

**Технологические и  
организационные аспекты  
обращения с  
радиоактивными  
отходами**

# Технологические и организационные аспекты обращения с радиоактивными отходами

Настоящая публикация была подготовлена следующим подразделением МАГАТЭ:

Waste Technology Section  
Международное агентство по атомной энергии  
Wagramer Strasse 5  
P.O. Box 100  
A-1400 Vienna, Austria

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ И ОРГАНИЗАЦИОННЫЕ АСПЕКТЫ ОБРАЩЕНИЯ С  
РАДИОАКТИВНЫМИ ОТХОДАМИ

МАГАТЭ, ВЕНА, 2005

IAEA-TCS-27

ISSN 1018–5518

© МАГАТЭ, 2005

Отпечатано МАГАТЭ в Австрии  
Сентябрь 2005

## ПРЕДИСЛОВИЕ

Научно-технический прогресс немыслим без развития атомной науки и техники. В различных областях человеческой деятельности – промышленности, медицине, науке, сельском хозяйстве и др. – использование радиоактивных изотопов и ядерных излучений все более расширяется, что сопровождается и ростом количества экологически опасных радиоактивных отходов. В связи с этим обезвреживание и локализация радиоактивных отходов является крупнейшей технической, экономической и социальной проблемой.

Внедрение новых технологий и новых стандартов, автоматизация процессов на всех стадиях обращения с радиоактивными отходами, ужесточение требований к их безопасности и усиление радиационного контроля – все это повышает требования к специалистам, работающим в области обращения с радиоактивными отходами. Повышение квалификации персонала, уровня его компетенции, общей культуры и кругозора – задача учебных курсов, семинаров и учебно-тренировочных и демонстрационных мероприятий, организуемых Международным Агентством по Атомной Энергии (МАГАТЭ).

В частности в 1995 году МАГАТЭ разработало и начало осуществление проекта создания международных учебно-тренировочных и демонстрационных центров с целью обучения персонала предприятий стран-членов МАГАТЭ основным методам и приемам переработки и хранения радиоактивных отходов, которые соответствуют международным и национальным стандартам и критериям безопасности. В рамках этого проекта созданы и действуют региональные учебно-тренировочные центры в Европе, Латинской Америке и Азии. В Европе такой центр создан в Российской Федерации на базе ГНЦ РФ ВНИИНМ им. А.А. Бочвара (Государственный Научный Центр Российской Федерации - Всероссийский Научно-Исследовательский Институт Неорганических Материалов) и ГУП МосНПО “Радон” (Государственное Унитарное Предприятие - Московское Научно-Производственное Объединение) для обучения представителей из стран Центральной и Восточной Европы.

Опыт показал, что участники учебных мероприятий, проводимых под эгидой МАГАТЭ, нуждаются в справочном пособии, способном помочь в освоении излагаемого на лекциях материала и закреплении полученных на демонстрационно-практических занятиях навыков для более углубленного их изучения. В этой связи и был подготовлен данный документ, представляющий собой сборник основных лекций по тематике обращения с радиоактивными отходами.

Предлагаемый материал не претендует на всеобъемлющее и детальное изложение всех вопросов обращения с радиоактивными отходами, так как подразумевается, что отдельные аспекты проблемы могут быть раскрыты более глубоко во время проведения специальных тематических курсов или других конкретных мероприятий. В то же время собранная в данном материале информация обеспечивает достаточную основу для проведения большинства учебных мероприятий МАГАТЭ, особенно с участием представителей стран-членов МАГАТЭ, в которых русский язык достаточно распространен и широко используется в научно-технических областях, в частности в области технологии обращения с радиоактивными отходами.

За основу данного сборника взяты лекции, прочитанные сотрудниками Секции по Технологий Обращения с Радиоактивными Отходами МАГАТЭ и ведущими

специалистами МосНПО “Радон”, ГНЦ РФ ВНИИНМ им. А.А. Бочвара на разного рода семинарах, курсах и конференциях. Список лиц, внесших свой вклад в подготовку данного лекционного материала, приведен в конце документа.

Секретариат МАГАТЭ выражает благодарность всем экспертам и авторам, кто принимал участие в подготовке данного материала, а также профессору С. А. Дмитриеву за прочтение рукописи и сделанные ценные замечания, сотрудникам МосНПО “Радон” Волкову А.С., Карлину Ю.В., Арустамову А. Э., Агриненко В. В., Полканову М. А., Флиту В.Ю., Варлакову А.П., Семенову К.Н., Волковой Е.В., Семеновой И.В. за предоставленные материалы, а также особая благодарность Щербатовой Т. Д. за техническую и редакторскую правку. Ответственными за подготовку данного материала являлись сотрудники Отдела Ядерного Топливного Цикла и Обращения с Радиоактивными Отходами МАГАТЭ, Р. Бурцл и В. Ефременков.

### **ПРИМЕЧАНИЯ РЕДАКТОРА**

*Использование названий отдельных стран или территорий не предполагает каких-либо суждений со стороны издателя, каковым является МАГАТЭ, относительно юридического статуса этих стран или территорий; их правительств и учреждений, а также установленных государственных границ.*

*Упоминание наименований отдельных фирм или продуктов производства (независимо от факта их регистрации) не означает посягательство на их право собственности; это не означает также их поддержку или рекомендации со стороны МАГАТЭ.*

## СОДЕРЖАНИЕ

<b>1</b>	<b>БАЗОВЫЕ ПРИНЦИПЫ И НАЦИОНАЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ ОБРАЩЕНИЯ С РАДИОАКТИВНЫМИ ОТХОДАМИ</b>	<b>1</b>
1.1	ВВЕДЕНИЕ .....	1
1.2	ЦЕЛЬ ОБРАЩЕНИЯ С РАДИОАКТИВНЫМИ ОТХОДАМИ .....	2
1.3	ПРИНЦИПЫ ОБРАЩЕНИЯ С РАДИОАКТИВНЫМИ ОТХОДАМИ .....	2
1.4	СТАДИИ ОБРАЩЕНИЯ С РАДИОАКТИВНЫМИ ОТХОДАМИ .....	5
1.5	ЭЛЕМЕНТЫ НАЦИОНАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ ОБРАЩЕНИЯ С РАДИОАКТИВНЫМИ ОТХОДАМИ .....	7
1.6	ОТВЕТСТВЕННОСТЬ ГОСУДАРСТВА И ОБЯЗАННОСТИ РАЗЛИЧНЫХ ОРГАНИЗАЦИЙ ..	9
1.6.1	<i>Ответственность государства .....</i>	<i>9</i>
1.6.2	<i>Ответственность органов государственного регулирования .....</i>	<i>11</i>
1.6.3	<i>Обязанности организаций, производящих и перерабатывающих радиоактивные отходы ..</i>	<i>12</i>
<b>2</b>	<b>ИСТОЧНИКИ РАДИОАКТИВНЫХ ОТХОДОВ И СИСТЕМЫ ИХ КЛАССИФИКАЦИИ</b>	<b>14</b>
2.1	ВВЕДЕНИЕ .....	14
2.2	ИСТОЧНИКИ РАДИОАКТИВНЫХ ОТХОДОВ .....	14
2.2.1	<i>Радиоактивные отходы ядерного топливного цикла .....</i>	<i>15</i>
2.2.2	<i>Применение радиоактивных препаратов и облучателей в медицине .....</i>	<i>16</i>
2.2.3	<i>Применение в научных исследованиях .....</i>	<i>17</i>
2.2.4	<i>Производство радиоизотопов .....</i>	<i>18</i>
2.2.5	<i>Промышленные и другие применения .....</i>	<i>18</i>
2.2.6	<i>Радиоактивные материалы с природными радионуклидами .....</i>	<i>19</i>
2.3	ТИПЫ ОТХОДОВ .....	19
2.4	КЛАССИФИКАЦИЯ РАДИОАКТИВНЫХ ОТХОДОВ .....	20
2.4.1	<i>Системы классификации радиоактивных отходов .....</i>	<i>21</i>
2.5	СИСТЕМА КЛАССИФИКАЦИИ ОТХОДОВ МАГАТЭ .....	25
2.5.1	<i>Отходы, освобожденные от контроля .....</i>	<i>25</i>
2.5.2	<i>Низко и среднеактивные отходы .....</i>	<i>25</i>
2.5.3	<i>Высокоактивные отходы .....</i>	<i>25</i>
2.5.4	<i>Граничные уровни .....</i>	<i>25</i>
2.6	ПРИМЕРЫ НАЦИОНАЛЬНЫХ СИСТЕМ КЛАССИФИКАЦИИ .....	26
<b>3</b>	<b>СБОР, СОРТИРОВКА И ПЕРВИЧНАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАДИОАКТИВНЫХ ОТХОДОВ</b>	<b>29</b>
3.1	ВВЕДЕНИЕ .....	29
3.2	СБОР И ПЕРВИЧНАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ОТХОДОВ .....	30
3.3	РАЗДЕЛЬНЫЙ СБОР ЖИДКИХ ОТХОДОВ .....	31
3.3.1	<i>Водные радиоактивные отходы .....</i>	<i>32</i>
3.3.2	<i>Жидкие органические радиоактивные отходы .....</i>	<i>32</i>
3.4	РАЗДЕЛЬНЫЙ СБОР ТВЕРДЫХ ОТХОДОВ .....	33
3.5	МАРКИРОВКА КОНТЕЙНЕРОВ .....	34
3.6	ХРАНЕНИЕ ОТХОДОВ НА МЕСТАХ ИХ ОБРАЗОВАНИЯ .....	35
3.6.1	<i>Требования к хранилищам .....</i>	<i>35</i>
3.6.2	<i>Требования к упаковкам .....</i>	<i>36</i>
3.7	ПРИЛОЖЕНИЕ. КАТЕГОРИРОВАНИЕ ПЕРВИЧНЫХ ФОРМ ОТХОДОВ, ПРИНЯТОЕ В МОСКОВСКОМ НПО "РАДОН", РОССИЯ .....	38
<b>4</b>	<b>ВЫБОР ТЕХНОЛОГИЙ ОБРАБОТКИ РАДИОАКТИВНЫХ ОТХОДОВ, МИНИМИЗАЦИЯ ОТХОДОВ</b>	<b>41</b>
4.1	ВВЕДЕНИЕ .....	41
4.2	НЕТЕХНИЧЕСКИЕ ФАКТОРЫ, ВЛИЯЮЩИЕ НА ВЫБОР ТЕХНОЛОГИИ .....	41
4.3	ВЫБОР ТЕХНОЛОГИЙ С УЧЕТОМ ТЕХНИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ .....	43
4.4	ПРИМЕР ВЫБОРА ТЕХНОЛОГИЙ .....	48
4.5	ПРИЛОЖЕНИЕ. МИНИМИЗАЦИЯ РАДИОАКТИВНЫХ ОТХОДОВ .....	50
4.5.1	<i>Сокращение источников отходов .....</i>	<i>50</i>
4.5.2	<i>Минимизация объемов РАО для хранения и захоронения .....</i>	<i>53</i>

<b>5</b>	<b>ТЕХНОЛОГИИ ОБРАБОТКИ ЖИДКИХ РАДИОАКТИВНЫХ ОТХОДОВ НИЗКОГО УРОВНЯ АКТИВНОСТИ</b>	<b>56</b>
5.1	ВВЕДЕНИЕ .....	56
5.2	СПОСОБЫ ОЧИСТКИ И КОНЦЕНТРИРОВАНИЯ .....	57
5.3	ОСНОВНЫЕ СТАДИИ РАБОТ ПО ОЧИСТКЕ ЖРО .....	59
5.3.1	<i>Аналитическая стадия .....</i>	<i>59</i>
5.3.2	<i>Согласование плана работ с надзорными органами .....</i>	<i>60</i>
5.3.3	<i>Выполнение работ .....</i>	<i>60</i>
5.4	ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОСНОВНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ЖРО, ПОДЛЕЖАЩИХ ОЧИСТКЕ .....	60
5.4.1	<i>Отбор проб ЖРО из емкости-хранилища .....</i>	<i>60</i>
5.4.2	<i>Экспресс-анализ основных характеристик ЖРО .....</i>	<i>62</i>
5.4.3	<i>Ультрафильтрация ЖРО .....</i>	<i>63</i>
5.4.4	<i>Подготовка проб ЖРО к химическому анализу и радиометрии .....</i>	<i>63</i>
5.5	ОЧИСТКА И КОНЦЕНТРИРОВАНИЕ НИЗКОАКТИВНЫХ ЖРО .....	65
<b>6</b>	<b>ТЕХНОЛОГИИ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ И УМЕНЬШЕНИЯ ОБЪЕМА ТВЕРДЫХ РАДИОАКТИВНЫХ ОТХОДОВ</b>	<b>69</b>
6.1	ВВЕДЕНИЕ .....	69
6.2	ПРИЕМ ТВЕРДЫХ РАДИОАКТИВНЫХ ОТХОДОВ .....	69
6.3	ОБРАБОТКА ТВЕРДЫХ РАДИОАКТИВНЫХ ОТХОДОВ .....	70
6.3.1	<i>Сортировка .....</i>	<i>70</i>
6.3.2	<i>Фрагментация .....</i>	<i>71</i>
6.3.3	<i>Прессование под низким давлением .....</i>	<i>75</i>
6.3.4	<i>Прессование под высоким давлением .....</i>	<i>76</i>
<b>7</b>	<b>ОБРАБОТКА И ИММОБИЛИЗАЦИЯ ОРГАНИЧЕСКИХ РАДИОАКТИВНЫХ ОТХОДОВ</b>	<b>78</b>
7.1	ВВЕДЕНИЕ .....	78
7.2	ОБРАЗОВАНИЕ И ХАРАКТЕРИСТИКИ ОРГАНИЧЕСКИХ ОТХОДОВ .....	78
7.2.1	<i>Масла и сцинтилляционные жидкости .....</i>	<i>78</i>
7.2.2	<i>Экстрагенты и растворители .....</i>	<i>79</i>
7.2.3	<i>Медико-биологические отходы .....</i>	<i>79</i>
7.2.4	<i>Твердые органические радиоактивные отходы .....</i>	<i>79</i>
7.3	ОСОБЕННОСТИ ОБРАЩЕНИЯ С ОРГАНИЧЕСКИМИ ОТХОДАМИ .....	80
7.3.1	<i>Общие соображения .....</i>	<i>80</i>
7.3.2	<i>Раздельный сбор органических отходов .....</i>	<i>80</i>
7.4	ОБРАБОТКА .....	81
7.4.1	<i>Сжигание .....</i>	<i>81</i>
7.4.2	<i>Компактирование .....</i>	<i>81</i>
7.4.3	<i>Окислительные процессы .....</i>	<i>81</i>
7.4.4	<i>Электрохимический процесс окисления .....</i>	<i>82</i>
7.4.5	<i>Кислотное растворение .....</i>	<i>82</i>
7.4.6	<i>Щелочной гидролиз .....</i>	<i>83</i>
7.4.7	<i>Дистилляция .....</i>	<i>83</i>
7.4.8	<i>Пиролиз .....</i>	<i>83</i>
7.5	ПРОЦЕССЫ ИММОБИЛИЗАЦИИ .....	84
7.5.1	<i>Абсорбция .....</i>	<i>84</i>
7.5.2	<i>Цементирование .....</i>	<i>84</i>
7.5.3	<i>Абсорбция и цементирование .....</i>	<i>84</i>
7.6	ВЫБОР ПРОЦЕССА ОБРАБОТКИ .....	85
<b>8</b>	<b>ТЕХНОЛОГИИ ОЧИСТКИ ГАЗООБРАЗНЫХ ВЫБРОСОВ</b>	<b>87</b>
8.1	ВВЕДЕНИЕ .....	87
8.2	ЗАДАЧИ СИСТЕМ ВЕНТИЛЯЦИИ И ГАЗООЧИСТКИ .....	87
8.3	ОРГАНИЗАЦИЯ ВЕРТИЛЯЦИОННОЙ СИСТЕМЫ .....	87
8.3.1	<i>Приточная вентиляция .....</i>	<i>88</i>
8.3.2	<i>Вытяжная вентиляция .....</i>	<i>88</i>
8.3.3	<i>Элементы вентиляционных систем .....</i>	<i>89</i>
8.4	ЭЛЕМЕНТЫ СИСТЕМ ГАЗООЧИСТКИ .....	91
8.4.1	<i>Фильтры для аэрозолей .....</i>	<i>91</i>

8.4.2	Фильтры для газов.....	93
8.5	ИСПЫТАНИЯ И КОНТРОЛЬ СИСТЕМ ВЕНТИЛЯЦИИ И ГАЗООЧИСТКИ.....	94
<b>9</b>	<b>ТЕРМИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ ОБРАБОТКИ РАДИОАКТИВНЫХ ОТХОДОВ</b>	<b>95</b>
9.1	ВВЕДЕНИЕ .....	95
9.2	МЕТОДЫ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ .....	95
9.3	СЖИГАНИЕ .....	96
9.4	УСТАНОВКИ СЖИГАНИЯ .....	97
9.5	ТЕРМОХИМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА.....	102
9.6	ПЛАВЛЕНИЕ .....	103
9.7	КОНТРОЛЬ ХИМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ .....	104
<b>10</b>	<b>ИММОБИЛИЗАЦИЯ РАДИОАКТИВНЫХ ОТХОДОВ В ЦЕМЕНТ</b>	<b>107</b>
10.1	ВВЕДЕНИЕ .....	107
10.2	ПРОИЗВОДСТВО ЦЕМЕНТА .....	108
10.3	ХИМИЯ ПРОЦЕССА ЦЕМЕНТИРОВАНИЯ.....	110
10.3.1	Реакции гидратации.....	110
10.4	ТИПЫ И ХАРАКТЕРИСТИКИ ЦЕМЕНТОВ .....	112
10.4.1	Типы портланд-цементов.....	112
10.4.2	Смешанные цементы .....	113
10.4.3	Характеристики цементов .....	114
10.5	ЦЕМЕНТИРОВАНИЕ РАДИОАКТИВНЫХ ОТХОДОВ .....	114
10.5.1	Критерии качества цементных компаундов.....	115
10.6	МЕТОДЫ ЦЕМЕНТИРОВАНИЯ.....	116
10.6.1	Особенности цементирования жидких отходов.....	116
10.6.2	Аппаратное оформление процессов цементирования .....	117
10.7	МИРОВОЙ ОПЫТ ЦЕМЕНТИРОВАНИЯ ОТХОДОВ .....	119
<b>11</b>	<b>ИММОБИЛИЗАЦИЯ ОТХОДОВ В БИТУМЫ И ПОЛИМЕРЫ</b>	<b>126</b>
11.1	ИММОБИЛИЗАЦИЯ ЖИДКИХ РАДИОАКТИВНЫХ ОТХОДОВ В БИТУМЫ.....	126
11.1.1	Свойства битумов и процесс битумирования.....	126
11.1.2	Технология битумирования .....	129
11.2	ИММОБИЛИЗАЦИЯ РАДИОАКТИВНЫХ ОТХОДОВ В ПОЛИМЕРЫ.....	131
11.2.1	Свойства полимеров и типы отходов, пригодных для иммобилизации .....	132
11.2.2	Технология иммобилизации отходов в полимерные материалы .....	133
<b>12</b>	<b>ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ОСТЕКЛОВАЫВАНИЯ ДЛЯ ИММОБИЛИЗАЦИИ НИЗКО- И СРЕДНЕАКТИВНЫХ ОТХОДОВ</b>	<b>135</b>
12.1	ВВЕДЕНИЕ .....	135
12.2	ХАРАКТЕРИСТИКИ СТЕКЛА .....	135
12.3	ТЕХНОЛОГИИ ОСТЕКЛОВАЫВАНИЯ.....	136
<b>13</b>	<b>ОБРАЩЕНИЕ С ОТРАБОТАВШИМИ ЗАКРЫТЫМИ РАДИОАКТИВНЫМИ ИСТОЧНИКАМИ</b>	<b>144</b>
13.1	ВВЕДЕНИЕ .....	144
13.2	ТИПЫ РАДИОНУКЛИДНЫХ ИСТОЧНИКОВ .....	144
13.3	ИНФРАСТРУКТУРА ДЛЯ ОБРАЩЕНИЯ С ОТРАБОТАВШИМИ РНИ .....	146
13.3.1	Обязанности заинтересованных сторон.....	146
13.3.2	Контроль над движением источников.....	148
13.4	СТРАТЕГИЯ ОБРАЩЕНИЯ С РАДИОНУКЛИДНЫМИ ИСТОЧНИКАМИ .....	148
13.4.1	План использования радионуклидных источников .....	148
13.4.2	Объявление источника “отработавшим” .....	149
13.4.3	Характеристика закрытых РНИ.....	149
13.4.4	Сбор и сортировка .....	151
13.5	ВАРИАНТЫ ОБРАЩЕНИЯ С ОТРАБОТАВШИМИ РНИ.....	153
13.5.1	Передача другому пользователю .....	155
13.5.2	Возвращение изготовителю/поставщику.....	155
13.5.3	Хранение для распада радионуклидов.....	156
13.5.4	Кондиционирование отработавших источников.....	156
13.5.5	Временное хранение кондиционированных РНИ.....	162
13.5.6	Захоронение.....	162



<b>14</b>	<b>ОРГАНИЗАЦИЯ И ТРЕБОВАНИЯ К ДОЛГОСРОЧНОМУ ХРАНЕНИЮ КОНДИЦИОНИРОВАННЫХ РАДИОАКТИВНЫХ ОТХОДОВ.....</b>	<b>164</b>
14.1	ВВЕДЕНИЕ.....	164
14.2	ПРИНЦИПЫ БЕЗОПАСНОСТИ ХРАНЕНИЯ ОТХОДОВ .....	164
14.3	ТРЕБОВАНИЯ К УПАКОВКАМ ОТХОДОВ .....	165
14.4	ТРЕБОВАНИЯ К ХРАНИЛИЩАМ .....	167
	14.4.1 Проектные требования.....	167
	14.4.2 Эксплуатационные требования.....	168
	14.4.3 Оценка безопасности хранилищ .....	169
	14.4.4 Обеспечение качества .....	169
14.5	ХРАНИЛИЩА ОТХОДОВ .....	170
	14.5.1 Тип хранилищ.....	170
	14.5.2 Перемещение упаковок.....	170
	14.5.3 Загрузка .....	170
	14.5.4 Регистрация.....	171
	14.5.5 Возможная деградация упаковок в течение хранения .....	171
14.6	ПРИМЕР ВРЕМЕННОГО ХРАНИЛИЩА .....	171
<b>15</b>	<b>СПОСОБЫ ЗАХОРОНЕНИЯ ОТХОДОВ НИЗКОГО И СРЕДНЕГО УРОВНЯ АКТИВНОСТИ .....</b>	<b>174</b>
15.1	ПРИНЦИПЫ ЗАХОРОНЕНИЯ ОТХОДОВ .....	174
15.2	ТИПЫ ЗАХОРОНЕНИЙ .....	174
15.3	КЛАССИФИКАЦИЯ ОТХОДОВ ДЛЯ ЗАХОРОНЕНИЯ .....	176
15.4	ЭТАПЫ РЕАЛИЗАЦИИ ЗАХОРОНЕНИЯ .....	176
15.5	БЕЗОПАСНОСТЬ ЗАХОРОНЕНИЯ .....	179
15.6	КРИТЕРИИ ПРИЕМЛЕМОСТИ УПАКОВОК ДЛЯ ЗАХОРОНЕНИЯ .....	181
15.7	ОПЫТ ЗАХОРОНЕНИЯ НИЗКО И СРЕДНЕАКТИВНЫХ ОТХОДОВ .....	182
15.8	ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....	192
<b>16</b>	<b>МЕТОДЫ ДЕЗАКТИВАЦИИ.....</b>	<b>194</b>
16.1	ВВЕДЕНИЕ.....	194
16.2	ВИДЫ ЗАГРЯЗНЕНИЙ.....	194
16.3	МЕТОДЫ ДЕЗАКТИВАЦИИ .....	195
	16.3.1 Химическая дезактивация .....	195
	16.3.2 Механические методы дезактивации .....	200
	16.3.3 Альтернативные методы дезактивации.....	204
16.4	ДЕЗАКТИВАЦИЯ ТРАНСПОРТА, ОБОРУДОВАНИЯ И СПЕЦОДЕЖДЫ.....	204
	16.4.1 Дезактивация транспорта .....	204
	16.4.2 Дезактивация оборудования.....	205
	16.4.3 Дезактивация спецодежды .....	206
<b>17</b>	<b>ОБЕСПЕЧЕНИЕ КАЧЕСТВА И КОНТРОЛЬ КАЧЕСТВА ПРИ ОБРАЩЕНИИ С РАДИОАКТИВНЫМИ ОТХОДАМИ .....</b>	<b>208</b>
17.1	ВВЕДЕНИЕ.....	208
17.2	ОБЕСПЕЧЕНИЕ КАЧЕСТВА.....	209
	17.2.1 Общие принципы .....	209
	17.2.2 Программы качества .....	210
	17.2.3 Аудиторские проверки.....	212
	17.2.4 Обучение и повышение квалификации персонала.....	214
	17.2.5 Документация и отчетность .....	214
17.3	КОНТРОЛЬ КАЧЕСТВА.....	215
	17.3.1 Общие принципы .....	215
	17.3.2 Требования регулирующих органов.....	215
	17.3.3 Оценка риска .....	216
	17.3.4 Сбор, анализ и хранение информации.....	216
17.4	ЗАКЛЮЧЕНИЕ И РЕКОМЕНДАЦИИ .....	218
17.5	ПРИЛОЖЕНИЕ. ПРИМЕРНЫЙ ПЕРЕЧЕНЬ ВОПРОСОВ АУДИТОРСКОЙ ПРОВЕРКИ ...	219
	<b>СПИСОК ЛИЦ ПРИНИМАВШИХ УЧАСТИЕ В ПОДГОТОВКЕ УЧЕБНОГО ПОСОБИЯ .....</b>	<b>221</b>

# 1 БАЗОВЫЕ ПРИНЦИПЫ И НАЦИОНАЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ ОБРАЩЕНИЯ С РАДИОАКТИВНЫМИ ОТХОДАМИ

## 1.1 ВВЕДЕНИЕ

Широкие исследования в области ядерной физики, начатые в начале 20-го столетия, привели к широкомасштабному использованию атомной энергии и радиоактивных материалов в промышленности, медицине, сельском хозяйстве, научных исследованиях и в образовательном процессе. Как и в других областях человеческой деятельности, эта практика сопряжена с образованием различного рода отходов, характерной особенностью которых является наличие в них радиоактивных компонентов. В принципе радиоактивность окружала и окружает человека всегда и во всем, вопрос состоит только в том, каков уровень этой радиоактивности? В этом плане определение радиоактивных отходов является довольно принципиальным.

Что относить к радиоактивным, а что считать нерадиоактивными материалами, в частности, отходами? С нормативно-правовой точки зрения радиоактивные отходы могут быть определены как материалы, содержащие, либо загрязненные радионуклидами при концентрации или активности выше уровня, установленного Органом Государственного Регулирования, и для которых дальнейшее использование не предвидится.

Нужно иметь в виду, что это определение имеет исключительно регулирующие цели и что материалы, активность которых настолько мала, что их можно считать нерадиоактивными, с физической точки зрения, строго говоря, остаются радиоактивными, хотя измерить либо определить эту радиоактивность очень сложно, поскольку она очень незначительна.

Все отходы, содержание радионуклидов в которых превышает установленный уровень, считаются радиоактивными и, как следствие, объявляются опасными для человека и окружающей среды. Поэтому радиоактивные отходы должны обрабатываться, храниться и захораниваться так, чтобы не причинять человеку и окружающей среде неприемлемого ущерба, как в настоящее время, так и в будущем. Для достижения этой цели обращение с радиоактивными отходами требует системного подхода, который в каждой стране определяется законодательством, определяющим, в свою очередь, роль и ответственность всех, кто имеет отношение к этой проблеме.

Радиоактивные отходы образуются в различных формах и характеризуются различными физико-химическими свойствами, концентрацией и периодом полураспада радионуклидов. Это могут быть:

- газообразные радиоактивные отходы, включающие вентиляционные выбросы предприятий, использующих или производящих радиоактивные материалы;
- жидкие радиоактивные отходы, от сцинтилляционных жидкостей в исследовательских лабораториях до высокоактивных жидких отходов от переработки ядерного топлива;
- твердые радиоактивные отходы, начиная с обычного лабораторного мусора и кончая высокоактивными компонентами отработавшего ядерного топлива и активной зоны реактора.

Активность радиоактивных отходов колеблется в широких пределах от очень низких значений (отходы медицинских и научно-исследовательских лабораторий) до очень высоких (отходы от переработки ядерного топлива, либо мощные отработавшие источники ионизирующих излучений). Объем радиоактивных отходов может быть небольшим, как, например, в случае закрытых отработавших радионуклидных источников, так и очень большим, например, в случае отходов обогатительных производств при добыче урана. Несмотря на большие отличия свойств источников и радиоактивных отходов, таких как концентрация, объем, период полураспада и радиотоксичность, при обращении со всеми категориями радиоактивных отходов необходимо соблюдать общие принципы обеспечения безопасности.

Радиоактивные отходы как источники ионизирующих излучений могут представлять опасность для человека и окружающей среды. Исходя из результатов многолетних исследований и практического опыта, для предотвращения этой опасности разработано большое количество национальных и международных руководств и правил по радиационной защите и обращению с радиоактивными отходами. Поскольку некоторые радиоактивные отходы могут представлять опасность в течение очень длительного времени (и для будущих поколений), должна также учитываться необходимость дополнительных затрат в будущем на обеспечение радиационной защиты, контроля и наблюдения.

При обращении с радиоактивными отходами необходимо учитывать также потенциальную опасность биологически или химически токсичных веществ, которые могут присутствовать в радиоактивных отходах.

Фундаментальные принципы по обеспечению безопасности при обращении с радиоактивными отходами разрабатываются и постоянно совершенствуются Международным Агентством по Атомной Энергии (МАГАТЭ) путем достижения консенсуса среди стран, участвующих в их разработке и обсуждении. С учетом накопленного международного опыта МАГАТЭ подготовлена серия документов по обеспечению безопасности при обращении с радиоактивными отходами “RADWASS”, включающая принципы, стандарты, руководства и практику по безопасному обращению с радиоактивными отходами.

## 1.2 ЦЕЛЬ ОБРАЩЕНИЯ С РАДИОАКТИВНЫМИ ОТХОДАМИ

Основной целью, которая должна быть достигнута при обращении с радиоактивными отходами, является охрана здоровья человека и обеспечение безопасности для окружающей среды, как в настоящее время, так и для будущих поколений.

## 1.3 ПРИНЦИПЫ ОБРАЩЕНИЯ С РАДИОАКТИВНЫМИ ОТХОДАМИ

Для эффективного обеспечения основной цели обращения с радиоактивными отходами должен соблюдаться ряд основных принципов. Принятые на международном уровне они сформулированы в документе МАГАТЭ [1.1], в котором вспомогательный и пояснительный текст о путях и мерах, позволяющих соблюсти эти принципы, представляет неотъемлемую часть публикации. Несмотря на большие различия в происхождении и характеристиках радиоактивных отходов (РАО), их применение достаточно универсально для всех видов РАО. Ниже следует перечисление этих принципов с краткими комментариями.

**1. Охрана здоровья людей.** Соблюдение этого принципа предусматривает:

- контроль возможных путей облучения;
- удержание уровней облучения в пределах национальных требований, которые устанавливаются в более широкой сфере ядерной и радиационной безопасности;
- в практической деятельности с РАО – соблюдение принципов и рекомендаций Международного Комитета по Радиационной защите - МКРЗ: обоснования, оптимизации и ограничения доз (в случае вмешательства применяются принципы обоснования и оптимизации доз, но не их ограничения).

**2. Охрана окружающей среды.**

- Удержание выбросов и сбросов в ходе различных этапов обращения с РАО на практически достижимом минимальном уровне (предпочтительный подход – концентрирование и удержание радионуклидов, а не их разбавление и рассеяние);
- ограничение, насколько возможно, негативных последствий захоронения РАО для использования природных ресурсов;
- учет нерадиационного воздействия деятельности с РАО, такого как химическое воздействие и изменение среды обитания.

**3. Обеспечение безопасности за пределами национальных границ.**

- Обеспечение радиационной безопасности (учет возможных эффектов на здоровье и окружающую среду) за пределами национальных границ; на основе рекомендаций МКРЗ и МАГАТЭ;
- обмен информацией и достижение договоренностей с соседними или пострадавшими странами в случае выброса радионуклидов или его угрозы;
- осуществление импорта и экспорта отходов на основе положений МАГАТЭ по международному трансграничному перемещению РАО (в частности, их ввоз может осуществляться только при наличии в стране административных и технических возможностей, а также, регулирующей структуры обращения с РАО).

**4. Защита будущих поколений.**

- Не превышение уровней возможного негативного влияния РАО на безопасность будущих поколений, выше уровней установленных соответствующими нормами для современного человека;
- использование принципа многобарьерной изоляции РАО при захоронении, чем достигается достаточная уверенность в отсутствии неприемлемых негативных последствий для будущих поколений;
- при выборе мест захоронения необходим учет возможной будущей геологической разведки и добычи полезных ископаемых;
- учет неопределенностей долгосрочных оценок радиационной безопасности.

**5. Предотвращение необоснованного бремени на будущие поколения.** Этот принцип связан с тем, что поколение, которое извлекло определенную пользу от практического использования атомной энергии или радиоактивных изотопов, должно нести ответственность за обработку и изоляцию образовавшихся при этом отходов, не перекладывая эту проблему на плечи будущих поколений. Эта проблема

в будущем может быть ограничена только необходимостью наблюдения и ведомственного контроля за местами захоронения РАО. Для этого необходима:

- Разработка нынешним поколением технологий обработки и безопасного захоронения РАО;
- обеспечение системы финансирования и контроля обращения с РАО;
- ограничение насколько возможно отложенных мероприятий или действий с РАО;
- регистрация и надлежащее хранение информации о типе, характеристиках и местах захоронения РАО.

#### **6. Наличие национальной правовой структуры.**

- Четкое распределение обязанностей для каждой организации участвующей в деятельности по обращению с РАО;
- отделение функций регулирования, включая применение санкций, от функций эксплуатации (обеспечение независимости регулирования);
- обеспечение достаточно долгосрочной ответственности и достаточного финансирования (учет вероятных будущих операций).

#### **7. Контроль образования радиоактивных отходов.** Обеспечение образования РАО на минимальном практически осуществимом уровне, как по радиоактивности, так и по объему, осуществляется посредством:

- выбора и контроля материалов, их возврата и повторного использования;
- соблюдение установленных эксплуатационных регламентов;
- разделением различных видов отходов и материалов в целях сокращения объема РАО и облегчения обращения с ними.

#### **8. Взаимосвязь между этапами обращения с радиоактивными отходами.**

Основными этапами обращения с радиоактивными отходами в зависимости от их типа могут быть предобработка, обработка, кондиционирование и пакетирование, хранение и захоронение. Все эти этапы взаимосвязаны и взаимообусловлены. Неправильный выбор одного из этапов обработки может повлиять на эффективность или применимость последующего этапа или этапов. Выбор методов обработки может расширять либо ограничивать возможность выделения и повторного использования ценных или полезных материалов из отходов, может влиять на выбор или приемлемость способов транспортировки и хранения и имеет прямое отношение к обеспечению безопасности при обработке и захоронении отходов.

Поскольку отдельные этапы обращения с отходами могут быть разделены значительными интервалами времени (иногда десятки лет), на практике часто приходится принимать решение о тех или иных этапах задолго до того, как они начнут реализовываться. С самого начала планирования деятельности, связанной с *образованием* радиоактивных отходов, должна приниматься во внимание *будущая деятельность* по их обработке, включая и их окончательное захоронение.

## 9. Безопасность установок для обращения с РАО на протяжении всего срока их службы.

- Первоочередное внимание вопросам безопасности при выборе площадки, проектировании, сооружении, эксплуатации и снятии с эксплуатации установки или закрытии хранилища;
- предотвращение аварий и ограничение их последствий;
- обеспечение и поддержание соответствующего уровня защиты от возможного радиационного воздействия;
- учет особенностей района (при выборе площадки);
- поддержание соответствующего уровня обеспечения качества;
- обеспечение высокого уровня подготовки и аттестации персонала;
- проведение оценок безопасности.

Отметим, что принципы 3, 4 и 5 основаны на этических соображениях, которые заключаются в том, что страна, получающая пользу от любого вида деятельности, должна нести ответственность перед другими странами и будущими поколениями за возможные негативные последствия этой деятельности (в частности, связанной с образованием отходов).

Соблюдение указанных принципов внесет вклад в достижение цели обращения с РАО, состоящей в обеспечении защиты здоровья человека и охраны окружающей среды в настоящее время и в будущем. Способы применения этих принципов на практике зависят от вида отходов и типов установок.

В приведенных выше принципах обращения с радиоактивными отходами заложена концепция системного подхода, заключающегося в том, что все стадии представляют собой элементы общей системы.

### 1.4 СТАДИИ ОБРАЩЕНИЯ С РАДИОАКТИВНЫМИ ОТХОДАМИ

Радиоактивные отходы образуются как в течение производственного цикла, так и ходе снятия установок с эксплуатации<sup>1</sup>. Основные стадии процесса обращения с РАО, начиная с их образования до захоронения, представлены на рисунке 1.1 с указанием целей или операций, составляющих эти стадии [1.2]. Прохождение РАО через эти стадии зависит от вида отходов, для выяснения которого проводится определение их физических, химических и радиационных свойств (*характеризация*). В результате часть отходов может быть освобождена от контроля или направлена на повторное использование; кроме того, отходы разделяются на группы для обеспечения соответствия принятым методам обработки, а также требованиям хранения и захоронения. Данные о характере и свойствах отходов передаются с одной стадии обработки на другую для их регистрации, учета и документирования.

**Предварительная обработка** является первоначальной стадией обращения с отходами, начинающейся сразу после их образования. Эта стадия чрезвычайно важна, в ее ходе предоставляется наилучшая возможность для разделения отходов на потоки, предназначенные для освобождения от контроля, для конкретных методов обработки, поверхностного или геологического захоронения.

---

<sup>1</sup> Главными источниками РАО являются эксплуатация АЭС и снятие их с эксплуатации.

**Обработка** отходов направлена на повышение безопасности или экономичности посредством изменения характеристик отходов. Примерами операций, составляющих эту стадию обращения, являются: прессование и сжигание (уменьшение объема); выпаривание, фильтрация или ионный обмен в жидких отходах (удаление радионуклидов); осаждение или флоккуляция химических веществ (изменение состава). Часто некоторые из этих процессов используются в сочетании друг с другом для повышения общей эффективности обработки.

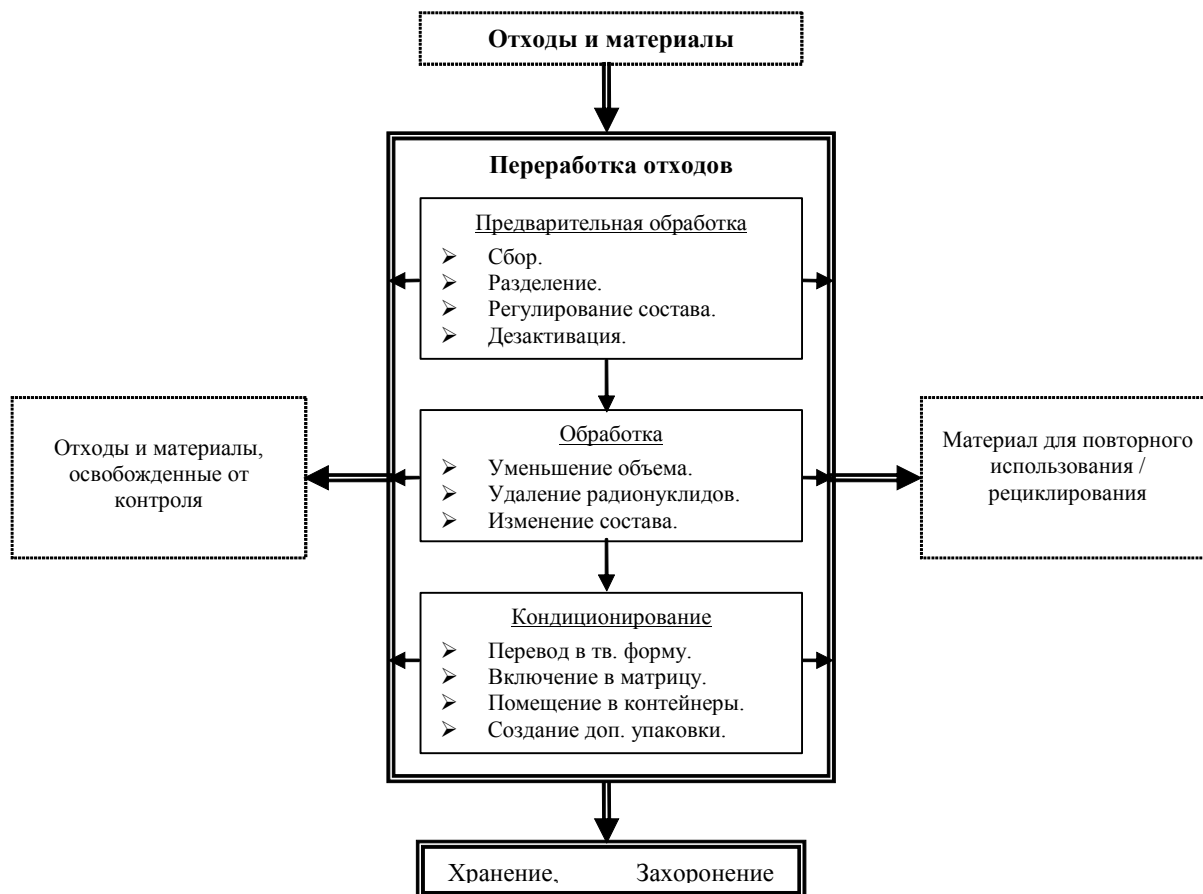


Рис. 1.1. Основные стадии обращения с радиоактивными отходами (МАГАТЭ).

**Кондиционирование** РАО состоит из операций, в процессе которых они переводятся форму, обладающую химической, термической и радиационной устойчивостью и сохраняющую стабильность в процессе перемещения, перевозки, хранения и захоронения. Операции перевода отходов в твердую форму посредством их отверждения, включения в какую-либо матрицу или заключение в герметичные оболочки определяются термином **иммобилизация**. Имобилизованные отходы в свою очередь могут упаковываться в различные контейнеры, начиная от обычных 200-литровых стальных бочек до толстостенных контейнеров сложной конструкции.

Выбор матричного материала (метода кондиционирования) зависит от характеристик и свойств отходов. Связующий материал должен обладать высокими изоляционными свойствами (стойкость к выщелачиванию), иметь хорошую совместимость с компонентами отходов, что обеспечивает минимальный объем

конечного продукта. Матричные материалы для иммобилизации РАО бывают органические (битум, полимеры), неорганические (цемент, стекло, керамика, стеклокерамика), металлические и композиционные, состоящие из нескольких матриц. Наивысшей устойчивостью обладают гомогенные (квазигомогенные) формы кондиционированных РАО, в которых компоненты отходов входят в структуру материала на молекулярном уровне. Таковыми являются керамические формы РАО. Менее устойчивы гетерогенные формы отходов, в матрице которых частицы РАО распределены механически (битумно-солевой компаунд, битумированные и цементированные ТРО, и пр.). В настоящее время наиболее распространенными методами иммобилизации являются: отверждение ЖРО низкого и среднего уровней активности путем включения их в цемент (**цементирование**) или битум (**битумирование**), а также помещение высокоактивных ЖРО в стеклянную матрицу (**остекловывание**).

Стадии обращения – **обработка и кондиционирование** – зачастую проводятся в тесной взаимосвязи.

Важно подчеркнуть, что между различными стадиями или в рамках нескольких стадий могут происходить **хранение и перевозка** РАО (эти стадии на схеме не указаны). Хранение осуществляется с учетом классификационной сортировки отходов и возможности их изъятия и передачи на переработку или захоронение. Тип и конструкция инженерного сооружения для хранения РАО должна соответствовать характеристикам отходов и их упаковок. **Временное хранение** РАО в течение достаточно длительного времени для снижения уровня радиоактивности направлено на упрощение и повышение эффективности последующей обработки отходов. Уменьшению конечных объемов отходов с короткоживущими изотопами служит их временное хранение в течение времени естественного распада. Безопасное перемещение отходов от мест образования, к установкам переработки, местам хранения и захоронения производится с использованием специальных транспортных и грузоподъемных средств.

**Захоронение** – заключительная стадия обращения с радиоактивными отходами, заключающаяся в локализации отходов в специально оборудованном хранилище – могильнике при соответствующем обеспечении безопасности без намерения их изъятия, долгосрочного наблюдения за хранилищем и технического обслуживания. Захоронение предусматривает создание многобарьерной системы изоляции, т.е. сооружения вокруг РАО системы *естественных и инженерных* барьеров, препятствующих выходу радионуклидов в окружающую среду.

## 1.5 ЭЛЕМЕНТЫ НАЦИОНАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ ОБРАЩЕНИЯ С РАДИОАКТИВНЫМИ ОТХОДАМИ

Основным гарантом обеспечения безопасности при использовании атомной энергии и обращении с радиоактивными отходами является государство. Для адекватного выполнения такой роли государство должно создать и обеспечить нормальное функционирование национальной системы обращения с радиоактивными отходами.

Национальные системы обращения с радиоактивными отходами обычно включают три основных компонента [1.3]:



- Национальную политику, которая законодательно закрепляет цель обращения с радиоактивными отходами, а также определяет государственные структуры, ответственные за достижение этой цели.
- Стратегию, определяющую долгосрочную программу обращения с радиоактивными отходами (для достижения поставленной цели), пути и этапы достижения этой цели.
- Необходимые ресурсы для достижения поставленной цели, включая наличие необходимой инфраструктуры, адекватных технологий, квалифицированного персонала и достаточного финансирования.

## Политика

Политика государства в области обращения с радиоактивными отходами должна соответствовать общепринятым принципам, выработанным международным сообществом путем консенсуса и направленным главным образом на обеспечение безопасности.

Политика в разных странах может различаться в зависимости от масштабов проблемы, национальных или местных условий, традиций и т.д. Политика не обязательно должна быть сформулирована в одном документе и не обязательно предполагает участие в ее создании одной организации. Однако она должна законодательно определять общие цели (обеспечение безопасности) и позицию государства в вопросах достижения этих целей.

## Стратегия

Для реализации своей национальной политики государство должно выработать соответствующую стратегию ее реализации. Стратегия обычно сформулирована в долгосрочной национальной программе обращения с радиоактивными отходами и является тем инструментом, который определяет ключевые этапы решения проблемы обращения с отходами, определяет приоритеты ее этапов или компонентов в зависимости от уровня развития и стадий выполнения отдельных ключевых задач. Такими задачами могут быть создание и развитие инфраструктуры, выбор и внедрение технологий, выбор и анализ площадки для размещения ключевых объектов, строительство, пуск в эксплуатацию и эксплуатация установок, снятие установок с эксплуатации и т.д. Программа также должна определять ответственных за ее выполнение, условия и сроки ее реализации.

Создание или разработка такой стратегии зависит от национальных условий, таких как политическая структура, национальные приоритеты, уровень технического развития, характера и объемов отходов, а также степени их опасности. Целью национальной стратегии и национальной программы является обеспечение взаимосвязи между отдельными этапами обращения с отходами для создания комплексной и интегрированной системы в целом.

Стратегия должна предусматривать и минимизацию образования отходов, насколько это практически оправдано, что может быть достигнуто снижением количества потенциальных источников отходов.

## Ресурсы

Для реализации стратегической программы обращения с радиоактивными отходами (особенно при наличии больших количеств отходов) необходимо наличие соответствующей инфраструктуры, адекватных технологий, квалифицированного персонала и наличие необходимого финансирования, что в большинстве случаев требует создания механизма формирования соответствующего фонда и управления этим фондом.

В принципе может существовать три вида организации обращения с радиоактивными отходами (рис. 1.2):

- централизованная обработка отходов на спецпредприятиях,
- обработка отходов по месту их образования (нецентрализованная),
- смешанное использование централизованного и нецентрализованного подходов.

Выбор стратегии обращения с отходами зависит от количества предприятий, производящих отходы, и количества отходов, а также необходимости переработки отходов для долгосрочного хранения и захоронения.

Для обращения с долгоживущими отходами обычно предусматривается централизованный подход, для короткоживущих может быть рекомендован и нецентрализованный подход.

## 1.6 ОТВЕТСТВЕННОСТЬ ГОСУДАРСТВА И ОБЯЗАННОСТИ РАЗЛИЧНЫХ ОРГАНИЗАЦИЙ

Безопасное и эффективное обращение с радиоактивными отходами может быть обеспечено только при наличии четкой организации и регламентирования всей деятельности, связанной с этим вопросом. В любой национальной системе обращения с радиоактивными отходами необходимо определить все аспекты, имеющие отношение к этой проблеме, перечень организаций и круг обязанностей каждой из них.

### 1.6.1 Ответственность государства

#### *Создание правовой инфраструктуры*

В первую очередь ответственность за обращение с радиоактивными отходами должно нести государство. Только государство обладает властью для установления соответствующей правовой основы и административной инфраструктуры для обращения с радиоактивными отходами. Эти правовые основы должны базироваться на международных принципах, выработанных исходя из многолетней практики обращения с отходами.

Если цель обращения с радиоактивными отходами законодательно сформулирована, государство должно четко определить ответственность всех сторон, вовлеченных в сферу обращения с радиоактивными отходами и отвечающих за достижение поставленной цели. Необходимо определить, какие государственные органы (или орган) несут прямую ответственность за все виды деятельности, связанные с радиоактивными отходами. Перечень правовых вопросов, требующих регламентации, может варьироваться в зависимости от общей технической политики государства, в частности в области ядерной энергетики, структуры государственного управления и

законодательных органов, масштабов ядерной деятельности и, соответственно, масштаба образования отходов, правовых традиций государства и т.д.

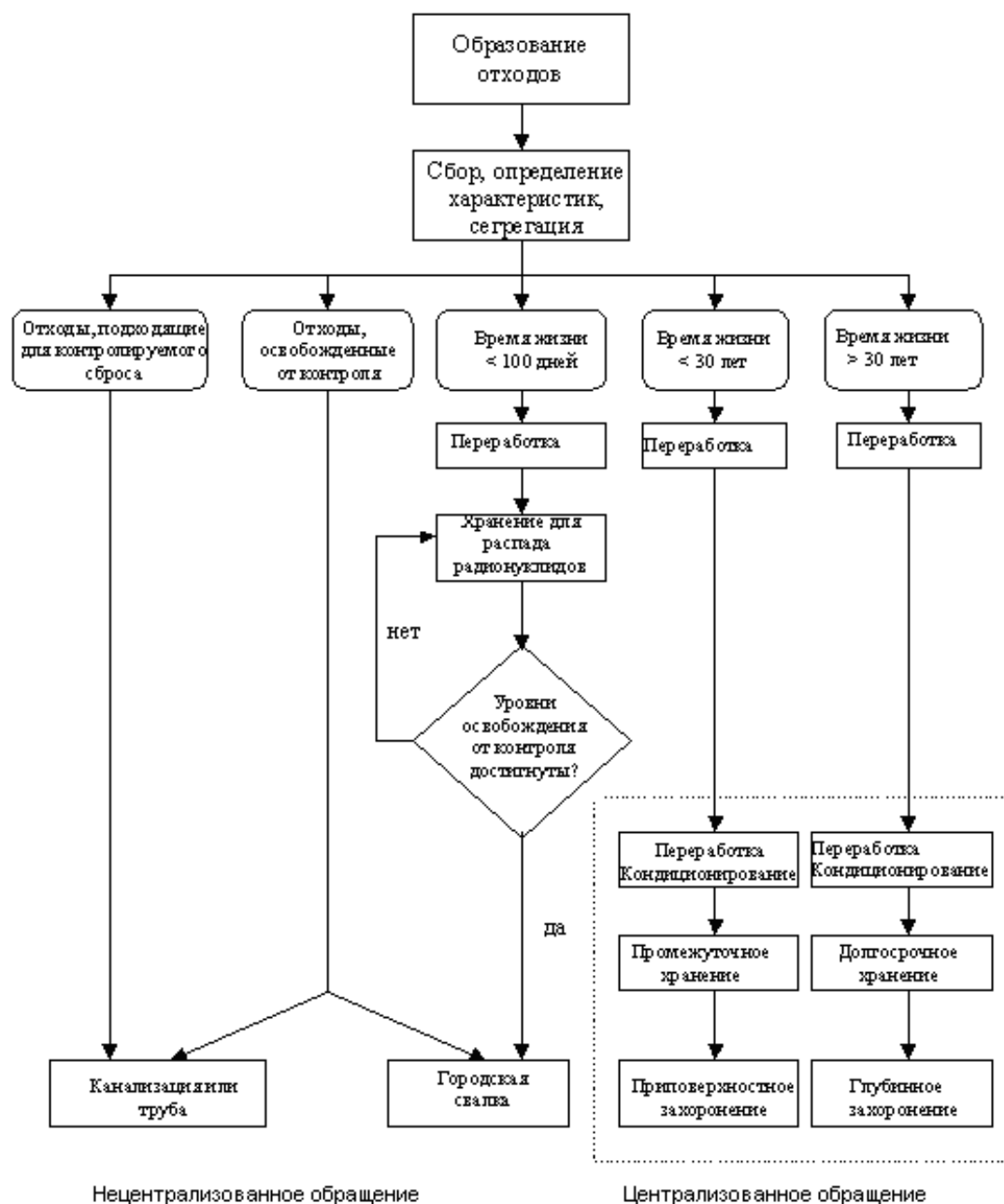


Рис. 1.2. Централизованное и децентрализованное обращение с радиоактивными отходами.

### Создание органов государственного регулирования

Государство должно создать орган, на который возлагаются функции регулирования с целью обеспечения безопасности и охраны населения и окружающей среды при использовании атомной энергии, ядерных технологий и при обращении с радиоактивными отходами. Если таких органов создано несколько, государство должно

определить сферу деятельности каждого из них и принципы их взаимодействия. При органах государственного регулирования могут быть консультативные комитеты, сформированные из специалистов различного профиля. Государство должно делегировать органам регулирования необходимый уровень полномочий для принятия решений, привлекать для работы в них компетентных специалистов и обеспечивать эти органы необходимыми ресурсами для выполнения своих функций.

Необходимым условием для эффективного регулирования является независимость органов регулирования от проектных, монтажных и эксплуатирующих организаций, связанных с отходами и их обработкой, чтобы ни одна из заинтересованных сторон не могла оказывать давление на органы регулирования.

Органы государственного регулирования наделяются полномочиями подготовки и издания нормативных документов, относящихся ко всем аспектам обращения с радиоактивными отходами. Они также уполномочиваются государством выдавать, приостанавливать либо лишать лицензии на проведение работ по обращению с радиоактивными отходами или на эксплуатацию соответствующих установок и оборудования.

#### ***Определение ответственности производителей отходов и операторов соответствующих установок***

Государство должно определить роль и ответственность организаций и предприятий, производящих радиоактивные отходы, занимающихся их обработкой, хранением, транспортировкой и захоронением. Все эти виды деятельности могут выполняться производителями отходов или специализированными организациями. В последнем случае государство должно предусмотреть процедуры передачи и сохранения ответственности за безопасность на всех этапах выполнения этих работ.

#### ***Обеспечение необходимыми ресурсами***

Государство должно предпринимать все необходимые шаги для адекватного финансирования и обеспечения другими ресурсами, включая обеспечение квалифицированными кадрами, всех стадий обращения с радиоактивными отходами в стране.

### **1.6.2 Ответственность органов государственного регулирования**

#### ***Контроль выполнения требований законодательства***

В обязанность регулирующего органа входит создание механизма выполнения основного законодательства, в частности по обращению с радиоактивными отходами. В соответствии с требованиями законодательства он определяет цели безопасности, стандарты безопасности и осуществляет контроль за их соблюдением. Для реализации этих функций регулирующий орган:

- разрабатывает и пересматривает руководства и правила для обеспечения государственной политики и соблюдения национального законодательства в области обращения с радиоактивными отходами,
- осуществляет контроль за соблюдением установленных норм и правил,
- осуществляет инспекции и надзор за производствами и процессами на их соответствие требованиям законодательства и регулирующих актов,

- анализирует отчеты по безопасности предприятий и в случае необходимости вносит предложения или требования по усовершенствованию,
- проверяет правильность учета и движения радиоактивных отходов и материалов и т.д.

### ***Лицензирование***

Регулирующий орган уполномочен рассматривать, утверждать, выдавать, приостанавливать, модифицировать, изымать лицензии на проведение работ по обращению с радиоактивными отходами либо рекомендовать эти действия правительству.

### ***Консультации***

Регулирующий орган должен консультировать правительство либо вносить предложения по развитию и реализации национальной политики, стратегии и законодательства в области обращения с радиоактивными отходами.

## **1.6.3 Обязанности организаций, производящих и перерабатывающих радиоактивные отходы**

### ***Выбор способа обращения с радиоактивными отходами***

Производители радиоактивных отходов и операторы соответствующих установок ответственны за выбор приемлемых способов обращения с отходами, которые соответствуют требованиям безопасности, установленным регулирующим органом и законодательными нормативами. Предприятия, производящие отходы, могут проводить весь комплекс их переработки самостоятельно, либо передавать их на переработку и захоронение другим специализированным предприятиям, уполномоченным проводить такие работы.

### ***Обеспечение безопасности при обращении с радиоактивными отходами***

Предприятие, уполномоченное проводить работы по обращению с радиоактивными отходами, несет ответственность за обеспечение безопасности и охраны окружающей среды. В частности, предприятие должно:

- проводить оценки безопасности и влияния на окружающую среду,
- обеспечивать адекватную защиту персонала, населения и окружающей среды,
- иметь достаточное количество оборудования и квалифицированного персонала для обеспечения безопасности на всех этапах обращения с отходами,
- иметь действенную программу контроля и обеспечения качества при обработке, хранении и захоронении отходов,
- вести учет образования, характеристик и движения радиоактивных отходов,
- предоставлять необходимую информацию органам регулирования и контроля,
- обобщать и распространять положительный опыт обращения с отходами.

### ***Соблюдение установленных правил и требований***

Производители отходов и операторы соответствующих установок должны соблюдать правила, установленные органами государственного регулирования и действующим законодательством. Это предусматривает представление органам

регулирования и контроля всех необходимых материалов, подтверждающих и демонстрирующих соблюдение установленных требований и норм.

Радиоактивные отходы возникают от деятельности различных установок и существуют в различных физических и химических формах, содержащих разную концентрацию разнообразных радионуклидов и других вредных веществ. Также существует большое разнообразие методов обращения с отходами, включая заключительную стадию – захоронение (от приповерхностного захоронения до захоронения в глубоких геологических формациях).

