запись изменений пароля. Эта запись должна сохраняться, по крайней мере, в течение 6 месяцев.
- Операционная система компьютера должна сохранять записи каждого входа в систему и выхода из нее. Эта запись должна сохраняться в течение, по крайней мере, 6 месяцев.
- Операционная система компьютера должна сохранять записи каждого действия, которое имеет результатом создание, открытие, закрытие или разрушение файла. Эта запись должна сохраняться в течение, по крайней мере, 6 месяцев.
- Операционная система компьютера должна сохранять записи каждого действия, которое имеет результатом доступ к системе файлов. Эта запись должна сохраняться в течение, по крайней мере, 6 месяцев.
- Операционная система компьютера должна предоставлять списки контроля доступа к файлу. Список контроля доступа к файлу должен позволить владельцу файла давать разрешение на доступ к файлу, притом к каждому файлу в отдельности.
- Компьютерная система должна быть снабжена механизмом блокировки диалогового сеанса после периода бездействия пользователя. Продолжительность бездействия, после которой инициируется блокировка, должна быть определена внедряющим подразделением.

Компоненты системы компьютеризированного учета и контроля CoreMAS

Если исключить компонент, связанный с преобразованием и переносом данных, то система управления и контроля ядерных материалов CoreMAS состоит из двух основных компонентов: Admin и CoreMAS.

Компонент Admin разработан для оказания административной поддержки СУиК и для выдачи системному администратору санк-

ции на первоначальное внедрение системы. Возможности Admin. включают:

- конфигурацию групп пользователей;
- их санкционирование;
- конфигурацию специфики предприятия. Если разработчики создали специфические для предприятия таблицы или хотят создать новую форму по образцу одной из форм этого компонента, они должны будут выдать санкции на ведение этих таблиц.

Компонент CoreMAS представляет собой собственно автоматизированную систему учета ядерных материалов на базе архитектуры клиент/сервер и современной системы управления реляционной базой данных. CoreMAS следит за той деятельностью предприятия, которая влияет на статус ядерных материалов. Дизайн системы дает широкие возможности в области учета и отчетности. В основе дизайна CoreMAS лежит легко расширяемая система, совместимая со специфическими для предприятия модификациями и функциональностью.

До запуска программы имя «CoreMAS» должно быть установлено как источник данных ODBC на машине–клиенте. Связь с базой данных устанавливается через вызов подпрограммы доступа к данным OpenDatabase. Связь ODBC устанавливается через имя источника данных ODBC «CoreMAS». Оно должно быть установлено как системный источник данных (System Data Source) в отличие от источника данных пользователя (User Data), чтобы все, кто подключается к системе, имели к ней доступ.

На рис. 7.11 представлена главная форма интерфейса системы с раскрытым меню системы.

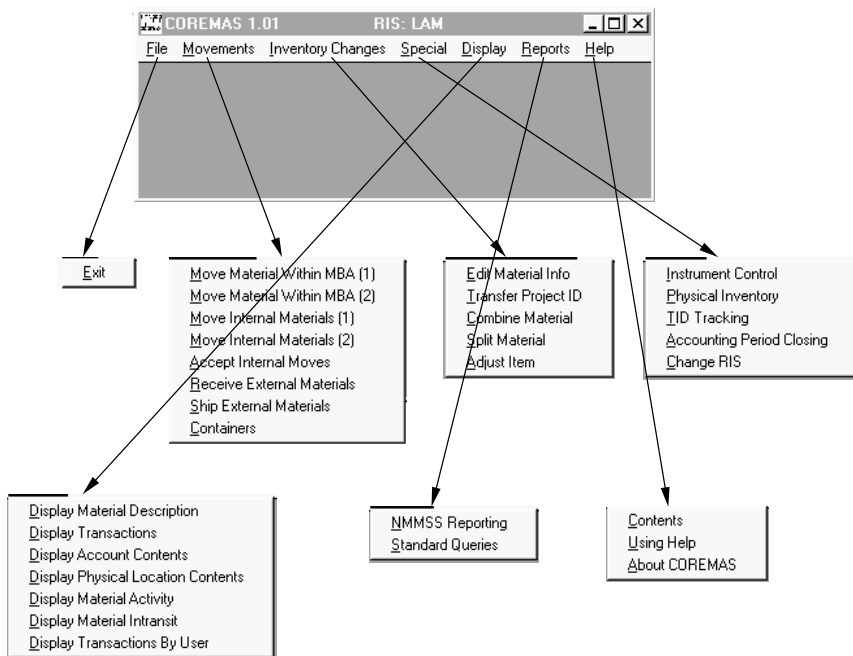


Рис. 7.11. Главное меню компонента CoreMAS

Облегченная СУиК ЯМ Е/З MAS – пример системы, основанной на Web-технологиях

Е/З MAS можно отнести к системам клиент/сервер, которые были определены, как трехсвязные [21]. На рис. 7.12 представлено схематическое изображение компонентов, составляющих архитектуру системы.

В этой терминологии выделяется три составляющих системы – представительская логика, деловая логика и логика доступа к базе данных. Здесь, так же как в системе CoreMAS, логика доступа к базе данных сосредоточена на сервере базы данных. Отличие заключается в том, что в качестве СУБД может использоваться Access, поэтому не используются возможности сохраняемых процедур для переноса части деловой логики на сервер базы данных. Основная деловая логика сосредоточена на Web-сервере в виде файлов *.asp.

И, наконец, представительская логика распределена между Web-сервером в виде www страниц и рабочей станцией в виде программы броузера. Такая архитектура легко расширяема до многосвязных систем.

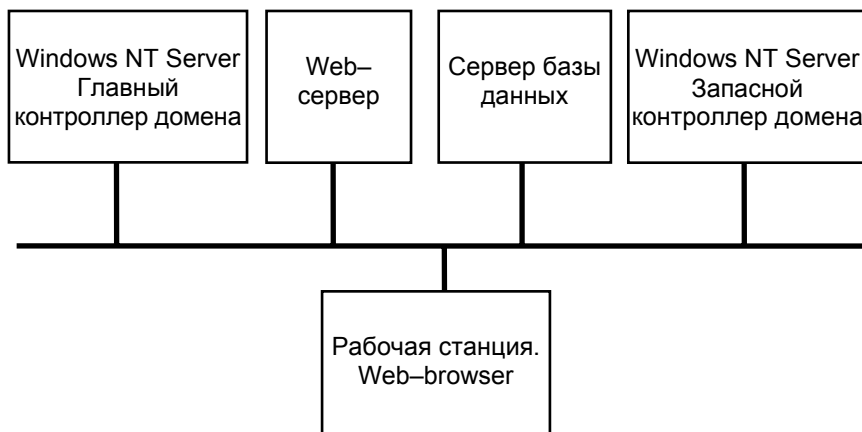


Рис. 7.12. Компоненты компьютеризированной СУИК ЯМ Е/З MAS

Отметим то, что не обязательно указанные функциональные единицы должны распределяться на физически обособленных компьютерах. Так, в небольших сетях контроллер домена, сервер базы данных и Web-сервер могут совмещены.

Данная система способна функционировать практически под управлением любой операционной системы семейства Windows. В частности, она работает в среде сертифицированной ОС Windows NT 4.0, ее работоспособность проверена под управлением Windows 2000.

Для функционирования системы требуется активизация в ОС серверного компонента. Для указанных операционных систем этим компонентом является Internet Information Server, начиная с версии 4.

Интерфейс работы с базой данных в системе подразумевает возможность использования любой СУБД, поддерживающей реляционную модель. Все обращения к данным осуществляются через запросы SQL, а источник данных подключен к системе через ODBC. Реально система взаимодействует либо с MS Access, либо с MS

SQL Server. Синтаксис языка запросов несколько отличается в этих двух СУБД, и в тексте модулей формируются два варианта запросов в зависимости от системных установок.

Тип операционной системы на рабочей станции не имеет решающего значения. Все вопросы безопасности решаются на серверной стороне и операционные системы Windows 95/98 и Windows NT абсолютно равноправны. В принципе, системы, созданные на базе Web-технологий, не зависят от платформы, на которой создана рабочая станция, поскольку ASP-технология формирует HTML документы «на лету» в форме приемлемой для конкретной системы и броузера. Но существует одно ограничение. В сценарии существует часть функций, написанных на языке VBScript, предназначенных для выполнения на клиентском компьютере. Язык же VBScript поддерживается в настоящее время только браузером MS Internet Explorer. Поэтому при использовании других платформ или другой программы браузера в системах Windows возможно возникновение сбойных ситуаций.

Назначение системы и технические параметры

Как уже отмечалось, E/Z MAS предназначена для предприятий с умеренными потребностями в учете и контроле ЯМ. Спецификация требований к программному обеспечению E/Z MAS – документ существенно меньших масштабов, чем аналогичный документ для CoreMAS. Она определяет критерии, которые надо рассматривать при возможности использования системы на том или ином предприятии, следующим образом:

- тип предприятия – система предназначена скорее для предприятий со штучным учетом, нежели с учетом материала в балк – форме;
- число транзакций в месяц – E/Z MAS предназначена для предприятий, производящих минимум 50–100, максимум 1500–2000 транзакций в месяц;
- тип единиц хранения – E/Z MAS предназначен для предприятий как со статическим, так и с динамическим типом инвентарных единиц;
- размеры инвентарного количества – этот параметр должен рассматриваться совместно с типом и числом транзакций в месяц. Например, предприятие с 100000 статистических единиц и 100 тран-

закциями в месяц – хороший кандидат для использования E/Z MAS. А предприятие с таким же числом динамических единиц и 100000 транзакций в месяц – плохой кандидат.

Отметим несколько особенностей E/Z MAS.

- E/Z MAS может функционировать как закрытая система или как открытая система в закрытой среде.

- E/Z MAS может функционировать на отдельном компьютере и в сети с выделенным сервером базы данных.

- СУиК контролирует вход в систему по имени и паролю. Причем эти параметры не связаны с параметрами пользователя в домене (в отличие от CoreMAS) и проверяются самой системой.

- Существует возможность вводить данные в базу с помощью штрихкодowego оборудования и весов.

- E/Z MAS готова к работе непосредственно после установки. Вместе с тем, поскольку все файлы предоставлены пользователю, система легко обновляется дополнительными функциями.

Дизайн базы данных СУиК E/Z MAS

Таблицы базы данных можно сгруппировать в несколько предметных областей:

- Пользователи и право доступа: Users, UserOp, Operation.
- Предприятие: Enterprise, PhysLoc, MBA.
- Партии материала: Batch, BatchMat, MatType, PhysForm, ChemForm, Packaging, Quality.
- Контейнеры: ConInfo, ConType.
- Транзакции: ShipTrans, TransType, Trans, ConTrans, StatusType.
- Индикаторы целостности (пломбы): TIDTrans, TIDInfo, TIDTransType, TIDType.
- Штрихкоды: BarcodeError, InvVerify, InvTrans, InvInfo.
- Федеральная отчетность: UnitConversion, Classification.
- Отдельная таблица Log, не связанная ни с какой другой таблицей предназначена для контроля входов, запоминая URL, с которого осуществлен вход в систему.

В системе E/Z MAS существуют базовые таблицы, из которых нельзя убирать информацию, чтобы не нарушать целостность данных, например, физическое месторасположение. Эти таблицы за-

полняются в начале функционирования системы, и информация в них может только дописываться.

Рассмотрим основные концепции и сущности, отражаемые в структуре базы данных E/Z MAS.

Основа описания материала, используемого в базе данных – это концепция партии материала – batch. Для каждой партии определяется тип материала, его вес, физическая, химическая формы, упаковка. Партии материала поступают на предприятие извне, либо создаются в процессе обработки материала.

Материал любой партия должен быть распределен по контейнерам. Система отслеживает, чтобы суммарный вес всего материала совпадал с весом партии. Концепция контейнеризации близка к тому, что использовалось в СУиК CoreMAS: неограниченная вложенность контейнеров один в другой, наличие пломб и их соответствие контейнерам. Единственным отличием концепции контейнеризации является то, что в E/Z MAS материал не может существовать вне контейнера. Если такое существует в реальности (например, слитки металла), то система создает виртуальный контейнер, который однозначно соответствует данной части материала. Контейнер может быть пустым.

Каждому контейнеру, если только он не находится в состоянии транзита, что аналогично этому же состоянию в СУиК CoreMAS, соответствует определенное местоположение. Если контейнер является вложенным и находится в другом контейнере, то его местоположение имеет значение NULL и определяется через положение внешнего контейнера.

Местоположение определяется в базе данных рядом понятий. Самым общим понятием является – предприятие (enterprise). Предприятие для данной базы только одно, от других предприятий она может только получать внешние поступления, и они существуют в виде названий (адресов). Каждому предприятию соответствует, по меньшей мере, одна ЗБМ. Число зон баланса материалов для предприятия не ограничено. Внутри ЗБМ и задается собственно месторасположение. Месторасположений (location) может быть не менее одного, максимальное число не ограничено. Месторасположение может содержать контейнеры, а может быть пустым.

Наконец, важной составной частью базы данных являются пользователи. Каждый пользователь имеет входное имя и пароль. Для

каждого пользователя устанавливаются права на доступ к ЗБМ, контейнерам и права на выполнение той или иной функции внутри или вовне ЗБМ.

Разработчики СУиК E/Z MAS считают, что такая компоновка базы данных лучшим образом приспособлена для учета штучных образцов материала, хотя существует возможность и учета материала в балк-форме.

Функциональность E/Z MAS

E/Z MAS обладает всей необходимой функциональностью, требующейся для СУиК ЯМ. Система следит за ядерными материалами с помощью инвентарной описи. Эта опись – информация о материале в базе данных изменяется синхронно с реальными изменениями ситуации в так называемом режиме «почти в реальном времени». Это, естественно, подразумевает, что пользователь вводит информацию о транзакции своевременно с осуществлением реального действия.

Вместе с тем, система не рассчитана на физический контроль материалов – она не контролирует полки, двери, замки, не следит за устройствами индикации доступа.

Всю функциональность E/Z MAS можно объединить в пять категорий функций:

1. Перемещение контейнеров.
2. Передача контейнеров на предприятие или с него.
3. Проведение операций, отражающихся на инвентарном количестве.
4. Создание отчетов.
5. Поддержание статистических таблиц базы данных.

Более подробно функциональность системы заключена в следующих конкретных операциях.

- Перемещения внутри ЗБМ – данная функция позволяет санкционированному пользователю перемещать контейнеры и их содержимое в различные физические месторасположения внутри одной ЗБМ. Процесс выполнения заключается в том, что пользователь определяет ЗБМ, выбирает контейнеры, определяет новое месторасположения и дает команду начала процесса. При нормальном протекании процесса осуществляются и регистрируются следующие транзакции. Транзакция, указывающая на то, что контейнер

перемещен, и транзакция, указывающая на новое положение контейнера.

- Перемещения между ЗБМ – данная функция существует в двух видах: первая – перемещает контейнеры между разными ЗБМ в одну операцию и вторая – перемещает материалы между разными ЗБМ в два этапа с переводом материала в состояние «in transit». При этом функцию отправки контейнера может осуществлять один пользователь, а функцию получения – другой.

В обоих случаях пользователь выбирает исходную ЗБМ, выбирает контейнер, ЗБМ назначения и физическое месторасположение в ней. В случае второго варианта, пользователь выполняет отправку контейнера, не указывая куда, а потом его изымают из положения «in transit» по месту назначения.

- Внешние передачи: отправления/получения – данная функция позволяет фиксировать получение/отправление материала извне/другим предприятиям.

При получении материала санкционированный пользователь может добавить новый контейнер и находящийся в нем новый материал в систему в том виде, в каком он был получен от внешнего предприятия. Именно здесь определяется физический вид, химический состав и форма материала и связывается материал с контейнерами. Во всех других операциях мы имеем дело с контейнерами, а не с материалом. Здесь же определяется та ЗБМ, куда направляется материал, число и состав контейнеров, внешнее предприятие откуда был получен материал.

При отправке материала пользователь фиксирует предприятие, на которое отправляется материал и отправляемый контейнер или контейнеры.

- Инвентарные изменения – данный раздел подразумевает несколько возможных операций:

корректировка параметров материала. Данная функция позволяет пользователю модифицировать вес материала, его элементы и изотопы. Пользователь выбирает ЗБМ, выбирает тип материала и тип корректировки, которая должна последовать. Можно менять вес материала, обновлять информацию об элементе и изотопе, содержащимся в материале;

объединение материалов в новый материал;

разделение партии материала на две;

балк–разделение – позволяет пользователю регистрировать операции изотопного разделения.

- Контейнеризация – подразумевает следующие операции:
создание контейнера без привязки к материалу – пустой контейнер;

- помещение контейнеров в другой контейнер;

- извлечение контейнеров из контейнера;

- перемещать материал из контейнера в контейнер.

- Физическая инвентаризация. Эта функция позволяет санкционированному пользователю вводить результаты физической инвентаризации с зарегистрированными наблюдениями. В процессе работы помечается контейнер, подвергшийся проверке и вводятся результаты проверки.

- Учет индикаторов целостности (пломб). Система позволяет пользователю создавать пломбы, обновлять пломбы, получать отчеты о пломбах. Естественно, что все это подразумевается в виртуальном смысле, т.е. связь с реальными пломбами целиком лежит на операторе.

- Создание отчетов. Вообще говоря, система позволяет легко добавлять новые отчеты, что вы и сделаете на лабораторной работе. В качестве базовых отчетов заложены отчеты по группам:

- контейнеры (транзакции с контейнерами и содержимое контейнеров);

- содержимое на физическом месторасположении;

- ЗБМ (транзакции в выбранной ЗБМ и содержимое ЗБМ);

- транзакции (вывод транзакций упорядоченных по дате и по пользователю).

Кроме того, система поддерживает создание специальных отчетов для Федеральной системы учета ЯМ. Поскольку на момент создания системы форма такого отчета не определена, в системе стоит некоторый произвольный отчет.

Следует так же понимать тот факт, что под «отчетом» разработчики E/Z MAS понимают сформированную по некоторым правилам и упорядоченную таблицу, выбранную из базы данных с помощью некоторого SQL запроса. В российских требованиях к СУиК есть пункт, по которому наряду с электронной системой должна действовать система сбора и хранения бумажных копий информации. Это требование не накладывает каких-то невыполнимых действий,

но надо понимать, что наряду с электронной версией потенциальный российский пользователь E/Z MAS должен предусмотреть получение распечаток отчетов по определенной форме. В среде MS Access это сделать нетрудно.

- Конфигурация данных. Как говорилось ранее, в системе существуют таблицы, которые обновляются очень редко – месторасположения, ЗБМ, предприятия, пользователи. Обновление этих таблиц возможно только для специальных санкционированных пользователей, имеющих статус администратора.

- Взаимодействие базы данных с внешними устройствами. В последней версии E/Z MAS существуют функции, осуществляющие ввод информации в базу данных непосредственно из внешних устройств. Связь была осуществлена с двумя видами устройств – штрихкодowym оборудованием и весами. Связь осуществляется через com-порт одной из рабочих станций специально оборудованной для этого. Программно в asp-файле используется объект Active-X, осуществляющий связь с этим портом. В связи с этой функцией существует не решенная до конца проблема. Когда внешнее оборудование отключено от компьютера, то в интерфейсах системы эти функции отсутствуют. При подключении же одной из рабочих станций к внешним устройствам функции включаются во всех интерфейсах на всех рабочих станциях сети, поскольку они загружаются из одного файла на Web-сервере. Серьезной проблемы это не представляет, один из путей ее решения – включение этой функции для пользователей, санкционированных для проведения измерений или инспекции со специальными login.

- Важную роль в функционировании системы имеют вопросы защищенности системы от несанкционированных действий пользователей. С каждым именем пользователя связан набор функций, которые он может выполнять. E/Z MAS предусматривает три типа пользователей:

- пользователи, имеющие право только просматривать санкционированную информацию;

- пользователи, имеющие право изменять санкционированную информацию;

- администраторы базы данных – пользователи, имеющие право санкционировать права других пользователей.

Примеры интерфейсов E/Z MAS

В заключение рассмотрим примеры интерфейсов системы, т.е. реализацию описанной выше функциональности в asp-страницах. Приведем некоторые характерные примеры использования той или иной скриптовой техники и дизайна форм системы.

На рис. 7.13 представлена исходная страница системы E/Z MAS, открывающаяся в браузере при входе в систему. Пользователю предлагается ввести login и пароль. Существует вариант СУиК E/Z MAS, в котором требуется ввод двух независимых идентификаторов пользователя. Этот вариант реализуется для предприятий, где требуется выполнение пресловутого правила двух – осуществлять любое действие с ЯМ или информацией о нем могут только два человека.

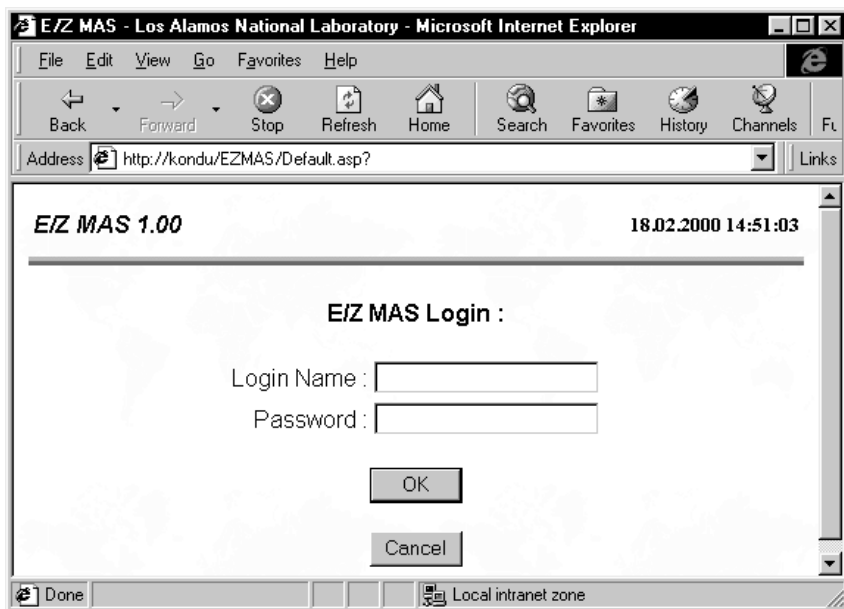


Рис. 7.13. Исходная страница E/Z MAS

После ввода идентификатора пользователя и пароля и подтверждения существования пользователя, открывается главная страница системы, представленная на рис. 7.14. На главной странице систе-

мы расположены верхний и нижний фрагменты окна, содержащие, соответственно, наименование версии системы и главное меню. Между фрагментами располагается сообщение о благополучном входе в систему.

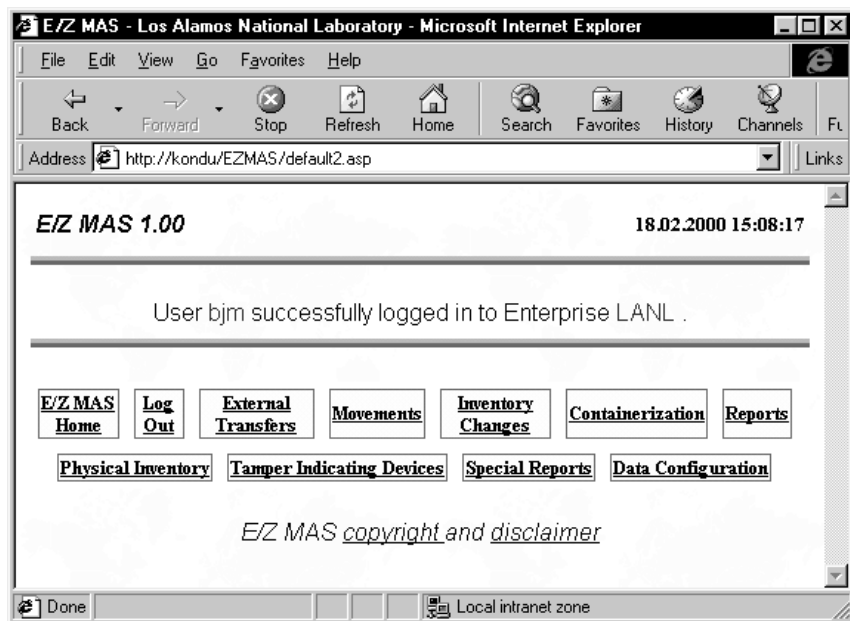


Рис. 7.14. Главная страница E/Z MAS. Пользовательское меню системы

Использование E/Z MAS в МИФИ

E/ZMAS – единственная КСУиК ЯМ производства США, которая эксплуатируется на российском предприятии. Она была поставлена в МИФИ в 1999 г., подверглась адаптации к требованиям ФИС, была аттестована и эксплуатируется в течение 8 лет [22]. Модернизация, в основном, коснулась тех таблиц базы данных и функций, которые связаны с требованиями ФИС по учету и контролю ЯМ. Добавлены таблицы кодификаторов и условных обозна-

чений, введены функции создания отчетов в электронной форме требуемых ФИС форматов.

Главный недостаток системы заключается в использовании не-сертифицированного компонента – СУБД MS Access. В связи с необходимостью переаттестации системы, в настоящее время ведутся работы по глубокой модернизации системы на базе базового программного обеспечения с открытым кодом.

В заключение главы о компьютеризированных СУиК ЯМ рассмотрим процесс разработки и ввода в эксплуатацию систем такого рода и регламентацию этого процесса.

7.5. Разработка компьютеризированных СУиК ЯМ

При изучении компьютеризированных СУиК важным разделом является изучение процесса создания программного продукта начиная с начального этапа и заканчивая внедрением его на предприятии. Важно при этом обратить внимание не только на процедуры процесса создания системы, но и на требующуюся документацию.

Российские стандарты в достаточной степени регламентируют этот процесс. Однако в США, где опыт создания больших программных проектов значительно больший, чем в России, выработаны различные процедуры и методы планирования, проектирования, тестирования и ввода в эксплуатацию программного обеспечения. Подходы и методы разработки программных продуктов требуют отдельного специального изучения. В настоящей главе будет приведен лишь краткий обзор и даны некоторые рекомендации.

Требования отраслевого стандарта к порядку разработки, вводу в действие и эксплуатации

Весь процесс создания СУиК отраслевой стандарт [1] разделяет на ряд этапов. Первым этапом является предпроектная стадия. На этом этапе производится обследование объекта. При этом должно быть разработано технико-экономическое и аналитическое (с точки зрения защиты информации) обоснование разработки СУиК. Выпускается техническое задание на разработку, включающее в себя конкретные требования по защите информации.

Следующая стадия – стадия проектирования. Она завершается разработкой технорабочего проекта, включающего организационные и технические решения, разработку программной среды,

средств и методов защиты информации. Все решения должны соответствовать нормам и требованиям стандартов и требованиям технического задания.

Разработанные на этом этапе оборудование и программные средства должны пройти ряд испытаний. Технические средства:

- испытания на работоспособность в местах установки;
- проверку на соответствие требованиям защиты информации.

Базовое и прикладное программное обеспечение должно пройти комплекс лабораторных испытаний. Средства защиты информации должны пройти сертификацию на соответствие правилам по защите информации.

Следующая стадия – ввод системы в эксплуатацию.

Перед началом эксплуатации СУиК необходимо:

- разработать перечень эксплуатационных документов;
- представить общее описание системы, включающее основные характеристики, сведения об областях применения, требуемых технических средствах;
- разработать комплекс рабочей регламентирующей документации;
- представить описание комплекса организационно–технических мероприятий, организационной структуры и штатного расписания предприятия в части, касающейся СУиК;
- разработать руководство системного программиста, включающего сведения для установки, настройки, тестирования системы, а также восстановления после аварий (следует ссылка на ГОСТы);
- разработать руководство пользователей, содержащие сведения для обеспечения диалога пользователя с программно–аппаратным оснащением СУиК;
- представить акт приемки в эксплуатацию программного обеспечения;
- представить план–график ввода СУиК в эксплуатацию.

При вводе в действие проводится аттестация программно–аппаратного оснащения СУиК на соответствие требованиям защиты информации.

Выделяют опытную эксплуатацию и промышленную. Перед началом опытной эксплуатации комиссия составляет акт о принятии системы в опытную эксплуатацию. Для перевода СУиК в промышленную эксплуатацию создается комиссия, включающая предста-

вителей разработчика, заказчика, эксплуатирующей организации. Если СУиК имеет выход в центральную информационную систему, в состав комиссии вводят представителя инспектирующей организации. Составляется акт технической приемки.

Дальнейшие действия стандарт не регламентирует. Существуют ссылки на другие стандарты, касающиеся автоматизированных систем и информационных технологий. Вопросы сопровождения, поддержки и вывода из эксплуатации регламентируются там. Отметим обилие технической документации, сопровождающей проект.

Жизненный цикл программного обеспечения

Американский стандарт вводит понятие жизненного цикла программного обеспечения, который представляет собой все процессы, связанные с конкретным программным продуктом от разработки концепции до вывода из эксплуатации и замены на более современное. Точного перечня этапов жизненного цикла не существует, но основные этапы представлены ниже:

- концепция;
- анализ требований к программному обеспечению;
- разработка;
- реализация;
- тестирование;
- внедрение и проверка;
- эксплуатация и обслуживание.

Для различных проектов, в зависимости от их целей и объемов, соотношение трудозатрат и материальных затрат на этих этапах может быть различным. Основная часть затрат приходится на два этапа – планирование и проектирование (включает в себя первые три графы) и на этап тестирования и внедрения.

Кроме того, следует помнить то, что некоторые разработчики США называют правилом 1:10:100. Понимается это следующим образом: затраты на исправление ошибки (неточности), выявленной на этапе планирования и проектирования, принимаются за 1. Тогда затраты на исправление этой же ошибки на этапе программирования будут равны 10. И, наконец, выявленная ошибка на этапе конечных испытания требует в 100 раз больших трудозатрат. Эти оценки дают представление о важности предварительного этапа разработки.

В США в год проводится до 175 тыс. программных проектов в различных областях, на которые тратится до 250 млрд. долларов. Только 16 % из них выполняются в срок и за те деньги, которые были запланированы. 31 % проектов просто проваливаются и не доводятся до конца. Поэтому разработчиками США накоплен достаточно большой как положительный, так и негативный опыт и сформулированы основные требования ко всем этапам создания системы, обеспечивающие успех всего мероприятия.

Планирование систем учета и контроля

Первоначальный этап планирования системы называют «Анализ требований». Суть этого анализа в выработке, анализе и документировании функциональных, информационных, эксплуатационных, интерфейсных, характеристических и проектных ограничений программного продукта. На этом этапе проектировщик должен дать подробную формулировку того ЧТО требуется от системы, но ни в коем случае КАК это надо делать. Именно поэтому на данном этапе не рекомендуется участие непосредственно разработчиков ПО. Человек, имеющий опыт создания систем, неизбежно продумывает, как реализовать требования, и при этом может подгонять требования заказчика под готовые решения.

При анализе требований выделяются следующие задачи:

- определение первоначального объема проекта;
- анализ области принадлежности задачи;
- определение основных функций области;
- определение альтернативных схем решения проекта;
- выбор единственного решения;
- создание выходного документа – Спецификации требований к программному обеспечению (SRS);
- определение плана внедрения.

Для выполнения этих этапов создается рабочая группа. Предполагается, что в составе группы должны быть выделены следующие роли:

- бизнес–лидер. Это специалист–предметник из той области деятельности (бизнеса), для которой создается проект. Он отвечает за деловые решения;

• координатор – председательствует на заседаниях, специалист в области руководства и ведения проектами. Фактический руководитель проекта;

• управляющий – представитель организации разработчика, отвечает за общее руководство, бюджет, выполнение проекта;

• спонсор – лицо, ответственное за финансирование;

• технический лидер – представитель организации разработчика, осуществляет техническое руководство;

• представитель пользователя – представляет интересы конечных пользователей;

• группа программного проекта – рабочая группа.

Работа началась. Рассмотрим кратко основные этапы планирования и проектирования проекта.

Определение первоначального объема проекта. На этом этапе разработчик четко должен:

• определить, что включается, а что не включается в проект, т.е. во всей области выявить ту подобласть, которая может быть решена за выделенные деньги и выделенное время;

• получить общее понимание проблемы;

• выбрать методики и средства анализа требований;

• согласовать объем проекта с заказчиком и спонсором, это согласие должно быть документировано.

На этом этапе создается группа проекта, чтобы подготовить объекты и оборудование, наметить общий подход.