Для того чтобы упростить обращение с разными отходами и стандартизовать методы обращения, радиоактивные отходы должны быть классифицированы в соответствии с их физическими, химическими, радиологическими и биологическими свойствами. Для того чтобы следовать единой национальной политике в деле обращения с радиоактивными отходами и применять успешно выбранную стратегию, в каждой стране должна быть национальная классификация радиоактивных отходов, отвечающая её целям в этой области.

### ЛИТЕРАТУРА

- [1.1] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, The Principles of Radioactive Waste Management, Safety Series, No. 111-F, IAEA, Vienna (1996).
- [1.2] Чечеткин Ю.И., Грачев А.Ф. Обращение с радиоактивными отходами. – Самара, 2000, 248 с.
- [1.3] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Establishing a National System for Radioactive Waste Management, Safety Series No. 111-S-1, IAEA, Vienna (1995).

## 2 ИСТОЧНИКИ РАДИОАКТИВНЫХ ОТХОДОВ И СИСТЕМЫ ИХ КЛАССИФИКАЦИИ

### 2.1 ВВЕДЕНИЕ

Помимо ядерно-энергетической индустрии радиоактивные материалы и источники ионизирующего излучения широко используются в медицине, других отраслях промышленности и различных научных исследованиях. Как и во многих других видах деятельности, при использовании ядерных и радиоактивных материалов образуются различные отходы, часть которых являются радиоактивными. Радиоактивные отходы (РАО) это те отходы, которые содержат или загрязнены радионуклидами в концентрациях выше уровней установленных регулирующими органами. Радиоактивные отходы могут образовываться в результате аварий при работе с радиоактивными материалами, а также при снятии с эксплуатации ядерных установок. В некоторых случаях природные материалы могут содержать настолько высокие количества естественных (присутствующих в природе) радионуклидов, что они могут также классифицироваться как радиоактивные, а соответственно требовать специального обращения.

Радиоактивным отходам присуще большое разнообразие составов, физико-химических и др. свойств в зависимости от места, условий и источника их возникновения. В частности, велико разнообразие содержащихся в отходах радионуклидов и их количеств: активность РАО может быть как очень низкой, так и очень высокой. Чтобы упростить обращение с таким разнообразием РАО и стандартизировать методы, например, обработки, кондиционирования и захоронения, образующиеся отходы должны быть разделены на категории в соответствии с их свойствами и потенциальной опасностью. Классификации отходов важна для выработки единой национальной политики и определения стратегических задач в области обращения с радиоактивными отходами, функционирования системы регулирования и надзора за всеми стадиями обращения с ними (установление оценок безопасности, дозовых критериев, норм и правил). Классификация отходов важна также для реализации стратегии их минимизации, например, для установления уровней освобождения отходов от регулирующего контроля.

### 2.2 ИСТОЧНИКИ РАДИОАКТИВНЫХ ОТХОДОВ

Для описания источников радиоактивных отходов можно воспользоваться схемой разделения сфер их происхождения [2.1]:

- отходы, образующиеся на всех стадиях ядерного топливного цикла (ЯТЦ);
- отходы, не связанные с ЯТЦ (отходы научных и исследовательских центров, медицинских учреждений, отраслей промышленности, отходы от хозяйственной деятельности, в том числе бытовые, и т.п.);
- отходы, образующиеся при снятии ядерных установок с эксплуатации;
- отходы, образующиеся при ликвидации радиационных инцидентов и аномалий<sup>2</sup>.

---

<sup>2</sup> Следует заметить, что радиоактивные отходы, возникающие в результате применения радиоактивных материалов и источников излучения в военных отраслях, в данном курсе лекций не рассматриваются.

### 2.2.1 Радиоактивные отходы ядерного топливного цикла

Основным источником радиоактивных отходов являются предприятия ядерного топливного цикла (ЯТЦ). К отходам ЯТЦ относятся отходы, образующиеся при добыче урановых руд и производстве ядерного топлива (1), при эксплуатации АЭС (2) и при переработке отработанного ядерного топлива (3) [2.2].

#### *Добыча урановых руд и производство ядерного топлива*

На этом этапе ЯТЦ образуются:

- газообразные отходы (радиоактивные аэрозоли и Rn) и загрязненные шахтные воды (добыча урановых руд).
- газообразные и жидкие отходы и пустая порода, содержащая остаточные продукты распада (обогащение урановых руд).
- жидкие и твердые радиоактивные отходы в виде загрязненного оборудования, фильтроматериалов, шламов и т.п. (очистка уранового концентрата и производство тепловыделяющих элементов (ТВЭлов)).

Основными носителями активности этой группы отходов являются  $\alpha$ -излучающие природные радионуклиды урана, радия и тория.

#### *Отходы, возникающие при эксплуатации АЭС*

В реакторах атомных электростанций (АЭС) ядерное топливо подвергается расщеплению; уран распадается на радиоактивные продукты деления. Большинство продуктов деления остается в топливных сборках и перемещается с отработавшим топливом при его выгрузке из реактора. Однако из-за дефектов оболочек топливных элементов некоторые продукты деления попадают в систему охлаждения реактора и далее распространяются по различным частям первичного контура и другим частям реактора. В системе охлаждения реактора может также происходить нейтронная активация нерадиоактивных загрязнителей и продуктов коррозии, присутствующих в воде охлаждающего контура реактора. Такие радиоактивные загрязнения появляются в различных жидких потоках АЭС, таких как воды от протечек циркуляционного контура и отдельного оборудования, промывки сорбентов систем очистки теплоносителя, дезактивационные растворы, воды от дезактивации помещений и душевые, сбросы радиохимической лаборатории и т.д.. Кроме того, небольшие количества газообразных отходов (третий, I, Ar, Xe) также образуются в течение нормальной эксплуатации реактора, источником которых являются дефекты тепловыделяющих элементов.

Твердые радиоактивные отходы на АЭС образуются в результате радиоактивного загрязнения поверхностей жидкими или аэрозольными загрязнителями, а также в результате нейтронной активации конструкционных материалов реактора.

Состав и количество отходов зависят от типа реактора и условий его эксплуатации. При эксплуатации типичного энергетического ядерного реактора мощностью 1000 МВт образуется от 200 до 300 м<sup>3</sup> твердых низко- и среднеактивных отходов в год. Эти отходы представляют собой металлические конструкции или их части, различное оборудование, ионообменные смолы и фильтры системы газоочистки, лабораторная посуда, защитная одежда и обтирочные материалы, производственный мусор и т.д.



В таблице 2.1 приведены усредненные данные по образованию различных отходов от эксплуатации типичного легководного реактора мощностью 1000 МВт [2.1].

**ТАБЛИЦА 2.1. РАДИОАКТИВНЫЕ ОТХОДЫ, ВОЗНИКАЮЩИЕ ПРИ ЭКСПЛУАТАЦИИ АЭС МОЩНОСТЬЮ 1000 МВт.**

Тип отходов	Категория отходов	Количество (м <sup>3</sup> /ГВт.год)	Активность (Бк/м <sup>3</sup> )	Радионуклиды
Кубовые остатки	Жидкие	50	$3,7 \times 10^9 - 7,4 \times 10^{10}$	<sup>60</sup> Co, <sup>137</sup> Cs, <sup>134</sup> Cs
Пульпы фильтроматериалов	Жидкие	10	$1,8 \times 10^{10}$	<sup>60</sup> Co, <sup>137</sup> Cs, <sup>134</sup> Cs
Ионообменные смолы	Твердые	2	$4,6 \times 10^{12}$	<sup>60</sup> Co, <sup>137</sup> Cs, <sup>134</sup> Cs
Концентраты от дезактивации	Жидкие, твердые	10	$3,7 \times 10^{11}$	<sup>60</sup> Co
Поглощающие стержни, нейтронные источники и т.д.	Твердые	0,1	$7,4 \times 10^{14}$	<sup>60</sup> Co
Другие	Твердые	260	$7,4 \times 10^9$	<sup>60</sup> Co

### ***Радиоактивные отходы от снятия АЭС с эксплуатации***

При снятии с эксплуатации и демонтаже ядерной установки неизбежно образуется большое количество отходов и мусора, значительная часть которого будет содержать остаточные радиоактивные загрязнения. Некоторые материалы и оборудование после демонтажа, проверки и, если необходимо, дезактивации можно использовать повторно на других установках, однако большая часть продуктов демонтажа будет считаться радиоактивными отходами. Часть работ по снятию с эксплуатации может быть проведена немедленно после закрытия установки, а другая часть может быть отложена на 50-100 лет для распада короткоживущих радионуклидов и создания в этой связи более безопасной радиационной обстановки.

### ***Радиоактивные отходы от переработки облученного ядерного топлива***

В некоторых странах ядерное топливо после выработки своего ресурса рассматривается как радиоактивные отходы, подлежащие хранению и последующему захоронению. В других странах это топливо подвергается переработке с целью извлечения делящихся материалов и их использования в производстве нового ядерного топлива. В обоих случаях речь идет об обращении с высокоактивными отходами, которые не входят в задачу нашего рассмотрения.

## **2.2.2 Применение радиоактивных препаратов и облучателей в медицине**

Применение радиоактивных источников излучения и материалов в медицине преследует диагностические и лечебные цели. Сюда входят: проведение клинической диагностики при помощи наружного радиационного анализа, диагностика и терапия при внутреннем применении радиофармацевтических препаратов, проведение радиотерапии с использованием закрытых источников излучения; стерилизация медицинских изделий и инструментов.

В радиоанализе наиболее часто используются коммерчески доступные комплекты, содержащие в большинстве случаев несколько кБк, чаще всего иода-125 или технеция-99m. После каждого индивидуального анализа и после истечения срока годности комплекта, радиоактивный материал и загрязненные предметы должны рассматриваться как радиоактивные отходы.

Из радионуклидов, используемых "in vivo", наиболее часто применяется технеций-99m, имеющий период полураспада 6 часов. Он обычно получается из коммерчески доступного генератора, содержащего молибден-99. Так как период полураспада последнего 66 часов, генераторы должны заменяться примерно каждую неделю. Используемые для подготовки препаратов Тс-99m колбы, шприцы, тампоны и т.п. являются короткоживущими РАО.

При диагностических исследованиях пациентов содержание радиоактивных изотопов в моче и экскрементах, а также радиоактивное загрязнение постельного белья и т.д. изменяется в соответствии с характеристиками используемого радиофармацевтического препарата, однако обычно эти загрязнения невелики.

Среди радионуклидов, использующихся при приготовлении терапевтических радиофармацевтических препаратов наиболее существенными с точки зрения отходов, являются иод-131, фосфор-32, итрий-90 и самарий-153. Из-за более высоких активностей, используемых в терапевтических применениях, большее внимания нужно уделять обращению с такими отходами как моча, экскременты, загрязненное постельное белье и т.д. В числе радиоактивных отходов медицинских учреждений могут быть хирургические инструменты, перевязочный материал, детали демонтированных облучательных установок и другие изделия, выполненные из разнообразных материалов.

Закрытые источники излучения, состоящие из более долгоживущих радионуклидов, используются для терапевтического лечения пациентов в качестве как постоянных, так и временных имплантантов, а также для телетерапии и стерилизации образцов крови, шприцев и хирургических инструментов. Источники, радиоактивность которых распалась до уровней, которые делают их неприемлемыми для медицинского использования, должны рассматриваться в качестве радиоактивных отходов.

### 2.2.3 Применение в научных исследованиях

Следует отметить, что едва ли не каждый радионуклид любой активности может найти свое применение в научно-исследовательской деятельности (как фундаментального, так и прикладного характера), в результате которой образуются твердые, жидкие и биологические РАО. Исследования, в которых используются радионуклиды, могут включать как фундаментальные исследования, так и различные исследования прикладного характера.

Ниже перечислены некоторые направления научных исследований, где используются радионуклиды и образуются РАО.

- Производство и маркировка составов в биологических исследованиях, содержащих несколько МБк использованного радионуклида, например трития, иода-125, углерода-14 или фосфора-32. Диапазон используемых радионуклидов обычно довольно ограничен и активность низка. Однако отходов от процесса

нанесения радиометок может быть много как в отношении общей активности, так и концентрации активности (удельной активности).

- Исследование метаболических, токсикологических или экологических проблем. В этих исследованиях изучаются широкие диапазоны составов лекарств, пестицидов, удобрений и т.д. При исследованиях с животными появляются такие отходы как радиоактивные экскременты, трупы и подстилки. Наиболее часто используемые радионуклиды – углерод-14 и тритий, поскольку они могут быть легко внедрены в сложные биологические молекулы и хорошо прослеживаются;
- Разработка применение в исследовательских целях клинических препаратов и подготовленных составов (например, фармацевтических);
- Исследования в области ядерного топливного цикла. Исследования обычно проводятся в лабораториях, используя небольшие количества расщепляющегося материала (уран, плутоний) и относительно долгоживущие продукты деления, в зависимости от задачи исследования. Образующиеся отходы включают твердые материалы и жидкости, содержащие используемый расщепляющийся материал и продукты деления;
- Фундаментальные исследования в области физики, химии и биологии. Фундаментальные исследования с применением радионуклидов могут включать неразрушающие испытания, физику твердого тела и разработку новых материалов. Спектр используемых радиоизотопов может быть очень широк.

В связи с разнообразием исследовательских программ характер и количества образующихся радиоактивных отходов может быть специфичным для каждого исследовательского проекта.

#### 2.2.4 Производство радиоизотопов

Для производства радиоизотопов используются ускорители заряженных частиц и исследовательские ядерные реакторы. Радиоизотопы образуются на мишенях и в капсулах, которые удаляются из установок после облучения для обработки и очистки. Исследовательские учреждения могут также использовать некоторые из произведенных радионуклидов в своих собственных научно-исследовательских программах. В результате образуются небольшие объемы жидких отходов с относительно высокой активностью и более значительные объемы сухих, низкоактивных твердых отходов.

#### 2.2.5 Промышленные и другие применения

*Закрытые* радиоактивные источники интенсивно используются для различных применений в промышленности, которые включают неразрушающий анализ (радиографию и измерение различных производственных параметров), стерилизацию пищевых продуктов и других предметов. Закрытые источники излучения также используются для технологического управления процессами и для калибровки лабораторного оборудования. Доминирующий радионуклид присутствует в очень сконцентрированной форме, общая активность зависит от применения и природы излучения источника. Закрытые радионуклидные источники ионизирующего излучения (РНИ) рассматриваются в качестве отходов, когда радионуклиды распадаются до уровня, делающего их непригодными для первоначальных целей, или потому, что прибор, в котором они размещены, устарел или не нужен, а также когда стандартные испытания указывают на утечку радиоактивности.

Примером промышленного использования *открытых* источников в качестве радиоактивной метки является оценка износа и коррозии ключевых компонентов установки или станков, например деталей двигателей, внутренней поверхности печей и т. п. Другие примеры применения радиоактивной метки – контроль обработки сточных вод, изучение движения грунтовых вод или дисперсии и разбавления водных или газообразных сбросов. В большинстве случаев используются небольшие метки короткоживущих радионуклидов, что не приводит образованию радиоактивных отходов.

## 2.2.6 Радиоактивные материалы с природными радионуклидами

В горнодобывающих отраслях и на предприятиях перерабатывающей промышленности (горно-обогатительные, нефте- и газопереработка, производство удобрений и т. д.) образуются большие количества отходов или материалов, загрязненных естественными радионуклидами, содержащимися в природном сырье. Обычно их классифицируют как NORM – Naturally Occurring Radioactive Materials. К основным таким радионуклидам относятся, например, C-14, K-40, Ca-48, изотопы урана, тория и др. Концентрация таких радионуклидов в отходах производства, а иногда и в полезных материалах, может значительно превышать уровни, установленные для радиоактивных отходов или материалов. Ввиду потенциальной опасности таких материалов или отходов к ним необходимо применять все те требования, которые для них устанавливаются органами государственного регулирования (обычно эти требования менее жесткие, чем те, которые предъявляются к искусственным радиоактивным материалам).

## 2.3 ТИПЫ ОТХОДОВ

Типы, форма, количества и характеристики образующихся радиоактивных отходов зависят от очень многих факторов, таких как:

- вид ядерной деятельности,
- характер установок и процессов,
- характеристики используемых материалов,
- область применения радиоактивных материалов,
- квалификация персонала и культура производства, и др.

По своему естественному физическому состоянию отходы делятся на твердые, жидкие и газообразные. Однако такая классификация не может быть достаточной для обеспечения эффективной обработки отходов и перевода их в стабильное и безопасное состояние. Характер твердых отходов может определяться их составом и свойствами – металлы, материалы органической или неорганической природы, и т. д. Жидкие отходы могут быть водными, неводными, смешанными и т. д. Газообразные отходы также могут варьироваться в широких пределах.

Для того чтобы обеспечить эффективную последующую обработку, кондиционирование и захоронение отходов, отходы должны быть разделены на другие, более определенные категории или классы в соответствии с их радиологическими, биологическими, физическими и химическими характеристиками, а также в зависимости от их приемлемости к выбранным или доступным методам обработки (и захоронения). Соответственно, каждая категория отходов должна быть собрана отдельно, или отделена от отходов с другими параметрами и свойствами.

## 2.4 КЛАССИФИКАЦИЯ РАДИОАКТИВНЫХ ОТХОДОВ

Классификация – это система объединения и соподчинения объектов и понятий, используемая как средство установления связей между ними. Основанием для классификации служат основные признаки (критерии), подлежащие дифференцированию, степень которого зависит от цели классификации. Общая цель любой классификации: она должна облегчать управление ее элементами. Для этого число классов должно быть сбалансировано между желательным дифференцированием и легкостью обращения с системой классификации. Кроме того, определение классов и образование соответствующих уровней должны быть ясными и обоснованными, а сфера применимости системы четко ограничена.

В области обращения с радиоактивными отходами существует довольно много качественных и количественных систем классификации, разработанных с учетом требований безопасности, технологических требований их обработки, транспортирования, захоронения и пр. Классификация радиоактивных отходов необходима на всех стадиях: от их возникновения, в процессе обработки, при хранении, транспортировке и вплоть до захоронения. Классификация радиоактивных отходов помогает:

- На концептуальном уровне:
  - В разработке общей стратегий по обращению с отходами;
  - В планировании и проектировании основных объектов по обращению с отходами.
- На уровне государственного регулирования:
  - В выборе подходов для обеспечения безопасности для каждой категории отходов;
  - Для определения степени потенциальной опасности, исходящей от различного типа отходов;
  - Определения количественных характеристик отходов и требований к их обработке и захоронению.
- На эксплуатационном уровне:
  - Для определения условий эксплуатации установок и организации работы с отходами;
  - Для облегчения ведения учета движения отходов.
- На уровне коммуникации и взаимодействий:
  - Для введения определений, терминологии и акронимов для улучшения взаимопонимания и взаимодействия между экспертами, производителями отходов, переработчиками отходов, регулирующими органами и населением, а также между экспертами из разных стран.

Цель классификации радиоактивных отходов состоит в том, чтобы разделить отходы на потоки или составляющие компоненты, позволяющие максимально оптимизировать процесс последующей обработки, получения стабильных форм и упаковок, пригодных для безопасной транспортировки, хранения и захоронения, и обеспечить при этом безопасность персонала, окружающей среды и населения. Классификация нужна для сортировки отходов в зависимости от их потенциальной опасности и выбранной стратегии и технических условий их обработки (т.е. оптимизации процесса обработки и захоронения). Из указанных целей классификации вытекают принципы и требования классификации отходов.

## 2.4.1 Системы классификации радиоактивных отходов

Универсальной системы классификации отходов не существует, несмотря на многолетние попытки создать такие системы. Унифицированность систем классификации значительно упростила бы и облегчила взаимодействие, обмен информацией и опытом, особенно на международном уровне.

Относительно широкое распространение получила классификация отходов на низкоактивные (не требующие применения защитных и дистанционно управляемых средств обращения), среднеактивные (требующие применения защитных и дистанционно управляемых средств обращения) и высокоактивные (которые помимо требования использования защитных и дистанционно управляемых средств обращения, характеризуются значительным тепловыделением из-за радиационного саморазогрева).

Такое деление отходов на категории является достаточно удобным и относительно универсальным, однако на практике оно недостаточно для решения всех вопросов обработки отходов. Дополнительное деление отходов на категории и классы является неизбежным и определяется требованиями ряда факторов. Система классификации радиоактивных отходов должна удовлетворять целому ряду параметров, включая следующие:

- охватывать полный спектр радиоактивных отходов;
- учитывать все стадии обращения с радиоактивными отходами;
- отражать потенциальную опасность отдельных классов радиоактивных отходов;
- быть гибкой, чтобы отвечать определенным потребностям;
- изменять как можно меньше уже принятую терминологию;
- быть логичной и понятной.

### *Классификация на концептуальном уровне*

На концептуальном уровне, т. е. для выработки стратегии обращения с радиоактивными отходами на уровне государства, можно рассматривать основные источники РАО и их общие количества, т.е. классифицировать отходы по источникам их образования, например:

- отходы от добычи и переработки урановых руд и производства ядерного топлива,
- отходы от эксплуатации АЭС,
- отходы от использования радиоизотопов в неэнергетических отраслях (медицина, промышленность, наука и т.д.),
- отходы от снятия ядерных объектов с эксплуатации,
- радиоактивные отходы горнодобывающей промышленности, и т.д.

Оценка потенциальных или существующих источников РАО, масштабов и динамики их образования, основных характеристиках РАО образующихся в стране позволяет определить общие требования к государственной стратегии и политике обращения с радиоактивными отходами. На выбор такой стратегии и политики могут также оказывать влияние существующие в стране социальные, политические и правовые аспекты.

### ***Классификация на уровне государственного регулирования***

На уровне государственного регулирования важно иметь информацию о потенциальной опасности образующихся отходов и регламентировать требования обеспечения безопасности. Для этого необходимо классифицировать РАО по этому критерию и определить требования по обращению с отходами разного уровня потенциальной опасности. В данном случае РАО могут классифицироваться:

- По уровню активности, с определением количественных характеристик:
  - отходы высокого уровня активности,
  - отходы среднего уровня активности,
  - отходы низкого уровня активности,
  - отходы очень низкого уровня активности и т. д.
- По периоду полураспада радиоизотопов, которые определяют время, необходимое для их изоляции:
  - очень короткоживущие (часы, дни),
  - короткоживущие (месяцы),
  - среднеживущие (годы),
  - долгоживущие (столетия и выше).

Категории классификации могут быть и другими, в зависимости от конкретной ситуации с РАО в стране. На этом уровне все определяемые классы РАО должны иметь четкие количественные определения (по типу радиоактивности, уровню активности, удельной активности, периоду полураспада и др.) Эта классификация должна быть закреплена в соответствующих регламентирующих документах.

В системе классификации органами государственного регулирования могут быть определены требования или ограничения по содержанию в РАО делящихся материалов, а также других, нерадиоактивных опасных компонентов, таких как биологически активных, инфекционных, химически агрессивных или токсичных веществ.

Для *каждого* класса РАО органами государственного регулирования определяются требования по безопасному обращению с ними, основными из которых являются требования к хранению, транспортировке и захоронению. Эти требования определяют выбор соответствующих технологий и процедур обращения с *каждым* классом РАО.

### ***Классификация на эксплуатационном уровне***

На эксплуатационном уровне, помимо обязательной классификации РАО в соответствии с требованиями государственного регулирования, существует необходимость дополнительного разделения отходов на потоки внутри каждого класса, позволяющие не только эффективно использовать существующие технологии обработки и кондиционирования, но и обеспечить безопасность и требования к качеству конечных форм и упаковок отходов. Последние требования определяются требованиями к транспортировке, хранению и захоронению отходов для каждого класса.

Первая ступень классификации на эксплуатационном уровне – это дифференцирование радиоактивных отходов согласно их физическому состоянию, то есть деление на твердые (ТРО), жидкие (ЖРО) и газообразные. Эта система основана

на нуждах технологических процессов и часто связана с определенными технологиями. Жидкие отходы могут быть далее классифицированы как водные и органические. Твердые отходы могут быть подразделены на сухие и влажные.

Даже в такой простой системе классификации необходимо применение количественного подхода, например, для отличия твердых отходов от жидких, влажных твердых от сухих твердых отходов. Жидкими отходами могут быть жидкости, содержащие относительно низкие концентрации твердых веществ (обычно менее одного процента), влажными твердыми отходами могут быть шламы, содержащие, по крайней мере, 10 % твердых веществ.

Важным параметром является радиологические свойства отходов:

- время жизни радионуклидов
- выделение тепла
- интенсивность проникающей радиации
- активность и концентрация радионуклидов
- поверхностное загрязнение
- дозовые факторы отдельных радионуклидов

### ***Водные отходы***

Для целей обработки, помимо разделения отходов по классам в зависимости от радиологических характеристик, отходы должны подразделяться на следующие категории в зависимости от их приемлемости (или непригодности) к имеющимся методам обработки и кондиционирования, например для:

- ионного обмена,
- сорбционной обработки и какими сорбентами,
- обработки методами соосаждения,
- прямой иммобилизации (в цемент, битум), и др.

При этом важное значение могут иметь химические характеристики жидких отходов, такие как:

- химический потенциал радионуклидов,
- коррозионная активность растворов,
- содержание органики,
- химическая реактивность и pH,
- общее солесодержание,
- наличие токсичных и биологически опасных компонентов,
- наличие комплексообразователей и ПАВ, и др.

Эти и другие параметры жидких отходов определяют их приемлемость определенным методам обработки и могут быть определяющими в классификации таких отходов на уровне предприятия по переработке отходов.

### ***Органические отходы***

Объем радиоактивных жидких органических отходов обычно мал по сравнению с другими типами радиоактивных отходов. Однако в силу своих специфических свойств



такие отходы могут требовать специальных методов обработки, и соответственно классификации в зависимости от их свойств и приемлемости для конкретных методов или технологий обработки. Эти методы подробнее рассматриваются в разделе "Обработка и иммобилизация органических радиоактивных отходов".

### Твердые отходы

Твердые радиоактивные отходы в основном представляют собой следующее:

- спецодежду и средства индивидуальной защиты;
- бумагу, древесину, строительные материалы, тару;
- различное оборудование;
- изделия из керамики, стекла (например, лабораторную посуду);
- изделия из резины, полимерных материалов и пластмассы;
- изделия из металлов и сплавов;
- материалы из центров вивисекции (подстилки и пр.) и трупы экспериментальных животных;
- фильтры системы газовой очистки;
- загрязненные почвы;
- ионообменные смолы, и т. д.

В основном это отходы низкого уровня радиоактивности. Они могут быть далее классифицированы в различные категории в зависимости от имеющихся методов обработки и приемлемости отходов для обработки этими методами, среди которых:

- сжигание,
- прессование (компактирование),
- дезактивация,
- прямая иммобилизация (в цемент, битум), и др.

Рисунок 2.1 иллюстрирует связь системы классификации радиоактивных отходов с технологическими процессами их обработки на примере ГУП МосНПО "Радон".

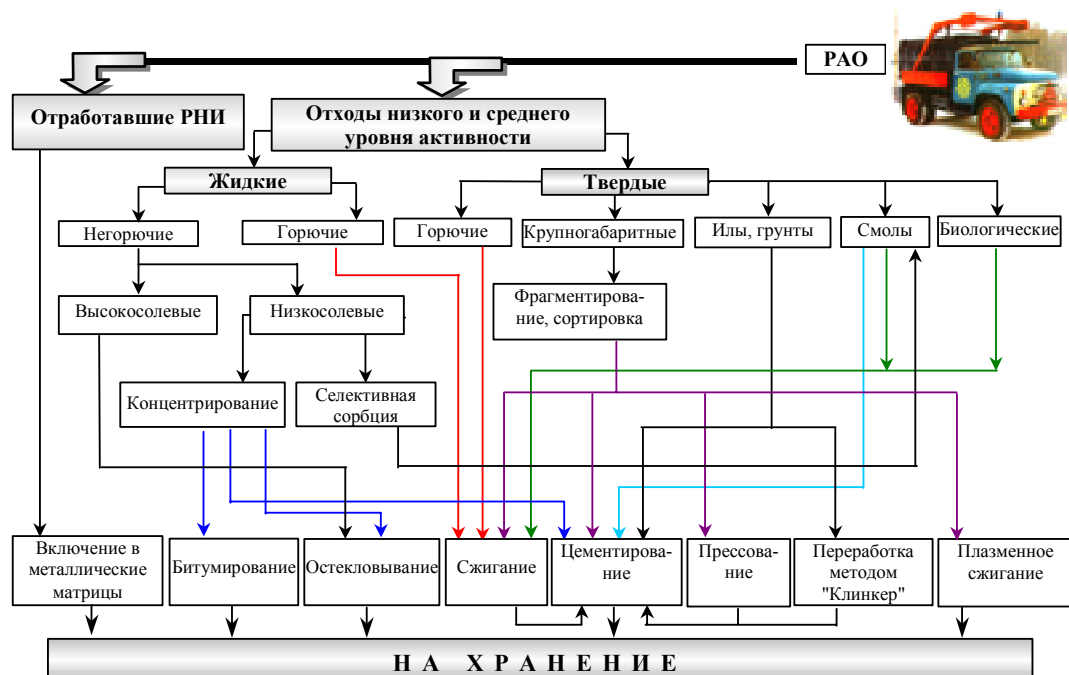


Рис. 2.1. Схема методов обращения с радиоактивными отходами на ГУП МосНПО "Радон".

## 2.5 СИСТЕМА КЛАССИФИКАЦИИ ОТХОДОВ МАГАТЭ

Недостатки систем классификации отходов и отсутствие согласованности национальных систем вынуждают МАГАТЭ уделять проблеме классификации отходов самое пристальное внимание и работать над ее совершенствованием [2.4].

Кратко рассмотрим классификацию отходов МАГАТЭ, в основе которой лежит учет вариантов окончательного захоронения РАО. Основным признаком классификации служит длительность распада нуклида т.к. требования к технологии захоронения отходов во многом определяются временем, в течение которого отходы сохраняют токсичность. Согласно этой системе классификации, представленной в таблице 2, отходы подразделяются на следующие категории.

### 2.5.1 Отходы, освобожденные от контроля

Отходы, содержащие такие низкие концентрации радионуклидов, что они могут быть освобождены от ядерного регулирующего контроля, поскольку радиологическая опасность отходов незначительна. Пределы радионуклидов для этой категории отходов называются уровнями освобождения. Они устанавливаются органами государственного регулирования, принимая во внимание критерии для освобождения материалов от регулирующего контроля. Уровни освобождения рассчитываются из условия, что при всех сценариях облучения индивидуальная доза не должна превышать 10 мкЗв в год.

### 2.5.2 Низко и среднеактивные отходы

Отходы, содержащие такие количества радионуклидов, что необходимы меры для защиты персонала и населения. Этот класс охватывает очень широкий диапазон радиоактивных отходов, начиная с отходов, слегка превышающих уровень отходов, освобожденных от контроля, до отходов, содержащих такие высокие уровни активности, что требуются биологическая защита и даже охлаждение. В этой категории выделены две группы отходов, содержащих короткоживущие и долгоживущие радионуклиды. Способы захоронения низко- и среднеактивных отходов разнообразны.

### 2.5.3 Высокоактивные отходы

Отходы, содержащие такие высокие количества радионуклидов, что в течение значительного периода времени необходима высокая степень их изоляции от биосферы. Такие отходы требуют создания экранирующей оболочки (биологической защиты) и охлаждения.

### 2.5.4 Граничные уровни

Граничные уровни при классификации предлагаются в терминах параметров, наиболее уместных для безопасного захоронения радиоактивных отходов. Категория низко- и среднеактивных отходов (LILW) подразделяется на короткоживущие LILW и долгоживущие LILW. Приповерхностное захоронение может быть подходящим методом для короткоживущих LILW, однако для долгоживущих LILW отходов может оказаться необходимым захоронение в глубоких геологических формациях.

Дополнительные соображения приводятся для тех случаев, когда (1) радиоактивные отходы характеризуются долгоживущими естественными радионуклидами, (2) имеет место значительное выделение тепла благодаря

радиоактивному распаду; (3) когда применяется сегрегация радиоактивных отходов для приповерхностного или геологического захоронения; и (4) когда образуются жидкие или газообразные отходы.

Граничные уровни между классами характеризуются лишь порядком величины активности (таблица 2.2). Конкретные значения активности, пригодные для дальнейшего подразделения отходов в пределах одного класса, – прерогатива национальной системы классификации.

ТАБЛИЦА 2.2. ТИПИЧНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ КЛАССОВ ОТХОДОВ [2.4]

Классы отходов	Типичные характеристики	Метод захоронения
1. Освобождаемые от контроля отходы (CW)	Уровни активности равны или ниже уровней приведенных в [3], которые основаны на годовой дозе для населения не более 0,01 мЗв.	Нет радиологических ограничений
2. Низко- и среднеактивные отходы (LILW)	Уровни активности выше величин, приведенных в [3] и тепловыделение* ниже 2 кВт/м <sup>3</sup> .	
2.1. Короткоживущие отходы (LILW-SL)	Ограниченная концентрация долгоживущих радионуклидов (меньше 4000 Бк/г в отдельных упаковках отходов и в среднем 400 Бк/г для всех упаковок).	Приповерхностные или глубинные геологические хранилища
2.2. Долгоживущие отходы (LILW-LL)	Концентрация долгоживущих радионуклидов выше пределов для короткоживущих отходов.	Глубинные геологические хранилища
3. Высокоактивные отходы (HLW)	Тепловая мощность* выше 2кВт/м <sup>3</sup> и концентрация долгоживущих радионуклидов выше пределов для короткоживущих отходов [4].	Глубинные геологические хранилища

\*Тепловая мощность 2 кВт/м<sup>3</sup>, указанная в [4], сильно завышена. Она соответствует активности Cs-137 (~ 1000 Ки/л) и подходит для отходов очень высокого уровня активности, требующих специальных мер для отвода выделяющегося тепла. Возможно, в [4] и последующих публикациях МАГАТЭ была допущена опечатка, и граничным тепловыделением должно быть 2 Вт/м<sup>3</sup>.

## 2.6 ПРИМЕРЫ НАЦИОНАЛЬНЫХ СИСТЕМ КЛАССИФИКАЦИИ

В различных странах в основе систем классификации радиоактивных отходов лежат разные соображения: экологические проблемы, существование определенных типов отходов и наличие определенных технологий их переработки. Во всем мире широко используется деление отходов на низко-, средне- и высокоактивные. Но, как уже говорилось, нет согласованных количественных критериев (концентрации радионуклидов или уровня удельной активности), разграничивающих эти классы отходов, особенно ЖРО. Неоднозначность классификации ТРО связана с тем, что в ее основу во многих странах положены различные критерии:

- тип контейнера, при использовании которого мощность экспозиционной дозы при обращении с отходами не превышает установленных пределов; удельная объемная или массовая активность;
- раздельная оценка вклада различных радионуклидов;
- концентрация продуктов деления, главным образом, стронций-90 и цезий-137, которые являются основными источниками внешнего ионизирующего излучения;

- концентрация радионуклидов с очень большими периодами полураспада, главным образом  $\alpha$ -излучающих радионуклидов, определяющих необходимость весьма долговременной изоляции отходов.

Например, классификация радиоактивных отходов в *Соединенных Штатах Америки* следующая:

- HLW: “высоко радиоактивный материал, образующийся в результате переработки отработавшего топлива, включая жидкие отходы, и любой твердый материал, полученный из таких жидких отходов, который содержит продукты деления в значительной концентрации, и другой высокорadioактивный материал, который Комиссия по ядерному урегулированию (NRC) США в соответствии с существующим законом определяет как материал, требующий постоянной изоляции. В разомкнутом топливном цикле отработавшее ядерное топливо рассматривается в качестве высокоактивных отходов”.
- Трансурановые (TRU) отходы: NRC определяет TRU отходы как отходы, содержащие альфа-излучающие изотопы с атомным номером,  $Z$  больше чем 92, с периодом полураспада  $> 5$  лет и концентрацией  $> 3.7 \cdot 10^6$  Бк/кг. Министерство энергетики и Агентство по охране окружающей среды используют несколько отличное определение, сохраняя для TRU отходов такую же концентрацию, но указывают период полураспада  $> 20$  лет.
- Низкоактивные отходы (LLW): Не являющимися HLW, отработавшим ядерным топливом, TRU-отходами, или побочными материалами, как определено в разделе Акта по атомной энергии 1954 года.
- Хвосты горнодобывающих заводов также рассматриваются как радиоактивные отходы.
- Другая категория отходов, которая регулируется не NRC, а индивидуальными штатами, является природный материал или материал, произведенный на ускорителях, который классифицируется как LLW с точки зрения захоронения.

В *Российской Федерации* классификация радиоактивных отходов по уровню содержания радионуклидов дана в ОСПОРБ-99 и приведена в Таблице 2.3.

ТАБЛИЦА 2.3. КЛАССИФИКАЦИЯ ЖИДКИХ И ТВЕРДЫХ РАДИОАКТИВНЫХ ОТХОДОВ В РОССИИ

Категория отходов	Удельная активность, кБк/кг		
	$\beta$ -излучающие радионуклиды	$\alpha$ -излучающие радионуклиды (исключая трансурановые)	Трансурановые радионуклиды
Низкоактивные	Менее $10^3$	Менее $10^2$	Менее $10^1$
Среднеактивные	От $10^3$ до $10^7$	От $10^2$ до $10^6$	От $10^1$ до $10^5$
Высокоактивные	Более $10^7$	Более $10^6$	Более $10^5$

Во *Франции*, твердые радиоактивные отходы классифицируются в три категории:

- Категория А: Низко- и среднеактивные отходы, содержащие короткоживущие радионуклиды (время полураспада  $\sim 30$  лет) и содержащие только следы долгоживущих радионуклидов ( $3.7 \times 10^6$  Бк/кг). Эти отходы подлежат захоронению

в поверхностных могильниках с ожидаемым административным контролем, не превышающим 300 лет.

- Категория В: Среднеактивные отходы, содержащие долгоживущие радионуклиды (время полураспада  $>30$  лет), главным образом альфа-излучающие радионуклиды, без существенного тепловыделения, характеризующиеся как TRU отходы с низким выделением тепла, с максимальным содержанием  $3,7 \times 10^6$  Бк/кг, и со средней загрузкой отходов в хранилище, не превышающей  $3,7 \times 10^5$  Бк/кг.
- Категория С или HLW: Отходы, содержащие продукты распада, образующиеся от переработки топлива, отвержденные остекловыванием и характеризующиеся высоким тепловыделением во время их образования.

В ряде стран, например во Франции и Великобритании, используется еще одна категория радиоактивных отходов, называемые радиоактивные отходы очень низкого уровня активности. Так в Великобритании под радиоактивными отходами очень низкого уровня активности понимают отходы, содержащие на каждый  $0.1 \text{ м}^3$  менее 400 кБк  $\beta/\gamma$  активности или единичные упаковки с суммарной активностью менее 40 кБк.

### ЛИТЕРАТУРА

- [2.1] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Underground Disposal of Radioactive Wastes: Basic Guidance, Safety Series No. 54, IAEA, Vienna (1970).
- [2.2] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Standardization of Radioactive Waste Categories, Technical Reports Series No.101, IAEA, Vienna (1970).
- [2.3] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Exemption from Regulatory Control: Recommended Unconditional Clearance Levels for Solid Materials, Safety Series No. 111-G-1.5, IAEA, Vienna (1993).
- [2.4] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Classification of Radioactive Waste, Safety Series No.111-G-1.1, IAEA, Vienna (1994).

### **3 СБОР, СОРТИРОВКА И ПЕРВИЧНАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАДИОАКТИВНЫХ ОТХОДОВ**

#### **3.1 ВВЕДЕНИЕ**

Начальными этапами всего цикла обращения с радиоактивными отходами после их образования являются их сбор, первичная характеристика, разделение по категориям и временное хранение. Радиоактивные отходы должны быть собраны, проанализированы, и разделены по категориям на месте их образования в соответствии с их физическими, химическими, биологическими и радиологическими свойствами [3.1-3.4]. Эти действия облегчают последующую обработку отходов, повышают ее эффективность, способствуют снижению конечных объемов отходов, требующих хранения и захоронения. Общая стратегия сортировки и раздельного сбора отходов регламентируется нормативными документами и зависит от существующей системы обращения с радиоактивными отходами, которая определяет основные категории отходов, методы их обработки и захоронения.

Для обеспечения всех требований по сортировке, анализу и хранению РАО, организация, где они образуются и на которую возложено проведение этих операций, должны обладать соответствующей инфраструктурой. Она должна располагать необходимым оборудованием, в том числе, необходимым парком контейнеров, упаковок, помещениями для хранения РАО, техническими средствами для их перемещения, располагать профессиональным персоналом, владеющим методами анализа (измерений и расчетов), радиационного контроля, дезактивации, ликвидации радиационных аварий и т.д. Организация должна предпринимать необходимые организационные и технические меры для предотвращения смешивания РАО с отходами других видов. В отдельных случаях, как будет видно из дальнейшего, от организации может потребоваться проведение некоторой предварительной обработки отходов на месте их сбора.

Раздельный сбор и сортировка отходов на месте их образования на основании их характеристик является одним из способов минимизации отходов, и позволяет:

- предотвратить попадание нерадиоактивных отходов в категорию радиоактивных, и таким образом избежать необоснованных затрат на их последующую обработку, хранение и захоронение;
- отделить отходы с низкими уровнями активности от более высоко активных отходов, требующих более сложных систем обработки, хранения и захоронения;
- повторно использовать либо возвратить в производственный цикл материалы и оборудование, обладающие определенной либо значительной ценностью.

Во всех случаях важно отделить радиоактивные отходы от нерадиоактивных и ограничить распространение радиоактивного загрязнения или перекрестное загрязнение, что способствует минимизации радиоактивных отходов.

Газообразные РАО, возникающие в результате деятельности организации, подлежат обезвреживанию на месте их образования, для чего предусматривается система газоочистки.

### 3.2 СБОР И ПЕРВИЧНАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ОТХОДОВ

Одновременно со сбором и накоплением радиоактивных отходов организация, где они образуются, проводит их сортировку. Общая стратегия сортировки и отдельного сбора отходов зависит от существующей системы обращения с радиоактивными отходами, которая определяет основные категории отходов, методы их обработки и захоронения. При планировании отдельного сбора (сортировки) отходов необходимо учитывать следующие факторы:

- физические и химические характеристики отходов;
- тип и период полураспада радионуклидов, содержащихся в отходах;
- концентрация радионуклидов в отходах;
- приемлемость отходов для определенных методов обработки;
- планируемые или доступные методы хранения и захоронения.

Характер и состав радиоактивных отходов во многом (а иногда в основном) определяется источником их образования. Например, во многих случаях использования радиоактивных материалов, в частности в медицине и в научных исследованиях, в определенных процедурах почти всегда используется один определенный радионуклид. Соответственно, в этом случае довольно просто произвести отдельный сбор образующихся отходов в соответствии с их радионуклидным составом.

На предприятиях ядерного топливного цикла ввиду другого принципа образования радиоактивных отходов, они уже в начальной стадии могут содержать смесь радионуклидов, поэтому разделение их по этому принципу затруднено. В этом случае разделение отходов должно основываться на радиохимических характеристиках отходов и их удельной активности, или уровня загрязнения. Определение радиохимических характеристик отходов на этапе их сбора используется, как и на всех стадиях обращения с отходами, также для принятия адекватных мер радиационной безопасности.

Для измерения активности отходов необходимо наличие соответствующей измерительной аппаратуры и владение методиками проведения прямых и косвенных измерений, отбора или приготовления проб образцов. Это особенно важно при переводе дезактивированных объектов, оборудования или материалов в разряд нерадиоактивных, поскольку, чем ниже такие контрольные уровни, тем сложнее измерения, а очень низкий уровень активности потенциально чистых либо очищенных материалов должен быть подтвержден измерениями. Для *прямых измерений* активности используются различные детекторы ионизирующих излучений, которые располагаются в непосредственной близости от измеряемого объекта. Метод *косвенных измерений* состоит в определении уровня нефиксированного или слабо фиксированного загрязнения мазка, взятого с какой-либо поверхности (уровень загрязнения определяется прямым измерением на приборе).

Отходы, содержащие короткоживущие радионуклиды (по российским Правилам – это отходы, содержащие радионуклиды с периодом полураспада менее 15 суток), собираются отдельно от других РАО и выдерживаются в местах временного хранения организации, производящей сбор отходов. После снижения активности до уровней, удовлетворяющим критериям освобождения от контроля, ТРО удаляются как обычные промышленные отходы, а ЖРО при обязательном радиационном контроле могут быть

возвращены в систему оборотного водоснабжения или слиты в хозяйственно-бытовую канализацию.

Следует отметить, что если отходы, содержащие короткоживущие радионуклиды, обладают химической или биологической опасностью, то их непосредственный сброс без дополнительной обработки не приемлем. Сбор твердых и жидких отходов с периодом полураспада выше указанного значения – предмет рассмотрения следующих разделов.

### 3.3 РАЗДЕЛЬНЫЙ СБОР ЖИДКИХ ОТХОДОВ

Сбор и принципы разделения жидких радиоактивных отходов (ЖРО) зависят от их химического и радиохимического состава, который влияет, например, на отнесение отходов к определенной категории опасности. Состав и характеристики ЖРО существенно влияют на эффективность определенного метода обработки (упаривания, сорбции, ионного обмена, мембранных методов и др.), на коррозию аппаратов и контейнеров, на совместимость отходов с иммобилизирующими матрицами, что и определяет важность их разделения в зависимости от этих характеристик. Жидкие водные отходы должны быть собраны и разделены согласно следующим основным критериям (перечень этих критериев может быть расширен):

- Активность и концентрация радионуклидов;
- период полураспада,
  - отделение короткоживущих отходов, подлежащих хранению для распада радионуклидов;
  - отделение отходов с долгоживущими изотопами, требующих геологического захоронения,
  - наличие радионуклидов, допускающих захоронение в приповерхностных могильниках, или адекватных;
- содержание органических веществ;
- гомогенность, наличие твердой фракции;
- инфекционность;
- химическая токсичность;
- наличие химически агрессивных компонентов.

На предприятиях или в организациях использующих радиоактивные материалы (госпитали, исследовательские учреждения) жидкие отходы должны собираться в маркированные контейнеры или сосуды подходящего размера, изготовленные из материалов, годных для транспортировки. Емкости с ЖРО могут заполняться постепенно и в промежутках между операциями сбора они должны быть всегда закрыты для предотвращения испарения жидкости. Заполнение сборников должно производиться под радиационным контролем и в условиях, исключающих возможность их разлива. Для небольших объемов жидких отходов могут использоваться толстостенные полиэтиленовые бутылки (вместимостью от 5 до 50 л) с заворачивающимися крышками. Необходимо избегать стеклянных контейнеров из-за их хрупкости. Если все же стеклянные контейнеры нужны, то они должны помещаться в подходящие вторичные небьющиеся ёмкости.

В крупных медицинских и исследовательских учреждениях, где образуются большие объемы жидких отходов (десятки кубических метров в год), могут использоваться специальные емкости большого объема для безопасного раздельного



хранения жидких отходов с короткоживущими радиоизотопами и биологически опасными компонентами. Отходы с короткоживущими радиоизотопами после распада и контроля могут быть сброшены в канализацию, отходы с биологически опасными компонентами должны подвергаться специальной обработке для дезинфекции. В зависимости от других характеристик ЖРО могут использоваться дополнительные резервуары для раздельного сбора и хранения каждой категории отходов отдельно.

При выборе контейнеров и емкостей должен быть тщательно рассмотрен вопрос выбора материалов конструкции. Предпочтение должно отдаваться химически стойким материалам. Нержавеющая сталь - это наилучший, но и наиболее дорогой материал. При условии обеспечения безопасности удержания жидких отходов альтернативой могут быть контейнеры, сделанные из пластмассы или стекловолокна.

### **3.3.1 Водные радиоактивные отходы**

Тип жидких водных отходов зависит от конкретной операции, проводимой с использованием радионуклидов. Водные отходы значительно различаются по химическому составу и содержанию радионуклидов от жидких органических отходов, что необходимо учитывать при планировании разделения. Растворы с различными химическими свойствами рекомендуется собирать и хранить отдельно друг от друга, в зависимости от их характеристик и приемлемого способа обработки. Персонал должен знать, что смешивать ЖРО с различными характеристиками нельзя, если для каждой категории отходов существует определенный метод обработки. Если же по каким-то причинам предполагается смешивание ЖРО, важно предотвратить неконтролируемые химические реакции, которые при этом могут протекать с выделением тепла, аэрозолей или с образованием осадков. Например, важно разделение кислых и щелочных растворов, изменение pH может привести к образованию газообразных радионуклидов, например, йода. Смешивание растворов содержащих соединения с окислительными и восстановительными свойствами может также приводить к протеканию нежелательных реакций в растворах.

Раздельный сбор и обработка ЖРО с различными характеристиками на крупных предприятиях, таких как АЭС, должна предусматриваться проектом и конструкцией соответствующих систем, где такие отходы образуются. В процессе эксплуатации, регламентных работ и реконструкции изменения должна вноситься в существующую систему сбора ЖРО с целью поддержки внедрения новых технологий обработки ЖРО, повышения эффективности всей системы обработки отходов в целом.

### **3.3.2 Жидкие органические радиоактивные отходы**

Объем жидких радиоактивных органических отходов, образующихся в результате проведения медицинских, промышленных и исследовательских прикладных программ, мал по сравнению с другими категориями радиоактивных отходов. Однако такие радиоактивные отходы требуют специальной обработки, т.к. не только их радиологические, но и физико-химические характеристики и свойства могут оказывать вредное воздействие на здоровье человека и окружающую среду. Поскольку многие органические отходы несовместимы с окружающей средой, к ним не может быть применен принцип свободного сброса (в канализацию или в окружающую среду) даже после очистки от радиоактивных примесей. Для этого типа отходов предпочтительно применять технологии, включающие удержание и концентрирование радиоактивных примесей и/или разложение органических компонентов.

При эксплуатации АЭС и на других предприятиях ядерного топливного цикла количества жидких органических отходов может быть значительным. Такие отходы должны также подвергаться сортировке как по характеру радиоактивных загрязнений, так и в зависимости от их свойств и предполагаемых методов обработки (см. раздел “Обработка и иммобилизация органических радиоактивных отходов”). Обычно отработавшие загрязненные органические растворители и смазочные материалы собираются и хранятся до обработки отдельно. В них часто может присутствовать загрязненная вода и твердые примеси. Наличие посторонних (неорганических) примесей в жидких органических радиоактивных отходах может влиять на эффективность или приемлемость выбранных методов их обработки. В силу огнеопасного характера сбор и хранение органических отходов должны включать условия для эффективной вентиляции и защиты от возгорания.

### 3.4 РАЗДЕЛЬНЫЙ СБОР ТВЕРДЫХ ОТХОДОВ

Твердые радиоактивные отходы (ТРО) также необходимо разделять и сортировать на местах их образования в зависимости от их свойств, степени и характера загрязненности (которые могут определять их приемлемость к определенному способу захоронения), а также в зависимости от приемлемости для планируемых способов обработки. Принципы разделения будут зависеть от общей стратегии обращения с ТРО и имеющихся средств для дальнейшего сокращения их объема.

Поскольку основными методами обработки и уменьшения объемов ТРО являются методы сжигания, прессования (компактирования) и плавления, обычно их сортировка проводится с учетом их приемлемости для обработки этими методами. Т. е. после определения радиохимических параметров загрязнения и соответствующего разделения, дальнейшая сортировка ТРО производится на горючие и негорючие, прессуемые и непрессуемые (если, конечно, имеются соответствующие технологии обработки). Если нет установки для сжигания радиоактивных отходов, то разделение твердых отходов на горючие и негорючие не имеет смысла. В этом случае предпочтительнее использовать прессование отходов, и для этого разделять твердые отходы на прессуемые и непрессуемые. Если ни сжигание, ни прессование не доступны и не планируются в будущем, сегрегация твердых отходов на вышеупомянутые категории не имеет смысла.

В отдельную категорию должны входить отходы, которые будут направляться на фрагментацию (обычно это большие металлические объекты, элементы загрязненного оборудования) с последующей прямой иммобилизацией без дополнительной обработки. Кроме того, отдельно от других ТРО собираются оборудование, детали конструкций и пр. предметы, выполненные из металлов и сплавов, которые могут направляться на дезактивацию и/или переплавку.

Для облегчения сбора и разделения твердых отходов рекомендуется распределять соответствующие контейнеры по всем рабочим зонам. Контейнеры для сбора и хранения твердых отходов должны удовлетворять следующим критериям, учитывающим тип отходов и последующие стадии обращения с ними:

- иметь необходимую вместимость, для удовлетворения максимальной потребности участка по сбору отходов;
- соответствовать установленным стандартам, принятым на предприятии;

- иметь соответствующую маркировку, отражающую категорию твердых отходов (учитывать предстоящие этапы обработки и кондиционирования);
- предусматривать возможность транспортировки и удобство выгрузки.

Для горючих отходов рекомендуется использовать баки с откидывающимися крышками с помощью ножной педали, с вложенными внутрь прочными полиэтиленовыми пакетами, которые могут быть легко запечатаны по мере наполнения и извлечены. Полиэтиленовые пакеты направляются на сжигание вместе с их содержимым.

Твердые биологические отходы (например, трупы экспериментальных животных) требуют отдельного сбора и хранения при глубокой заморозке для того, чтобы избежать биологического разложения. Для различных типов твердых биологических отходов желательно иметь разные типы контейнеров. Контейнеры, используемые для сбора радиоактивных биоопасных отходов, предпочтительно должен сжигаться вместе с его содержимым. Преимущественно использование прочных одноразовых полиэтиленовых пакетов или контейнеров с крышками (объемом 10-120 л) для предотвращения просачивания влаги. Рекомендуется также использовать двойные упаковки.

В медицинских учреждениях особое внимание необходимо обращать на меры безопасности при сборе *острых* загрязненных предметов, например игл и шприцев, скальпелей, битого стекла, стеклянных ампул и т.д. Эти предметы обычно находятся в сухом виде, хотя маленькие количества жидкости могут оставаться внутри игл и ампул. Если такие отходы направляются на сжигание, для сбора отходов могут рекомендоваться прочные картонные коробки или полиэтиленовые контейнеры. Если нет установки для сжигания, острые предметы можно собирать в металлических ящиках приемлемых объемов.

### 3.5 МАРКИРОВКА КОНТЕЙНЕРОВ

Все контейнеры для сбора радиоактивных отходов должны иметь четкую маркировку определяющую, для каких отходов контейнер предназначен [3.5]. Помимо знака радиационной опасности на контейнере должна быть легко читаемая надпись, определяющая характер собираемых отходов, например **“Отходы для сжигания”**, **“Отходы для прессования”**, **“Осторожно! Острые предметы”** и т. д. Желательно, а иногда обязательно, чтобы контейнеры для разных отходов имели разную окраску для четкой визуальной идентификации их назначения.

Для учета и контроля за движением отходов важно, чтобы по мере заполнения контейнера и после его заполнения оператором была сделана надлежащая запись с данными о собранных отходах. Информация на этикетке к контейнеру должна включать природу и количество присутствующих радионуклидов, происхождение отходов, мощность дозы на поверхности и результаты измерения поверхностного загрязнения. Характеристики отходов фиксируются также в журнале учета радиоактивных отходов. Эти данные являются основой для формирования систем учета образования и движения радиоактивных отходов как на предприятии, где они образуются, так и в дальнейшем при обработке, кондиционировании и захоронении радиоактивных отходов.

### 3.6 ХРАНЕНИЕ ОТХОДОВ НА МЕСТАХ ИХ ОБРАЗОВАНИЯ

Хранение отходов после сбора на местах образования может преследовать разные цели [3.1]. Цель временного хранения отходов (локальное хранение) может состоять в том, чтобы сохранить контроль над радиоактивными отходами в течение времени необходимого для распада содержащихся в отходах короткоживущих радионуклидов до уровней освобождения от контроля [3.6]. Вместимость хранилища в этом случае должна позволять хранить отходы, в которых содержащиеся радионуклиды распадутся до безопасных уровней в пределах разумного времени (например, до одного года).

Локальное временное хранение может быть необходимо по эксплуатационным причинам (например, если отправка отходов на другое предприятие для обработки происходит раз в три месяца) или из-за невозможности отправки в определенное время по другим причинам. Однако локальное хранение целесообразно планировать на возможно короткое время. Централизованные организации по обращению с радиоактивными отходами обычно имеют лучшие условия для обеспечения долгосрочной безопасности радиоактивных отходов.

Локальное временное хранение может продолжаться и в течение нескольких лет, если централизованная организация для обработки и хранения отходов не существует. Если необходимо хранение в течение нескольких лет, специальное внимание должно быть уделено вопросам целостности упаковок, и для выполнения этого требования может потребоваться кондиционирование отходов на местах.

#### 3.6.1 Требования к хранилищам

В зависимости от количества отходов, планируемых для хранения, в качестве хранилища может быть как обычный сейф, так и специальное помещение или здание. В последнем случае хранилище должно быть должным образом спроектировано, построено и лицензировано регулирующим органом. Отходы, помещаемые на относительно долговременное хранение, и отходы, ожидающие распада радионуклидов, могут быть помещены в одно и то же помещение при условии, что следующие требования выполнены:

- (1) Отходы, ожидающие распада, должны храниться отдельно от используемого радиоактивного материала и от отходов других категорий.
- (2) Радиоактивные отходы должны храниться отдельно от нерадиоактивных материалов, тем более взрывчатых, воспламеняющихся или ядовитых.
- (3) Локальное хранение отходов должно располагаться вдали от рабочих мест или мест, регулярно посещаемых персоналом.
- (4) Должны быть установлены физические барьеры, препятствующие свободному доступу в хранилище, средства наблюдения, установлены надежные замки или комбинация этих средств.
- (5) Локальное хранилище должно быть расположено таким образом, чтобы облегчить перемещение отходов в и из хранилища.
- (6) Защита от излучения (встроенная в стены или передвижная) должна обеспечить ограничение мощности дозы в любом доступном месте вне хранилища в соответствии с пределами, предписанными регулирующим органом.
- (7) Помещение хранилища должно быть достаточно большим, чтобы разместить отходы в организованном порядке и визуально идентифицировать индивидуальные группы контейнеров.

- (8) Поверхности в хранилище (пол, стены) должны быть гладкими, чтобы облегчить дезактивацию всякий раз, когда потребуется.
- (9) На входе в хранилище должен быть помещен символ радиоактивности.
- (10) При наличии газообразных выделений хранилище должно быть оснащено вентиляцией.
- (11) Защиту от насекомых/грызунов нужно обеспечить, если хранятся биоопасные отходы.

Для отходов с высокой мощностью дозы на поверхности упаковки должна быть предусмотрена дополнительная защита от излучения, если хранилище посещается регулярно.

Необходимые меры радиационной защиты должны применяться при хранении радиоактивных отходов даже в случае простейшего по конструкции хранилища. Хранилища должны регулярно проверяться ответственным за безопасность и сохранность радиоактивных материалов в отношении уровней радиации и радиоактивного загрязнения, и любая серьезная аномалия должна быть исследована и соответствующие действия приняты. Регулирующий орган должен быть проинформирован о таких аномалиях.