Методы сбора информации, используемые на этапах планирования: семинары и собеседования. Главное, на чем следует концентрировать внимание, – это необходимость фиксировать всю информацию, не позволять руководителям подавлять мнение участников. Зачастую требуется не допускать руководителей отделов или предприятий на эти семинары. Общение должно быть максимально свободным. Главное на этом этапе – участие непосредственных пользователей. Практика успешных проектов в США показывает, что участие пользователя уже на этапе планирования является главным фактором успеха любого проекта.

Следующий этап уже непосредственно касается проектирования – это анализ функций и процессов, с которыми будет иметь дело проект.

Функции это то, что выполняется системой, то, что она должна обеспечить. Процесс это конкретная реализация функции – он начинается, продолжается, заканчивается. Выделенные процессы и функциональные требования документируются и представляются графически. Причем при разработке следует осуществлять декомпозицию функций. Т.е. сначала рассматриваются глобальные функции, например – функция перемещение материала. Затем она подразделяется на функции более низкого уровня – перемещение материала внутри ЗБМ, получение материала извне, отправка материала. И это продолжается до получения элементарных функций, тех, которые уже невозможно разложить на функции более низкого уровня.

Между функциями устанавливаются зависимости. Выделяют:

- прямую зависимость – один процесс начинается после завершения другого;
- взаимоисключающая зависимость – используются условия;
- возвратная зависимость – повторное выполнение процесса;
- параллельная зависимость – результат вызывает выполнение более одного процесса.

Затем необходимо определить объекты деятельности и их атрибуты. Объект – это лицо, место, вещь, событие или идея, о которой необходимо получить информацию для успешного выполнения деятельности. Объекты имеют атрибуты – свойства информационного объекта. В дальнейшем на этапе проектирования базы данных объекты будут реализованы в таблицах, а атрибуты станут полями (столбцами) таблиц. Этот этап крайне важен и требует непременно участия пользователя. Если какой-либо объект не будет выделен на этом этапе, или не будут определены его атрибуты, а появится уже на этапе программирования или внедрения, потребуются изменение всей структуры базы данных.

После выделения объектов между ними устанавливаются взаимоотношения. Этот процесс близок к процессу организации связи между таблицами базы данных.

Следующий этап – определение технических требований. На этом этапе необходимо определить и документировать следующие технические ограничения на будущую систему:

- производительность;
- дизайн;

- вопросы защиты информации;
- доступность;
- интерфейс;
- используемую СУБД.

Требования должны быть составлены в измеряемой, конкретной форме. Например, время доступа к таблице равно 2 секундам. Число пользователей, число клиентов, число транзакций в сутки. Необходимо учесть требования стандартов, отчетность. Мы рассматривали примеры таких требований при разборе конкретных программных продуктов и СУиК CoreMAS и E/Z MAS.

После проведения описанных процедур, разработчики должны выбрать из возможных решений единственное, оптимальное. Один из способов выбора – экспертные оценки. Группа экспертов оценивает различные ключевые требования, задавая им рейтинги и оценивая в этих рейтингах альтернативы. Строится таблица параметров. Перемножается рейтинг на оценку и суммируется. Результат выделяет предпочтительные варианты. Затем оцениваются возможные риски срыва разработки.

Наконец, переходим к последнему этапу фазы планирования проекта – созданию спецификации требований к программному обеспечению (SRS). В результате выполнения этого этапа будет создан документ, описывающий основные требования к ПО. На основании этого документа в дальнейшем будет осуществляться проектирование основных программных составляющих проекта. Степень официальности SRS зависит от размеров и важности проекта. Спецификация должна содержать:

- функциональные требования;
- требования к данным;
- технические требования;
- решения;
- проблемы;
- рекомендуемые решения.

Проектирование программного обеспечения

После составления SRS разработчик переходит к этапу непосредственного проектирования программного обеспечения. Результатом этого этапа должна быть созданная база данных: определена

структура всех таблиц со связями и средствами, обеспечивающими целостность информации (триггеры, ограничения, сохраняемые процедуры) и Описание проекта программного обеспечения (Software Design Description – SDD) – подробный документ о структуре данных и функций. Следующий шаг после проектирования – собственно кодирование, после такого предварительного разбора превращается в техническую операцию.

Рассмотрим процесс проектирования программного обеспечения и некоторые методики, применяемые при этом. На этапе проектирования должны быть созданы:

- проект архитектуры, который устанавливает соотношения между главными структурными компонентами системы;
- процедурный проект, обеспечивающий преобразование главных структурных компонентов в процедурное описание программного обеспечения, в результате чего создается исходный текст программы;
- проект системы данных, который преобразует информационную модель в структуры данных (база данных и данные программ).

Первым из этих трех этапов обычно является разработка данных. При разработке данных главным является выбор логических представлений объектов, идентифицированных при составлении SRS. Предложены следующие принципы разработки данных:

- системный анализ, используемый при анализе функций и процессов, применим и для данных;
- должны быть идентифицированы все структуры данных и операции, проводимые с ними;
- при создании программы должен быть создан и использован глоссарий данных;
- последовательная детализация данных – данные низкого уровня откладываются на следующую стадию проектирования;
- структуры данных должны быть известны только тем модулям, которые их непосредственно используют;
- должны быть созданы библиотеки структур данных и связанных с ними функций;
- язык программирования должен поддерживать абстрактные типы данных.

При разработке архитектуры программы первоочередная задача – разработать модульную структуру и показать соотношения между

различными модулями. Разработка архитектуры программы сочетает разработку структуры программы с разработкой данных посредством интерфейса между модулями.

Процедурная разработка проводится после того, как устанавливается программная структура (архитектура) и структура данных. Два основных метода используются при процедурной разработке – использование блок–схем и условного языка проектирования (псевдокода).

Испытание программного обеспечения

После того, как ПО спроектировано, наступает этап непосредственного кодирования. После проделанной ранее работы это уже не вызывает труда. Данный этап занимает небольшую часть в общих трудозатратах. Практика США показывает, что затраты на написание кодов пренебрежимо малы по сравнению с проектированием и проверкой работоспособности программы. После написания кодов мы подходим к новому этапу – этапу испытания программного обеспечения.

Существует три наименования процессов, связанных с проверкой выполнения различных этапов проекта: испытания, отладка и тестирование. Испытания и проверки происходят на всех стадиях проекта с целью выявления ошибок на как можно более ранней стадии разработки. Дефекты могут возникать на всех этапах проекта, например, на стадии анализа требований могут быть не учтены некоторые необходимые функции или введены несовместимые друг с другом требования.

На этапе разработки для локализации дефектов осуществляются такие методы испытаний, как обзоры и инспекции. Осуществляются группами специалистов, не участвующих непосредственно в конкретной разработке. Ответственность при этом может быть разного рода, твердого стандарта не существует.

Тестирование и отладка осуществляется на стадии кодирования и непосредственно после нее. Отладка отличается от тестирования тем, что при отладке программист исправляет выявленную ошибку, при тестировании неточности только фиксируются. Мероприятия по тестированию начинаются на самой ранней стадии разработки проекта на этапе планирования. Попутно с разработкой на каждом этапе создается и дополняется план тестовых испытаний про-

граммного продукта. На этапе кодирования осуществляется поблочное тестирование. После создания всего продукта производится полное системное тестирование с выявлением и исправлением неточностей и, наконец, при установке заказчику созданной системы осуществляется приемочное тестирование. Итоговое тестирование обязательно документируется. Практика показывает, что самое тщательное тестирование реальных проектов не может ликвидировать все проблемы. В среднем при тестировании выявляется около половины существующих ошибок. Остальные выявляются и, по мере возможности, устраняются уже на этапе сопровождения ПО. В США существуют специальные фирмы, выполняющие независимое тестирование программного обеспечения.

Ввод СУиК в эксплуатацию

Часто этот этап называют «развертывание». Специалисты США этот этап считают очень важным. Выделяют следующие принципы, которые способствуют гладкому протеканию процесса.

- Осознание важности раннего и тщательного планирования процесса развертывания. Особенно это важно для среды клиент/сервер. Учет предстоящего развертывания на этапе проектирования и тестирования позволит избежать многих болезненных проблем, когда спроектированная и тщательно тестированная система в реальной среде не дает требуемых показателей производительности – причина заключается в том, что отладка проходила на другом оборудовании, более мощных компьютерах, более производительной сети.

- Следует понимать, что развертывание – планируемый процесс и он не должен нарушать нормальное функционирование предприятия.

- За развертывание должен отвечать один человек.

Приводится следующий пример, который демонстрирует сложности развертывания. Фирма Мицубиси в Калифорнии развертывала некий программный проект. Планировалось провести процесс в течение года. Получилось – два. Расходы на развертывание системы Oracle примерно в 3 раза превысили стоимость разработки программного обеспечения.

Какие проблемы сопровождают развертывание? Выделим основные.

- Расходы на сетевое оборудование, СУБД и т.п.
- Отсутствие стандарта на оборудование и ПО компьютеров на стороне клиента.
- Обучение персонала новым стандартам пользовательского интерфейса.
- Ввод ПО, изменяющего привычные стандарты работы.
- Недружелюбный пользователь.

Отсюда вытекают рекомендации, позволяющие снять ряд проблем. Самая простая из них и одна из самых эффективных – вовлечение конкретных пользователей в создание системы на самых ранних этапах. Обучение пользователя надо начинать заранее. Постепенно в процессе разработки системы внедрять на площадке стандарты оборудования и ПО (управление конфигурацией). Пользователя нужно делать союзником.

Этапы развертывания:

- Аналитическая фаза. Начинается параллельно разработке требований и продолжается все время до начала внедрения. На этой фазе необходимо определить:

- уровень подготовки пользователей, наличие аппаратных средств и ПО;
- требования к параметрам доступной компьютерной техники;
- требования к операционной среде, по контролю доступа и безопасности;
- необходимость преобразования существующих данных;
- роли, обязанности и расходы фазы сопровождения;
- решить вопросы о приобретении нового оборудования и ПО и о лицензионных правах.

- Фаза построения. В этой фазе приобретается оборудование и ПО. Испытываются системы преобразования данных. Готовятся руководства пользователя, по эксплуатации и т.п.

- Обучение – очень важный этап. В США ему уделяют большое внимание. Важно провести обучение своевременно. При ранней подготовке навыки могут забыться, при поздней – пользователь отторгает нововведения. Требуются достаточно большие затраты – подготовка курсов, учебного матобеспечения.

- Фаза развертывания. Выпускаются все документы, проводится обучение, преобразовываются данные, система начинает функционировать.

- Завершающий этап. Передаются полномочия на обслуживание системы.

Обслуживание, сопровождение и вывод из эксплуатации

Обслуживание – это деятельность персонала по нормальному обеспечению эксплуатации системы в стадии производства. В сферу обслуживания входят вопросы поддержания эксплуатационных характеристик, обеспечение доступности данных, поддержание системы защиты информации, аварийное восстановление.

Для обслуживания системы требуется определенный штат персонала. Он включает в себя: системных администраторов, администраторов баз данных, специалистов по защите, администраторов сетей, операторов.

Под сопровождением понимается деятельность разработчика по исправлению ошибок, модернизации и развитию системы после ее поставки потребителю. Очень важный вид деятельности. По аналитическим оценкам в США предприятия тратят на сопровождение ПО 70 % бюджета, выделенного на ПО. И только 30 % идет на новое ПО. Выделяют следующие типы сопровождения:

- корректирующее (аварийное и неаварийное);
- адаптивное (новые аппаратные и программные средства при изменении условий);
- усовершенствование;
- профилактическое.

Следует помнить, что любое вмешательство в функционирующее ПО сопряжено с риском внесения ошибок. На этой стадии изменения обычно подвергаются минимальному тестированию, документация не фиксирует мелкие изменения. Не соблюдаются введенные ранее стандарты. Отсюда оптимальная стратегия – сводить сопровождение к минимуму. В основном, сопровождение должно сводиться к аварийному. Требования пользователей на изменения системы должны аккумулироваться и приводить к выпуску новой версии системы. К изменениям надо подходить как к новым проектам – максимальное тестирование и документирование всех изменений.

Если расходы на поддержание системы превышают прибыль, приносимую системой, то пришло время выводить ее из эксплуата-

ции. Обычно при этом существующая система заменяется аналогичной, но более современной.

Список литературы

1. Стандарт отрасли. Оснащение программно–аппаратное систем учета и контроля ядерных материалов. Общие требования. ОСТ 95 10537–97.

2. Веске Дж. Л., Гандерлоу М., Чипмен М. Access и SQL. Руководство разработчика: Пер. с англ. М.: Лори, 1997.

3. Fedorov A., Francis B., Harrison R. et al. Professional Active Server Pages 2.0/ Wrox Press Ltd, 1998.

4. Гостехкомиссия России. Министерство Российской Федерации по атомной энергии. Руководящий документ. Требования по защите от несанкционированного доступа к информации в автоматизированных системах учета и контроля ядерных материалов. М., 1997.

5. Государственный стандарт Российской Федерации. ГОСТ Р ИСО/МЭК 15408–1–2001. Информационная технология. Методы и средства обеспечения безопасности критерии оценки безопасности информационных технологий. Часть 1. Введение и общая модель.

6. Государственный стандарт Российской Федерации. ГОСТ Р ИСО/МЭК 15408–2–2001. Информационная технология. Часть 2.

7. Государственный стандарт Российской Федерации. ГОСТ Р ИСО/МЭК 15408–2–2001. Информационная технология. Часть 3.

8. Пискарев А.С., Шеин А.В. О состоянии и перспективах использования Общих критериев оценки безопасности информационных технологий в России для оценки применяемых в СУиК программных средств. – Материалы 5 международного рабочего семинара «Разработка Федеральной автоматизированной информационной системы учета и контроля ядерных материалов России», г. Новоуральск, Свердловской обл., 26–30 мая 2003 г.

9. Федосеев В.Н., Мизин П.П., Шанин О.И. Проблемы и перспективы развития СУиК ЯМ в России с точки зрения системного программного обеспечения. – Материалы 7 международного рабочего семинара «Разработка Федеральной автоматизированной информационной системы учета и контроля ядерных материалов России», г. Звенигород, 11–15 сентября 2006 г.

10. Гостехкомиссия России. Руководящий документ. Средства вычислительной техники. Защита от несанкционированного досту-

па к информации. Показатели защищенности от несанкционированного доступа к информации. М., 1992.

11. Зегжда Д.П., Ивашко А.М. Основы безопасности информационных систем. М.: Горячая линия – Телеком, 2000.

12. Руссинович М., Соломон Д. Внутреннее устройство Microsoft Windows: Windows Server 2003, Windows XP и Windows 2000. Мастер класс./ Пер. с англ. – 4-е изд. М.: Издательско-торговый дом «Русская редакция», 2005.

13. Уинкуп С. Microsoft SQL Server™ 6.5 в подлиннике: Пер. с англ. СПб.: BHV – Санкт-Петербург, 1998.

14. Андреев А.Г. и др. Windows SQL Server 2000. Русская версия / Под общ. ред. А.Н. Чекмарева и Д.Б. Вишнякова. С-Пб.: БХВ, 2003.

15. Шмидт В. Microsoft Visual Basic 5.0 – М.: ABF, 1997.

16. Иванова Е.Б., Вершишнин М.М. Java 2, Enterprise Edition. Технология проектирования и разработки. С-Пб.: 2003.

17. Посполит А.В. Visual Studio.NET: разработка приложений баз данных. СПб.: БХВ – Санкт-Петербург, 2003.

18. Коннэлл Дж. Visual Basic 6. Введение в программирование баз данных: Пер. с англ. М.: ДМК, 2000.

19. Сеппа Д. Microsoft ADO.NET: Пер. с англ. М.: Издательско-торговый дом «Русская редакция»; 2003.

20. Ерыгин А.И., Кушнарев М.С. Интеграция систем учета и контроля ядерных материалов. Проблемы и перспективы. – Материалы 7 международного семинара «Разработка Федеральной автоматизированной системы учета и контроля ядерных материалов России». Звенигород, 11–15 сентября 2006 г.

21. Румянцев А.Н. От учета и контроля – к управлению. Компьютерная СУИК ЯМ, радиоактивных веществ и радиационных источников РНЦ «Курчатовский институт» – система КИ–МАКС // Новости Фис. Информационный бюллетень, №5, 2004.

22. Кондаков В.В. Компьютеризированные системы учета и контроля ядерных материалов: Учеб. пособие. М.: МИФИ, 2001.

23. Кондаков В.В., Ожерельев С.А. Опыт эксплуатации и перспективы развития системы учета и контроля ядерных материалов МИФИ – Материалы 7 международного семинара «Разработка Федеральной автоматизированной системы учета и контроля ядерных материалов России». Звенигород, 11–15 сентября 2006 г.

ГЛАВА 8

ИНФОРМАЦИОННАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ КОМПЬЮТЕРИЗИРОВАННЫХ СУиК ЯМ

8.1. Защищенные системы обработки информации

При проектировании и эксплуатации автоматизированных систем учета и контроля ядерных материалов (АСУиК ЯМ) одним из основных вопросов является обеспечение сохранности циркулирующей в них информации и ее защиты от несанкционированного доступа (НСД). Приоритетность вопросов обеспечения информационной безопасности определяются тем, что информация, для обработки которой создаются СУиК ЯМ, является предметом государственной тайны. Потеря, искажение или хищение этой информации как в результате умышленных действий, так и вследствие объективных причин может привести к тяжелым последствиям. Поэтому отраслевой стандарт, регламентирующий вопросы программно – аппаратного оснащения СУиК ЯМ [1], требует, чтобы система защиты информации являлась неотъемлемой частью АСУиК ЯМ. На всех этапах функционирования СУиК ЯМ защита информации должна быть обеспечена применением комплекса мероприятий по предотвращению утечки информации или исключению воздействия на нее по техническим каналам, по предупреждению преднамеренных программно–технических воздействий с целью нарушения целостности информации в процессе ее обработки, передачи и хранения или нарушения работоспособности технических средств.

Обработка конфиденциальной информации осуществляется на основании нормативных документов, которые регламентируют порядок защиты информации, составляющей государственную тайну. При переходе от обработки бумажных документов к компьютерной обработке информации необходимо обеспечить преемственность выполнения этих требований. Компьютеризированная система, предназначенная для обработки секретной информации, должна удовлетворять требованиям этих документов. Например, необходимо организовывать систему доступа пользователей к информации в компьютеризированных системах в соответствии с грифом секретности документа и уровнем доступа сотрудника.

После перевода конфиденциальной информации в электронную форму появляются дополнительные факторы, которые способны нарушить нормальное функционирование информационной системы. Эти факторы называются угрозами безопасности. Часть угроз безопасности компьютеризированные системы унаследуют от традиционных систем обработки информации, например, кража или разглашение информации. Но, вместе с тем, в результате компьютеризации появляются новые угрозы. Это определяется тем, что автоматизация обработки информации связана с отстранением человека от непосредственной работы с носителем информации. Полномочия передаются компьютерным программам, которые в результате умышленных действий или вследствие ошибок в программном коде могут нарушать регламент обработки конфиденциальной информации. Чтобы компьютерная система могла использоваться для автоматизации обработки конфиденциальной информации, она должна успешно противостоять угрозам безопасности.

Наконец, в настоящее время в РФ имеется достаточно проработанная система стандартов в области обеспечения безопасности информации. Система, использующаяся для обработки информации о ядерных материалах, должна удовлетворять требованиям критериев этих стандартов. Это соответствие должно быть подтверждено аттестационными испытаниями. Кроме государственных стандартов действуют отраслевые стандарты и руководящие документы на уровне предприятия. Требования этих документов также необходимо принимать во внимание.

Таким образом, защищенная система обработки информации [2], в частности компьютеризированная СУиК ЯМ, должна удовлетворять следующим трем требованиям:

- осуществлять автоматизацию процесса обработки конфиденциальной информации, включая все аспекты этого процесса связанные с обеспечением безопасности обрабатываемой информации;
- успешно противостоять угрозам безопасности, действующим в определенной среде;
- соответствовать требованиям и критериям стандартов информационной безопасности.

Защищенные системы обработки информации должны обеспечивать информационную безопасность. Под информационной безопасностью специалисты понимают состояние защищенности

информационной среды, обеспечивающее ее формирование и развитие в интересах организации и государства. Для предотвращения угроз информационной безопасности и устранению их последствий осуществляется комплекс организационных, правовых, технических и технологических мер, которые в совокупности называются мерами по защите информации.

8.2. Проблемы информационной безопасности в сфере учета и контроля ядерных материалов

Проблема безопасности информационных технологий в последние годы обострилась. Аналитические обзоры демонстрируют каждый год рост ущерба от нарушения безопасности. Для иллюстрации этого факта приведем цифры ущерба от компьютерных вирусов за последние годы. В 2001 г. ущерб от вирусов составил примерно 13 млрд. долларов, в 2002 г. – от 20 до 30 млрд. долларов. В 2003 г. он достиг 55 млрд. долларов. По некоторым данным ущерб от вируса *Mydoom* в январе 2004 г. вплотную приблизился к этой цифре. Таким образом, можно говорить о кризисной ситуации, сложившейся в сфере обеспечения безопасности информационных технологий.

Истоки кризиса безопасности заложены в стремительном развитии информационных технологий и отставании теории и практики обеспечения безопасности от прогресса в сфере технологий. Огромная вычислительная мощь современных вычислительных систем сочетается с простотой эксплуатации этих систем. Создание глобальной информационной среды обеспечивает доступ к информационным ресурсам огромного количества пользователей различной квалификации. Большинство пользователей не обладают достаточной квалификацией для поддержания безопасности компьютерных систем на должном уровне. Большинство эпидемий компьютерных вирусов смогли реализоваться по той причине, что пользователи не производят регулярной проверки своих компьютеров, не обновляют антивирусные базы данных и своевременно не устанавливают обновления операционных систем, которые ликвидируют выявленные ошибки в программном обеспечении.

Прогресс в сфере вычислительной техники сопровождается бурным развитием программного обеспечения. Зачастую вновь созданные и распространяемые программные средства не отвечают современным требованиям к безопасности. Примером может яв-

ляться программное обеспечение, создаваемое наиболее мощной корпорацией в этой сфере деятельности – Microsoft. Выпускаемые операционные системы (ОС), системы управления базами данных (СУБД) содержат изъяны в обеспечении информационной безопасности и большое число «недокументированных возможностей». Их наличие позволяет злоумышленникам через глобальные сети внедряться в информационные системы, определять пароли пользователей, произвольно назначать себе уровни доступа и, в конечном итоге, свободно манипулировать конфиденциальной информацией.

Отставание теоретической проработки информационной безопасности от технологического прогресса и постоянно обновляющихся угроз безопасности приводит к тому, что большинство систем защиты занимается «латанием дыр», обнаруженных в процессе эксплуатации.

На ситуацию с обеспечением компьютерной безопасности существенное влияние оказывает тот факт, что существующие национальные стандарты в сфере информационной безопасности также отстают от требований, предъявляемых к безопасности современных информационных технологий. Глобализация информационного пространства привела к необходимости выработки международных критериев безопасности, которые должны стандартизировать требования к безопасности, обоснования применения тех или иных средств обеспечения информационной безопасности и корректности реализации средств защиты.

Надо отметить, что перечисленные проблемы осознаются и органами государственного управления и разработчиками систем вычислительной техники и программного обеспечения. В последнее время усилия по обеспечению защиты информации ставятся на первый план и при продвижении нового программного обеспечения. Созданы международные критерии обеспечения компьютерной безопасности, которые утверждены Международной организацией по стандартизации (ISO) в 1999 г. [2,3]. С 1 января 2004 г. этот стандарт действует и в Российской Федерации. Разработчики программного обеспечения стремятся сертифицировать свои продукты согласно этим критериям, что в целом должно поднять уровень обеспечения информационной безопасности. Так, в 2002 г. на соответствие этим критериям была сертифицирована операционная сис-

тема Windows 2000, в 2003 году были сертифицированы некоторые дистрибутивы операционной системы Linux.

В Российской Федерации в целом тенденции развития информационных технологий в области обеспечения безопасности соответствуют общемировым. Тем не менее существуют и определенные особенности. Распространение информационных технологий в России несколько отстает от экономически развитых стран мира. С одной стороны, это объясняется тем, что наша страна позднее развитых стран получила возможность развивать общедоступные информационные системы, с другой стороны, экономическая ситуация в стране не позволяет сделать информационные технологии доступными большинству населения. Это отставание сказывается, например, в динамике развития нормативных документов в сфере информационной безопасности. Так, первые руководящие документы Гостехкомиссии при Президенте Российской Федерации [4 – 8] в сфере защиты информации от несанкционированного доступа были приняты в 1992 г. Идеология, отраженная в этих документах, соответствовала образцам критериев Министерства обороны США, так называемой «Оранжевой книги», принятых в 1983 г. Близок к этим документам и руководящий документ, регулирующий защиту информации в автоматизированных системах учета и контроля ядерных материалов [9], принятый в 1997 г. И только в 2004 г. в России стали стандартом международные критерии.

На отечественном рынке практически отсутствуют специализированные средства работы с секретной информацией, такие как операционные системы и СУБД. То, что используется в качестве базового программного обеспечения (ПО), не выдерживает критики с точки зрения обеспечения безопасности. Зачастую используются коммерческие системы, предназначенные для обеспечения работы малых предприятий и офисов и не ориентированные в принципе на работу с конфиденциальной информацией. Существующие средства защиты решают отдельные задачи, например задачу криптографии, но не в состоянии решить проблему в целом.

Если говорить о положении защиты информации в сфере учета и контроля ядерных материалов, то следует отметить, что использование коммерческого базового программного обеспечения, разработанного в третьих странах для обработки информации, составляющей государственную тайну, едва ли может считаться нормаль-

ным. В аналогичных ситуациях правительства многих стран отказываются от импортного программного обеспечения и разрабатывают собственное ПО. Один из последних примеров такого рода – отказ ряда стран от использования программного обеспечения корпорации Microsoft для задач государственного и регионального управления. Существуют два пути решения этой проблемы. Первый путь заключается в создании собственного программного обеспечения на отечественной платформе. Второй путь – доработка существующего ПО, заключающаяся в создании собственных систем защиты информации (СЗИ) и внедрении их в существующие системы на основании лицензионных соглашений. Первый путь является очень затратным, и в настоящее время Минатом движется по второму пути. Как известно [3], в 2003 г. в рамках программы GSP (Government Security Program) корпорацией Microsoft предоставлена возможность для уполномоченных организаций ряда стран ознакомиться с исходными текстами своих операционных систем. В России такое соглашение подписано между корпорацией и ФАПСИ. Заявлено также, что корпорация Microsoft будет предоставлять в установленном порядке для проведения оценки необходимую проектную документацию, а также возможность разработки программных модулей в тех случаях, когда предъявляемые функциональные требования не реализованы в продуктах корпорации Microsoft.

8.3. Угрозы информационной безопасности и противодействие им

Угрозами информационной безопасности называются факторы, стремящиеся нарушить нормальное функционирование системы. Угрозы могут быть как целенаправленные (субъективные), так и случайные (объективные). Российские стандарты в основном обращают внимание на целенаправленные угрозы, то есть на защиту информации от несанкционированного доступа (НСД). Не меньшую угрозу нормальному функционированию информационных систем могут представлять объективные факторы. Так нарушение целостности данных в результате некачественного проектирования базы данных может свести ценность накопленных данных к нулю. Аналогичным образом возможна полная потеря информации в ре-

зультате аппаратной аварии, если не предпринимались специальные меры по ее архивации и дублированию.

Можно выделить три широких класса вида угроз:

- угрозы конфиденциальности;
- угрозы целостности;
- угрозы отказа в обслуживании.

Противодействие объективным угрозам относится к вопросам обеспечения надежности системы. Противодействие субъективным угрозам является основной задачей обеспечения информационной безопасности.

Специалисты в области защиты информации рассматривают различные способы воздействия угроз на компьютеризированную информационную систему. Выделяют информационные, программно–математические, физические и организационно–правовые способы воздействия.

Под информационными способами воздействия понимается всякого рода несанкционированное манипулирование информацией, содержащейся в базах данных. Сюда включается незаконный доступ к данным, хищение и копирование информации, сокрытие информации, ее намеренное искажение и нарушение технологии и своевременности ее обработки.

Программно–математические способы воздействия сводятся к воздействию на защищаемую систему с помощью внедряемых вредоносных программ или аппаратных устройств. Эти программы или устройства способны реализовывать недокументированные функции, что приводит к хищению или порче данных. В связи с тем, что в настоящее время при создании автоматизированных СУиК ЯМ используется в основном импортное оборудование и программное обеспечение, произведенное зарубежными компаниями, вероятность внедрения специальных «закладок» достаточна велика. Более того, известны реальные случаи таких действий. Широко распространенное в настоящее время воздействие на компьютеры посредством компьютерных вирусов является одной из форм программно–математического воздействия угроз информационной безопасности.

Физические способы воздействия осуществляются через физическое воздействие различных факторов на вычислительную технику, сетевое оборудование, носители информации и, в конечном итоге, на персонал, осуществляющий работу с конфиденциальной информацией, и охранные системы. По оценкам Ассоциации защиты информации США 39 % причин сбоев в работе компьютерных систем являются физические угрозы. Физическое воздействие может быть организовано посредством высокотехнологической электронной аппаратуры, которая может перехватывать сигналы от работающего оборудования и таким образом похищать информацию. Возможно блокирование сигналов и нарушение нормальной работы оборудования, внедрение устройств перехвата информации в рабочих помещениях. Для уничтожения информационной базы можно использовать простейшие воздействия: пожар или залив оборудования водой. При этом необязательно воздействовать на помещение и оборудование, где хранится информация. Достаточно, например, организовать пожар в соседнем помещении, куда доступ посторонних значительно упрощен.

Менее очевидными являются организационно–правовые способы воздействия угроз. К этим способам воздействия относится невыполнение персоналом и руководством требований нормативных документов, задержка с принятием нормативно–правовых положений. Невыполнение нормативных требований или их отсутствие часто открывают путь другим способам воздействия угроз. Угрозы могут представлять и действия, связанные с закупкой устаревшего оборудования, неправомерного ограничения доступа к информации и другие.

Предотвращение, парирование или нейтрализация угроз информационной безопасности осуществляется с помощью средств защиты информации на основании разработанных и внедренных методов противодействия различным угрозам информационной безопасности. Под средствами защиты информации понимаются организационные, технические, криптографические, программные средства, предназначенные для защиты информации с ограниченным доступом, а также программные средства и вычислительная техника, в которых они реализованы. Кроме того, к ним же относятся и средства контроля эффективности защиты информации.

Для эффективной и всесторонней защиты информации от существующих угроз необходимо использовать различные методы противодействия этим угрозам и предотвращения самой возможности их применения. Методы предотвращения, парирования или нейтрализации угроз можно разделить на организационно–правовые, меры физической защиты и программно–технические методы.

Организационно–правовые методы, прежде всего, включают в себя разработку комплекса нормативно–правовых актов и положений, регламентирующих информационные отношения руководящих и нормативно–методических документов по обеспечению информационной безопасности. На основании этих нормативных документов создается система лицензирования деятельности в сфере информационной безопасности и стандартизация способов и средств защиты информации. В свою очередь, в организациях необходимо сформировать и обеспечить функционирование систем защиты секретной и конфиденциальной информации. Необходима сертификация и аттестация этих систем по требованиям руководящих документов в области информационной безопасности. При разработке автоматизированных СУиК ЯМ одной из важнейших процедур является выработка должностных инструкций и регламентов поведения персонала в различных ситуациях. В процессе эксплуатации необходимо добиваться неуклонного выполнения этих инструкций.

Необходимо организовывать физическую защиту помещений, линий связи, каналов передачи информации, носителей информации с целью предотвращения физического проникновения, хищения или перехвата информации. Средства физической защиты весьма действенны при обеспечении информационной безопасности. Далее, при рассмотрении вопросов классификации компьютеризированных СУиК ЯМ, мы увидим, что именно наличие физической защиты позволяет использовать для целей учета ЯМ базовое программное обеспечение, сертифицированное по третьему классу безопасности от несанкционированного доступа.

И, наконец, непосредственно при проектировании и создании компьютерных сетей необходимо применять программно–технические методы противодействия угрозам информационной безопасности. Особенно возрастает роль этих средств при исполь-

зовании открытых каналов передачи информации. Кратко можно перечислить следующие меры:

- исключение несанкционированного доступа к информации;
- предотвращение специальных воздействий, вызывающих разрушение, уничтожение, искажение информации или сбои в работе средств информатизации;
- выявление внедренных программных или аппаратных закладных устройств;
- применение средств защиты информации, в том числе криптографических, при передаче по каналам связи.

При планировании противодействий целенаправленным угрозам информационной безопасности следует учитывать, что хотя атаки извне на компьютерные системы вызывают повышенное внимание прессы, однако значительно больший ущерб безопасности вызывают внутренние нарушения безопасности. На сайте центра исследований компьютерной преступности [10] приводятся данные о том, что в 2002 году 70 % нарушений безопасности произошло внутри организаций, нередко со стороны недовольных сотрудников. Поэтому огромную важность имеет добросовестная кадровая политика и правильное распределение обязанностей персонала, во избежание ситуаций, когда безопасность зависит от одного человека.

8.4. Стандарты в сфере обеспечения информационной безопасности в автоматизированных СУиК ЯМ

Существует достаточно большой перечень документов Росатома, касающихся обеспечения информационной безопасности в автоматизированных системах предприятий и организаций министерства. Их перечень приводится в отраслевом стандарте по оснащению систем учета и контроля ядерных материалов [1]. Сам отраслевой стандарт содержит разделы, посвященные обеспечению информационной безопасности как с точки зрения защиты от НСД, так и с точки зрения надежности хранения информации. В данном разделе мы рассмотрим отечественные стандарты в сфере защиты от НСД, которыми разработчики СУиК ЯМ должны руководствоваться при создании средств защиты информации. Основным документом, устанавливающим классификацию СУиК ЯМ и регламен-

тирующим требования по защите от НСД к информации в СуиК, является руководящий документ Гостехкомиссии РФ и Минатома «Требования по защите от несанкционированного доступа к информации в автоматизированных системах учета и контроля ядерных материалов», утвержденный в январе 1997 г. [9]. Этот документ содержит также требования по сертификации средств защиты информации в таких системах и аттестационные требования к АСУиК ЯМ.

Данный документ при разработке учитывал руководящие документы Гостехкомиссии России в сфере информационной безопасности, выпущенные в 1992 году [4–8]. Существуют прецеденты, когда компьютеризированные СУиК ЯМ аттестовывались на основании именно этих критериев, а не на основании требований 1997 года. Наконец с 1 января 2004 г. в России начал действовать новый стандарт ИСО/МЭК 15408–99 [11–13], созданный на основании международных Общих критериев («Common Criteria»). Для развития нормативной базы обеспечения информационной безопасности этот шаг имеет большое значение, поскольку вводит в употребление в России современные подходы и требования к безопасности информационных систем. Шаги в направлении сближения внутренних требований к международно признанным в перспективе позволят выходить российским разработчикам программного обеспечения на внешний рынок. Следует учитывать, что введение новых стандартов не отменяет требований, представленных в руководящих документах Гостехкомиссии РФ.

В ближайшей перспективе на состояние дел в области нормативных требований в сфере обеспечения компьютерной безопасности должен оказать большое влияние вступивший в силу 1 июля 2003 года Федеральный закон «О техническом регулировании». Ниже будет дан краткий комментарий проблемам и задачам, возникающим в связи с принятием нового закона.

8.4.1. Требования по защите от НСД к информации в автоматизированных СУиК ЯМ

Данный документ разработан Российским федеральным ядерным центром – ВНИИ экспериментальной физики (РФЯЦ ВНИИЭФ) и

Тихоокеанской Северо–Западной Национальной Лабораторией (PNNL) США в рамках соглашения по модернизации физической защиты, учета и контроля ядерных материалов в Российской Федерации. Основной целью данного документа являлась создание нормативной основы для сертификации по требованиям безопасности информации программного обеспечения автоматизированных СУиК ЯМ, разрабатываемого на базе коммерческих программных продуктов корпорации Microsoft. Документ вводит классификацию автоматизированных СУиК ЯМ, определяет требования с СЗИ от НСД к информации в зависимости от класса АСУиК и, наконец, определяет сертификационные и аттестационные требования средств защиты информации.

Классификация СУиК ЯМ

Классификация СУиК ЯМ вводится в целях разработки и применения обоснованных мер по достижению требуемого уровня защиты информации. Выбор класса защищенности производят заказчик и разработчик СУиК с привлечением специалистов в сфере защиты информации. В качестве критериев при установлении класса защищенности используются следующие свойства системы:

- наличие в СУиК информации различной степени секретности;
- уровень полномочий пользователей на доступ к секретной информации;
- порядок и условия размещения и функционирования, физическая защищенность средств вычислительной техники СУиК.

Исходя из оценки этих факторов, требования устанавливают три класса защищенности автоматизированных СУиК ЯМ. Самым высоким является первый класс.

К **третьему классу** относятся СУиК, характеризующиеся:

- наличием информации строго одной степени секретности;
- все субъекты доступа (кроме администраторов) имеют равные права доступа (полномочия) ко всей информации СУиК;
- все средства вычислительной техники СУиК размещаются в контролируемой зоне и не имеют внешних (выходящих за пределы контролируемой зоны) физических информационных связей.

Ко **второму классу** относятся СУиК, характеризующиеся:

- наличием информации нескольких степеней секретности;
- субъекты доступа имеют разные права доступа к информации СУиК;
- все средства вычислительной техники СУиК размещаются в пределах одной или нескольких контролируемых зон и не имеют незащищенных внешних физических информационных связей.

К **первому классу** относятся СУиК, характеризующиеся:

- наличием информации нескольких степеней секретности;
- субъекты доступа имеют разные права доступа к информации СУиК;
- средства вычислительной техники СУиК размещаются в контролируемой зоне и имеют внешние физические информационные связи со средствами вычислительной техники, не относящимися к СУиК.

В настоящее время все сертифицированное базовое программное обеспечение относится только к третьему классу. В табл. 8.1 приведены программные продукты, сертифицированные для использования в компьютеризированных СУиК ЯМ.

Таблица 8.1

Базовое программное обеспечение, сертифицированное для использования в компьютеризированных СУиК ЯМ

Тип программного обеспечения	Наименование
Операционные системы	MS Windows NT 4.0 Workstation (Russian) с пакетом обновления SP 3 или SP 5
	MS Windows NT 4.0 Server с пакетом обновления SP 3 или SP 5
	MS Windows NT 4.0 Server Enterprise Edition с пакетом обновления SP 5
Системы управления базами данных (СУБД)	Microsoft SQL Server версии 6.5. с пакетом обновления SP 4 или SP 5a
	Oracle7 Server и Workgroup Server версии 7.3.4.0.0
	Oracle8i Enterprise Edition версии 8.1.7.0.0

На нынешнем этапе развития Федеральной информационной системы отсутствие базового программного обеспечения, сертифицированного на класс выше третьего, представляет собой основную проблему, сдерживающую развитие компьютеризированного учета.

Принадлежность СУиК к третьему классу предполагает наличие информации одной степени секретности. Вместе с тем на предприятиях отрасли часто используются материалы, имеющие различный уровень секретности. В этом случае выполнение требований Гостехкомиссии должно сопровождаться либо созданием не менее двух не связанных между собой локальных компьютерных сетей для учета материалов с различной степенью секретности, либо автоматическим повышением уровня секретности всех материалов до максимального. В первом случае затраты на создание сети резко увеличиваются, во втором – серьезно затрудняется работа персонала с материалами, изначально обладающими низким уровнем секретности. Наконец, последнее требование предполагает, что все предприятие размещено на одной площадке. Для крупных предприятий топливного цикла это требование не выполняется. Единственный выход в этом случае – создание фрагментов компьютеризированной системы на отдельных площадках и организация связи между ними посредством пересылки информации на носителях со специальными курьерами.

Таким образом, актуальной задачей является сертификация базового ПО по второму классу защиты информации от НСД. СУиК первого класса защищенности потребуются в том случае, когда возникнет потребность в передаче информации по открытым информационным каналам. Напомним, что это требование включено в программу развития Федеральной информационной системы (ФИС) на период до 2010 года.

Требования к СЗИ от НСД к информации по классам СУиК

Требования Гостехкомиссии выделяют четыре подсистемы Системы защиты информации от несанкционированного доступа (СЗИ НСД). Это подсистемы:

- управления доступом к информации;
- регистрации и учета;
- криптографическая;
- обеспечения целостности.

К каждой подсистеме, в зависимости от класса СУиК, устанавливаются сертификационные и аттестационные требования. В табл. 8.2 собраны требования по классам для различных компонентов этих четырех подсистем. Если в таблице стоит «+», то к данному классу есть соответствующие требования, если «–», то требований нет.

Таблица 8.2

Подсистемы и требования	Классы СУиК		
	III	II	I
1. Подсистема управления доступом			
1.1. Идентификация, проверка подлинности и контроль доступа субъектов:			
• при входе в операционную систему	+	+	+
• при доступе к СУБД	+	+	+
• при доступе к объектам ОС (рабочим станциям, серверам, сетям, доменам, каналам связи, портам, областям ОЗУ, внешним и сетевым устройствам, процессам, дискам, томам, каталогам, файлам и т.п.) и к объектам СУБД (файлам, таблицам, индексам, записям, полям записей, схемам, процедурам и т.п.)	+	+	+
1.2. Контроль передаваемых (принимаемых) данных в сети	–	+	+
1.3. Ограничение процессов для доступа к данным	–	+	+
1.4. Управление потоками информации	–	+	+
2. Подсистема регистрации и учета			
2.1. Регистрация и учет:			
• входа (выхода) субъектов доступа в операционную систему/ из системы (рабочей станции, сервера)	+	+	+
• выдачи печатных (графических) выходных документов	+	+	+
• запуска (завершения) всех программ (процессов, заданий)	+	+	+
• доступа программных средств (процессов, программ, задач, заданий) к защищаемым файлам и каталогам	+	+	+
• доступа программных средств (процессов) к фрагментам и узлам сети (доменам, серверам, рабочим станциям), портам (линиям, каналам связи), внешним и сетевым устройствам, процессам	–	+	+
• доступа к объектам СУБД (файлам, таблицам, индексам, записям, полям записей, схемам, процедурам и т.п.)	+	+	+
• изменения полномочий субъектов доступа и статуса объектов доступа	–	–	+
• создаваемых защищаемых объектов доступа	–	+	+
• всех нарушений при обмене данных по сети	–	+	+
• установления соединения между удаленными процессами	–	–	+
2.2. Учет носителей информации	+	+	+
2.3. Очистка (обнуление, инициализация, обезличивание) освобождаемых областей ОЗУ ЭВМ и внешних накопителей	–	+	+
2.4. Сигнализация попыток нарушения защиты	–	–	+

Подсистемы и требования	Классы СУиК		
	III	II	I
3. Криптографическая подсистема			
3.1. Шифрование секретной информации	–	–	+
3.2. Использование сертифицированных криптографических средств	–	–	+
4. Подсистема обеспечения целостности			
4.1. Обеспечение целостности программных средств и обрабатываемой информации	+	+	+
4.2. Обеспечение целостности соединения	–	–	+
4.3. Доказательство передачи и доставки данных	–	–	+
4.4. Физическая защита помещений, средств вычислительной техники и носителей информации	+	+	+
4.5. Наличие администратора (службы) защиты информации в СУиК	–	+	+
4.6. Периодическое тестирование СЗИ НСД	+	+	+
4.7. Наличие средств восстановления СЗИ НСД	+	+	+
4.8. Использование защищенных линий связи	–	+	+
4.9. Применение сертифицированных межсетевых экранов	–	–	+
4.10. Использование сертифицированных средств защиты	+	+	+

Требования по сертификации СЗИ от НСД по классам СУиК ЯМ

Под сертификацией СЗИ понимается установление соответствия средств защиты информации набору требований, обеспечивающих защиту сведений соответствующей степени секретности. Порядок проведения обязательной сертификации СЗИ и организации, уполномоченные проводить сертификацию, подробно описаны в разделе «Разработка и ввод в эксплуатацию компьютеризированных СУиК ЯМ». В настоящем разделе приводятся сертификационные требования к различным подсистемам СУиК в зависимости от ее класса. Требования к более высокому классу автоматически включают в себя требования к более низкому классу.

Далее приводятся требования к **СУиК третьего класса**. К компонентам **подсистемы управления доступом** предъявляются следующие требования, должны осуществляться:

- идентификация и аутентификация пользователей при входе в операционную систему;
- идентификация и аутентификация пользователей при доступе к системе управления базами данных (СУБД);
- идентификация серверов, рабочих станций, внешних и сетевых устройств по физическим адресам;
- идентификация субъектов и объектов по именам;
- идентификация объектов баз данных по именам.

Поясним некоторые понятия. Процесс идентификации заключается в том, что система устанавливает личность пользователя. Для этого при входе в систему пользователь вводит свой идентификатор (login). Аутентификация устанавливает подлинность пользователя, то есть тот факт, что идентификатор был введен самим пользователем. Для этого вводится пароль – секретное слово, известное только самому пользователю. Требования Гостехкомиссии РФ устанавливают, что пароль должен содержать не менее 8 символов. Помимо этого требования, существуют рекомендации, основанные на многолетней практике. В частности, рекомендуется использовать в пароле не только буквы, но и другие символы. Должны использоваться символы с установкой различных регистров. Пароль ни в коем случае не должен являться осмысленным словом или содержать личную информацию. Все это должно затруднить подбор пароля с использованием автоматизированных средств. Длина пароля 8 символов установлена из тех соображений, что для подбора комбинации из 8 символов обыкновенным перебором на современной вычислительной технике требуется около полугода. За это время обычно действие пароля прекращается. В настоящее время в связи с увеличением параметров вычислительной техники рекомендуется использовать не менее 10 символов. Доступ к паролям пользователей должен иметь только специально уполномоченный персонал (администраторы). Необходимо устанавливать срок действия паролей и периодически их изменять.

Под субъектом системы понимается любой процесс в системе, инициированный пользователем и действующий в интересах пользователя. Объект операционной системы и объект базы данных – любой ресурс в ОС или СУБД. Более подробно об этом излагается в разделе «Базовое программное обеспечение».

К компонентам **подсистемы регистрации и учета** предъявляются следующие требования. Должна осуществляться регистрация следующих событий:

- входа/выхода пользователей в операционную систему/из системы, а также регистрация загрузки операционной системы и ее программного останова;
- запуска/завершения всех программ;
- попыток доступа программных средств к защищаемым файлам и каталогам;
- доступа к объектам базы данных.

Средства регистрации должны быть доступны только администратору и включать для него средства для просмотра и анализа накапливаемых событий по указанным параметрам и их архивирования.

При регистрации должны указываться:

- время и дата процесса входа/выхода пользователя в систему/из системы, загрузки/останова системы;
- идентификатор пользователя инициализирующего процесс;
- результат действия (успешное или неуспешное – несанкционированное).

При доступе к файлам или объектам базы данных регистрируется также спецификация объекта доступа и код запрашиваемой операции.

Подсистема обеспечения целостности должна обеспечивать:

- целостность программных средств и информационной базы СЗИ НСД.
- целостность информационной базы СЗИ НСД в СУБД посредством ее изолирования от пользователей и оперативного восстановления со стороны администратора.

Криптографическая система у СУиК третьего класса отсутствует.

Далее приводятся требования к **СУиК второго класса**. Подсистема управления доступом должна осуществлять:

- идентификацию каналов связи по физическим адресам;
- контроль доступа субъектов к защищаемым ресурсам ОС в соответствии с матрицей доступа на основе дискреционного принципа;

- контроль доступа субъектов к объектам СУБД в соответствии с матрицей доступа по операциям выборки, модификации, вставки, удаления и т.п.;

- ограничение доступа пользователей к защищаемым объектам только с помощью строго установленных процессов;

- мандатный принцип управления доступом;

- управление потоками информации с помощью атрибута секретности субъектов и объектов;

- передача данных по сети должна осуществляться вместе с атрибутами секретности, которые должны быть защищены.

Несанкционированные действия над передаваемыми по сети данными и несанкционированное дублирование данных должны надежно идентифицироваться как ошибка с соответствующей регистрацией.

Поясним требование мандатного принципа управления доступом. Теоретически существует два основных принципа (или модели) управления доступом к ресурсам. Это дискреционная и мандатная модели. При реализации дискреционного принципа доступа к объектам каждый объект содержит список управления доступом, т.е. список пользователей, которым разрешен доступ. Для каждого пользователя устанавливается матрица доступа – какое именно действие в отношении данного объекта разрешено данному пользователю. Для файлов, например, матрица доступа реализует следующие права: читать, писать, добавлять, создавать, удалять, переименовывать, исполнять (для исполняемых файлов).

При реализации мандатного принципа управления доступом каждому объекту и субъекту устанавливается двойной атрибут. Первая часть атрибута должна отображать одну из пяти степеней секретности: «несекретно», «для служебного пользования» и т.д. Вторая часть атрибута должна отображать одну из тематических категорий. При этом должны выполняться следующие правила:

- субъект получает право чтения информации только в том случае, если степень секретности субъекта выше или равна степени секретности объекта и категория объекта либо совпадает с категорией субъекта, либо является ее подмножеством;

- субъект может получить право записи по отношению к объекту только в том случае, если степень секретности объекта выше или равна степени секретности субъекта, и категория субъекта либо

совпадает с категорией (группой) объекта, либо является полным подмножеством категории (группы) объекта.

Более подробно о доступе к информации на основе дискреционного принципа говорится в разделе «Операционные системы».

При передаче данных по сети требования Гостехкомиссии устанавливают, что должны использоваться средства, предотвращающие передачу данных объекту, имеющему степень секретности ниже, чем передаваемые данные.

Подсистема регистрации и учета должна осуществлять:

- регистрацию выдачи секретных печатных документов на «твердую» копию;
- регистрацию попыток доступа программных средств к следующим защищаемым объектам доступа: узлам и фрагментам сети, портам, внешним устройствам, процессам;
- регистрация всех выявленных ошибок при обмене данных по сети;
- автоматический учет создаваемых защищаемых объектов с помощью их дополнительной маркировки, используемой в подсистеме управления доступом;
- очистку (обнуление, инициализация, обезличивание) освобождаемых областей ОЗУ ЭВМ и разделяемых внешних накопителей. Очистка осуществляется двукратной произвольной записью в любую освобождаемую область памяти, использованную для хранения защищаемой информации.

При выдаче на печать секретных документов необходимо осуществлять автоматическую маркировку листов номерами и учетными реквизитами. Одновременно должна оформляться учетная карточка документа с определенными параметрами регистрации.

Требования к подсистемам обеспечения целостности и криптографии полностью совпадают с требованиями к аналогичным подсистемам СУиК третьего класса.

Требования к **СУиК первого класса** полностью включают в себя требования к СУиК третьего и второго классов.

Требования к **подсистеме управления доступом** включают в себя аутентификацию пользователей при удаленном доступе к серверу, рабочей станции с помощью методов, устойчивых к прослушиванию каналов и активному воздействию на передаваемые в сети данные. Также должна проводиться аутентификация субъекта –

источника данных, т.е. должны использоваться средства, подтверждающие подлинность источника блока данных с помощью методов, устойчивых к прослушиванию каналов и активному воздействию на передаваемые данные в сети.

Подсистема регистрации и учета должна осуществлять регистрацию изменения полномочий субъектов доступа и статуса объектов доступа. Должна также осуществляться регистрация установления соединения между удаленными процессами и сигнализация попыток нарушения защиты на дисплей рабочей станции администратора и нарушителя.

Криптографическая подсистема должна осуществлять шифрование всей секретной информации, записываемой на совместно используемые различными субъектами доступа носители данных, в каналах связи сети, а также на съемные носители данных. Доступ субъектов к операциям шифрования и к соответствующим криптографическим ключам должен дополнительно контролироваться посредством подсистемы управления доступом.

Подсистема обеспечения целостности должна обеспечивать:

- целостность соединения для защиты передаваемых по сети данных пользователя от несанкционированной модификации, подстановки или изъятия любых данных с помощью методов, устойчивых к прослушиванию каналов и воздействию на передаваемые данные в сети;
- доказательство источника данных с целью предотвращения любой попытки отправителя данных отрицать впоследствии факт передачи;
- доказательство доставки данных для предотвращения любой попытки получателя данных отрицать впоследствии факт получения данных.

Требования по аттестации СЗИ от НСД по классам СУиК ЯМ

Аттестации подлежит вся компьютеризированная СУиК ЯМ. Под аттестацией понимается документированное подтверждение соответствия применяемого при эксплуатации комплекса организационно-технических мероприятий требованиям стандартов и иных нормативных документов по безопасности информации. Предусматривает аттестационные испытания защищаемой АС в условиях эксплуатации для оценки соответствия используемых мер и СЗИ

требуемому уровню безопасности информации. Далее информация располагается в том же порядке, что и требования по сертификации.

Далее приводятся требования к **СУиК третьего класса**. К компонентам **подсистемы управления доступом** предъявляются следующее аттестационное требование. Доступ персонала к информации СУиК должен осуществляться в соответствии с действующей разрешительной системой допуска исполнителей к секретным документам и сведениям.

Подсистема регистрации и учета должна:

- проводить учет всех защищаемых носителей информации с помощью их любой маркировки;
- регистрировать и учитывать выходные печатные документы ручным способом в соответствии с требованиями делопроизводства соответствующей степени секретности. Выдача печатных документов должна осуществляться только в соответствии с установленным перечнем выходных документов с указанием их степени секретности.

Подсистема обеспечения целостности должна обеспечивать следующий набор функций.

- Должна быть обеспечена неизменность программной среды, при этом целостность программной среды обеспечивается отсутствием в СУиК средств разработки и отладки программ.
- Должно проводиться периодическое тестирование функций СЗИ НСД при изменении программной среды и персонала СУиК с помощью тестов, имитирующих попытки НСД.
- Должны быть в наличии средства восстановления СЗИ НСД, предусматривающие ведение двух копий программных средств СЗИ НСД, и их периодическое обновление и контроль работоспособности, а также оперативное восстановление функций СЗИ НСД при сбоях аппаратуры.
- Помещения с техническими средствами СУиК, на носителях которых содержится секретная информация, должны быть оборудованы техническими средствами охраны, обеспечивающими уровень защиты, соответствующий степени секретности хранимой информации.
- Должны использоваться средства защиты информации от НСД, сертифицированные для данного класса СУиК.

Аттестационные **требования к СУиК второго класса** отличаются от требований к СУиК третьего класса только в отношении **подсистемы обеспечения целостности**. Должен быть предусмотрен администратор защиты информации, ответственный за ведение, нормальное функционирование и контроль работы СЗИ НСД. Администратор должен иметь свою рабочую станцию и необходимые средства оперативного контроля и воздействия на безопасность СУиК. Кроме того, должны использоваться защищенные линии связи, выходящие за пределы контролируемых зон.

Аттестационные **требования к СУиК первого класса** отличаются от требований к СУиК второго класса наличием **криптографической подсистемы**. Должны использоваться криптографические средства, сертифицированные для СУиК первого класса. Кроме того, **подсистема обеспечения целостности** должна использовать межсетевые экраны, сертифицированные для СУиК первого класса.

8.4.2. Руководящие документы Гостехкомиссии России

В 1992 г. Гостехкомиссия РФ опубликовала пять руководящих документов, посвященных вопросам защиты от несанкционированного доступа к информации [4–8]. Эти документы послужили основой тех требований к СУиК ЯМ, которые мы рассмотрели выше. Поэтому кратко рассмотрим важнейшие из них.

Идейной основой этих документов является «Концепция защиты средств вычислительной техники от несанкционированного доступа к информации (НСД)» [4], содержащая систему взглядов Гостехкомиссии на проблему информационной безопасности и основные принципы защиты компьютерных систем. С точки зрения разработчиков данных документов основная задача средств безопасности заключается в обеспечении защиты от несанкционированного доступа к информации. Практически не рассматриваются вопросы поддержки работоспособности систем обработки информации. Этот уклон в сторону поддержания секретности объясняется тем, что эти документы были разработаны в расчете на применение в информационных системах Министерства обороны и спецслужб РФ, а также невысоким уровнем информационных технологий начала 1990–х годов по сравнению с современными.

Руководящие документы ГТК предлагают две группы критериев безопасности: показатели защищенности средств вычислительной техники (СВТ) от НСД и критерии защищенности автоматизированных систем обработки данных. Первая группа позволяет оценить степень защищенности отдельно поставляемых потребителю компонентов вычислительных систем, а вторая рассчитана на полнофункциональные системы обработки данных. Рассмотрим положения документа «Автоматизированные системы. Защита от несанкционированного доступа к информации. Классификация автоматизированных систем и требования по защите информации». Этот документ устанавливает классификацию автоматизированных систем по отношению к защищенности от НСД к информации. Имеет смысл сравнить эту классификацию с классификацией автоматизированных СУиК ЯМ.

Документы ГТК устанавливают девять классов защищенности автоматизированных систем от НСД. Каждый из классов характеризуется определенной совокупностью требований к средствам защиты. В свою очередь, классы подразделяются на три группы, отличающиеся спецификой обработки информации. Группа автоматизированной системы определяется на основании следующих признаков:

- наличие в АС информации различного уровня конфиденциальности;
- уровень полномочий пользователей АС на доступ к конфиденциальной информации;
- режим обработки данных в АС (коллективный или индивидуальный).

В пределах каждой группы устанавливается иерархия классов защищенности АС. Класс, соответствующий высшей степени защищенности для данной группы, обозначается буквой А, следующий класс обозначается Б и т.д.

Третья группа включает АС, в которых работает один пользователь, допущенный ко всей информации АС, размещенной на носителях одного уровня конфиденциальности. Группа содержит два класса – ЗБ и ЗА.

Вторая группа включает АС, в которых пользователи имеют одинаковые полномочия доступа ко всей информации, обрабаты-

ваемой и/или хранимой в АС на носителях различного уровня конфиденциальности. Группа содержит два класса – 2Б и 2А.

Первая группа включает многопользовательские АС, в которых одновременно обрабатывается и/или хранится информация разных уровней конфиденциальности. Не все пользователи имеют равные права доступа. Группа содержит пять классов – 1Д, 1Г, 1В, 1Б и 1А.

Анализ требований показывает, что второй класс защищенности от НСД к информации в компьютеризированных СУиК ЯМ в целом соответствует классу 1Б автоматизированных систем. Существуют прецедент, когда автоматизированная СУиК ЯМ, аттестованная по классу 1Б защищенности автоматизированных систем от НСД к информации используется для учета и контроля ЯМ в условиях, соответствующих второму классу СУиК ЯМ.

Разработка перечисленных документов в начале 90-х годов заполнила правовой вакуум в области стандартов информационной безопасности. Являясь, по сути, первым опытом стандартизации в столь деликатной сфере эти документы не лишены недостатков. Кроме того, за прошедшее с момента принятия этих критериев время получили развитие как теория информационной безопасности, так и подходы к формированию стандартов в сфере информационной безопасности. Главные недостатки реализованных в документах подходов заключается в том, что ранжирование требований по классу защищенности сводится к выявлению наличия определенного набора механизмов защиты, что существенно снижает гибкость и применимость данных требований на практике. Понятие политики безопасности в данных документах трактуется как поддержание режима секретности и отсутствии НСД. Из-за такого подхода средства защиты ориентируются исключительно на противодействие внешним угрозам, а к функционированию системы и ее структуре требований практически не предъявляется. Следует заметить, что требования к компьютеризированным СУиК ЯМ, принятые в 1997 г., созданы на основании перечисленных документов и сохраняют те же недостатки.

8.4.3. Общие критерии безопасности информационных технологий

«Общие критерии» (Common Criteria for Technology Security Evaluation) представляют собой результат последовательных усилий по разработке критериев оценки безопасности информацион-

ных технологий, которые были бы приняты в качестве международных критериев.

В начале 1980-х годов в США были разработаны «Критерии оценки доверенных компьютерных систем». В следующем десятилетии различные страны проявили инициативу по разработке критериев оценки, которые строились на концепциях этого документа, но были бы более гибки и адаптируемы к развитию информационных технологий.

Так в 1991г. Европейской комиссией были опубликованы «Критерии оценки безопасности информационных технологий», разработанные совместно Францией, Германией, Нидерландами и Великобританией. В Канаде в начале 1993 г. были созданы «Канадские критерии оценки доверенных компьютерных продуктов». В США в это же время был издан проект стандарта «Федеральные критерии безопасности информационных технологий».

В 1990 г. Международной организацией по стандартизации (ISO) была начата разработка международного стандарта критериев оценки для общего использования. Новые критерии были призваны удовлетворить потребность взаимного признания результатов стандартизированной оценки безопасности на мировом рынке информационных технологий. В июне 1993 г. организации, разработчики национальных критериев, объединили свои усилия и начали действовать совместно, чтобы согласовать различающиеся между собой критерии и создать единую совокупность критериев безопасности.

Первая версия Общих критериев была завершена в январе 1996 г. и одобрена ISO в апреле 1996 г. для распространения в качестве проекта комитета. Был проведен ряд экспериментальных оценок, а также организовано широкое публичное обсуждение документа. Затем в рамках проекта Общих критериев была предпринята значительная переработка документа на основе замечаний, полученных при его экспериментальном использовании. Вторая версия вышла в мае 1998 г. Версия 2.1 этого стандарта утверждена ISO в 1999 г. в качестве международного стандарта информационной безопасности ISO/IEC 15408. Сейчас в ряде стран наличие сертификата CC обязательно для информационных систем, важных с точки зрения национальной безопасности.

27 марта 2003 г. Государственная техническая комиссия при Президенте России представила план работ по внедрению между-

народного стандарта в области информационной безопасности. Россия стала внедрять международный стандарт практически без изменений, разделив его на три ГОСТа под одним номером ИСО/МЭК 15408–2002. Серия новых ГОСТов вступила в действие в России с 1 января 2004 г.

Кратко познакомимся с новым стандартом. Сам стандарт достаточно сложен и объемен. Он состоит из трех частей общим объемом около 600 страниц.

Часть 1 стандарта содержит методологию оценки безопасности ИТ, определяет виды требований безопасности (функциональные и доверия), основные конструкции (профиль защиты, задание по безопасности) представления требований безопасности в интересах трех категорий пользователей: потребителей, разработчиков и оценщиков продуктов и систем ИТ. Требования безопасности объекта оценки (ОО) по методологии Общих критериев определяются исходя из целей безопасности, которые, в свою очередь, основываются на анализе защищаемых информационных ресурсов, назначения ОО и условий среды его использования (угроз, предположений, политики безопасности).

Часть 2 стандарта содержит универсальный систематизированный каталог функциональных требований безопасности и предусматривает возможность их детализации и расширения по определенным правилам.

Часть 3 стандарта содержит систематизированный каталог требований доверия, определяющих меры, которые должны быть приняты на всех этапах жизненного цикла продукта или системы ИТ для обеспечения уверенности в том, что они удовлетворяют предъявленным к ним функциональным требованиям безопасности. В этой же части содержатся оценочные уровни доверия, представляющие собой стандартизованные наборы требований, которые позволяют с возрастающей степенью полноты и строгости провести оценку проектной, тестовой и эксплуатационной документации, правильности функционирования комплекса средств безопасности, оценку уязвимостей продукта или системы ИТ, стойкости механизмов защиты.

Как следует из содержания, Общие критерии представляют собой методический документ, содержащий хорошо систематизированный и структурированный набор требований, формы их пред-

ставления и методологию задания. С использованием этих критериев оценка безопасности проводится не по жесткой схеме и единому штампу для различных продуктов информационных технологий (ИТ), как это предусмотрено в действующих документах Гостехкомиссии РФ, а исходя из назначения, видов и условий применения продуктов и систем ИТ с возможностью гибкого подхода к формированию соответствующих требований безопасности в профилях защиты. При этом профили защиты, разрабатываемые на основе ОК, могут включать и любые другие обоснованные требования, необходимые для обеспечения безопасности конкретного типа изделий ИТ.

Как показывают оценки специалистов в области информационной безопасности, по уровню систематизации, полноте и возможностям детализации требований, универсальности и гибкости в применении Общие критерии представляют наиболее совершенный из существующих в настоящее время стандартов.

Следует отметить, что Международное соглашение распространяется только на признание результатов оценки продуктов и систем информационных технологий, предназначенных для обработки конфиденциальной информации (до уровня доверия EAL 4 включительно), и не затрагивает вопросов оценки продуктов и систем, предназначенных для обработки информации, составляющей государственную тайну стран-участниц Международного соглашения. В то же время, методология Общих критериев может быть использована заинтересованными сторонами и в этих интересах.

США с января 2001 г. полностью перешли на оценку безопасности ИТ по Общим критериям, в передовых странах Европы (ФРГ, Франции и др.) около 40 % разработанных в последние годы продуктов ИТ оценивалось по Общим критериям, причем тенденция оценки вновь разрабатываемых продуктов – по Общим критериям.

Агентство национальной безопасности США выпустило в мае 2000 г. директиву №140–23 об использовании с июля 2002 г. министерством обороны США, а также его подрядчиками, представляющими государственные организации или коммерческими компаниями, для обработки чувствительной информации только продуктов и систем информационных технологий, сертифицированных по Общим критериям.