### **3.6.2 Требования к упаковкам**

Функция первичной упаковки отходов заключается в том, чтобы удерживать отходы в течение заполнения контейнера, транспортировки к месту обработки или помещения в хранилище. Перед помещением отходов на хранение необходимо убедиться в следующем:

- (1) Отходы должны быть упакованы таким образом, чтобы целостность упаковки обеспечивалась в течение всего запланированного времени хранения.
- (2) Активность отходов, предназначенных для распада радиоактивности, должна быть измерена (или определена другими методами) и зарегистрирована в первый день хранения.
- (3) Каждая упаковка должна быть промаркирована символом радиоактивности. Бирка с идентификацией должна быть прикреплена к упаковке и контрольный листок должен быть заполнен.

Адекватная упаковка (контейнер) отходов является важным компонентом системы обращения с радиоактивными отходами. Путем выбора надлежащих материалов и вида контейнера можно уменьшить объем отходов, предназначенных для хранения, обеспечить надежное удерживание радионуклидов в течение хранения и облегчить последующую обработку. Следующие факторы должны учитываться при выборе контейнеров для локального хранения:

- (1) Природа отходов;
- (2) Планируемый период хранения;
- (3) Методы дальнейшей обработки, то есть дезактивация, сжигание, измельчение, прессование;
- (4) Способы транспортировки;
- (5) Выполнение существующих национальных и локальных требований безопасности;
- (6) Выполнение требований организации, которая принимает отходы на дальнейшую обработку;

- (7) Простота закрывающих устройств контейнера для предотвращения рассеяния радиоактивных материалов;
- (8) Удобство маркировки упаковки с целью будущего отслеживания и идентификации отходов;
- (9) Надежность и прочность упаковки;
- (10) Способность упаковки выдерживать температурные перепады, столкновения и удары.

Использование полиэтиленовых пакетов или полиэтиленовых бочек для твердых медицинских и биоопасных радиоактивных отходов имеет то преимущество, что они обеспечивают удержание в них небольших количеств жидкостей, присутствующих в таких отходах. Для более надежной упаковки желательно применение двойных полиэтиленовых упаковок. Очень тяжелые влажные отходы нельзя упаковывать в полиэтилен из-за возможного разрыва шва полиэтиленового пакета и утечки содержимого. Полиэтиленовые упаковки незаменимы для больших количеств биологически опасных радиоактивных отходов, например органов и тканей и т. д. Важно, чтобы такие контейнеры плотно закрывались крышкой для предотвращения утечек жидкости. Эти контейнеры также ценны тем, что они могут уменьшить зловонные запахи в течение краткосрочного хранения. Нужно иметь в виду, что эти контейнеры не пригодны для острых предметов.

В целом, полиэтиленовые упаковки для хранения отходов должны удовлетворять следующим требованиям:

- Должны быть плотно запечатаны перед перемещением;
- Максимальный вес отходов, содержащихся в любом пакете, должен быть совместим с ограничениями веса для ручного перемещения;
- Пакеты нужно брать только за верх, и ни в коем случае не сжимать содержимое;
- Пакеты нельзя бросать или переворачивать;
- Толщина полиэтилена должна соответствовать весу отходов. Там, где необходимо, должны использоваться двойные пакеты;
- Пакеты не должны заполняться больше чем на две трети объема.

Контейнеры, предназначенные для хранения острых предметов, должны:

- Быть прочными, герметичными и стойкими к проколам, даже при падении;
- Сохранять содержимое при перемещении внутри рабочих зон;
- Имеют такую апертуру, которая позволяет заполнять контейнер одной рукой, не загрязняя внешнюю сторону контейнера, и позволяет сохранить содержимое контейнера даже при перевороте (принцип “непроливашки”), но;
- Иметь надежное закрывающее устройство;
- Маркировано словами “загрязненные острые предметы”;
- Должны быть снабжены ручкой, не являющейся частью запорного устройства;
- Иметь горизонтальную линию, показывающую, когда контейнер заполнен на две трети, и надпись: “внимание – не заполнять выше этой линии”.

Жидкие отходы должны храниться в подходящих контейнерах или баках, выбранных в соответствии с химическими и радиологическими характеристикам и объемами отходов, и в соответствии с требованиями хранения и дальнейшей обработки. Обычно предпочтительно использовать контейнеры из полиэтилена вместо стекла, поскольку они более прочные и легко поддаются утилизации. Для

специфических отходов, включая органические растворители, контейнер должен быть герметичным и стойким к увеличению объема (расширению) из-за образования газов и паров. В этих случаях предпочтительнее использовать контейнеры, сделанные из полиэтилена высокого давления. Для отходов, содержащих тритий, предпочтительнее использовать стекло. Часто контейнеры помещаются в дополнительные ёмкости, которые могут удерживать содержимое первичных контейнеров. Цветная идентификация контейнеров может использоваться для выделения различных типов отходов.

Перед решением вопроса о хранении биоопасных радиоактивных отходов в металлических контейнерах, коррозионные свойства жидкости, которую нужно хранить, и продолжительность хранения должны быть тщательно изучены. Если отходы должны быть обработаны паром или подвергнуться другой термообработке для стерилизации перед захоронением, необходим контейнер, способный выдержать высокую температуру. Таким контейнером может быть контейнер, сделанный из полипропилена, стойкого к разрушению до температуры 130°C. Стекланных контейнеров следует избегать из-за их хрупкости.

### 3.7 ПРИЛОЖЕНИЕ. КАТЕГОРИРОВАНИЕ ПЕРВИЧНЫХ ФОРМ ОТХОДОВ, ПРИНЯТОЕ В МОСКОВСКОМ НПО “РАДОН”, РОССИЯ

Сортировка отходов, предназначенных для отправки на специализированное предприятие по переработке низко- и среднеактивных РАО МосНПО “Радон”, производится в соответствии с принятым в объединении категорированием первичных форм отходов [3.7-3.9]. (Транспортирование отходов, образующихся на предприятиях и в учреждениях Центрального региона России, осуществляется самим объединением, для чего оно располагает собственным парком спецавтомобилей.) Представленное в таблице 3.1 разделение первичных форм отходов по группам разработано с учетом эффективного использования технологических возможностей объединения. Оно служит для регулирования отношений объединения с поставщиками отходов и обеспечения функционирования базы данных в системе учета РАО.

ТАБЛИЦА 3.1. КЛАССИФИКАТОР И УПАКОВОЧНЫЕ СРЕДСТВА ДЛЯ ПЕРВИЧНЫХ ФОРМ ОТХОДОВ

Индекс-идентификатор и группы отходов		Упаковка
<b>И69</b>	Источники, выгружаемые из контейнеров	Специальный транспортный защитный контейнер с устройством донной разгрузки.
<b>И</b>	Источники с контейнерами	Защитный контейнер + металлический или деревянный ящик
<b>ИР</b>	Радиоизотопные приборы	Бумажный мешок + многооборотный пластиковый контейнер с крышкой..
<b>ИП</b>	Ампулированные препараты	Ампулы, флаконы + металлические контейнеры, 100-л бочки.
<b>Р</b>	Реакторные	Пенал + защитный контейнер.
<b>Б</b>	Биологические	Бумажный, пластиковый мешок + многооборотный пластиковый контейнер с крышкой.
<b>Г</b>	Горючие небιологические	Бумажный мешок + многооборотный полиэтиленовый контейнер с крышкой.
<b>П</b>	Прессуемые	Бумажный, пластиковый мешок, картонная коробка + 100-л бочки.

Индекс-идентификатор и группы отходов		Упаковка
<b>К</b>	Кондиционируемые	Бумажный мешок + 200-л металлические бочки, многооборотный пластиковый контейнер с крышкой.
<b>Ф</b>	Фильтры	Полиэтиленовый мешок + металлический контейнер
<b>С</b>	Свинец	Полиэтиленовый мешок + деревянный ящик, металлический контейнер.
<b>Н</b>	Несортированные	Бумажный, полиэтиленовый мешок, пластиковый чехол, рубероид + металлический контейнер, 200-л бочка.
<b>ЖН</b>	Жидкие неорганические	Спецавтоцистерна.
<b>ЖО</b>	Жидкие органические	200-л стальная бочка.
<b>Ж</b>	Жидкие прочие	Герметичный сосуд (контейнер КЖО, фляга, канистра).

В таблице также указано, какие упаковочные средства должны быть использованы для тех или иных групп отходов. В основе разработанных на объединении требований по сбору, сортировке, временному хранению и, если необходимо, предварительной обработке отходов, лежат нормативные документы: “Основные Санитарные правила обеспечения радиационной безопасности” (ОСПОРБ-99) и “Санитарные Правила обращения с радиоактивными отходами” (СПОРО-2002). Порядок выполнения технологических и административных процедур по обращению с РАО в МосНПО “Радон” также определяется набором нормативных документов РФ и отдельных положений документов МАГАТЭ.

Требования по сбору, сортировке, упаковке и временному хранению отходов, направляемых на МосНПО, при заключении договора с поставщиком отходов включаются в “Правила передачи РАО”. В этот документ, помимо указанных в таблице 1 сведений, входят радиологические и другие критерии приема упаковок отходов, в частности:

- состав отходов,
- метод дальнейшей обработки (например, для прессуемых отходов предполагается их накопление и промежуточное хранение, прессование),
- масса и предельные размеры упаковок, конфигурация упаковки,
- предел по общей удельной  $\alpha$ - и  $\beta$ -активности,
- срок нахождения и условия хранения у заказчика биологических отходов и т.д.

В документе оговариваются особые требования. Например, биологические объекты в отсутствии холодильных установок могут храниться в организации не более 5 суток. Трупы животных, в организм которых были введены радионуклиды, должны предварительно дезинфицироваться 5% раствором лизола и 10% раствором формалина, а при укладке их в сборники-контейнеры – пересыпаться древесной стружкой, опилками или другими влагопоглощающими материалами. В конструкции контейнеров и цистерн для жидких отходов должна быть предусмотрена возможность вакуумной перекачки РАО. В требования специализированного предприятия МосНПО “Радон” входит также условие нейтрализации ЖРО на месте их образования до pH-7-9. Самовоспламеняющиеся и взрывоопасные РАО до отправки на захоронение должны быть переведены в неопасное состояние.



Передача РАО на переработку и захоронение производится при соблюдении установленных правил и оформляется актом. Контроль правильности оформления документации и радиационного контроля производится представителем НПО по следующим параметрам: масса и наружные размеры упаковок; маркировка; механическая прочность; наличие внутри упаковки бирки или документов с необходимыми сведениями (в том числе о составе РАО); мощность дозы на поверхности упаковки и на расстоянии 1м от нее; наличие и величина загрязнения наружной поверхности; надежность запоров и необходимая герметичность; наличие грузоподъемных и крепежных элементов.

## ЛИТЕРАТУРА

- [3.1] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Storage of Radioactive Wastes, IAEA-TECDOC-653, Vienna (1992).
- [3.2] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Handling and Treatment of Radioactive Aqueous Wastes, IAEA TECDOC-654, Vienna (1992).
- [3.3] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Treatment and Conditioning of Radioactive Organic Liquids, IAEA-TECDOC-656, Vienna (1992).
- [3.4] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Management of Radioactive Waste from the Use of Radionuclides in Medicine, IAEA-TECDOC-1183, Vienna (2000).
- [3.5] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Containers for Packaging of Solid and Intermediate Level Radioactive Wastes, Technical Reports Series No. 355, IAEA, Vienna (1993).
- [3.6] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Clearance Levels for Radionuclides in: Application of Exemption Principles, Safety Series No. 111-G-1.5, IAEA, Vienna.
- [3.7] Нормы радиационной безопасности. НРБ-99. – М.: Минздрав России, (1999), стр. 116.
- [3.8] Основные Санитарные Правила обеспечения радиационной безопасности (ОСПОРБ-99). – М.: Минздрав России, (2000), стр. 114.
- [3.9] Санитарные Правила обращения с радиоактивными отходами (СПОРО-2002). – М.: Минздрав России, (2003), стр. 62.

## **4 ВЫБОР ТЕХНОЛОГИЙ ОБРАБОТКИ РАДИОАКТИВНЫХ ОТХОДОВ, МИНИМИЗАЦИЯ ОТХОДОВ**

### **4.1 ВВЕДЕНИЕ**

Для предотвращения или уменьшения отрицательного потенциального воздействия радиоактивных отходов на здоровье человека и окружающую среду на каждом этапе обращения с ними – от их возникновения до окончательного захоронения – необходимо использовать такие технологии, которые позволяют достичь главной цели всей системы обращения с РАО. Она состоит в достижении безопасности обработки, хранения, транспортировки и захоронения в соответствии с национальными нормами и международными обязательствами. В связи с этим процедура тщательного выбора оптимальной технологии обработки отходов с учетом технических, экономических и социально-политических обстоятельств является важным элементом, и его значение в деле повышения эффективности всей системы нельзя недооценивать.

### **4.2 НЕТЕХНИЧЕСКИЕ ФАКТОРЫ, ВЛИЯЮЩИЕ НА ВЫБОР ТЕХНОЛОГИИ**

Несмотря на то, что выбор оптимальных технологий обработки отходов и методов обращения с ними – задача в основном чисто техническая, о чем речь пойдет ниже, большое значение имеет и “нетехнические” аспекты. В некоторых обстоятельствах нетехнические факторы могут оказать существенное влияние на выбор конкретных технических решений. Из нетехнических факторов, влияющих на принятие решения (иногда они тесно взаимосвязаны), можно выделить следующие:

- национальная система обращения с радиоактивными отходами;
- производственная инфраструктура;
- трудовые ресурсы и компетентность персонала;
- наличие и механизм финансирования;
- социально-политические факторы;
- географические и геологические условия;
- международное сотрудничество.

Характеристика указанных аспектов общей системы обращения с радиоактивными отходами представляет собой отдельную, выходящую за рамки данного раздела, тему. Ниже дается лишь краткое описание их влияния на выбор технологии.

#### **Национальная система обращения с радиоактивными отходами**

Степень развития национальной системы обращения с радиоактивными отходами влияет на возможности выбора технологий, поскольку для обеспечения радиационной безопасности необходима надлежащая инфраструктура, основными элементами которой являются законодательная основа и регулирующая структура, требования о соблюдении их пользователями, а также требования, предъявляемые к оборудованию и процедурам. Общие требования, предъявляемые к национальной системе обращения с РАО, изложены в [4.1]. Если некоторые компоненты этой системы отсутствуют, или они не удовлетворяют реальным национальным потребностям или международным нормам, эффективность использования любой технологии обращения с отходами и эффективность достижения целей обращения с отходами может быть поставлена под сомнение.

Например, любая технология обработки РАО должна удовлетворять нормам радиационной защиты персонала, прописанным в нормативно-технических документах [4.2, 4.3]. Профессиональные дозы облучения, которые не должны превышать установленные нормативы, необходимо ограничить посредством выбора соответствующих методов, например путем применения дистанционных методов обращения, выбором оборудования, требующего меньшего человеческого вмешательства и обслуживания, выбором адекватных методов определения характеристик и т.д.

Примером может служить и вопрос по освобождению отходов из-под контроля, уровни которого рассчитываются на основе дозовых критериев и также устанавливаются законодательно [4.4]. Если эти уровни не установлены, юридического основания для освобождения от регулирующего контроля даже очень низкоактивных отходов и, следовательно, для уменьшения количества радиоактивных отходов нет.

Адекватность национальной системы обращения с РАО позволяет гарантировать оптимальное использование ресурсов (материальных, финансовых и человеческих) социальной и производственной инфраструктуры, представляющей собой комплекс производственных и непроизводственных отраслей: дороги, связь, транспорт, образование, здравоохранение и др.

### **Производственная инфраструктура**

Степень, в которой технологии обращения с отходами могут быть использованы, зависит от доступности основных производственных ресурсов, включая развитие промышленности, транспортные средства, связь, энергоснабжение и другие элементы инфраструктуры. Процесс выбора оптимальной технологии обращения с отходами может зависеть, например, от доступности площадок для захоронения, наличия специального транспорта, промышленности, изготавливающей контейнеры для отходов и т.п.

### **Трудовые ресурсы и компетентность персонала**

Важным фактором при выборе технологии является наличие трудовых ресурсов. Для эффективного и безопасного обращения с РАО, для эксплуатации, обслуживания и ремонта зачастую весьма сложного оборудования необходим персонал с достаточным уровнем компетентности. Иногда следует учитывать наличие персонала, способного квалифицированного действовать в условиях аварийной ситуации. Кроме того, необходима развитая система обучения и повышения квалификации персонала.

### **Финансирование**

Одним из основных факторов, ограничивающим выбор технологии обращения с тем или иным видом отходов, является финансовое обеспечение, поскольку стоимость различных технологий может сильно отличаться друг от друга. Экономические соображения могут, например, заставить отказаться от более эффективного, но дорогостоящего, метода обработки отходов. Недостаточное финансирование может привести к несоблюдению норм и требований безопасности.

Следует отметить, что структура и механизм финансирования обращения с отходами неодинаковы в разных странах. Работы по обращению с отходами могут

финансироваться из бюджета, могут оплачиваться, полностью или частично, организациями и предприятиями, где эти отходы образуются.

### **Социально-политические факторы**

Выбор технологии обращения с РАО, особенно крупномасштабной, требует привлечения общественного мнения. Оппозиционные партии или организации способны возбудить общественное мнение против той или иной технологии, поэтому необходимы постоянные консультации с общественностью в процессе принятия решений. Необходимо учитывать проявления радиофобии, преувеличения населением радиологической опасности. Кроме того, могут возникать земельные споры, особенно там, где стоимость земель высока или ее ресурсы ограничены, и т.п. Следует также понимать, что политические решения иногда могут противоречить технической целесообразности.

### **Географические и геологические условия**

География страны может иметь большое влияние на выбор технологий обращения с отходами, поскольку различные технологии могут предъявлять разные требования к использованию земли или воды. При размещении технологических объектов необходимо учитывать их близость к населенным пунктам, к материальным ресурсам и степень развития инфраструктуры местности. Особенно сильно географические и геологические условия влияют на выбор технологии по захоронению отходов (см. соответствующий раздел).

### **Международное сотрудничество**

Мировое сообщество разработало ряд соглашений, направленных на укрепление международного сотрудничества в области ядерной деятельности, к которой относится обращение с радиоактивными отходами. Большинство соглашений принято в форме конвенций, т.е. имеющих обязательную силу. Глобальная система ядерной и радиационной безопасности характеризуется тремя главными компонентами [4.5, 4.6]:

- обменом технической информацией и опытом в мировом масштабе;
- международно-признанными нормами безопасности, требующими придания им юридической силы на национальном уровне;
- юридически обязательными соглашениями между государствами.

Наличие двусторонних, многосторонних или региональных соглашений в области обращения с радиоактивными отходами могут быть полезны для экономии средств и уменьшения потенциальной опасности, связанной с обработкой отходов. Сюда входят соглашения об обмене технологиями, о передаче отходов для переработки или хранения и пр. При выборе технологии обращения с отходами полезно рассмотреть вопрос о доступности ресурсов в других странах, особенно соседних. Целесообразным может быть заимствование высокотехнологического оборудования, такого как, например, суперкомпакторы.

## **4.3 ВЫБОР ТЕХНОЛОГИЙ С УЧЕТОМ ТЕХНИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ**

В выборе технологии для обработки радиоактивных отходов решающую роль играют ряд технических факторов [4.7]. Относительная важность рассматриваемых в

данном разделе технических критериев зависит от конкретной проблемы и рассматриваемой технологии.

### **Характеристики радиоактивных отходов**

Знание и понимание характеристик отходов является самым важным при выборе оптимальной технологии их обработки, т.е. стадия анализа и характеристики отходов всегда должна предшествовать принятию решения о возможности и целесообразности применения той или иной технологии.

Как известно, отходы весьма различаются по происхождению, физическим, химическим и биологическим свойствам. Они могут быть твердыми, жидкими и газообразными, широк диапазон их активности (например, низкоактивные жидкие отходы и отработавшее ядерное топливо или отработавшие свой ресурс закрытые источники ионизирующего излучения). Потоки отходов могут быть различными по объему и т.д. Понятно, что столь различные свойства отходов накладывают ограничения на выбор доступных технологий обращения с ними и диктуют применение различных технологий их обработки.

В настоящее время сложился ряд технологических приемов, позволяющих оптимально проводить обработку отходов. Список стандартных технологий, применяемых для обработки некоторых видов отходов, представлен в таблице 4.1.

### **Масштаб применения технологий**

Количество отходов и скорость их возникновения имеют значительное влияние на масштаб и конструкцию установки по обращению с отходами. Вообще, большие количества отходов требуют специального, часто сложного, оборудования для обработки. Такое оборудование может быть стационарным или мобильным в зависимости от местных условий. Кроме того, большие количества отходов требуют применения технологий по их минимизации. Для обращения с отходами небольших объемов достаточно иметь более простое и дешевое оборудование.

Некоторые процессы, как, например, подготовка отработавших источников для захоронения, могут быть только маломасштабными. Другие процессы являются полномасштабными по определению, например прессование твердых отходов на суперкомпакторах (суперпрессах) или упаривание ЖРО.

Вопрос, тесно связанный с масштабом использования технологии, – выбор между обработкой отходов на установках централизованных предприятий (понятно, что в этом случае отходы подлежат транспортированию) и на установках, расположенных в местах возникновения отходов (т.е. имеет место дублирование установок), или на мобильных установках. Принятие решения в таких случаях обычно основывается на экономических соображениях.

ТАБЛИЦА 4.1. ОСНОВНЫЕ МЕТОДЫ ПЕРЕРАБОТКИ РАДИОАКТИВНЫХ ОТХОДОВ

Вид отходов		Методы переработки
<b>Твердые</b>	Сжигаемые	Сжигание в печах. Плазменное сжигание. Термохимическая переработка. Сжигание при остекловывании. Кислотное разложение
	Прессуемые	Компактирование и Суперкомпактирование
	Металлические	Компактирование. Плавление
	Несжигаемые, непрессуемые	Контейнеризация
<b>Жидкие</b>	Органические сжигаемые	Сжигание, совместное сжигание с твердыми отходами
	Органические несжигаемые	Сорбция на порошках и включение в цементоподобную матрицу, термохимическая переработка
	Водные малосолевые	Очистка (концентрирование) выпаркой химическим осаждением, сорбцией, селективной сорбцией, мембранным разделением. Цементирование
	Водные высокосолевые	Очистка селективной сорбцией. Цементирование. Битумирование. Остекловывание
<b>Газообразные</b>		Улавливание сорбцией и химическими реагентами

### Отработанность, или “зрелость”, технологии

При выборе конкретного технологического процесса необходимо собрать надежную информацию относительно его зрелости. Термин “зрелость” охватывает сложный набор вопросов, в числе которых следующие:

- Процесс уже применяется на промышленном уровне или все еще находится в стадии разработки?
- Использовался ли процесс с реальными отходами или имитаторами?
- Получил ли данный процесс лицензию?
- Используется ли технология в настоящее время?
- Доступно ли оборудование, известны ли поставщики?
- Каков практический опыт эксплуатации (стоимость, производительность, надежность, ремонтпригодность)?
- Есть ли доступ к информации относительно современного использования технологии, чтобы выяснить его результаты и проверить рекламные заявления?

Преимущество зрелой технологии в сокращении стоимости и уменьшении риска при ее использовании в ядерных и радиохимических отраслях промышленности очевидно. Применение таких технологий дает определенные гарантии получения ожидаемого результата, позволяет более обоснованно планировать обращение с отходами и достижение заданных целей обработки.

## **Надежность технологии**

Термин “надежность” технологии не имеет строгого определения; в общем случае он означает надежность эксплуатации и обслуживания технологического оборудования. В отношении технологий обращения с РАО это понятие включает следующие важные характеристики:

- чувствительность технологии к изменению состава отходов, поступающих на переработку;
- зависимость процесса от характеристик всех исходных материалов;
- степень зависимости процесса от технологических параметров;
- сложность эксплуатации, обслуживания и снятия с эксплуатации.

Иногда недостаток надежности той или иной технологии можно компенсировать проведением дополнительных операций, например тщательной предварительной обработкой отходов (сегрегацией, гомогенизацией) и пр.

## **Диапазон применения технологии**

Если надежность технологии связана с чувствительностью процесса как такового к различным параметрам, то термин “диапазон применения” технологии означает возможность ее применения к различным типам отходов. Чувствительность к диапазону характеристик отходов позволяет сделать выбор между технологией, эффективной только для одного типа отходов, и другой, применимой для многих типов РАО. Например, процессы биологического или химического окисления органических отходов более чувствительны к составу отходов, нежели процессы сжигания: последние позволяют обрабатывать фактически любые органические материалы. Понятно, что стоимость установки сжигания достаточно высока.

## **Характеристики обработанных отходов**

При выборе того или иного метода обработки отходов необходимо учитывать характеристики получающегося в результате продукта. Требования к характеристикам продуктов обработки (следовательно, и к самой технологии) различны, поскольку они могут предназначаться для разных целей, а именно:

- дальнейшей обработки;
- захоронения без дополнительной обработки;
- иммобилизации для захоронения;
- иммобилизации для хранения;
- временного хранения;
- подготовки упаковки для последующего транспортирования или захоронения.

Требования к продукту определяются и критериями его приемлемости для транспортирования. Среди этих критериев – требования к типу упаковки, её размерам, весу, механической прочности; они включают пределы для мощности дозы на поверхности и поверхностного загрязнения упаковки.

## **Сложность и ремонтпригодность установок**

Принципы простоты конструкции и эксплуатации оборудования особенно важны в ядерной промышленности. Преимуществами обладают процессы, характеризующиеся тем, что:

- в оборудовании мало или полностью отсутствуют движущиеся части;
- используются доступные реактивы и компоненты;
- управление ими простое;
- не требуют высокого уровня технической компетентности обслуживающего персонала.

Зачастую сложности и трудоемкости процесса, помимо высокой капитальной стоимости, сопутствуют большие эксплуатационные расходы.

Технические показатели оборудования, от которых зависит его обслуживание, например, дезактивация, ремонт, замена узлов и т.д., суть следующие:

- простота конструкции;
- радиационная стойкость материалов;
- сопротивление коррозии;
- износостойкость;
- сложность или простота дезактивации.

## **Сокращение объема**

При выборе технологии обращения с радиоактивными отходами необходимо учитывать требования сокращения их количеств и объема. Сокращение объемов отходов является одним из компонентов общей концепции минимизации РАО. Его актуальность связана не только с экологическими причинами, но и с экономическими. Сокращение объема отходов позволяет снизить расходы на их перевозку, затраты на обработку, хранение, захоронение, продлить срок эксплуатации существующих установок по хранению и захоронению РАО и т.д. Обычно рассматриваются два основных направления практического сокращения отходов:

- сокращение источников РАО и
- минимизация объемов образовавшихся РАО для хранения и захоронения.

Более подробное описание этого аспекта обращения с РАО дается в приложении к данному разделу. Тема минимизации отходов выделена в отдельный раздел в виду важности проблемы. К обсуждаемой теме имеют отношение методы и способы сокращения объемов уже образовавшихся отходов для оптимизации хранения и захоронения (см. п. 2 приложения).

## **Научно-исследовательские работы**

Все технологии, используемые ныне в ядерной и радиохимической промышленности, явились результатом обширных научных исследований и разработок, поэтому использование зрелых, проверенных временем технологий не будет нуждаться в проведении дорогостоящих исследований. Понятно, что выбор инновационных технологий автоматически влечет необходимость дополнительных исследований. Однако исследовательские программы дороги и требуют высококвалифицированных



научных кадров. Кроме того, включение в контракт обслуживание и ремонт оборудования при его покупке могут облегчить принятие решения о выборе соответствующей технологии.

При обработке небольших объемов отходов исследования могут ограничиваться проверкой совместимости отходов с имеющимися на рынке или доступными технологиями. При принятии решения о способах обработки больших количеств отходов, а также при разработке долгосрочных программ, может возникнуть необходимость проведения исследовательских и испытательных работ для поиска новых или специфических методов, способных более эффективно решить задачу обращения с отходами, чем с помощью уже имеющихся и доступных методов.

### **Вторичные отходы**

При выборе технологии обработки отходов следует учитывать образование вторичных отходов, их свойства и объемы, и предусмотреть варианты их обработки. Надо иметь в виду, что для обработки вторичных отходов могут потребоваться дополнительные технологии и оборудование.

## **4.4 ПРИМЕР ВЫБОРА ТЕХНОЛОГИЙ**

Итак, процесс выбора оптимальной технологии обращения с РАО или комбинации методов требует рассмотрения всех технических и нетехнических факторов. Какие из факторов окажутся при принятии решения определяющими, зависит от конкретного случая. На рисунке 4.1 приведен типичный список вопросов, которые обычно рассматриваются при выборе технологии.

Если время жизни радионуклидов, содержащихся в отходах, мало, как, например, в случае некоторых медицинских применений радиоизотопов, может быть достаточно простая выдержка таких отходов до распада без применения специальных технологий обработки. Если объем отходов значителен, необходимо преобразование их в форму, обеспечивающую безопасность в течение времени, требующегося для распада радионуклидов.

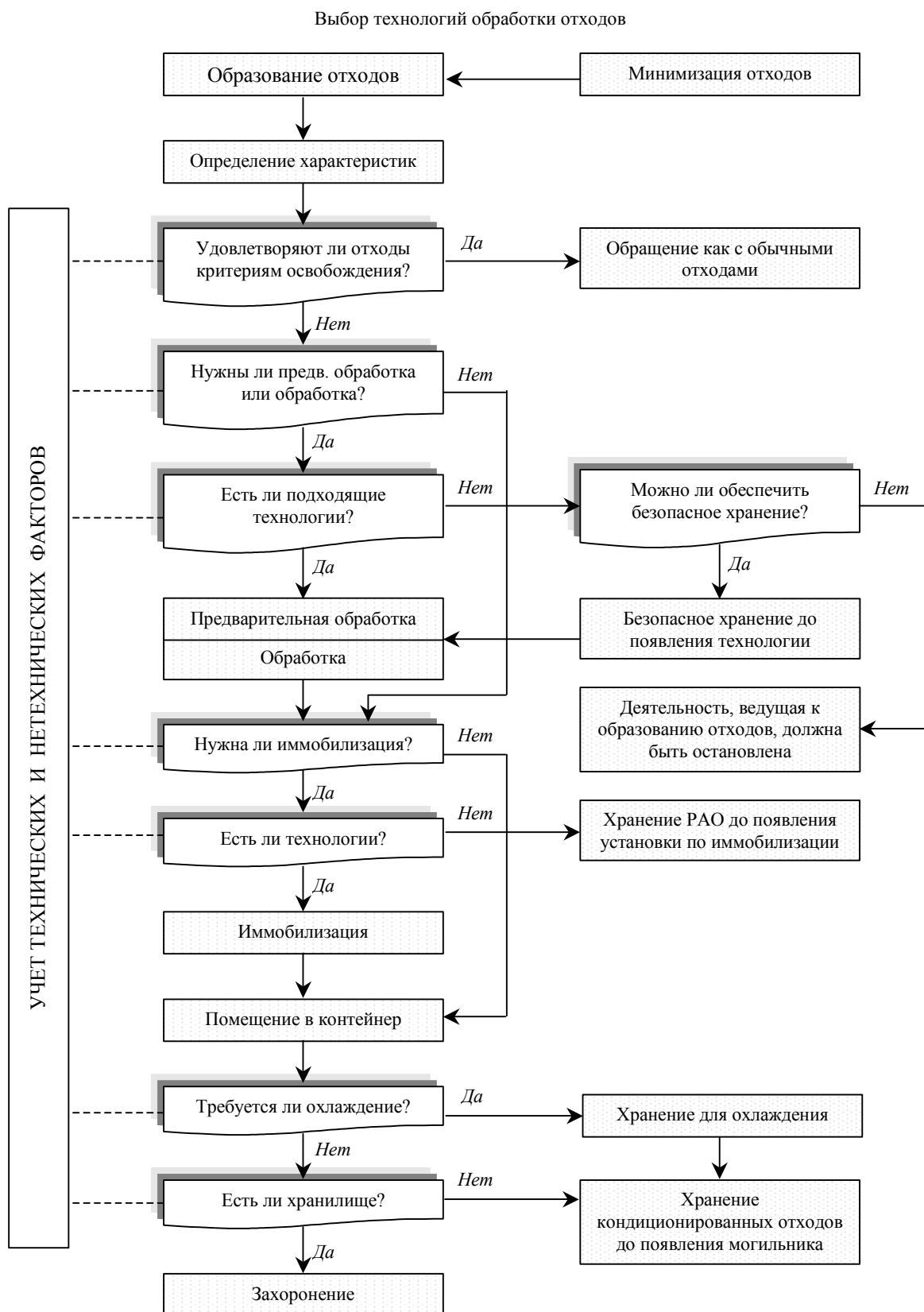


Рис. 4.1. Принятие решения при выборе технологии обращения с отходами.

Если ядерная деятельность ведет к образованию отходов, подлежащих обработке, кондиционированию, хранению, транспортировке и захоронению, социально-политические по своей сути факторы, в том числе наличие квалифицированного персонала и вопрос стоимости, нуждаются в тщательной оценке. Например, в случае обработки высокоактивных отходов или кондиционирования отработавшего топлива

для захоронения, фактор общественного мнения может играть доминирующую роль. Кроме того, концентрация внимания на стоимостных оценках может привести к упрощенному пониманию проблемы безопасного и эффективного обращения с РАО, т.е. необходима осторожная оценка финансовой выгоды и связанных с этим рисков.

Рисунок 2.1 во второй главе, иллюстрирующий связь системы классификации радиоактивных отходов с технологическими процессами их обработки на примере ГУП МосНПО "Радон", демонстрирует также пример выбора технологий обработки радиоактивных отходов в зависимости от их свойств и характеристик.

#### 4.5 ПРИЛОЖЕНИЕ. МИНИМИЗАЦИЯ РАДИОАКТИВНЫХ ОТХОДОВ

В документах МАГАТЭ минимизация отходов определяется как "концепция, позволяющая сократить отходы, как по количеству, так и активности до разумно достижимого минимального уровня". К данному определению нужно добавить, что минимизация отходов является частью общей программы обращения с РАО, цель которой – эффективное снижение радиологического и экологического влияния отходов на окружающую среду.

Для координации планирования и проведения необходимых мероприятий по минимизации РАО должна быть разработана ее стратегия. При этом должны учитываться многие аспекты: общая национальная стратегия обращения с РАО, законодательная база, определение сфер ответственности, экономические условия, система обеспечения качества, культура безопасности, уровень развития промышленной инфраструктуры, в том числе отрасли обращения с радиоактивными отходами и т.д. Поэтому механизм принятия решения о стратегии минимизации отходов включает последовательный анализ всех факторов. Практическая реализация установленных концептуальных принципов может быть достигнута выполнением комплекса организационных и технических мероприятий.

В данном разделе кратко рассматриваются основные технические аспекты минимизации отходов, применяемые на основных стадиях общей системы обращения с радиоактивными отходами [4.2]:

- Сокращение источников РАО:
  - на стадии планирования, проектирования и строительства ядерных установок,
  - в процессе эксплуатации установок и
  - в процессе снятия установок с эксплуатации.
- Минимизация объемов образовавшихся РАО для их хранения и захоронения.

##### 4.5.1 Сокращение источников отходов

Снижение образования РАО по объему и по активности источников – самый простой и логичный способ их минимизации.

##### *Проектирование и строительство ядерных установок*

Основные технические решения по минимизации отходов на стадии проектирования установок, при эксплуатации которых будут образовываться радиоактивные отходы либо которые предназначены для переработки таких отходов, суть следующие.

- Правильный выбор эксплуатационных и конструкционных материалов. Требования к конструкционным материалам включают:
  - коррозионную стойкость,
  - слабую сорбирующую способность,
  - высококачественную обработку поверхностей (например, электрополировку) и, как следствие, легкость их дезактивации,
  - применение специальных покрытий (например, для пористых материалов),
  - низкую способность к активации.
- Оценка образования отходов и приемлемых технологий их обработки. Усилия должны быть направлены на уменьшение ожидаемых отходов, прогнозирование их характеристик, качественного и количественного состава. Применение эффективных технологий влияет на степень уменьшения образования отходов. Кроме того, выбор надежных технологий предполагает долгосрочность их безотказной работы без замены оборудования и/или его ремонта.
- Предотвращение/предупреждение накопления радиоактивных отходов, минимизация утечек отходов во избежание необходимости дезактивации и ремонта.
- Разделение активных и неактивных сред.
- Удобство доступа к оборудованию для замены узлов при ремонте и дезактивации.

Выполнение требований по минимизации на стадии планирования и проектирования впоследствии окажет влияние на производство отходов при эксплуатации установок и в процессе снятия их с эксплуатации.

### ***Сокращение радиоактивных производственных отходов***

Ниже представлены типичные меры и процедуры, направленные на минимизацию производственных РАО (т.е. возникающих в процессе эксплуатации ядерных установок, в том числе установок по обращению с отходами). Вообще говоря, количество отходов, образующихся в условиях нормального режима работы правильно спроектированной установки, относительно невелики. Оно может быть значительно выше при проведении ремонтных работ или реконструкции установки. Для уменьшения образования эксплуатационных радиоактивных отходов следует принимать во внимание следующее:

- Ограничение числа и размеров зон возможного загрязнения, анализ всех мест в рабочей зоне и всех этапов технологического процесса. Эти меры необходимы для определения возможности сокращения образования РАО и предотвращения радиоактивного загрязнения. Например, этого можно достичь исключением на каком-то этапе упаковочных материалов, увеличивающих собой количество отходов, или применением материалов, перспективных в отношении их повторного использования. Такой анализ проводится периодически для выявления новых возможностей минимизации отходов или идентификации изменившихся условий.
- Создание системы учета радиоактивных материалов и отходов. Такая система позволяет отслеживать их количество, тип, активность и другие важные характеристики, а также их движение и место нахождения.
- Правильная эксплуатация, соблюдение технологических регламентов и режимов, их постоянный контроль, своевременное и квалифицированное техническое

обслуживание установок. Замена неисправного оборудования или его элементов, своевременные профилактические работы также могут быть элементами минимизации отходов.

- Пересмотр существующей практики, применение новейших технологических процессов и использование положительного опыта для модификации и совершенствования процедур технического обслуживания.
- Рециклирование/повторное использование восстановленных материалов. Любое рециклирование/повторное использование материалов из отходов и перевод их в категорию нерадиоактивных позволяет значительно снизить количество радиоактивных отходов и затраты на их хранение или захоронение. Однако для реализации такого подхода, помимо определенных технических возможностей (соответствующей методологии, инструментария для измерения очень низких уровней загрязненности и пр.), необходимо наличие официально установленных критериев приемлемости таких материалов для повторного использования. Критерии приемлемости материалов для неограниченного повторного использования (*критерии неограниченного освобождения*) могут быть достаточно жесткими. *Критерии ограниченного освобождения* для использования материалов в определенных процессах могут быть менее жесткими, если это радиологически оправдано. Следует отметить, что необоснованно жесткие требования к степени чистоты материалов, особенно в ядерной отрасли, могут препятствовать возможности их рециклирования/повторного использования, и соответственно приводить к увеличению материалов, попадающих в категорию отходов.

Наличие возможности и условий для освобождения отходов от регулирующего контроля, т.е. перевода их в категорию нерадиоактивных, является важным фактором минимизации РАО. Освобожденные от контроля отходы могут быть либо подвергнуты обработке как обычные, нерадиоактивные, бытовые или промышленные отходы, либо переработаны для повторного использования. Металлом от демонтажа реакторов и реакторного оборудования может после соответствующей обработки и очистки поступать на переплавку и впоследствии использоваться без каких-либо ограничений, либо использоваться только в ядерной промышленности (например, для производства контейнеров для хранения и перевозки радиоактивных материалов). В последнем случае, естественно, требования к степени очистки металла будут менее жесткими, чем в случае неограниченного использования во всех сферах хозяйственной деятельности. То же относится к жидким отходам, когда обработка и повторное использование жидкостей в рамках отдельного процесса уменьшает потенциальное воздействие на окружающую среду и уменьшает количество РАО.

- Установление системы сортировки РАО и обеспечение более эффективного выявления характеристик. Сортировка и адекватный анализ РАО как существенные элементы практической минимизации радиоактивных отходов необходимы для:
  - строгой сегрегации радиоактивных и нерадиоактивных отходов,
  - разделения радиоактивных отходов в зависимости от их типа и уровня активности, т.е. от предполагаемых методов их последующей переработки, хранения и захоронения.
  - разделения радиоактивных отходов с целью исключения нежелательного смешивания и усложнения последующей обработки.

- Постоянное информирование персонала о подходах, технических приемах и усовершенствованных методах, касающихся сокращения объемов отходов. Это положение предполагает как использование административных механизмов управления, так и постоянное повышение квалификации персонала и его обучение, что способствует улучшению понимания проблемы минимизации в целом и на отдельных этапах производства.

Следует добавить, что культура производства, адекватная организация труда, обеспечение необходимым инструментом и материалами – все это способствует предотвращению тех операций или действий, которые приводят к образованию дополнительного количества радиоактивных отходов, обеспечивает предотвращение распространения загрязнения, снижает дозовые нагрузки на персонал и т.д.

### ***Снятие ядерных установок с эксплуатации***

При снятии ядерных установок с эксплуатации образуются большие объемы РАО в основном низкой и средней активности. Большая часть этих отходов относится к категории очень низкоактивных (при снятии с эксплуатации АЭС она составляет около 75 %). Доля отходов высокой активности не превышает 5 % [4.8, 4.9]. Следует отметить, что существует стратегия немедленного или отсроченного демонтажа объекта [4.10]. Выбор одной из этих стратегий основывается на разных факторах, в частности наличием технологий демонтажа, доступности приемлемых установок для хранения/захоронения РАО и т.п. В одних случаях снятие установки с эксплуатации не требует сложных методов и технологий, в других возникает необходимость в сложных технологиях и дополнительном оборудовании. Но именно проблема обращения с РАО и их захоронения стимулирует разработку таких технологий снятия установки с эксплуатации, которые позволят минимизировать образование отходов.

### **4.5.2 Минимизация объемов РАО для хранения и захоронения**

Важным элементом общей стратегии минимизации отходов является снижение их объема уже после того, как они образовались. На этой стадии минимизация отходов понимается как оптимальное уменьшение их объемов для уменьшения стоимости хранения и захоронения без ущерба безопасности. Кроме того, это позволяет увеличить срок эксплуатации существующих хранилищ и площадок по захоронению отходов и уменьшить потребность в перевозке отходов. Сокращение объемов отходов достигается применением различных методов обработки и концентрирования, таких как сжигание, прессование, выпаривание, фильтрация и т.д.

Например, наибольший эффект уменьшения объема дают методы сжигания и суперпрессования твердых отходов и выпаривания жидких отходов; их выбор целесообразен, если это доступно и возможно. Методы прессования, сорбции, ионного обмена в этом плане менее эффективны, но более доступны. Следует отметить, что методы концентрирования сопровождаются увеличением удельной активности отходов.

Различные методы обработки и кондиционирования, адекватные для каждого типа отходов, позволяют существенно сократить окончательные объемы РАО:

- Хранение РАО в течение достаточно долгого периода времени, в результате чего уровни их активности снижаются. Этот способ обычно используется для отходов, содержащих короткоживущие радионуклиды. Такой подход может упростить последующую обработку и/или кондиционирование отходов и повысить их

эффективность, или привести к освобождению отходов от регулирующего контроля. Сокращение объемов РАО путем естественного распада радионуклидов и перевода отходов в категорию нерадиоактивных является одним из важных факторов минимизации отходов.

- Рециклирование/повторное использование металлов, конструкционных материалов общего назначения и некоторых видов оборудования (например, насосов, электромоторов и т. д.), получаемых в процессе переоснащения установок или снятия с эксплуатации.
- Применение различных методов обработки в целях сокращения объемов определенных типов РАО, в том числе:
  - мембранные и микрофильтрующие процессы, разрабатываемые для больших объемов сильно разбавленных водных растворов отходов, содержащих радиохимические и химические загрязнители. Мембранные методы могут применяться также в качестве альтернативных более сложным высокотемпературным, каталитическим и биодеструкционным методам для обработки смешанных органических отходов.
  - Для сокращения объемов твердых отходов применяются в основном методы, основанные на сжигании и суперкомпактировании.

Итак, реализация стратегии минимизации радиоактивных отходов – это всегда решение задачи по оптимизации, когда принимаются в расчет такие факторы, как дозы облучения, получаемые операторами, стоимость сэкономленных или возвращенных в производство материалов, стоимость хранения или захоронения отходов, перевод отходов в менее опасную категорию, снижение объема отходов в отдельных категориях и т.д. В процессе решения указанной задачи ключевой вопрос касается путей минимизации. Следует понимать, что достижение только финансовых выгод без учета всех аспектов проблемы минимизации РАО может повлечь за собой недооценку новых факторов риска, помимо тех, что свойственны тому или иному процессу [9].

## ЛИТЕРАТУРА

- [4.1] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Establishing a National System for Radioactive Waste Management, Safety Series No. 111-S-1, IAEA, Vienna (1995).
- [4.2] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, The Principles of Radioactive Waste Management, Safety Series No. 111-F, IAEA, Vienna (1995).
- [4.3] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, International Basic Safety Standards for Protection against Ionizing Radiation and for the Safety of Radiation Sources, Safety Series No. 115, IAEA, Vienna (1997).
- [4.4] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Principles for Exemption of Radiation Sources and Practices from Regulatory Control (Jointly Sponsored by IAEA and NEA/OECD), Safety Series No. 89, IAEA, Vienna (1988).
- [4.5] Безопасность превыше всего. – Бюллетень МАГАТЭ, т. 39, №3, 1997, с. 31-32.
- [4.6] Флакус Ф.-Н., Джонсон Л.Д. Юридически обязательные соглашения по ядерной безопасности: глобальная правовая основа. – Бюллетень МАГАТЭ, т. 40, №2, 1998, с. 21-26.
- [4.7] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Review of the Factors Affecting Waste Management Technology Selection and Implementation, IAEA-TECDOC-1096, Vienna (1999).

- [4.8] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Minimization of Radioactive Waste from Nuclear Power Plants and the Back End of the Nuclear Fuel Cycle, Technical Reports Series No. 345, IAEA, Vienna (1992).
- [4.9] Бурцл Р., Лараиа М. и Бонн А. Как добиться большего с меньшими затратами: техническое руководство по минимизации радиоактивных отходов. — Бюллетень МАГАТЭ, т. 40, №. 1, 1998 г., с. 37-40.
- [4.10] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, State of the Art Technology for Decontamination and Dismantling of Nuclear Facilities, Technical Reports Series No. 395, IAEA, Vienna (1999).



## 5 ТЕХНОЛОГИИ ОБРАБОТКИ ЖИДКИХ РАДИОАКТИВНЫХ ОТХОДОВ НИЗКОГО УРОВНЯ АКТИВНОСТИ

### 5.1 ВВЕДЕНИЕ

Жидкие (водные) радиоактивные отходы (ЖРО) образуются в различных процессах на предприятиях ядерного топливного цикла и при различных операциях с радиоактивными веществами в исследовательских, медицинских и учебных заведениях. Они представляют собой жидкости (растворы) различного состава с повышенным относительно природной среды содержанием радионуклидов. Жидкие отходы могут быть водными и органическими растворами (например, отработанные экстрагенты). Радиоактивные водные растворы представляют более 99% всех образующихся ЖРО, поэтому далее под ЖРО подразумеваются только водные растворы.

Радионуклиды в водных растворах могут находиться в самых разнообразных формах, основные из которых представлены ниже:

- взвешенные твердые частицы или эмульгированные жидкие нефтепродукты (размер частиц от  $10^{-7}$  м до нескольких миллиметров),
- коллоидные частицы или мицеллы (размер частиц от  $10^{-8}$  м до  $10^{-7}$  м),
- растворенные сложные органические вещества (молекулы) и/или поверхностно-активные вещества (размер частиц от  $10^{-9}$  м до  $10^{-8}$  м),
- ионы (размер частиц от  $10^{-10}$  м до  $10^{-9}$  м).

В результате очистки ЖРО получают очищенную воду и радиоактивный концентрат, содержащий основную массу радионуклидов. Эффективность очистки ЖРО определяется коэффициентом очистки воды от радионуклидов,  $K_{оч}$ , и коэффициентом концентрирования радионуклидов в конечном объеме,  $K_{кон}$ .

Для  $i$ -го радионуклида *коэффициенты очистки* можно определить по уравнению:

$$K_{оч,i} = \frac{C_{i,0}}{C_{i,f}} \quad (1)$$

где  $C_{i,0}$  и  $C_{i,f}$  – концентрация  $i$ -го радионуклида в исходном растворе и очищенном, соответственно.

Для  $i$ -го радионуклида *коэффициенты концентрирования* можно определить по уравнению:

$$K_{кон,i} = \frac{C_{i,k}}{C_{i,0}} \quad (2)$$

где  $C_{i,k}$  – концентрация  $i$ -го радионуклида в концентрате.

Очевидно, что чем больше коэффициент концентрирования радионуклидов, тем меньше объем радиоактивных отходов, которые необходимо кондиционировать и захоранивать. Коэффициент очистки ЖРО от радионуклидов должен достигать таких значений, чтобы очищенную воду можно было сбросить в канализационную сеть предприятия, или повторно использовать в технологических процессах.

## 5.2 СПОСОБЫ ОЧИСТКИ И КОНЦЕНТРИРОВАНИЯ

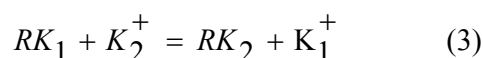
Для очистки низкоактивных ЖРО используют методы фильтрации, сорбции, микрофильтрации, ионного обмена, обратного осмоса, электродиализа, коагуляции, ультрафильтрации, выпаривания и некоторые другие. Каждый из указанных методов имеет свои ограничения, поэтому выбор метода или комплекса методов зависит от состава ЖРО и свойств его компонентов. С учетом большого разнообразия в химическом и радионуклидном составе ЖРО в каждом отдельном случае следует разработать индивидуальную технологическую схему очистки ЖРО. Здесь не рассматривается метод выпарки, так как несмотря на универсальность этого метода, он отличается очень большими затратами электроэнергии или других теплоносителей (газа, угля или нефтепродуктов) и, следовательно, является очень дорогостоящим методом. Чаще всего выпарка применяется на АЭС, где большое количество произведенной энергии (доступность перегретого пара) делают применение выпарки целесообразным и эффективным методом.

Краткое описание основных методов обработки ЖРО приведено ниже. Более полную информацию о методах переработки жидких радиоактивных отходов можно найти в специальных публикациях [5.1-5.5].

**Простая фильтрация** – это процесс очистки, когда вода (или жидкие радиоактивные отходы) проходит слой гранулированной фильтрующей засыпки (песок, дробленый керамзит и т.д.) или пористый материал (размер пор до нескольких десятков микрометров, например, тканые материалы, фильтровальная бумага и т.п.). При простой фильтрации главным образом задерживаются взвешенные частицы и/или эмульсии вследствие их механической задержки или адгезионного взаимодействия с материалом фильтра или фильтровального слоя.

**Сорбция** – это процесс очистки жидких радиоактивных отходов, когда в результате контакта отходов с сорбентом или абсорбентом (активированные угли, цеолиты и т.п.) происходит сорбционное извлечение радионуклидов из раствора. Процесс может проходить как в статических условиях, так и в динамических (пропускание отходов через сорбционную колонку в непрерывном режиме). При сорбции, вследствие взаимодействия радионуклидов с сорбирующим материалом, происходит очистка раствора от растворенных в воде загрязнителей. В сорбционных процессах очистки могут использоваться как сорбенты широкого спектра действия, так и специфические сорбенты, извлекающие только определенные вещества или определенные радионуклиды. Все сорбенты обладают определенной сорбционной емкостью, после достижения которой сорбент нужно регенерировать, или заменять на новый, а отработавший сорбент отправлять на иммобилизацию.

**Ионный обмен** – частный случай сорбции, когда ионы радионуклидов  $K_2^+$ , находящиеся в растворе, обмениваются с нерадиоактивными ионами  $K_1^+$  ( $H^+$ ,  $Na^+$  и др.), находящимися в матрице гранулированного ионообменника  $R$  (ионообменные смолы, синтетические неорганические сорбенты, цеолиты), путем взаимодействия с ионообменными группами, например:



**Микрофильтрация** – это процесс фильтрации, когда ЖРО продавливаются через микрофильтрационную мембрану (диафрагму) с размером пор от 0,1 мкм до нескольких микрометров. Рабочее давление при микрофильтрации – до 0,1 МПа.

**Ультрафильтрация** – это процесс очистки ЖРО, когда отходы продавливаются через ультрафильтрационную мембрану с размером пор от 0,01 мкм до 1 мкм. Рабочее давление – до 0,5 МПа. При ультрафильтрации полностью задерживаются взвеси, коллоидные частицы, эмульсии, большая часть высокомолекулярных веществ, бактерии.

**Обратный осмос** – это процесс очистки ЖРО, когда отходы продавливаются через обратноосмотическую мембрану с размером пор от 0,001 мкм до 0,01 мкм. Рабочее давление может достигать значений до 10 МПа. При обратном осмосе задерживаются практически все примеси, содержащиеся в воде.

**Электродиализ** – это процесс очистки ЖРО, когда очищаемые отходы протекают между катионообменной и анионообменной мембраной, а ионы радионуклидов под действием постоянного электрического тока выводятся из раствора через мембраны в соседние (концентратные) камеры.

**Реагентная коагуляция** – процесс со-осаждения радиоактивных примесей в очищаемом растворе с осаждающимся носителем (гидроокись металлов, нерастворимые соли) при изменении pH, электроокислительного потенциала или со-осаждения с добавленными осадителями (коагулянтами). В качестве осадителя может быть сульфат железа, гидроокись алюминия, другие соединения. Частным случаем реагентной коагуляции является реагентное окисление, когда в очищаемый раствор добавляют некоторый окислительный реагент (например, перманганат или бихромат калия) в целях разрушения органических примесей, препятствующих образованию нерастворимых соединений, или изменения валентной формы многозарядных ионов, способствующей образованию нерастворимых форм и их выведению в осадок.

**Электрокоагуляция** – процесс осаждения примесей вместе с ионами, растворяющимися в очищаемой воде из растворимого анода при пропускании электрического тока. Материалом анода при электрокоагуляции обычно служит железо или алюминий, которые после перехода в раствор в результате анодного растворения затем легко образуют нерастворимые соединения, выпадающие в осадок и захватывающие при этом растворенные радионуклиды.

Поскольку в подавляющем большинстве случаев ЖРО имеет сложный химический состав и характеризуется многообразием форм радионуклидов, то для очистки радиоактивных вод обычно используется не один способ, а некоторая комбинация различных водоочистных способов. Очищаемая вода последовательно пропускается через несколько различных очистных аппаратов. Каскад различных очистных аппаратов, соединяющие их трубопроводы, насосное оборудование, контрольно-измерительная аппаратура и баковое хозяйство в совокупности образуют очистную установку.

Очистные установки бывают стационарные и передвижные (или мобильные). Стационарные очистные установки целесообразно использовать при наличии постоянно образующихся ЖРО, характеризующихся стабильностью по химическому и радионуклидному составу. Передвижные или мобильные установки (особенно модульного типа) характеризуются гибкостью технологической схемы, а,

следовательно, позволяют оперативно решать проблемы очистки ЖРО различного состава.

Очень часто даже на территории одного предприятия составы ЖРО в соседних сборных емкостях различны. Во время проведения работ по очистке ЖРО при переходе от одной емкости к другой обычно возникает задача изменения или доработки технологической схемы очистки. Оптимальным решением такой задачи является модульный принцип организации переработки ЖРО. Под отдельным модулем в данном случае подразумевается полностью автономный технологический модуль, использующий определенную технологию очистки (осаждение, сорбцию, ионный обмен и т.д.). Система очистки может включать последовательное прохождение отходов через несколько отдельных модулей (фильтрации, сорбции, ионного обмена, обратного осмоса и др.) для полной очистки от радиоактивных загрязнений. Система очистки также может включать вспомогательные аппараты, обеспечивающие нормальную работоспособность основных аппаратов, различное оборудование (насосы, трубопроводы, контрольно-измерительная аппаратура, запорная арматура), общие поддон и опорную раму, предназначенную для фиксации оборудования, погрузки-выгрузки и транспортирования модулей. Очевидно, что в целях реализации разнообразных технологических схем набор водоочистных модулей должен быть достаточно разнообразным. Основным требованием к очистным модулям является согласование их производительности по очищаемым растворам и стандартизация стыковочных узлов.

### 5.3 ОСНОВНЫЕ СТАДИИ РАБОТ ПО ОЧИСТКЕ ЖРО

При обработке жидких радиоактивных отходов практически всегда необходимо предусматривать три основных этапа проведения работ.

#### 5.3.1 Аналитическая стадия

- (1) Анализ состава ЖРО, подлежащих очистке:
  - определение объема ЖРО;
  - определение химического и радионуклидного состава ЖРО;
  - определение основных технологических условий проведения работ по переработке ЖРО (размещения ЖРО, определение предельных габаритов оборудования, возможного энергопотребления, требования к очищенным фракциям и обращение с радиоактивными концентратами).
- (2) Проведение предварительных технологических исследований и испытаний:
  - определение эффективности различных способов очистки применительно к заданному составу отходов;
  - разработка технологической схемы (последовательность применяемых технологий) предполагаемой системы очистки ЖРО;
  - проверка эффективности разработанной технологической схемы в лабораторных условиях и на модельных стендах.
- (3) Разработка технико-экономического обоснования на проведение работ с указанием необходимого оборудования, расчетом расходных материалов, необходимых трудозатрат и календарного плана исполнения работ.
- (4) Создание (сборка или комплектация) очистной установки и вспомогательных устройств.

### 5.3.2 Согласование плана работ с надзорными органами

- (1) Разработка технической документации на установку переработки ЖРО (инструкция по эксплуатации, техническое описание и определение параметров эксплуатации, заявка на лицензию, методики расчета безопасности сброса очищенных вод, другие документы в зависимости от местных условий).
- (2) Согласование регламента выполнения работ с надзорными органами.

### 5.3.3 Выполнение работ

- (1) Пуско-наладочные работы на установке для выхода на штатный режим очистки (при необходимости рециркуляция ЖРО обратно в исходную емкость).
- (2) Переработка основного объема ЖРО при условии периодического контроля качества очистки ЖРО в контрольной емкости перед сбросом очищенных вод.
- (3) Оформление актов на сброс очищенной воды.
- (4) Сбор и передача на дальнейшую переработку и кондиционирование радиоактивных концентратов.

На практике, если необходимая информация о ЖРО уже известна, технологические параметры отдельных технологических модулей по отношению к таким отходам уже определены, некоторые предварительные анализы и испытания можно не проводить. Однако в большинстве случаев рекомендуется соблюдать указанный выше порядок подготовки и проведения работ по переработке ЖРО.

После каждой кампании по очистке ЖРО рекомендуется оформить итоговый отчет, который позволит не только извлечь определенные уроки и проанализировать ошибочные действия исполнителей работ, которые иногда имеют место, но также учесть накопленный практический опыт будущим исполнителям работ по очистке ЖРО.