Одновременно действие этой директивы распространяется на атомные станции, находящиеся в частном пользовании, поскольку в США придается особое значение роли Общих критериев при оценке безопасности информационных технологий, используемых в критически важных системах.

Все это свидетельствует о внимании, уделяемом мировым сообществом проблемам информационной безопасности, и об интересе к решению этих проблем на основе подходов и методологии Общих критериев.

В рамках подготовки к введению в России нового стандарта специалисты Центра «Атомзащитаинформ», ЦНИИАтоминформ и ЦБИ разработали Комментарии к российскому стандарту, предназначенные для лучшего понимания российскими специалистами назначения, основных концептуальных положений, методологии и терминологии Общих критериев, а также для пояснения расхождений в терминологии стандарта с принятой в России терминологией и действующими нормативными документами.

Основным сопутствующим документом, выпускаемым в поддержку Общих критериев и являющимся обязательным для использования в рамках упомянутого Международного соглашения, является «Общая методологии оценки безопасности информационных технологий», перерабатываемая в настоящее время специалистами ряда стран–участников Международного соглашения. В настоящее время на основе аутентичного перевода актуальной версии Общей методологии коллективом специалистов ЦБИ, Центра «Атомзащитаинформ» и ЦНИИАтоминформ при участии экспертов международной рабочей группы по Общим критериям осуществляется разработка методологии оценки продуктов и систем ИТ.

План ввода в действие стандарта предусматривает также:

- разработку концепции обеспечения безопасности информационных технологий (проект разработан ЦБИ и представлен в Гостехкомиссию России);
- разработку руководства по разработке профилей защиты и заданий по безопасности (проект разработан ЦБИ и представлен в Гостехкомиссию России);
- разработку руководства по регистрации профилей защиты на основе международного стандарта ISO/IEC 15292 (проект разработан ЦБИ и представлен в Гостехкомиссию России);

- создание инструментального комплекса автоматизации разработки профилей защиты и заданий по безопасности (в настоящее время находится в разработке ЦБИ);

- разработку профилей защиты основных типов продуктов и систем ИТ: операционных систем, систем управления базами данных, межсетевых экранов, виртуальных частных сетей и др. (в ряде организаций, среди них: ЦБИ, ЦНИИАтоминформ, МИФИ ведется разработка профилей защиты для продуктов и систем информационных технологий различного назначения, в частности, ЦНИИАтоминформ разрабатывает профиль защиты по II классу защищенности для автоматизированных СУиК ЯМ);

- разработку типовых методик проведения сертификационных испытаний продуктов и систем ИТ на основе Общей методологии оценки;

- проведение сертификационных испытаний ряда продуктов и систем ИТ, в том числе операционных систем (в частности, семейства Windows).

Указанные мероприятия направлены не только на внедрение ГОСТ Р ИСО/МЭК 15408–2002 «Критерии оценки безопасности информационных технологий», но и на последующее присоединение России к Международному соглашению в качестве участника, выдающего сертификаты по Общим критериям.

В Росатоме России, как упоминалось ранее, также рассматриваются вопросы оценки и сертификации по требованиям Общих критериев программных продуктов, используемых в СУиК ЯМ. Следует констатировать, что для этого необходимо разработать профиль защиты для систем III класса защищенности, а также задания по безопасности, на соответствие которым провести сертификацию выбранных для этих целей программных продуктов. От решения этих вопросов будут зависеть совершенствование действующих и разработка новых СУиК ЯМ, равно как и функционирование Федеральной информационной системы учета и контроля ядерных материалов.

По мнению российских специалистов, участвующих в освоении методологии Общих критериев, ввод в действие Российского стандарта, Общей методологии оценки, иных нормативных и методических документов в их поддержку, а также практическая работа по использованию методологии Общих критериев позволят:

- выйти на современный уровень критериальной и методической базы оценки безопасности информационных технологий;
- создать новое поколение межведомственных и ведомственных нормативных и методических документов по оценке безопасности ИТ на единой основе;
- заказчикам и разработчикам изделий информационных технологий иметь мощный инструмент определения требований к безопасности ИТ и создания систем защиты информации;
- потребителям объективно оценивать возможности ИТ–продуктов по защите информации;
- заказчикам и разработчикам автоматизированных систем различного уровня и назначения иметь возможность, соответственно, более обоснованно формулировать и реализовывать требования по безопасности информации этих систем;
- сделать реальной перспективу вхождения России в Международное соглашение, что в свою очередь даст возможность:
 - заказчикам и разработчикам ИТ–систем сократить свои затраты на сертификацию продуктов;
 - для потребителей расширить рынок сертифицированных продуктов;
 - испытательным лабораториям привлечь дополнительный поток заказов на сертификацию из–за рубежа;
 - производителям российских высокотехнологичных продуктов получить международные сертификаты в России, что позволит им выйти на закрытые ранее зарубежные рынки.

При этом Россия (как и другие страны, присоединившиеся к соглашению о взаимном признании сертификатов) сохраняет возможность учета своих национальных требований при сертификации продуктов и систем ИТ и, прежде всего, предназначенных для защиты информации, составляющей государственную тайну.

Вместе с тем, на этом пути предстоит большой объем работ, связанных с освоением Общих критериев и Общей методологии оценки в практической деятельности по заданию требований и оценке безопасности информационных технологий, по приведению в соответствие с международными стандартами, в частности, со стандартом ИСО/МЭК 15408–99 российской терминологии и российских стандартов в области безопасности информационных технологий, с выходом российских испытательных лабораторий (центров) и ор-

ганов по сертификации, а также российской продукции, сертифицированной в соответствии с методологией Общих критериев, на международный рынок продукции и услуг.

Для этого необходимо преодолеть ряд трудностей технического, организационного и финансового характера, связанных:

- для разработчиков ИТ–продуктов – с четким соблюдением предусмотренных процедур подготовки и представления для оценки свидетельств, сопровождением жизненного цикла изделий;
- для заказчиков и разработчиков автоматизированных систем – с разработкой или обоснованным выбором профилей защиты, заданий по безопасности и, соответственно, ИТ–продуктов, отвечающих реальным потребностям безопасности создаваемых автоматизированных систем;
- для испытательных центров и органов по сертификации – с подготовкой и приведением в соответствие международным стандартам их деятельности по оценке безопасности ИТ, а также их аккредитацией в рамках Международного соглашения.

Однако пройти этот путь необходимо. Это позволит использовать богатый опыт, накопленный до настоящего времени мировым сообществом не только в области стандартизации, но и в области развития ИТ в целом, даст возможность российским специалистам активно участвовать в создании новых и совершенствовании действующих международных стандартов, и таким образом влиять на ход развития ИТ и их безопасности.

8.5. Влияние Федерального закона «О техническом регулировании» на обеспечение безопасности информационных технологий

1 июля 2003 г. произошло еще одно событие, которое в перспективе окажет большое влияние на политику в области информационной безопасности. В этот день вступил в действие Федеральный закон «О техническом регулировании». Этот закон регулирует отношения, возникающие при: разработке, принятии, применении и исполнении обязательных требований к продукции, процессам производства, эксплуатации, хранения, перевозки, реализации и утилизации; разработке, принятии, применении и исполнении на добровольной основе требований к продукции, процессам производства, эксплуатации, хранения, перевозки, реализации и утилиза-

ции, выполнению работ или оказанию услуг. К сфере регулирования этого закона относятся и вопросы создания продукции и оказания услуг в сфере информационной безопасности [14, 15].

Новый закон призван упростить процедуры поступления товаров на рынок, создать предпосылки для гармонизации российской и международной систем стандартизации, ввести в рамки закона права контрольно–надзорных органов. Закон декларирует доступность стандартов для пользователей, возможность участия производителей и потребителей в выработке регламентов и стандартов. Закон предусматривает выработку технических регламентов, которые гарантируют безопасность товаров и услуг и будут обязательны для производителей. Стандарты же делаются необязательными к исполнению. Потребитель сам должен оценить качество продукции и отдать предпочтение более качественной, в частности сертифицированной на соответствие тем или иным стандартам.

Вместе с тем, такие глубокие изменения в сфере стандартизации создают определенные опасности. Среди них необязательность следования стандартам со стороны производителей, возможное снижение качества продукции и отсутствие ответственности за него. В день вступления в силу нового закона в Москве состоялась конференция «IT–SECURITY: новые требования к участникам рынка информационной безопасности».

Отмечая положительные стороны принятия нового закона, участники дискуссий сформулировали конкретные предложения государственным органам, направленные на исключение возможных негативных последствий законодательных реформ в сфере информационной безопасности. Перечислим основные предложения:

- сохранить на переходный период действующий в настоящее время порядок применения технических требований к средствам обеспечения информационной безопасности;
- внести в Закон изменения, направленные на разработку и ввод технических регламентов по информационной безопасности;
- назначить ответственный государственный орган за разработку технических регламентов в области информационной безопасности;
- исключить лицензирование использования любых средств защиты информации;

- совместить испытательные лаборатории и сертификационные центры различных ведомств в «одно окно»;
- определить, когда право на защиту информации гарантирует государство, а когда – заказчик и исполнитель вправе руководствоваться при определении качества услуг или продуктов любыми механизмами от корпоративных стандартов до экспертных оценок;
- принять ряд законов: «Об электронно–цифровой подписи», «О служебной тайне», «О защите информации», «О стандартах в сфере информационных технологий и средств защиты информации».

При выполнении этих рекомендаций, считают участники конференции, принятый закон послужит делу улучшения положения дел в сфере информационной безопасности. В любом случае, на протяжении переходного периода (в течение 7 лет) продолжают действовать все нормативные документы.

8.6. Вопросы надежности компьютеризированных СУиК ЯМ и резервирования информации

Вопросы надежности и отказоустойчивости информационных систем наряду с вопросами обеспечения защиты информации от несанкционированного доступа являются определяющими в деле обеспечения информационной безопасности. Российские критерии информационной безопасности, как видно из материала рассмотренного ранее, основной упор делают на противодействие субъективным угрозам безопасности. Тем не менее надежность систем играет не меньшую роль в проблемах, с которыми сталкиваются при проектировании и эксплуатации СУиК ЯМ.

Немецкая страховая компания GERLIG приводит следующие данные [16]. В 74 % случаев причиной прекращения деятельности предприятий в Германии стала именно утеря информации. Статистика показывает, что в случае остановки информационной системы существует критический срок восстановления работоспособности системы. Если в указанный срок восстановления информации не произошло, то со 100 % вероятностью организация прекратит свое существование. Для страховой компании этот срок 5,5 дней, у производственного предприятия – 5, у банка – 2, у предприятия непрерывного производственного цикла – около суток.

При оценках такого рода необходимо учитывать, что работоспособность многих критических приложений должна быть обеспечена

со стопроцентной гарантией, поскольку от их деятельности зависит инфраструктура всего современного общества (правоохранительные органы, органы государственной власти, энергогенерирующие и транспортные компании и т.п.). Предприятия, имеющие в обращении ядерные материалы, относятся к этим критическим системам. Полная потеря информации о ядерных материалах должна быть исключена со 100–процентной гарантией. Стандарт отрасли [1] устанавливает некоторые требования и нормативы, связанные с обеспечением надежности СУиК ЯМ.

Для исключения возможности полной потери информации в условиях нормальной эксплуатации и при проектных авариях необходимо предусматривать систему хранения и восстановления данных. Эта система включает в себя следующие элементы:

- дублирование сервера или использование дублирования на жестких магнитных дисках (RAID – технология);
- хранение на предприятии дистрибутивных копий как базового, так и прикладного программного обеспечения;
- хранение резервных копий баз данных. Необходимо иметь не менее двух наборов, поочередно используемых внешних носителей резервных копий, которые необходимо хранить отдельно либо в хранилище файлов, либо (и) по соответствующему соглашению в другом компьютерном центре.

Перечисленные пункты относятся к выбору стратегии резервирования функций и информации. Дадим некоторый комментарий указанным положениям. Как правило, в локальных сетях, предназначенных для обработки важной информации, необходимо предусматривать резервный сервер (резервный контроллер домена в сетях под управлением Windows NT). В процессе работы периодически осуществляется синхронизация данных главного и резервного серверов. В случае выхода из строя главного сервера обработка информации автоматически переводится на резервный. Современные решения предлагают различного рода кластерные системы с распределенной нагрузкой, когда выход из строя сервера не прекращает эксплуатации всей системы.

RAID–технология (Redundancy Array of Independent Disks) представляет собой использование вместо одного магнитного накопителя массива из многих, относительно недорогих, дисков с высокой надежностью и скоростью работы. Этот дисковый массив органи-

зуется с помощью контроллера таким образом, чтобы полученная система обладала большей надежностью, чем надежность составляющих его дисков. Используются различные режимы записи информации на диски, позволяющие зеркально дублировать информацию или восстанавливать ее после сбоев. Очень часто такие высоконадежные дисковые массивы объединяются для работы с кластерными системами. Однако следует понимать, что катастрофический отказ RAID-массивов приведет к полной остановке таких систем.

При выборе стратегии резервирования необходимо оценивать требования к системе в области поддержки ее работоспособности. Надо помнить, что резервирование функций удорожает всю систему. Стремление многократно и надежно резервировать функции системы вступает в противоречие двум важнейшим инженерным принципам: во-первых, надежность системы обратно пропорциональна количеству составляющих ее компонент, во-вторых, надежность системы не может быть выше, чем у наименее надежного компонента. Вместе с тем, надо оценить действительно ли система относится к системам класса $24 \times 7 \times 365$ – должна работать 24 часа в сутки, семь дней в неделю, 365 дней в год. В реальности СУиК ЯМ не требуют столь жестких нормативов. Отраслевой стандарт устанавливает максимальное время восстановления работоспособности СУиК ЯМ – не более 10 часов. Подчеркивается, что этот норматив устанавливается для каждой конкретной подсистемы на стадии разработки компьютеризированной СУиК ЯМ.

Для аварийного восстановления работоспособности системы в случае потери всей информации необходимо восстановить базовое и прикладное программное обеспечение и содержимое баз данных. Этим целям служат хранение дистрибутивов программного обеспечения и резервных копий баз данных. Стандарт выделяет два требования к хранению резервных копий информации: наличие более чем одной копии и хранение резервных копий отдельно от оригинала, желательно в территориально удаленном месте. В работе [17] приводятся основополагающие принципы, нацеленные на сохранение данных:

- резервные копии данных делаются не в единственном экземпляре, а в нескольких, как минимум по принципу «дед–отец–сын»;

- выбираются надежные носители информации для выполнения резервных копий;
- создаются полноценные резервные копии;
- обеспечивается надежное хранение резервных копий в отдельном помещении – территориально удаленном от первичного носителя информации;
- обеспечивается регулярный контроль качества резервных копий и пригодность к восстановлению.

Данные принципы обеспечивают восстановление данных ценой некоторых временных затрат. Однако следовать им надо неукоснительно. Так, если резервные копии хранятся в серверном помещении, то с точки зрения восстановления информации их ценность практически нулевая. В случае пожара они погибнут вместе с оригиналом.

Стандарт определяет максимальное значение среднего времени наработки на сбой в 250 часов. Определяется, что используемая вычислительная техника должна быть отнесена к пятому классу и должна соответствовать требованиям надежности по ГОСТ 27201–87. Помещения, в которых размещаются элементы СУиК ЯМ, должны соответствовать требованиям пожарной и общепромышленной безопасности по ГОСТ 12.4.009–89.

Нельзя сбрасывать со счетов и человеческий фактор. Низкий уровень подготовки персонала и безответственное отношение к своим обязанностям часто приводит к отсутствию стратегии резервирования и восстановления данных или их разработке на формальном уровне, с нарушением принципов и правил. По оценкам специалистов до 75 % всех резервных копий являются непригодными к восстановлению. Эта оценка сделана в отношении западных компаний.

Для учета человеческого фактора стандарт отрасли выделяет в отдельный параграф вопросы организационного обеспечения. Стандарт требует разработки на каждом предприятии комплекта документов, устанавливающих организационную структуру, права и обязанности персонала, эксплуатирующего СУиК ЯМ. Документы должны определять:

- функции, права и обязанности персонала по обеспечению функционирования СУиК, в том числе по профилактике;

- действия персонала при отказах и сбоях технических и программных средств;
- действия персонала в специфических случаях;
- действия персонала по восстановлению работоспособности системы;
- ответственность должностных лиц, персонала и пользователей.

Каждому предприятию предлагается разработать требования к уровню подготовки, квалификации и количеству специалистов, требующихся для обслуживания СУиК ЯМ. Требуется разработать программы обучения и переподготовки специалистов.

Список литературы

1. Стандарт отрасли. Оснащение программно–аппаратное систем учета и контроля ядерных материалов. Общие требования. ОСТ 95 10537–97.

2. Зегжда Д.П., Ивашко А.М. Основы безопасности информационных систем. – М.: Горячая линия – Телеком, 2000.

3. Пискарев А.С., Шеин А.В. О состоянии и перспективах использования Общих критериев оценки безопасности информационных технологий в России для оценки применяемых в СУиК программных средств. – Материалы 5 международного рабочего семинара «Разработка Федеральной автоматизированной информационной системы учета и контроля ядерных материалов России», г. Новоуральск, Свердловской обл., 26–30 мая 2003 г.

4. Гостехкомиссия России. Руководящий документ. Концепция защиты средств вычислительной техники от несанкционированного доступа к информации. М., 1992.

5. Гостехкомиссия России. Руководящий документ. Средства вычислительной техники. Защита от несанкционированного доступа к информации. Показатели защищенности от несанкционированного доступа к информации. М., 1992.

6. Гостехкомиссия России. Руководящий документ. Автоматизированные системы. Защита от несанкционированного доступа к информации. Классификация автоматизированных систем и требования по защите информации. М., 1992.

7. Гостехкомиссия России. Руководящий документ. Временное положение по организации разработки, изготовления и эксплуата-

ции программных и технических средств защиты информации от несанкционированного доступа в автоматизированных системах и средствах вычислительной техники. М., 1992.

8. Гостехкомиссия России. Руководящий документ. Защита от несанкционированного доступа к информации. Термины и определения. М., 1992.

9. Гостехкомиссия России. Министерство Российской Федерации по атомной энергии. Руководящий документ. Требования по защите от несанкционированного доступа к информации в автоматизированных системах учета и контроля ядерных материалов. М., 1997.

10. Международное исследование в области компьютерной безопасности (обзор) – www.crime-research.ru/news/2003/07/2403.html

11. Государственный стандарт Российской Федерации. ГОСТ Р ИСО/МЭК 15408–1–2001. Информационная технология. Методы и средства обеспечения безопасности критерии оценки безопасности информационных технологий. Часть 1. Введение и общая модель.

12. Государственный стандарт Российской Федерации. ГОСТ Р ИСО/МЭК 15408–2–2001. Информационная технология. Часть 2.

13. Государственный стандарт Российской Федерации. ГОСТ Р ИСО/МЭК 15408–2–2001. Информационная технология. Часть 3.

14. Федеральный Закон РФ от 27.12.2002 № 184–ФЗ «О техническом регулировании».

15. Вихорев С. ГОСТ на европейский лад, или Меняем не глядя? // Сети. 2003. №2. – <http://www.osp.ru/nets/2003/02/032.htm>

16. Короткин Д. Обеспечение физической безопасности устранил 39 % угроз. Аналитическое приложение. – www.cnews.ru/newcom/index.html?2003/10/15/150071

17. Воинов Ю. Новоиндийская защита или катастрофоустойчивые решения по защите данных. – www.softdeco.com/index.php

ГЛАВА 9

АВТОМАТИЗАЦИЯ УЧЕТА ЯМ

Автоматизация процессов идентификации и измерений ЯМ, автоматизация процессов обработки информации в компьютеризированных СУиК ЯМ (отчуждение и обобществление информации о наличных количествах и перемещениях ядерных материалов от материально ответственного лица в виде централизованной базы данных, получения баланса и другое) являются составляющими автоматизации учета ЯМ. Они служат достижению определенного уровня непрерывности и достоверности знаний о ядерных материалах.

До недавнего времени большинство систем автоматизации, которые применялись в области обращения с ядерными материалами, представляли собой технологические системы на заводах–изготовителях. Причем на тех заводах, где в основном работа шла с материалами в балк–форме. Это – заводы по переделу ядерных материалов из одной формы в другую, заводы по обогащению и заводы по производству тепловыделяющих сборок для ядерных реакторов. И с определенной вероятностью деятельность автоматизированных систем этих предприятий может быть приспособлена для целей учета и контроля ЯМ.

Однако на сегодняшний день стало понятно, что большое количество материалов находится вне сферы деятельности этих технологических систем. Сбор и обработка информации по учету и контролю материалов вне заводов–изготовителей оказались на поверку достаточно сложными и трудоемкими процессами. И они, поэтому, требуют применения автоматизации.

В Соединенных Штатах автоматизация учета и контроля ядерных материалов в той или иной степени существует практически на всех объектах, где находятся, хранятся или обращаются ядерные материалы. У нас – ситуация другая. Мало организаций, где действительно применялись бы в рутинной практике автоматизированные системы учета и контроля ядерных материалов. То, что применяется на сегодняшний день – это движение от уровня макетов, прототипов к уровню промышленных систем, которые могут поддерживать рутинные операции учета и контроля.

9.1. Использование баркодной технологии для идентификации ЯМ

Если информацию о ЯМ перевести в символы, воспринимаемые компьютером, то эта информация будет восприниматься быстро, точно и, в конечном итоге, дешево. Этому, например, служит стандартный американский код для обмена информацией (ASCII). Одной из форм двоичного представления данных для их дальнейшей автоматизированной обработки и передачи является штриховое кодирование. Баркод (barcode: bar – штрих, полоса; code – код, шифр) – читаемый машиной символ, состоящий из комбинации полос и пробелов между ними.

Принципиальная особенность новой системы учета и контроля – использование баркодной технологии для идентификации учетных единиц, контейнеров, печатей, местоположений, транспортных средств и т.д. [12]. В основе баркодной технологии лежит оптическое различие толщины линий и расстояния между линиями. Эти два параметра используются для того, чтобы кодировать информацию. Баркодная технология позволяет экономить время и силы на проведение операций, связанных, прежде всего, с физическими инвентаризациями и выборочным контролем ЯМ (т.е. там, где многократно повторяется операция сличения меток). Количество ошибок при вводе данных в форме баркодов на порядки ниже, чем при ручном вводе с клавиатуры. Статистика показывает, что вероятность ошибки при использовании баркодной технологии составляет не более $10^{-7} \div 10^{-6}$. Надежность работы с баркодами обеспечивается за счет исключения человеческого фактора, неизменности символики, алгоритмов кодирования, наличия проверочных знаков в символе.

Характеристика баркодной символики

Баркод содержит зашифрованное по определенным правилам смысловое сообщение. Сообщение состоит из слов, являющихся комбинацией знаков. Знаки могут быть непрерывного и дискретного типов. Дискретный знак начинается и кончается полосой и между знаками имеется пробел. Непрерывный тип характеризуется тем, что он начинается полосой и кончается пробелом, а пробела между знаками нет.

Каждая баркодная символика характеризуется своим набором знаков. В том числе:

- используются только цифры (0–9);
- буквы и цифры (A–Я, A–Z, 0–9);
- полный набор ASCII-кодов.

Ширина полос и пробелов кратны кванту ширины X , называемому «mil», который равен 0,001 дюйма = 0,025 мм. В символиках могут использоваться:

- две ширины элементов: узкие (X) и широкие (кратные X , часто $2X$);
- несколько ширин – X , $2X$, $3X$, $4X$ и т.д.

Длина сообщения может быть фиксированной и переменной. Один и тот же набор знаков, выраженный в разных символиках, имеет разную длину. Длина сообщения, выражаемая в знаках на дюйм (CPI), зависит от плотности печати. Слово начинается со знака начала и заканчивается знаком конца. Перед началом слова и после окончания слова размещаются зоны покоя. Размеры этих зон в $5\div 10$ раз больше, чем ширина самого широкого элемента. В результате, баркоды удобны для чтения, так как читаются независимо от направления сканирования.

Все баркоды имеют встроенную функцию самопроверки. Проверка кода происходит на уровне знаков, слов и сообщений (последний уровень не обязательно). Конкретные особенности проверки баркодов на уровнях знаков и слов зависят от типа символика. В целом, самопроверка на уровне знаков включает контроль:

- общего числа полос и пробелов в знаке;
- числа полос в знаке;
- числа пробелов в знаке;
- общего числа широких полос и пробелов в знаке;
- числа широких полос;
- числа широких пробелов;
- кратности ширин широких элементов ширине самого узкого элемента.

Самопроверка на уровне слов включает:

- наличие зон покоя;
- наличие знаков начала и конца слова;
- наличие и значения проверочных знаков.

Проверочный знак вычисляется в зависимости от данных в символе и кодируется во время печати слова. Алгоритм получения проверочных знаков зависит от символики. Рассмотрим простейший пример: имеется сообщение, представленное словом – 73594. Сумма цифр в этом слове равна 28. В качестве контрольного символа оставляем остаток деления этого числа на 10. Тогда сообщение с контрольным символом будет – 735948. При считывании проверочный знак декодируется и сопоставляется со значением, вычисленным по прочитанным знакам слова. В случае несовпадения сообщение не выдается. Таким образом, баркоды представляют собой надежное средство автоматизированного сбора данных.

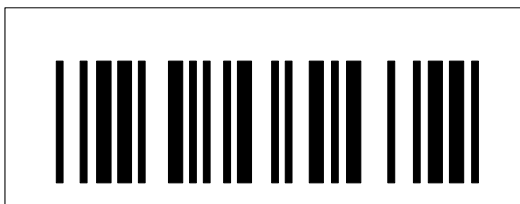
Некоторые типичные баркодные символики

На сегодняшний день известно более сотни баркодных символик. Некоторые из них широко распространены в силу своих положительных качеств.

Символика кода 39 (современная версия – Mod.43) имеет 43 знака (первоначально было 39 знаков) и является одной из простейших. Этот баркодный стандарт довольно широко используется у нас в промышленности, вооруженных силах, здравоохранении. Код 39 является алфавитно-цифровым, дискретным, со знаками начала и конца слов. Версия Mod.43 предусматривает возможность добавления проверочного знака в словах. На рис. 9.1 и 9.2 приведен пример баркодной метки 39-го стандарта и схема кодирования символов. Видно, что для кодирования букв, цифр и других символов используется всего 9 элементов: 5 полос и 4 пробела, каждый из которых может быть широким и узким. Знаком начала и конца слова является звездочка.

Простота в кодировании обеспечивает высокую вероятность разрешения меток при усложненных обстоятельствах (нечеткое изображение меток). При использовании этой символики в среднем наблюдается менее одной ошибки на 3 миллиона считываний даже без проверочного знака. Версия Mod.43 имеет повышенную надежность символики за счет добавления проверочного знака в словах.

Код 39



Код 39

- Знак кода 39 содержит в общей сложности 9 элементов, в том числе 5 полос и 4 пробела;
- 3 элемента из 9 - широкие, в том числе 2 широкие полосы и 1 широкий пробел.



Рис. 9.1. Пример кода 39 стандарта

СИМВОЛ	Последовательность полос и пробелов	Двоичная последовательность	СИМВОЛ	Последовательность полос и пробелов	Двоичная последовательность
1		1001000001	M		101000010
2		0011000001	N		000010011
3		1011000000	O		100010010
4		000110001	P		001010010
5		100110101	Q		000000111
6		001110000	R		100000110
7		000100101	S		001000110
8		100100100	T		000010110
9		001100100	U		110000001
0		000110100	V		011000001
A		100001001	W		111000000
B		001001001	X		010010001
C		101001000	Y		110010000
D		000011001	Z		011010000
E		100011000	дефис		010000101
F		001011000	точка		110000100
G		000001101	пробел		011000100
H		100001100	звездочка		010010100
I		001001100	знак доллара		010101000
J		000011100	слэш		010100010
K		100000011	плюс		010001010
L		001000011	знак процента		000101010

Рис. 9.2. Символика кода 39

Код UPC/EAN (UPC – Uniform Product Code, EAN – European Article Code). Очень широко применяется во всех видах розничной торговли, а также международной торговли. Имеется несколько версий этого кода. В основных версиях это цифровой, непрерывный код с фиксированным числом знаков (в основной версии 12, включая проверочный знак). Максимальная плотность записи – 5,5 знака на сантиметр.

Символ кода состоит из двух половин. Левая половина содержит номер производителя, который определяется Единым торгово-коммерческим производителем (UCC), а правая – номер товара, присваиваемый производителем. Код включает самопроверку по проверочному знаку и по четности. Левая половина символа проверяется на нечетность, а правая – на четность. На рис. 9.3 показана структура правых знаков кода UPC–A. В правой половине символа знаки начинаются с полосы и заканчиваются пробелом и, наоборот, в левой половине символа каждый знак начинается с пробела и кончается полосой.

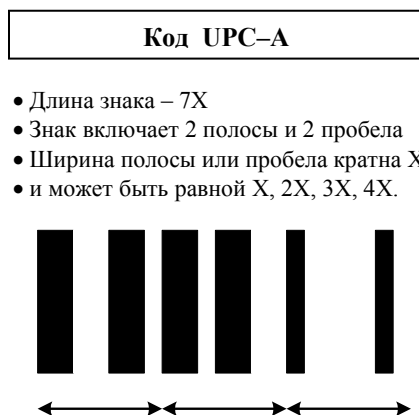


Рис. 9.3. Структура правых знаков кода UPC–A

Код PDF417 – штриховой код с высокой плотностью информации, превышающей примерно в 100 обычную. Код PDF417 является общедоступным стандартным баркодом, который дает возможность записи сравнительно большого объема данных. Включает полный набор ASCII-кодов. Используется как компактный файл

данных, с товарной документацией, медицинскими данными и пр. Символы размещаются на ярлыках и этикетках. Максимальная плотность записи – 360 знаков на сантиметр. Сообщение может содержать до 1850 знаков.

Печать и чтение баркодных символов

Баркодные символы можно наносить на самые разные материалы: бумагу, пластик, металл, стекло, дерево и пр. Для нанесения символов требуются печатающие устройства с соответствующим программным обеспечением. Символы могут наноситься как на предметы, так и на специальные этикетки и ярлыки, которые прикрепляются к предметам. Например, на рис. 9.4 показана конструкция стандартной этикетки, которая наклеивается на предметы. Она представляет собой многослойный бутерброд, состоящий, по крайней мере, из 3 слоев.

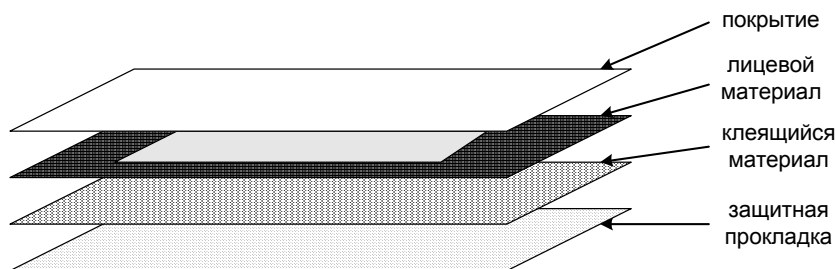


Рис. 9.4. Составные слои стандартной баркодной этикетки

Для печати баркодных символов используют различные технологии: обычная печать (офсетная литография), матричная, термическая и др. Технология офсетной литографии наиболее подходит для изготовления больших количеств одного символа, так как требуется изготовить печатающую матрицу, а потом перенести изображение с этой матрицы на барабан. Все этикетки получаются одинаковыми, но их стоимость невысокая.

При термическом способе печати используют матрицу из нагреваемых элементов. Эти элементы выборочно включаются и выключаются для создания изображения. Термопринтер Zebra S-500

(Zebra Technologies Corporation) удобен при изготовлении самоклеющихся этикеток с высоким качеством печати. Обеспечивает печать баркодов 15 символов, в том числе PDF-417. Скорость печати 5÷15 см в секунду с разрешением ~ 8 точек/мм. Относительно низкая стоимость этикеток при небольшом их количестве в партии. Однако требует специального основания для печати.

Баркодные символы, наносимые непосредственно на предметы – более долговечные, и их труднее подделать по сравнению с этикетками и ярлыками. Однако при таком способе нанесения меток возможны технологические сложности. При выборе технологии нанесения баркодов на предметы учитываются условия их дальнейшей эксплуатации. В том числе, возможности повреждений и износа оболочки, на которую наносится баркод, необходимость деактивации, ограничения по внесению дополнительных веществ с вредным влиянием и пр. Например, в практике нанесения баркодов на предварительно подготовленные металлические поверхности используется:

- обработка поверхности лазерным лучом;
- струйный принтер;
- выдавливание;
- травление и пр.

Струйная технология, являясь бесконтактной, может использоваться для нанесения меток на разные поверхности включая абразивные, хрупкие и неровные. Например, каплеструйный принтер Willet 3940 наносит изображение посредством электронно-управляемой струи чернил, направляемой на поверхность. Сложность системы управления струей ограничивает применение Willet 3040 случаями не доступными для других принтеров.

Таким образом, существует ряд технологий и соответствующих устройств для нанесения баркодных символов на объекты. Требования по качеству, условия дальнейшей эксплуатации объектов во многом определяют выбор способа нанесения символа на объект. Развитое программное сопровождение устройств печати обеспечивает автоматизацию этого процесса.

Чтение баркодов производится с помощью считывателей и передается в компьютер посредством интерфейса. Считыватели – приборы, получающие стандартный электрический сигнал, соответствующий во времени пространственному образу символа и

преобразующие этот сигнал в слова ASCII-кодов. Считыватели состоят из двух устройств:

- сканер – устройство, испускающее управляемый световой поток, принимающее и измеряющее отраженный свет и выдающее электрический сигнал;
- декодер – устройство, анализирующее электрический сигнал сканера и преобразующее сигнал в форму ASCII-кодов.

К настоящему времени разработано множество устройств считывания баркодов: от простейших сканеров до многоканальных, высокоскоростных терминалов сбора и обработки данных.

Сканеры различаются по источнику света (светодиодные, лазерные), по перемещению луча (сканирующие и с неподвижным лучом), по контакту с баркодным символом (контактные, бесконтактные), по типу установки (ручные, стационарные).

Декодер выполняет следующие функции:

- определяет, является ли сканируемый объект баркодом;
- определяет отношения ширины широких полос к узким;
- контролирует наличие зон покоя с обеих сторон баркодного символа;
- определяет тип символа, анализируя несколько первых и последних полос;
- сравнивает сигнал с образцами в памяти и преобразует его в коды ASCII;
- производит проверочные вычисления;
- выдает данные в компьютер.

Обмен данными между считывателем (либо терминалом сбора данных) и персональным компьютером производится посредством интерфейса – устройства, обеспечивающего электрическое и логическое сопряжение считывателя с компьютером.

Обмен данными между баркодным оборудованием и PC осуществляется через:

- COM порт (RS 232C);
- LPT порт (Centronics);
- Net порт (Ethernet).

RS 232C (RS 422/485) – рекомендованный стандарт последовательной передачи данных и устройств связи. Он является наиболее популярным, относительно простым, независим от систем и поддерживается всеми поставщиками оборудования. Однако RS 232C

имеет низкую помехозащищенность, а при связи на дальние расстояния требует дополнительное оборудование (модемы).

Centronics Parallel – стандарт параллельной передачи данных. Данные передаются побайтно.

Ethernet – является стандартом передачи данных в сетях.

Рассмотрим характеристики некоторых считывателей баркодной символики.

Trakker Reader 9445 (фирма INTERMEC) – портативное автономное программируемое устройство для считывания баркодов, предварительной обработки и временного хранения информации. Прибор снабжен светодиодным излучателем, жидкокристаллическим дисплеем, стандартным интерфейсом RS 232 и имеет память для программ и данных – 64 Kb.

Trakker ANTARES 2420 (фирма INTERMEC) – автономный переносный считыватель баркодов. Прибор снабжен лазерным сканером, жидкокристаллическим дисплеем, стандартным интерфейсом RS 232 и имеет память для программ и данных – 2 Mb.

JANUS J2020 (фирма INTERMEC) – портативный автономный считыватель баркодов. Имеет в своем составе миниатюрный DOS компьютер на 386 процессоре. Память размещена на нескольких дисках, один из которых (1 Mb) выделен для приложений и данных. Прибор снабжен лазерным сканером, жидкокристаллическим и виртуальным дисплеями и имеет стандартный интерфейс RS 232.

Среди средств программирования считывателей баркодов отметим три.

PictoRL (Pictorial Reader Language) – является генератором прикладных программ для чтения баркодов. Для этого в составе пакета программ PictoRL имеется рисуночный язык для считывателей. Программный пакет PictoRL позволяет составлять прикладные программы пользователям баркодного оборудования без специального обучения. Пакет PictoRL включает приложение ICW, которое обеспечивает обмен данными между считывателем и компьютером. Программный пакет PictoRL ориентирован на считыватели фирмы Intermec, в том числе, Trakker Reader 9445, Trakker ANTARES 2420 и JANUS J2020.

EZBuilder – представляет простой и наглядный инструмент создания прикладных программ для считывателей фирмы Intermec. Ориентирован на определенные типы считывателей: Trakker

ANTARES, JANUS. Его можно использовать для создания меню, экранов, полей данных, этикеток и др. Имеет встроенные средства обмена данными между PC и считывателем. Не требует умения программировать на СИ. Имеется мощный HELP–файл для быстрого самостоятельного обучения пользователя. Пользователь просто должен выбрать некоторые опции, задать систему параметров, и EZBuilder сам создаст программу–приложение для считывателей отмеченных выше типов. При этом встроенный симулятор позволяет проверить работу приложения без загрузки в считыватель.

LabelView – пакет прикладных программ, позволяющий пользователям конструировать этикетки и ярлыки различных видов. Сконструированные с помощью LabelView этикетки могут включать текст, баркодные символы, графические изображения, поля и др.

Эффективность использования баркодной технологии при физических инвентаризациях ЯМ

Баркодная технология позволяет автоматизировать процесс сличения меток и, тем самым, радикальным образом снизить затраты труда при проведении периодических инвентаризаций и контроле ядерных материалов.

В РНЦ «Курчатовский институт» были проведены эксперименты, целью которых было идентифицировать разные ядерные материалы, находящиеся в контейнерах или в тепловыделяющих сборках, в виде отдельных образцов и отдельных твэлов. Идентифицировать, сравнив их наименования с тем, что написано в паспортных данных. Это стандартная процедура проверки во время физической инвентаризации.

Оказалось, что визуальные сравнения сопровождаются следующей статистикой ошибок персонала: на тысячу операций сравнения меток обученный, квалифицированный, грамотный, мотивированный персонал делает в среднем одну ошибку. При этом, конечно, диапазон неопределенности весьма большой – 10 раз в меньшую и большую стороны. То есть кто–то делает одну ошибку на 100 регламентированных действий, кто–то делает на 10000 действий. Но в среднем одна ошибка на тысячу контролируемых изделий. То есть, если конкретному человеку дается задача сличить тысячу меток, то, по крайней мере, в одном случае, когда он утверждает – да, метки

идентичны, они, на самом деле, различны. Тысяча меток проходит и в одном случае (в среднем) метки различны, а он утверждает, что они совершенно идентичные.

Теперь, надо иметь в виду, что если объектами инвентаризации являются тысячи поименованных изделий и их надо сличать визуально (при проведении физической инвентаризации сверяют конкретные изделия с паспортными данными), то можно себе представить, сколько ошибок будет при этом сделано.

Эффект от применения баркодов. Надо отметить, что сличение относительно длительная процедура. На сличение меток, имеющих десять символов (паспортные данные и изделие), требуется примерно 30 секунд. Это связано с подготовкой изделия, развертыванием его в определенном положении, чтобы можно было метку считать и двух- или трехкратным считыванием, поскольку метки длинные и они человеком сразу не запоминаются. То есть он должен их сравнивать посимвольно.

В результате оказалось, что при использовании баркодных меток с соответствующей компьютерной поддержкой вероятность неправильного считывания метки оценивается по экспериментам, проведенным в РНЦ КИ, примерно на уровне 10^{-6} . Ориентировочно, на миллион меток может быть одна такого рода ошибка. Но самое главное, что вместо 30 с, требуемых человеку (да еще с определенной вероятностью ошибки), здесь сравнение осуществляется в пределах 1,5 – 2 с.

Вывод. Баркодные технологии позволяют радикально решить проблему сличения конкретных изделий с документальными данными при проведении физических инвентаризаций.

9.2. Автоматизация процессов измерения ЯМ

Одна из важных проблем, связанная с автоматизацией учета ЯМ, – это автоматизация измерений ядерных материалов. Здесь надо отметить один отрадный факт: на сегодняшний день львиная доля (если не все) оборудования, применяемого для измерения и контроля ядерных материалов – это оборудование, которое компьютеризировано, либо предусматривает выход на компьютерные системы обработки информации.

Примеры НРА оборудования

До недавнего времени, до момента вступления в ядерную индустрию электронных весов, измерения ядерных материалов велись на аналитических лабораторных весах. Это исключительно точные весы рычажного типа, которые в состоянии взвешивать ядерный материал до 5 кг с погрешностью 0,001 г. Как правило, они стоят на сейсмозащищенной платформе. Можно себе представить продолжительность сеанса взвешивания на этих весах. Это – долго, иногда – часы. Потому что требуются многократные измерения. А электронные весы позволяют взвешивать с погрешностью ~ 0,1 г буквально в считанные секунды. При этом электронные весы снабжаются интерфейсом типа РС–232, используемым для подключения к персональному компьютеру.

Гамма–спектрометрическая аппаратура – это не только детекторы и аналого–цифровые преобразователи, но и компьютер, встроенный в систему для ведения обработки экспериментальной информации. В результате, набор статистики – 5–10 мин, компьютерная обработка – 1,5–2 мин. Таким образом, сеанс измерений в зависимости от предъявляемых требований по точности и использования образцов ядерных материалов занимает от нескольких минут до часу (нескольких часов). Близкая ситуация наблюдается и в отношении нейтронных измерений с помощью, например, нейтронных колодцев. Переход на приборы с внутренней статистической обработкой данных измерений позволил резко снизить затраты труда на обработку данных измерений и сократить время на получение окончательного ответа.

Короче, в настоящее время измерительных систем, применяемых для измерения ядерных материалов, не компьютеризованных, либо не оснащенных выходами на компьютерную систему обработки информации промышленностью (нашей, в первую очередь, потому что американская промышленность давно не производит оборудование для ручного считывания) не производится.

Таким образом, на повестке дня оказалась проблема стыковки систем учета и контроля с измерительным оборудованием, которое выдает статистически обработанные результаты, готовые для ввода в компьютеризированные СУиК ЯМ.

В РНЦ «Курчатовский институт» разработаны и применяются программные интерфейсы (аппаратно обеспеченные) для изме-

ний в рамках системы КИ–МАКС. Подобные задачи были решены также в ГНЦ ФЭИ (Обнинск) и во ВНИИЭФ (Саров) и других организациях. Эти программные интерфейсы позволили автоматизировать процесс передачи данных в СУиК ЯМ и снизить (ориентировочно, на три порядка) вероятность ошибочных считываний показаний измерительных приборов. Это означает, что на сегодняшний день система автоматизации измерений, встроенная в систему учета и контроля, позволяет человеку, производящему измерения, принимать решения грамотно и статистически обоснованно и не заниматься переписыванием показаний приборов (заниматься оценкой, насколько выполненные измерения подходят или не подходят).

9.3. Системный подход к построению СУиК ЯМ на предприятии

Учет и контроль ядерных материалов является сложной человеко–машинной системой, в которой машинам (оборудование, приборы, эталоны, компьютерные сети) предоставляются функции индикации вмешательства, идентификации, измерения, ввода и обработки информации и т.д., а человеку – функции анализа, принятия и исполнения решений. Как правило, такие системы включают множество мероприятий и средств технической поддержки. В настоящее время учет и контроль ЯМ переживает техническое перевооружение, связанное, в первую очередь, с компьютеризацией учета и автоматизацией идентификации, контроля и измерений ЯМ. Поэтому, главная задача, которая встает при разработке УиК ЯМ, заключается в рациональном их сочетании в рамках связанной системы мер и средств. Для решения этой задачи используется системный подход к построению модели СУиК ЯМ (рис. 9.5).

Системный подход включает, во–первых, определение задач, решаемых системой. Для УиК ЯМ – это определение наличного количества и потоков ЯМ, а также своевременного установления несанкционированных действий с ЯМ, либо потенциальных ошибок при их идентификации и измерении. В связи с последним, важным аспектом при определении задач системы является список аномалий с ЯМ, возникновение которых возможно в процессе обращения либо хранения ЯМ на объекте.



Рис. 9.5. Процесс построения и оценки модели системы учета и контроля ядерных материалов

Далее выполняется стадия построения модели системы. На этой стадии работ развивается вариант модели системы. Построение модели СУиК ЯМ включает структуризацию объекта в соответствии с размещением и потоками ЯМ, размещение в рамках этой структуры технических средств, определение последовательности основных учетных и контрольных процедур, организационные мероприятия по поддержанию и контролю функционирования системы и др. Указанные компоненты СУиК ЯМ должны присутствовать в модели в той мере, чтобы система в максимальной степени отвечала поставленным задачам.

Несколько развитый вариант СУиК ЯМ отвечает поставленным перед ней задачам, решают на завершающей стадии работ. Эта стадия построения СУиК ЯМ посвящена оценке эффективности функционирования системы в соответствии с выбранным критерием.

Как известно, эффективность – это то свойство системы, которое отражает ее приспособленность для выполнения поставленных перед нею задач. В настоящее время рассматриваются различные подходы для характеристики эффективности СУиК ЯМ. Как правило, такие оценки получают на основе компьютерных моделей функционирования системы в условиях поставленной задачи. Применительно к СУиК ЯМ используются компьютерные модели оценки допустимых пределов статистического разброса инвентаризационной разницы в ЗБМ. В качестве другого примера показателя эффективности функционирования СУиК ЯМ может рассматриваться требование по ведению компьютерных баз данных по ЯМ. А именно, достоверность представления в системе учета и контроля ЯМ в ЗБМ данных об идентификаторах учетных единиц, идентификаторах УИВ и местоположении учетных единиц должна превышать 99 %.

Если оценка модели системы не удовлетворяет выбранному критерию, он направляется на внесение изменений. Таким образом, процесс построения модели СУиК ЯМ носит итерационный характер. Число итераций зависит от жесткости принятого критерия.

ГЛАВА 10

КОНТРОЛЬ ЯДЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Контроль ядерных материалов включает контроль за наличием и перемещением ЯМ; контроль доступа к ЯМ, оборудованию и информации; наблюдение за ЯМ, проверку санкционированного размещения и перемещения ЯМ. Цель этой деятельности – обеспечение сохранности и требуемого порядка в обращении с ЯМ, достоверности знаний о ЯМ [1]. Существуют различные формы контроля ЯМ.

10.1. Средства и меры контроля ЯМ на предприятиях

Локализация ядерных материалов

Локализация – это обеспечение контроля ЯМ за счет создания барьеров на пути к ним. Обычно локализация ЯМ заключается в помещении их внутри специальных зон. Инженерно–технические средства в этих зонах позволяют контролировать доступ к ЯМ. Среди таких специальных зон можно выделить два вида: охраняемые зоны и зоны доступа к материалу (ЗДМ).

Охраняемые зоны. Как известно, охраняемой зоной может быть: защищенная, внутренняя и особо важная зоны. Охраняемые зоны имеют барьеры для задержки проникновения на территорию зоны (защищенный периметр). В качестве барьеров могут рассматриваться ограждения, строительные конструкции и др. Каждая охраняемая зона имеет контрольно–пропускной пункт и оборудуется средствами контроля доступа на ее территорию.

Согласно правилам физической защиты ЯМ и ядерных установок:

- ЯМ 1 и 2 категорий должны использоваться и храниться во внутренней или особо важной зонах;
- ядерные установки должны размещаться во внутренней или особо важной зонах;
- ЯМ третьей категории – в любой охраняемой зоне.

На рис. 10.1 приведен пример размещения зон локализации ЯМ различной категории.

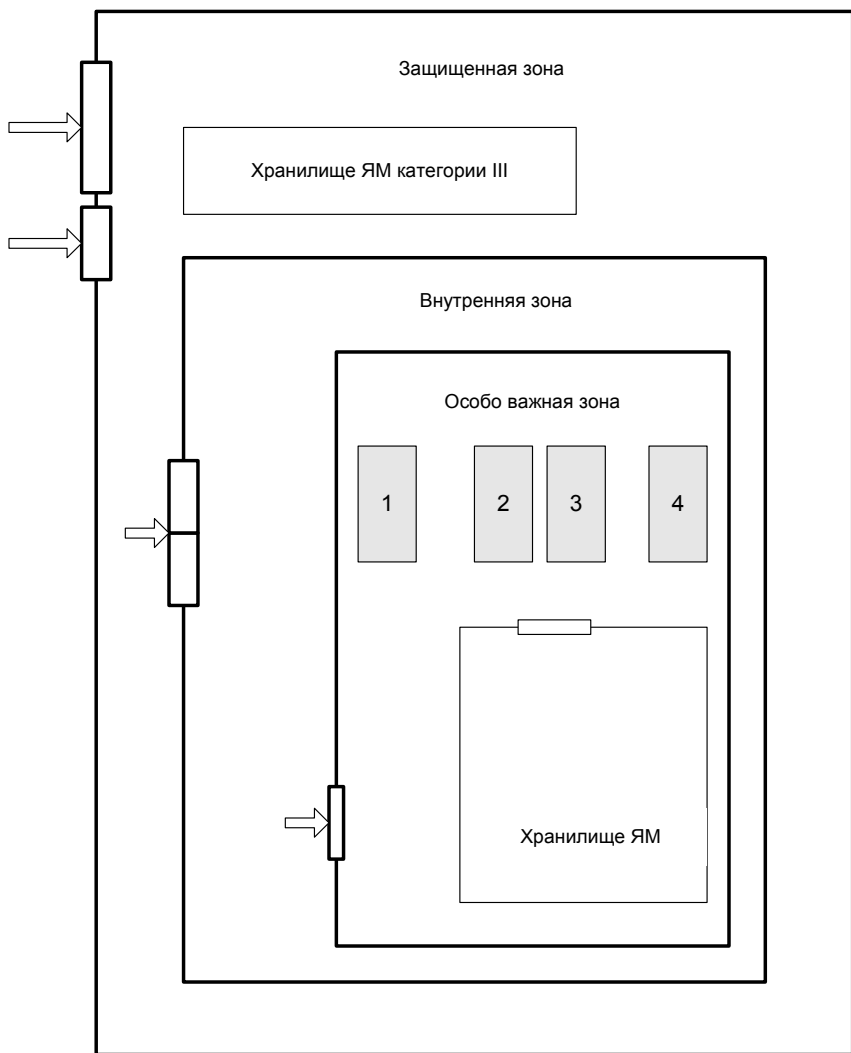


Рис. 10.1. Зоны локализации ядерных материалов:
1, 2, 3, 4 – технологические участки

Зоны доступа к материалу. К зонам доступа к материалу относятся технологические участки и зоны хранения ЯМ.

Технологический участок – область, где ядерные материалы подвергаются физическим и химическим изменениям. На технологических участках происходит большинство количественных изменений ЯМ. В связи с непосредственным доступом к ядерным материалам на технологических участках вводятся специальные меры безопасности. В том числе, нахождение на технологическом участке разрешается только персоналу, участвующему в проведении процесса. Количество материала на участке ограничивается, как правило, величиной, необходимой для нормальной работы в течение одного дня. На технологическом участке ведутся журналы доступа с регистрацией всех, кто имел доступ на участок. Это дает отправную точку для расследования аномалий. Во время отсутствия персонала действует система обнаружения вторжения на участок.

Помимо мер безопасности важно также, чтобы на технологических участках существовала возможность надежного контроля ЯМ, в том числе, за счет локализации материалов.

Локализация ЯМ на технологических участках заключается в нахождении ЯМ в оборудовании, трубопроводах, перчаточных боксах, сейфах, контейнерах. Таким образом, во время технологического процесса материал находится в этих элементах установок, что препятствует легкому его изъятию несанкционированным образом. На рис. 2.1 (часть II глава 2) показаны технологические участки предприятия по производству низкообогащенного топлива. На каждом из участков ядерный материал локализован в оборудовании, сейфах, контейнерах. Контейнеры для хранения ЯМ широко используются и обеспечивают эффективную локализацию материалов в балк-форме (рис.10.2). На практике используют контейнеры различных типов: цилиндрические металлические бочки; банки; сборки, упаковки; баки; емкости и пр.

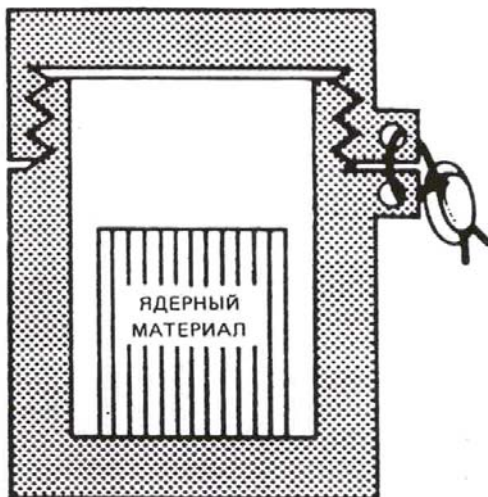


Рис. 10.2. Локализация ЯМ в контейнере

Сейфы, хранилища и контейнеры держатся закрытыми на замок, если не находятся под прямым наблюдением уполномоченного лица. Минимальное число сотрудников имеют доступ к материалам, содержащимся в них. Коды замков меняются при изменении ситуации с ЯМ на участке. Например, при первоначальном получении контейнера, при переходе на другую работу или увольнении кого-либо из сотрудников, знающих код.

Важно также отметить, что меры ядерной безопасности, являющиеся первоочередными на любом технологическом участке с ЯМ, направлены одновременно на локализацию ядерных материалов и, тем самым, способствуют улучшению условий контроля ЯМ.

Локализация в зонах хранения. Ядерные материалы могут храниться в зонах хранения на установке или в пунктах хранения ЯМ вне установки. Пункт хранения ЯМ является отдельным стационарным объектом. На рис. 10.3 показан пример локализации ЯМ в хранилище.

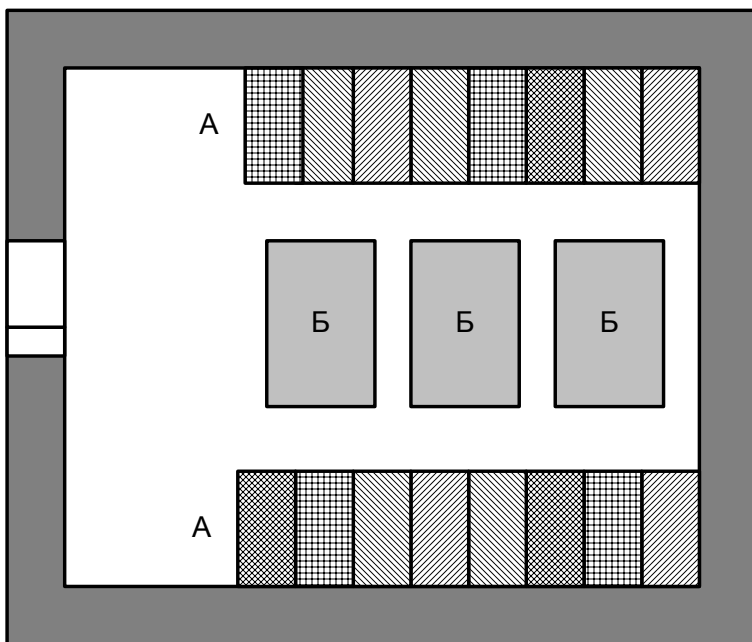


Рис. 10.3. Пример хранилища ЯМ: А – стеллажи для контейнеров;
Б – сейфы для ЯМ

Нахождение материалов в хранилищах – это оптимальный метод контроля ЯМ. Основные структурные элементы хранилища (пол, стены, крыша и двери) отвечают повышенным критериям для локализации материалов. В том числе пол, потолок, крыша и стены выполняются из железобетона, а их толщина составляет не менее 20 см. Любые отверстия в хранилищах, допускающие несанкционированное проникновение, оснащаются барьерами. В помещениях хранилищ запрещается переработка материалов и проведение работ, не связанных с хранением ЯМ (например, экспериментов с ЯМ). Запрещается также прокладывать пути к другим эксплуатационным зонам через хранилища.

Средства контроля доступа к ядерным материалам

Принципиальная особенность современных систем учета и контроля – максимальное использование средств контроля доступа. В основе систем учета и контроля ядерных материалов во всех развитых странах, в том числе и у нас, лежит принцип измеряемого материального баланса. И при этом порядок измерения наличных ядерных материалов – это, по сути, серьезный физический эксперимент. Однако этого мало. Сами измерения ядерных материалов – процедура относительно длительная и небезопасная (особенно, если речь идет о плутонии). Поэтому, все усилия предпринимаются к тому, чтобы свести измерения ядерных материалов к необходимому минимуму. А непрерывность знаний относительно состояния ядерных материалов обеспечивается за счет применения средств контроля доступа (СКД) к ЯМ.

СКД включают два класса мер: по наблюдению и по сохранению.

Наблюдение. Самое простое и часто применяемое – визуальное наблюдение. Это непрерывное присутствие определенного количества лиц. При работе с ядерными материалами используется правило двух лиц. Наиболее важные операции с ядерными материалами производятся не менее чем двумя людьми. При работе с оружейными материалами может применяться правило трех человек.

Электронно–оптическое наблюдение в виде телевизионного мониторинга нашло широкое применение во многих странах для контроля ЯМ. На рис. 10.4 приведен вариант размещения камер оптического наблюдения за отработавшим топливом, находящимся в бассейне выдержки.

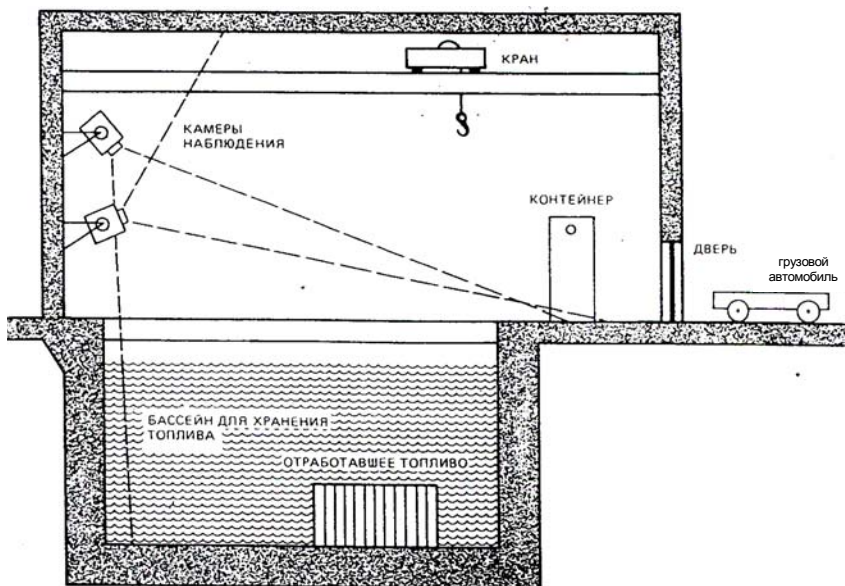


Рис. 10.4. Вариант размещения камер телевизионного наблюдения за отработавшим топливом, находящимся в бассейне выдержки

Оптическое наблюдение за ЯМ многие годы успешно используется в международных гарантиях. МАГАТЭ применяет оптический мониторинг для контроля перемещений ЯМ, наблюдения за облученным топливом в хранилищах и других случаях. До 1988 г. в Международном агентстве использовалось фотонаблюдение (система MINOLTA). С 1988 г. произведена замена фотосистем на значительно более эффективные видеосистемы. В табл. 3.2 (часть I глава 3) приведены некоторые примеры видеосистем, используемых МАГАТЭ в настоящее время. Эти примеры демонстрируют все возрастающие возможности этой формы контроля ядерных материалов.

Меры сохранения. Меры сохранения обеспечивают непрерывность знания о ЯМ, находящихся в покое. Сохранение – это, прежде всего, использование разного рода датчиков, регистрирующих несанкционированный доступ (УИВ), или реагирующих на изменение состояния и положения ядерных материалов (гибридные мето-

ды сохранения ЯМ). Например, при сдвиге контейнера соответствующий сенсор дает сообщение, что контейнер сдвинут.

УИВ – это пломбы и печати различного типа.

Роль пломб и печатей заключается в обнаружении несанкционированного доступа к ЯМ (пломбируются контейнеры, упаковки изделий, двери и т.д.).

Эффективность действия пломб и печатей характеризуется тремя следующими свойствами:

- **слабостью**, т.е. пломбы легко могут быть разрушены, тем самым, являясь средствами упреждения несанкционированных действий с ЯМ;

- **указателем вмешательства**, т.е. при разрушении пломбы ее трудно восстановить, не оставляя следов вмешательства;

- **уникальностью**, т.е. пломбы (так же, как и печати) должны обладать неповторяющимися идентификационными признаками (желательно скрытыми).

На рис. 10.5 – 10.9 приведены примеры пломб различного типа, используемых в практике обращения с ЯМ: Е-сир, петлевая пломба модели PS360, Multi-lock, Cobra, Vacoss.

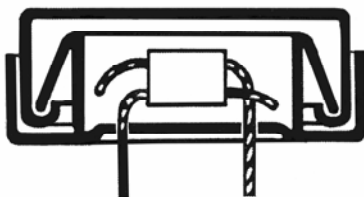


Рис. 10.5. Конструкция пломбы типа чашка–Е



Рис. 10.6. Общий вид пластмассовой петлевой пломбы (модель PS360)

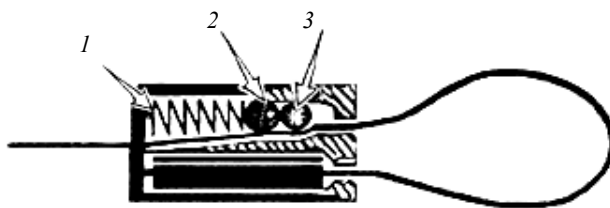


Рис. 10.7. Конструкция пломбы «Multi-Lock»: 1 – пружина; 2 – алюминиевый шар; 3 – стальной шар

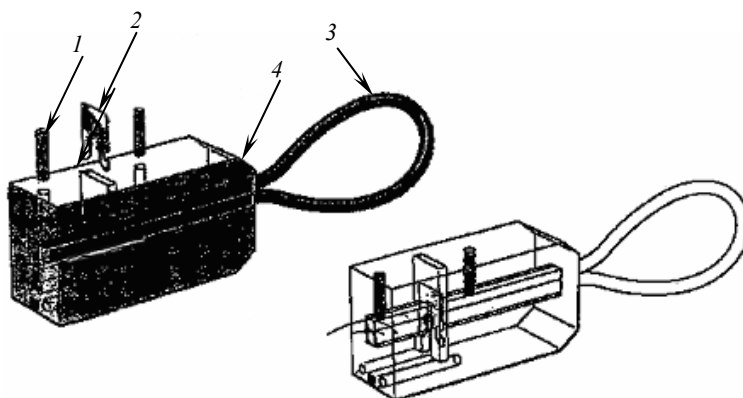


Рис. 10.8. Конструкция пломбы повышенной уникальности «Собта»: 1 – сжимающая шпилька; 2 – срезающее лезвие; 3 – оптоволоконный кабель; 4 – тело пломбы

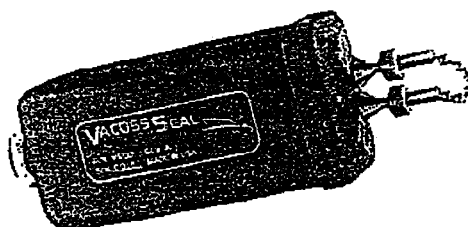


Рис. 10.9. Конструкция многоразовой пломбы типа «Vacoss» фирмы «Акила», США

Клеящиеся пломбы (печати). Такие пломбы содержат бумажную, виниловую или лавсановую подложку с нанесенным на нее с внутренней стороны клеящим составом. Клеящие пломбы могут содержать один или более слоев подложки.

Бумажная и виниловая клеящие пломбы имеют однослойную подложку. После установки эти пломбы трудно снять не оставляя следов вмешательства, так как:

- бумажные пломбы выполнены на рисовой бумаге, и при попытке их снять очень легко разрушаются;
- на виниловых пломбах делаются поперечные надрезы по всей длине подложки, что сильно затрудняет снятие пломбы без обрывов.

Лавсановая пломба содержит прозрачный внешний слой и цветной металлизированный внутренний слой. На внутреннем слое находятся рисунок и порядковый номер. На цветной слой подложки лавсановой пломбы со стороны нанесения клея предварительно печатается по всей длине подложки признак нарушения целостности пломбы (например, слова «Void – недействительная», «Open – вскрыта»). При снятии пломбы этот признак появляется на поверхности контейнера, а растянутая цветная подложка не совпадает с оставшимся изображением на контейнере.