## 5.4 ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОСНОВНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ЖРО, ПОДЛЕЖАЩИХ ОЧИСТКЕ

### 5.4.1 Отбор проб ЖРО из емкости-хранилища

Пробоотбор ЖРО из накопительной емкости осуществляется при помощи пробоотборного устройства. В общем случае примеси (в том числе и радиоактивные) имеют неоднородное распределение по объему емкости. Это может быть связано с множеством причин, например: с осадкообразованием; с седиментационно-диффузионным равновесием в придонной области по осаждающимся частицам взвесей субмикронного размера. Поэтому пробоотбор ЖРО следует осуществлять, по возможности, после интенсивного перемешивания, либо из разных уровней емкости-хранилища. Чем больше будет рассредоточенных по емкости пробоотборных точек, тем представительнее будет информация о состоянии ЖРО в емкости. Количество проб при этом может составлять от 2 и более с каждого уровня. Как правило, для снижения вероятности ошибки из каждой точки отбирают несколько параллельных проб (рекомендуется не менее 3 проб).

Пробоотборные устройства для ЖРО различаются собственно устройством, а также сложностью изготовления и обслуживания. Наиболее простое пробоотборное устройство, которое позволяет отбирать пробу воды с заданной глубины, показано на рисунке 5.1 (А).

Пробоотборная емкость (стеклянная или полимерная) прикрепляется к длинному шесту, на котором нанесены деления для определения глубины его погружения. Емкость закрывается пробкой, которая с помощью тросика может открываться на заданной глубине.

Более удобен для работы пробоотборник с верхним клапаном и нижним сливом, показанный на рисунке 5.1 (Б). После погружения этого пробоотборника на заданную глубину при помощи тросика открывают верхний клапан. После заполнения пробоотборника тросик отпускают, и клапан перекрывает входное отверстие. Слив ЖРО из пробоотборника осуществляют через сливное устройство, которое в простейшем варианте может быть изготовлено из резинового шланга и пружинного зажима.

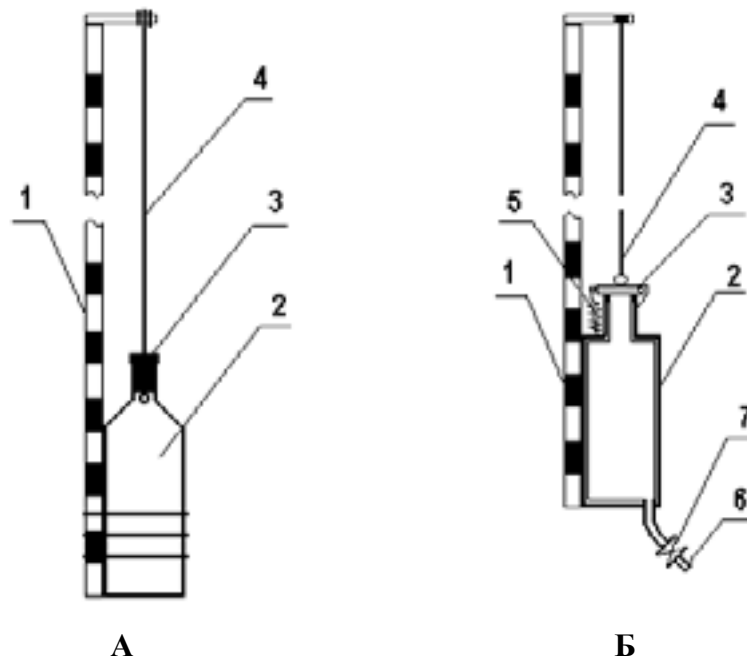


Рис.5.1. Принципиальная схема погружного пробоотборника ЖРО: А – на основе подручных средств (1 – шест с разметкой, 2 – бутылка, 3 – пробка, 4 – тросик); Б – пробоотборник с верхним клапаном и нижним сливом (1 – шест с разметкой, 2 – корпус пробоотборника, 3 – верхний клапан, 4 – тросик, 5 – пружина, 6 – трубка для слива, 7 – зажим или нижний клапан).

Полное исключение загрязнения внешних поверхностей пробоотборника радионуклидами достигается в пробоотборнике, оборудованном вакуумной линией (рис.5.2.). Принцип действия пробоотборника ясен из рисунка. По окончании заполнения пробоотборника радиоактивной пробой из емкости вакуумная линия отсекается вентилем. Для создания вакуума можно использовать вакуумные насосы различных типов (например, водоструйные) как электрические, так и ручные.

Обычно из пробоотборника проба ЖРО сливается в сосуд с герметичной пробкой (стеклянный или полимерный), на который затем наносится шифр пробы, место пробоотбора, дата пробоотбора и фамилия сотрудника, отобравшего пробу. В целях снижения сорбции радионуклидов на стенках сосуда и устранения осадкообразования в пробу ЖРО вносится 12 N азотная кислота из расчета 0,5 - 1 мл кислоты на 1 л ЖРО. В

пробы, которые направляются на измерение pH, кислота не добавляется, и измерение pH производится сразу после пробоотбора.

При пробоотборе ЖРО из емкости-хранилища используют индивидуальные защитные средства: хлопчатобумажная или лавсановая спецодежда; спецобувь (ботинки); пластиковые бахилы, фартук и нарукавники; резиновые перчатки. При пробоотборе ЖРО из емкости-хранилища радиационный контроль осуществляет дозиметрист, обеспеченный радиометрами  $\alpha$ ,  $\beta$  и  $\gamma$  излучения.

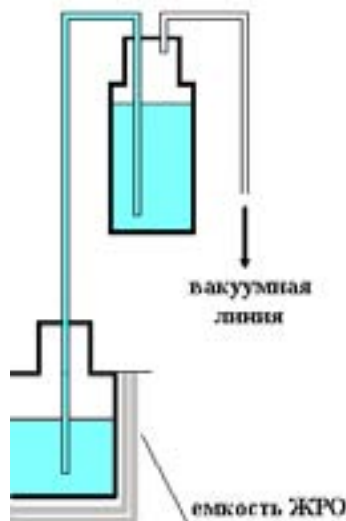


Рис.5.2. Принципиальная схема пробоотбора ЖРО с использованием вакуумной линии.

#### 5.4.2 Экспресс-анализ основных характеристик ЖРО

К основным характеристикам ЖРО, которые можно определить без использования сложных процедур, относятся – определение солесодержания (по кондуктометру), определение сухого остатка, pH, наличие взвешенных и коллоидных частиц (по ультрафильтрации). Указанные характеристики определяют как можно быстрее после доставки проб ЖРО в лабораторию, так как состояние примесей в ЖРО может измениться со временем.

##### *Солесодержание (по кондуктометру)*

Следует иметь в виду, что кондуктометрический метод оценки солесодержания пригоден только для растворов, близких к нейтральным, при pH = 4-10. В кислых и щелочных растворах кондуктометрическое определение солесодержания приводит к большой погрешности.

##### *Сухой остаток*

Сухой остаток определяют параллельно с подготовкой проб к радиометрии. Отмытые и обезжиренные ацетоном мишени высушивают на столике для выпарки проб, рис.5.3, и взвешивают. Концентрат ЖРО, полученный в ходе подготовки проб к радиометрии после их упаривания в химическом стакане, переносят в мишени и доупаривают досуха на столике. После полного упаривания мишени охлаждают и взвешивают. Массу осадка определяют по разнице массы мишени до и после выпарки.

Удельное содержание нелетучих примесей определяют путем деления массы осадка на объем выпаренной пробы ЖРО.

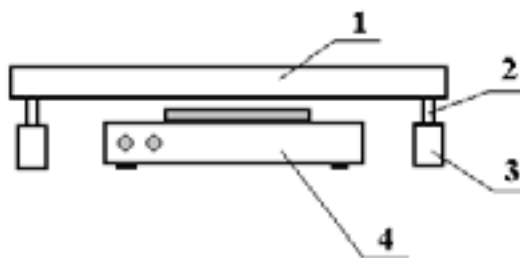


Рис.5.3. Принципиальная схема устройства для выпарки проб ЖРО из мишеней (1 – стол, 2 – шпилька с резьбой, 3 – ножка столика с внутренней резьбой, 4 – электрическая плитка).

Столик для выпарки проб ЖРО из мишеней изготавливают из нержавеющей стали в виде поддона на ножках с возможностью регулирования их длины. Его особенностью является то, что между дном столика и нагревательной поверхностью электрической плитки имеется воздушный зазор. Размер воздушного зазора определяет интенсивность нагрева мишеней. В свою очередь размер воздушного зазора можно изменять путем регулирования длины ножек столика.

### **Измерение pH**

Измерить pH жидких радиоактивных отходов можно двумя способами – с помощью специальной индикаторной бумаги (грубый способ) и с помощью pH-метра.

С помощью индикаторной бумаги pH радиоактивной воды можно измерять непосредственно у емкости-хранилища ЖРО. Погрешность этого способа составляет 1–2 единицы pH. Измерение pH на pH-метре производится согласно инструкции, которая входит в состав рабочей документации pH-метра.

### **5.4.3 Ультрафильтрация ЖРО**

Для оценки распределения радионуклидов между взвесями и раствором берется проба ЖРО, в которую не добавляли азотную кислоту. Проба ЖРО в количестве около 1 литра заливается в корпус статической ультрафильтрационной установки, рис. 5.4.

Ультрафильтрационная ячейка герметизируется и воздушным компрессором в ней создается избыточное давление до 0,2 МПа. Под действием избыточного давления ЖРО продавливается через ультрафильтрационную мембрану и фильтрат собирается в мерном стакане.

### **5.4.4 Подготовка проб ЖРО к химическому анализу и радиометрии**

Подготовка проб ЖРО к химическому анализу заключается, главным образом, в добавлении в пробу ЖРО 12N азотной кислоты для растворения всех нерастворенных частиц в растворе. После этого пробы доставляют в химическую лабораторию и далее обрабатывают по стандартным аналитическим методикам определения примесей в воде.



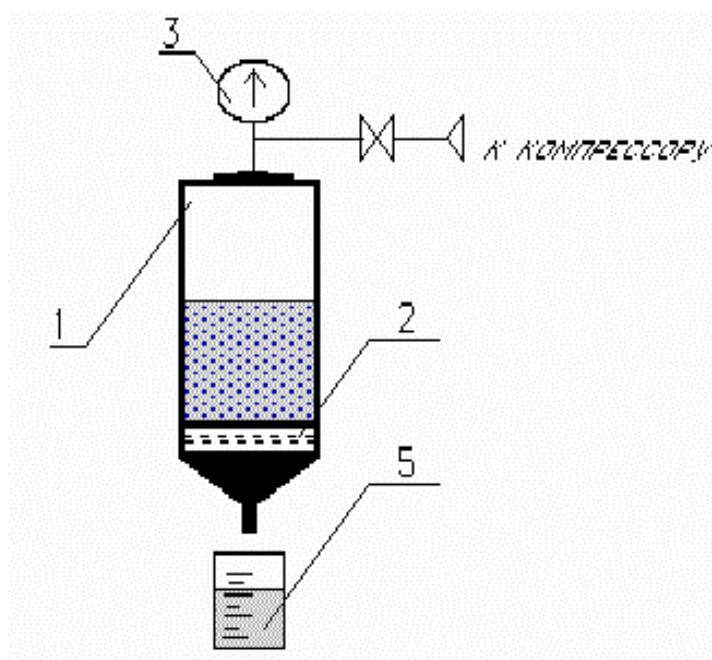


Рис. 5.4. Принципиальная схема статической ультрафильтрационной установки (1 – корпус ультрафильтрационной ячейки, 2 – ультрафильтрационная мембрана, размещенная на пористой подложке из нержавеющей стали (ПНС), 3 – манометр, 4 – компрессор (на рисунке не показан), 5 – мерный стакан).

Подготовка проб к радиометрии может быть осуществлена двумя путями:

- если радиометрию проводят непосредственно из раствора (например, на жидкостном сцинтилляционном радиометре или в чашке Маринелли на гамма-спектрометре), то подготовка пробы ЖРО, как и при химическом анализе, заключается главным образом в добавлении в пробу ЖРО 12N азотной кислоты,
- если радиометрию проводят из мишени, то требуется перенос пробы ЖРО на мишень и ее выпарка.

Как и в случае химического анализа, чем более полно проведен радиометрический анализ ЖРО, тем легче будет определить оптимальную технологию очистки ЖРО от радионуклидов. В большинстве случаев необходимо определить суммарное содержание бета- и альфа-нуклидов ( $\Sigma\beta$  по  $^{137}\text{Cs}$  или  $\Sigma\beta$  по  $^{90}\text{Sr}+^{90}\text{Y}$ ;  $\Sigma\alpha$  по  $^{239}\text{Pu}$ , здесь указаны эталоны), а также содержание отдельных изотопов  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{90}\text{Sr}$ ,  $^{60}\text{Co}$ ,  $^{238}\text{Pu}$ ,  $^{239}\text{Pu}$ ,  $^{234}\text{U}$ ,  $^{238}\text{U}$ ,  $^{226}\text{Ra}$  и некоторых других. Особое внимание необходимо обратить на определение в ЖРО трития ( $^3\text{H}$ ), так как очистка ЖРО от этого радионуклида обычными способами недоступна, и, следовательно, при большом содержании в ЖРО трития необходимо будет использовать нетрадиционные подходы для решения проблемы сброса воды, очищенной от остальных радионуклидов.

Информацию о методиках проведения радиометрии проб ЖРО, химического и радиохимического анализа можно найти в литературе [5.6-5.7].

## 5.5 ОЧИСТКА И КОНЦЕНТРИРОВАНИЕ НИЗКОАКТИВНЫХ ЖРО

Несмотря на большое разнообразие методов очистки, для обработки ЖРО используют ограниченный набор методов. Во многом это объясняется тем, что ЖРО необходимо не только очистить от радиоактивных и токсичных примесей, но и сконцентрировать их (примеси) в минимальном объеме. Для обращения с низкоактивными ЖРО в отсутствие дешевых источников пара (на АЭС) чаще всего используют методы соосаждения с последующим отстаиванием, фильтрацию через насыпные и пористые фильтры, сорбцию, ионный обмен, мембранные методы.

Следует отметить, что методы осаждения с последующим осветлением воды, несмотря на их кажущуюся простоту, могут приводить к увеличению вторичных отходов. Правильный подбор осаждающих агентов зачастую требует продолжительных исследований. Оборудование для осветления воды отстаиванием занимает большие площади, а фильтрационное оборудование может оказаться нетехнологичным вследствие низких коэффициентов очистки или коагуляции осадка в насыпных фильтрах.

Методы сорбции и ионного обмена проще других, но синтетические сорбенты имеют высокую стоимость. Перед подачей на сорбционные фильтры ЖРО необходимо очистить от нерастворимых взвесей (осветлить). Регенерация ионообменных смол также приводит к увеличению радиоактивных вторичных отходов. Мембранные методы позволяют получать высокие коэффициенты очистки ЖРО даже от ионных форм радионуклидов, но характеризуются серьезными ограничениями по физико-химическому составу ЖРО, подаваемых на очистку в мембранные аппараты.

Очевидно, что в общем случае с учетом разнообразия составов ЖРО и многообразия форм радионуклидов в растворе для очистки радиоактивных вод следует использовать комбинированные технологические схемы очистки, в которых очистка отходов достигается их пропусканием через каскад различных очистных аппаратов [5.8].

### ЛИТЕРАТУРА

- [5.1] Соболев И.А., Хомчик Л.М. Обезвреживание радиоактивных отходов на централизованных пунктах. М.: Энергоатомиздат (1983).
- [5.2] Никифоров А.С., Куличенко В.В., Жихарев М.И. Обезвреживание жидких радиоактивных отходов. М.: Энергоатомиздат (1985).
- [5.3] Кузнецов Ю.В., Щебетковский В.Н., Трусев А.Г. Основы очистки воды от радиоактивных загрязнений. М.: Атомиздат (1974).
- [5.4] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Chemical Precipitation Processes for the Treatment of Aqueous Radioactive Waste, IAEA, Vienna (1992).
- [5.5] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Advances in Technologies for the Treatment of Low and Intermediate Level Radioactive Liquid Wastes, IAEA, Vienna (1994).
- [5.6] Методические рекомендации по санитарному контролю за содержанием радиоактивных веществ в объектах внешней среды. Под общей ред. А.Н. Мареев, А.С. Зыковой. М.: Минздрав СССР (1980).
- [5.7] Герфорт Л., Кох Х., Хюбнер К. Практикум по радиоактивности и радиохимии. М.: Мир (1984).
- [5.8] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Combined Methods for Liquid Radioactive Waste Treatment, IAEA-TECDOC-1336, Vienna (2003).

## ПРИЛОЖЕНИЕ. УСТАНОВКИ ОЧИСТКИ ЖРО, РАЗРАБОТАННЫЕ В МОСКОВСКОМ НПО “РАДОН”, РОССИЯ

В МосНПО “Радон” многолетние исследования эффективности различных методов очистки ЖРО и богатый практический опыт по очистке ЖРО в полевых условиях и на объектах различных заказчиков позволили для низкоактивных ЖРО предложить сравнительно простую технологическую схему установки, использующую сорбционные и мембранные методы очистки [1, 2]. Указанная установка является модульной и носит название “Аква-Экспресс”.

### Краткое техническое описание установки “Аква-Экспресс”

Общий вид установки “Аква-Экспресс” показан на рис.5. Установка состоит из двух модулей: фильтрационно-сорбционного и ультрафильтрационного. Кроме того, к ней могут придаваться дополнительные буферные емкости – на рис.5.5 они показаны на дальнем плане и имеют рабочий объем до 4 м<sup>3</sup>. На рис.5 не показан фильтр-контейнер с сорбентом, избирательно извлекающим из ЖРО <sup>134</sup>Cs и <sup>137</sup>Cs, который обеспечивает низкий уровень мощности гамма-излучения на установке во время проведения очистных работ.



*Рис.5.5. Общий вид установки “Аква-Экспресс”.*

Принципиальную технологическую схему установки “Аква-Экспресс”, представленную на рисунке 5.6, можно разделить на следующие элементы, которые соответствуют определенным стадиям очистки воды: фильтр-контейнер с сорбентом “Феникс-А”, сорбционные насыпные фильтры и ультрафильтрационные аппараты.

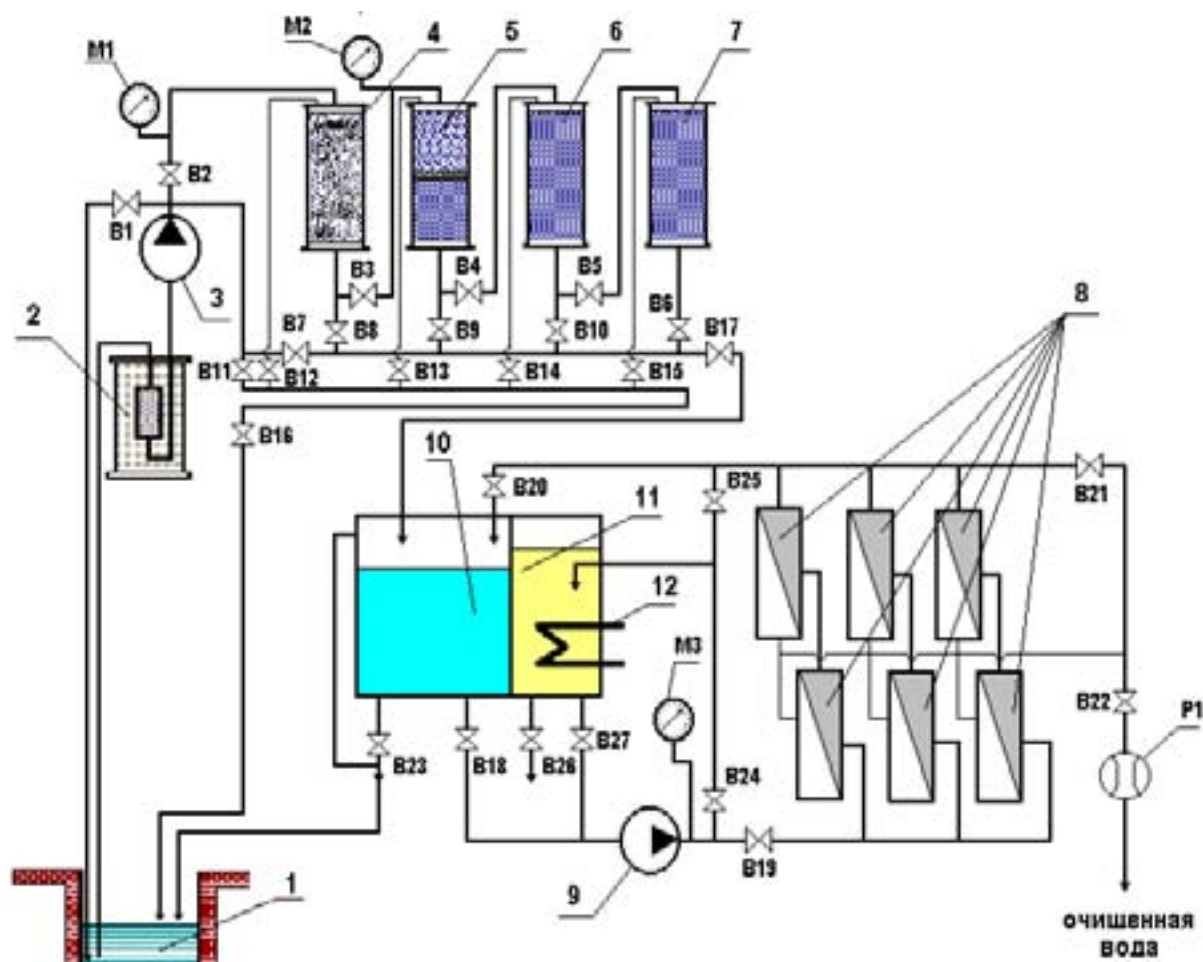


Рис.5.6. Принципиальная технологическая схема установки “Аква-Экспресс” (1 – горловина емкости-хранилища ЖРО, фильтр-контейнер с сорбентом “Феникс-А”, 3 – перистальтический насос, 4 – 7 – насыпные фильтры, 8 – рулонные ультрафильтрационные аппараты, 9 – центробежный насос, 10 – буферная емкость ультрафильтрационного модуля, 11 – емкость для промывочного раствора, 12 – ТЭН (тепловыделяющий элемент), B1-B27 – вентили, M1-M3 – манометры, P1 – счетчик расхода воды).

Исходные ЖРО из емкости-хранилища 1 засасываются перистальтическим насосом 3 через фильтр-контейнер 2 с сорбентом “Феникс-А”. Сорбент “Феникс-А” является синтетическим сорбентом (ферроцианид никеля, осажденный на силикагель), который избирательно извлекает из ЖРО ионы цезия, в том числе и радионуклиды  $^{134}\text{Cs}$  и  $^{137}\text{Cs}$ . Во многих ЖРО изотопы цезия являются основными гамма-излучателями, поэтому извлечение их из раствора на первой стадии очистки способствует улучшению радиационной обстановки на всей водоочистной установке. Коэффициенты очистки ЖРО от изотопов цезия на этой стадии могут достигать 10000.

Перистальтическим насосом 3 ЖРО далее прокачиваются через каскад насыпных фильтров с различными сорбентами. Состав сорбентов определяется составом ЖРО и в каждом отдельном случае определяется индивидуально на основе химического и радиохимического анализов ЖРО. Это основная стадия очистки ЖРО от радионуклидов, поэтому подбор сорбентов должны осуществлять специалисты в

области очистки ЖРО. Коэффициенты очистки ЖРО от радионуклидов на этой стадии обычно составляют от 10 до нескольких тысяч.

Вода, в основном очищенная от радионуклидов, далее поступает в емкость 10 ультрафильтрационного модуля. При помощи насоса 9 она циркулирует в системе “емкость 10 – ультрафильтрационные аппараты 8” под избыточным давлением 0,2 – 0,4 МПа. Под действием избыточного давления часть воды (так называемый, пермеат) продавливается через ультрафильтрационные мембраны. Вода при этом полностью очищается от всех взвесей, коллоидов, полимерных молекул, так как размер пор мембраны не превышает 50 – 100 нм. Использование ультрафильтрации позволяет гарантировать полную очистку воды от радионуклидов, сорбированных на субмикронных частицах взвесей, а также от продуктов истирания сорбентов. Последнее особенно актуально в случае использования природных сорбентов (например, клиноптилолита, шабазита, бентонита и т.п.) и активированных углей. Коэффициенты очистки ЖРО на последней стадии могут составлять от 1 до 10, в зависимости от доли субмикронных взвесей в исходных ЖРО и интенсивности их проскока через насыпные фильтры.

В случае очистки ЖРО, содержащих значительное количество нефтепродуктов или взвесей, рекомендуется в качестве первой стадии очистки использовать один насыпной фильтр, загруженный послойно волокнистым синтетическим гидрофобным материалом (например, сипроном), песком или дробленным керамзитом, активированным углем или дробленным антрацитом. Система обвязки насыпных фильтров позволяет это сделать без особых затруднений.

В процессе эксплуатации насыпных фильтров 4 – 7 необходимо периодически выводить из них газы, накапливающиеся в верхней части фильтров, и взрыхлять их обратным потоком воды.

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] Y.V. Karlin, S.A. Dmitriev, V.A. Iljin, M.I. Ojovan. Elaboration of not large mobile modular installations “Aqua-Express” (300L/h) for LWR cleaning. Proc. WM’03 Conference, Tucson, AZ, 120.pdf. (2003).
- [2] D.V. Adamovich, I.A. Sobolev, S.A. Dmitriev et.al. Experience on treating liquid radioactive wastes of the Russian State Center of Nuclear Shipbuilding. Proc. WM’01 Conference, Tucson, AZ, 31a2.pdf. (2001).

## **6 ТЕХНОЛОГИИ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ И УМЕНЬШЕНИЯ ОБЪЕМА ТВЕРДЫХ РАДИОАКТИВНЫХ ОТХОДОВ**

### **6.1 ВВЕДЕНИЕ**

Твердые радиоактивные отходы (ТРО), поступающие на централизованные предприятия по переработке отходов из организаций, не относящихся к ЯТЦ, таких как научно-исследовательские институты, производства по изготовлению радиоизотопов, медико-биологические учреждения, представляют собой следующее:

- спецодежда и средства индивидуальной защиты, ветошь;
- бумага, древесина, строительные материалы, тара;
- различное оборудование;
- изделия из керамики, стекла (например, лабораторная посуда);
- изделия из резины, полимерных материалов и пластмассы;
- изделия из металлов и сплавов;
- отработавшие закрытые радионуклидные источники ионизирующих излучений (РНИ);
- материалы из центров вивисекции (подстилки и пр.) и трупы экспериментальных животных;
- фильтры системы газоочистки;
- загрязненные почвы;
- ионообменные смолы, сорбенты и т. д.

Сбор и первоначальная упаковка радиоактивных отходов, производимые непосредственно на месте их образования в учреждениях и организациях, регламентируются национальными правилами и разработанными на их основе местными инструкциями.

Целью обработки ТРО является изменение размеров, объема и физико-химических характеристик отходов, что позволяет повысить эффективность иммобилизации и кондиционирования таких отходов для хранения или захоронения. Обработка ТРО призвана способствовать уменьшению объемов конечных упаковок отходов, повышению безопасности и экономичности последующего хранения и захоронения кондиционированных отходов.

Механическая обработка ТРО включает операции по уменьшению размеров ТРО и сокращению их объема путем прессования. Коэффициент уменьшения объема при применении механических методов зависит от природы материалов, других характеристик отходов, таких как плотность, а также от параметров применяемого метода, таких как усилие пресса.

### **6.2 ПРИЕМ ТВЕРДЫХ РАДИОАКТИВНЫХ ОТХОДОВ**

Контроль соответствия сопроводительной документации на партию ТРО установленным требованиям приема производится путем осмотра, оценок и измерений. Для этого необходимо выполнить следующие процедуры:

- Проверить наличие паспорта на партию ТРО, правильность его оформления и полноту представленных в паспорте сведений.

- Проверить наличие бирки на каждой упаковке, правильность ее оформления и полноту сведений, указанных в бирке.
- Измерить мощность дозы гамма-излучения на поверхности упаковки и на расстоянии 1 м от нее.
- При помощи металлоискателя определить наличие крупных металлических вложений в упаковке.

Если в сопроводительной документации полностью или частично отсутствуют необходимые данные, особенно в части данных по радионуклидному составу (его вид и суммарная активность), если она неправильно заполнена, а также в случае несовпадения результатов дозиметрического контроля с данными сопроводительной документации, необходимо направить упаковки с отходами на сортировку и анализ для идентификации присутствующих в ней радионуклидов. Результаты осмотра и проведенных измерений заносятся в регистрационный журнал.

### 6.3 ОБРАБОТКА ТВЕРДЫХ РАДИОАКТИВНЫХ ОТХОДОВ

Выбор механических методов обработки ТРО определяется характером отходов и теми целями, которые сформулированы выше. Одна из главных целей – уменьшение объемов отходов, что связано как с вопросами экономики, так и безопасности. Основными механическими методами обработки ТРО являются компактирование, или прессование, отходов (приемлемых для данной операции), и фрагментация крупных объектов, элементов оборудования и пр., которые неприемлемы для прессования и по своим физическим размерам не позволяют эффективно использовать объемы стандартных контейнеров, предназначенных для иммобилизации отходов.

#### 6.3.1 Сортировка

Перед обработкой ТРО необходимо провести их сортировку. Сортировка особенно важна для подготовки отходов к прессованию. Наличие в отходах крупных металлических предметов, элементов строительных конструкций (бетон), других подобных материалов и объектов могут привести к поломке и выходу из строя компактора (пресса). Наличие в отходах сосудов с жидкостями или остатками жидкостей может привести к выходу этих жидкостей за пределы контейнеров прессования и радиоактивному загрязнению всего оборудования. То же относится к влажным отходам, прессование которых может привести к тем же последствиям. Необходимо также отслеживать возможность нахождения в ТРО токсичных или химически агрессивных жидкостей, взрывоопасных или легко воспламеняющихся материалов.

Обычно такая сортировка проводится на местах образования ТРО. Предприятие – переработчик отходов должно сформулировать требования к составу отходов, приемлемых для прессования, и производитель отходов должен строго придерживаться этих требований, а также представлять все данные об отходах в сопроводительной документации. Если по вине поставщика ТРО произошла поломка пресса или его загрязнение (в результате несоблюдения требования сортировки или сокрытия реального содержания отходов), все восстановительные, ремонтные и дезактивационные работы оплачиваются поставщиком отходов.

Эффективность компактирования ТРО при прессовании весьма существенно зависит от состава ТРО. Некоторые отходы, в частности изделия из пластика, резинотехнические изделия, после прессования могут “релаксировать” и принимать

исходную форму. Поэтому прессование, а особенно суперпрессование таких отходов неэффективно, а иногда даже опасно (разрыв контейнера после прессования). Такие отходы необходимо смешивать с “нерелаксирующими” отходами, такими как упаковка из тонкого металла, текстиль, древесные отходы и др.

### 6.3.2 Фрагментация

Фрагментации подвергают радиоактивные отходы, представляющие собой крупногабаритное оборудование, что необходимо для облегчения упаковки материалов при транспортировании, контейнерном кондиционировании, хранении или захоронении. Основные методы фрагментации включают разборку оборудования, резку и другие методы измельчения.

В публикациях МАГАТЭ 80-х годов [6.1] описаны следующие методы фрагментации: плазменно-дуговой, метод “дуговой пилы”, разрядно-взрывной с линейной формой разряда и традиционные методы резки металлов. Для фрагментации бетонных конструкций этот список дополнен методами взрыва, бурения и раскалывания, методами пламенной или тепловой резки, резки при помощи алмазных инструментов, а также методом разрушения струей воды высокого давления. В последующих документах [6.2–6.6] продолжен обзор методов и оборудования для измельчения и очистки бетонных и металлических конструкций при выводе из эксплуатации ядерных установок.

Механические методы фрагментации основаны на прямом воздействии на рабочую поверхность обрабатываемых предметов при помощи разрушающих, рассекающих или размывающих средств. Процесс резки не дает вторичных трудноудаляемых отходов или отходов в виде мелких осколков. Образующиеся в небольшом количестве отходы легко могут быть собраны и удалены. Недостатком механических методов является соотношение больших размеров устройств с относительно малым объемом разрезания, а также возможность помять объект резки. Это может привести к возникновению заусенцев и деформации, например, трубопроводов, что в дальнейшем затруднит дезактивацию объекта.

В таблице 6.1 приведены основные характеристики механических средств резки и измельчения материалов конструкций [6.2]. Остановимся подробнее на наиболее используемых инструментах для фрагментации крупногабаритных твердых РАО.

**Ножницы.** Ножницы бывают ручными, пневматическими, гидравлическими, электрическими и используются для сегментации металлов и измельчения бетона. По конструкции они делятся на три основных типа:

- устройство с двумя лезвиями, которые действуют так же, как и обычные бытовые ножницы;
- устройство с одним лезвием и упором, причем лезвие с силой прижимает разрезаемый участок к неподвижному упору. Устройства такого типа гораздо тяжелее и более громоздки по сравнению с устройствами первого типа, но зато они могут разрезать металлические конструкции большого сечения и толщины. Для резки металлов в таких устройствах могут использоваться нагрузки ударного типа. Ножницы могут использоваться вручную, могут иметь дистанционное управление, а также использоваться в виде стационарных установок;
- размельчающие ножницы, в которых используются механические подъемники и другие громоздкие механизмы, включающие упоры в виде наковален и режущие



лезвия. Такие ножницы используются для сегментации тяжелых металлических конструкций типа крупноразмерных балок и размельчения железобетонных плит.

ТАБЛИЦА 6.1. ПЕРЕЧЕНЬ РЕЖУЩИХ И РАЗРУШАЮЩИХ МЕТОДИК

Технология резания	Материал	Окружающая среда
Ножницы	Все металлы	Вода/воздух
Механические кусачки	Мягкая сталь, нержавеющая сталь	Вода/воздух
Механические пилы	Все металлы	Вода/воздух
Круговые фрезы	Все металлы	Вода/воздух
Абразивные ножевые диски, лопасти, проволочные и колонковые дрели	Металлы, бетон	Вода/воздух
Взрывные средства	Все металлы, бетон	Вода/воздух
фрезерование	Все металлы	Вода/воздух
Разрушающие шары и плиты	Бетон	Воздух
Вспучивающий раствор	Бетон	Воздух
Камнедробилка	Бетон	Вода/воздух
Бетонолом и обрубочный молоток	Бетон	Вода/воздух

Примеры использования ножниц для фрагментации крупногабаритных ТРО показаны на рисунке 6.1.



А



Б

Рис. 6.1. Инструменты для фрагментации: (А – ножницы для резки тонких пластин, Б – гидравлические ножницы, Kjeller, Норвегия).

**Механические кусачки.** Кусачки представляют собой ударник в виде лезвия, который с высокой скоростью движется навстречу пуансону. Устройство может использоваться вручную или дистанционно как в воздушной, так и в водной среде. При дистанционном управлении кусачки монтируются на длинной рукоятке. Кусачки применяются для резки мягкой стали или нержавеющей стали как в виде листов, так и в виде труб.

**Механические пилы.** Метод распиливания заключается в том, что твердое режущее ребро внедряется в более мягкий материал, который нужно разрезать. Механические пилы имеют огромный диапазон размеров, начиная от маленьких ручных ножовок до очень больших и тяжелых ленточных пил, способных разрезать парогенератор атомного котла. Существует три основных типа механических пил: возвратно-поступательные пилы (включая ножовки и гильотины), ленточные пилы и циркулярные пилы.

Технология с использованием *возвратно-поступательных пил* хорошо отработана и имеет широкое распространение. В простейшей форме пилы такого типа содержат лезвие, закрепленное на раме с одного или двух концов и приводимые в действие вручную. В более сложных случаях они могут иметь электрические или пневматические приводы. Такими пилами можно разрезать различные материалы, включая металлы и пластиковые материалы. Они могут применяться как в воздушной, так и в водной среде.

*Ленточные пилы* содержат не имеющее концов лезвие, т.е. в виде стальной петли или ленты, раму, в которой эта лента вращается и мотор для привода лезвия. Размеры ленточных пил колеблются в широких пределах, начиная от ручных пил до очень больших устройств, способных за один прием разрезать парогенератор диаметром в несколько метров. Основные достоинства пил: ими можно резать как в вертикальном, так и в горизонтальном направлениях; они создают тонкий надрез, что минимизирует возникновение аэрозолей и пыли.

*Циркулярные пилы* представляют собой довольно известную и хорошо разработанную к настоящему времени технику. Лезвие пилы имеет форму диска, на котором по окружности нанесены зубья. Процесс распиливания происходит путем вращения диска. Лезвия пил могут иметь различные размеры вплоть до 1–2 метров в диаметре и легко могут быть заменены. Основной недостаток таких пил – это их громоздкость и необходимость прикладывания больших усилий. Циркулярные пилы могут использоваться как в воздушной среде, так и под водой.

В качестве примера кратко рассмотрим установку-стенд по фрагментации и сортировке твердых радиоактивных отходов, использующуюся на Московском НПО “Радон” (рис. 6.2 и 6.3) [6.7]. Установка состоит из следующих узлов: рабочий стол (1) с поддоном из нержавеющей стали; насосная станция (2); катушка шланговая (3); гидравлический инструмент (4); вытяжной зонтик (5).

**Рабочий стол** с поддоном предназначен для размещения сортируемых ТРО и закрепления объектов, подлежащих фрагментации. Наличие поддона ограничивает загрязнение радиоактивными веществами прилегающего пространства. **Насосная станция** обеспечивает гидравлические устройства рабочей жидкостью давлением до 25 МПа. **Катушка шланговая** служит для наматывания на нее гибких шлангов высокого давления и подключения гидравлических инструментов к источнику рабочей

жидкости на расстояние не более 10 м. **Гидравлические кусачки** – инструмент для резания металлических профилей, проволоки, тросов, труб, перемычек и т.п. **Вытяжной зонт** предназначен для создания на рабочем месте разрежения и отсоса из рабочей зоны радиоактивной пыли.

После фрагментации отходы помещаются в контейнеры, 200-литровые бочки или железобетонные контейнеры, где они подвергаются иммобилизации в цемент.

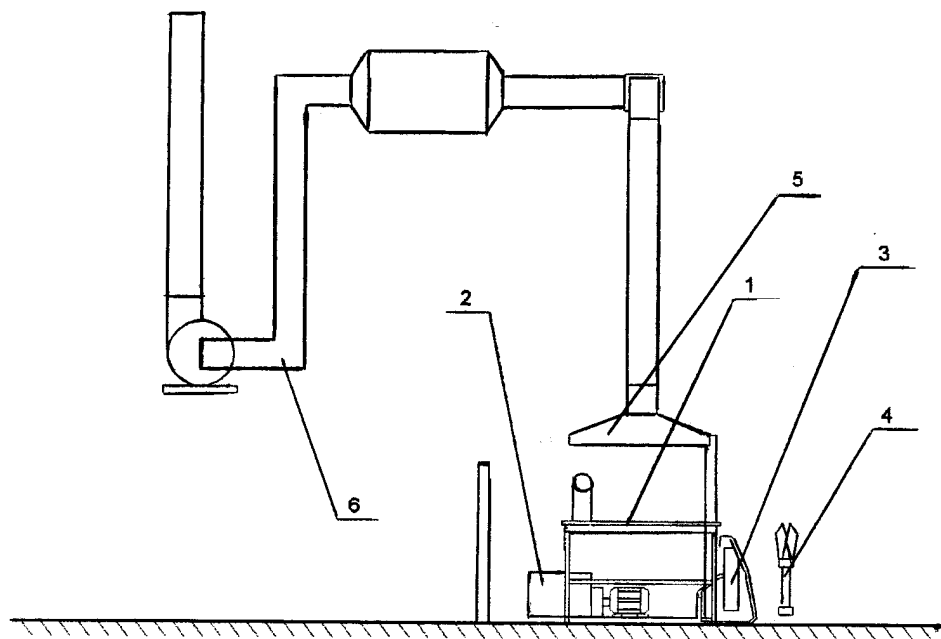


Рис. 6.2. Стенд для сортировки и фрагментации ТРО (1 – рабочий стол, 2 – насосная станция, 3 – катушка шланговая, 4 – гидравлический инструмент, 5 – вытяжной зонт, 6 – система вытяжной вентиляции).



Рис. 6.3. Общий вид станда для сортировки и фрагментации ТРО.

### 6.3.3 Прессование под низким давлением

Прессование – самый простой и экономичный способ уменьшения объема отходов, позволяющий сократить расходы на транспортировку и затраты на строительство и эксплуатацию хранилищ радиоактивных отходов. В настоящее время используются установки, на которых прессование производится:

- внутри стальных бочек;
- внутри ящиков;
- пакетировкой;
- в винтовом прессе типа экструдера.

Для прессования обычно используют вертикальные и горизонтальные прессы [6.8]. Широкое распространение получило прессование ТРО в кипы с постоянной площадью сечения и толщиной, определяемой количеством отходов. Такие установки используются в Нидерландах и Великобритании [6.9]. В национальной лаборатории Айдахо и на заводе в Роки-Флетс ТРО прессуют в тюки [6.10]. Наиболее распространено прессование ТРО, проводимое внутри стандартизованных бочек, как, например, в Сакле, Франция, и в Маундской лаборатории, США [6.10]. Сведения о прессовании ТРО в бочки с использованием прессов низкого и высокого давления приведены в обзоре [6.2].

Коэффициент сокращения объема в результате прессования обычно не превышает 10 и зависит от состава ТРО: максимальный коэффициент у металлических отходов (8–10), минимальный – у резинотехнических изделий и полимерных материалов (2–3). Установки прессования различаются по давлению, которое пресс может развивать при сжатии отходов. Прессы низкого давления обычно развивают усилие до 10 МН.

Прессование в бочках часто используется как подготовка отходов к суперпрессованию. Бочки со спрессованными отходами в дальнейшем поступают на суперпресс, где прессованию подвергается вся бочка вместе с отходами.

В качестве одного из типичных примеров рассмотрим пакетировочную установку прессования в ГУП МосНПО "Радон" [6.11]. Она выполнена на базе серийного брикетировочного прессы БА 1330, произведенного Азовским ПО "Донпрессмаш", и состоит из:

- гидравлического прессы, развивающего усилие 100 т на последней ступени,
- узла выгрузки спрессованных брикетов,
- системы газоочистки.

*Пакетировочный пресс* снабжен герметичным кожухом над камерой прессования. Камера снабжена дверью для загрузки металлических барабанов с отходами для прессования, которые помещают под пуансон прессы. Цикл прессования состоит из двух стадий: продольного и поперечного прессования. После прессования брикет устойчивой формы размерами 320×320×600 мм через шиберное отверстие прессы попадает в бочку объемом 200 л. *Узел выгрузки* расположен в герметичном боксе, оборудован кантователем бочек и дверью для установки в бокс пустых и выемки заполненных спрессованными брикетами бочек. По мере заполнения на 2/3 объема бочка грузозахватным механизмом вынимается из герметичного бокса, закрывается герметичной крышкой и отправляется на спецавтомобиле ОТ-20 для заливки в бочку

цементного раствора, замешенного на низкосолевых низкоактивных ЖРО. Система газоочистки предназначена для очистки отходящих газов и для создания необходимого разрежения в узлах установки и состоит из газоходов, камеры фильтрования (фильтры ФА-1) и вытяжного вентилятора. Схема установки прессования приведена на рисунке 6.4.

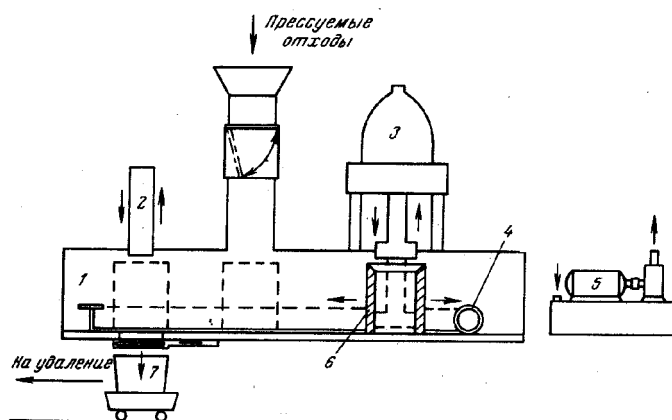


Рис. 6.4. Схема установки прессования на базе вертикального гидравлического пресса (защитный бокс, гидротолкатель, пресс, привод пресс-формы, насосная станция, пресс-форма контейнер).

#### 6.3.4 Прессование под высоким давлением

Прессы высокого давления, также называемые **суперкомпакторами**, позволяют добиться наибольшего сокращения объема. После обработки высоким давлением из первичных бочек с отходами получают так называемые “таблетки” спрессованных отходов (рис. 6.5). В таких прессах используется давление 10 МН или выше.



Рис. 6.5. Суперкомпактор ГУП МосНПО “Радон”, Россия.

Суперкомпактирование используется для уменьшения объема разных типов отходов, включая бумагу, пластмассы и ткани, обычно относящиеся к категории сжимаемых отходов, а также такие материалы, как металлы, бетонный мусор, стекло, дерево, песок и т.д., которые не удастся сжимать прессами с низким усилием. Прессованием под высоким давлением можно получить продукт плотностью >90% от

его теоретической плотности. Спрессованные “таблетки” радиоактивных отходов обычно помещают в бочки большего диаметра для последующей иммобилизации в цемент.

Суперкомпакторы достаточно дороги, поэтому их применение экономически оправдано при больших объемах ТРО.

## ЛИТЕРАТУРА

- [6.1] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Treatment of Low and Intermediate Level Solid Radioactive Wastes, Technical Reports Series No. 223, IAEA, Vienna (1983).
- [6.2] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Status of Technology for Volume Reduction and Treatment of Low and Intermediate Level Solid Radioactive Waste, Technical Reports Series No. 360, IAEA, Vienna (1994).
- [6.3] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Advances in Technologies for the Treatment of Low and Intermediate Level Radioactive Liquid Wastes, Technical Reports Series No.370, IAEA, Vienna (1994).
- [6.4] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Management of Radioactive Waste from the Use of Radionuclides in Medicine, IAEA-TECDOC-1183, Vienna (2000).
- [6.5] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Management of Small Quantities of Radioactive Waste, IAEA-TECDOC-1041, Vienna (1998).
- [6.6] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Handling and Processing of Radioactive Waste from Nuclear Applications, Technical Reports Series No. 402, IAEA, Vienna (2001).
- [6.7] Дмитриев С.А. ред. Обращение с радиоактивными отходами от неядерных применений. (Лекции курсов-семинара по подготовке и повышению квалификации специалистов, работающих в области обращения с радиоактивными отходами). МГУ им. М.В. Ломоносова и МосНПО “Радон”, Москва – Сергиев Посад, (2000).
- [6.8] Шведов В.П., Седов В.М., Рыбальченко И.Л., Власов И.Н. Ядерная технология. – М.: Атомиздат, 1979, 336 с.
- [6.9] Konig C. Proc. of the Intern. Symp. on the Conditioning of Radioactive Wastes for Storage and Disposal. IAEA-SA-261/25, Vienna, p.305-314 (1983).
- [6.10] Clark D.E., Lerch R.E. Symp. Pergamon Press, 1979, vol.1, p.235-286.
- [6.11] Соболев И.А., Хомчик Л.М. Обезвреживание радиоактивных отходов на централизованных пунктах. – М.: Энергоатомиздат, 1983, 128 с.

## **7 ОБРАБОТКА И ИММОБИЛИЗАЦИЯ ОРГАНИЧЕСКИХ РАДИОАКТИВНЫХ ОТХОДОВ**

### **7.1 ВВЕДЕНИЕ**

Радиоактивные отходы обычно образуются при эксплуатации атомных реакторов различного назначения, в тех процессах и на тех установках, на которых производят радиоактивные материалы для различных целей, а также в тех процессах, в которых эти радиоактивные материалы используются. Некоторые из этих отходов полностью состоят из органических материалов как твердых, так и жидких, другие могут содержать органические компоненты в виде определенной фракции радиоактивных отходов. Органические радиоактивные отходы, или органические фракции радиоактивных отходов, могут образоваться в твердом, жидком и иногда в газообразном состоянии. Специфика органических компонентов радиоактивных отходов состоит в том, что при обращении с ними необходимо учитывать их природу и специфические свойства, такие как летучесть, горючесть, химическая и биологическая токсичность, подверженность химическому, биологическому и радиационному разложению. Обычно это нехарактерно для неорганических отходов.

Твердые органические радиоактивные отходы обычно имеют гетерогенную природу, представляя собой смесь таких материалов, как спецодежда, упаковочная бумага, картон, различные виды пластиков, и т.д. Жидкие отходы обычно представляют собой достаточно однородные гомогенные индивидуальные жидкости, или смесь жидкостей. Жидкие отходы предпочтительнее не смешивать, а собирать отдельно, поскольку это значительно облегчает их последующую обработку (смазочные и трансформаторные масла, растворители, экстрагенты, сцинтилляционные растворы и т.д.). В качестве органических радиоактивных отходов в этом разделе будут рассмотрены радиоактивные отходы, состоящие из органических компонентов (в основном это смесь твердых отходов), либо содержащие органические компоненты в значимых количествах (обычно это больше относится к жидким отходам). Следует отметить, что объем жидких органических радиоактивных отходов обычно сравнительно мал, однако, в силу указанных выше специфических свойств органических компонентов (летучесть, горючесть, химическая и биологическая токсичность), эта специфика должна учитываться при обращении с такими отходами. [7.1].

### **7.2 ОБРАЗОВАНИЕ И ХАРАКТЕРИСТИКИ ОРГАНИЧЕСКИХ ОТХОДОВ**

#### **7.2.1 Масла и сцинтилляционные жидкости**

Жидкие радиоактивные органические отходы могут содержать, или могут состоять из загрязненных вакуумных и других масел, смазочных материалов, гидравлических жидкостей, сцинтилляционных растворов, и разнообразных растворителей. Обычно эти отходы содержат относительно небольшие количества бета-гамма-излучающих радионуклидов. Неводные растворители типа стероидов, липидов и неполярных растворителей типа толуэна, ксилена и гексана - наиболее часто используемые в экстракционных процессах органические жидкости. Отходы содержащие сцинтилляционные жидкости образуются при проведении радиохимического анализа и состоят из трех составляющих: сцинтилляционного раствора, растворителя и исследуемого образца. Они наиболее часто используются для

измерения трития, и реже для измерения  $^{125}\text{I}$ ,  $^{32}\text{P}$  и  $^{35}\text{S}$ . Активность отходов такого типа обычно приблизительно 350 МБк/м<sup>3</sup>.

### 7.2.2 Экстрагенты и растворители

Наиболее часто используемым органическим экстрагентом для выделения урана или плутония из водных растворов является трибутилфосфат (ТБФ). При проведении процессов экстракции ТБФ разбавляют, обычно малонасыщенными углеводородами, часто смесью керосинов. Отработавший ТБФ обычно загрязнен радионуклидами урана и тория. Иногда другие органические соединения используются для извлечения тяжелых металлов, хотя их объемы обычно малы по сравнению с ТБФ. В научно-исследовательских центрах, исследующих вопросы переработки отработавшего топлива, растворители, в дополнение к урану, могут быть загрязнены Pu и продуктами деления.

Ряд жидких органических отходов возникает в результате проведения дезактивации. Они включают толуол, тетрахлорид углерода, ацетон, спирт и трихлорэтилен. Водные растворы органических кислот типа лимонной кислоты также используются в процессе дезактивации оборудования.

### 7.2.3 Медико-биологические отходы

Жидкие медико-биологические радиоактивные отходы в основном являются водными растворами, которые могут содержать остатки медикаментов, биологически активные компоненты, кровь, биологические растворы, хемотерапевтические и радиофармацевтические препараты, и т.д. Такие отходы, в силу их потенциальной биологической или патогенной токсичности, должны собираться и храниться отдельно от других отходов, и их обработка требует привлечения специальных технологий стерилизации и дезинфекции.

### 7.2.4 Твердые органические радиоактивные отходы

Твердые органические радиоактивные отходы в основном представляют собой загрязненные органические материалы, используемые на предприятиях ядерной промышленности, других предприятиях где производятся или используются радиоактивные вещества. К ним относятся пластики, резинотехнические изделия, целлюлозные материалы (упаковочные материалы, бумага, дерево, хлопковые и другие ткани, спецодежда), угольные фильтры, и т.д. Иногда к ним относят отработавшие ионообменные смолы, графит, другие материалы органической природы.

Наиболее существенные объемы твердых органических радиоактивных отходов образуются на АЭС и в ядерных исследовательских центрах, где значительная часть производственного мусора переходит в категорию радиоактивных отходов. Такие отходы могут составлять от 50% до 70% от общего количества твердых радиоактивных отходов, образующихся на предприятиях.



## 7.3 ОСОБЕННОСТИ ОБРАЩЕНИЯ С ОРГАНИЧЕСКИМИ ОТХОДАМИ

### 7.3.1 Общие соображения

Различные методы обработки могут быть применены к каждому типу отходов, однако следующие факторы должны быть учтены при выборе конкретного метода обработки органических радиоактивных отходов:

- Так как многие органические отходы несовместимы с окружающей средой, вариант “разбавления и сброса”, иногда применимый для водных и газообразных отходов, не применим к органическим отходам, в частности к жидким органическим радиоактивным отходам. Помимо локализации радионуклидов, органические компоненты отходов должны быть разрушены, либо переведены в стабильную нетоксичную форму.
- Предпочтение должно отдаваться относительно простым и эффективным процессам, обеспечивающим выполнение требований по охране здоровья человека и защите окружающей среды.

Если индивидуальные производители органических радиоактивных отходов, особенно жидких органических отходов, не имеют опыта и необходимой квалификации для их обработки, целесообразно отсылать органические отходы на централизованные предприятия по обращению с отходами, где имеется квалифицированный персонал и необходимое оборудование. Соответственно, эта концепция предусматривает сбор и транспортировку отходов от ряда производителей на централизованное предприятие по переработке радиоактивных отходов.

### 7.3.2 Раздельный сбор органических отходов

В зависимости от свойств и характеристик органических радиоактивных отходов, а также в зависимости от выбранного метода (методов) их отработки, органические отходы должны собираться и сортироваться на месте их образования. Некоторые виды твердых органических отходов позволяют их совместный сбор, если эти отходы являются приемлемыми для выбранного метода обработки (например, сжигания или компактирования). Каждый вид жидких радиоактивных органических отходов собирается и хранится до отправки на обработку отдельно, в зависимости от состава и свойств органической фазы и радионуклидного состава отходов. Т.е. во время сбора отходов должна быть обеспечена их сегрегация, например в зависимости от периода полураспада и радиотоксичности содержащихся радионуклидов, физико-химических характеристик отходов и/или выбранного метода обработки. Сцинтилляционные жидкости не должны смешиваться с другими органическими растворителями, маслами и т.д. Должна вестись регистрация содержимого контейнеров для сбора отходов с указанием типа отходов, типа радионуклидов и активности. Желательно собирать отходы в тех контейнерах, в которых они будут транспортироваться на обработку, например, в стальных или пластмассовых бочках подходящего размера. Стекланную тару или контейнеры лучше не применять из-за их недостаточной прочности и надежности. Из-за химически активной и огнеопасной природы органических жидких отходов, их хранение должно быть организовано в специальных помещениях, предназначенных только для хранения таких отходов, отдельно от других отходов. Такие хранилища должны быть оборудованы противопожарными средствами и вентиляцией [7.2].

Отходы, содержащие короткоживущие и долгоживущие радиоизотопы, должны собираться отдельно. Отходы, содержащие короткоживущие радиоизотопы, хранятся до распада радиоактивности до уровней освобождения от регулирующего контроля, после чего они могут быть переведены в категорию нерадиоактивных химических отходов. Отходы, содержащие долгоживущие радиоизотопы должны обрабатываться в соответствии с требованиями, предъявляемыми к такого рода радиоактивным отходам.

## 7.4 ОБРАБОТКА

### 7.4.1 Сжигание

Сжигание является одним из основных и универсальных методов обработки как твердых, так и жидких органических отходов. В процессе сжигания органические компоненты отходов окисляются до простых неорганических окислов, (в основном диоксид углерода и вода), т.е. полностью разрушаются и теряют свою индивидуальность. Оксиды других элементов тоже могут образовываться в зависимости от состава отходов. Объем отходов при этом значительно уменьшается, радиоактивные компонента отходов в основном переходят в зольный остаток, который в силу своей неорганической природы является более приемлемым для надежной иммобилизации, чем исходные органические отходы.

Этапы и компоненты процесса показаны на рисунке 7.1. Любая система сжигания радиоактивных отходов должна быть спроектирована и эксплуатироваться таким образом, чтобы обеспечить удержание радиоактивных веществ в течение всего процесса, включая систему газоочистки. Установка для сжигания отходов должна дополнительно обеспечивать удержание летучих органических веществ, токсичных продуктов горения, препятствовать формированию и выбросу токсичных вторичных соединений, образованию взрывоопасных смесей газов и паров. Более подробно требования к установкам по сжиганию радиоактивных отходов рассмотрены в разделе “Термические технологии обработки радиоактивных отходов”.

Разработан и успешно эксплуатируется в различных странах ряд установок по сжиганию как жидких, так и твердых радиоактивных отходов [7.3]. Иногда сжигание твердых и жидких радиоактивных отходов производится на одной установке, конструкционные особенности которой предусматривают такую возможность.

### 7.4.2 Компактирование

Твердые органические радиоактивные отходы во многих случаях подвергаются компактированию на обычных прессах или суперпрессах совместно с другими компактируемыми отходами неорганической природы (металл, фильтроматериалы, зольные остатки, и т.д.). После прессования такие отходы подвергаются дополнительной иммобилизации, обычно в цементную матрицу. Технологии этих процессов более подробно рассматриваются в разделе “Технологии механической обработки и уменьшения объема твердых радиоактивных отходов”.

### 7.4.3 Окислительные процессы

Разрушение органических компонентов радиоактивных отходов можно производить не только путем сжигания, но и окислением в жидкой фазе при невысоких температурах [7.4–7.6]. Органические компоненты отходов окисляются пероксидом водорода в водной среде в присутствии катализатора при 100°C, вода затем

выпаривается, оставляя сконцентрированные неорганические отходы и радионуклиды в кубовом остатке. В основном этот метод применяется для обработки жидких органических радиоактивных отходов. Главные преимущества процесса – низкие температуры и образование водных отходов, которые проще перерабатывать. При этом методе достигается хороший контакт окислителя с органическими отходами в водной среде. Раньше метод использовался только для полярных материалов, которые легко растворяются в воде, но в последнее время этот метод успешно применяют и для разложения (окисления) неполярных органических материалов.