Клеящие пломбы используются для опломбирования контейнеров с ЯМ.

Гибридные методы сохранения

К методам контроля доступа относятся также гибридные методы, которые разработаны в США и стали применяться, в том числе, у нас в стране. Это методы запоминания гамма-образов. Под контейнер, в котором находится ЯМ (например, высокообогащенный уран), помещают датчик, непрерывно регистрирующий гамма-излучение. Спектр гамма-излучения далее поступает в компьютер и сравнивается с эталонным, т.е. со спектром, который был зафиксирован при постановке материала под контроль. Если сравнение не подтверждает идентичность спектров, включается сигнал тревоги. Это – использование технологии гамма-образов, которое также обеспечивает достоверность знаний по состоянию ядерных материалов.

Ежедневный административный контроль ядерных материалов

Материально–ответственные лица и администрация установки осуществляют контроль ЯМ, так как они несут ответственность за сохранность ЯМ (в соответствии с основными правилами по учету и контролю ЯМ). Административный контроль выражается в систематических проверках, производимых МОЛ либо уполномоченными администрацией предприятия лицами, с целью проверки наличия ЯМ или оперативного выявления на рабочих местах аномалий и нарушений правил обращения с ЯМ, учета и контроля ЯМ. В рамках этой формы контроля проверяется размещение ЯМ в санкционированных местах, все устройства индикации вмешательства, охранная сигнализация и др.

10.2. Внутригосударственный и международный контроль ЯМ

Деятельность Ростехнадзора РФ

У нас в стране государственный контроль осуществляет специальная организация – Ростехнадзор России. Функции этой организации очень широкие. Деятельность Ростехнадзора регламентируется законом об использовании атомной энергии. В соответствии с этим законом Ростехнадзор уполномочен:

- разрабатывать федеральные нормы и правила;
- лицензировать деятельность организаций по использованию ЯМ;
- осуществлять надзор за соблюдением правил по учету и контролю ЯМ в организациях;
- осуществлять надзор за ядерной, радиационной, технической и пожарной безопасностью.

Среди этих функций важное место занимает осуществление надзора за учетом и контролем ЯМ в организациях. Инспекторы Ростехнадзора проверяют всю документацию по ЯМ в каждой ЗБМ предприятия, проводят собственные подтверждающие измерения и делают заключение о состоянии учета ЯМ на предприятии. Надзорная деятельность Ростехнадзора охватывает все предприятия и организации России, имеющие в своем распоряжении ядерные материалы (за исключением организаций Министерства обороны РФ).

Международный контроль ядерных материалов

Проблему ядерного нераспространения на международном уровне призван решать международный контроль. Основой для осуществления международного контроля ЯМ служит Договор о нераспространении ядерного оружия, к которому присоединились практически все страны мира. Этот вид контроля ядерных материалов рассмотрен в части I (глава 3).

Часть III

ФИЗИЧЕСКАЯ ЗАЩИТА ЯДЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ И УСТАНОВОК

ГЛАВА 1

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ЗАДАЧИ ФИЗИЧЕСКОЙ ЗАЩИТЫ

Физическая защита (ФЗ) ядерных материалов и установок в соответствии с Законом Российской Федерации об использовании атомной энергии [1] является одним из видов ядерной деятельности, который направлен на обеспечение безопасности ядерных объектов (ЯО) в части их защиты от определенного вида угроз (хищение ядерных материалов, диверсия на ядерных установках и т.п.).

Обеспечение физической защиты осуществляется на всех стадиях и этапах жизненного цикла ядерной установки (ЯУ), при обращении с ядерным материалом (ЯМ), в том числе, при его транспортировании.

В российских нормативно-правовых документах [1, 2] устанавливаются требования к обеспечению физической защиты ЯО, в которых среди прочих факторов учитываются международные обязательства Российской Федерации в области использования атомной энергии. В соответствии с нормативно-правовыми актами Российской Федерации ядерная деятельность без обеспечения физической защиты запрещается.

Следует отметить иерархический характер мероприятий по физической защите, которая обеспечивается на государственном, отраслевом уровнях и на уровне конкретного ядерного объекта.

Реализуют эти мероприятия соответствующие системы физической защиты.

Государственная система физической защиты представляет собой совокупность государственных органов власти и управления, федеральных органов исполнительной власти, осуществляющих государственное управление использованием атомной энергии и государственное регулирование безопасности объектов использования атомной энергии, других федеральных органов исполнительной власти и организаций, принимающих участие в обеспечении физической защиты.

Кроме того, на этом уровне осуществляется надзор за выполнением требований к физической защите, декларированных в соответствующих нормативно-правовых документах.

В частности, государственная система физической защиты должна снизить вероятность посягательства на ЯО путем профилактического выявления готовящихся акций, ограничения возможностей нарушителей. Чтобы у противника не было в распоряжении

соответствующей техники, например, бронетехники, ракетных установок, вертолетов и т.п. и информации о мероприятиях по физической защите, проводимых на конкретных ЯО.

Ведомственная система физической защиты объединяет и координирует усилия, предпринимаемые конкретными подведомственными объектами по обеспечению их физической защиты, руководству, финансирование и контроль за этой деятельностью.

На ведомственном уровне осуществляется руководство указанным видом деятельности на всех подведомственных объектах с учетом специфики данной отрасли, обеспечивается методическая помощь и материальное обеспечение создания (совершенствования) системы физической защиты (СФЗ) на объектах, ведомственный контроль за обеспечением физической защиты на ЯО. С этой целью в соответствующих органах исполнительной власти создаются управленческие структуры, на которые возложены указанные функции.

Система физической защиты на уровне ядерного объекта (объектовая СФЗ) реализует указанный выше комплекс мероприятий непосредственно на конкретном объекте. Именно объектовая СФЗ является важнейшим, ключевым звеном во всей деятельности по физической защите. Зоной ее ответственности является территория объекта, находящиеся на ней здания, сооружения и, разумеется, сами ядерные материалы и критические элементы ядерных установок. Именно здесь решаются конкретные задачи по защите ядерных материалов от хищения и ядерных установок от диверсии.

Отдельно решается задача защиты ядерных материалов в процессе их транспортирования (межобъектовые перевозки).

Деятельность на всех уровнях важна и вносит свой вклад в общую задачу по физической защите ядерных материалов и установок (ЯМиУ).

Государственная и ведомственные системы физической защиты связаны, в основном, с решением общих политических, организационных и финансовых проблем. Основные научно-технические и практические проблемы возникают при обеспечении физической защиты непосредственно на ядерном объекте. Именно этих проблем и путей их решения мы коснемся ниже.

Следует также отметить один важный момент, связанный с построением СФЗ как сложной человеко-машинной системы, в которой присутствует конфликт интересов сторон (нарушитель и система защиты). «Человеческие» звенья в СФЗ – лица, принимающие решения, и лица, их исполняющие (тревожные группы и т.п.), а

также решение задачи в условиях неопределенности (мы не знаем заранее намерений противника) ограничивают нас в применении аналитических методов исследования. Наиболее приемлемым для этих целей, как будет показано ниже, является метод математического (имитационного) моделирования.

Весьма актуальным является вопрос, как построить такую сложную систему, чтобы она была эффективна. Здесь не обойтись без применения системного подхода, позволяющего на основе определения общей цели СФЗ – защиты объекта, выработать требования к отдельным ее подсистемам.

Важным является и анализ самого процесса создания (совершенствования) СФЗ, также требующий системного подхода с целью координации работ, проводимых на отдельных стадиях и этапах.

Если коснуться тенденций развития современных СФЗ ЯО, то надо отметить все более полное применение в них технических средств. Новые типы средств и систем обнаружения нарушителя, в том числе ранее отсутствовавшие (водная акватория, низколетящие цели, обнаружение проноса/провоза запрещенных предметов), системы автоматизации некоторых функций, ранее выполняемых персоналом физической защиты – вот далеко не полный перечень технических новшеств в СФЗ. Применение технических средств позволяет повысить эффективность физической защиты ЯО, «отстроиться» от человеческого фактора и тем самым повысить культуру безопасности ЯО.

В последующих главах будет сначала рассмотрен вопрос о том, что же такое СФЗ, из чего она состоит, какие функции выполняют ее отдельные подсистемы и элементы, в качестве которых могут выступать технические средства, силы реагирования, строительные конструкции и т.п. Затем мы коснемся вопроса о том, как построить такую систему, каковы стадии и этапы ее жизненного цикла, какие процедуры и методики обеспечивают процесс создания (совершенствования) и функционирования СФЗ.

Список литературы

1. Закон Российской Федерации об использовании атомной энергии. Принят 21 октября 1995 г.
2. Правила физической защиты ядерных материалов, ядерных установок и пунктов хранения ядерных материалов. Утверждены Постановлением Правительства РФ от 7 марта 1997 г. № 264.

ГЛАВА 2

НОРМАТИВНО–ПРАВОВОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ФИЗИЧЕСКОЙ ЗАЩИТЫ

Разумеется, столь сложная и ответственная задача, как физическая защита, должна иметь нормативно–правовое обеспечение, регулирующее деятельность в данной области.

Деятельность в области физической защиты ЯМ регламентируется соответствующими российскими законодательными актами и нормативными документами. Кроме того, следует учитывать также требования и рекомендации некоторых международных документов. С них и начнем.

Международным агентством по атомной энергии (МАГАТЭ) разработан документ [1], который является для разных стран, располагающих ядерными материалами и установками, общей концептуальной основой их физической защиты. При этом в документе отмечается, что ФЗ в каждой конкретной стране является национальной проблемой и строится с учетом ее специфики (геополитического положения, особенностей ядерных объектов, криминогенной обстановки в данной стране и т.п.).

Вторым международным документом является «Конвенция по физической защите ядерного материала» (1989г.). Учитывая национальный характер проблемы ФЗ, основной упор в данном документе сделан на межгосударственные перевозки ЯМ.

Основным российским правовым актом является «Закон об использовании атомной энергии» [2]. Ряд глав и статей данного закона посвящен проблеме физической защиты, но, разумеется, в самых общих чертах.

Более конкретно данный вопрос регламентирован в другом документе федерального уровня [3]. В нем определены функции органов исполнительной власти, предъявлены основные требования к организации физической защиты ядерных объектов, а также ядерных материалов и установок при их транспортировке.

Разумеется, в законах только обозначены различные аспекты деятельности в области физической защиты и даны лишь общие рекомендации по ее обеспечению. Поэтому весьма актуальной задачей является создание отраслевых (межотраслевых) нормативных документов, учитывающих специфику ядерных объектов, принад-

лежащих данной отрасли, необходимость координации деятельности нескольких отраслей.

В этих документах регламентируются необходимые процедуры, предъявляются требования к СФЗ, ее составным частям и к видам деятельности. В ряде документов этого уровня приводятся методики проведения отдельных работ (например, анализа уязвимости объекта, оценки эффективности СФЗ, испытаний элементов СФЗ и т.п.). В качестве примера можно рассмотреть систему отраслевых документов по СФЗ Росатома России, рассмотренную в работах [4, 5].

Очень важной составляющей нормативной базы в области СФЗ являются нормативные документы объектового уровня (положения, инструкции и т.п.), которые еще более детализируют требования по обеспечению ФЗ с учетом специфики именно данного ЯО. Такие документы разрабатываются и применяются непосредственно на объектах.

Список литературы

1. INFCIRC/225/rev. 4 «Методические рекомендации по физической защите ядерного материала».
2. Закон Российской Федерации об использовании атомной энергии. Принят 21 октября 1995 г.
3. Правила физической защиты ядерных материалов, ядерных установок и пунктов хранения ядерных материалов. Утверждены Постановлением Правительства РФ от 7 марта 1997 г. № 264.
4. Системы физической защиты ЯМ и У. Инструкция по организации проектирования. Минатом РФ. РД 95 10544–99.
5. Системы физической защиты ЯОО. Общие требования. Минатом РФ, 2001.

ГЛАВА 3

СТРУКТУРА И СОСТАВ СИСТЕМЫ ФИЗИЧЕСКОЙ ЗАЩИТЫ (СФЗ)

Ядерные материалы и установки находятся на охраняемой территории, ограниченной периметром, в соответствующих зданиях и помещениях. На рис. 3.1. показан (в упрощенном виде) типовой объект физической защиты.

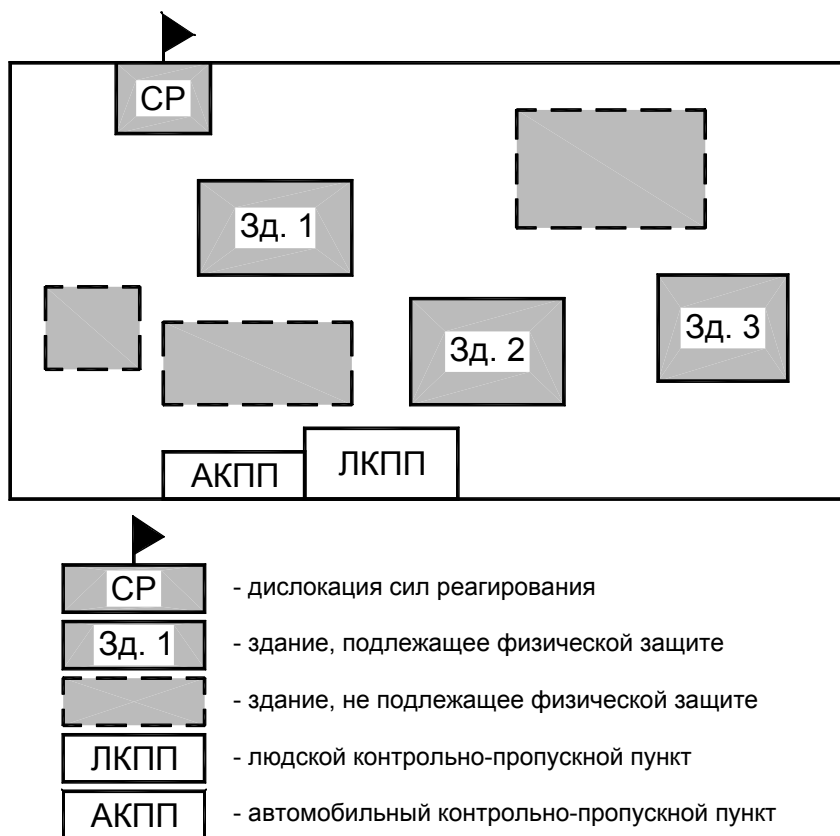


Рис 3.1. Типовой объект физической защиты

Следует отметить, что только некоторые здания, те, в которых расположены ЯМ и критические элементы ЯУ, требуют физической защиты, наличие остальных лишь косвенно влияет на решение задачи физической защиты (ограничение видимости, маршрутов движения по объекту и т.п.). При рассмотрении в главе 5 зонального принципа построения СФЗ эти вопросы будут освещены подробнее.

Физическая защита на уровне ядерного объекта осуществляется силами и средствами самого объекта. Это, прежде всего, силы охраны, а также инженерно–технические средства физической защиты (ИТСФЗ).

Силы и средства физической защиты объединяются в **систему физической защиты (СФЗ)**, которая представляет собой взаимосвязанную совокупность организационных, административных и правовых мер, персонала физической защиты и инженерно–технических средств, предназначенную для обеспечения физической защиты конкретного ядерного объекта.

СФЗ является сложной человеко–машинной системой, для анализа которой необходимо применять методы таких дисциплин, как системотехника и исследований операций [1].

При анализе таких систем, прежде всего, производят их декомпозицию (разделение) на подсистемы. Это способствует пониманию иерархической структуры системы в целом и отдельных ее составных частей.

Проведем декомпозицию СФЗ на подсистемы. При этом следует отметить, что система более низкого уровня является подсистемой системы более высокого уровня. Например, СФЗ, в свою очередь является подсистемой всей системы безопасности ЯО, которая кроме нее включает также другие системы (ядерной безопасности, пожарной безопасности, учета и контроля ЯМ и т.п.).

Структура СФЗ показана на рис. 3.2.

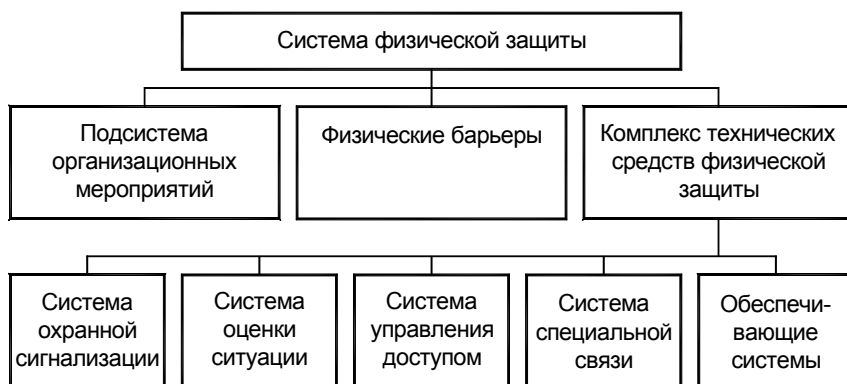


Рис 3.2. Структура системы физической защиты

Как видно из рис. 3.2, СФЗ состоит из трех основных составных частей, функции которых будут рассмотрены ниже.

Основным назначением комплекса технических средств физической защиты (КТСФЗ) является получение информации о несанкционированных действиях с целью последующей выработки соответствующих управляющих воздействий.

Физические барьеры призваны затруднить осуществление потенциальными нарушителями запланированных акций.

Организационные мероприятия устанавливают порядок (правила) на объекте в плане обеспечения ФЗ. Действия сил охраны по пресечению указанных действий нарушителя являются как бы «исполнительным механизмом» для СФЗ и позволяют решить конечную задачу по защите ЯО.

Следует отметить, что подсистемы СФЗ всех уровней должны быть сбалансированы и «лить воду» на общую цель – защиту ЯО от несанкционированных действий потенциальных нарушителей.

Ниже приводится описание отдельных подсистем и выполняемых ими функций.

Список литературы

1. Подиновский В.В. Оптимизация систем по последовательно применяемым критериям. М.: Радио и связь, 1985.

ГЛАВА 4

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ПОДСИСТЕМ СФЗ

4.1. Комплекс технических средств физической защиты

Как было отмечено выше, декомпозиция системы способствует ее пониманию. Ниже дана краткая характеристика отдельных систем как подсистем комплекса технических средств физической защиты (КТСФЗ) [1, 2].

Система охранной сигнализации

Важным моментом при построении и функционировании СФЗ является получение информации о совершении (попытке совершения) несанкционированного действия. Эту функцию осуществляют средства обнаружения (СО), входящие в систему охранной сигнализации (СОС).

Средство обнаружения – техническое устройство, предназначенное для автоматической подачи сигнала тревоги в случае несанкционированного действия в зоне, на которую оно рассчитано.

Система охранной сигнализации – совокупность средств обнаружения, тревожно–вызывной сигнализации, системы сбора, обработки и отображения информации в СФЗ.

СО могут быть классифицированы следующим образом.

По условиям применения:

- внешние (периметры, локальные зоны);
- внутренние (здания и помещения).

По принципу действия:

- электроконтактные;
- оптические (в том числе инфракрасные);
- емкостные;
- индуктивные;
- вибрационные;
- сейсмические;
- акустические (в том числе ультразвуковые);
- радиолучевые;
- радиолокационные;
- на основе «линии вытекающей волны»;
- комбинированные;
- прочие.

В основу классификации СО по физическим принципам положено взаимодействие объекта обнаружения (нарушителя) с различными физическими полями.

В процессе проектирования КТСФЗ важны характеристики отдельных его элементов, в том числе и СО.

В качестве основных характеристик СО обычно выбираются:

- вероятность обнаружения;
- среднее время наработки на ложное срабатывание;
- среднее время наработки на отказ;
- среднее время восстановления;
- стоимость.

Вероятность обнаружения влияет на эффективность СФЗ в целом.

Наработка на ложное срабатывание или их частота – эксплуатационная характеристика, определяющая, насколько КТСФЗ приносит «пустые хлопоты» силам охраны. Важен также психологический аспект, заключающийся в снижении доверия к сигналам и притуплении бдительности при частых ложных тревогах.

Наработка на отказ и время восстановления – надежность характеристики, также влияющие на эффективность и удобство эксплуатации КТСФЗ.

Стоимость – характеристика, учет которой важен при проектировании КТСФЗ.

На рис. 4.1 приведены простые примеры применения средств обнаружения на периметре и в помещении ЯО.

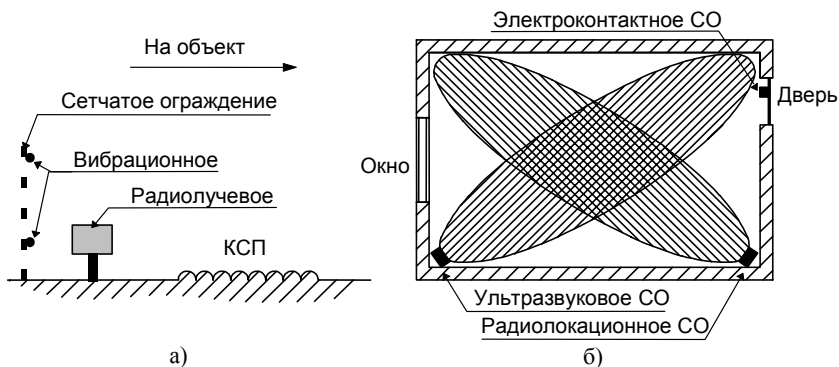


Рис. 4.1. Пример применения СО: а) – на периметре; б) – в помещении

Сигналы от средств обнаружения, расположенных в различных точках объекта: на периметре, территории, в зданиях и помещениях, передаются по линиям связи на пульт (пульта) физической защиты. Операторы пультов анализируют сигналы, после чего лицом, принимающим решение, выбирается тактика действий сил реагирования по противодействию нарушителей и защите ЯМ и ЯУ.

Совокупность СО, линий связи и пультов (обрабатывающих и отображающих информацию центров) образуют систему охранной сигнализации.

Подсистема оценки ситуации

Проблема ложных срабатываний заставляет нас задуматься о путях повышения доверия к сигналам срабатывания СО. Старым проверенным, но несовременным способом является организация на периметрах ЯО контрольно-следовых полос (КСП), на которых остаются следы нарушителя, вторгнувшегося на объект. Применительно к помещениям для подтверждения сигналов тревоги используются печати и пломбы.

Более современным способом подтверждения сигналов тревоги является применение средств и систем телевизионного наблюдения (СТН).

Все рассмотренные средства, как старые, так и новые, можно объединить в общую группу средств и систем оценки ситуации, позволяющих повысить достоверность первичной информации, получаемой от СО, а также в ряде случаев (телевидение) получить дополнительную информацию о нарушителе (численность, направление движения нарушителей и т.п.), позволяющих организовать адекватное противодействие акциям нарушителей.

Совершенствуются также печати и пломбы (штрихкоды, оптические пломбы и т.п.).

Подсистема управления доступом

В связи с тем, что в процессе функционирования ЯО необходимо обеспечить санкционированный доступ персонала и транспорта на объект и в отдельные его зоны, на ЯО создается специальная подсистема, которая по определенным признакам отделяет «своих» (персонал, командированных на ЯО лиц и т.п.) от «чужих» (нарушителей).

Дадим некоторые определения, относящиеся к данной области.

Допуск – оформление в установленном порядке разрешения на проход/проезд в охраняемые зоны, проведение определенной работы, получение определенных документов и сведений.

Доступ – реализация возможности: нахождения в охраняемой зоне, получения информации и документов, выполнения работ с ЯМ и т.д.

Примером элемента указанной подсистемы является часовая, осуществляющий контрольно–пропускные функции. В настоящее время он все чаще заменяется автоматическими техническими устройствами.

Кроме того, важными элементами системы управления доступом (СУД) являются средства обнаружения проноса (провоза) на ЯО или выноса (вывоза) с ЯО запрещенных предметов (оружия, взрывчатых веществ, ядерных материалов и т.п.

Система управления доступом – это подсистема СФЗ, обеспечивающая решение задач управления доступом в охраняемые зоны ЯО.

Для осуществления всех перечисленных функций на ЯО организуются внешние и внутренние контрольно–пропускные пункты (КПП).

Системы и средства управления доступом предназначены для применения:

- на внешних людских контрольно–пропускных пунктах (КПП);
- на внешних авто– и ж/д транспортных КПП;
- на внутренних людских КПП;
- на входах в режимные помещения;
- в местах хранения предметов физической защиты (сейфы и т.д.).

Можно привести следующие методы идентификации личности:

- по присвоенным признакам:
 - пропуск с шифром;
 - цифровой код;
- по присущим человеку признакам:
 - геометрия руки;
 - структура глаза;
 - голос;
 - динамика подписи;

внешний вид (компьютерная фотография);
прочие.

В качестве примеров элементов СУД можно привести:

- шлюзовые кабины для внешних и внутренних (вход в локальные зоны) КПП;
- турникеты на входах в отдельные охраняемые зоны;
- дверные терминалы, управляющие доступом в охраняемые помещения.

Кроме того, на КПП могут применяться технические средства обнаружения проноса (провоза) вышеуказанных запрещенных предметов.

Конкретный состав устройств и их расположение на объекте определяются в процессе проектирования СФЗ в целом.

В качестве основных характеристик СУД можно привести следующие:

- вероятность обнаружения нарушения процедуры прохода (идентификационных признаков и т.д.);
- вероятность ложного обнаружения указанного нарушения;
- среднее время наработки на отказ;
- среднее время восстановления;
- стоимость.

Первая характеристика влияет на эффективность СФЗ в целом.

Вторая характеристика определяет удобство эксплуатации СУД. Следует отметить, что СУД позволяет упорядочить доступ в отдельные охраняемые зоны объекта, разделить людские и транспортные потоки между охраняемыми зонами объекта. С помощью СУД обеспечивается санкционированный доступ персонала именно в те зоны, куда имеется допуск.

Относительно последних трех из приведенных характеристик можно дать те же комментарии, что и для СО.

СУД позволяет также решить задачу противодействия внутренним нарушителям.

В связи с большими возможностями, которые открывает использование современной вычислительной техники, наметилась тенденция интеграции СУД с системами охранной сигнализации и создания интегрированных систем управления доступом и охранной сигнализации (СУДОС).

Кроме того, наметились пути интеграции СФЗ с системой учета и контроля ЯМ. СУД является основным «стыковочным» элементом при обеспечении указанной интеграции.

Отдельно следует сказать о других технических устройствах, обеспечивающих управление доступом. Это, прежде всего, управляемые запирающие устройства (замки), которые могут входить в составные части СУД, например, в кабины, а могут устанавливаться отдельно (замки на дверях). В последнем случае логично их считать скорее управляемыми физическими барьерами, которые будут описаны ниже.

Система специальной связи

Система связи является средством управления силами реагирования (СР) и обеспечения связи внутри ЯО и с «внешним (по отношению к объекту) миром»: вышестоящими организациями, правоохранительными органами и т.п.

В нормативных документах выдвигается требование обеспечения двухканальной связи (проводной телефон и радиосредства).

В связи с современными возможностями вычислительной техники можно организовать сеть связи и гибко ею управлять в зависимости от сложившейся ситуации.

Термин «специальная связь» употреблен, прежде всего, из-за необходимости обеспечить защиту информации, циркулирующей в системе связи.

Обеспечивающие системы

Термин «Обеспечивающие системы» хорошо отражает назначение этих систем.

Ярким примером может служить система электропитания всех перечисленных выше систем, без которой их функционирование невозможно.

Вторым примером является система освещения, обеспечивающая работу элементов (телекамер) системы телевизионного наблюдения.

Система кабелепроводов, связывающих отдельные элементы перечисленных выше основных систем, а также конструктивные элементы (зонные шкафы и т.п.) также являются примерами обеспечивающих средств и систем.

4.2. Физические барьеры и организационная подсистема СФЗ

Физические барьеры

Физические барьеры (ФБ) играют важную роль в СФЗ. Физический барьер – физическое препятствие, обеспечивающее задержку нарушителя, то есть принятие мер, направленных на замедление продвижения нарушителя к цели по территории охраняемой зоны.

Действительно, недостаточно получить сигнал от СО или от элементов СУД о несанкционированных действиях. Необходимо еще обеспечить выполнение условия, чтобы время действий нарушителя (T_n) было больше времени действий сил реагирования (T_{cp}). Важно, чтобы у последних был резерв времени, то есть выполнялось условие $T_n > T_{cp}$ или $\Delta T_{cp} = T_n - T_{cp} > 0$, где ΔT_{cp} – резерв времени сил реагирования.

ФБ предназначены для всемерной задержки нарушителя и увеличения T_n .

Физические барьеры могут быть постоянными и управляемыми.

При классификации физических барьеров, в частности, можно выделить:

- существующие на объекте ФБ:

элементы строительных конструкций (стены, перекрытия, двери);
элементы рельефа местности, растительность;

- искусственно созданные ФБ:

заграждения на периметре, локальных зонах;
тамбуры, решетки, усиленные двери в зданиях и помещениях;
противотаранные устройства на транспортных КПП;
специальные ФБ (светозвуковые, дымовые, пенообразующие и т.д.).

Можно также говорить о технических средствах воздействия (ТСВ) на нарушителя (электрошок, газовые генераторы и др.), однако их применение на ЯО должно быть санкционировано соответствующими законодательными актами.

Силы реагирования

Задачу по пресечению акций нарушителей в конечном итоге решают силы реагирования (СР). Иными словами, когда поступает информация (от технических средств или от часовых) о попытках

вторжения нарушителя на объект или в отдельные его охраняемые зоны, СР начинают действовать. При этом выбор тактики действий СР зависит от требований соответствующих нормативных документов, и от конкретно сложившейся обстановки.

Весь персонал СР состоит из отдельных групп, каждая из которых решает свою задачу. Например, тревожная группа направляется к месту срабатывания СО, группа усиления движется к наиболее уязвимым местам объекта с целью усиления их охраны и т.д.

Как будет показано далее, от выбранной тактики зависят временные соотношения. Например, изменяя дислокацию СР и приближая их к местам возможных действий, мы уменьшаем $T_{\text{ср}}$.

Организационные мероприятия

И, наконец, очень важно, чтобы все компоненты СФЗ действовали как слаженный механизм. Вопрос о том, как построить и эксплуатировать СФЗ, мы обсудим ниже в разделах, касающихся проектирования и оптимизации систем физической защиты. Сейчас лишь отметим, что в процессе функционирования СФЗ на объекте должен соблюдаться порядок, который устанавливается организационными мероприятиями. Эти мероприятия включают:

- действия персонала ЯО в штатных и чрезвычайных ситуациях;
- взаимодействие различных служб объекта, причастных к ФЗ, а также с «внешним миром» (муниципальными властями, вышестоящими организациями, силовыми структурами);
- техническое обслуживание инженерно-технических средств физической защиты.

Мероприятия должны регламентироваться нормативными документами (положениями, инструкциями и т.д.). Это позволяет снизить субъективизм при функционировании СФЗ. Например, в отсутствие регламентирующих документов решение в тех или иных ситуациях будет принимать руководитель соответствующего уровня, то есть эти решения будут существенно зависеть от его личностных качеств. Жесткий и негибкий руководитель службы безопасности создает массу проблем для нормального функционирования объекта, и, наоборот, если он не в меру мягок, это снизит контроль на ЯО и в конечном итоге ослабит его физическую защиту.

Следует отметить, что в современных СФЗ на технические средства возлагается выполнение все большего числа организационных

функций. Например, современные СУД обеспечивают выполнение «правила двух» лиц – принципа групповой ответственности (включая вскрытие и сдачу помещений под охрану), основанный на наблюдении одних лиц за действиями других с целью уменьшения возможности совершения несанкционированных действий.

Другой пример. В системы сбора и обработки информации встраивается хронометр, который запускается в момент выхода (выезда) тревожной группы (ТГ) на сигнал тревоги. Когда ТГ достигает нужного участка, она должна там отметиться. Это позволяет уточнить времена движения персонала охраны и соответственно итоговое время $T_{\text{ср}}$.

Список литературы

1. Глебов В.Б., Измайлов А.В., Румянцев А.Н. Введение в системы учета, контроля и физической защиты ядерных материалов. М.: МИФИ, 2001.
2. Измайлов А.В. Методы проектирования и анализа эффективности систем физической защиты ядерных материалов и установок. М.: МИФИ, 2002.

ГЛАВА 5

ОБЩИЕ ПРИНЦИПЫ ПОСТРОЕНИЯ СФЗ

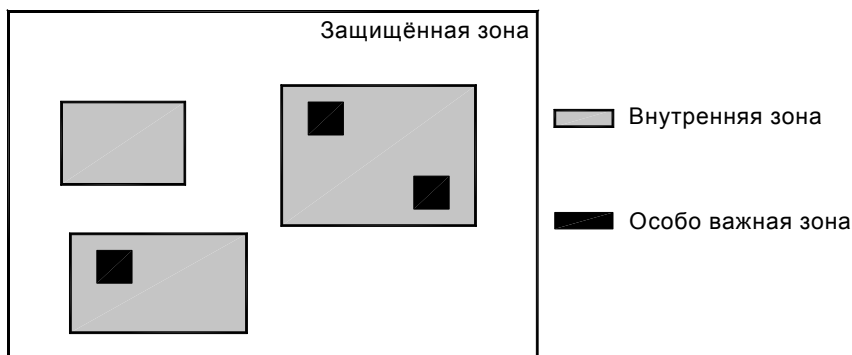
В основу создания сложных систем закладываются общие принципы, характерные для систем любой природы, а также некоторые специфические принципы, отражающие особенности данного класса систем. Указанные ранее особенности СФЗ накладывают свой отпечаток на набор таких специфических принципов их построения, которые и приведены ниже [1].

Зональный принцип, эшелонирование рубежей защиты. Согласно этому принципу на объекте создается система вложенных охраняемых зон: защищенная, внутренняя и особо важная зона (рис. 5.1).

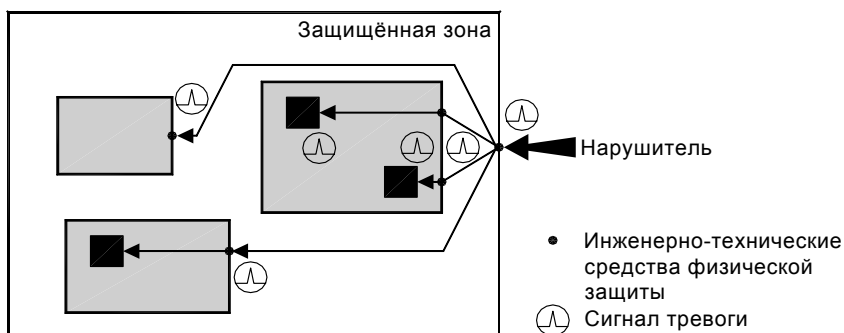
Под защищенной зоной (ЗЗ) понимается вся территория ЯО, которая окружена физическими барьерами, постоянно находящимися под охраной и наблюдением, и доступ в которую ограничивается и контролируется. Внутри защищенной зоны располагается внутренняя зона (их может быть несколько). Во внутренней зоне соответственно располагается особо важная зона (их также может быть несколько). Защитные меры усиливаются от периферии к предметам физической защиты.

Можно привести примеры указанных зон. Если, как было указано выше, защищенной зоной является вся территория объекта, то внутренней зоной (ВЗ) могут являться здания или отдельные части зданий на указанной территории, а в качестве особо важной зоны (ОВЗ) могут рассматриваться помещения (группы помещений) внутри зданий.

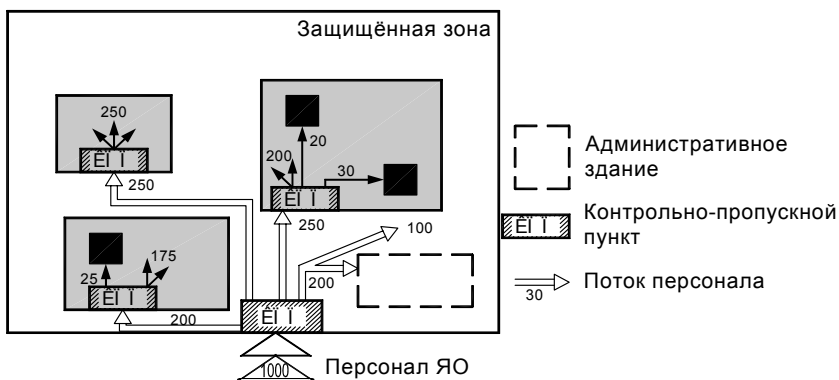
Границы зон оборудуются инженерно-техническими средствами, в них организуются специальные проходы (проезды) для санкционированного доступа персонала на объект. Разумеется, требования к оборудованию зон и их границ инженерно-техническими средствами и в части организационных мероприятий различны. В зависимости от категории предмета физической защиты он должен располагаться в определенной зоне. Например, в соответствии и требованиями нормативно-правовых документов высокообогащенный уран должен располагаться внутри ВЗ или ОВЗ.



а)



б)



в)

Рис. 5.1. Зональный принцип построения СФЗ: а) – охраняемые зоны; б) – эшелонирование рубежей защиты; в) – дифференциация доступа персонала в охраняемые зоны

Следует отметить, что внутри зон могут быть организованы дополнительные рубежи, оборудованные ИТСФЗ, не находящиеся на границе зоны и не изменяющие ее статуса.

Зональный принцип позволяет создать эшелонированную систему защиты и фиксировать попытки преодоления нарушителем отдельных рубежей (границ зон), прогнозировать его траектории и цели (рис. 5.1,б).

Кроме того, зонирование объекта позволяет дифференцировать доступ персонала в отдельные зоны и дополнительно иметь полную (с точностью до зоны) информацию о месте нахождения персонала ЯО (рис. 5.1,в).

Принцип адекватности СФЗ принятым потенциальным угрозам и моделям вероятных нарушителей.

Принцип адекватности СФЗ угрозам связан с необходимостью «настроить» СФЗ именно на принятые угрозы. Если система будет рассчитана на более слабую потенциальную угрозу, то защита не будет обеспечена. Если же СФЗ будет избыточна (на всякий случай), то это чревато излишними капитальными и эксплуатационными затратами.

То есть структура, состав и процесс функционирования СФЗ зависят от принятых потенциальных угроз и моделей вероятных нарушителей.

Введем относящиеся к данной теме некоторые термины и определения.

Угроза – это потенциальная возможность совершения диверсии или хищения ЯМ.

Внешняя угроза – угроза, исходящая от внешнего нарушителя.

Внутренняя угроза – это угроза, исходящая от внутреннего нарушителя.

Модель нарушителя – совокупность качественных и количественных характеристик нарушителя, используемая при анализе диверсионной устойчивости, выработке требований к СФЗ и оценке ее эффективности.

Внешний нарушитель – нарушитель, из числа лиц, не имеющих права доступа в защищенную зону.

Внутренний нарушитель – нарушитель из числа лиц, имеющих право доступа без сопровождения в охраняемые зоны.

В качестве основных угроз ядерному объекту можно привести:

- хищение ЯМ и изделий на их основе;
- диверсия на ядерной установке (ЯУ) или в пункте хранения ЯМ;
- террористический акт;
- ядерный шантаж.

Так как для осуществления ядерного шантажа нарушителям необходимо захватить ЯМ или ключевые элементы ЯУ, защита от данной угрозы сводится к обеспечению физической защиты от первых двух типов угроз.

Перейдем к рассмотрению основных типов нарушителей как «проводников» указанных угроз.

Классификация нарушителей приведена на рис. 5.2.

Далее необходимо построить модели вероятных нарушителей, которые можно разделить на «макромодели» и «микромодел».

Макромодель содержит следующие сведения:

- тип нарушителя;
- ожидаемая акция;
- цель акции;
- количественный состав (в случае группы нарушителей);
- осведомленность;
- подготовленность;
- техническая оснащенность;
- вооружение.

Микромодель содержит следующие сведения:

- способы преодоления физических барьеров и средств обнаружения (СО);
- скорость перемещения в зоне обнаружения СО;
- наличие подручных средств;
- наличие специальных технических средств, например, предназначенных для деблокирования СО.

Макромодели используются в основном при разработке концепции построения СФЗ в целом, тогда как микромодел» позволяют выработать требования к отдельным элементам СФЗ, например, к средствам обнаружения и физическим барьерам на периметре, локальных зонах, в зданиях, помещениях и т.д.

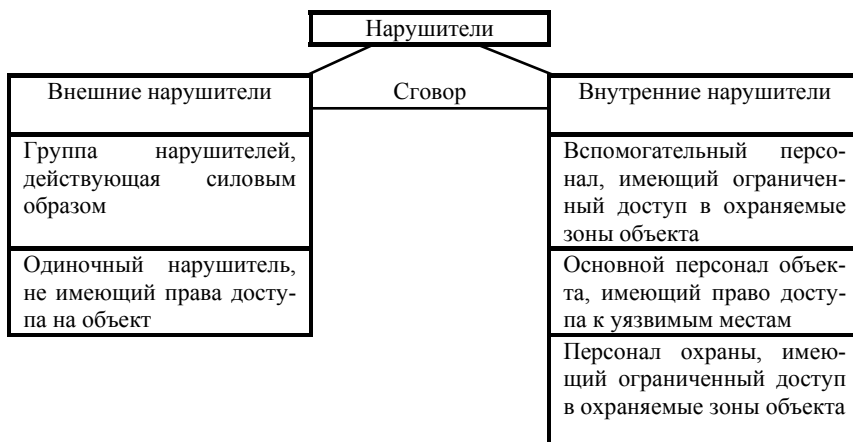


Рис. 5.2. Классификация нарушителей

На практике модель нарушителя для конкретного ЯО формируется на объекте после анализа его уязвимости путем заполнения соответствующих форм-анкет.

Следует также отметить, что модель нарушителя следует регулярно пересматривать. Поводом для этого могут послужить изменение политической обстановки в стране и в регионе, где расположен ЯО, изменение на самом объекте (перепрофилирование, передислокация ЯМ, изменение инфраструктуры ЯО и т.п.).

Принцип своевременного противодействия принятым угрозам.

Принцип своевременного противодействия связан с тем, что необходимо при любых рассматриваемых сценариях обеспечить выполнение соотношения $T_n \geq T_{cp}$, где T_n – время, необходимое нарушителю для выполнения своей акции; T_{cp} – время, необходимое силам реагирования на пресечение указанной акции при действиях по сигналам тревоги от технических средств.

Принцип равнопрочности защиты ПФЗ с учетом их ценности (привлекательности) возможных последствий несанкционированных действий и вероятности реализации нарушителем тех или иных сценариев.

Этот принцип комментариев не требует, все ясно из приведенного выше определения.

Принцип адаптивности.

В соответствии с этим принципом СФЗ должна иметь возможность адаптироваться к измерениям:

- угроз и моделей нарушителей;
- конфигурации объекта и границ его охраняемых зон;
- дислокации предметов физической защиты;
- видов и способов охраны;
- сезонных и климатических условий.

Принцип регулярности контроля функционирования. Постоянный контроль необходим для того, чтобы фиксировать любые отклонения от заданного порядка на объекте, например, контроль за правильностью выполнения процедур персоналом СФЗ. В связи с большими объемами информации, циркулирующей в СФЗ, без автоматизации процесса контроля в современных СФЗ ЯО не обойтись.

Контроль за обеспечением физической защиты осуществляется на ведомственном уровне и на уровне самого ЯО (самоконтроль).

Общетехнические принципы построения СФЗ связаны с обеспечением надежности, живучести, унификации элементов СФЗ, их взаимной совместимости и т.д. Они характерны для многих сложных технических и человеко–машинных систем.

Список литературы

1. Измайлов А.В. Методы проектирования и анализа эффективности систем физической защиты ядерных материалов и установок. М.: МИФИ, 2002.

ГЛАВА 6

ПРОЦЕСС СОЗДАНИЯ (СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ) СФЗ. СТАДИИ И ЭТАПЫ

Жизненный цикл системы физической защиты ЯО состоит в создании СФЗ и обеспечении ее функционирования на ядерном объекте. Если мы имеем дело с действующим, а не проектируемым объектом, где уже существует СФЗ, то уместно говорить не о создании, а о совершенствовании СФЗ.

Стадии жизненного цикла СФЗ показаны на рис. 6.1. «Обратные связи» между стадиями отражают необходимость повторного проведения работ под действием различных факторов (изменение угроз и моделей нарушителей, конфигурации объекта, дислокации и состава предметов физической защиты, ограничения по возможности практической реализации предлагаемых решений и т.д.).

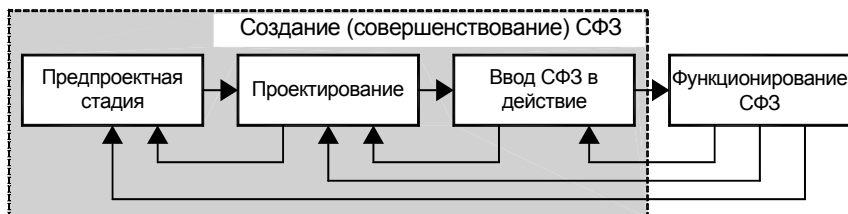


Рис. 6.1. Жизненный цикл системы физической защиты

Процесс **создания (совершенствования) СФЗ** содержит следующие стадии:

- предпроектная;
- проектирования;
- ввода СФЗ в действие.

Предпроектная стадия содержит следующие этапы:

- анализ уязвимости ЯО, включая анализ угроз и моделей вероятных нарушителей;
- категорирование предметов физической защиты (ПФЗ), включая ядерные материалы и критические элементы ядерных установок;

- оценку эффективности существующей СФЗ ЯО;
- концептуальное проектирование СФЗ;
- обоснование инвестиций, включая вопросы определения приоритетов вложения средств, кредитования и т.п.;
- разработку технического задания на создание (совершенствование) СФЗ, включая частные технические задания на технические подсистемы.

Стадия проектирования содержит:

- разработку проекта комплекса инженерно–технических средств физической защиты (КИТ СФЗ);
- разработку проектно–конструкторской документации КИТ СФЗ;
- разработку организационно–технических документов.

Стадия ввода СФЗ в действие содержит:

- заказ и поставку оборудования (в соответствии с проектной документацией);
- выполнение строительно–монтажных работ;
- выполнение пусконаладочных работ;
- разработку эксплуатационной документации;
- проведение на ЯО подготовительных работ;
- проведение обучения персонала СФЗ;
- разработку необходимых нормативных документов объектового уровня;
- проведение предварительных испытаний инженерно–технических средств физической защиты (ИТСФЗ);
- проведение опытной эксплуатации ФЗ;
- проведение приемочных испытаний ФЗ;
- приемку СФЗ.

Следует отметить, что стадии проектирования и ввода в действие являются достаточно стандартными, характерными для многих, схожих с СФЗ сложных систем, тогда как предпроектная стадия отражает специфику именно систем физической защиты.

Работа по созданию (совершенствованию) СФЗ на конкретном ЯО начинается с анализа уязвимости объекта. На этом этапе опре-

деляются ПФЗ* и модели вероятных нарушителей в отношении каждого ПФЗ.

Затем проводится категорирование ПФЗ и оценка эффективности СФЗ ЯО (фактическое состояние ФЗ для действующих объектов) с учетом результатов категорирования ПФЗ и др. факторов. Выявляются слабые места в СФЗ.

Далее разрабатываются предложения, направленные на ликвидацию обнаруженных слабых мест и, тем самым, повышающие защищенность ядерного материала. Эти предложения относятся к структуре и составу комплекса инженерно-технических средств ФЗ (типы и размещение средств обнаружения, оценки ситуации, управления доступом, пультов управления и т.п.), структуре и составу физических барьеров (на периметре, территории, в зданиях и помещениях объекта), тактике действий сил реагирования. Оценивается эффективность предложенных вариантов, а также материальные и людские ресурсы, необходимые для их реализации.

Служба безопасности объекта анализирует предложения и производит выбор того варианта, который наиболее подходит для реализации. При этом учитываются не только эффективность и стоимость данного варианта, но и практические соображения, связанные с функционированием объекта (план реконструкции объекта и т.п.).

Ниже рассмотрено содержание работ на наиболее сложных этапах создания СФЗ (анализ уязвимости ЯО и оценка эффективности его СФЗ). При этом следует отметить, что анализ уязвимости должен проводиться периодически, отслеживая возможные изменения угроз и моделей нарушителей, конфигурации ЯМ на объекте, структуры и состава СФЗ. Оценка эффективности СФЗ проводится не только на предпроектной стадии, но и на всех последующих стадиях, в том числе в процессе функционирования СФЗ после ввода ее в действие.

* Вопросы анализа уязвимости ЯО и оценки эффективности его СФЗ подробно освещены в следующих главах.

ГЛАВА 7

АНАЛИЗ УЯЗВИМОСТИ ЯОО

В начале предпроектной стадии должен проводиться анализ уязвимости объекта, который включает в себя, прежде всего, определение внешних и внутренних угроз объекту и тех уязвимых мест, физическая защита которых должна обеспечиваться.

Результаты анализа уязвимости ЯОО используются в качестве исходных данных для концептуального проектирования СФЗ.

Основными этапами проведения анализа уязвимости являются:

- создание рабочей группы экспертов для проведения анализа;
- разработка плана (программы) проведения анализа;
- сбор исходных данных об уязвимых местах ЯО и предметах физической защиты;
- определение угроз и моделей нарушителя;
- оформление результатов анализа.

В соответствии с «Правилами ФЗ ...» анализ уязвимости проводит администрация ЯО с привлечением (при необходимости) специализированных организаций (силовых структур, научно-исследовательских и проектных организаций по профилю данного ЯО и т.д.).

Определение уязвимых мест ЯУ – это процесс выявления элементов ЯУ, которые могут быть предметами посягательства нарушителя, и мест их расположения.

Уязвимыми местами ЯО с точки зрения хищения ЯМ являются места их хранения и использования внутри охраняемых зон.

Следует отметить, что уязвимые места по ЯМ являются более очевидными – это места нахождения ЯМ. Выявление уязвимых мест ЯУ требует проведения специальной аналитической работы. Например, ответы на вопрос, вызовет ли тяжелые радиационные последствия вывод из строя (разрушение) того или иного элемента ЯУ (насоса, емкости, трубопровода, кабеля системы управления и т.п.) не всегда очевидны и требуют проведения достаточно серьезных исследований, моделирования ЯУ.

Выявление уязвимых мест ЯУ может производиться на основе использования логических схем и математического аппарата теории графов.

Логическая схема является эффективным средством определения уязвимых мест при рассмотрении потенциальных угроз хищения ЯМ или диверсии на ЯУ.

Рассмотрим пример, в котором опасным последствием (событием) является утечка радиоактивности в результате диверсии в отношении некоторого элемента оборудования реактора типа ВВЭР.

В процессе анализа обычно строится дерево повреждений при диверсии (ДПД) (рис. 7.1).

Из рис. 7.1 видно, что конечное событие «Утечка радиоактивности» раскрывается в промежуточные события первого уровня, второго уровня и т.д., пока мы не дойдем до исходных событий. На рис. 7.2 показан пример раскрытия события «Утечка во время работы на мощности» (3 уровень) еще на 3 уровня.

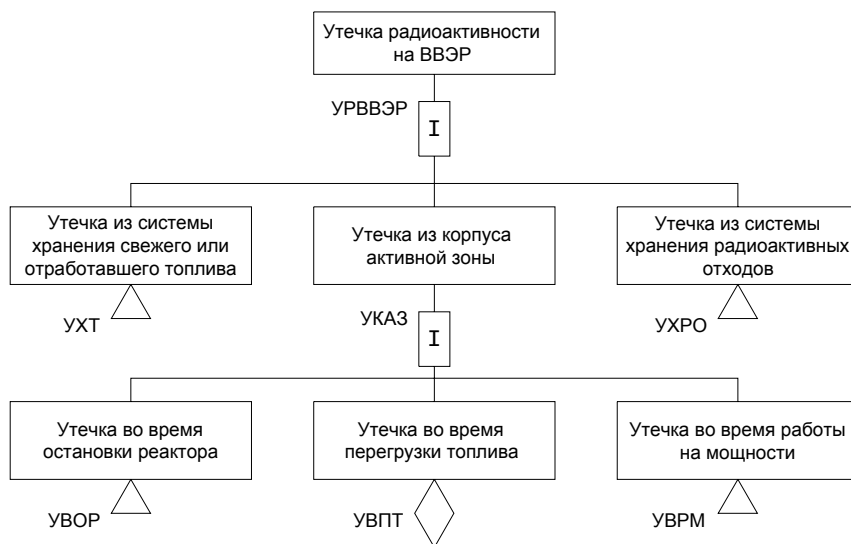


Рис. 7.1. Верхняя часть ДПД для реактора типа ВВЭР

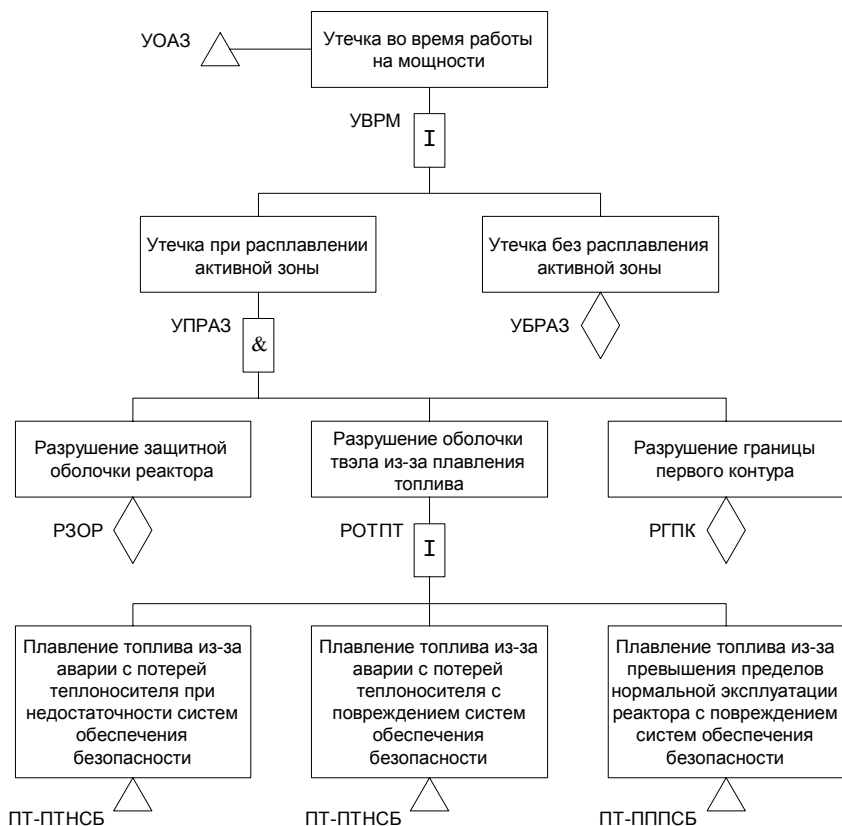


Рис. 7.2. Пример раскрытия события третьего уровня

Следующим шагом в определении охраняемой зоны является определение местонахождения элемента ЯУ, повреждение которого может вызвать заданное событие. Для этого надо дерево событий (рис. 7.3) преобразовать в дерево местонахождений.

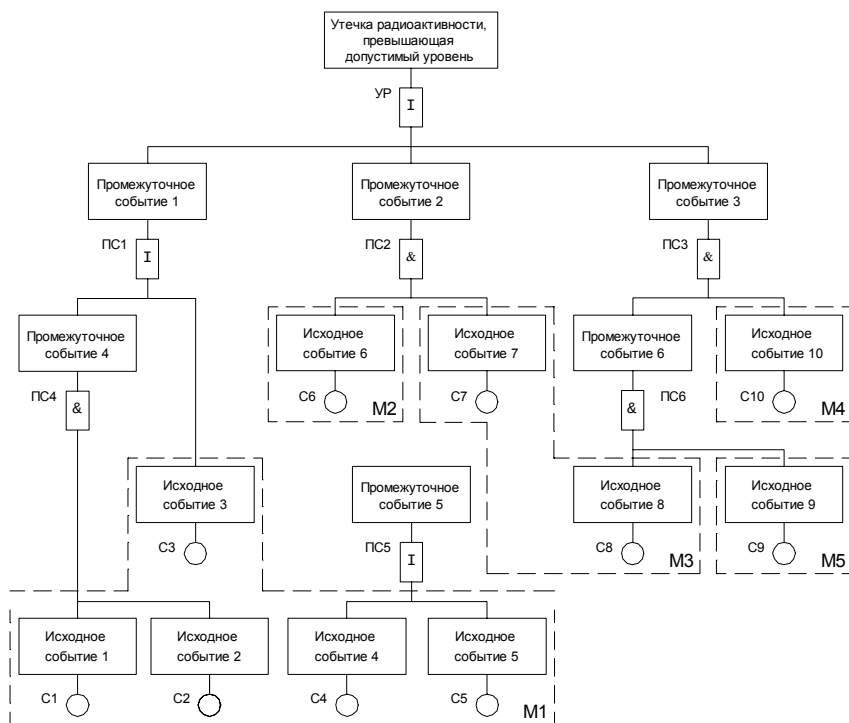


Рис. 7.3. Пример дерева событий

Допустим, что местонахождения M1...M5 соответствуют исходным событиям C1...C10.

Исходные события C1...C5 могут произойти в местонахождении M1, C6 – в M2, C7 и C8 – в M3, C9 – в M5, C10 – в M4. Анализ схемы показывает, что для совершения конечного события (верхнего на схеме) является достаточным совершение любой группы событий из следующих шести:

1. C3.
2. C4.
3. C5.
4. C1 и C2.
5. C6 и C7.
6. C8, C9 и C10.

Для преобразования схемы событий в схему местонахождений необходимо определить, какие местонахождения соответствуют данным событиям. Например, группа событий под номером 6 (С8, С9 и С10) соответствует местонахождениям М3, М4 и М5. Таким образом, местонахождениями, соответствующими полученным шести группам событий, являются:

1. С3 – М1.
2. С4 – М1.
3. С5 – М1.
4. С1 и С2 – М1.
5. С6 и С7 – М2 и М3.
6. С8, С9 и С10 – М3, М4 и М5.

Это означает, что акты диверсии, способные привести к указанному конечному событию, могут быть совершены или в местонахождении М1 или в М2 и М3 (одновременно) или в М3, М4 и М5.

Теперь строится дерево местонахождений. Следующим шагом является определение минимальных групп местонахождений (минимальных критических групп), защита которых предотвратит совершение указанного конечного события (опасного последствия). Одной из таких групп является, например, комбинация М1 и М3. Особенностью этой группы является то, что она имеет в своем составе общие члены со всеми ранее выявленными группами, местонахождение которых может быть инициировано совершением конечного события, т.е. с группами:

1. М1.
2. М2 и М3.
3. М3, М4 и М5.

Анализ показывает, что утечки радиоактивности не произойдет, если будет исключен доступ нарушителя в любую из следующих трех групп местонахождений:

1. М1 и М3.
2. М1, М2 и М4.
3. М1, М2 и М5.

Эти группы называются группами защиты.

При выборе конкретной группы для принятия мер по ее физической защите необходимо учитывать стоимость и влияние этих мер на работу ЯУ.

Аналогичные, хотя и более простые примеры можно привести и для случая хищения ЯМ.

ГЛАВА 8

ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ СФЗ*

Для объективной оценки приспособленности любой системы для выполнения возложенных на нее задач необходимо иметь **метод оценки эффективности** данной системы. Такие методы могут быть качественными, но лучше, если в их основу положены количественные показатели, позволяющие сравнивать различные варианты системы [1].

Эффективность как свойство конкретного класса систем зависит от их специфики. В частности, применительно к СФЗ можно дать следующее определение.

Эффективность СФЗ представляет собой свойство системы, заключающееся в способности СФЗ противостоять действиям нарушителя в отношении ядерных материалов, ядерных установок, других уязвимых мест (УМ) ЯО и предметов физической защиты с учетом определенных в процессе анализа уязвимости ЯО угроз и моделей нарушителя. Обеспечение необходимого уровня эффективности СФЗ должно предусматривать комплекс работ по контролю и анализу выполнения СФЗ возложенных на нее задач по обеспечению физической защиты и определению путей повышения эффективности СФЗ или поддержания ее на требуемом уровне.

Для унификации подходов к оценке эффективности разрабатываются соответствующие методики.

Для определения эффективности СФЗ необходимо оценить способность СФЗ пресечь несанкционированные действия нарушителя. Под термином **пресечение** понимается своевременный выход сил охраны на рубежи (к месту) нейтрализации нарушителя.

Задачами оценки эффективности являются:

- выявление элементов СФЗ, преодолевая которые нарушитель имеет наибольшую вероятность совершения диверсий или хищения ЯМ;
- рассмотрение и выявление наиболее вероятных сценариев действий нарушителя для совершения диверсий или хищения ЯМ;
- выявление уязвимых мест действующих СФЗ, формально отвечающих требованиям, установленным в нормативных документах;

* В написании данной главы принимал участие Д.А. Скворцов.

- анализ причин появления уязвимых мест в СФЗ;
- оценка вероятности пресечения тех или иных действий нарушителя силами охраны, действующими по сигналу тревоги при внешней и внутренней угрозе;
- выбор оптимальных проектных решений на этапе создания и модернизации СФЗ;
- подготовка предложений администрации ЯО и силам охраны ЯО по совершенствованию СФЗ и ее отдельных структурных элементов.

Проведение оценки эффективности СФЗ обязательно на этапе проектирования СФЗ при ее создании или совершенствовании. Количественный показатель эффективности может быть использован в процессе проектирования СФЗ для сравнения конкурирующих вариантов СФЗ, в том числе для обоснования целесообразности проведения ее модернизации. При этом сравниваются показатели эффективности существующей СФЗ и предлагаемого варианта СФЗ.

Для действующей СФЗ оценка эффективности проводится в полном объеме при отсутствии на ЯО результатов ранее проведенной оценки эффективности СФЗ с привлечением специализированной организации, а также в следующих случаях:

- при планируемых изменениях на объекте в СФЗ ЯО;
- по результатам проведения анализа уязвимости ЯО;
- при выявлении новых уязвимых мест в результате государственного надзора, ведомственного и внутриобъектового контроля безопасности ЯО.

В указанных случаях может проводиться как оценка эффективности СФЗ в полном объеме, так и уточнение результатов оценки эффективности, проведенной при проектировании СФЗ.

Основанием для проведения оценки эффективности при планируемых изменениях на объекте и в СФЗ ЯОО являются:

- изменение структуры объекта и дислокации УМ и ПФЗ ЯО;
- изменение вида или способа охраны;
- изменение численности подразделений охраны;
- передислокация мест расположения сил охраны;
- другие причины, связанные с изменением времени реагирования сил охраны на сигналы тревоги;

- изменение структуры и состава комплекса технических средств физической защиты.

Основанием для проведения оценки эффективности по результатам проведения анализа уязвимости действующего ЯОО, а также государственного надзора, ведомственного и внутриобъектового контроля безопасности ЯО являются:

- уточнение модели нарушителя;
- уточнение и выявление новых УМ и ПФЗ, в отношении которых могут быть совершены несанкционированные действия;
- выявление новых угроз для ЯО и способов их осуществления;
- изменение технологических процессов на ЯО;
- выявление элементов СФЗ, которые не отвечают предъявляемым к ним требованиям;
- выявление элементов СФЗ, преодолевая которые нарушитель имеет благоприятные возможности для совершения диверсий или хищения ЯМ или других ПФЗ;
- другие причины, повышающие уязвимость ЯМ, ЯУ и других ПФЗ.

Как отмечалось выше, в качестве основного критерия оценки эффективности СФЗ принимается способность СФЗ пресечь несанкционированные действия нарушителя. Эффективность СФЗ оценивается количественными показателями, отражающими **вероятность пресечения несанкционированных действий нарушителя** силами охраны, действующими по сигналу тревоги.

Показатели эффективности зависят от определенных в процессе анализа уязвимости ЯОО угроз, моделей нарушителя и уязвимых мест. Для оценки эффективности СФЗ применяют:

- **дифференциальный показатель эффективности**, учитывающий вероятность пресечения акции нарушителя против одной цели;
- **интегральный показатель**, представляющий собой усредненный с учетом важности целей показатель эффективности СФЗ по ЯО в целом.

При оценке эффективности учитываются:

- вероятности обнаружения нарушителя техническими средствами физической защиты (ТСФЗ);
- время задержки нарушителя физическими барьерами (ФБ);
- времена движения сил охраны и нарушителя на ЯО;

- взаимное расположение технических средств (возможность определения направления движения нарушителей);
- наличие систем и средств оптикоэлектронного наблюдения;
- наличие средств идентификации вторжения (контрольно-следовая полоса, пломбы);
- тактика действий сил охраны;
- оснащение нарушителя (транспортные средства, инструменты, оружие и др.).