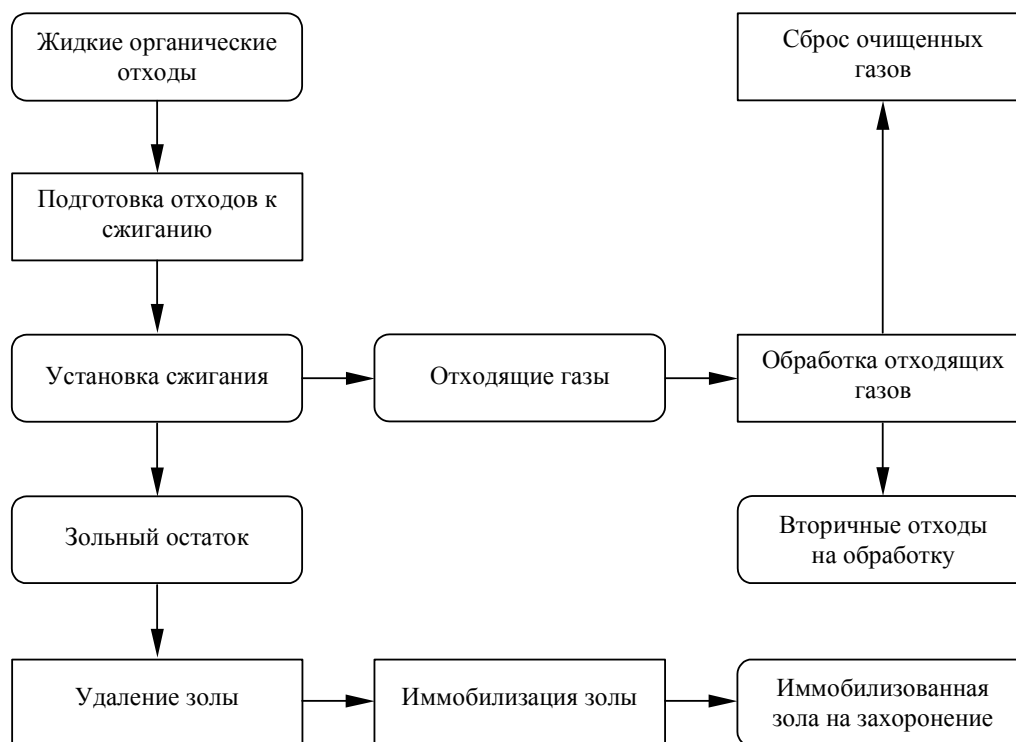


Рис. 7.1. Этапы и компоненты сжигания органических радиоактивных отходов.

#### 7.4.4 Электрохимический процесс окисления

Этот процесс предлагает альтернативный метод окисления, имеющий некоторое сходство с процессом окисления в водной фазе. Оба процесса протекают при намного более низких температурах, чем сжигание, и не требуют очистки отходящих газов, характерных для обычного сжигания. В процессе окисления в жидкой фазе и при электрохимическом процессе используются сильные окислители. При электрохимическом окислении в качестве окислителя используется  $\text{Ag (II)}$  в растворе нитрата серебра и азотной кислоты.  $\text{Ag (I)}$  в растворе нитрата серебра в анодном отделении электрохимической ячейки восстанавливается до  $\text{Ag (II)}$ , который в качестве сильного окислителя окисляет органические соединения до углекислого газа и воды. [7.7].

#### 7.4.5 Кислотное растворение

Применение кислотного растворения для обработки органических отходов разрабатывалось в ряде стран, однако только Германия и США накопили существенный опыт в его применении на промышленном уровне [7.8]. Для процесса

требуется смесь азотной и серной кислот при 250°C, соответственно для аппаратурного оформления процесса требуются дорогие коррозионно-стойкие материалы. Процесс основан на окислительных свойствах смеси азотной и серной кислот. При этом процессе требуются сложные системы очистки агрессивных газов, так как в течение процесса образуются диоксиды серы и азота. Этим методом хорошо обрабатываются некоторые органические жидкости, например гексон и ТБФ, хотя парафин растворяется только частично. Трихлорэтилен и толуол подвергаются существенному окислению этим методом только в распыленном виде.

#### 7.4.6 Щелочной гидролиз

Щелочной гидролизный процесс исследовался в Германии в качестве метода для очистки ТБФ в его смеси с разбавителем и водой для повторного использования экстракционных композиций [7.9–7.11]. В результате гидролитических реакций радиоактивные компоненты (металл-ионы) переходят из органической в водную фазу, и после разделения фаз можно получить органическую фазу, очищенную от радиоактивного загрязнения. Водная фаза, содержащая радионуклиды, направляется на дальнейшую переработку.

#### 7.4.7 Дистилляция

Обычная дистилляция может использоваться для предобработки сцинтилляционных жидкостей и различных растворителей. При этом возможно повторное использование дистиллята, а также существенное сокращение объема отходов, поскольку радиоактивные элементы концентрируются в кубовом остатке. Очищенный в результате дистилляции органический растворитель может вновь использоваться как технический растворитель или как топливо для установки сжигания отходов. Дистилляция сцинтилляционных жидкостей осуществлялась в США [7.12] и Бразилии. Дистилляция может проводиться на обычном оборудовании и не требует большого пространства для самой установки. Процесс достаточно прост и доступен, не требует высокой квалификации операторов. Кубовые остатки после дистилляции могут направляться на сжигание, либо на дальнейшую обработку другими методами, в зависимости от их состава.

#### 7.4.8 Пиролиз

Пиролиз в принципе аналогичен сжиганию, поскольку представляет собой термическое разложение (неполное окисление) органических веществ при недостатке кислорода [7.13–7.16]. При этом образуются свободные от радионуклидов газообразные продукты “неполного сгорания”, такие как CO, H<sub>2</sub>, низшие углеводороды, и неорганические “зольные остатки”, содержащие основную массу радиоактивных загрязнений. Процесс протекает при температуре 500–550°C, что значительно ниже температуры сжигания. При этой температуре значительно уменьшается проблема коррозии аппаратуры, а также проблема уноса в газовую фазу некоторых летучих радионуклидов. С целью утилизации свободный от радионуклидов пиролизный газ сжигается в специальных установках для получения тепла. Зольные остатки подвергаются обработке как неорганические радиоактивные отходы.

Если сжигание применяется в основном для обработки низкоактивных отходов, пиролиз обычно используют при обработке отходов среднего уровня активности.

## 7.5 ПРОЦЕССЫ ИММОБИЛИЗАЦИИ

### 7.5.1 Абсорбция

Обработка органических жидких радиоактивных отходов абсорбентами – довольно простой путь перевода жидких отходов в отвержденную форму. Простым добавлением жидких органических отходов к соответствующим абсорбентам может быть получен отвержденный продукт, приемлемый для транспортировки, временного хранения и последующего кондиционирования. Этот процесс вероятно является наиболее простым для преобразования органических жидкостей в твердую форму, и поэтому он довольно широко применяется во многих областях. В частности, этот метод обычно используется для отверждения радиоактивных турбинных и насосных масел, образующихся на АЭС [7.17].

При использовании сорбентов, жидкие органические отходы преобразуются в форму, которая может меняться от желеобразного состояния до твердого, в зависимости от состава и соотношения используемых компонентов. Такие формы отходов неустойчивы, но как промежуточные они упрощают процессы транспортировки и промежуточного хранения жидких органических отходов, повышая безопасность промежуточных манипуляций с такими отходами. Поглощительная способность различных сорбентов может быть достаточно высокой, а увеличение объема отходов при этом может достигать 300 %. Присутствие воды отрицательно сказывается на процессе сорбции органических отходов на твердых абсорбентах.

### 7.5.2 Цементирование

Простое цементирование имеет ограниченную эффективность для отверждения жидких органических отходов. Только незначительные количества таких отходов может быть включено непосредственно в цемент при сохранении монолитной отвержденной формы отходов. Однако, существенное увеличение наполнения может быть получено для эмульгированных и многофазных (масло/вода/растворитель) жидкостей. Цементирование органических отходов интенсивно используется в США для иммобилизации турбинных и насосных масел и растворителей, содержащих ТБФ [7.18].

Цементирование может также применяться для прямой иммобилизации твердых органических радиоактивных отходов. Однако обычно перед цементированием такие отходы подвергаются прессованию (компактированию) с целью уменьшения объемов окончательных упаковок.

### 7.5.3 Абсорбция и цементирование

Эффективность цементирования жидких органических радиоактивных отходов значительно повышается при предварительной адсорбции отходов и переводе их в твердую форму. При этом подходе органическая жидкость преобразуется в твердое вещество, которое затем смешивается с цементом и водой для получения окончательной цементированной формы отходов. Преимущество этого метода состоит в том, что процедура является относительно толерантной к составу органической фазы отходов и позволяет добиться более высокого включения отходов (до 56 %) в цементную матрицу.

Некоторые эмпирические соотношения цемента, отходов и сорбентов при цементировании приведены в Таблице 7.1.

ТАБЛИЦА 7.1. ОТВЕРЖДЕНИЕ МАСЕЛ С ПОМОЩЬЮ АБСОРБЦИИ И ЦЕМЕНТИРОВАНИЯ

Сорбент	Цемент, г	Масло, г	Сорбент, г	Вода, г	Содержание жидкости, об. %
Глина	200	32,2	71	71	15,6
Вермикулит	200	84	24	120	21,8
Натуральное волокно	200	321	11	70	56,0
Земля	200	372	265	160	38,75
Синтетическое волокно	200	295	34	165	44,5

Если жидкие органические отходы содержат воду, то за счет нее можно уменьшить количество добавленной воды, приведенной в таблице. Однако смесь должна содержать количество воды, достаточное для гидратации цемента, иначе отвержденная форма отходов не будет обладать достаточной прочностью.

Этот метод, также как и простое цементирование, доступен и не требует специальных навыков оператора, однако требует рационального подбора компонентов процесса для обеспечения требуемого качества отвержденного продукта. Увеличение объема отходов в результате абсорбции и цементирования можно считать не очень большим недостатком, принимая во внимание сравнительно небольшие объемы жидких органических радиоактивных отходов подлежащих обработке.

## 7.6 ВЫБОР ПРОЦЕССА ОБРАБОТКИ

Жидкие органические радиоактивные отходы в силу их специфических свойств, указанных выше, являются достаточно проблемными отходами для хранения, обработки и кондиционирования. Технологии, используемые для обработки водных радиоактивных отходов в непосредственном виде неприемлемы для обработки жидких органических отходов. Ряд специфических методов обработки, приведенных выше, требуют специального оборудования и соответствующей квалификации персонала для безопасного и эффективного проведения этих процессов. Применение специальных технологий обработки жидких органических отходов может быть экономически оправдано при достаточно больших объемах таких отходов. При сравнительно небольших объемах отходов более целесообразно применение более простых и доступных методов, которые хотя и приводят к значительному увеличению объема отходов, однако могут удовлетворять требованиям обеспечения качества окончательных упаковок, предназначенных для хранения или захоронения.

При значительных количествах жидких органических радиоактивных отходов использование специализированного оборудования и технологий предпочтительнее, поскольку это позволяет значительно уменьшить объем отходов (сжигание и другие окислительные процессы), а также позволяет перевести отходы в более стабильную инертную форму (за счет разрушения органических компонентов отходов), более пригодную для дальнейшей иммобилизации и получения конечных упаковок с требуемыми качественными характеристиками. Другие факторы, такие как стоимость оборудования, приемлемость его для обработки ряда жидких органических отходов,

доступность оборудования, надежность в эксплуатации и легкость обслуживания, также необходимо принимать во внимание при выборе технологий обработки жидких органических отходов. Часто наибольшую эффективность обработки таких отходов можно достигнуть путем комбинации двух или более процессов обработки [7.19].

## ЛИТЕРАТУРА

- [7.1] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Predisposal Management of Organic Radioactive Wastes, Technical Reports Series No. 427, IAEA, Vienna (2004).
- [7.2] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Storage of Radioactive Wastes, IAEA-TECDOC-653, Vienna (1992).
- [7.3] DUSSOSSOY, J.L., "Incineration of radioactive organic liquids", Incineration of Radioactive Waste (Proc. CEC Sem. Arnhem, 1984), Rep. CEC-EUR-9621, Graham and Trotman, London (1985).
- [7.4] WILKS, J.P., HOLT, N.S., Wet oxidation of mixed organic and inorganic radioactive sludge wastes from a water reactor, *Wastes Manage.* **10** (1990) 197-203.
- [7.5] WILKS, J.P., HOLMAN, D.J., HOLT N.S., "Organic waste treatment by wet oxidation", *Chemspec Europe 91 BACS Symposium* (1991).
- [7.6] HOLMAN, D.J., "Process options for treatment of organic-containing ILWs by wet oxidation", *Radioactive Waste Management*, BNES, London (1989).
- [7.7] STEELE, D.F., A novel approach to organic waste disposal, *Atom* **393** (July 1989).
- [7.8] WIECZOREK, H., OSER, B., "Development and active demonstration of acid digestion of plutonium-bearing waste", *Spectrum '86* (Proc. ANS Conf. Niagara Falls, 1986), American Nuclear Society, Hinsdale, IL (1986).
- [7.9] KRAUSE, H., et al., ASD - Jahresbericht 1967 KFK-Bericht 888 (1968).
- [7.10] KRAUSE, H., et al., ADB - Jahresbericht 1970 KFK-Bericht 1500 (1972).
- [7.11] DROBNIK, S., Rep. AED-Conf-78-274-000, Fachinformationszentrum Energie, Physik, Mathematic GmbH, Eggenstein-Leopoldshafen (1978).
- [7.12] DELLAMANO, J.C., Distillation as a pre-treatment process of waste scintillation solutions, *Radioactive Waste Management* **2**, BNES, London (1989).
- [7.13] GRABENER, K.H., Verbrennung von schwach radioaktiven Abfällen, Kraftwerke Union AG, Offenbach (1984).
- [7.14] Chrubasik, A., et al., Proc. of the Int. Conf. on Nuclear Fuel Waste Management, RECOD 87, Vol 2, Paris, (1987).
- [7.15] Pyrolysis of radioactive organic waste, NUCEM Nuclear GmbH, April 2000 Web page [www.nukem.de/global/downloads/deutsch/Pyrolyse.pdf](http://www.nukem.de/global/downloads/deutsch/Pyrolyse.pdf).
- [7.16] Luyckx, P., Deckers, J., "Pebble bed pyrolysis for the processing of alpha contaminated organic effluents", *Proceedings of the Int. Conf. ICEM'99*, Nagoya, Japan, CD-ROM, (Oct. 1999).
- [7.17] LIN, M., MACKENZIE, D.R., Tests of Absorbents and Solidification Techniques for Oil Wastes, Rep. BNL-NUREG-51589, Brookhaven National Lab, Upton, NY (1983).
- [7.18] GREENHALGH, W.O., Immobilisation of Organic Liquid Wastes, Rep. HEDL-SA-3377-FA, Hanford Engineering Development Lab. Richland, WA (1985).
- [7.19] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Combined Methods for Liquid Radioactive Waste Treatment, IAEA-TECDOC-1336, Vienna, (2003).

## 8 ТЕХНОЛОГИИ ОЧИСТКИ ГАЗООБРАЗНЫХ ВЫБРОСОВ

### 8.1 ВВЕДЕНИЕ

При работе с радиоактивными материалами могут образоваться газообразные радиоактивные отходы, чаще всего представляющие собой газовые или аэрозольные радиоактивные продукты в воздухе. Газообразные отходы обладают повышенной подвижностью и могут быстро распространяться в окружающей среде. Для локализации, сбора и обработки газообразных отходов используются различного типа изолированные объемы, снабженные вентиляционными системами и системами газоочистки. Обработка газообразных отходов с целью удаления из них радионуклидов выполняется системой газоочистки, состоящей из коллекторов, коробов и разнообразных фильтров и адсорберов. Комбинация вентиляции с очисткой собранного воздуха предотвращает радиоактивное загрязнение воздуха в рабочих помещениях и окружающей атмосфере.

На установках по обращению с радиоактивными материалами воздушные потоки, выходящие непосредственно из рабочих областей, например, горячих камер или печей сжигания, называют отходящими газами. Отходящие газы, как правило, содержат более высокие концентрации радионуклидов, чем вентиляционные потоки из рабочих помещений, в которые радионуклиды обычно попадают лишь путем утечек из закрытых рабочих областей. Поэтому отходящие газы различных установок, как правило, очищаются от радионуклидов до их смешивания с вентиляционным воздухом из рабочих помещений.

### 8.2 ЗАДАЧИ СИСТЕМ ВЕНТИЛЯЦИИ И ГАЗООЧИСТКИ

Главными задачами систем вентиляции и газоочистки являются:

- Снижение и поддержание уровня радиоактивного загрязнения рабочих помещений в безопасных допустимых пределах;
- Поддержание минимальной концентрации пыли в рабочих помещениях и уменьшение поверхностного загрязнения.
- Создание нормальных рабочих условий путем нагревания или охлаждения, а также увлажнение или осушение подаваемого воздуха.
- Поддержание направления потока воздуха от объема с меньшим загрязнением к объему с большим загрязнением, что позволяет защитить помещения от неконтролируемого распространения загрязнения.
- Очистка отходящих газообразных потоков перед выбросом в атмосферу.

На установках, не относящихся к ядерному топливному циклу (ЯТЦ), в частности на установках по обращению с РАО, одни и те же системы вентиляции и очистки предназначены как для нормальных, так и для нестандартных (аварийных) условий [8.1]. В то же время на объектах ЯТЦ, например на АЭС, для нормальных условий работы и прогнозируемых аварийных ситуаций устанавливаются отдельные системы газоочистки [8.2].

### 8.3 ОРГАНИЗАЦИЯ ВЕНТИЛЯЦИОННОЙ СИСТЕМЫ

Вентиляционная система установок (помещений) по обращению с радиоактивными материалами состоит из двух подсистем: приточной и вытяжной



вентиляции. С целью эффективной вентиляции и очистки воздуха в помещениях, где проводят работы с радиоактивными материалами, их условно разделяют на ряд зон в зависимости от степени опасности и возможного загрязнения. Наиболее часто используется следующая система классификации зон.

*Белая зона:* Область, свободная от радиоактивного загрязнения воздуха и поверхностей, например коридоры между служебными помещениями и сами “нерадиоактивные” помещения со свободным доступом.

*Зеленая зона:* В основном это чистая зона благодаря очистке воздуха при его регулярном контроле. Загрязнение воздуха может произойти только в исключительных обстоятельствах. Примеры: входные коридоры и помещения персонала радиационной защиты. Вход в такие помещения разрешается через пропускные пункты со сменой одежды.

*Желтая зона:* Область, в которой может быть поверхностное загрязнение, а загрязнение воздуха может превышать допустимые пределы. Иногда, в желтую зону включают области, где загрязнение воздуха требует применение респираторов. Примеры: перчаточные боксы, зоны работы с радиоактивными материалами и некоторые участки горячих камер. Посещение таких областей ограничено.

*Красная зона:* Область, где уровни загрязнения так велики, что вход туда не разрешен. Примеры: перчаточные боксы и горячие камеры.

Типичная схема зонирования и организации вентиляции и газоочистки показана на рисунке 8.1.

### 8.3.1 Приточная вентиляция

Система приточной вентиляции на установках по обращению с радиоактивными отходами аналогична системам, устанавливаемым в помещениях без радиоактивных отходов (система кондиционирования воздуха). Она включает вентиляторы, пылеулавливатели, увлажнители и оборудование для кондиционирования воздуха.

Место ввода свежего воздуха в приточную вентиляционную систему располагается таким образом, чтобы избежать забора воздуха из областей, близких к зонам выброса вентиляционных или газоочистительных установок. Вход в вентиляционное помещение располагается извне здания или из чистой зоны, где нет работ с радиоактивными материалами.

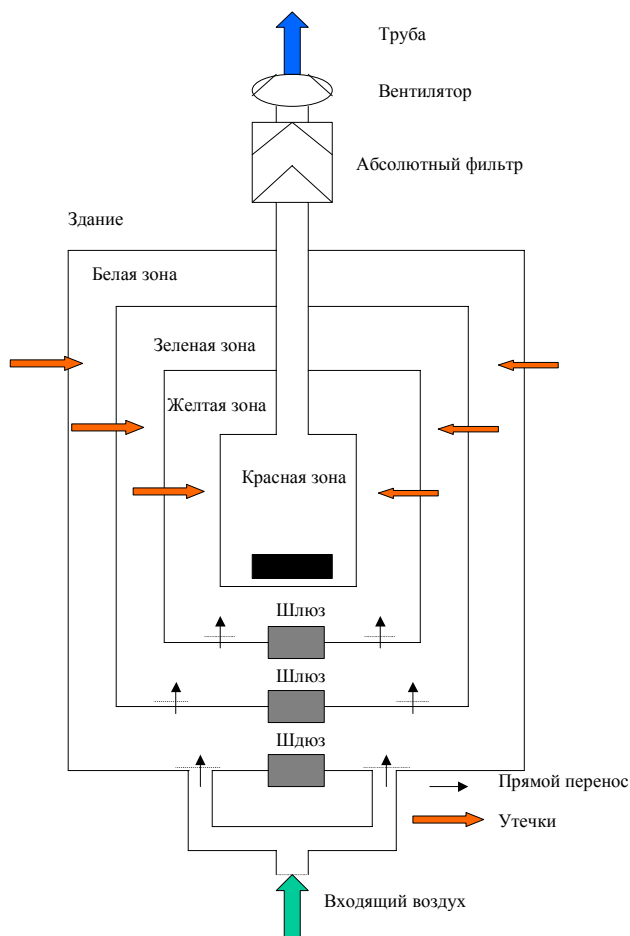
Вентиляционные системы для контролируемых зон обычно проектируются с расчетом использования чистого воздуха. Там, где внешняя температура сильно отличается от требуемой внутренней температуры и требуется много энергии для нагрева или охлаждения входящего воздуха применяется рециклирование тепла, выделяемого или поглощаемого при кондиционировании воздуха.

### 8.3.2 Вытяжная вентиляция

Главные функции вытяжной вентиляционной системы являются следующие:

- очистка выходящего воздуха фильтрами;

- зонная организация движения воздуха от менее к более загрязненным зонам и предотвращение обратных потоков загрязненного воздуха;
- обеспечение герметичности системы.



*Рис. 8.1. Принципиальная схема разделения на зоны и организации системы вентиляции и газоочистки.*

Для повышения надежности системы вытяжной вентиляции выполняются с частичным или полным дублированием газоочистного оборудования. Обычно используются коррозионно-стойкие материалы и материалы, удобные для последующей дезактивации. Точки выброса очищенного воздуха обычно располагаются достаточно высоко, чтобы обеспечить хорошее рассеяние выбросов.

### 8.3.3 Элементы вентиляционных систем

Типичными компонентами вентиляционных систем являются: вытяжные зонты и шкафы, перчаточные боксы, временные системы удержания, вентиляторы, демпферы и пылеулавливатели.

#### **Вытяжные зонты**

Вытяжные зонты используются для сбора паров, пыли и дыма на месте их выделения. Из-за низкой эффективности удержания они применяются для обращения с материалами достаточно низкой активности. Для увеличения эффективности

удержания и уменьшения входного потока воздуха они располагаться как можно ближе к источнику загрязнения.

### ***Вытяжные шкафы***

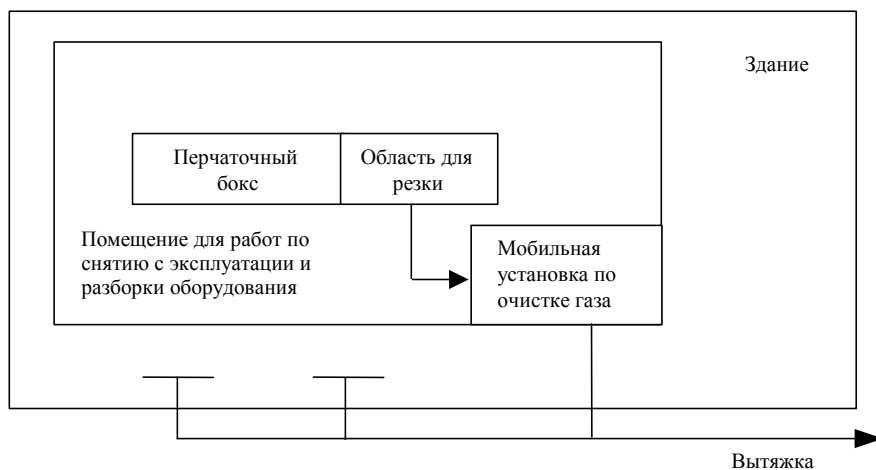
Вытяжные шкафы используются для содержания оборудования и процессов при возможности доступа с передней стороны шкафа. Каждый вытяжной шкаф соединяется с общей вытяжной вентиляционной системой, из которой газы после соответствующей очистки выбрасываются в атмосферу. Для лучшей эффективности рекомендуется ограничить площадь открывания двери до  $0,5 \text{ м}^2$ .

### ***Перчаточные боксы***

Перчаточный бокс представляет собой полностью закрытый ящик, со вставленными внутрь резиновыми перчатками, позволяющими оператору манипулировать внутри ящика в полной изоляции от окружающей среды. Давление внутри ящика отрицательное и составляет обычно между 150 и 650 Па, с целью предотвращения газо-аэрозольных утечек. В зависимости от проводимых внутри операций, перчаточный бокс может быть снабжен дополнительными системами очистки газов и аэрозолей. Обычно перчаточные боксы используются для работы с материалами, испускающими  $\alpha$ -излучение, и некоторыми  $\beta$ -активными материалами.

### ***Временные системы удержания***

Для выполнения ремонтных работ и работ, связанных со снятием с эксплуатации установок, требуется создание надежных систем вентиляции и удержания радиоактивности на временной основе. Системы газоочистки в этом случае организуются согласно вышеизложенным принципам, часто с использованием мобильных газоочистных установок. Схема такой системы показана на рисунке 8.2, а пример мобильной установки газоочистки представлен на рисунке 8.3.



*Рис.8. 2. Диаграмма организации вентиляции при работах по снятию с эксплуатации.*

### ***Вентиляторы***

Для забора и выброса воздуха используются разнообразного типа вентиляторы. Выбор вентиляторов основывается на их способности преодолевать сопротивление фильтрующей системы в чистых и грязных условиях, а также в случае аварийных ситуаций.

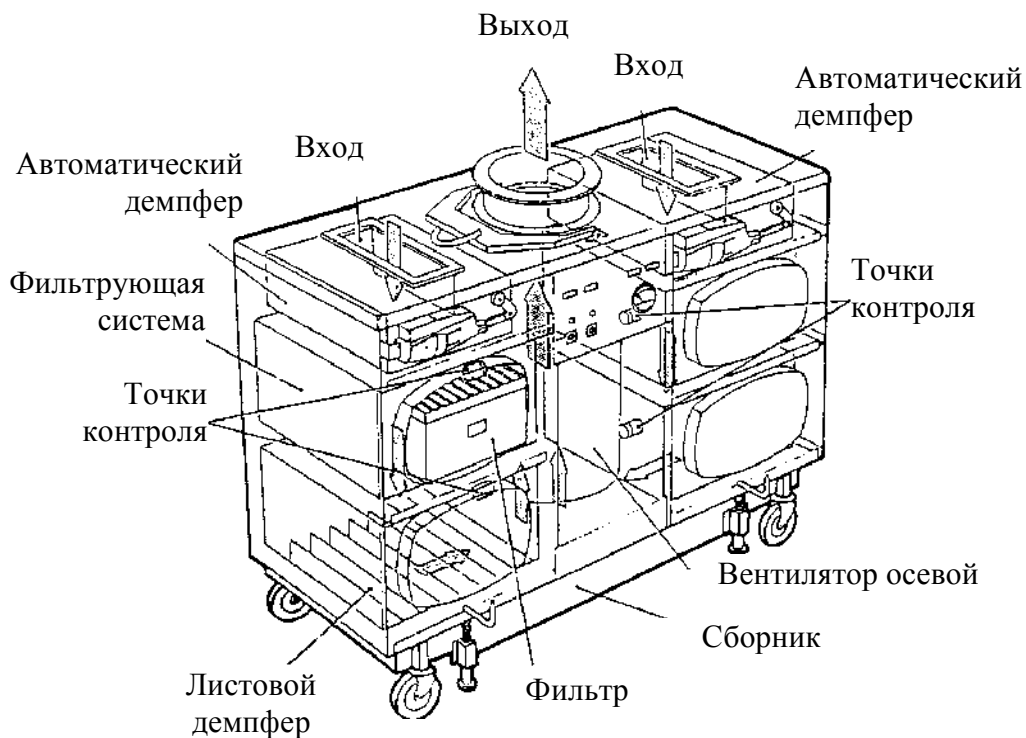


Рис. 8.3. Типичная мобильная установка газоочистки.

### **Демпферы**

Для контроля давления, объема и направления воздушного потока в вентиляционной системе применяются демпферы, которые встроены в линию и могут быть, например, в виде клапана.

### **Пылеулавливатели**

Пылеулавливатели в системах вытяжной вентиляции находятся в герметичном объеме под отрицательным давлением.

## **8.4 ЭЛЕМЕНТЫ СИСТЕМ ГАЗООЧИСТКИ**

Наиболее важными компонентами систем газоочистки являются аэрозольные фильтры и адсорберы. Размеры этих устройств и их конструкции различны, но принципы работы, фильтрационные и сорбционные материалы одни и те же.

### **8.4.1 Фильтры для аэрозолей**

Для улавливания твердых аэрозольных частиц применяют высокоэффективные тонковолокнистые фильтры из синтетических волокон или из стекловолокна, называемые НЕРА или “абсолютные фильтры”. Существует большое число модификаций абсолютных фильтров, удовлетворяющих самым разнообразным требованиям. Как правило, время службы фильтра определяется ростом его сопротивления по мере увеличения количества улавливаемых аэрозолей, а не уменьшением эффективности удержания частиц. Так как абсолютные фильтры имеют ограниченную ёмкость по пыли, перед ними часто устанавливаются предварительные

фильтры грубой очистки, улавливающие пыль. Для защиты абсолютных фильтров от попадания воды в случае, когда в потоке воздуха присутствуют капли воды, используются специальные улавливатели (рисунок 8.4). Для этой цели могут использоваться также стекловолокнистые самоочищающиеся фильтры тонкой очистки с коэффициентом до  $10^3$ .

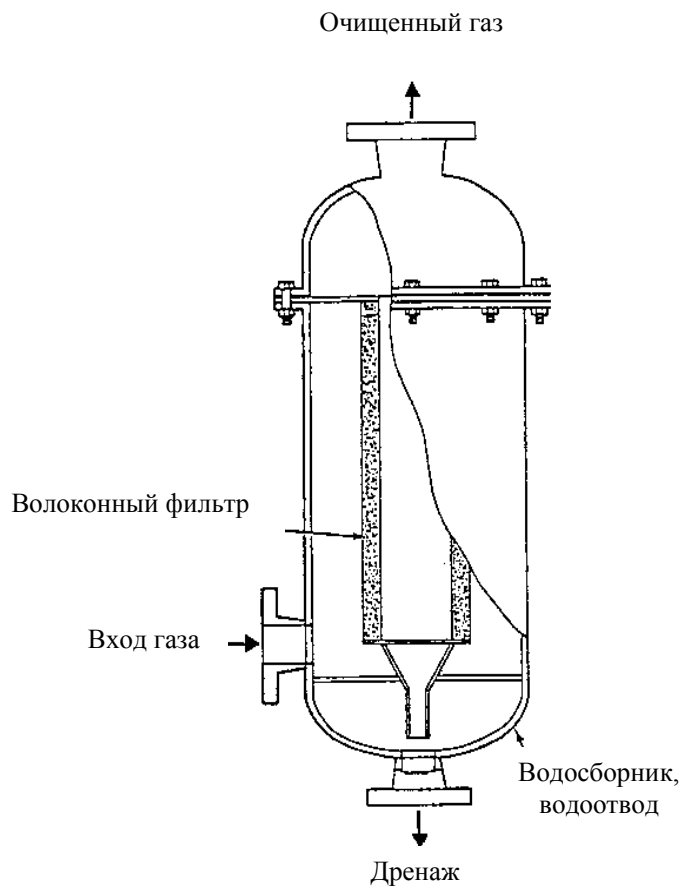


Рис. 8.4. Улавливатель влаги.

Фильтрация аэрозолей основана не только на механическом удержании сравнительно крупных частиц, но и на улавливание субмикронных частиц с помощью сил адгезии. Эффективность фильтрации является сложной функцией распределения частиц по размерам, скорости воздушного потока и других параметров. Типичное распределение аэрозольных частиц по размерам и улавливающие аппараты для различных размеров показаны на рисунке 8.5.

Типичный прямоугольный фильтр для аэрозолей показан на рисунке 8.6. Чтобы обеспечить обработку больших потоков воздуха такие фильтры обычно устанавливаются по несколько штук параллельно.

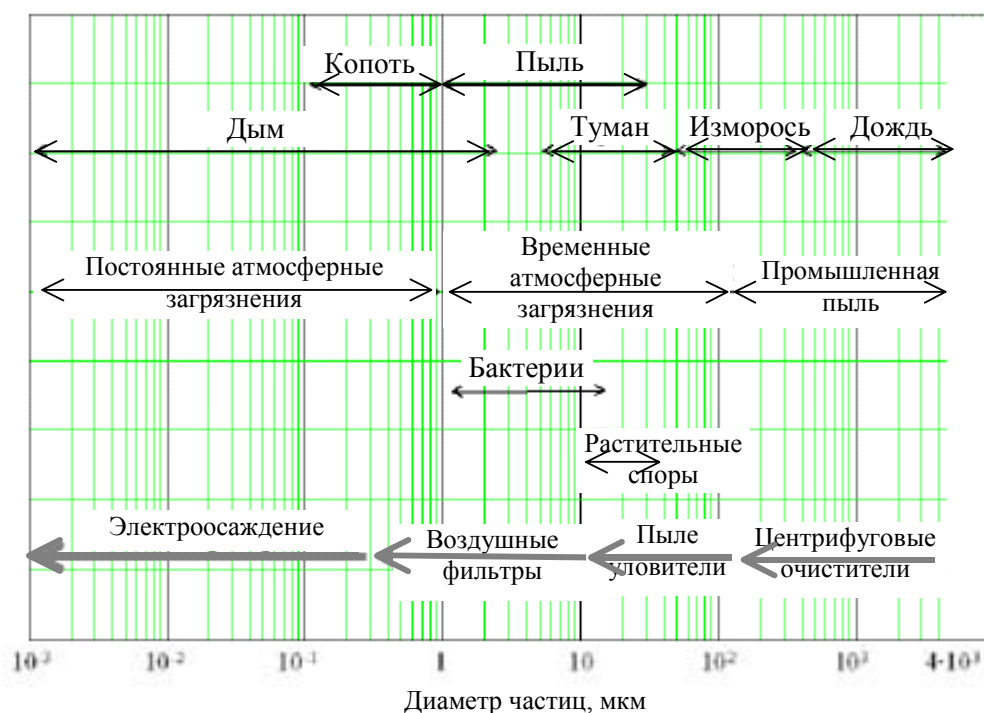


Рис. 8.5. Размеры аэрозольных частиц и оптимальные аппараты для их фильтрации.

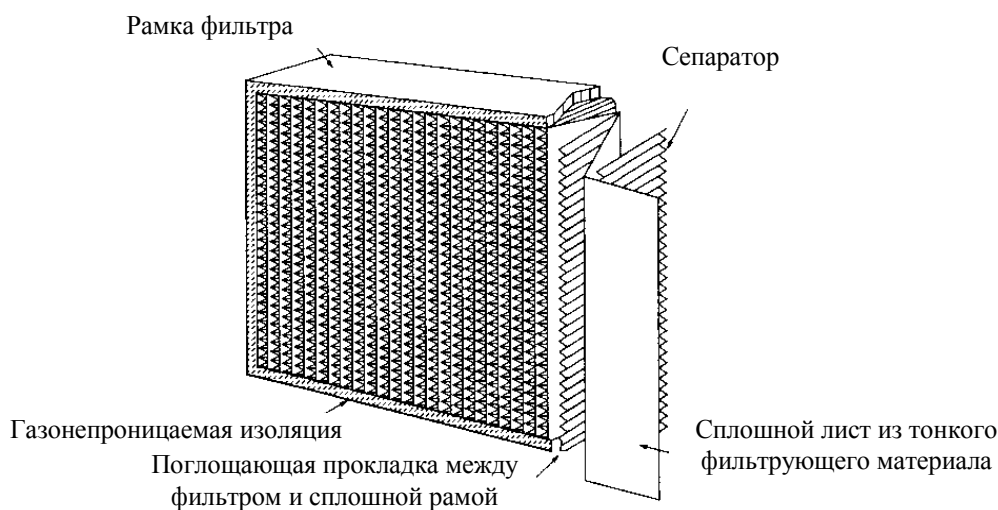


Рис.8.6. Абсолютный (HEPA) фильтр для аэрозолей.

#### 8.4.2 Фильтры для газов

Для очистки газообразных радиоактивных отходов, содержащих короткоживущие радионуклиды таких как криптон, ксенон или радон, применяются хроматографические системы, основанные на задержке радионуклидов в угольном адсорбере в течение времени, достаточного для их распада. Коэффициент адсорбции криптона и ксенона на увлажненном угле существенно ниже, чем на сухом, поэтому в газоочистную систему включают узел сушки. Поведение угольных адсорберов имеет динамический характер и эффективность очистки падает со временем из-за продолжающегося осаждения нерадиоактивных компонентов воздуха (влаги,

органических и неорганических паров и газов). Старение и отравление активированного угля могут также являться причинами деградации фильтров. Поэтому очень важно производить периодическое испытание фильтров.

Для очистки отходящих газов от радиоактивного йода применяют адсорбцию на активированном угле, а также изотопный обмен и химические реакции на импрегнированных углях. Используют йодиды металлов, такие как KI, PbI<sub>2</sub> или Cu I<sub>2</sub>, а также соединения, вступающие в химическую реакцию с иодом и метилдиодидом, такие как AgNO<sub>3</sub> или триэтилендиамин.

## 8.5 ИСПЫТАНИЯ И КОНТРОЛЬ СИСТЕМ ВЕНТИЛЯЦИИ И ГАЗООЧИСТКИ

Контроль вентиляционных систем установок по обращению с радиоактивными отходами такой же, как у обычных вентиляционных систем и включает контроль таких параметров, как перепад давления, скорость воздушных потоков, температура, влажность, концентрация загрязняющих веществ. Поскольку загрязнение воздуха после очистной системы мало, эффективность отдельных компонентов газоочистной системы проверяется с использованием известных процедур. Испытания абсолютных фильтров основано на генерации испытательных аэрозолей, смешивании их с потоком воздуха и определения фактической эффективности измерением концентраций аэрозолей на входе и выходе. Стандартные процедуры испытаний описаны в [8.3, 8.4]. Угольные адсорбенты испытываются путем импульсной подачи порции метилдиодида с радиоактивными метками. В большинстве случаев испытания на месте не обязательны, так как представительные образцы активированного угля могут быть взяты или из действующих фильтров или специальные байпасные фильтры могут быть установлены параллельно и содержащие точно такой уголь, что и в основных фильтрах. Эти образцы систематически извлекаются и испытываются в лабораторных условиях [8.3].

## ЛИТЕРАТУРА

- [8.1] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Design and Operation of Off-gas Cleaning and Ventilation Systems in Facilities Handling Low and Intermediate Level Radioactive Material, Technical Reports Series No. 292, IAEA, Vienna (1988).
- [8.2] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Off-gas and Air Cleaning Systems for Accident Conditions in Nuclear Power Plants, Technical Reports Series No. 358, IAEA, Vienna (1993).
- [8.3] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Testing and Monitoring of Off-gas Cleanup Systems at Nuclear Facilities, Technical Reports Series No. 243, IAEA, Vienna (1984).
- [8.4] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Comparison of High Efficiency Particulate Filter Testing Methods, IAEA-TECDOC-355, Vienna (1985).
- [8.5] B.H. Hamling. Sources and control of radioactive materials in gaseous effluents from nuclear reactors and processing plants. In: Progress in nuclear energy. V.3. Technology, engineering and safety. Ed. C.M. Nicholls. Pergamon Press, Oxford, Pp.348-368 (1960).
- [8.6] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Treatment of Off-gas from Radioactive Waste Incinerators, Technical Reports Series No. 302, IAEA, Vienna (1989).
- [8.7] Ю.В. Чечеткин, А.Ф. Грачев. Обращение с радиоактивными отходами. Самарский дом печати, 247с., Самара (2000).

## 9 ТЕРМИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ ОБРАБОТКИ РАДИОАКТИВНЫХ ОТХОДОВ

### 9.1 ВВЕДЕНИЕ

Обработка радиоактивных отходов заключается в операциях, направленных на перевод их в стабильную инертную форму, приемлемую для долговременной изоляции от потенциального влияния на человека и окружающую среду. Обработка отходов приводит к изменению их характеристик, и может включать:

- сокращение объема.
- извлечение радионуклидов.
- изменение состояния.

Примерами обработки являются сжигание и прессование твердых отходов, переплавка металлических отходов, извлечение радионуклидов из жидких радиоактивных отходов и т.д. После обработки отходы могут быть дополнительно иммобилизованы в матричные материалы для создания необходимой стабильной формы, пригодной для хранения, транспортирования и захоронения.

Наиболее эффективным методом сокращения объемов горючих ТРО и ЖРО низкого и среднего уровней активности являются сжигание. Коэффициент сокращения объема при сжигании составляет от 50 до 100 для горючих ТРО, и от 500 до 1000 для горючих ЖРО. Такое большое сокращение объемов отходов позволяет экономить объемы дорогостоящих хранилищ. Кроме того, термическая переработка переводит отходы в негорючее состояние, что повышает уровень их безопасного хранения и захоронения.

### 9.2 МЕТОДЫ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ

Основой процесса термической обработки является воздействие на отходы высоких температур, приводящих к термолизу и окислению их составляющих. В результате образуется твердый продукт, в котором сконцентрирована подавляющая часть радиоактивных загрязнителей, и большое количество отходящих газов, подлежащих газоочистке перед сбросом в атмосферу (рисунок 9.1).

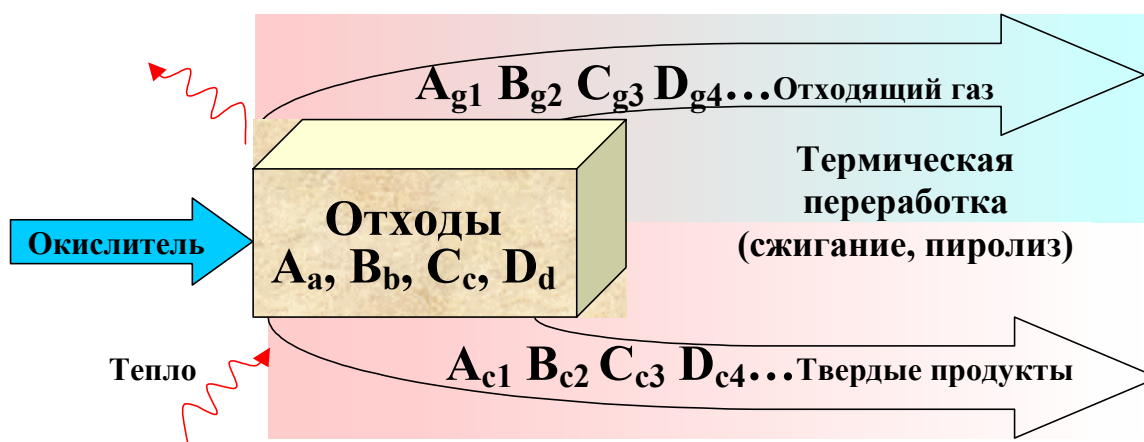


Рис. 9.1. Схема термической обработки отходов.



Термическая обработка, как правило, включает целый ряд окислительных, пиролитических и термохимических процессов, являющихся исключительно эффективными для уменьшения объема твердых горючих отходов. Эти процессы обеспечивают высокие коэффициенты уменьшения объема (100:1) и массы (10:1) путем химического разрушения органической составляющей отходов, которая является в них преобладающей. Продукты термической обработки более совместимы с окружающей средой в случае захоронения. С помощью термических методов может обрабатываться широкий спектр отходов, включая сухие и влажные ТРО, жидкие органические отходы, а также небольшие количества водных отходов.

Наиболее развитый и часто используемый процесс термической обработки радиоактивных отходов – сжигание. Сжигание включает процессы окисления горючих компонентов. В других процессах используется плавление, термическая декомпозиция, окисление и термохимическое разрушение органических компонентов отходов. Примерами таких процессов могут быть:

- Окисление во влажном воздухе;
- Сжигание в расплавленной соли;
- Сжигание в расплавленном стекле;
- Сжигание в плазменном разряде;
- Циклонное сжигание;
- Пиролитическое разложение;
- Плазменный пиролиз;
- Термохимическое разложение металлизированными топливами;
- Плавление металлических отходов.

Термические технологии, альтернативные обычному сжиганию, обладают значительно меньшей эмиссией вредных газо-аэрозольных выбросов, следовательно, экологически более безопасны и поэтому предпочтительны для населения и общественности.

### 9.3 СЖИГАНИЕ

Сжигание включает процессы окисления горючих компонентов отходов и приводит к образованию большого количества отходящих газов, и небольшого количества твердого остатка, называемого зольным остатком. Кроме того, сжигание приводит к образованию небольшого количества вторичных отходов в виде сажи и жидкого конденсата. Коэффициент сокращения объема при сжигании вычисляют путем деления начального объема отходов на объем полученного зольного остатка. Целью процесса сжигания отходов является достижение минимального количества остаточных горючих компонентов в зольном остатке, минимального уноса золы и сажи с газовой фазой и максимального удержания радионуклидов в зольном остатке.

Выбор технологии сжигания и конструкций отдельных ее узлов должен основываться на следующих критериях [9.1]:

- проведение более полного процесса окисления органической части отходов,
- поддержание оптимальной температуры горения, обеспечивающей надежное и устойчивое проведение процесса,
- максимальная механизация и автоматизация технологического процесса,

- очистка отходящих газов до безопасных допустимых концентраций радионуклидов и химических соединений,
- минимизация типов и количества вторичных отходов,
- безопасность обслуживания установки,
- коррозионная и химическая стойкость материалов аппаратов.

Процесс термической обработки отходов характеризуется коэффициентом избытка кислорода или воздуха  $\alpha$ , поскольку, как правило, кислород в зону горения отходов доставляется воздухом:

$$\alpha = M_{\text{возд.}} / M_{\text{стех. возд.}},$$

где  $M_{\text{возд.}}$  – масса поставляемого воздуха в зону горения,  $M_{\text{стех. возд.}}$  – расчетная стехиометрическая масса воздуха для полного окисления горючих компонентов отходов. Сжигание отходов осуществляется в режиме  $\alpha > 1$ , а пиролиз при  $\alpha < 1$ .

#### 9.4 УСТАНОВКИ СЖИГАНИЯ

Установки сжигания радиоактивных отходов делятся на три категории: с избытком воздуха, работающие при коэффициенте избытка воздуха  $\alpha > 1$ , с контролируемой подачей воздуха, работающие при  $\alpha = 1$ , и с дефицитом воздуха, работающие при  $\alpha < 1$ . Эффективность процесса сжигания отходов  $E_c$  (%) определяется путем измерения концентрации окислов углерода  $[CO_2]$  и  $[CO]$  в отходящих газах на выходе из печи:

$$E_c = \frac{[CO_2] - [CO]}{[CO_2]} \cdot 100\%.$$

Идеальный процесс сжигания достигается при отсутствии монооксида углерода СО в отходящих газах  $E_c = 100\%$ . Принципиальная схема технологии сжигания горючих РАО представлена на рисунке 9.2.

Сжигание радиоактивных отходов успешно используется много десятилетий. Особо популярное в 70-80-х годах оно получило развитие в современных установках плазменного типа и в комбинированных установках плавления-иммобилизации.

Характерные ограничения по удельной активности при сжигании ТРО составляют до  $3,7 \cdot 10^5$  Бк/кг по  $\alpha$ -нуклидам и до  $3,7 \cdot 10^6$  Бк/кг по  $\beta$ -излучающим нуклидам. При более высоком содержании радионуклидов системы газоочистки усложняются, и сжигание становится часто экономически неоправданным.

В настоящее время существует множество конструкций печей для сжигания твердых бытовых, промышленных и радиоактивных отходов. Наибольшее распространение получили камерные колосниковые печи, в которых отходы загружаются на колосниковые решетки, где и происходит их сжигание. Примером такой печи является двухкамерная печь сжигания радиоактивных отходов ГУП МосНПО «Радон» (рис. 9.3).

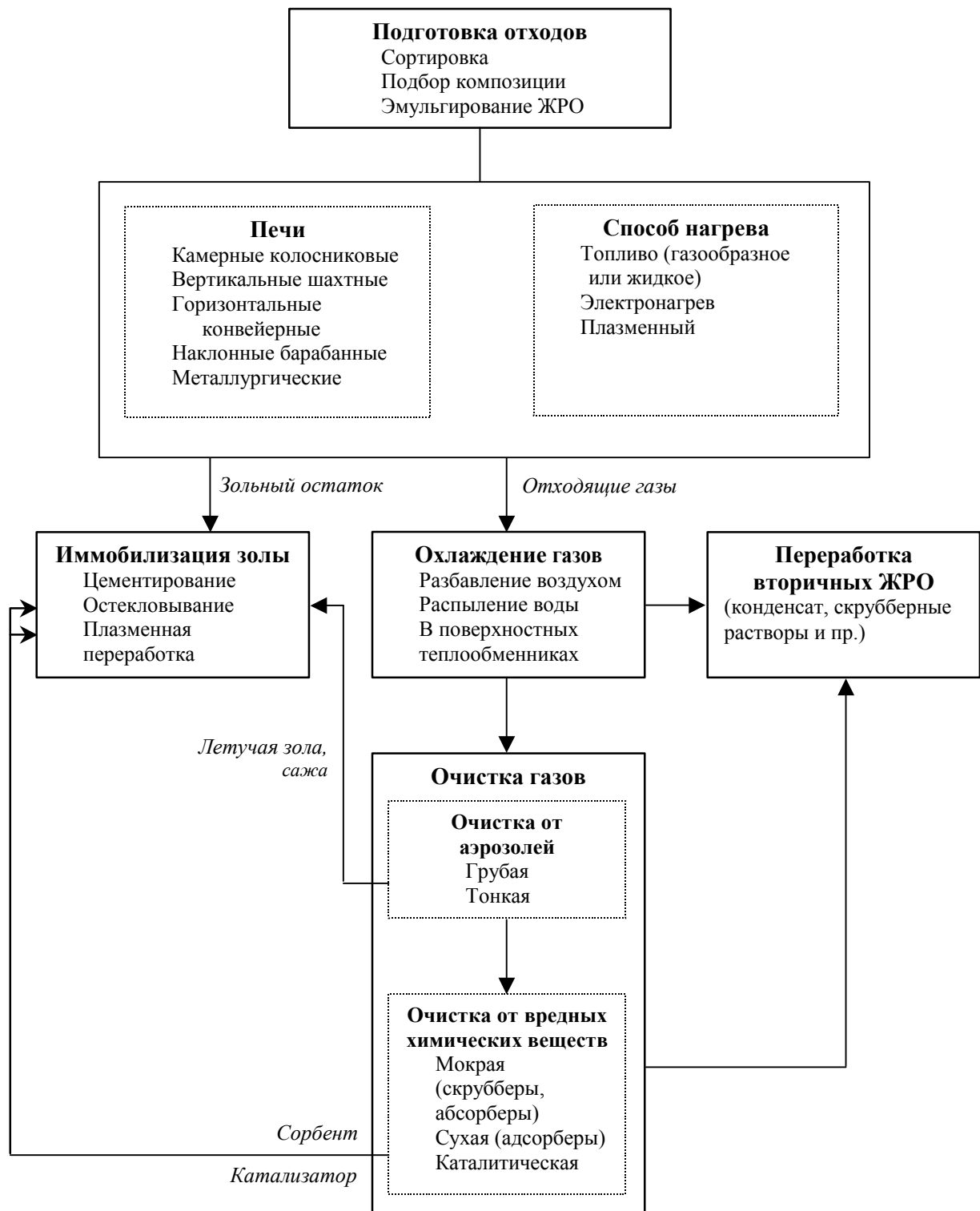


Рис. 9.2. Принципиальная схема технологии сжигания горючих РАО.

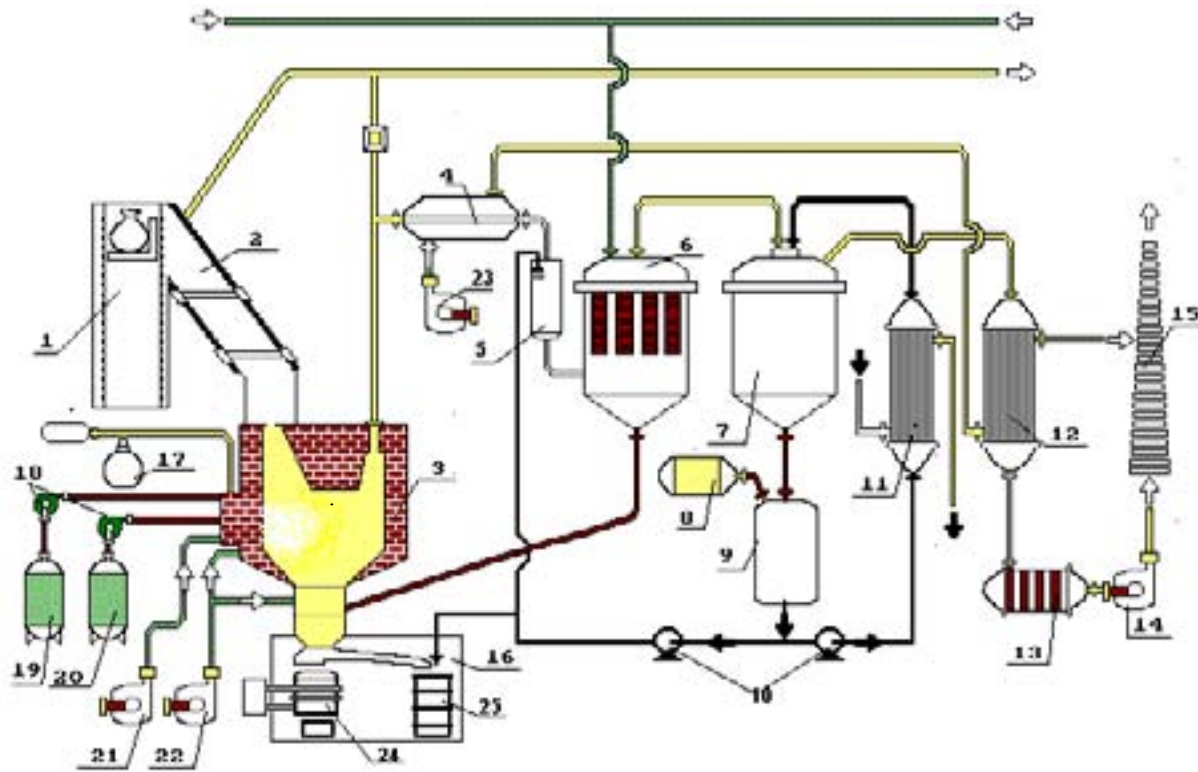


Рис. 9.3. Колосниковая установка сжигания горючих ТРО и ЖРО (1 – лифт; 2 – узел загрузки ТРО; 3 – печь; 4, 11, 12 – теплообменники; 5 – испарительный теплообменник; 14, 21–23 – вентиляторы; 6 – фильтр грубой очистки МТФ; 7 – скруббер; 8 – емкость раскислителя; 9 – емкость оборотная; 10, 18 – насосы; 13 – фильтр тонкой очистки; 15 – вентиляционная труба; 16 – узел золоудаления; 17 – система зажигания факела; 19 – топливная емкость; 20 – емкость ЖРО; 24 – узел остекловывания зольного остатка; 25 – узел цементирования зольного остатка).

Габариты установки составляют в метрах 12х12х10 при производительности сжигания 60кг в час по ТРО и 20л в час по ЖРО. Обогрев камеры сжигания производится сжиганием жидкого углеводородного топлива. Температура в камере сжигания составляет  $900 \pm 50^{\circ}\text{C}$ , а удельный расход жидкого топлива до 0.25 кг на 1кг отходов. Установленная мощность вспомогательного электрического оборудования 60 кВт. Установка содержит ряд систем, обеспечивающих ее безопасную работу, таких как транспортирование и загрузки, систему газоочистки, выгрузки и иммобилизации зольного остатка, системы топливоснабжения и подготовки ЖРО, вытяжной и приточной вентиляции, водяного и воздушного охлаждения, электроснабжения, пробоотбора, радиационного и дозиметрического контроля, причем наибольшая по своему объему является система газоочистки. Отходящие газы после системы газоочистки характеризуются содержанием пыли ниже  $10 \text{ мг/м}^3$  и удельным содержанием радионуклидов ниже установленных безопасных пределов (по альфа-излучающим нуклидам  $<1 \text{ Бк/м}^3$ , а по бета-излучающим нуклидам  $<10 \text{ Бк/м}^3$ ). Содержание химических загрязнителей также низкое, например, удельное содержание оксида углерода и хлористого водорода ниже  $10 \text{ мг/м}^3$ , а сернистого ангидрида ниже  $50 \text{ мг/м}^3$ . Сжигание отходов достаточно эффективное: так содержание органики в зольном остатке  $\leq 4 \%$  масс. Характерное распределение радионуклидов в продуктах сжигания в % следующее: зольный остаток 90–95, сажа 1–5, конденсат 0,1–2, отходящие газы  $<0,1$ .

Установка работает непрерывно в недельном цикле, после чего иммобилизация зольного остатка производится одним из следующих методов:

- Цементирование с использованием конденсата газоочистной системы в стандартных 200-л бочках,
- Иммобилизация на установке остекловывания в индукционном плавителе с использованием флюсующих добавок в стальные 20-л контейнеры.
- Остекловывание непосредственно в стальных 20-л контейнерах с использованием порошкообразного металлизированного топлива

Опыт эксплуатации установок сжигания выявил необходимость *предварительной сортировки* и тщательного входного *контроля* поступающих на переработку отходов, так как при наличии в отходах негорючей составляющей, например, строительного мусора, металла, возникают сложности с работой механических подвижных частей печи, таких как механизм поворота колосниковой решетки и шиберов выгрузки, и переработкой остатков после сжигания. Другое важное ограничение – наличие в отходах хлор-содержащих материалов, сжигание которых приводит к интенсивной коррозии конструкционных материалов и существенно осложняют проблему газоочистки.

Другой тип печей, допускающих частично несортированные отходы с содержанием до 20% негорючих материалов, – вертикальные шахтные печи, в которых слои отходов в процессе сжигания перемещаются из верхней в нижнюю часть шахты, где зольный остаток расплавляется плазматронами и выгружается в контейнер (рис. 9.4).

Преимуществом таких технологий являются менее жесткие требования по составу отходов и получение в печи жидкого шлака (без дополнительных стадий переработки), который при остывании превращается в химически стойкий и механически прочный продукт в виде стеклокомпозиционного материала.

Топливо-плазменный источник нагрева и дуговой плазматрон позволяют достичь температуры до 1550–1650°C в нижней части печи. В ходе переработки отходов в рабочем объеме печи поддерживается разрежение 20–40 мм вод. ст. Через шлюзовую камеру узла загрузки ТРО периодически попадают в верхние слои шахты, где в отсутствие свободного кислорода проходят стадии сушки и пиролиза, сопровождающиеся большим газовыделением. Опускаясь под действием силы тяжести, перерабатываемый материал нагревается теплом движущихся навстречу отходящих газов. Далее непрореагировавшая часть коксового остатка и тугоплавкие неорганические составляющие отходов поступают в зону горения, плавления и перегрева расплава. Перегретый расплав поступает в приемную ванну, в которой завершаются реакции силикатообразования, затем через узел слива – в бокс приемки расплава, где сливается в стальные контейнеры. После охлаждения расплава в приемных контейнерах застывший шлак отправляется на хранение и захоронение.

Отходящие газы из шахты печи (пиролизный газ) дожигаются в отдельной камере, а отходящие газы охлаждаются в испарительном теплообменнике до температуры 400°C, очищаются от аэрозолей на фильтре грубой очистки, охлаждаются до выделения конденсата, подогреваются перед поступлением на очистку от аэрозолей в абсолютном фильтре, после чего с помощью вентилятора выбрасываются в атмосферу.

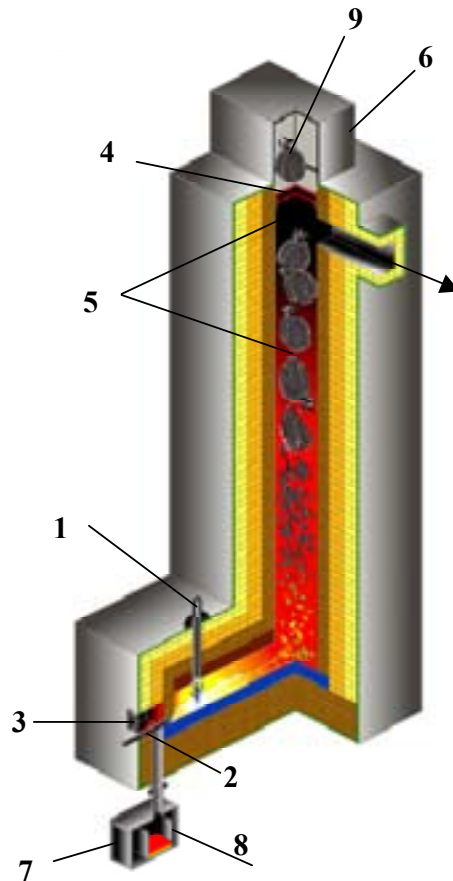


Рис. 9.4. Плазменная шахтная печь для сжигания ТРО (1 – плазматрон, 2 – слив, 3 – окно, 4 – шибер, 5 – шахта, 6 – загрузка, 7 – приемный бокс, 8 – контейнер, 9 – упаковки ТРО).

Отвержденный шлак является типичным стеклокомпозиционным материалом с содержанием как кристаллических включений, так и аморфного стекла. Его химическая устойчивость является весьма высокой, так нормализованная скорость выщелачивания цезия не превышает по порядку величины  $10^{-5}$  г/(см<sup>2</sup>·сут), а стронция и  $\alpha$ -излучателей – на 1–3 порядка меньше. Содержание радионуклидов в конечном стеклокомпозиционном материале составляет для  $\alpha$ -излучателей не менее 99,9%, а для  $\beta$ ,  $\gamma$ -излучателей – 85% относительно исходного содержания в отходах. Затраты энергии на переработку 1 кг отходов с содержанием негорючей составляющей 20% от общей массы в неохлаждаемой шахте составляют 1–1,5 кВт·ч.

Кроме описанных выше типов печей, сжигание отходов может быть проведено и в горизонтальных конвейерных печах или в наклонных вращающихся печах барабанного типа. В последнее время внедряются технологии переработки отходов в металлургических печах в расплаве металлов или их шлаков, изучается метод сжигания радиоактивных отходов в расплаве стекла. Способы нагрева печей также могут отличаться. Наиболее распространен метод нагревания печей путем сжигания газообразного или жидкого углеводородного топлива, однако могут использоваться также электрический джоулев или дуговой нагрев.

При выборе типа печи руководствуются тремя группами взаимозависимых параметров:

- конструктивными и эксплуатационными параметрами печи,
- тепло- и массообменными процессами,
- показателями работы печи.

К конструктивным параметрам относят геометрические размеры и форму рабочего пространства, систему отопления печи, взаимное расположение горелок и дымовых окон, вид огнеупорных и изоляционных материалов, тип и состав утилизационных устройств. Эксплуатационные параметры включают в себя расход и температуру подогрева топлива и воздуха, распределение их по зонам печи, давление газов и температурный режим в рабочем пространстве.

Вторая группа параметров характеризует тепло- и массообменные процессы, происходящие в печи: движение газов, сжигание топлива, давление газов и температурный режим в рабочем пространстве.

Изменения в конструкции и эксплуатации печи оказывают влияние на тепло- и массообменные процессы, которые в свою очередь влияют на показатели работы печи (производительность, удельный расход тепла, срок службы печи), составляющие третью группу параметров.

## 9.5 ТЕРМОХИМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА

Некоторые горючие ТРО, такие как отработанные ионообменные органические смолы, поливинилхлоридные (ПВХ) или биологические отходы требуют специальной технологии обработки. Для этих отходов был разработан термохимический метод, использующий порошкообразные металлизированные топлива (ПМТ). ПМТ были предложены для автономной термической переработки радиоактивных отходов, когда большие капитальные расходы на создание крупных стационарных установок недоступны [7]. Состав ПМТ таков, что он обеспечивает нагрев отходов, химическое разрушение (окисление) органических составляющих и улавливание вредных компонентов и радионуклидов с их инкорпорированием в стабильные матричные формы. Схема термохимического процесса обработки показана на рисунке 9.5.

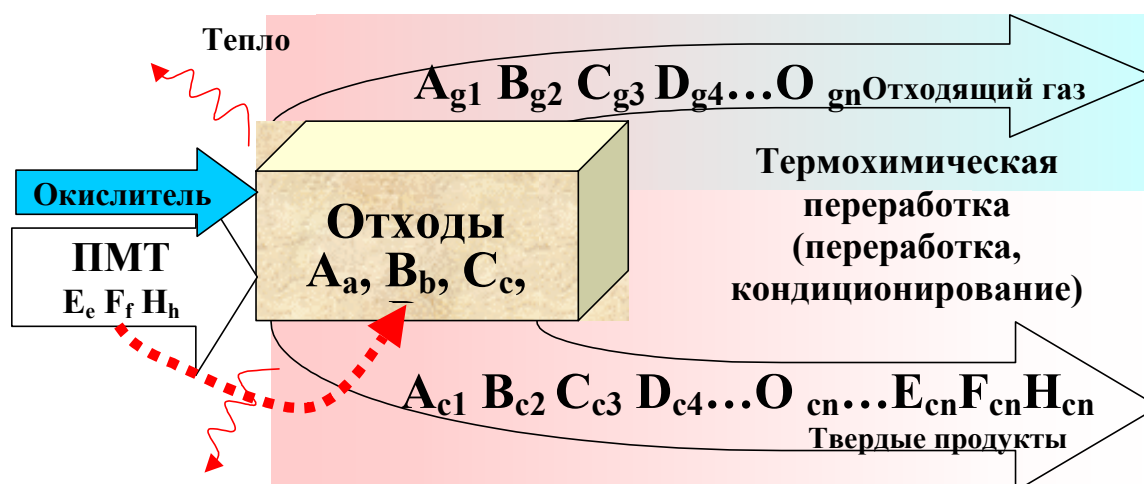
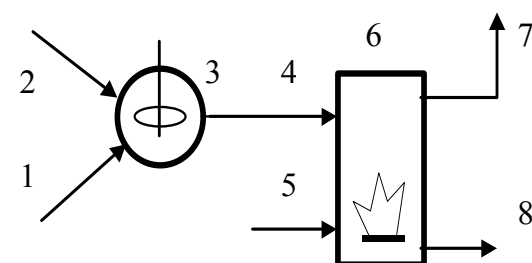


Рис. 9.5. Схема термохимического метода обработки, использующего активные ингредиенты  $F_f$  для связывания загрязнителей  $B_b$  в твердом продукте обработки.

Примером применения термохимического метода служит переработка этим методом ионообменных смол (рис. 9.6, А). Влажные ионообменные смолы перемешиваются с ПМТ и подаются в реактор, где происходит самоподдерживающаяся реакция сжигания и другие химические превращения. Вода, реагируя с металлом ПМТ, выделяет водород, что позволяет поддерживать высокую температуру процесса горения. Радионуклиды, включая летучие, улавливаются формирующимся шлаковым остатком, химически вредные компоненты разлагаются. Типичная температура процесса от 800 до 1000°C. Унос радионуклидов из зоны реакций (термохимического реактора) при этом не превышает 5% по цезию и значительно меньше для других радионуклидов. ПВХ и другие полимеры перерабатываются этим методом после предварительного измельчения, что повышает эффективность обработки. Рисунок 9.6 (Б) показывает вид модульной установки по термохимической переработке отработавших ионообменных смол производительностью 20 кг в час. Установка состоит из двух морских контейнеров, в одном из которых смонтирован термохимический реактор для обработки ионообменных смол, а в другом – система газоочистки отходящих газов.



А



Б

Рис. 9.6. Схема термохимического метода обработки отходов (А) и внешний вид модульной установки переработки ионообменных смол (Б) (1 – отходы, 2 – ПМТ, 3 – смешатель, 4 – загрузка смеси, 5 – окислитель, 6 – термохимический реактор, 7 – отходящие газы, 8 – шлаковый остаток).

Термохимический метод обработки с использованием ПМТ применяют также и для сжигания биологических отходов. Расход ПМТ при этом равен 0,12 – 0,20 кг на кг отходов.

## 9.6 ПЛАВЛЕНИЕ

Термический метод плавления применяется для обработки металлических отходов и имеет то преимущество, что, значительно сокращая объем отходов, может также очищать металл от многих радиоактивных загрязнителей. При расплавлении металла радиоактивные загрязнители (за исключением радионуклидов, растворяющихся в расплавленном металле) переходят в образующиеся шлаки (см. рисунок 9.7). Так, переплавка свинца практически всегда приводит к очищению металла от радиоактивных загрязнителей.





Рис. 9.7. ПМТ-переплавленные металлические ТРО (нижний слой – нержавеющая сталь, верхний – шлаки содержащие радиоактивные загрязнители).

Во многих случаях возможно рециклирование и других металлов, включая нержавеющую сталь. Рисунок 9.8 показывает схему установки переплавки металлов в Институте атомных исследований в Японии.

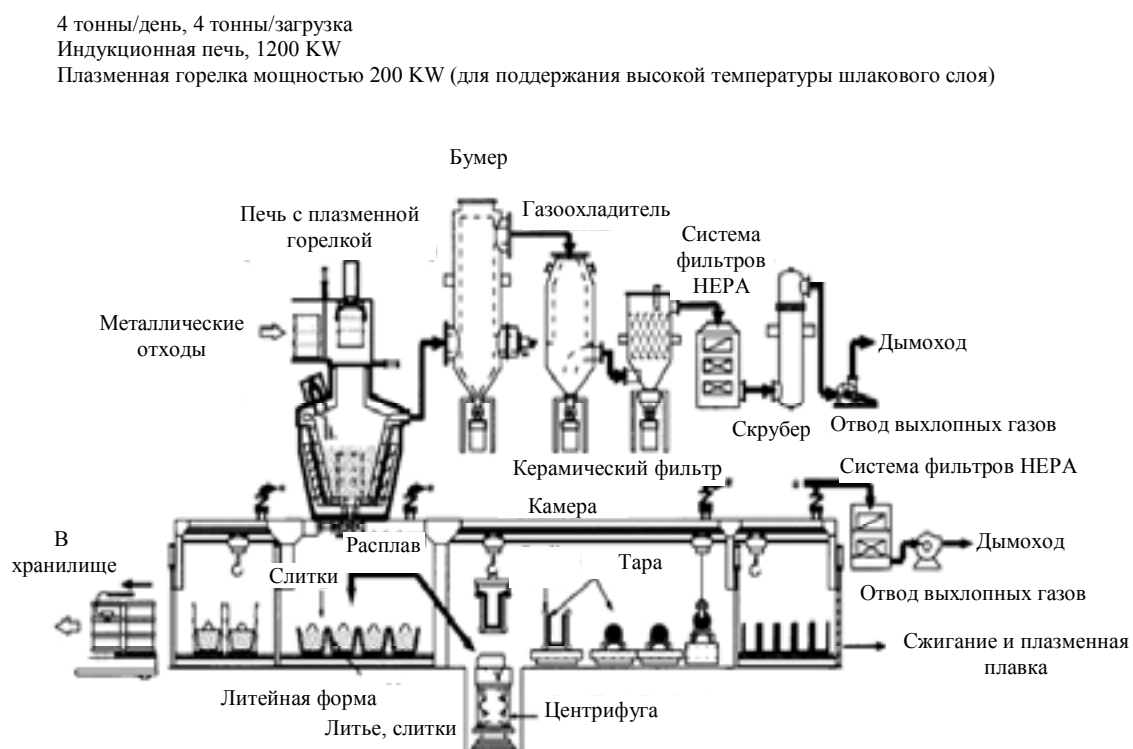


Рис. 9.8. Схема плавления металлических отходов в JAERI в Японии.

## 9.7 КОНТРОЛЬ ХИМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

В настоящее время особое внимание уделяется снижению общей *токсичности* выбросов и сбросов при переработке различных типов отходов. Горение перерабатываемых материалов сопровождается образованием как относительно инертных и неопасных для окружающей среды продуктов (углекислый газ и вода), так и вредных веществ, таких как тяжелые металлы (Hg, Pb, Cd, Zn, Cu), CO, HCl, HF, NO<sub>x</sub>, SO<sub>x</sub>, представляющих опасность не только для окружающей среды, но и для конструкционных материалов установок сжигания. Органические материалы в отходящих газах представлены, в основном, не полностью сгоревшими компонентами

отходов и топлива. Кроме того, в отходящих газах установок сжигания отходов могут присутствовать высокотоксичные соединения, такие как 2,3,7,8-дibenзо-п-диоксин (ТХДД). Его токсичность выше, чем у нервно-паралитических газов, таких как зарин, зоман, табун или VX, поэтому его содержание в окружающей среде жестко нормируется. Диоксины обладают кумулятивным эффектом и подобно радионуклидам вызывают отдаленные мутагенные и канцерогенные последствия при хроническом поступлении даже в крайне малых дозах. Предельно допустимая концентрация диоксина в атмосферном воздухе равна  $2,12 \text{ пг/м}^3$  (для сравнения: для  $^{137}\text{Cs}$  –  $5,6 \text{ пг/м}^3$ , для  $^{239}\text{Pu}$  –  $0,48 \text{ пг/м}^3$ ). Несколько меньшей, но также высокой токсичностью и канцерогенностью обладают полициклические ароматические углеводороды (ПАУ), такие как бензапирен (БП). Существует еще ряд токсичных органических соединений, образующихся при сжигании отходов: полихлорированные бифенилы (ПХБ), хлорбензолы (ХБ), хлорфенолы (ХФ), альдегиды, нитросоединения.

Для предотвращения загрязнения атмосферы радиоактивными и вредными химическими веществами все установки сжигания РАО оборудуются системами газоочистки. Ряд установок оборудован камерами дожигания органических веществ и оксида углерода. Для предотвращения выброса в атмосферу высокотоксичных химических загрязнителей установки сжигания оборудуются дополнительными очистными устройствами.

Высокотоксичные соединения образуются чаще всего в процессе термообработки определенного класса органических отходов, например, хлор-содержащих, таких как ПВХ, и при определенных условиях, таких как температурный интервал и доступ окислителя. Для уменьшения содержания диоксинов в газовых выбросах используют дополнительную каталитическую очистку. На рисунке 9.9 приведены результаты обследования содержания диоксинов в отходящих газах на 1–4 ступенях системы газоочистки установки “Факел”, а также после каталитической очистки газов (5-я точка).

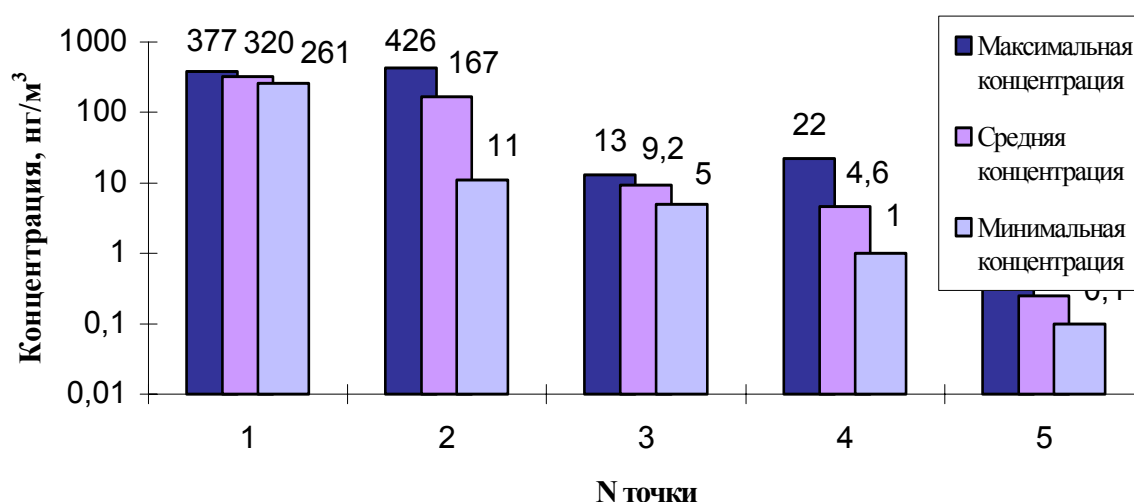


Рис. 9.9. Распределение диоксинов по ступеням  $N$  в системе газоочистки установки “Факел” ГУП МосНПО “Радон”.

Дополнительные системы улавливания химических загрязнителей усложняют и могут значительно удорожать термическую обработку отходов, делая ее в ряде случаев экономически нецелесообразной. В таких случаях новые технологические методы, такие как термохимическая обработка или пиролиз, могут оказаться наиболее эффективными.

### ЛИТЕРАТУРА

- [9.1] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Treatment of Off-gas from Radioactive Waste Incinerators, Technical Reports Series No. 302, IAEA, Vienna (1989).
- [9.2] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Handling and Processing of Radioactive Waste from Nuclear Applications, Technical Reports Series No. 402, IAEA, Vienna (2001).
- [9.3] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Management of Radioactive Waste from the Use of Radionuclides in Medicine, IAEA-TECDOC-1183, Vienna (2000).
- [9.4] R. Berlin, C.C. Stanton. Radioactive waste management, John Willey and Sons, New York (1990).
- [9.5] Соболев И.А., Хомчик Л.М. Обезвреживание радиоактивных отходов на централизованных пунктах. - М.: Энергоатомиздат, (1983), стр. 128.
- [9.6] Дмитриев С.А. ред. Обращение с радиоактивными отходами от неядерных применений. (лекции курсов - семинара по подготовке и повышению квалификации специалистов, работающих в области обращения с радиоактивными отходами). МГУ им. М.В. Ломоносова и МосНПО "Радон", Москва - Сергиев Посад, (2000).
- [9.7] M.I. Ojovan, W.E. Lee, I.A. Sobolev, S.A. Dmitriev, O.K. Karlina, V.L. Klimov, G.A. Petrov, C.N. Semenov. Thermochemical processing using powder metal fuels of radioactive and hazardous waste. J. Process Mechanical Engineering, 218, 1-9 (2004).
- [9.8] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Treatment of Low and Intermediate Level Solid Radioactive Wastes, Technical Reports Series No. 223, IAEA, Vienna (1983).

## 10 ИММОБИЛИЗАЦИЯ РАДИОАКТИВНЫХ ОТХОДОВ В ЦЕМЕНТ

### 10.1 ВВЕДЕНИЕ

Включение в цемент является одним из самых распространенных методов отверждения и кондиционирования радиоактивных отходов низкого и среднего уровня активности\*. Во многом благодаря доступности и дешевизне технологического оборудования и матричных материалов, негорючести конечного продукта, отсутствию у него пластичности, относительной простоте технологических процессов цементирования получило широкое применение при иммобилизации радиоактивных отходов. Способность цемента связывать воду особенно важна при кондиционировании жидких радиоактивных отходов (ЖРО).

В случае отверждения радиоактивных отходов процесс взаимодействия цемента с водой может значительно осложняться теми химическими процессами, в которых, кроме воды, могут принимать участие химические компоненты радиоактивных отходов. Это неизбежно отражается и на технологии процесса цементирования и на качестве конечного (отвержденного) продукта. Поэтому для правильного планирования и реализации отверждения конкретных радиоактивных отходов процесса необходимо понимание химической природы цементирования.

Еще древние греки и римляне знали, что определенные виды вулканических выбросов (лава, пепел), если их измельчить, смешать с песком, добавить известь и воду, дают твердый и прочный продукт, устойчивый к воздействию воды и атмосферы. Этот продукт они широко применяли при строительстве домов, мостов, дорог и т.д. Греки для этой цели использовали туф с острова Тера (современное название Санторин), римские строители – красный или розовый туф, найденный недалеко от Неаполя. Наилучшими качествами обладал материал, обнаруженный позднее недалеко от города Поззоли и названный “поззоланом”. Римляне же называли этот материал “цементом”.

Появление “портланд-цемента” связывают с именем Иосифа Аспдина, строителя из Англии, который 21 октября 1824 года впервые запатентовал его в качестве строительного материала. Свое название цемент получил за сходство по цвету с портландским известняком (Портланд – город на юге Англии, рис. 10.1).



Рис. 10.1. Великобритания.

---

\* Существуют нетрадиционные способы кондиционирования с использованием цемента и высокоактивных отходов.

В современной строительной индустрии широко используются цементы различных марок и качества, что регламентируется различными национальными и международными стандартами (например: the American Society of Testing and Materials; ASTM Standard C150, который определяет спецификацию восьми различных цементов) [10.1–10.4]. При выборе цементов для иммобилизации радиоактивных отходов необходимо учитывать те процессы, которые могут происходить при взаимодействии цемента с отходами, и влияние этих процессов на качество конечного продукта.

## 10.2 ПРОИЗВОДСТВО ЦЕМЕНТА

Портланд-цемент получают путем спекания при температуре 1300-1500°C компонентов, содержащих карбонаты кальция, силикаты и окислы алюминия, железа, кремния, с последующим измельчением полученного клинкера. Схематично процесс изготовления цемента представлен на рисунках 10.2 и 10.3.

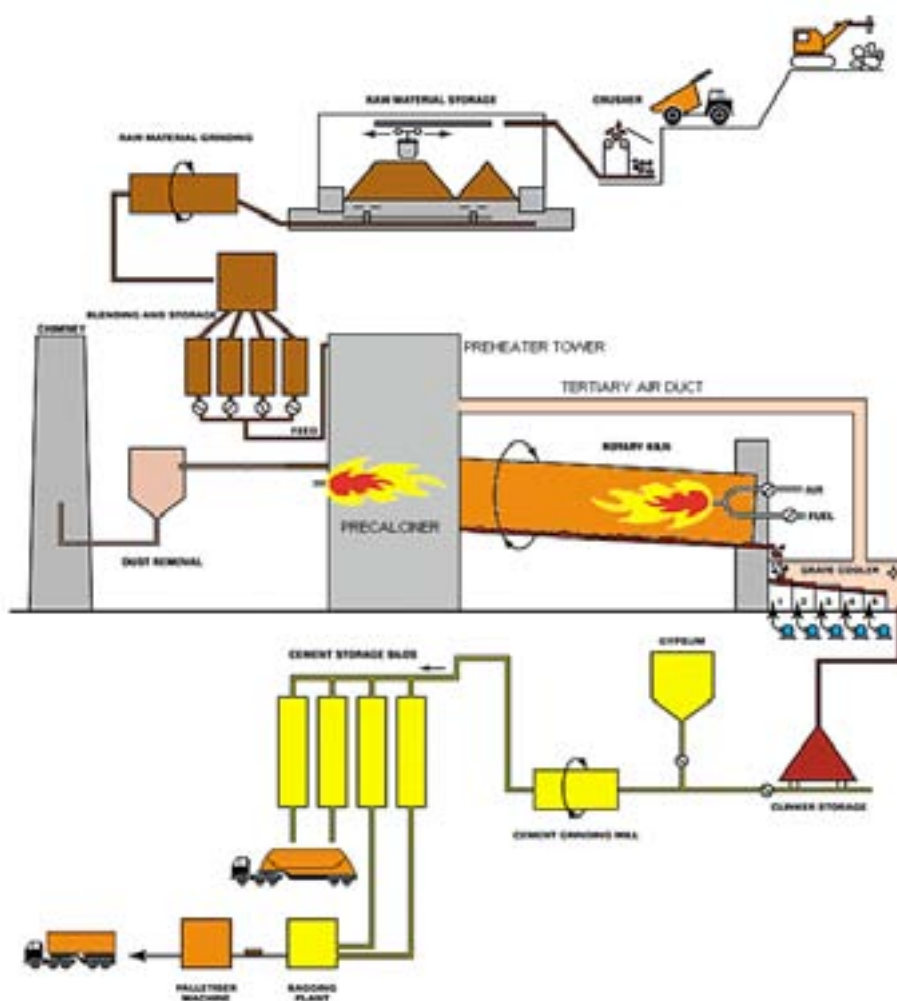


Рис. 10.2. Схема производства цемента.

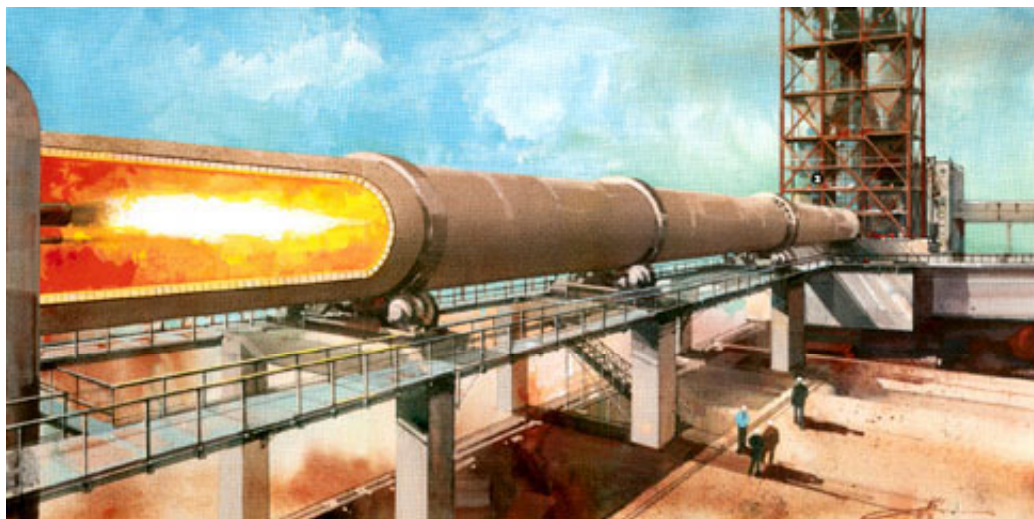


Рис.10.3. Печь обжига компонентов цемента.

В процессе термической обработки происходит разложение карбонатов и дегидратация (удаление воды), в результате чего получается смесь дегидратированных окислов кальция, кремния, алюминия и некоторых солей, в основном сульфатов (клинкер). Состав обычного портланд-цемента представлен на диаграмме (рис. 10.4) и в таблице 10.1.

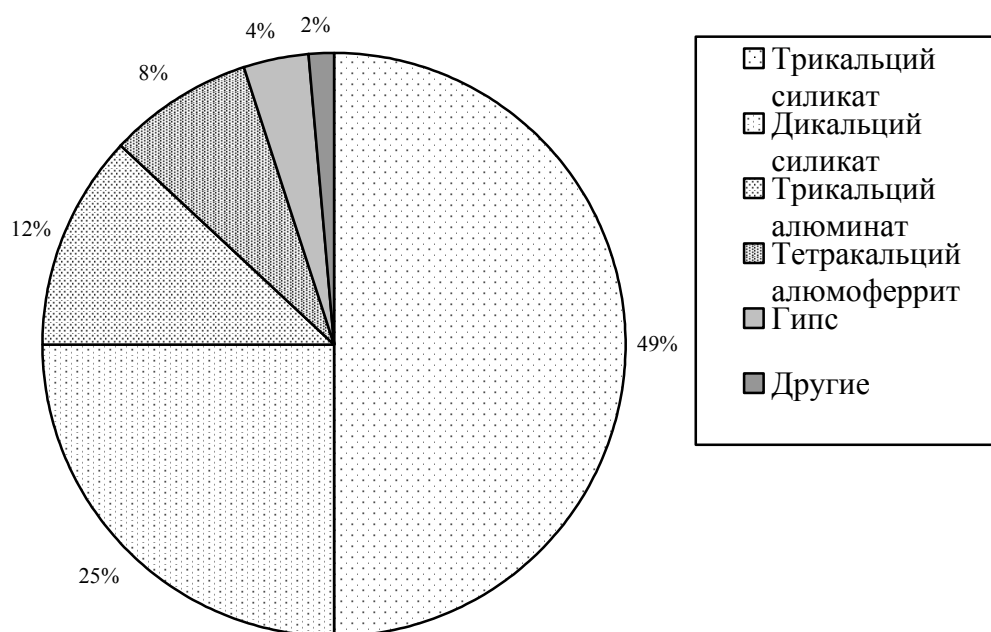


Рис. 10.4. Состав цементного клинкера.

ТАБЛИЦА 10.1. ХИМИЧЕСКИЙ СОСТАВ ЦЕМЕНТНОГО КЛИНКЕРА

Компонент	Название минерала	Химический состав	Обозначение	Массовое содержание, %
Трикальций силикат	Алит	$3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$	$\text{C}_3\text{S}$	36–60
Дикальций силикат	Фелит	$2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$	$\text{C}_2\text{S}$	15–38
Трикальций алюминат	Белит	$3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$	$\text{C}_3\text{A}$	7–15
Тетракальций алюмоферрит	Целит	$4\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$	$\text{C}_4\text{AF}$	8–18
Пентакальций триалюминат		$5\text{CaO}\cdot 3\text{Al}_2\text{O}_3$	$\text{C}_5\text{A}_3$	1–2
Кальций сульфатогидрат	Гипс	$\text{CaSO}_4\cdot 2\text{H}_2\text{O}$	$\text{CSH}_2$	2–5

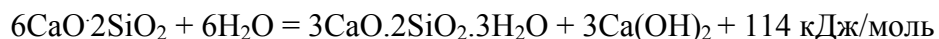
### 10.3 ХИМИЯ ПРОЦЕССА ЦЕМЕНТИРОВАНИЯ

Химия процесса цементирования довольно хорошо изучена и описана во многих источниках, например [10.5–10.11]. Процесс отверждения цемента связан с реакцией гидратации всех его компонентов при взаимодействии с водой с образованием монолитного продукта. Наличие и участие в нем посторонних компонентов (в частности радиоактивных отходов) может существенно влиять на процессы гидратации и, как следствие, на качество получаемого отвержденного продукта.

#### 10.3.1 Реакции гидратации

Основные свойства цемента определяет трикальцийсиликат из-за большого массового содержания в цементном компаунде. При смешении с водой в результате реакции гидратации он претерпевает несколько этапов процесса отверждения, продолжающегося в течение нескольких суток (от семи и более).

Химическая реакция гидратации трикальцийсилката записывается в виде следующего уравнения:



Процесс формирования твердой фазы цемента протекает следующим образом. На начальной стадии вода взаимодействует с клинкеров при практическом отсутствии барьера для такого взаимодействия (прямой контакт реагентов). По мере реакции с цементным клинкером образуется гель трикальцийсиликатогидрата-ТКСГ  $3\text{CaO}\cdot 2\text{SiO}_2\cdot 3\text{H}_2\text{O}$  (этот компонент определяет прочность и другие свойства отвержденного цемента), и гидроокись кальция (известь). На последующих стадиях вода должна продиффундировать через слой образовавшегося на начальной стадии кальцийсиликатогидрата КСГ, что значительно замедляет процесс гидратации. Процесс гидратации и отверждения продолжается до тех пор, пока в порах есть несвязанная вода. Таким образом, часть реакций происходит в жидкой фазе (быстрые), остальные – в твердой фазе (топохимические, более медленные). Такое описание механизма



является достаточно упрощенным, но все же оно иллюстрирует комплексность процессов отверждения цементов.

Следующий важный момент – выделение тепла при реакции гидратации (рис. 10.5). На первом этапе (I) гидратация протекает быстро с выделением значительного количества тепла. Увеличивается концентрация гидроокиси кальция, образуется гель кальцийсиликатогидрата. Когда концентрация гидроокиси кальция достигает насыщения, начинается ее кристаллизация. Гель кальцийсиликатгидрата образуется на поверхности трикальцийсиликата, затрудняя доступ воды и замедляя реакцию гидратации (этап II). Выделение тепла резко сокращается.

Через несколько часов (от 4 до 8) однородность желеобразного аморфного кальцийсиликатогидрата нарушается, что облегчает доступ воды к ТКС, тем самым инициируя снова процесс гидратации (выделение тепла, дальнейшее увеличение прочности, этап III).

Примерно через 12 – 24 часа реакция гидратации замедляется и на этой стадии (IV) определяется диффузионными (медленными) процессами. Тепловыделение на этом этапе незначительное.

Аналогичным образом происходит гидратация других компонентов цемента (табл. 10.2, рис. 10.6). Химические реакции гидратации три- и тетракальцийалюмината следующие:

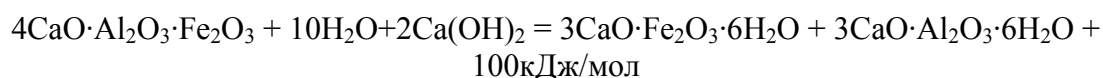


Рис. 10.5. Тепловыделение при реакции гидратации трикальцийсиликата ТКС.



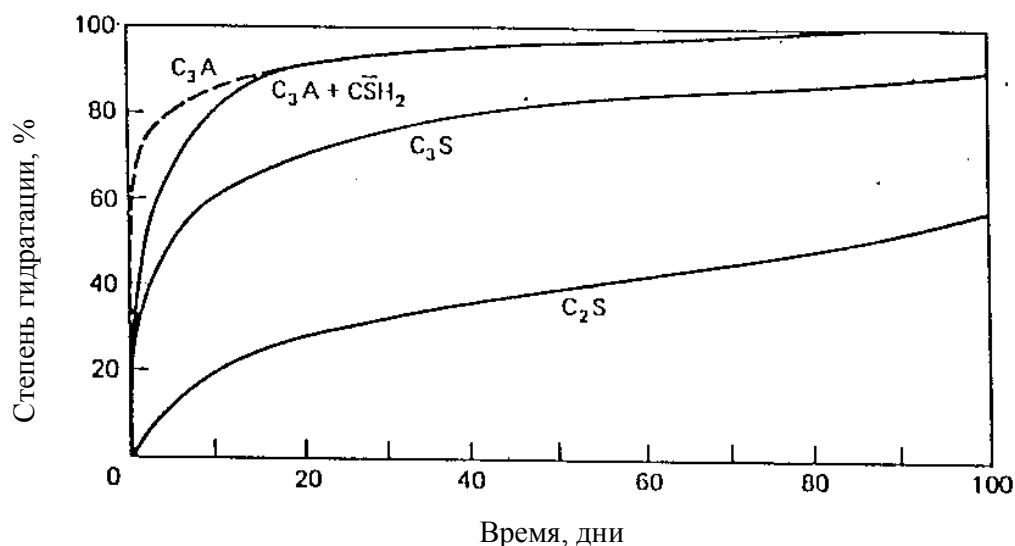


Рис.10.6. Степень гидратации компонентов цементного клинкера.

ТАБЛИЦА 10.2. ВЫДЕЛЕНИЕ ТЕПЛА ПРИ ГИДРАТАЦИИ РАЗЛИЧНЫХ КОМПОНЕНТОВ ЦЕМЕНТА

Компоненты	Скорость реакции	Количество выделяемого тепла
$C_3S$	Умеренная	Умеренное
$C_2S$	Медленная	Низкое
$C_3A + CSH_2$	Быстрая	Очень высокое
$C_4AF + CSH_2$	Умеренная	Умеренное

## 10.4 ТИПЫ И ХАРАКТЕРИСТИКИ ЦЕМЕНТОВ

### 10.4.1 Типы портланд-цементов

Современной промышленностью выпускается различные типы портланд-цементов (ПЦ), которые удовлетворяют различным требованиям с точки зрения физико-химических характеристик. В США, например, производится 8 типов портланд-цементов, наиболее распространенных пять из которых описаны ниже [10.1]:

**Тип I.** Цемент общего назначения: специальные требования не предъявляются, отсутствует воздействие агрессивных сред в воде или грунте, не предвидятся большие температурные нагрузки как в процессе затвердевания, так и в процессе эксплуатации.

**Тип II.** Этот тип цемента применяется в условиях, когда предполагается воздействие сульфатов при сравнительно небольших концентрациях. Содержит ограниченное количество трикальцийалюмината, выделяет немного тепла при гидратации. Используется при создании массивных конструкций (стен, блоков).

**Tun III.** Быстро твердеющий цемент, набирающий необходимую прочность за короткий период (неделю и менее). Химически идентичен типу I, более раннюю и полную гидратацию ему обеспечивает более мелкий помол. Применяется в случаях, когда существуют ограничения во времени достижения необходимой прочности цемента.

**Tun IV.** Цемент с низким выделением тепла. Твердеет медленнее, чем цемент типа I. Содержит в два раза меньшие количества трикальцийсиликата и трикальцийалюмината, но удвоенное количество дикальцийсиликата. Используется в строительстве массивных структур (плотин), когда тепловыделение может быть критическим фактором.

**Tun V.** Сульфатостойкий цемент. Содержание в нем трикальцийсиликата составляет не более 5%.

Из указанных типов портланд-цемента в практике обращения с радиоактивными отходами в основном используется цемент типа I.

#### 10.4.2 Смешанные цементы

Наиболее распространенным типом цемента, используемым при иммобилизации радиоактивных отходов, является портланд-цемент из-за высокой прочности затвердевшего цементного камня. Выбор других типов цемента для цементирования тех или иных отходов зависит от конкретных технологических задач и условий (допустимых температурных режимов, необходимости быстрого или медленного затвердевания, требуемой конечной прочности кондиционированного продукта и пр.).

Для улучшения характеристик цементов, в частности для уменьшения пористости, увеличения прочности, уменьшения тепловыделения при гидратации, улучшения текучести цементной пасты, уменьшения водопроницаемости и т.д., применяется смешивание цементов с другими компонентами. В качестве таких компонентов используются глинозем, металлургические и вулканические шлаки, шлаки и зола от сжигания минерального топлива, известковые материалы, различные силикаты.

Металлургические шлаки, состоящие в основном из окислов кремния и кальция, после измельчения до размера фракций портланд-цемента обладают практически теми же свойствами, что и цемент. В смешанном шлакопортландцементе (ШПЦ) доля шлака может составлять от 30 до 90%. В ряде случаев при иммобилизации радиоактивных отходов ШПЦ может обладать рядом преимуществ по сравнению обычным портланд-цементом (ОПЦ), в частности лучшими показателями по выщелачиваемости цезия. Это относится и к шлакощелочным цементам (ШЩЦ), приготовленным путем помола металлургических шлаков, а активатором твердения которых являются щелочные соли, присутствующие в ЖРО. Скорость выщелачивания  $^{137}\text{Cs}$  из цементных компаундов, приготовленных на основе ШПЦ и ШЩЦ, как правило, в 2 – 8 раз ниже, чем из компаундов, приготовленных на основе портланд-цемента. Следует, однако, заметить, что из-за большого разнообразия составов металлургических шлаков, являющихся промышленными отходами, добиться гарантированности свойств вяжущего материала достаточно трудно.

В практике цементирования радиоактивных отходов находят применение также другие типы цементов:

- Содержащий свыше 40%  $Al_2O_3$  *высокоглиноземистый цемент*. Т.к. при твердении этот цемент связывает до 50 масс. % воды, он обычно рекомендуется для кондиционирования отходов, содержащих тритий.
- Пуццолановый цемент, представляющий собой смесь ПЦ с пуццолановыми материалами (природной золой, туфом, трепелом, опокой и др.).
- Смесь портланд цемента с гашеной известью (примерно в равной пропорции). Используется при отверждении радиоактивных отходов, содержащих большие количества борной кислоты или ее солей и органических растворителей

В практике обращения с радиоактивными отходами цемент применяется и в качестве материала для изготовления контейнеров. В этом случае используются обычные марки цемента, применяемые в строительстве для изготовления высококачественных бетонных изделий; в качестве наполнителей могут использоваться инертные к воздействию щелочей материалы, а для повышения экранирующего эффекта – добавки соединений тяжелых металлов (барит, гематит и пр.).

#### 10.4.3 Характеристики цементов

Свойства исходных цементов характеризуются целым рядом показателей, некоторые из которых приведены ниже.

**Степень измельчения.** Чем меньше размер частиц цемента, тем больше поверхность их взаимодействия с водой и тем быстрее протекает гидратация и затверждение цемента.

**Время отверждения/схватывания.** Этот показатель зависит от многих факторов, таких как степень измельчения, соотношение вода/цемент, химический состав цемента (особенно наличие гипса), содержание различных добавок. Это время не должно быть ни очень коротким, ни очень длительным.

**Изменение объема.** Цементная паста не должна существенно изменять объем при отверждении.

**Тепловыделение при гидратации.** Избыток тепловыделения или неэффективный отвод тепла влияет на прочностные и другие характеристики цемента.

**Прочностные показатели отвержденного цемента.** Эти показатели зависят как от характеристик исходного цемента, так и от способов приготовления цементной пасты, условий гидратации, времени выдерживания и пр.

### 10.5 ЦЕМЕНТИРОВАНИЕ РАДИОАКТИВНЫХ ОТХОДОВ

Применения цемента в строительной индустрии и при иммобилизации радиоактивных отходов существенно различаются. В последнем случае цементные пасты готовятся без использования наполнителей (песка, гравия), которые дают дополнительное увеличение объема конечного продукта, что экономически невыгодно, т.к. увеличение объема радиоактивных отходов ведет к удорожанию их транспортировки, хранения и захоронения. С другой стороны, отсутствие наполнителей приводит к значительному выделению тепла и ускоренной гидратации, что отрицательно сказывается на качестве цементированного продукта. Поскольку при затвердевании смешанных цементов тепловыделение значительно ниже, то с этой точки зрения их использование предпочтительнее. Следует отметить, что при

иммобилизации радиоактивных отходов иногда практикуется и использование наполнителей (например, песка), если это оправдано требованиями к качеству отвержденного продукта.

### 10.5.1 Критерии качества цементных компаундов

Соблюдение установленных критериев качества цементных компаундов должно обеспечивать безопасность обращения с ними, т.е. безопасность транспортирования, хранения и захоронения в приповерхностных или заглубленных могильниках. При этом цементный компаунд должен сохранять свои первоначальные физико-химические свойства на период распада до безопасного уровня радиоактивных компонентов. Основными критериями качества отвержденного цементного продукта являются:

- прочность;
- стойкость к выщелачиванию радионуклидов и макрокомпонентов;
- устойчивость к воздействию среды хранения и захоронения (циклы замораживания и оттаивания, высыхания и увлажнения, поверхностное разрушение и химическая коррозия).

Отчасти данные показатели являются производными от прочности цементного камня, которая в свою очередь зависит от состава отходов, марки цемента, соотношения цемента и отходов и т.д. В таблице 10.3 приведены некоторые требования к цементным компаундам, принятые в Российской Федерации.

Важными технологическими параметрами цементного компаунда являются растекаемость (вязкость), сроки схватывания и степень включения радиоактивных отходов в цементный камень, т.е. соотношение цемента и иммобилизованных отходов. Последнее также определяет объем кондиционированных отходов. Зачастую указанные параметры являются конкурирующими, что необходимо учитывать при подборе составов цементных композиций для обеспечения требуемого качества конечного продукта, т.е. требуется оптимальный подбор компонентов.

Радиоактивные отходы и их компоненты, в особенности химически активные компоненты, могут непосредственно влиять на процесс цементирования и, соответственно, на качество и основные характеристики отвержденного продукта. Поэтому совместимость определенных цементов с некоторыми компонентами радиоактивных отходов должна оцениваться и контролироваться как на стадии выбора параметров иммобилизации, так и на всех стадиях технологического процесса. Чтобы обеспечить требуемое качество конечного отвержденного продукта для каждого вида отходов требуется соответствующее оформление технологического процесса, а именно, подбор состава цементных композиций и необходимых добавок, определение соотношения цемент/отходы, способа их приготовления и т.д.

ТАБЛИЦА 10.3. КРИТЕРИИ КАЧЕСТВА ЦЕМЕНТНЫХ КОМПАУНДОВ

Критерии	Допустимые пределы
Допустимая удельная активность компаунда:	
по $\beta$ - и $\gamma$ - нуклидам	$<1 \cdot 10^{-3}$ Ки/кг
по $\alpha$ - нуклидам	$<1 \cdot 10^{-6}$ Ки/кг
Скорость выщелачивания радионуклидов $^{137}\text{Cs}$ и $^{90}\text{Sr}$	$<10^{-3}$ г/(см <sup>2</sup> ·сут)
Механическая прочность (предел прочности на сжатие)	Допустимая прочность определяется условиями транспортировки, временного хранения и захоронения, но не менее 5 МПа
Радиационная стойкость	Механическая прочность цементного компаунда не снижается ниже допустимой величины (5 МПа) после облучения дозой $10^8$ рад
Устойчивость к термическим циклам	То же после 30 циклов замораживания-оттаивания ( $-40, +40^\circ\text{C}$ )
Устойчивость к длительному пребыванию в воде	Механическая прочность цементного компаунда не снижается ниже допустимой величины (5 МПа) после 90 суток погружения в воду

## 10.6 МЕТОДЫ ЦЕМЕНТИРОВАНИЯ

### 10.6.1 Особенности цементирования жидких отходов

Многие компоненты жидких радиоактивных отходов существенно и по-разному влияют на процессы гидратации цемента и качество отвержденного продукта. Но, как правило, при увеличении доли отходов в пересчете на сухой остаток прочность цементного компаунда уменьшается. Негативное влияние компонентов отходов на процесс цементирования можно уменьшить подбором необходимых добавок, зависящим от вида отходов, а также предварительной подготовкой отходов к цементированию [10.12-10.15].

Например, борная кислота, содержащаяся в жидких отходах АЭС с реакторами ВВЭР, сильно замедляет процесс твердения цемента вплоть до его полной остановки. Нейтрализация борной кислоты добавлением щелочи приводит к увеличению объема и не уменьшает наличие борат-ионов, которые замедляют процесс отверждения цемента. Осаждение же боратов добавлением извести (кальция-ионов) перед цементированием препятствует блокированию частиц цемента путем образования метабората кальция, обеспечивает щелочную реакцию и таким образом улучшает условия образования отвержденного продукта с необходимыми параметрами качества.

В качестве добавки при цементировании радиоактивных отходов используются также силикат натрия, метасиликат натрия или жидкое стекло, которые улучшают качество цементного компаунда, т.е. все основные его показатели: прочность, растекаемость, выщелачиваемость.

Для уменьшения выщелачиваемости **цезия** его обычно сорбируют на специальных добавках, которыми часто служат глинистые материалы (вермикулит,

бентонит), сланцы. Так, добавка бентонита только в количестве 3 % к цементному компаунду, содержащему 30 % сухого остатка среднеактивных ЖРО, уменьшает скорость выщелачивания цезия в 10 раз, а увеличение содержания до 10÷15 % - в 80÷100 раз. Скорость выщелачивания цезия при использовании специальных сорбентов составляет  $10^{-4}$ - $10^{-5}$  г/(см<sup>2</sup>·сут) при сохранении высокой механической прочности цементного компаунда.

Уменьшение выщелачиваемости **стронция** и других радионуклидов достигается уменьшением пористости цементного камня посредством сокращения водоцементного отношения с 0,7 до 0,35. Уменьшение пористости снижает выщелачивание и макрокомпонентов, а также повышает стойкость цементного компаунда к воздействию агрессивных факторов окружающей среды. Однако уменьшение водоцементного отношения ведет к значительному снижению растекаемости цементного компаунда. Растекаемость компаундов можно повысить путем добавления пластификаторов, широко используемых в производстве строительных материалов.

Содержащаяся в цементированных отходах в свободном и связанном виде вода подвергается радиационному воздействию, суть которого заключается в образовании продуктов радиолиза воды и разрушении гидратных соединений, отвечающих за целостность цементной матрицы. Но благодаря хорошей фильтруемости пористого отвержденного продукта разбухание цементных блоков в результате газовыделения не наблюдается, т.е. радиационный эффект не является сдерживающим фактором при цементировании отходов среднего уровня активности. Необходимо отметить, что механизм воздействия радиации на цементную матрицу достаточно хорошо изучен. Известно применение цемента в ядерных реакторах, хранилищах отработанных источников, где они подвергаются более жесткому радиационному воздействию по сравнению с воздействием отходов среднего уровня активности и сохраняют при этом свои физико-химические свойства.

### 10.6.2 Аппаратное оформление процессов цементирования

Итак, процесс цементирования заключается в смешении цемента с радиоактивными отходами и добавками с последующим затвердеванием полученной смеси в контейнерах, предназначенных для хранения, транспортирования и захоронения отходов. Способы смешивания отходов, добавок и цемента имеют различное аппаратное оформление, что иллюстрируется рисунком 10.7. Процесс смешивания радиоактивных отходов, цемента и добавок непосредственно в контейнерах выполняется в двух простых по исполнению и эксплуатации вариантах: с помощью неизвлекаемых или извлекаемых мешалок. Мешалки одноразового использования после окончания процесса перемешивания остаются в контейнерах и удаляются вместе с отходами, многоразовые мешалки после перемешивания извлекаются из контейнера и используются в последующих операциях перемешивания.

Мощность установок цементирования определяется размерами контейнеров и временем, необходимым для достижения полного перемешивания. Обычно контейнерами служат стандартные 200-литровые бочки.

В процессе цементирования с предварительным перемешиванием компонентов приготовление цементного компаунда может производиться в любых смесительных устройствах, из которых полученная смесь передается в контейнеры. Смесительные устройства, как правило, являются аппаратами непрерывного действия: ленточные,

конические и винтовые (одно- или двухходовые) смесители, экструдеры, глиномялки, насосы-смесители и пр. Могут также использоваться и аппараты с лопастными мешалками периодического действия высокой интенсивности. По сравнению с перемешиванием непосредственно в контейнерах этот процесс имеет ряд преимуществ: более высокая производительность, возможность приготовления смесей различных составов. Недостатком этого процесса является сложность обслуживания и ремонта оборудования. Мощность установок различается в широких пределах в зависимости от специфических условий, типов и объемов отходов.

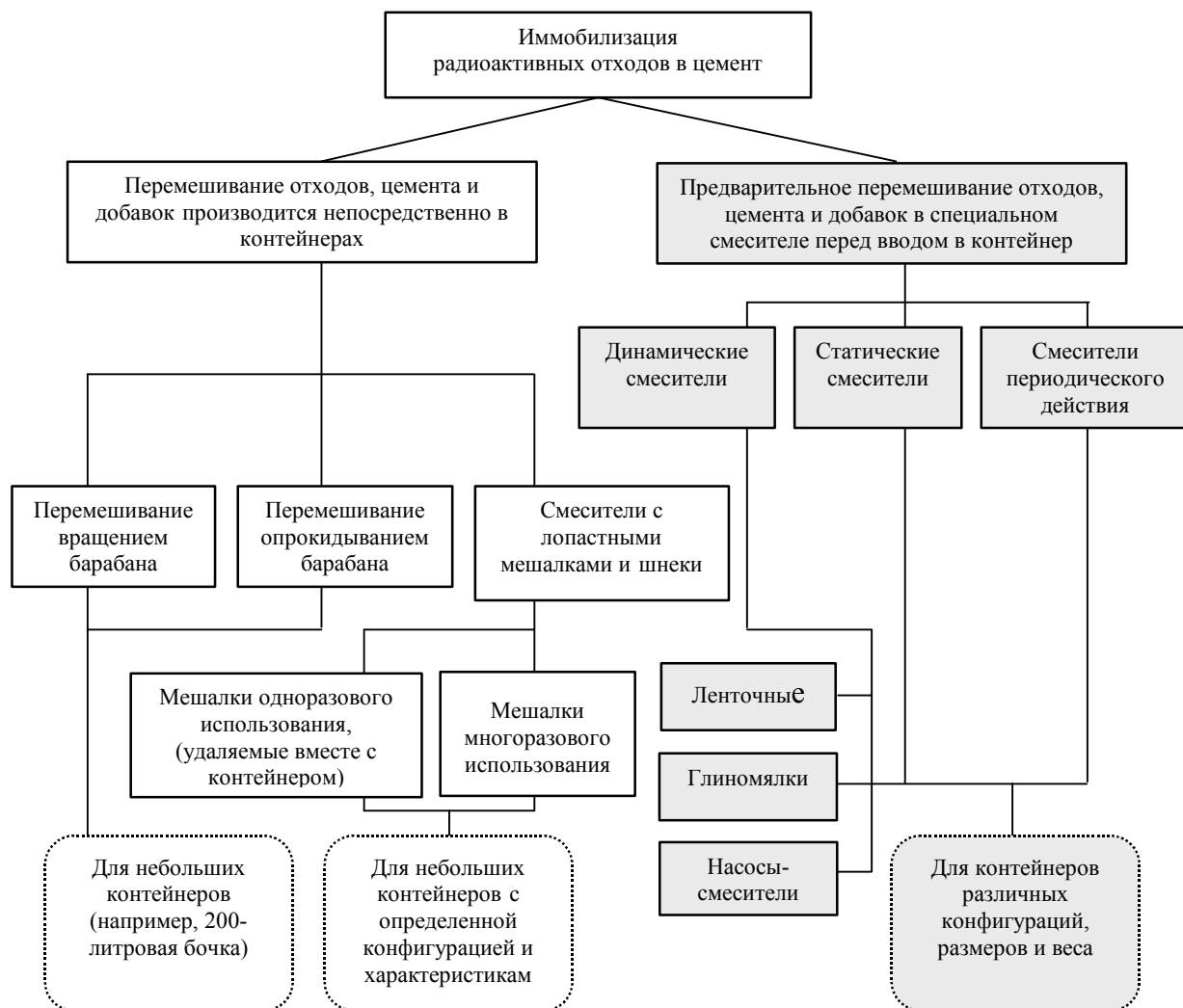


Рис.10.7. Основные варианты аппаратного оформления процесса цементирования.

На рисунке 10.8 в качестве примера представлена типичная схема процесса цементирования с предварительным перемешиванием компонентов.

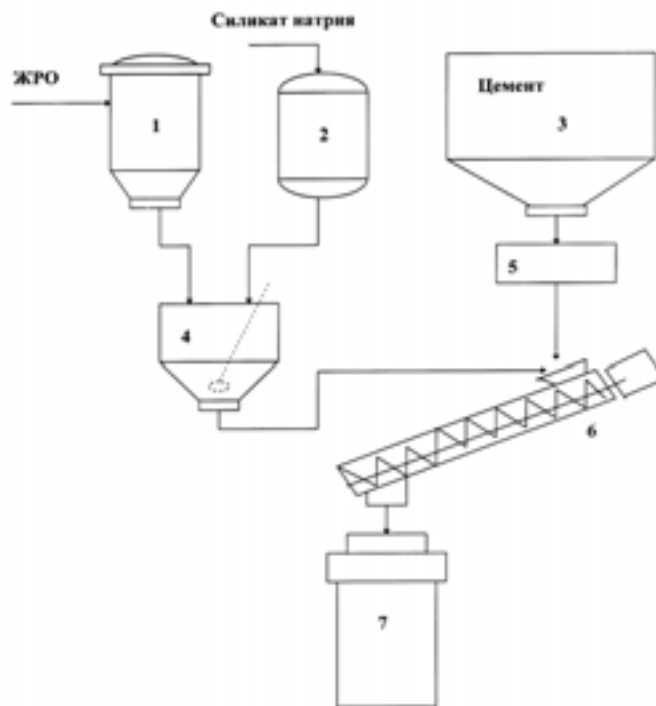


Рис. 10.8. Схема процесса цементирования радиоактивных отходов с предварительным перемешиванием компонентов (1 – резервуар для приема отходов, 2 – резервуар для добавок, 3 – бункер для цемента, 4 – контактный чан для перемешивания отходов и добавок, 5 – дозатор цемента, 6 – шнековый смеситель, 7 – барабан с цементированными отходами, передаваемый на хранение).

## 10.7 МИРОВОЙ ОПЫТ ЦЕМЕНТИРОВАНИЯ ОТХОДОВ

Метод цементирования низко- и среднеактивных отходов широко применяется во всем мире. Во многих странах сложились свои подходы к выбору отверждающих материалов и добавок, технологического оформления процесса. Опыт некоторых стран, которые используют установки цементирования, представлен в таблице 10.4. Ниже рассмотрены особенности процессов и аппаратов цементирования радиоактивных отходов на некоторых предприятиях.