Оценка эффективности основана на **событийно–временном анализе** развития конфликтной ситуации в системе «охрана – нарушитель» при внешней и внутренней угрозах.

Цели нарушителя рассматриваются только в стационарном состоянии.

Оценка эффективности СФЗ проводится для двух типов акций нарушителя:

- хищение ЯМ и других предметов физической защиты;
- диверсия против ЯМ, ЯУ или пункта хранения ЯМ.

Работы обычно проводятся в два этапа. На первом этапе, на основе инженерных расчетов, проводится предварительная оценка эффективности СФЗ. На втором этапе, с помощью специализированного программного обеспечения, проводится окончательная оценка эффективности СФЗ.

Работа проводится в следующей последовательности:

- формирование рабочей группы и организация совещания специалистов по оценке эффективности СФЗ ЯО;
- сбор исходных данных для проведения оценки эффективности СФЗ ЯО;
- разработка формализованного описания ЯО;
- оценка эффективности СФЗ ЯО при внешней угрозе;
- оценка эффективности СФЗ ЯО при внутренней угрозе;
- оформление и анализ результатов оценки эффективности СФЗ ЯО.

Оценка эффективности СФЗ проводится отдельно для внешних и внутренних угроз.

Эффективность СФЗ при внешней угрозе проводится для всех уязвимых мест ЯО с учетом моделей нарушителя, разработанных при проведении анализа уязвимости ЯО и уточненных на этапах

сбора исходных данных и составления формализованного описания объекта.

При оценке показателя эффективности предполагается, что внешний нарушитель при преодолении каждого рубежа СФЗ может выбрать один из двух вариантов действий:

- вариант 1 – внешний нарушитель преодолевает рубеж ФЗ, по возможности, скрытно. Такой вариант характеризуется низким значением вероятности обнаружения и значительным временем преодоления ФБ;

- вариант 2 – внешний нарушитель преодолевает рубеж ФЗ, по возможности, быстро, в том числе, используя специальные силовые инструменты и взрывчатые вещества для разрушения ФБ. Такой вариант характеризуется высоким значением вероятности обнаружения и малым временем преодоления ФБ.

Оценка эффективности СФЗ при внешней угрозе должна проводиться для обоих вариантов действий нарушителя.

Интегральный показатель эффективности СФЗ ЯО при внешней угрозе ($P_{\text{внеш.}}$) оценивается исходя из выражения:

$$P_{\text{внеш.}} = \sum_{j=1}^J \beta_j * P_{\text{внеш.}j}, \quad (8.1)$$

где J – число целей нарушителя на ЯО; β_j – весовой коэффициент, отражающий важность (категорию) j -й цели; $P_{\text{внеш.}j}$ – дифференциальный показатель эффективности СФЗ – вероятность предотвращения акции внешнего нарушителя против j -й цели.

Весовой коэффициент β_j определяется методом экспертных оценок рабочей группой.

Дифференциальный показатель эффективности СФЗ оценивается исходя из выражения:

$$P_{\text{внеш.}j} = 1 - \prod_{k=1}^K (1 - P_{\text{внеш.}jk}), \quad (8.2)$$

где K – общее количество отдельных групп сил реагирования (периметровая тревожная группа и др.), участвующих в развитии конфликтной ситуации при проникновении нарушителя на ЯО; $P_{\text{внеш.}jk}$

– вероятность пресечения k -й группой сил реагирования акции внешнего нарушителя против j -й цели.

При рассмотрении нескольких сценариев действий нарушителя против j -й цели, дифференциальный показатель эффективности ее защиты принимается равным минимальному значению по всем рассмотренным сценариям.

Сценарий действий нарушителя, соответствующий минимальному значению вероятности предотвращения акции против j -й цели, принимается в качестве критического.

Вероятность предотвращения k -й группой сил реагирования акции внешнего нарушителя против j -й цели в общем случае является функцией:

$$P_{\text{внеш}\cdot jk} = f(P_{o_{jl}}, P_{\text{зах}\cdot jkl}) \quad (l = 1, \dots, L), \quad (8.3)$$

где L – общее количество рубежей СФЗ, которые необходимо преодолеть внешнему нарушителю для проникновения к j -й цели; $P_{o_{jl}}$ – вероятность обнаружения нарушителя, действующего против j -й цели на l -ом рубеже СФЗ; $P_{\text{зах}\cdot jkl}$ – вероятность захвата k -й группой сил реагирования, действующей по сигналам начиная с l -го рубежа СФЗ, нарушителя, совершающего акцию против j -й цели.

Вероятности обнаружения принимаются равными значениям тактико–технических характеристик для соответствующих ТСФЗ, указанным в технической документации.

Вероятности захвата нарушителя определяются с учетом выполнения условия:

$$\Delta T = T_{\text{ср}} - T_{\text{н}} < 0 \quad (8.4)$$

для соответствующей оперативной ситуации. Здесь ΔT – резерв времени сил охраны; $T_{\text{ср}}$ и $T_{\text{н}}$ – времена действий сил реагирования и нарушителя (с момента поступления сигнала тревоги) соответственно.

Вероятности захвата оцениваются согласно выражению

$$P(\Delta T = T_{\text{ср}} - T_{\text{н}} < 0) = F(-x), \quad (8.5)$$

где $F(x)$ – функция распределения стандартной нормальной случайной величины; x – математическое ожидание приведенного резерва времени сил охраны, определяемое из выражения:

$$x = \frac{M[T_{\text{ср}}] - M[T_{\text{н}}]}{\sqrt{D[T_{\text{ср}}] + D[T_{\text{н}}]}}, \quad (8.6)$$

где $M[T]$ и $D[T]$ – математическое ожидание и дисперсия времен сил охраны и нарушителя соответственно.

Значения времен нарушителя и охраны складываются из составляющих, относящихся к различным этапам их действий (для нарушителя – время преодоления ФБ реагирования – время сборов, время движения, время осмотра участка периметра и т.п.). Расчет математических ожиданий и дисперсий времен действий нарушителя и охраны производится исходя из соотношения для суммы независимых случайных величин, согласно которому при $T = \sum_{i=1}^I ti$

имеем:

$$M[T] = \sum_{i=1}^I M[ti], \quad (8.7)$$

$$D[T] = \sum_{i=1}^I D[ti], \quad (8.8)$$

где ti , $i=1, \dots, I$ – отдельные случайные величины; $M[ti]$ и $D[ti]$ – математические ожидания и дисперсии величин ti .

Эффективность СФЗ при внутренней угрозе проводится для всех уязвимых мест ЯО с учетом полномочий различных групп персонала объекта. Под группой персонала понимается группа сотрудников ЯОО, имеющих одинаковые полномочия доступа.

Оценка эффективности должна проводиться для каждой группы персонала отдельно.

При расчетах показателя эффективности предполагается, что внутренний нарушитель при преодолении каждого рубежа СФЗ может выбрать один из двух вариантов действий:

вариант 1 – внутренний нарушитель преодолевает рубеж ФЗ, используя свои служебные полномочия, по путям санкционирован-

ного прохода. При этом, для уменьшения вероятности пресечения акции, внутренний нарушитель может пытаться выбросить/забросить запрещенные к проносу предметы из/в зону ФЗ, используя каналы, не доступные для проникновения человека (трубопроводы, окна верхних этажей, между прутьев решетки и т.д.);

вариант 2 – внутренний нарушитель преодолевает рубеж ФЗ «силовым» способом, используя несанкционированный канал проникновения, аналогично внешнему нарушителю. Предполагается, что последующие рубежи ФЗ нарушитель преодолевает также «силовым» способом.

Оценка эффективности СФЗ при внутренней угрозе проводится в предположении, что сценарий действий нарушителя состоит из двух частей – проход с использованием своих полномочий до какой-либо зоны ФЗ и затем «силовой» прорыв. В частном случае второй этап действий нарушителя может отсутствовать.

При оценке рассматриваются различные наборы инструментов и материалов, которые нарушитель может пронести на объект и использовать при прорыве к цели и совершении акции.

При оценке учитывается возможность использования для совершения несанкционированных действий инструментов и материалов, находящихся на ЯОО в силу производственной или иной необходимости.

Интегральный показатель эффективности СФЗ ЯО при внутренней угрозе ($P_{\text{внут.}}$) для каждой из целей оценивается исходя из выражения:

$$P_{\text{внут.}} = \sum_{i=1}^I \gamma_i \cdot P_{\text{внут.}i}, \quad (8.9)$$

где I – число групп персонала, выделенных на объекте, применительно к рассматриваемой цели; γ_i – весовой коэффициент, равный отношению числа лиц, относящихся к i -й группе к общему числу сотрудников ЯО; $P_{\text{внут.}i}$ – дифференциальный показатель эффективности СФЗ ЯОО при внутренней угрозе – вероятность предотвращения акции нарушителем из числа i -й группы допуска против рассматриваемой цели.

Дифференциальный показатель эффективности СФЗ ЯОО оценивается, исходя из выражения:

$$P_{\text{внут.}i} = 1 - \left(\prod_{l=1}^L (1 - P_{\text{внут.}il}) \right) \cdot (1 - P_{li}), \quad (8.10)$$

где L – количество рубежей ФЗ, преодолеваемых нарушителем с использованием своих служебных полномочий; $P_{\text{внут.}il}$ – вероятность задержания нарушителя, проносящего запрещенные предметы или объект хищения, на контрольно–пропускном пункте (КПП) l -го рубежа ФЗ; P_{li} – вероятность захвата нарушителя, действующего «силовым» способом из секции, находящейся за l -м рубежом ФЗ.

При рассмотрении нескольких сценариев действий внутреннего нарушителя против j -й цели, дифференциальный показатель эффективности ее защиты принимается равным минимальному значению по всем рассмотренным сценариям.

Вероятность задержания нарушителя на КПП, проносящего запрещенные предметы и материалы, в общем случае определяется из выражения:

$$P_{\text{внут}}^* = 1 - (1 - P_{\text{досм}}^* \cdot P_{\text{досм}}) \cdot (1 - P_{\text{мет}}^* \cdot P_{\text{мет}}) \cdot (1 - P_{\text{ВВ}}^* \cdot P_{\text{ВВ}}) \cdot (1 - P_{\text{ЯМ}}^* \cdot P_{\text{ЯМ}}), \quad (8.11)$$

где $P_{\text{досм}}^*$ – вероятность проведения личного досмотра; $P_{\text{досм}}$ – вероятность обнаружения запрещенных предметов при досмотре; $P_{\text{мет}}^*$ – вероятность проведения досмотра с применением металлообнаружителя; $P_{\text{мет}}$ – вероятность обнаружения металлических предметов при помощи металлообнаружителя; $P_{\text{ВВ}}^*$ – вероятность проведения досмотра с применением детектора ВВ; $P_{\text{ВВ}}$ – вероятность обнаружения ВВ при помощи детектора ВВ; $P_{\text{ЯМ}}^*$ – вероятность проведения досмотра с применением детектора ЯМ; $P_{\text{ЯМ}}$ – вероятность обнаружения ЯМ при помощи детектора.

Примечание. Если у нарушителя отсутствует тот или иной, запрещенный к проносу материал или предмет, то вероятность обнаружения для соответствующего детектора принимается равной «0».

Вероятности захвата внутреннего нарушителя, действующего «силовым» способом (P_{li}), определяются аналогично вероятностям захвата внешнего нарушителя. При этом не учитываются рубежи ФЗ, пройденные внутренним нарушителем легальным способом (считается, что нарушитель дошел до секции, находящейся за l -м рубежом ФЗ, необнаруженным).

Показатель эффективности СФЗ является основным показателем качества, характеризующим применение СФЗ по назначению. Однако на практике любая система характеризуется и другими показателями. Например, немаловажным фактором являются затраты на создание и эксплуатацию системы. Важны также и другие свойства системы (надежность, помехоустойчивость и др.).

Чтобы оценить СФЗ на наличие каждого из этих свойств необходимо:

- выбрать количественный показатель, характеризующий данное свойство;
- разработать методику его оценки;
- иметь необходимые исходные данные.

Например, количественным показателем затрат является стоимость необходимого оборудования СФЗ и работ по оснащению ЯО техническими средствами физической защиты. Методика получения стоимостных показателей достаточно проста и традиционна — это сметные расчеты. Размерность данного показателя (рубль или USD) также понятна.

Надежность КТСФЗ, как и любой другой технической системы, характеризуется показателями безотказности (среднее время наработки на отказ и др.), ремонтпригодности (среднее время восстановления и др.) и т.п.

Помехоустойчивость обычно характеризуется таким показателем, как среднее время наработки на ложное срабатывание технических средств.

Можно предложить использовать показатели, характеризующие такие «тонкие» свойства системы, как скорость развертывания сигнализационных средств (для мобильных технических средств), маскируемость и др.

Имеются соответствующие методики, которые позволяют получить количественную оценку указанных показателей, а также соответствующие базы исходных данных.

Следует отметить, что работа по сбору необходимых ИД, подготовке к расчетам и непосредственно оценке эффективности СФЗ требует проведения значительного количества рутинных действий и вычислений. При этом в процессе разработки концептуального проекта оценка эффективности проводится неоднократно, по мере выбора оптимальных (целесообразных) решений. Эти и ряд других

факторов неизменно приводят к мысли о необходимости **автоматизации** процедуры оценки эффективности СФЗ и, как следствие, к **разработке специализированных компьютерных программ**. Техническая революция в области создания и применения персональных компьютеров сделала эту задачу актуальной и выполнимой.

В России широко известны американские специализированные компьютерные программы, предназначенные для оценки эффективности СФЗ, такие как:

- **EASY, SAVI** – программы MS DOS, предназначенные для оценки эффективности СФЗ при «внешней» угрозе [2];
- **ET** – программа MS DOS, предназначенная для оценки эффективности при «внутренней» угрозе;
- **ASSESS – WINDOWS** программа, предназначенная для оценки эффективности СФЗ при «внешней» и «внутренней» угрозах, при сговоре «внешнего» и «внутреннего» нарушителей, расчета вероятности нейтрализации вооруженного противника [3].

Наибольшее распространение в России получила программа **ASSESS**, переданная российским ЯОО в рамках международного сотрудничества. Эта программа имеет ряд существенных преимуществ, по сравнению с более ранними американскими специализированными компьютерными программами.

Однако в ходе применения программы **ASSESS** российскими ЯОО и с приобретением практического опыта работ, был выявлен ряд недостатков этой программы, ограничивающих возможности ее применения на российских ЯОО. Например, в программе **ASSESS** заложена жесткая тактика действий сил реагирования, не всегда соответствующая российской специфике. Кроме того, в составе программы **ASSESS** отсутствует база данных по реальным тактико-техническим характеристикам ТСФЗ и ФБ, относящихся к чувствительной информации.

В России также ведутся работы по созданию отечественных специализированных компьютерных программ оценки эффективности СФЗ, позволяющих максимально полно учитывать российскую специфику. В качестве примера можно привести компьютерную программу **ВЕГА–2**, предназначенную для оценки эффективности СФЗ как при «внешней», так и при «внутренней» угрозах, по-

звolyющую производить расчеты на основе аналитического метода и имитационного моделирования [4].

Особенно следует отметить программный комплекс (ПК) ВЕГА–2, который позволяет более гибко описывать тактики действий сил охраны и вероятного нарушителя, учитывает целеуказующую функцию средств обнаружения, существенную для объектов с разветвленным деревом целей нарушителя, позволяет оценить вклад применения охранного телевидения на различных рубежах ФЗ и др. ПК ВЕГА–2 постоянно совершенствуется и модернизируется с учетом практического опыта его применения на конкретных ЯОО.

Список литературы

1. Измайлов А.В. Методы проектирования и анализа эффективности систем физической защиты ядерных материалов и установок. М.: МИФИ, 2002.
2. Описание компьютерной программы SAVI. Sandia NL, 1990.
3. Описание компьютерной программы ASSESS. Материалы тренинг–курса по обучению пользования программой. LLNL, США, 1995.
4. Описание компьютерной программы «ВЕГА–2». ГУП СНПО «Элерон», Минатом России, 1999.

ГЛАВА 9

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ СФЗ С СИСТЕМОЙ УЧЕТА И КОНТРОЛЯ ЯМ

Несмотря на существенное отличие описанных выше систем физической защиты и системы учета и контроля, они имеют общую цель, заключающуюся в обеспечении сохранности ядерного материала.

Возникает вопрос о возможности обеспечения взаимодействия указанных систем с целью повышения защищенности ЯМ. При этом целесообразно сохранять их «автономию», чтобы не нарушать сложившихся на российских ЯО типовых организационных структур.

Можно рассмотреть следующие виды взаимодействия СФЗ и СУиК:

- техническое;
- организационное;
- информационное.

Техническое взаимодействие предполагает использование одних и тех же элементов для решения задач каждой из систем. Например, одна и та же телекамера может быть использована и как средство контроля и сохранности ЯМ в СУиК, и как средство оценки ситуации в СФЗ.

Таковыми общими элементами могут быть также печати и пломбы на входах в помещения.

Однако такое совмещение элементов порождает много организационных трудностей, например, связанных с разделением ответственности за работу данного элемента и т.п.

Взаимодействие СФЗ и СУиК на уровне **организационных мероприятий** предполагает обеспечение взаимодействия персонала этих систем в различных ситуациях, что должно быть закреплено в соответствующих нормативных документах, объектового уровня (инструкции, положения, планы).

Предполагается, что в современных СФЗ и СУиК должна обеспечиваться **автоматизированная обработка данных**, поэтому

можно обеспечить **информационное взаимодействие** между ними на уровне баз данных каждой системы.

Проиллюстрируем это на примере. Предположим, необходимо санкционированно переместить ЯМ в пределах ЯО из одной зоны баланса материала (ЗБМ) в другую. Составляется заявка, СУиК ее обрабатывает и «информирует» СФЗ о предстоящей операции (место, время, допущенный персонал).

После этого СФЗ оформляет соответствующие разрешительные процедуры (вход в здание, в помещение – хранилище ЯМ и т.п.), которые затем будут реализованы через соответствующие пропускные устройства.

Упрощенный пример процедуры передачи ЯМ из одной ЗБМ в другую показан на рис. 9.1, из которого видно, что обе системы работают попеременно, обеспечивая комплексный контроль за операциями с ядерным материалом. Любое отклонение или про-пуск в какой-либо операции будет расценен системой безопасности как тревожная ситуация.

Реализация такого подхода позволяет повысить защищенность ЯМ.

№ п/п	Операция	Функции технических средств	Техническое устройство	Система, ответственная за операцию
1	Проход получателей ЯМ в здание №1	Проверка идентификационных признаков получателей на внутреннем КПП зд. №1	Кабина СУД	СФЗ
2	Посещение получателями ответственного хранителя ЯМ в здании №1	Проверка права на получение ЯМ (наряда)	Пульт хранителя	СУиК
3	Совместное (хранитель и получатель) прохождение в хранилище ЯМ	Проверка идентификационных признаков и выполнения правила «двух лиц» на вход в помещение хранилища	Дверной терминал СУД	СФЗ
4	Оформление передачи ЯМ от хранителя получателю	Проверка соответствия ЯМ заявке и изменение данных о местоположении ЯМ	Терминал в хранилище	СУиК
5	Совместный выход из хранилища ЯМ	Отметка о совместном выходе	Дверной терминал СУД	СФЗ
6	Выход получателей из здания №1	Проверка идентификационных признаков, в том числе на наличие ЯМ	Кабина СУД	СФЗ
7	Транспортировка ЯМ по территории объекта в здание №2	Обеспечение охраны ЯМ при транспортировке	Технические средства охраны и связи	СФЗ
8	Проход получателей в здание №2	Проверка идентификационных признаков на внутреннем КПП зд. №2	Кабина СУД	СФЗ
9 ...	Далее – повторение в здании №2 операций №2–6 с той лишь разницей, что ЯМ не изымается, а помещается в хранилище ЯМ здания №2			

Рис. 9.1. Упрощенный пример процедуры санкционированной передачи ЯМ из одной ЗБМ (здание №1) объекта в другую (здание №2)

СПИСОК ТЕРМИНОВ

Определения терминов взяты из работы «Терминологический словарь по учету, контролю и физической защите ядерных материалов» М.: ЦНИИАтоминформ, 2000.

Административный контроль	– контроль, осуществляемый при участии администрации ядерного объекта.
Аномалия	– несоответствие фактически наличного количества ЯМ данным учетных документов.
Атрибутивные признаки	– данные, однозначно определяющие наличие, либо отсутствие какого-либо свойства ЯМ.
Баланс ЯМ	– соотношение между зарегистрированным и фактически наличным количеством ЯМ.
Балк-форма ЯМ	– ЯМ в виде жидкости, газа или порошка, а также в виде большого количества предметов, не имеющих индивидуальных идентификаторов.
Баркод	– символ, представляющий собой набор параллельных штрихов различной толщины, расположенных с переменным шагом.
Безвозвратные потери ЯМ	– потери ЯМ при их обработке, длительном хранении или испытаниях, оцененные расчетным методом.
Безопасность ядерной деятельности	– условия, при которых отсутствует недопустимый риск ядерной, радиационной аварии, или несанкционированных действий с ЯМ.
Бухгалтерский учет ЯМ	– строго детерминированный учет ЯМ в денежном и материальном выражении.
Вид ядерного материала	– ядерные материалы, обладающие одинаковым или близким изотопным составом.

Визуальный контроль	– контроль, осуществляемый с помощью органов зрения.
Воспроизводящий ЯМ	– материал, который может превратиться в расщепляющийся материал после поглощения нейтрона.
Время конверсии ЯМ	– период времени, необходимый в оптимальных условиях для конверсии данной формы ЯМ в металлические компоненты ядерного взрывного устройства.
Выборка	– отбор проб ЯМ по определенному правилу.
Выборочный контроль ЯМ	– контроль ЯМ, при котором вывод делается по результатам анализа случайной выборки из общего количества учетных единиц.
Высокообогащенный уран	– уран с обогащением не менее 20 % по изотопу U-235.
Гарантии нераспространения ядерного оружия	– система мер, обеспечивающая нераспространение ядерного оружия.
Гарантии МАГАТЭ	– система мер, применение которых осуществляет МАГАТЭ согласно его Уставу и ДНЯО, в целях нераспространения ядерного оружия.
Данные партии	– данные об общей массе, элементном и изотопном составе ЯМ.
Делящийся материал	– расщепляющийся материал, ядра которого могут эффективно делиться нейтронами малых энергий.
Диверсия	– любое преднамеренное действие в отношении ЯМ, ядерных установок, пунктов хранения ЯМ или перевозящих ЯМ и ядерные установки транспортных средств, способные прямо или косвенно привести к аварийной ситуации и создать угрозу здоровью или жизни лю-

	дей в результате воздействия радиации и радиоактивного загрязнения окружающей среды.
Допуск	– оформление в установленном порядке разрешения на проход/проезд в охраняемые зоны, проведение определенной работы, получение определенных документов и сведений.
Доступ	– проход в зоны нахождения ЯМ.
Журнальный учет ЯМ	– учет ЯМ материально ответственным лицом в ЗБМ по журналам установленных форм.
Задержка нарушителя	– принятие мер, направленных на замедление продвижения нарушителя к цели по территории охраняемой зоны.
Защищенная зона	– территория ядерного объекта, которая окружена физическими барьерами, постоянно находящимися под охраной и наблюдением, и доступ в которую ограничивается и контролируется.
Значимое количество ЯМ	– количество ЯМ, в отношении которого с учетом любого процесса конверсии нельзя исключить возможность создания ядерного взрывного устройства.
Зона баланса материалов	– административно установленная замкнутая область, где на основании измеренных величин определяют все входящие и выходящие потоки ядерных материалов и на периодической основе – их наличное количество.
Идентификационные признаки	– уникальные признаки, присущие или искусственно привнесенные предмету.
Идентификация учетной единицы	– установление соответствия идентификационных признаков данным учетных документов.

Инвентаризационная разница	– разница между зарегистрированным и фактически наличным количеством ЯМ в ЗБМ.
Интегрированная система	– совокупность нескольких систем, существующих в условиях взаимозависимого функционирования.
Категория ядерного материала	– количественная характеристика значимости ядерного материала с точки зрения специального обращения с ним.
Ключевая точка измерений ЯМ	– место в ЗБМ, оборудованное для измерения параметров ЯМ и его атрибутивных признаков.
Контейнер	– тара для ЯМ.
Контроль ядерных материалов	– меры предотвращения несанкционированного использования ЯМ.
Контрольно–пропускной пункт	– место на периметре охраняемой зоны, оборудованное инженерно–техническими средствами и системами для осуществления санкционированного доступа на ее территорию.
Лигатурная масса ЯМ	– масса материала, содержащего химическую или физическую композицию ЯМ с инертным веществом.
Материально–балансовый отчет	– отчетный документ о фактическом наличии и балансе ядерных материалов за межбалансовый период в ЗБМ.
Материально ответственное лицо	– сотрудник предприятия, на которого возложена ответственность за хранение всего ЯМ внутри ЗБМ.
Межбалансовый период	– период времени между двумя последовательными физическими инвентаризациями.

Надзор за системой учета и контроля ЯМ	– форма контрольной деятельности, связанная с проверкой соблюдения принятых норм и правил учета и контроля ЯМ.
Накладная	– сопроводительный документ, содержащий основные учетные данные о передаваемом ЯМ.
Нарушитель	– лицо, совершившее или пытающееся совершить несанкционированное действие, а также лицо, оказывающее содействие в этом.
Неразрушающий анализ ЯМ	– определение характеристик ЯМ без нарушения целостности изделий, содержащих ЯМ.
Несанкционированное действие	– совершение или попытка совершения хищения ЯМ, несанкционированного доступа к ЯМ, вмешательства, диверсии, проноса (провоза) запрещенных предметов, вывода из строя средств учета, контроля и физической защиты ЯМ.
Несанкционированный доступ	– доступ без документально оформленного права на него.
Низкообогащенный уран	– уран с обогащением менее 20 % по изотопу U-235.
Норма потерь ЯМ	– обоснованное и утвержденное количество ЯМ, потеря которого допустима при осуществлении конкретного технологического процесса.
Обращение с ЯМ	– ядерная деятельность, непосредственно связанная с ЯМ.
Отчет об изменении инвентарного количества ЯМ	– отчетный документ о произошедших изменениях количеств ядерных материалов в ЗБМ.
Отчетные документы	– документы, содержащие данные о ЯМ и представляемые в вышестоящие, контрольные и (или) надзорные органы.

Партия ЯМ	– группа однотипных изделий, содержащих ЯМ, параметры которых определяются единым комплексом измерений.
Паспорт учетной единицы	– документ, сопровождающий учетную единицу и содержащий данные по основным ее параметрам.
Передача ЯМ	– процедуры измерения ЯМ и оформления учетных документов при перемещении ЯМ от поставщика к получателю.
Пломба	– устройство, предназначенное для индикации вмешательства путем идентификации ее целостности.
Погрешность измерения	– отклонение результата измерения от истинного значения измеряемой величины.
Подтверждающие измерения ЯМ	– измерения параметров партии ЯМ или атрибутивных признаков ЯМ с целью подтверждения полученных ранее учетных данных.
Правило двух (трех) лиц	– принцип групповой работы с ЯМ, основанный на наблюдении одного сотрудника за действиями другого.
Предел инвентаризационной разницы ЯМ	– установленная величина инвентаризационной разницы, превышение которой рассматривается как аномалия.
Представительная проба	– проба, взятая из предметов, содержащих ЯМ, с определенными типичными характеристиками для группы таких предметов.
Разница в данных отправителя/получателя ЯМ	– установленное несоответствие между количеством ЯМ, указанным отправителем (паспортные данные), и значением, полученным получателем в процессе подтверждающих измерений.

Разрушающий анализ ЯМ	– определение характеристик ЯМ путем взятия и дальнейшего анализа его пробы.
Сверка ЯМ	– проверка соответствия фактически наличного количества ЯМ в ЗБМ учетным данным.
Система охранной сигнализации	– совокупность средств обнаружения, тревожно–вызывной сигнализации, системы сбора, обработки и отображения информации в СФЗ.
Система управления доступом	– подсистема СФЗ, обеспечивающая решение задач управления доступом в охраняемые зоны.
Система телевизионного наблюдения	– средство контроля ЯМ, обнаружения нарушителя и оценки ситуации.
Система учета и контроля ЯМ	– система, предназначенная для своевременного получения достоверной информации о наличии, местонахождении, количестве и использовании ЯМ, а также своевременного установления несанкционированного использования ЯМ.
Система физической защиты	– система организационных, административных и правовых мер и инженерно–технических средств, предназначенных для обеспечения физической защиты ЯМ и ядерных установок на конкретном ядерном объекте.
Сохранность ЯМ	– обеспечение условий, исключающих несанкционированные действия с ЯМ.
Специальные ядерные материалы	– материалы, не содержащие или не способные воспроизвести ядерные материалы, но которые могут быть использованы в ядерных взрывных устройствах.
Список наличных количеств ядерных материалов	– перечень наличных ядерных материалов с указанием их количеств, составленный на основании учетных данных.

Список фактически наличных ядерных материалов – перечень фактически наличных ядерных материалов с указанием их количеств, определенных в результате физической инвентаризации.

Средства контроля доступа – технические средства, предназначенные для обнаружения несанкционированных действий с ЯМ и проникновения в зоны ограниченного доступа. Подразделяются на системы наблюдения и устройства индикации вмешательства.

Средство обнаружения – техническое устройство, предназначенное для автоматической подачи сигнала тревоги в случае несанкционированного действия в зоне, на которую оно рассчитано.

Страта – объединенные в группу отдельные учетные единицы или партии ЯМ с одинаковыми или близкими физическими и химическими характеристиками.

Устройство индикации вмешательства – техническое средство, предназначенное для обнаружения несанкционированного доступа к ядерным материалам (печати, пломбы).

Учет ЯМ – совокупность мер и технических средств, которые позволяют с достаточной надежностью определять наличные количества ЯМ и потоки ЯМ.

Учетная единица – поддающийся идентификации предмет, содержащий ЯМ (имеющий индивидуальный номер или другой идентификатор), целостность которого остается неизменной в течение установленного периода времени.

Учетные документы – документы, содержащие данные по наличию, количеству, составу, местонахождению и состоянию ЯМ, с помощью которых осуществляется их учет.

Учетные измерения	– измерения параметров партии ЯМ, результаты которых (включая погрешность измерений) вносятся в учетные документы как паспортные значения.
Физический барьер	– физическое препятствие, обеспечивающее задержку нарушителя.
Физическая инвентаризация ЯМ	– определение фактически наличного количества ядерных материалов путем измерений.
Форма ЯМ	– физико–химическое состояние ЯМ (металлическая форма, раствор, газообразная форма, порошок и т.п.).
Формы учетных и отчетных документов	– установленные образцы оформления данных по учету и контролю ЯМ.
Хищение ЯМ	– несанкционированное изъятие и перемещение ЯМ за пределы охраняемой зоны.
Эксплуатирующая организация	– организация, признанная пригодной эксплуатировать ядерную установку и осуществлять деятельность с ЯМ.
Эталонный ЯМ	– образец ЯМ, характеристики которого определены с установленной точностью, предназначенный для проверки приборов и методов измерений.
Эффективность системы	– свойство системы, отражающее ее приспособленность к выполнению основных поставленных перед ней целей.
Ядерная безопасность	– свойства ядерного объекта, обуславливающие невозможность ядерной аварии.
Ядерная деятельность	– деятельность по производству, использованию, хранению и транспортированию ЯМ, по

проектированию, строительству, эксплуатации и выводу из эксплуатации ядерных установок.

Ядерные материалы

– материалы, содержащие или способные воспроизвести делящиеся (расщепляющиеся) ядерные вещества.

Ядерная установка

– установка, в которой применяются или содержатся ядерные материалы.

Анатолий Васильевич Бушуев,
Василий Борисович Глебов,
Николай Иванович Гераскин,
Александр Владимирович Измайлов,
Эдуард Феликсович Крючков,
Владимир Вениаминович Кондаков

ОСНОВЫ УЧЕТА, КОНТРОЛЯ И ФИЗИЧЕСКОЙ ЗАЩИТЫ ЯДЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Учебное пособие

Под редакцией Э.Ф. Крючкова

Редактор Н.В. Шумакова
Компьютерная верстка Г.А. Бобровой

Подписано в печать 13.11.2007 Формат 60х84 1/16
Печ.л. 34 Уч.–изд.л. 34 Тираж 200 экз. Изд. № 1/22
Заказ № 0-625

*Московский инженерно–физический институт
(государственный университет).
115409, Москва, Каширское ш., 31*

*Типография издательства «Тровант»
г. Троицк Московской области*