ТАБЛИЦА 10.4. МИРОВОЙ ОПЫТ ЦЕМЕНТИРОВАНИЯ

Месторасположение	Тип отходов	Процесс	Производительность (объем обработанных отходов)
Бельгия, АЭС (три)	Концентраты, шламы	Перемешивание в барабанах	2 м <sup>3</sup> /сут
Великобритания, АЭС "Хинкли-Поинт"	Шламы бассейнов выдержки отработавшего топлива	Перемешивание в барабанах	Двенадцать 80- л барабанов/сут
Индия, АЭС, Тарапур	Шламы	Цементирование на месте удаления	500 м <sup>3</sup> /сут
Индия, Центр ядерных исследований в Тромбее	Шламы	Цементирование на месте удаления	225 м <sup>3</sup> /сут
Нидерланды, Центр ядерных исследований в Пэттене	Шламы, жидкие отходы	Предварительное перемешивание, окончательное в барабанах	5 м <sup>3</sup> /сут 0,5 м <sup>3</sup> /сут
США, Лос-Аламосская Национальная лаборатория	Концентраты среднеактивных отходов	Перемешивание в барабанах	4 м <sup>3</sup> /сут
США, Брукхейвенская Национальная лаборатория	Концентраты от выпаривания	Добавление концентрата в смесь цемента с вермикулитом(1:3) в бетонные контейнеры емкостью 4,2 м <sup>3</sup>	15 м <sup>3</sup> за 6 месяцев
Франция, Маркуль, АЭС	Твердые, жидкие отходы	Перемешивание в бетонных контейнерах	6 м <sup>3</sup> /сут 3 – 5 м <sup>3</sup> /сут
Франция, Центр ядерных исследований в Фонтен-о- Роз	Концентраты от выпаривания	Перемешивание в барабанах (цемент +вермикулит )	0,3 м <sup>3</sup> /сут
Франция, Центр ядерных исследований в Саклэ	Шламы	Предварительное перемешивание в смесителе и выгрузка в бетонные контейнеры	100 – 300 кг/сут
Франция, Центр ядерных исследований в Кадараше	Концентраты от выпаривания	Перемешивание в бетонных контейнерах	1,7 м <sup>3</sup> /сут
Центр по переработке отходов в Ла-Манше	Уплотненные твердые отходы	Цементирование в барабанах	20 м <sup>3</sup> /сут
Германия, АЭС	Концентраты от выпаривания, шламы	Перемешивание в барабанах	2 – 7 м <sup>3</sup> /смена
Германия, Центр ядерных исследований в Юлихе	Концентраты низкоактивных отходов	Перемешивание в барабанах	50 л/ч
Германия, Центр ядерных исследований в Карлсруэ	Концентраты среднеактивных отходов	Перемешивание в барабанах	3 – 4 м <sup>3</sup> за смену
Швейцария, АЭС(две)	Концентраты от выпаривания, шламы, ионообменные смолы	Перемешивание в барабанах	10 – 25 барабанов/сут
Швеция, АЭС "Рингхалс", "Оскархамн"	Концентраты от выпаривания, шламы, ионообменные смолы	Перемешивание в бетонных контейнерах емкостью 1 м <sup>3</sup>	2 – 5 контейнеров/сут
Российская Федерация, МосНПО "Радон"	Концентраты от выпаривания, шламы, ионообменные смолы	Перемешивание в смесителе	0,5 – 1,5 м <sup>3</sup> /час

**Фирмой NUKEM (Германия)** для цементирования ЖРО АЭС разработаны передвижные установки DEWA, состоящие из отдельных блоков дозирования, перемешивания, управления и т.д., которые можно легко и быстро демонтировать, транспортировать и смонтировать на новом месте (рис. 10.9). Принцип действия DEWA заключается в том, что в бочки объемом 200 или 400 л, заранее заполненные определенным количеством цемента, закачивается необходимое количество ЖРО из мерного бака. Перемешивание осуществляется планетарной двухвинтовой мешалкой, смонтированной на крышке и извлекаемой из бочки по окончании процесса. Бочка удаляется для выдержки до затвердевания цементного компаунда, на ее место подается следующая. Производительность DEWA составляет 2 - 5 м<sup>3</sup> за смену в зависимости от удельной активности и состава отходов. Все оборудование расположено в защитной камере и управляется дистанционно. Уровень смеси в бочках контролируется ультразвуковым указателем. Для очистки мешалки используются распылители.

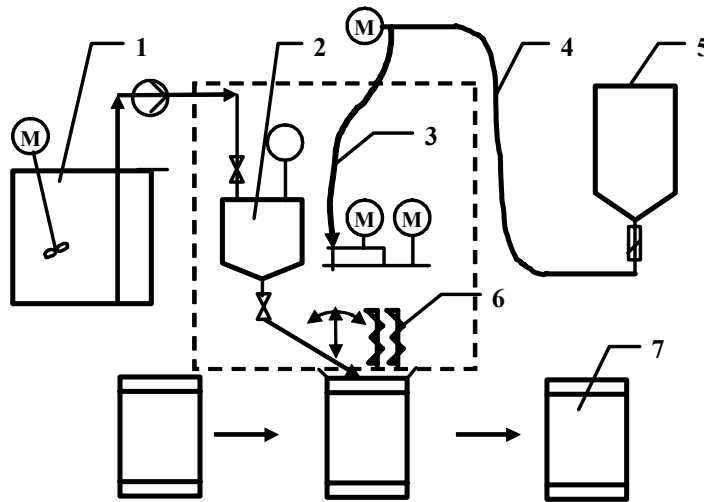


Рис. 10.9. Схема установка цементирования DEWA (1 – бак с отходами, 2 – мерный бак, 3 – гибкая труба, 4 – спиральная труба-контейнер, 5 – бак для цемента, 6 – планетарная мешалка, 7 – бочка.).

Учитывая опыт эксплуатации, в течение нескольких лет проводилось совершенствование установки DEWA, в результате была создана установка MOWA, схема которой представлена на рисунке 10.10. В установке MOWA ЖРО (шламы, концентраты выпарки, ионообменные смолы, воды дезактивации) и цемент в определенных количествах подаются в бочки емкостью 200 или 400 л, в которых заранее установлена лопастная мешалка (рис. 10.11); в процессе дозирования компонентов производится их перемешивание. В крышке каждой бочки имеются отверстия для подачи отходов, цемента, выхода вала мешалки, на время перемешивания соединяемого с гидроприводом, а также для выхода воздуха. Мешалка по окончании процесса остается в бочке и отправляется на хранение вместе с ней. В остальном установка MOWA аналогична DEWA. Процесс ведется при водоцементном отношении 0,31 – 0,50; степень наполнения составляет 6 – 10%. Сообщается, что в результате процесса цементирования на установке MOWA получают однородные смеси, затвердевающие за 48 часов. Плотность конечного продукта составляет 1,8 – 2,0 г/см<sup>3</sup>, прочность на сжатие – 24 – 62 МПа, выщелачивание <sup>137</sup>Cs – около 10<sup>-3</sup> г/(см<sup>2</sup>·сут).

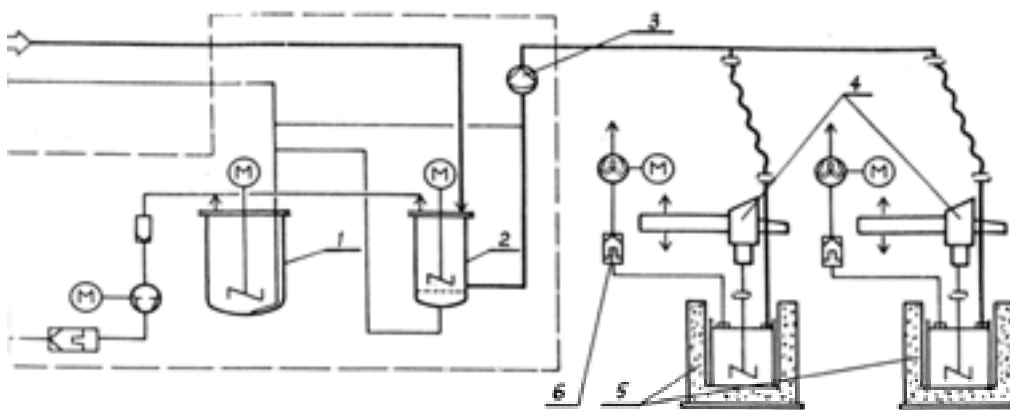


Рис. 10.10. Схема установки MOWA (1 – мерный иламовый бак, 2 – мерный бак для смолы, 3 – мембранный насос, 4 – крышка с отверстиями для питания, 5 – участок заполнения, 6 – НЕРА-фильтр).

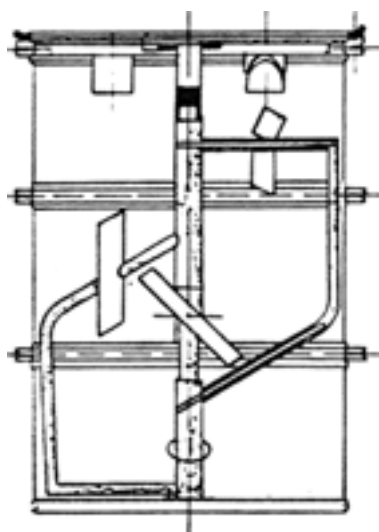


Рис. 10.11. Контейнер с неизвлекаемой лопастной мешалкой.

Многолетний опыт работы установок DEWA и MOWA позволил фирме NUKEM разработать на основе шнекового смесителя установку непрерывного цементирования для одновременной обработки жидких и измельченных твердых отходов, а также ионообменных смол (рис. 10.12). ЖРО дозируются в смеситель с помощью шнекового насоса, твердые отходы – шнекового транспортера. Вода в случае необходимости подается непосредственно в смеситель. Полученный гомогенный продукт из смесителя подается либо в стандартные бочки, либо в большие (до 4 м<sup>3</sup>) кубические контейнеры. Производительность установки составляет 3 м<sup>3</sup>/ч. На основе описанных установок фирмой NUKEM разработано и запатентовано еще несколько установок и устройств, улучшающих технологический процесс.

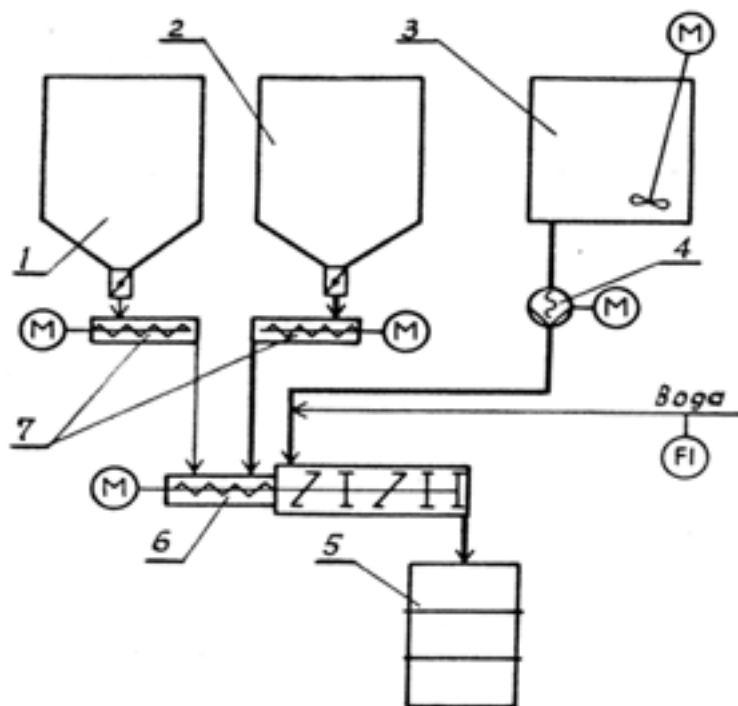


Рис. 10.12. Упрощенная схема установки непрерывного цементирования (1 – бункер для цемента, 2 – бункер для твердых отходов, 3 – бак для жидких отходов, 4 – шнековый насос, 5 – контейнер, 6 – смеситель непрерывного действия, 7 – шнековые транспортеры).

Специалисты **фирмы SGN (Франция)**, с середины 60-х годов занимающейся переработкой отходов АЭС, особое внимание обращают на недопустимость упрощенного подхода к способу цементирования ввиду разнообразия радиоактивных отходов. Это требует проведение опытных работ по кондиционированию каждого вида отходов и выбора типа цемента с последующей отработкой всего комплекса оборудования.

Фирмой SGN разработаны и запатентованы два способа цементирования радиоактивных отходов: периодический и непрерывный. В обоих случаях проводится предварительная обработка ЖРО для сокращения их объема и уменьшения выщелачиваемости из конечного продукта цезия и кобальта.

Технологическая схема непрерывного способа цементирования приведена на рисунке 10.13. Непрерывный способ цементирования – это двухступенчатый процесс с предварительной обработкой и концентрированием ЖРО перед их перемешиванием с цементом и добавками. Обе операции производятся в смесителях фирмы LIST, которые представляют собой горизонтальные двухшнековые самоочищающиеся аппараты надежной конструкции с высокой стойкостью к истиранию. После перемешивания, продолжающегося в течение нескольких минут, цементная смесь непрерывно заливается в металлические или асбесто-цементные контейнеры, расположенные на поворотной столешнице. Клапан на выходе смесителя позволяет остановить выдачу готовой смеси во время короткого интервала, необходимого для смены контейнера. Узел подачи компонентов установки оснащен дозирующими и взвешивающими устройствами, что очень важно для получения качественного конечного продукта. Установка позволяет перерабатывать также золы и ионообменные смолы.

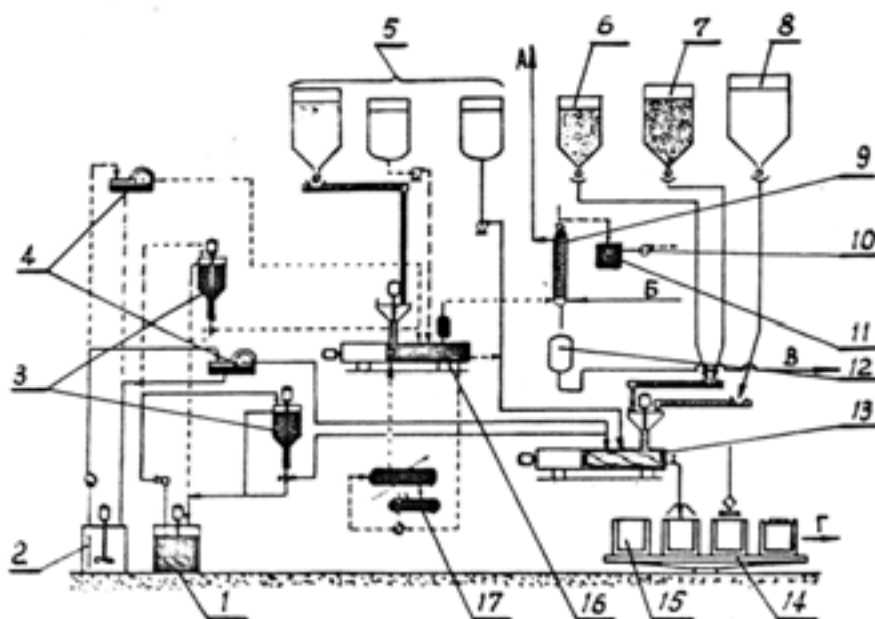


Рис. 10.13. Аппаратурно-технологическая схема процесса непрерывного цементирования (1 – бак для отработанных смол, 2 – бак для хранения концентрата ЖРО, 3 – дозирующие сгустители, 4 – насосы-дозаторы, 5 – баки для добавок, 6 – бак для извести, 7 – бак для добавки, 8 – бункер для цемента, 9 – конденсатор, 10 – вентилятор, 11 – фильтр газовый, 12 – бак для сбора конденсата, 13 – смеситель непрерывного действия, 14 – поворотный стол, 15 – контейнеры, 16 – сушилка двухшнековая, 17 – станция масляного нагрева сушилки, А – слив охлажденной воды, В – охлаждающая вода, Б – в хранилище жидких отходов, Г – на герметизацию и хранение).

Конечный продукт, получаемый на вышеописанных установках цементирования, имеют следующие характеристики:

- прочность на сжатие на 28 суток твердения – 20 МПа;
- выщелачивание  $^{137}\text{Cs}$  в течение 1 года –  $< 1\%$ ;
- степень включения отходов – 30–50 масс. %.

Кроме указанных установок фирмой SGN разработаны и другие технологические установки и устройства для цементирования ионообменных смол и золы от сжигания горючих ТРО.

Подобные технологические процессы и установки разработаны и в других странах:

- Великобритании (ядерные центры Harwell и Winfrith Risley, фирмы GEC Energy Systems, BNFL),
- Франции (PEC), Германии (Simens),
- США (Chem-Nuclear Systems, HPD, Pacific Nuclear Systems, ядерные центры Hanford, Savannah River и др.),
- Российской Федерации (МосНПО “Радон”).

Например, в Московском НПО “Радон” разработан компактный комплекс цементированья радиоактивных отходов для предприятий, имеющих небольшие количества отходов. Комплекс предназначен для цементированья ЖРО с высоким солесодержанием, пульп ионообменных смол, сорбентов и фильтроперлита, а также цементированья твердых радиоактивных отходов, предварительно помещенных в контейнеры (бочки 200 л), методами заливки цементным раствором или пропитки высокопроницаемыми цементными растворами.

Представляет интерес технологический процесс, используемый в Японии. С целью сокращения объема концентраты ЖРО высушивают до порошкообразного состояния, после чего порошки таблетуют, и в таком виде включают в цемент. Таблетирование снижает (за счет снижения удельной поверхности) контакт с водой во время цементированья, таким образом уменьшая влияние отходов на процесс гидратации цемента и улучшая качество отвержденного продукта.

## ЛИТЕРАТУРА

- [10.1] American Society of Testing and Materials (ASTM) Standard C150.
- [10.2] American Society for Testing and Materials (ASTM) Specification C595.
- [10.3] American Society for Testing and Materials (ASTM) Specification C1157.
- [10.4] ASTM web site: [www.astm.org](http://www.astm.org)
- [10.5] F. M. Lea. The Chemistry of Cement and Concrete. Edward Arnold (Publishers) Ltd London. Third Edition. 1970.
- [10.6] M. Atkins, F.P. Glasser. Application of Portland cement-based materials to radioactive waste immobilization. Waste Management, 1992, Vol.12, pp.105-131.
- [10.7] P. Hewlett. Lea's Chemistry of Cement and Concrete 4<sup>th</sup> Edition. ISBN: 0-7506-6256-5. Elsevier, Butterworth-Heinemann. 12<sup>th</sup> November 2003.
- [10.8] H. F. W. Taylor. Cement Chemistry. Published by Thomas Telford. 1997.
- [10.9] R. H. Bogue. The Chemistry of Portland Cement. 2<sup>nd</sup> Edition. New York: Reinhold Publishing Corp. 1955.
- [10.10] P. Barnes and J. Bensted. Structure and Performance of Cements. 2<sup>nd</sup> Edition. ISBN: 041923330X. Published by Routledge. 1<sup>st</sup> January, 2002.
- [10.11] S. H. Kosmatka, B. Kerkhoff and W. C. Panarese. Portland, Blended and Other Hydraulic Cements. 2002.
- [10.12] University of Sheffield, The Centre for Cement and Concrete. Department of Civil and Structural Engineering. This is the largest concrete academic research centre in the UK. Website address: [www.shef.ac.uk/uni/academic/A-C/ccr/](http://www.shef.ac.uk/uni/academic/A-C/ccr/)
- [10.13] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Improved Cement Solidification of Low and Intermediate Level Radioactive Wastes, Technical Reports Series No. 350, IAEA, Vienna (1993).
- [10.14] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Conditioning of Low and Intermediate Level Radioactive Wastes, Technical Reports Series No. 222, IAEA, Vienna (1983).
- [10.15] Соболев И.А., Дмитриев С.А., Лифанов Ф.А. и др. Совершенствование технологии цементированья при переработке радиоактивных отходов // Тезисы конференции “Радиационная безопасность: радиоактивные отходы и экология”, Санкт-Петербург, 9-12 ноября 1999, С.91.

## 11 ИММОБИЛИЗАЦИЯ ОТХОДОВ В БИТУМЫ И ПОЛИМЕРЫ

### 11.1 ИММОБИЛИЗАЦИЯ ЖИДКИХ РАДИОАКТИВНЫХ ОТХОДОВ В БИТУМЫ

Битумирование – это включение радиоактивных отходов, в основном жидких или “влажных”, в битумные материалы, представляющие собой высокомолекулярные смеси углеводородов, в основном получающихся после отгонки легких фракций из природной нефти. Битумирование отходов используется в ядерной промышленности более 40 лет и применяется во многих странах. Такое широкое распространение битум получил благодаря своим высоким гидроизолирующим свойствам и термопластичности, позволяющей при нагревании включать компоненты отходов с получением стабильного гомогенного продукта. Кроме того, битум как исходный материал для иммобилизации отходов весьма распространен, доступен и дешев.

Метод битумирования радиоактивных отходов по сложности технологии и стоимости занимает промежуточное положение между цементированием и остекловыванием. При битумировании ЖРО происходит испарение воды, поэтому в отличие от цементирования иммобилизация отходов практически не сопровождается увеличением объема иммобилизованных форм отходов; кроме того, его преимуществом является хорошая влагостойкость компаундов.

#### 11.1.1 Свойства битумов и процесс битумирования

Как указано выше, процесс битумирования включает выпаривание воды из жидких отходов и смешение оставшихся солей с битумом при повышенной температуре. При охлаждении смеси образуется компаунд с однородно распределенными в битуме частицами отходов (химическое взаимодействие отходов с битумом при этом практически не происходит). На качество конечного продукта влияют характеристики отходов, марка используемого матричного материала, технологические характеристики процесса.

Хотя существуют битумы естественного происхождения, большинство битумов, доступных на рынке, являются результатом переработки нефти. Сырье для получения нефтяных битумов – гудрон, получаемый после отгонки из нефти легких фракций и соляровых масел [11.1]. Состав битумов зависит от свойств исходной нефти и способа ее переработки. В таблице 11.1 приведен состав некоторых марок битумов.

По способам получения различают три группы битумов (детальная информация о процессах получения битума и их составе содержится в специальной литературе [11.2, 11.3]):

- *остаточные битумы* образуются после отгонки из гудрона тяжелых минеральных масел (эта группа битумов обогащена масляной фракцией, температура размягчения ( $T_{разм}$ ) – 34 – 65°C;
- *окисленные битумы* образуются в результате продувки через гудрон воздуха (битумы обогащены смолами и асфальтенами,  $T_{разм}$  – ~140°C;
- *крекинг-битумы* получают при пирогенном разложении тяжелых молекул нефти, обогащены ароматическими углеводородами и асфальтенами, обладают повышенной температурой размягчения.

Возможность подбора необходимой вязкости в области температур 100 – 200°C является определяющим фактором при использовании битумов для иммобилизации РАО.

При битумировании отходов важны такие свойства битума как фракционный состав, проникаемость, температура размягчения и возгорания, вязкость, плотность, потеря массы битума при нагревании, адгезия и радиационная стойкость.

ТАБЛИЦА 11.1. ХАРАКТЕРИСТИКИ РАЗЛИЧНЫХ МАРОК БИТУМОВ, ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ПРИ ОТВЕРЖДЕНИИ РАО.

Показатель	БНК-2	БН-1	БНД 60/90	БНД 40/60	БН-3	БН-4
1. Фракционный состав, масс. %						
Масла	67,6	55,2	59,8	56,4	55,0	49,0
В том числе:						
парафино-нафтенны	22,5	22,6	23,8	28,6	–	15,8
моноциклическая ароматика	7,0	5,0	13,6	8,6	–	8,3
полициклическая ароматика	38,1	24,6	21,6	19,2	–	24,9
Смолы	21,5	21,3	22,2	23,4	26,0	20,1
Асфальтены	10,6	20,7	19,0	19,2	16,0	27,9
2. Температура размягчения, °C	38	44	47	53	49	67,5
3. Температура вспышки, °C	240	180	200	200	200	230
4. Проницаемость, 0,1 мм, $\tau=25^\circ\text{C}$	183	130	66	42	54	23
5. Максимальная потеря массы при 160°C за 5 ч, масс. %	1,0	1,0	–	–	1,0	1,0

При сложном составе как самих битумов, так и отходов, между битумом и отходами могут происходить различные взаимодействия, что влияет на состав смесей в процессе смешивания и свойства конечного продукта. Например, нитрат натрия связывается с битумом слабыми силами сорбции, нитраты тяжелых металлов могут вступать с битумом в химическое взаимодействие окислительного характера. В отдельных случаях это взаимодействие может сопровождаться воспламенением смеси. Связь битумов и соединений многовалентных металлов, может носить и адсорбционный характер, причем эта связь прочнее, чем у щелочных элементов. Взаимодействие компонентов смеси сопровождается экзотермическим эффектом, пенообразованием, газовыделением [11.1].

К процессу битумирования РАО предъявляют требования, которые необходимо учитывать при выборе технологического режима:

- включение ЖРО целесообразно проводить при температуре, обеспечивающей практически полное обезвоживание при минимальном улетучивании радионуклидов и масляных компонентов битума;
- вязкость битума должна обеспечить хорошее смешение с компонентами отходов и полное удаление конечной смеси (продукта) из аппаратов;



- конечный продукт должен содержать максимально возможное количество сухого остатка отходов (*соленополнение*) и при этом обладать свойствами, обеспечивающими хорошее удержание отходов (*стойкость к выщелачиванию*).

Некоторые важные свойства битумированных отходов рассмотрены ниже.

**Радиационная стойкость.** Для того, чтобы снизить радиационные повреждения битумной матрицы, общая доза облучения битума не должна превышать  $10^7$  Гр. Т.е. для битумирования пригодны отходы низкого и среднего уровня активности после таких процессов как фильтрование, осаждение, ионный обмен, сжигание и упаривание, а именно, шламы, зола, отработавшие ионообменные смолы, пульпы и концентраты.

**Температура процесса и вязкость.** Для обеспечения обезвоживания смеси температура технологического режима не должна быть ниже температуры кипения раствора. Например, при включении в битум нитрата натрия температура должна быть не ниже  $120^{\circ}\text{C}$ . Для хорошего смешения с наполнителем и возможности слива битумной массы из аппарата необходимо сохранение оптимального значения вязкости. Для битумов обычно оптимальная температура процесса битумирования составляет  $130\text{--}140^{\circ}\text{C}$ , когда битум находится в жидком состоянии.

**Вязкость и соленополнение.** Вязкость в значительной степени изменяется при увеличении доли минерального наполнителя и накладывает определенные ограничения на количество включаемого сухого остатка отходов. Конечный продукт с достаточно высокой степенью закрепления радионуклидов (скорость выщелачивания радионуклидов при хранении в контакте с водой  $10^{-4}\text{--}10^{-5}$  г/см<sup>2</sup> сутки) можно получить при включении в битум не более 40–50% обезвоженных солей. Предельные величины включения зависят от состава отходов.

Ограничивается степень включения в битум гигроскопических соединений, таких как ионообменные смолы (не более 20-30%), кристаллогидраты (например, тетрабората натрия не более 20%). Фильтроматериалы типа перлита, датолита при включении в битум более 10% приводят к структурированию (затвердеванию) битума. Однако общую степень включения в битум можно увеличить до 70% введением в смесь солевого наполнителя, например нитрата или сульфата натрия. (Хотя введение в битум самого нитрата натрия при его содержании выше 20% приводит к заметному увеличению вязкости и температуры размягчения.).

Не рекомендуется подвергать битумированию кислые растворы с большим содержанием нитратов железа и алюминия, которые могут окислить битум, изменяя его термопластические свойства. При битумировании сильно щелочных растворов со значением  $\text{pH} > 12$  может происходить омыление органических соединений, входящих в состав битума, что уменьшает его водостойчивость. Наиболее благоприятным является битумирование нейтральных и щелочных отходов с  $\text{pH} < 12$ . При битумировании отходов со значением  $\text{pH}$  около 11 увеличиваются биоцидные свойства битумированных отходов, что важно для предупреждения микробиологических повреждений при некоторых вариантах захоронения отходов.

Применение добавок широко используется при битумировании отходов для увеличения степени их включения в битумный компаунд, оптимизации технологического процесса, повышения качества отвержденного продукта и, соответственно, надежности долговременного захоронения. Например, прочное удержание трибутилфосфата (ТБФ) достигается добавками глины или ПВА [11.1];

добавки природных сорбентов (вермикулита, клиноптилолита) уменьшают скорость выщелачивания цезия на 2–3 порядка [11.4] и т.д.

Для получения качественного продукта необходим выбор наиболее подходящей марки битума. Для этого перед отверждением жидких радиоактивных отходов необходимо провести лабораторные исследования физико-химического состава отходов и их взаимодействия с битумами, чтобы определить:

- совместимость отходов с битумным материалом;
- оптимальные границы включения отходов;
- технологические параметры процесса битумирования;
- конечные свойства получаемого компаунда применительно к условиям хранения, транспортирования и окончательного захоронения.

### 11.1.2 Технология битумирования

По технологическому оформлению процесс битумирования жидких радиоактивных отходов может быть периодическим и непрерывным [11.5].

**Периодический процесс битумирования.** В периодическом процессе битумирования в аппарат с внутренними электронагревателями подается порция битума, затем в горячий битум (температура не выше 220°C) при постоянном перемешивании подаются отходы в виде кубовых остатков, пульп или шламов (рис. 11.1). В аппарате происходит испарение воды из отходов, твердый остаток отходов распределяется в битумной массе. После заданного наполнения отходами битумно-солевой компаунд выгружают. В схему технологического процесса может быть включена стадия предварительного обезвоживания, позволяющая увеличить производительность аппарата битумирования. Установка битумирования оснащена системой очистки выделяющихся газов и аэрозолей.

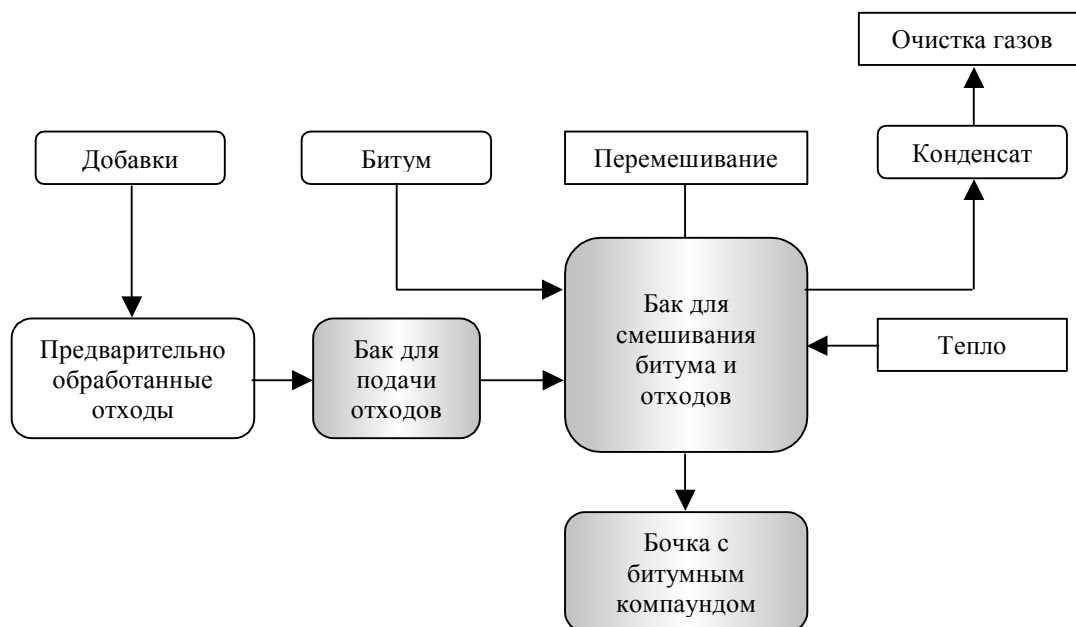


Рис. 11.1. Схема периодического процесса битумирования.

Следует заметить, что подача раствора на поверхность горячего битума приводит к интенсивному пенообразованию, затрудняющему ведение технологического процесса и загрязнению парогазовой фазы органическими примесями. В МосНПО “Радон” на установках данного типа для устранения этого недостатка используется предварительное горячее смешение разогретого битума с отходами (так называемое псевдоэмульгирование) [11.1].

Недостаток установок периодического действия, даже с использованием стадии горячего смешения, – их малая производительность (не более 70–100 л/ч [11.1]), электрообогрев, не исключающий перегрев массы более 200°C, и, как следствие, вероятность отложения битумных солевых наростов на стенках аппарата, свидетельствующих о термическом взаимодействии солей с битумом. Для повышения производительности установок этого типа требуется максимально возможное отделение из отходов воды.

***Непрерывный процесс битумирования.*** Непрерывный процесс включения жидких отходов в битум позволил значительно увеличить производительность установок битумирования. Существует два вида схем технологии непрерывного битумирования, включающие две и одну стадии процесса включения отходов в битум.

Принципиальная схема *двухстадийного* непрерывного битумирования показана на рисунке 11.2. Разделение технологии на две стадии позволяет интенсифицировать процесс битумирования. На первой стадии проводится предварительная обработка ЖРО, как правило, их обезвоживание. На второй стадии влажные соли отходов смешивают с расплавленным битумом, одновременно досушивая их и транспортируя к узлу выгрузки. Для этого используют шнековый смеситель (экструдер), обогреваемый паром или органическим высокотемпературным теплоносителем, принудительная циркуляция которого осуществляется специальным насосом. К вспомогательному оборудованию установки относятся узлы транспортировки и дозировки отходов и битума, системы отсоса, конденсирования и очистки парогазовой смеси, узел транспортировки солей, система обогрева смесителя и узел удаления битумного компаунда.

В *одностадийной* схеме непрерывного битумирования жидких отходов применяется роторный пленочный испаритель, который позволяет в одном аппарате осуществлять удаление влаги и битумирование. Расплавленный битум при 130°C подается вместе с отходами в верхнюю часть испарителя; эта смесь лопатками вращающегося ротора перемешивается и распределяется по внутренней поверхности обогреваемого корпуса в виде тонкой пленки. По мере стекания пленки к нижней части испарителя происходит сушка и образование однородной смеси отходов с битумом. Для обогрева аппарата может использоваться горячий пар. Образовывающаяся в процессе парогазовая смесь подлежит очистке и конденсации. Аппарат не предназначен для упаривания пенящихся растворов.

В заключение раздела о битумировании ЖРО следует отметить, что в процессе длительного хранения битумный компаунд изменяет свои характеристики вследствие радиационного воздействия и взаимодействия солей отходов с компонентами битумной матрицы. Поэтому безопасность хранения битумированных отходов определяется не только характеристиками продукта в момент получения, но и возможными последующими изменениями его свойств. Как и к другим формам иммобилизованных отходов, к битумным компаундам предъявляются требования гомогенности,

термической и радиационной устойчивости, влагостойкости, устойчивости к химическим, механическим и биологическим воздействиям.

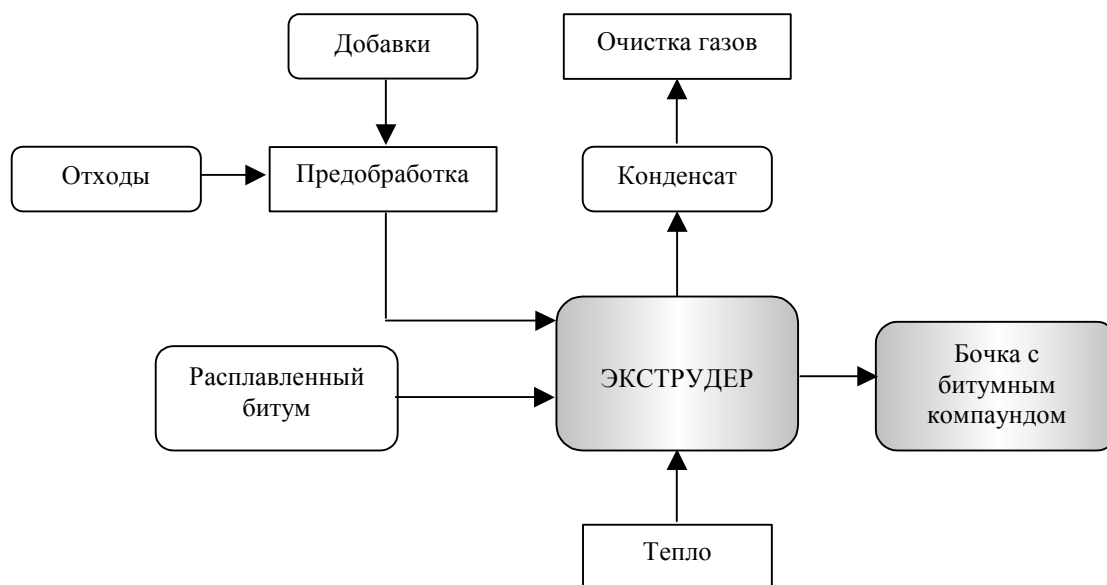


Рис.11. 2. Схема непрерывного процесса битумирования с использованием экструдера.

## 11.2 ИММОБИЛИЗАЦИЯ РАДИОАКТИВНЫХ ОТХОДОВ В ПОЛИМЕРЫ

Одновременно с развитием процессов цементации и битумирования в разных странах мира проводились исследования по поиску других связующих, обладающих по сравнению с цементом и битумом определенными преимуществами, среди которых улучшение водостойкости и радиационной стойкости конечного продукта, увеличение степени включения в иммобилизующую матрицу радиоактивных отходов, уменьшения пожаро- и взрывоопасности в процессе приготовления и хранения отвержденных отходов и т.п.

Изучение возможности включения радиоактивных отходов в полимерные материалы преследовало, в частности, цель получения продукта с низким уровнем выщелачивания. С этой целью было проверено около сорока разных полимерных систем, которые можно разделить на две категории [11.6, 11.7]:

- термостойкие полимеры, образующиеся при полимеризации мономеров; к этой группе относятся, прежде всего, формальдегид, полиэфиры, винилэфиры, эпоксидные смолы и полиуретаны.
- термопластические полимеры, размягчающиеся при нагреве, например, полиэтилен или поливинилхлорид.

В настоящее время применение полимеров в качестве отверждающей матрицы ограничивается иммобилизацией органических отходов, с которыми полимеры хорошо совместимы (например, ионообменные смолы, органические жидкости).

### 11.2.1 Свойства полимеров и типы отходов, пригодных для иммобилизации

По сравнению с цементными и битумными матрицами использование полимеров позволяет достичь более высокого наполнения конечного продукта отходами благодаря устойчивости его механических свойств. В полимеры можно включить до 70 % солей, 65 % ионообменных смол и до 40 % золы. Радиационная устойчивость полимеров ограничивается дозой  $10^5 - 10^7$  Гр. Теплопроводность полимеров низкая, а скорость их горения обычно невысока. Однако при включении радиоактивных отходов в полимеры происходит деградация почти всех свойств полимеров, поэтому необходимо изучение приемлемости конкретных систем [11.6].

Полимерные матрицы обладают хорошей химической стойкостью, т.к. полимеры устойчивы к слабым кислотам и щелочам. Органические растворители растворяют термопласты при температуре выше 60°C. Долговременный контакт с водой и температурные циклы не имеют значительного влияния на качество отверженных отходов: скорость выщелачивания компонентов отходов из полимерных материалов обычно ниже, чем для цементных и битумных компаундов. Почти все полимерные материалы устойчивы против биodeградации (к воздействию аэробных и анаэробных бактерий, спор, микроорганизмов).

Иммобилизация РАО в полимерные матрицы обычно приводит к увеличению объема отходов.

Проведение лабораторных исследований показало, что в полимерные матрицы возможно включить практически все типы радиоактивных отходов низкого и среднего уровня активности. Эксперименты проводились со следующими отходами [11.6, 11.8]:

- концентраты водных растворов (в том числе с повышенной концентрацией сульфатов и боратов), концентраты от выпарки жидких отходов;
- кальцинаты кубовых остатков разного состава;
- ионообменные смолы;
- органические жидкости (ТБФ, сцинтилляционные жидкости, масла);
- шламы;
- твердые отходы (фильтры, реакторные компоненты, порошковые отходы, оболочки твелов);
- золы из установок сжигания.

Опыт показывает, что использование полимерных матриц целесообразно для проблемных с точки зрения иммобилизации отходов, например органических жидкостей и ионнообменных смол. Некоторые типы отходов перед отверждением требуют предварительной обработки, методы которой, чаще всего применяемые, суть следующие:

- обезвоживание ионообменных смол (сушка);
- сушка (и термохимическая обработка) или кальцинация жидких отходов;
- химическая обработка (изменение pH, понижение растворимости солей);
- эмульгирование масла в воде.

### 11.2.2 Технология иммобилизации отходов в полимерные материалы

Для иммобилизации отходов в полимерные матрицы используют в основном аппараты двух типов [11.6]:

- Аппараты со шнековым смесителем. Эти установки похожи на установки битумирования (рис. 11.2), только в качестве матрицы применяются термопласты.
- Аппараты-смесители, в которые подаются мономеры термостойких смол, отходы и необходимые добавки (рис. 11.3). В этих аппаратах полимеризация и перемешивание протекают одновременно, зачастую непосредственно в емкостях или контейнерах, предназначенных для хранения и захоронения.

Некоторые промышленные применения технологии иммобилизации РАО в полимерные матрицы показаны в таблице 11.2.

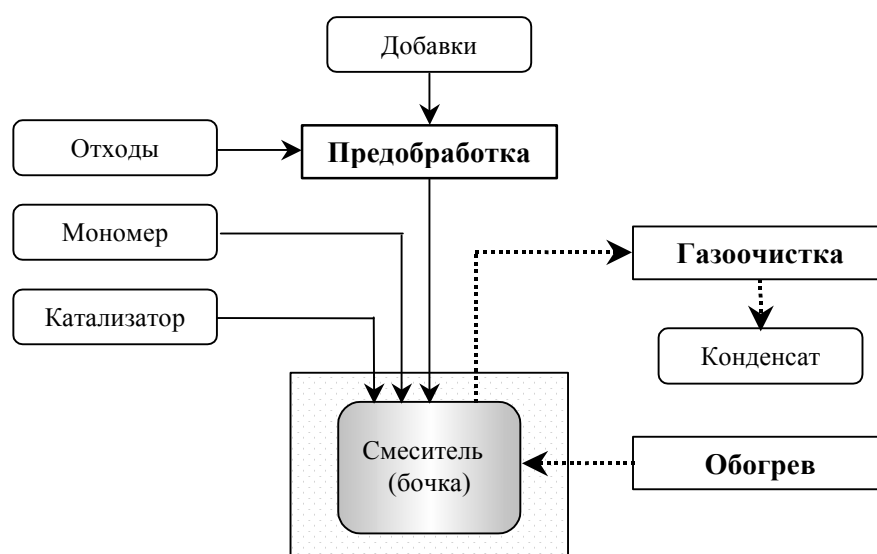


Рис. 11.3. Принцип иммобилизации отходов в термостойкие полимеры.

ТАБЛИЦА 11.2. ПРИМЕРЫ ПРОМЫШЛЕННОГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ МЕТОДА ИММОБИЛИЗАЦИИ РАДИОАКТИВНЫХ ОТХОДОВ В ПОЛИМЕРЫ [11.6].

<i>Месторасположение</i>		<i>Тип отходов</i>	<i>Процесс</i>
Аргентина	Атуха	Жидкие отходы АЭС	Полиэтилен (экструдер)
Франция	Гренобль	Концентраты, шламы, ионообменные смолы	Полиэфир, эпоксид (в бочке)
	Хооз	Отходы АЭС	Полиэфир, эпоксид (в бочке)
	МС* COMETE 1,2	Ионообменные смолы	Стирен-дивинил бензен (в бочке)
Германия	МС: FAMA, MOWA	Ионообменные смолы	Стирен-дивинил бензен (в бочке)
Япония	Фукусима, Шимане, Кашивазавки, Гамаока	Отходы АЭС	Полиэфир (в бочке)
Нидерланды	Борсель	Отходы АЭС	Полиэтилен (экструдер)
Швейцария	МС: FAMA	Ионообменные смолы	Стирен-дивинил бензен (в бочке)
Великобритания		Ионообменные смолы	Винилэфир-стирен (в бочке)
США	МС: Dow	Отходы АЭС	Винилэфир -стирен (в бочке)

\* ) МС – мобильная система.

## ЛИТЕРАТУРА

- [11.1] Соболев И.А., Хомчик Л.М. Обезвреживание радиоактивных отходов на централизованных пунктах. – М.: Энергоатомиздат, 1983, 128 с.
- [11.2] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Conditioning of Low- and Intermediate-Level Radioactive Wastes, Technical Report Series No. 222, IAEA, Vienna (1983).
- [11.3] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Bituminisation of Radioactive Waste, Technical Report Series No. 116, IAEA, Vienna (1970).
- [11.4] Градев Г., Стефанов Г., Стефанова И., и др. Физико-химическое исследование некоторых болгарских битумов и соледержащих битумных продуктов с целью их применения для отверждения жидких радиоактивных отходов из атомных электростанций. – Материалы VI Симпозиума СЭВ, Пиештины, Чехословакия, 22-25 апреля 1985 г.
- [11.5] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Bituminisation Processes to Condition Radioactive Waste, Technical Report Series No. 352, IAEA, Vienna (1993).
- [11.6] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Immobilization of Low and Intermediate Level Radioactive Wastes with  $\gamma$  Polymers, Technical Report Series No. 289, IAEA, Vienna (1988).
- [11.7] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Conditioning of Alpha Bearing Wastes, Technical Report Series No. 326, IAEA, Vienna (1991).
- [11.8] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Treatment of Spent Ion-Exchange resins for Storage and Disposal, Technical Report Series No. 254, IAEA, Vienna (1985).

## 12 ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ОСТЕКЛЫВАНИЯ ДЛЯ ИММОБИЛИЗАЦИИ НИЗКО- И СРЕДНЕАКТИВНЫХ ОТХОДОВ

### 12.1 ВВЕДЕНИЕ

Технология остекловывания используется для иммобилизации отходов высокого уровня активности уже более 40 лет. Стеклообразная матрица обладает высокой емкостью к иммобилизации различных радионуклидов и долговременной устойчивостью. В последние годы технология остекловывания интенсивно разрабатывается для иммобилизации отходов низкого и среднего уровня активности. В Хэнфорде, США, строится завод по остекловыванию низкоактивных отходов, причем ожидаемый суммарный объем стекла с отходами будет более 200 тыс. куб. м. В Таежуне, Южная Корея вводится в эксплуатацию завод по остекловыванию низкоактивных отходов АЭС. В Сергиевом Посаде, Россия с 1999 года также работает установка по остекловыванию низко- и среднеактивных отходов.

### 12.2 ХАРАКТЕРИСТИКИ СТЕКЛА

Способность стекла включать в свой состав широкий спектр элементов связана с его строением. Стеклообразное состояние вещества образуется при затвердевании переохлажденных расплавов и является твердотельной разновидностью аморфного состояния. Основу наиболее распространенного и практически важного класса оксидных стекол составляют оксиды - стеклообразователи, сравнительно легко превращающиеся в стекло: диоксид кремния, оксиды бора и фосфора. В полимерном каркасе из радикалов  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{B}_2\text{O}_3$ ,  $\text{P}_2\text{O}_5$  растворены ионы-модификаторы, обычно оксиды щелочных и щелочноземельных металлов, способствующих, как правило, снижению температуры плавления стекла и уменьшению вязкости расплава. В зависимости от состава стекла, некоторые из этих оксидов могут выступать и в роли стеклообразователей, т.е. входить в структурный каркас стекла. Наличие в составе стекла более одного стеклообразователя приводит к образованию смешанного каркаса. Преобладание ковалентных связей обуславливает полимерное строение стекла и приводит к пониженной летучести его компонентов, а также обуславливает относительно низкие коэффициенты диффузии в стекле.

Существует два механизма фиксации радионуклидов из отходов (рис. 12.1): прямой, когда радионуклиды входят в структуру стекла либо как стеклообразователи, либо как модификаторы и косвенный, когда радионуклиды содержатся во включениях окруженных стекломатрицей.

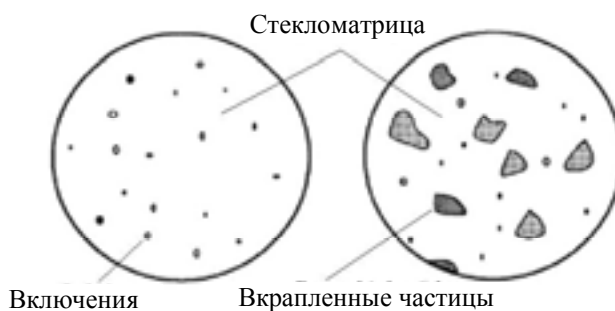


Рис. 12.1. Механизмы включения радионуклидов в остеклованном продукте. Слева – относительно однородный стеклопродукт фиксирует радионуклиды в структуру стекла. Справа – радионуклиды содержатся во включениях.



На самом деле остеклованные радиоактивные отходы всегда содержат то или иное количество включений, так что оба механизма иммобилизации реализуются одновременно.

К числу основных характеристик, определяющих выбор стекол в качестве матрицы при отверждении жидких отходов, относят:

- (1) достаточно высокую химическую устойчивость к выщелачивающему действию воды;
- (2) термическую и радиационную стойкость, гарантирующую отсутствие газовыделения и перехода радионуклидов в газовую фазу;
- (3) механическую прочность;
- (4) возможность включения в структуру стекла отходов, значительно различающихся по своему химическому составу;
- (5) возможность обеспечения максимального концентрирования в процессе отверждения, благодаря чему происходит сокращение объема РАО
- (6) наличие хорошо разработанной технологии получения стекла.

Наибольшее распространение для иммобилизации как высокоактивных, так и низко- и среднеактивных отходов получили боросиликатные стекла, основу которых составляют кремниевое-кислородный трехмерный каркас, а бор играет роль модификатора, понижающего температуру варки и увеличивающего прочность стекла.

### 12.3 ТЕХНОЛОГИИ ОСТЕКЛОВЫВАНИЯ

Процесс включения радиоактивных отходов в стекло предусматривает предварительное смешивание их в виде кальцинированного порошка или шлама со стеклообразующими материалами (флюсом) и последующим плавлением полученной смеси (шихты). Стеклообразующие добавки и отходы могут подаваться в плавитель отдельными потоками, соотношение которых поддерживается на уровне, обеспечивающем получение стекла заданного химического состава. Для плавления стекла обычно используют прямой джоулевый обогрев электрическим током, протекающим через расплав, или обогрев расплава индукционными токами высокой частоты. Принципиальная схема технологии остекловывания показана на рисунке 12.2.

При разработке составов стекол для отверждения РАО с целью получения высокостойкого продукта учитывают следующие факторы: флюс не должен содержать легколетучих компонентов и быть дорогостоящим; вязкость расплава при температуре варки должна составлять 2–10 Па, а его электропроводность – обеспечивать возможность выбора источника электронагрева. Температуру получения стеклообразных материалов (варки) определяют для каждого конкретного состава РАО, при этом учитывают такие факторы, как полнота разложения термически неустойчивых соединений, степень гомогенизации, достижение нужной для выбранного аппаратного оформления вязкости расплава, степень аэрозолеобразования и перехода радионуклидов в газовую фазу. Варка боросиликатного стекла обычно проводится при температуре 1150–1250°C.

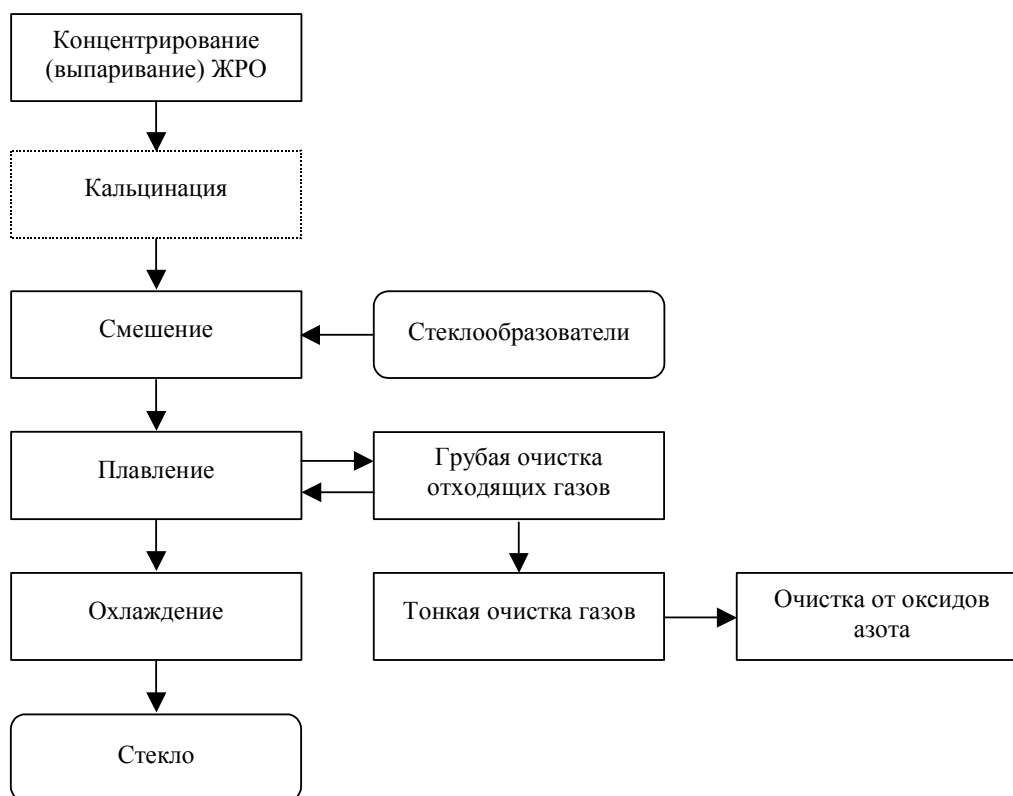


Рис.12.2. Принципиальная схема технологии остекловывания ЖРО.

Важной частью установок остекловывания является система газоочистки, очищающая отходящие газы из плавителей как от радионуклидов, так и химических загрязнителей.

Сокращение объема при остекловывании составляет 4,2–4,5. Унос наиболее летучего радиоактивного компонента отходов  $^{134,137}\text{Cs}$  не выше 3,5 %.

В качестве флюсующих добавок при получении *силикатных* стекол с РАО используют кремнезем, оксид алюминия, борный ангидрит, борную кислоту, при необходимости соединения лития или натрия. Флюсующими материалами могут служить природные материалы: датолитовый концентрат, различные глины, кварцевый песок. В результате переработки РАО с использованием силикатных стеклообразователей кроме стекол, не содержащих заметных кристаллических соединений, могут быть получены материалы других типов: стеклокомпозиционные и плавленые, напоминающие по своей структуре базальты – поликристаллические микрогетерогенные тела.

Кроме боросиликатных стекол для иммобилизации РАО используются *фосфатные* стекла с более низкой температурой варки (900–1000°C), при получении которых к отходам добавляют фосфорную кислоту или фосфаты. Фосфатные стекла обладают более высокой способностью растворять оксиды металлов – компонентов отходов, в том числе  $\text{MoO}_3$ ,  $\text{NaCl}$ ,  $\text{NaSO}_4$  (в случае боросиликатных стекол превышение пределов растворимости содержания в отходах сульфатов и хлоридов приводит к серьезной технологической проблеме: образованию на поверхности расплава отдельной фазы, так называемого хальмоза, обогащенного радионуклидами и обладающего высокой реактивностью). К недостаткам фосфатных стекол можно отнести более высокую склонность к расстекловыванию (кристаллизации), приводящую к снижению

химической стойкости, повышенному уносу рутения из расплава. Кроме того, фосфатные расплавы обладают высоким коррозионным воздействием на керамические огнеупоры.

В качестве источника тепла на установках остекловывания используют печи сопротивления, индукционный средне- и высокочастотный и микроволновый нагрев, пропускание переменного тока через расплав и т.д. Использование печей сопротивления ограничено, поскольку сравнительно низкая теплопроводность расплавленной стекломассы ( $\sim 3$  Вт/(м·град)) препятствует равномерному распределению температуры в большом объеме расплава.

В установках остекловывания отходов используются керамические и металлические горячие и холодные (с охлаждением стенок) плавители [12.1]. Наиболее распространенным является *керамический плавитель* (остекловывание РАО с их использованием проводится в США, ФРГ, Японии, России). Плавление стекломассы в нем осуществляется за счет тепла, выделяющегося при прохождении электрического тока, подводимого к электродам непосредственно через расплав. Длительная практика использования такого типа плавителей в производстве обычного стекла показала, что они позволяют проводить плавление очень сложных по составу стекол и получать конечный продукт высокого качества. Основные преимущества использования керамических плавителей следующие:

- большая технологическая гибкость, позволяющая получать стекла в широком диапазоне составов;
- высокая производительность при минимальных объемах рабочей камеры аппаратов;
- надежность и возможность относительно длительной (2-5 лет) эксплуатации плавителя;
- гомогенность (т.е. высокое качество) получаемого стекла благодаря равномерному нагреву объема стеклоплава.

Рисунок 12.3 показывает схематично керамический плавитель, используемый при одностадийном процессе остекловывания радиоактивных отходов среднего и низкого уровня активности. Он имеет установленную мощность электрообогрева 150 кВт при температуре расплава 1150–1250°C. При этом удельная производительность по стеклу составляет от 40 до 50 кг/м<sup>2</sup>час при удельном расходе энергии 3,2–3,4 кВт час/кг. Производительность плавителя составляет 50 кг стекла при остекловывании жидких отходов с концентрацией солей 200 г/л [12.2–12.5].

Существенные ограничения на применение керамического плавителя накладывают сложность его конструкции, большие габариты и масса, необходимость непрерывного режима работы и сложность ремонта и замены в случае выхода из строя. Также выведение такой установки из эксплуатации представляет собой важную проблему (демонтаж большой установки с высокими уровнями загрязнения).

При использовании *индукционного нагрева* плавитель помещается внутри медного индуктора, вместе с конденсаторами образующего колебательный контур, соединенный с генератором.

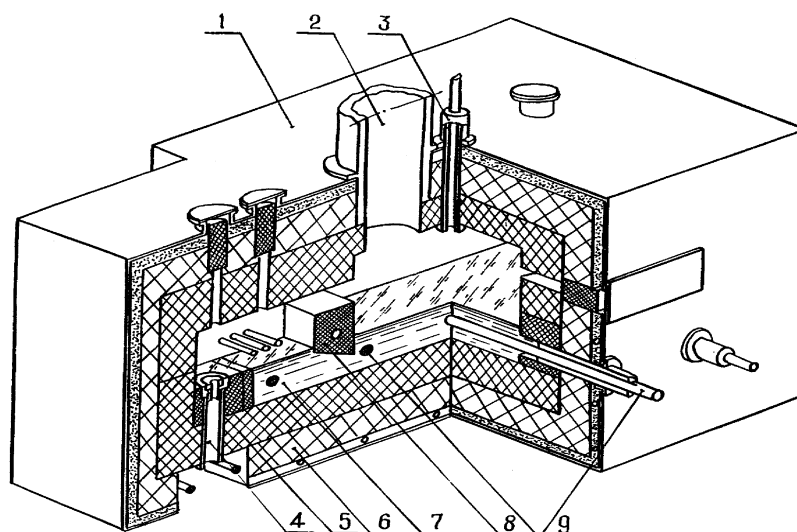


Рис. 12.3. Керамический плавитель для остекловывания радиоактивных отходов низкого и среднего уровня активности. 1-кожух, 2-выход отходящих газов, 3-ввод отходов, 4-слив расплава, 5-керамическая облицовка, 6-термоизоляция, 7-расплав стекла, 8-перегородка, 9-молибденовые электроды.

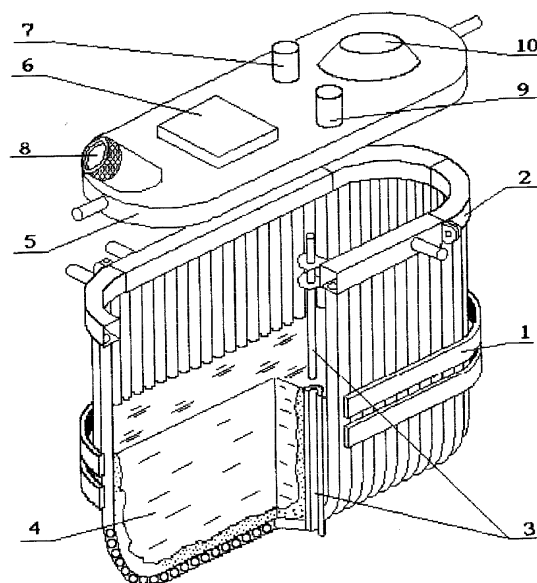
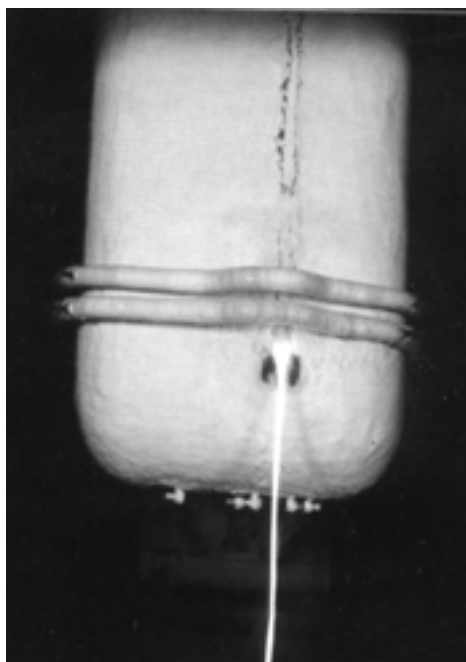
При подаче жидких отходов непосредственно в зону высоких температур расплава осуществляются процессы обезвреживания, кальцинации и плавления в одном аппарате. Водяной пар при контакте с расплавом может образовывать азеотропные смеси отдельных компонентов и летучие соединения. Кроме того, происходит механический унос частиц смеси. Одним из вариантов технологического оформления является постепенная подача раствора в тигель, при переработке расплавленный материал покрыт слоем кальцинированного твердого остатка, который в свою очередь покрыт слоем кипящего раствора. Находящийся на поверхности расплава твердый продукт является сорбентом для летучих соединений, слой жидкости частично задерживает аэрозоли.

Использование керамического плавителя в одностадийном процессе приводит к необходимости увеличивать поверхность варочной зоны, т.к. необходимая для обезвреживания перерабатываемых отходов энергия подводится через поверхность расплава.

Недостатком существующих вариантов технологических схем и установок остекловывания РАО является отсутствие надежных малогабаритных дистанционно управляемых плавителей, способных работать длительное время при высоких температурах, что связано в первую очередь с низкой коррозионной устойчивостью керамических огнеупоров. В последнее время были разработаны *индукционные плавители с холодным тиглем* (ИПХТ), которые являются перспективными как в производстве стекол различного назначения, так и при остекловывании РАО (рис. 12.4).

Основные преимущества таких плавителей обусловлены бесконтактным вводом энергии и отсутствием необходимости использования керамических огнеупоров (футеровкой служит сама шихта). Отсутствие проблем, связанных с коррозией огнеупоров, позволяет легко достигать температур 2000 – 3000°C. Использование более высоких температур и наличие в плавителе активного гидродинамического режима (перемешивание расплава вихревыми токами) обеспечивает высокую однородность

получаемого расплава и отвержденного материала. Кроме того, использование высоких температур создает возможность включения РАО не только в боросиликатные и фосфатные, но и безборатные стекла на алюмосиликатной или титаносиликатной основе и минералоподобные материалы.



*Рис.12.4. Индукционный плавитель “холодный тигель” (1 – индуктор; 2 – металлический водоохлаждаемый тигель; 3 – сливное устройство; 4 – расплав; 5 – крышка; 6 – технологический люк; 7 – посадочное место для измерительной аппаратуры; 8 – смотровой люк; 9 – патрубок для загрузки отходов; 10 – патрубок для отвода отходящих газов).*

Плавитель – холодный тигель, изготовленный из водоохлаждаемых медных трубок круглого или прямоугольного сечения, алюминия или нержавеющей стали, помещается внутри перемещаемого по высоте медного индуктора с зазором 12–20 мм. Параметры индуктора – диаметр, количество витков – рассчитываются с учетом емкости конденсаторной батареи. Плавитель снабжен водоохлаждаемой крышкой, в которой размещены технологический люк, патрубки и штуцера для установки контрольно-измерительных приборов, с помощью которых осуществляется контроль процесса.

Для тигля с полунепрерывным действием слив расплава производится через выпускное устройство. Слив может производиться с поверхности расплава (через боковую стенку или вертикально расположенное отверстие) или со дна (дистанционным открытием затвора, вертикальное и вращательное движение которого осуществляется электромеханическим приводом). Тигель непрерывного действия отличается наличием охлаждаемой водой перегородки, делящей его на зоны варки и выработки, как в КПДН. При необходимости тигель дополняется откидным (съемным) водоохлаждаемым дном.

Некоторые параметры процесса остекловывания радиоактивных отходов в аппарате ИПХТ показаны в Таблице 12.1.

ТАБЛИЦА 12.1. СОСТАВ И СВОЙСТВА СТЕКОЛ ДЛЯ ИММОБИЛИЗАЦИИ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ РАДИОАКТИВНЫХ ОТХОДОВ АЭС С РЕАКТОРАМИ РБМК И ВВЭР В ИНДУКЦИОННОМ ПЛАВИТЕЛЕ С ХОЛОДНЫМ ТИГЛЕМ

Параметр/Тип ректора	РБМК	ВВЭР
Состав, мас. %	16,2 Na <sub>2</sub> O; 0,5 K <sub>2</sub> O; 15,5 CaO; 2,5 Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ; 1,7 Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ; 7,5 B <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ; 48,2 SiO <sub>2</sub> ; 1,1 Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> ; 1,2 NaCl; 5,7 другие	24,0 Na <sub>2</sub> O; 1,9 K <sub>2</sub> O; 6,2 CaO; 4,3 Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ; 1,8 Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ; 9,0 B <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ; 46,8 SiO <sub>2</sub> ; 0,8 Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> ; 0,9 NaCl; 4,3 другие
Удельная активность стекла, Бк/кг	3,7 – 7,0 10 <sup>6</sup>	2,7 10 <sup>6</sup>
Температура варки, °С	1150 ± 25	1130 ± 20
Вязкость стекла при 1200°С (Па·с)	3,9	1,6
Удельное сопротивление при 1200°С (Ом·м)	0,028	0,027
Удельная производи- тельность, кг/м <sup>2</sup> ·ч	120 – 160	140 – 180
Удельное потребление энергии, кВч/кг	5,0 – 6,0	4,5 – 6,0
Унос аэрозолей, мас. %	1,0 – 1,2	1,0 – 1,2
Унос радионуклидов (134, 137 Cs, %)	3,0 – 3,9	3 – 4

Таблица 12.2 показывает некоторые свойства остеклованных форм радиоактивных отходов, указывающие на исключительно высокую надежность удержания радионуклидов стеклом.

Важным элементом установки остекловывания среднеактивных ЖРО является *система газоочистки*, предназначенная для улавливания радионуклидов и макрокомпонентов отходов и шихты, продуктов их термического разложения, основную долю которых составляют оксиды азота. При выборе метода улавливания аэрозольного уноса из плавителя учитывается, что использование “мокрых” методов очистки приводит к образованию значительных объемов вторичных жидких отходов. Среди “сухих” методов улавливания наиболее предпочтительным является фильтрование газов, т.к. только оно способно обеспечить высокую эффективность очистки тонкодисперсных аэрозолей (около 1 мкм).

Возможны два варианта проведения очистки от оксидов азота: с регенерацией азотной кислоты и без нее. В первом случае отходящие газы сначала очищают от радионуклидов и макрокомпонентов ЖРО и шихты (аэрозольного уноса), затем улавливают оксиды азота с получением азотной кислоты; по второму варианту частичную денитрацию (около 90%) производят непосредственно в плавителе путем добавления в шихту органических соединений, затем очищают газы от аэрозольного уноса. Последней стадией обоих вариантов является дополнительная доочистка от оксидов азота до санитарных норм.

ТАБЛИЦА 12.2. ПАРАМЕТРЫ ОСТЕКЛОВАННЫХ ФОРМ РАДИОАКТИВНЫХ ОТХОДОВ

Форма / Свойства	Стекло с отходами РБМК	Стекло с отходами ВВЭР	Стеклокомпозит с сульфатно-хлоридными отходами
Содержание окислов отходов, масс. %	30 – 35	35 – 45	30 – 35 + до 15% хальмоза
Плотность, г/см <sup>3</sup>	2,5 – 2,7	2,4 – 2,6	2,4 – 2,7
Прочность, Мпа	80 – 100	70 – 85	50 – 70
Скорость выщелачивания, г/см <sup>2</sup> ·сут			
<sup>137</sup> Cs	10 <sup>-5</sup> – 10 <sup>-6</sup>	~10 <sup>-5</sup>	~10 <sup>-5</sup>
<sup>90</sup> Sr	10 <sup>-6</sup> – 10 <sup>-7</sup>	~10 <sup>-6</sup>	10 <sup>-6</sup> – 10 <sup>-7</sup>
Cr, Mn, Fr, Co, Ni	~10 <sup>-7</sup> – 10 <sup>-8</sup>	~10 <sup>-7</sup>	~10 <sup>-7</sup> – 10 <sup>-8</sup>
РЗЭ, актиниды	~10 <sup>-8</sup>	~10 <sup>-8</sup>	~10 <sup>-8</sup>
Na	10 <sup>-5</sup> – 10 <sup>-6</sup>	~10 <sup>-5</sup>	10 <sup>-4</sup> – 10 <sup>-5</sup>
B	<10 <sup>-8</sup>	<10 <sup>-8</sup>	<10 <sup>-8</sup>
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	~10 <sup>-6</sup> при содержании менее 1%	–	10 <sup>-4</sup> – 10 <sup>-5</sup> при содержании до 15%

В последние годы прорабатывается метод остекловывания зольного остатка от сжигания твердых радиоактивных отходов. Зольный остаток является пылящим продуктом и ввиду сокращения объема при сжигании концентрирует в себя радионуклиды из сжигаемых отходов. Обычно зольный остаток цементируют, однако наполнение им цементной матрицы невелико (порядка 20-30%) и, кроме того, устойчивость цементных блоков к выщелачиванию небольшая (скорость выщелачивания составляет порядка 10<sup>-3</sup>–10<sup>-4</sup> г/см<sup>2</sup> сут). Преимущество остекловывания для иммобилизации зольных остатков состоит в том, что стекломатрицы значительно более устойчивы к выщелачиванию (скорость выщелачивания <10<sup>-5</sup>–10<sup>-7</sup> г/см<sup>2</sup> сут). Кроме того, при остекловывании объем иммобилизованных отходов значительно ниже, чем при цементировании.

Остекловывание зольного остатка с получения стеклокомпозиционных материалов, состоящих как из стеклофазы, так и кристаллических включений, производят в плавителях различной конструкции, а также с применением порошкообразных металлизированных топлив [12.5].

Применение порошкообразных металлизированных топлив позволяет получать стеклокомпозит безаппаратно, т. е. непосредственно в контейнерах, поскольку процесс остекловывания идет автономно – за счет экзотермических реакций окисления топлива. Для этого зольный остаток перемешивают с топливом в соотношении (мас.%) 60 : 40, смесь помещают в контейнер с двойными стенками и поджигают сверху, после чего процесс плавления и происходит в самоподдерживающемся режиме (рис. 12.5).



*Рис.12.5. Автономное остекловывание зольного остатка с помощью порошкообразного металлизированного топлива.*

Унос радионуклидов при остекловывании зольного остатка невелик ( $<1-2\%$ ). Автономное остекловывание с помощью порошкообразного металлизированного топлива применяется также и для иммобилизации неорганических ионообменников (таких как отработавший клиноптилолит) и загрязненного глинистого грунта.

#### ЛИТЕРАТУРА

- [12.1] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Design and Operation of High Level Waste Vitrification and Storage Facilities, Technical Report Series No. 339, IAEA, Vienna (1992)
- [12.2] И.А.Соболев, М.И.Ожован, Т.Д.Щербатова, О.Г.Батюхнова. Стекла для радиоактивных отходов. Энергоатомиздат, Москва, 240с. (1999).
- [12.3] F.A. Lifanov, M.I. Ojovan, S.V. Stefanovsky, R. Burcl. Cold crucible vitrification of NPP operational waste. Mat. Res. Soc. Symp. Proc., 757, II5.13.1-II5.13.6 (2003).
- [12.4] F.A. Lifanov, I.A. Sobolev, S.A. Dmitriev, S.V. Stefanovsky, M.I. Ojovan, W.E. Lee, R. Burcl. Vitrification of low and intermediate level waste: technology and glass performance. Proc. WM'04 Conference, February 29 – March 4, 2004, Tucson, Arizona, 10 p., 4010.pdf. (2004).
- [12.5] Карлина О.К., Варлакова Г.А., Ожован М.И., Тиванский В.М., Дмитриев С.А. Кондиционирование радиоактивного зольного остатка в волне твердофазных экзотермических реакций. Атомная энергия, 2001, т.90, вып. 1, с.38-43.



## 13 ОБРАЩЕНИЕ С ОТРАБОТАВШИМИ ЗАКРЫТЫМИ РАДИОАКТИВНЫМИ ИСТОЧНИКАМИ

### 13.1 ВВЕДЕНИЕ

Отработавшие свой ресурс закрытые радиоактивные, или радионуклидные источники ионизирующего излучения (РНИ) представляют собой класс исключительно опасных радиоактивных отходов, поскольку большинство из них содержат радиоактивные материалы высокой удельной активности. Так, удельная активность активных частей наиболее распространенных радионуклидов, используемых в закрытых источниках, составляет для  $^{60}\text{Co}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{226}\text{Ra}$  и  $^{241}\text{Am}$  – 42; 3,2; 0,04 и 0,13 ТБк/г соответственно (хотя для старых отработавших РНИ она может быть и значительно меньше). В связи с этим утечка даже небольшого количества радиоактивного материала источника может вызвать значительное загрязнение окружающей среды и представлять угрозу для здоровья людей. Неконтролируемое перемещение отработавших РНИ в окружающей среде приводит не только к человеческим жертвам, но и колоссальным затратам на ликвидацию последствий и реабилитацию загрязненных территорий [13.1]. Например, трагичными оказались последствия потери источников  $^{60}\text{Co}$  с удельной активностью 0,4 ТБк/г (Мехико, 1983 г.) и  $^{137}\text{Cs}$  с удельной активностью 0,5 ТБк/г (Гойана, Бразилия, 1987 г.). Надежная иммобилизация РНИ имеет особое значение, поскольку в последнее время они стали объектом внимания для террористических акций и в качестве сырья для изготовления “грязных бомб”. Отработавшие РНИ включают в различные матричные материалы и кондиционируют, т.е. приводят в форму, максимально повышающую безопасность их хранения и последующего захоронения.

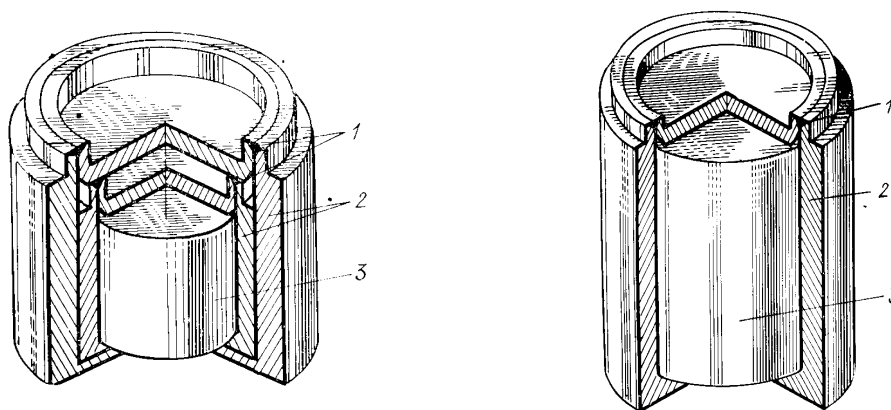
### 13.2 ТИПЫ РАДИОНУКЛИДНЫХ ИСТОЧНИКОВ

В настоящее время производят более 100 видов радиоактивных изотопов и РНИ, широко применяемых в промышленности, медицине и научных исследованиях. Таблица 13.1 дает представление о некоторых, наиболее часто используемых РНИ.

Конструкция большинства закрытых источников представляет собой герметичные ампулы, выполненные из нержавеющей стали или алюминия, внутри которых заключен радиоактивный материал (рис. 13.1, 13.2). Источники  $\alpha$ -излучения выполняют в виде различных игл, стержней, подложек или аппликаторов, на поверхности которых зафиксировано радиоактивное вещество (рис. 13.3).

ТАБЛИЦА 13.1. ХАРАКТЕРИСТИКИ И ОБЛАСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ ОСНОВНЫХ РАДИОНУКЛИДНЫХ ИСТОЧНИКОВ ИОНИЗИРУЮЩЕГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Изотоп	Период полураспада	Исполнение	Основной вид излучения	Энергия излучения, Мэв.	Применение
$^{226}\text{Ra}$	1600 лет	Ампулы, фольги, иглы, диски, подложки, аппликаторы	Альфа	7,7	Технологические и информационные системы, медицинские установки
$^{241}\text{Am}$	432,1 года	Ампулы, капсулы, шарики	Альфа	5,486	Приборы технологического контроля и информационные системы
$^{90}\text{Sr}+^{90}\text{Y}$	28,7 лет и 64,26 ч	Капсулы, шарики, диски, стержни, подложки	Бета	2,274	Лучевая терапия
$^{60}\text{Co}$	5,273 года	Капсулы, шарики, диски, стержни, проволока	Гамма	1,332	Лучевая терапия
$^{137}\text{Cs}$	30,18 года	Капсулы, подложки, диски	Гамма	0,662	Дефектоскопия, медицина, промышленное производство
$^{192}\text{Ir}$	74,08 сут	Капсулы, стержни	Гамма	0,317	

Рис. 13.1. Закрытые источники гамма-излучения с изотопом  $^{60}\text{Co}$  (1 – сварка, 2 – ампулы, 3 – радиоактивный материал).

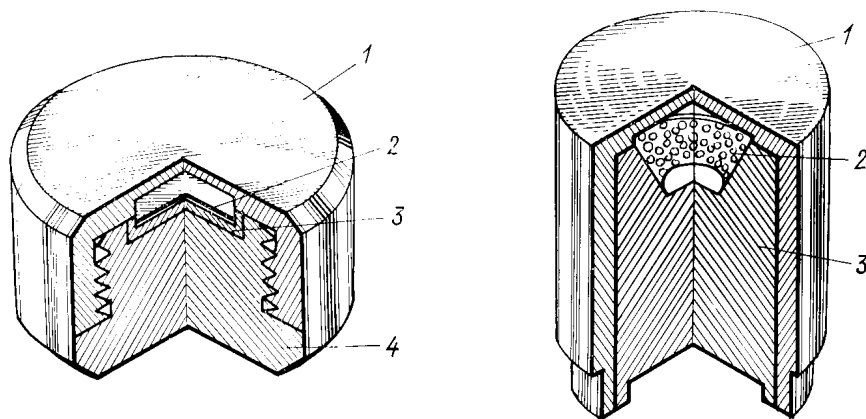


Рис. 13.2. Закрытые источники бета-излучения с изотопом  $^{90}\text{Sr}+^{90}\text{Y}$  (1 – капсула, 2 – радиоактивный материал, 3 – подложка, 4 – основание).

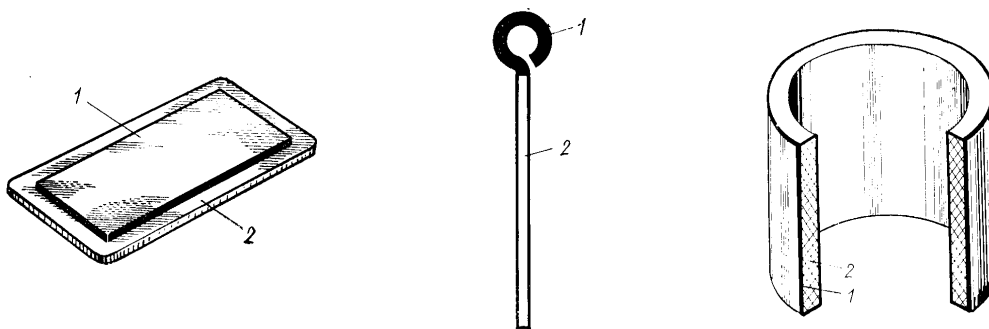


Рис. 13.3. Закрытые источники альфа-излучения с изотопами  $^{238}\text{Pu}$  (1 – радиоактивный материал, 2 – подложка).

### 13.3 ИНФРАСТРУКТУРА ДЛЯ ОБРАЩЕНИЯ С ОТРАБОТАВШИМИ РНИ

#### 13.3.1 Обязанности заинтересованных сторон

Основные требования радиационной защиты и обеспечения безопасности при работе с источниками ионизирующего излучения изложены в Основных Международных Стандартах Безопасности (BSS) [13.2], в которых также прописано обращение с радиоактивными отходами и отработавшими РНИ, возникающими в результате применения источников в разных областях. Его основные требования были далее разработаны в ряде публикаций МАГАТЭ в серии безопасности. В частности, документ N°111-SS-1 “Установление национальной системы для обращения с радиоактивными отходами” [13.3] содержит набор элементов национальной системы, необходимой для безопасного обращения с отходами и устанавливает ключевые обязанности заинтересованных сторон. Все общие требования, описанные в Стандартах безопасности, применимы и к обращению с закрытыми радиоактивными источниками.

В дополнение к заявленным в [13.3] обязанностям *регулирующий орган* в отношении обращения с отработавшими РНИ должен:

- (1) Тщательно рассматривать заявки на лицензии, связанные с применением закрытых источников и обращением с РНИ после завершения их ресурса работы (отработавшие источники);
- (2) Регулировать выбор площадки, конструкцию, строительство, ввод в действие, закрытие и снятие с эксплуатации установок, где находятся закрытые источники;
- (3) Осуществлять инспекции с целью оценки эксплуатации установки в соответствии с нормами и инструкциями;
- (4) Инициировать действия по выявлению и устранению случаев невыполнения правил;
- (5) Организовывать и поддерживать систему учета для всех закрытых радиоактивных источников в стране.

В дополнение к обязанностям, прописанным в [13.3], *пользователь/владелец* закрытого радиоактивного источника должен:

- (1) Предлагать приемлемое место назначения для отработавших закрытых источников;
- (2) Обеспечить локальное хранение закрытых источников, если источник не может быть отправлен в любое другое место;
- (3) Подготовить источник к транспортированию на централизованный пункт обращения с отходами, если таковой существует;
- (4) Организовать систему ведения записей для облегчения идентификации, характеристики, сбора и хранения всех закрытых радиоактивных источников (использующихся и отработавших);
- (5) Назначить компетентный орган (ответственного) в качестве координатора радиоактивных материалов (КРМ).

В Российской Федерации координатором радиоактивных материалов, включая радиоактивные отходы, является Центральный информационно-аналитический центр (ЦИАЦ) при Федеральном Агентстве Атомной энергии.

*Координатор радиоактивных материалов обязан [13.3]:*

- (1) Поддерживать систему учета радиоактивных материалов;
- (2) Устанавливать и поддерживать контакты со всеми организациями, использующими закрытые РНИ, и поддерживать связь с ответственными лицами этих организаций в плане советов и рекомендаций;
- (3) Осуществлять связь с центральной организацией;
- (4) Обеспечивать безопасное местное перемещение закрытых радиоактивных источников;
- (5) Подготавливать источник к транспортировке в центральную организацию по обращению с радиоактивными отходами в соответствии с национальными транспортными правилами;
- (6) Обеспечивать соответствующую защиту, упаковку, физическую защиту и целостность закрытого радиоактивного источника;
- (7) Сообщать руководству об инцидентах и несчастных случаях с закрытыми источниками.

*Централизованная организация по обращению с радиоактивными отходами (ЦООРАО)* создается в государстве для обращения или координации обращения со всеми отработавшими закрытыми источниками от различных пользователей. Если владелец лицензии по использованию закрытых РНИ не способен к

регламентируемому обращению с отработавшим источником, ЦООРАО должна принять на себя ответственность за источник, если такое решение примет регулирующий орган. ЦООРАО несет ответственность за:

- (1) хранение всех полученных короткоживущих источников до распада радиоактивности;
- (2) отправку на захоронение источников с радионуклидами, распавшимися до уровней освобождения от контроля;
- (3) кондиционирование отработавших закрытых источников;
- (4) хранение кондиционированных отработавших закрытых источников до тех пор, пока централизованная установка не будет принимать источники на захоронение;
- (5) хранение некондиционированных отработавших закрытых источников до тех пор, пока не появятся средства для их кондиционирования;
- (6) организацию и поддержание системы учета для всех отработавших закрытых источников.

В Российской Федерации роль ЦООРАО выполняют специализированные предприятия системы “Радон”.

### **13.3.2 Контроль над движением источников**

Контроль над закрытыми радиоактивными источниками особенно важен после того, когда они становятся отработавшими. Такой контроль требует, чтобы любой новый источник был прослежен в течение всей его жизни, и чтобы до момента получения источника были определены условия для его хранения, и существовал план по обращению с источником после того, как он стал отработавшим.

Система ведения записей для прослеживания всех закрытых источников должна быть организована обладателем лицензии и технически поддерживаться КРМ. Эта система должна содержать информацию, начиная с момента приобретения и до возврата источника изготовителю (или до его захоронения). Система учета и контроля должна содержать необходимую информацию относительно источника, которая должна быть надежно сохранена и архивирована. Данные учета должны быть легко доступны для определенного персонала, но в тоже время защищены от постороннего вмешательства. Приемлемая система учета допускает и ручное ведение записей, и компьютеризированную базу данных.

## **13.4 СТРАТЕГИЯ ОБРАЩЕНИЯ С РАДИОНУКЛИДНЫМИ ИСТОЧНИКАМИ**

### **13.4.1 План использования радионуклидных источников**

Страна, которая намерена применять радиоактивные источники, должна иметь план их использования. Такой план должен разработать *регулирующий орган*, осуществляющий контроль над использованием радиоактивных материалов в стране. В основу этого плана должны быть заложены потребности всех пользователей в закрытых источниках с гарантией, что в соответствии с их целями приобретается минимально необходимое количество источников, и что активность и период полураспада радионуклидов в источниках не превышают потребностей пользователей.

В прошлом закрытые РНИ обычно покупались пользователями без соглашения с изготовителем/поставщиком принять их обратно после выработки их ресурса или за ненадобностью. Такие условия перекладывали всю ответственность за обращение с

отработавшими РНИ на пользователя. В настоящее время преобладает подход о согласии возвращать отработавшие РНИ изготовителю/поставщику, если такая договоренность достигнута во время закупки источника. Возврат РНИ поставщику не может гарантировать его безопасное состояние, но такой возврат дает возможность рециклирования РНИ, не выработавших свой ресурс эксплуатации. Кроме того, изготовитель/поставщик, как правило, обладает необходимой инфраструктурой для безопасного временного хранения отработавших РНИ до решения вопроса о его кондиционировании и захоронении.

Часто пользователи хранят отработавшие закрытые РНИ без перспективы захоронения в скором будущем. С точки зрения обращения с радиоактивными отходами, желательно уменьшить количество источников, находящихся в пользовании или временном хранении у пользователя. Поэтому при первой же возможности отработавший закрытый РНИ должен быть возвращен изготовителю, где он будет кондиционирован или передан другому пользователю. По причине хорошей осведомленности об экономике рециркуляции и о спросе на РНИ различных типов изготовители/поставщики находятся в лучшей позиции для принятия оптимального решения относительно их заключительного использования.

#### **13.4.2 Объявление источника “отработавшим”**

Последовательность действий для объявления закрытого РНИ отработавшим представлена на рисунке 13.4.

Пользователь потенциально отработавшего закрытого РНИ должен связаться в письменной форме с Координатором радиоактивных материалов относительно своего намерения прекратить использование РНИ. После этого Координатор радиоактивных материалов должен информировать регулирующий орган о намерении объявить РНИ отработавшим.

Следующий шаг - нахождение подходящего места для безопасного хранения РНИ до момента принятия решения в отношении этого источника. Уже на этой стадии необходимо собрать всю нужную информацию о РНИ.

#### **13.4.3 Характеристика закрытых РНИ**

Перед детальным планированием дальнейших путей обращения с закрытым РНИ необходимо собрать о нем все необходимые данные. Большинство уже неиспользующихся РНИ будет послано на долговременное хранение или захоронение, потому что они или отработали свой ресурс, или просто не нужны, или непригодны по другим причинам. РНИ необходимо охарактеризовать, поместив их в одну из следующих групп:



Рис. 13.4. Шаги, необходимые для принятия решения в отношении отработавшего источника.

- Зарегистрированные РНИ: это РНИ, на которые имеется документация, объективно демонстрирующая его характеристики. Минимальная информация для этой категории источников может быть получена из: 1) учетных данных, 2) документации изготовителя, 3) бирки на РНИ или 4) из данных неразрушающих испытаний. Могут также быть использованы данные из описи всех имеющихся в стране РНИ, если существует надежная корреляция между документацией и самим РНИ;
- Незарегистрированные РНИ: это РНИ без документации, необходимой для объективной их характеристики. Эта категория источников требует дополнительных усилий для определения вида нуклидов и других данных;
- Дефектные РНИ: это РНИ с поврежденными оболочками. Эта отдельная категория может включать как зарегистрированные, так и незарегистрированные РНИ, которые как можно быстрее необходимо иммобилизовать и кондиционировать.

Для каждого РНИ должны быть определены его характеристики, которые, как минимум, должны включать следующее:

- общее описание;
- дату изготовления;
- название изготовителя;
- метод запечатывания радиоактивного материала в оболочке;
- приблизительные размеры источника;
- тип биологической защиты (если есть);
- состав РНИ;
- вес РНИ;
- любую другую информацию, которая может помочь в характеристике РНИ.

В документации с характеристиками РНИ должен также быть указан и способ получения данных. Например, был ли РНИ визуально осмотрен или информация была получена из паспорта изготовителя? Если информация о каких-либо параметрах недоступна, это должно быть отмечено.

Вся информация относительно РНИ должна быть собрана и зарегистрирована для того, чтобы в случае необходимости облегчить поиск данных. Эта документация должна храниться в двойном экземпляре в разных местах и Координатор радиоактивных материалов должен регулярно ее проверять.

#### **13.4.4 Сбор и сортировка**

Первый шаг обращения с отработавшим РНИ – забрать его от пользователя и создать условия для безопасного хранения до принятия окончательного решения в отношении источника. Собранные РНИ должны быть рассортированы и помещены в соответствующие контейнеры. Дефектные РНИ, по возможности, должны быть отделены от неповрежденных РНИ. Для перемещения к месту хранения отработавшие РНИ должны быть помещены в первоначальные контейнеры или контейнеры, сопоставимые с теми, в которых они были изначально получены (примеры транспортных контейнеров представлены на рисунках 13.5–13.9). В случае радиографического или телетерапевтического оборудования отработавший источник необходимо должным образом вернуть в его нерабочую позицию. Если используются не первоначальные, а другие контейнеры, их конструкция должна учитывать геометрию источника, его активность, размеры и требования по перемещению. Существующие контейнеры, даже не будучи рассчитаны для захоронения или очень длительного (десятки лет) хранения РНИ, тем не менее, обеспечивают хорошую защиту от ионизирующего излучения и позволяют достаточно долго безопасно хранить недефектные РНИ.



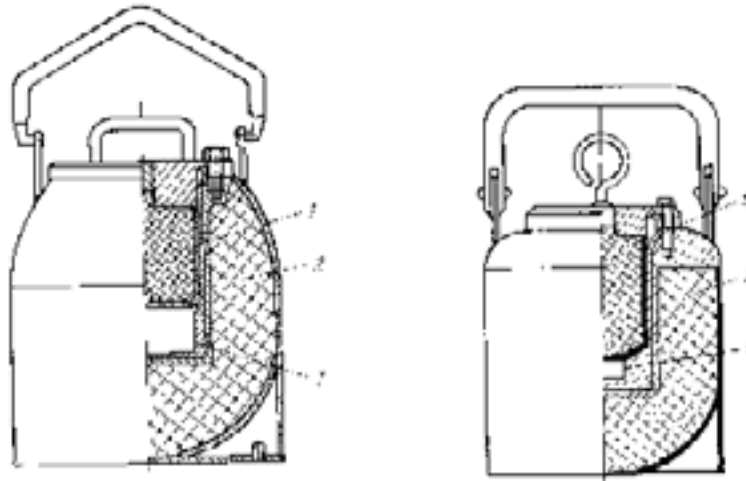


Рис. 13.5. Транспортные контейнеры для закрытых источников бета-излучения (1 – крышка, 2 – свинец, 3 – место для источников).

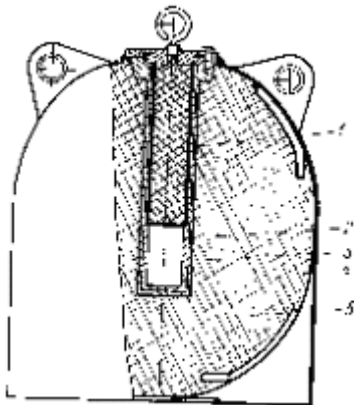


Рис. 13.6. Транспортный контейнер для закрытых источников гамма-излучения (1 – пробка, 2 – стакан, 3 – место для источников, 4 – корпус, 5 – свинец).

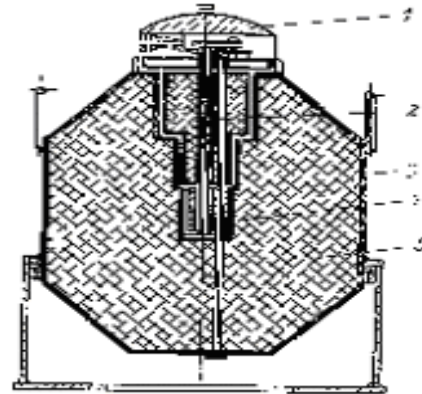


Рис. 13.7. Транспортный контейнер для закрытых источников гамма-излучения с донной разгрузкой 1 – крышка, 2 – стержень, 3 корпус, 4 – револьверная головка с гнездами для источников, 5 – свинец

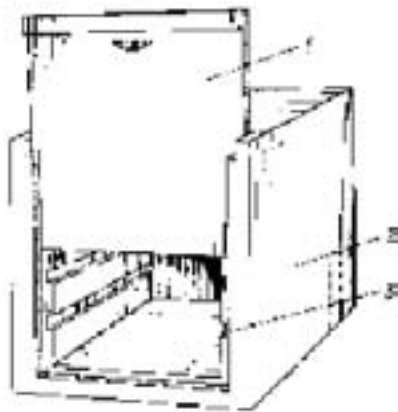


Рис. 13.8. Транспортный контейнер для закрытых источников альфа-излучения (1 – крышка, 2 – корпус, 3 – место для источников).

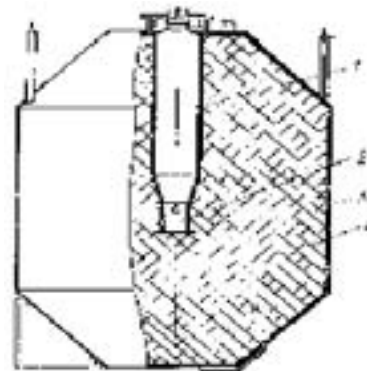


Рис. 13.9. Транспортный контейнер для закрытых нейтронных источников (1 – крышка, 2 – место для источников, 3 – стальной корпус, 4 – парафин).

### 13.5 ВАРИАНТЫ ОБРАЩЕНИЯ С ОТРАБОТАВШИМИ РНИ

Вариант обращения с определенным источником зависит от ряда факторов, включая активность, радионуклидный состав, условия поставки и физического состояния источника [13.4]. Можно рассмотреть следующие варианты:

- (1) Передача источника другому пользователю.
- (2) Возвращение отработавшего РНИ изготовителю/поставщику.
- (3) Хранение для распада короткоживущих радионуклидов до уровней освобождения от контроля.
- (4) Транспортировка на центральное временное хранилище до появления средств кондиционирования.
- (5) Транспортировка на центральную установку кондиционирования с последующим хранением.
- (6) Кондиционирование и хранение РНИ на месте его использования до появления специального могильника для захоронения.
- (7) Транспортировка кондиционированного РНИ к месту захоронения.
- (8) Окончательное захоронение в лицензированном могильнике.

Схематически выбор варианта обращения с РНИ показан на рисунке 13.10. Для отработавших РНИ с очень высокой начальной активностью короткоживущих радионуклидов (например, мощных РНИ, содержащих  $^{60}\text{Co}$  или  $^{137}\text{Cs}$ ) эта схема не применима. Дело в том, что для РНИ, требующих более чем тысячелетние времена для распада радионуклидов до уровней освобождения, независимо от периода полураспада радионуклидов, единственной возможностью является их иммобилизация в металлическую матрицу и долгосрочное временное хранение (несколько десятилетий и более) в ожидании глубинного захоронения в будущем.

Очень мощные источники независимо от  $T_{1/2}$  направляются на глубинное захоронение.

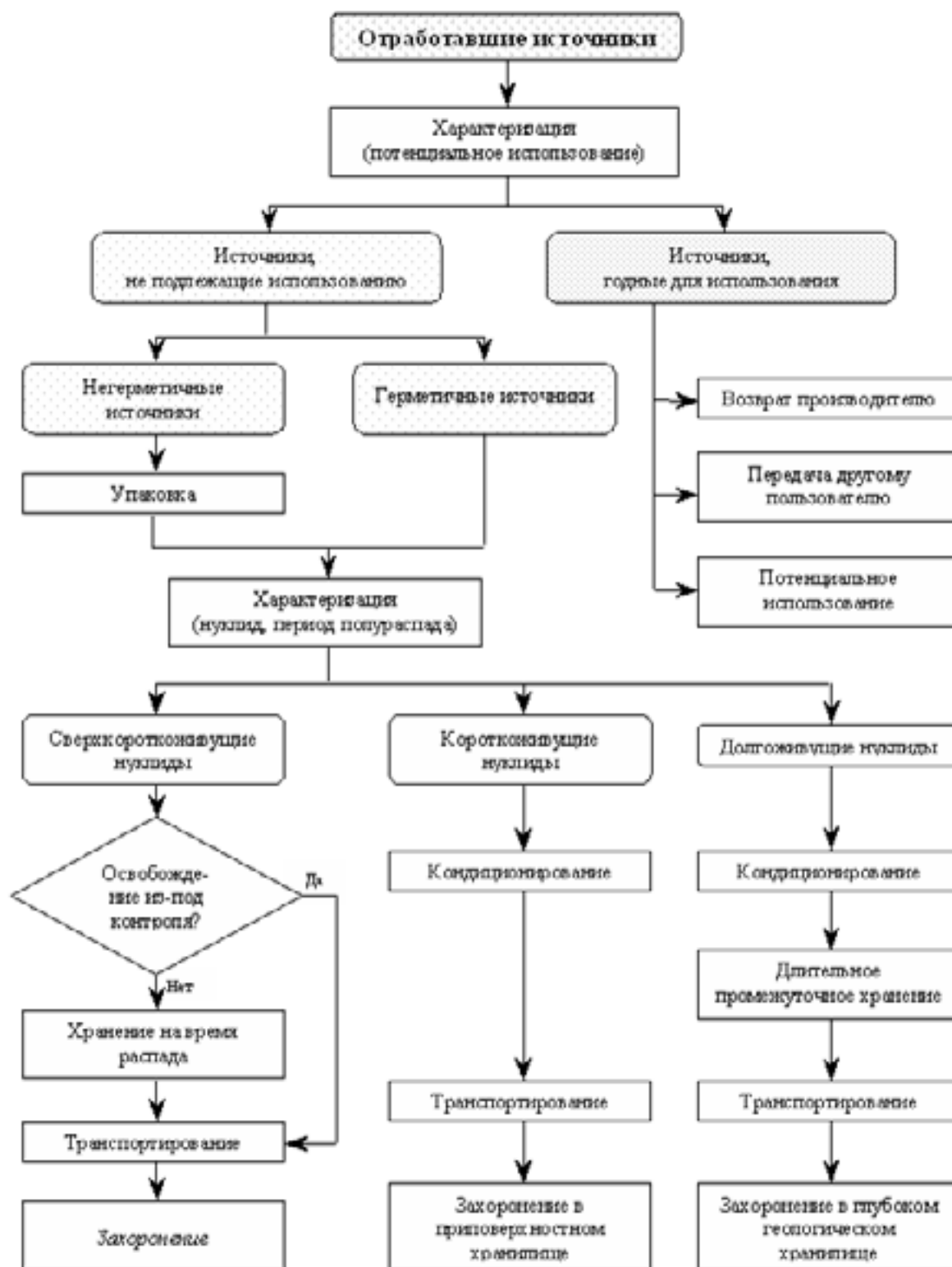


Рис. 13.10. Варианты обращения с отработавшими закрытыми источниками.

### 13.5.1 Передача другому пользователю

Первоначальная активность РНИ выбирается с определенной целью. Когда источник не может использоваться для первоначальной цели, но его эксплуатационные характеристики, включая гарантированный срок эксплуатации, не исчерпаны, то его можно использовать для другой цели. Вариант передачи другому пользователю особенно предпочтителен для использования высокоактивных РНИ, например  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{60}\text{Co}$ . Передача РНИ другим пользователям предоставляет экономические преимущества как в вопросе приобретения, так и в вопросе сокращения числа РНИ, требующих, в конечном итоге, захоронения. Если позволяют обстоятельства, то вопрос о повторном использовании РНИ должен рассматриваться ещё до его закупки. Повторное использование РНИ другим пользователем должно быть одобрено регулирующим органом. Особое внимание надо уделять тому, что передаваемые РНИ действительно находятся в пригодном для эксплуатации состоянии.

### 13.5.2 Возвращение изготовителю/поставщику

Возвращение первоначальному изготовителю/поставщику наиболее приемлемо для высокоактивных источников и РНИ, содержащих долгоживущие радионуклиды. Этот вариант, однако, не применим для многих старых источников, когда неизвестен первоначальный поставщик или он больше не существует. В некоторых случаях возвращению отработавших источников препятствуют финансовые ограничения из-за высокой стоимости упаковки и транспортировки.

Для возвращения отработавших закрытых РНИ поставщикам должны быть установлены определенные правила. Они, например, могут включать следующие меры:

- Покупатель закрытого РНИ, содержащего радиоактивный материал, который будет иметь активность выше 100 МБк после 10 лет со дня его покупки, должен включать в контракт статью, разрешающую возврат источника после истечения срока его эксплуатации, но не позже, чем 15 лет после покупки.
- Иметь копию контракта, в котором оговорено соглашение о возвращении РНИ. Эта копия должна быть представлена регулирующему органу до того как РНИ, удовлетворяющий вышеупомянутому требованию, будет импортирован, или транспортирован потребителю.
- Если покупатель по не зависящим от него обстоятельствам не может обеспечить возвращение РНИ, то отработавший источник может быть послан в ЦООРАО для кондиционирования, хранения и захоронения.

Лучшим механизмом для использования закрытых РНИ является аренда. В соответствии с договоренностью, пользователь никогда не является владельцем РНИ, но арендует его в течение договорного периода времени. Аренду можно рекомендовать пользователям, нуждающимся в РНИ с начальными уровнями активности 100 ГБк или больше, или РНИ, содержащих долгоживущие радионуклиды, т.е. для источников, требующих более чем тысячелетние времена для распада радионуклидов до уровней освобождения.

Закрытые РНИ, возвращаемые поставщикам, должны быть упакованы и отправлены в оригинальных контейнерах. Если оригинальный транспортный контейнер недоступен, необходимо приобрести новый контейнер или заключить контракт на транспортировку со специализированной транспортной организацией. Условия

перевозки отработавших РНИ должны удовлетворять Правилам перевозки радиоактивных материалов МАГАТЭ [13.5].

### 13.5.3 Хранение для распада радионуклидов

Отработавшими РНИ, подлежащими хранению для распада, являются низкоактивные источники, которые содержат очень короткоживущие радионуклиды, например  $^{32}\text{P}$ ,  $^{125}\text{I}$ ,  $^{192}\text{Ir}$ ,  $^{210}\text{Po}$ . В этих РНИ активность может уменьшиться до уровней освобождения от контроля [13.6] в течение разумно-короткого периода времени. Считается, что период хранения 3–5 лет является разумным временем для такого варианта. После распада радионуклидов до уровней активности ниже уровней освобождения эти РНИ могут рассматриваться как нерадиоактивные отходы. Необходимое время хранения (в годах) отработавшего РНИ вычисляется по формуле:

$$t = 1,44 T_{1/2} \ln \left( \frac{Q_0}{Q_i} \right)$$

где  $T_{1/2}$  – период полураспада радионуклида (лет),  $Q_0$  – начальная активность РНИ (Бк),  $Q_i$  – активности освобождения от контроля (Бк). После этого времени РНИ смогут быть захоронены как обычные (нерадиоактивные) отходы. Следует особо отметить, что измерение очень низких активностей достаточно сложная задача, поэтому нужно иметь соответствующее оборудование и приборы, с помощью которых можно подтвердить, что активность источников после распада является ниже уровней освобождения. Уровни освобождения от контроля для некоторых радионуклидов даны в Таблице 13.2.

ТАБЛИЦА 13.2. УРОВНИ ОСВОБОЖДЕНИЯ ОТ КОНТРОЛЯ ДЛЯ НЕКОТОРЫХ РАДИОНУКЛИДОВ

Радионуклид	Период полураспада, дни	Концентрация активности, Бк/г	Активность, Бк
$^{32}\text{P}$	14.3	$1 \times 10^3$	$1 \times 10^5$
$^{125}\text{I}$	59.4	$1 \times 10^3$	$1 \times 10^6$
$^{192}\text{Ir}$	74	$1 \times 10^1$	$1 \times 10^4$
$^{210}\text{Po}$	138	$1 \times 10^1$	$1 \times 10^4$

Все РНИ, предназначенные для хранения, должны удовлетворять следующим требованиям:

- РНИ должен быть упакован таким способом, чтобы целостность упаковки могла быть обеспечена в течение всего запланированного времени хранения. РНИ должны храниться в их оригинальных или предназначенных для хранения контейнерах.
- Каждая упаковка должна быть помечена символом радиоактивности. Идентификационная бирка должна быть прикреплена к контейнеру вместе с заполненной специальной формой.

### 13.5.4 Кондиционирование отработавших источников

Практика показала, что контейнеры и другие защитные приспособления не обеспечивают в достаточной мере безопасность долговременного хранения РНИ. Поэтому для повышения надежности хранения отработавших РНИ необходима их иммобилизация в стабильную матрицу. Цель кондиционирования состоит в том, чтобы

изготовить упаковку отработавших РНИ, приемлемую для безопасного хранения, транспортировки и захоронения. В случае ограниченного количества отработавших РНИ наиболее перспективным методом кондиционирования является технология бетонирования контейнеров с РНИ в 200-л стальной бочке. Цементно-песчаная матрица (бетон) представляет собой дополнительную защиту от излучения, а размеры и механическая прочность упаковки исключают риск неконтролируемого или случайного доступа человека к РНИ. Таким образом, получаемая упаковка может долго удерживать РНИ и препятствовать утечке радионуклидов в окружающую среду. Другим, более надежным методом иммобилизации РНИ является их фиксация в металлическом матричном материале. Металло-иммобилизация может проводиться с использованием предварительно подготовленных стальных капсул или непосредственно внутри хранилищ колодезного типа, что особенно подходит для большого количества РНИ, содержащих долгоживущие радионуклиды.

Кондиционирование РНИ позволяет обеспечить соответствие параметров получаемой упаковки правилам безопасности при транспортировании радиоактивных веществ. Мощность дозы на поверхности упаковки и на расстоянии 1 м от нее должна удовлетворять требованиям, предъявляемым к транспортным упаковкам типа А, к которым относится 200-л бочка. Мощность дозы не должна превышать 2 мЗв/ч на поверхности упаковки и 0,1 мЗв/ч на расстоянии 1 м от нее соответственно [13.5].

### ***Иммобилизация отработавших РНИ в бетон***

Для иммобилизации РНИ в бетон используются два типа бочек. Бочки *1 типа* предназначены для размещения нескольких источников в пригодном по геометрическим размерам контейнере. Бочку заполняют цементно-песчаным строительным раствором до уровня 10 см от верхнего края таким образом, чтобы в середине оставалась полость диаметром 30 см для размещения контейнера или капсулы с РНИ. Дно этой внутренней полости расположено на 1/3 высоты бочки (рис. 13.11). Бочки *2 типа* предназначены для размещения контейнера с РНИ высокой активности. Бочку заполняют цементно-песчаным раствором на 1/3 ее высоты. С целью увеличения прочности упаковки цементно-песчаный раствор армируют стальными стержнями (числом  $\geq 3$  и диаметром 5–10 мм), располагая их по периметру бочки так, чтобы их концы находились на расстоянии 10 см от дна.

После заполнения цементно-песчаным раствором бочки обоих типов выдерживают для отверждения смеси не менее 3-х суток, после чего они готовы для кондиционирования закрытых источников.

### ***Иммобилизация отработавших РНИ в металл***

Из отработавших РНИ, использовавшихся в научных исследованиях, медицине и промышленности, наибольшую проблему представляют отработавшие РНИ, содержащие долгоживущие радионуклиды, такие как, например,  $^{226}\text{Ra}$  ( $^{226}\text{Ra}$  является одним из продуктов распада  $^{238}\text{U}$ ). Дочерним продуктом распада  $^{226}\text{Ra}$  является радиоактивный газ  $^{222}\text{Rn}$ , имеющий период полураспада 3,82 дня. В процессе радиоактивного распада каждого атома  $^{226}\text{Ra}$  выделяется пять ядер гелия, образующихся из альфа-частиц, испускаемых в процессе распада. Таким образом, в закрытых источниках  $^{226}\text{Ra}$  создается избыточное давление, которое составляет 0,2 атмосферы на 1 грамм  $^{226}\text{Ra}$  в год, что при свободном объеме источника, равном 1 см<sup>3</sup>, и в случаях длительного хранения или использования источников может приводить к разрушению оболочек РНИ.



*Рис. 13.11. Бочки 1 типа для иммобилизации закрытых РНИ.*

Кроме того,  $^{226}\text{Ra}$  является щелочноземельным металлом и его соли, например, хлориды, бромиды, сульфаты и карбонаты, на основе которых изготавливались РНИ, растворимы в воде. Так как химические свойства Ra очень близки к свойствам Ca, он накапливается в человеческом организме в костях и обладает очень большим периодом полувыведения, что определяет его высокую радиотоксичность. Металло-иммобилизация является предпочтительным методом для РНИ с долгоживущими радионуклидами. Металло-иммобилизация может выполняться путем помещения РНИ в капсулу из нержавеющей стали (рис. 13.12) и герметизации крышки аргонно-дуговой сваркой [13.7].

Другой метод металло-иммобилизации использует включение РНИ в дополнительную металлическую матрицу внутри капсул из нержавеющей стали [13.8, 13.9]. Данный метод кондиционирования индивидуальных источников имеет ряд существенных преимуществ перед методом герметизации сваркой. Во-первых, он технологически проще и не требует какой-либо специальной аппаратуры. Во-вторых, метод обеспечивает минимальные температурные нагрузки на РНИ, поскольку сплавы имеют низкую температуру плавления (в пределах  $100^\circ\text{C}$ ) и основная масса теплонагруженных операций выполняется без участия РНИ. В-третьих, в дополнение к стенкам капсулы создается дополнительный барьер из металлической матрицы, обладающей высокой коррозионной стойкостью. В-четвертых, высокая способность свинцовых сплавов к пластической деформации дает возможность избежать возникновения внутренних напряжений в матрице, создаваемых избыточным давлением при накоплении гелия.



(a)



(б)

*Рис. 13.12. Капсулы из нержавеющей стали, используемые для металло-иммобилизации РНИ (а), и свинцовый контейнер, используемый для хранения капсул с иммобилизованными РНИ (б).*

Геометрические размеры капсул подбирают с учетом размеров самих РНИ и внутренних камер стандартных контейнеров для хранения РНИ. Для того, чтобы максимально снизить температурное воздействие на РНИ используют предварительно подготовленные капсулы из нержавеющей стали (рис.13.13 (а)) и сплавы на основе свинца с низкой температурой плавления. На стадии подготовки в капсулу заливается расплав и с помощью специального вкладыша формируется внутренняя полость для последующего размещения РНИ. Вкладыш вставляется в капсулу с жидким расплавом и после его застывания удаляется. В подготовленную таким образом капсулу манипулятором помещают РНИ и заливают небольшой порцией расплава, после чего устанавливают крышку. В крышке выполнено дренажное отверстие, предназначенное для выхода излишков расплава из капсулы. Расплав заполняет дренажное отверстие в крышке и после остывания фиксирует ее, препятствуя несанкционированному вскрытию капсулы (рис. 13.13 (б)).



(a)



(б)

*Рис. 13.13. Предварительно подготовленные капсулы, используемые для иммобилизации РНИ (а), и капсула, содержащая кондиционированные источники радия (б).*



Для кондиционирования радиевых стержней используется другая конструкция капсулы (рис. 13.14). В этом случае стержни устанавливают манипулятором в специальный захват на крышке капсулы. В капсулу помещают расплав матричного материала и затем устанавливают крышку капсулы, погружая радиевый стержень в расплав матричного материала. Излишки расплава выходят через дренажное отверстие в крышке и после остывания фиксируют ее.



*Рис. 13.14. Капсулы, используемые для хранения радиевых стержней.*

Капсулы с металло-иммобилизованными РНИ (заваренные или залитые расплавом) помещаются в свинцовый контейнер (рис. 13.12,б), который, в свою очередь, помещается внутрь 200-литровой стальной бочки (рис.13.11).

### ***Обращение с высокоактивными РНИ***

Для кондиционирования РНИ с высокой активностью, которые обычно содержатся в устройствах с мощной биологической защитой, вышеописанные методы не являются подходящими. Они иммобилизуются на ЦООРАО в унифицированных железобетонных контейнерах (рис. 13.15) или непосредственно в подземных хранилищах колодезного типа [13.10]. РНИ разгружают из транспортного контейнера 1 в специальную капсулу, помещенную в защитный контейнер 4 (рис. 13.15, I). По мере заполнения капсулы РНИ послойно заливают расплавом легкоплавкого сплава, который, застывая, изолирует источники от внешней среды (рис. 13.15, II). Сбор источников в капсулу и последующее хранение заполненного защитного контейнера осуществляется в хранилище для твердых радиоактивных отходов (рис. 13.15, III).

Основными элементами описанной технологической схемы являются узел сбора отработавших РНИ, включающий переходный модуль (2) и защитный контейнер (4), электроплавитель с дозатором (5) и система газоочистки (6).

Для иммобилизации РНИ в типовых подземных хранилищах колодезного типа используют специализированную мобильную установку, подготавливающую хранилище, иммобилизующее РНИ и обеспечивающее безопасные условия во время технологической операции иммобилизации (рис. 13.16).

Для иммобилизации РНИ используют сплавы свинца или свинец, обладающий очень низкой скоростью коррозии в грунтовых водах и обеспечивающий надежную иммобилизацию радионуклидов на сроки свыше 500 лет без загрязнения окружающей среды токсическими соединениями [13.11, 13.12].

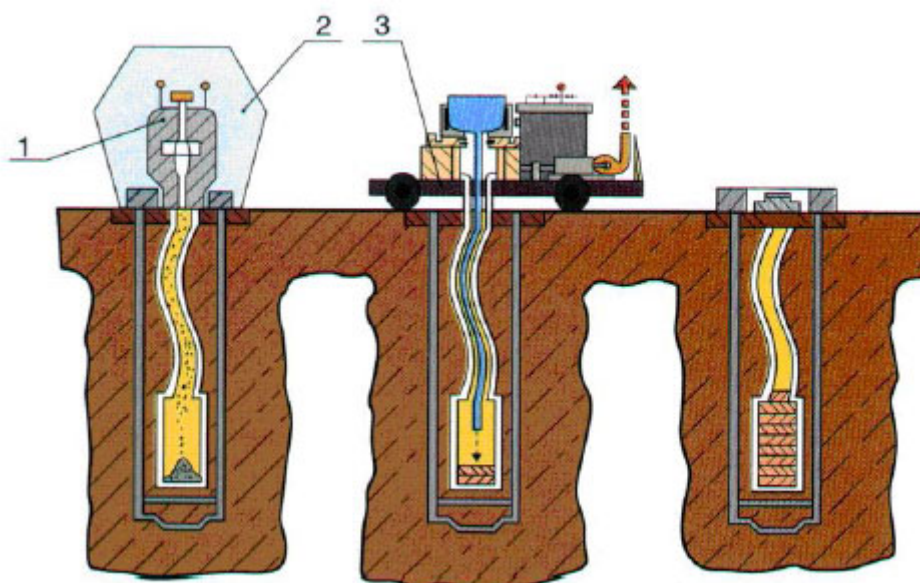
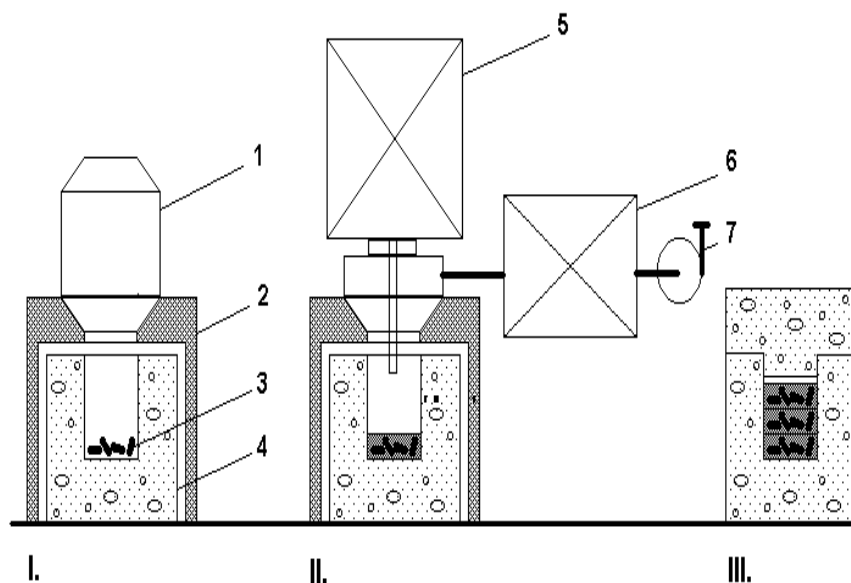
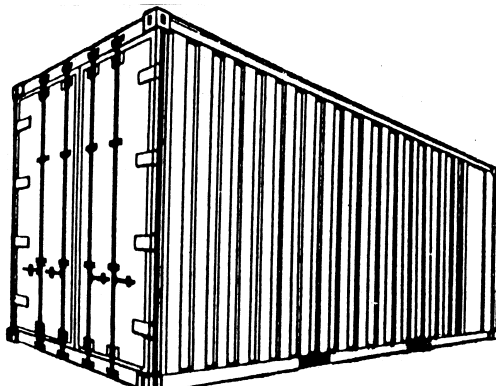


Рис. 13.16. Схема металло-иммобилизации РНИ в типовых хранилищах колодезного типа. 1 – транспортный контейнер, 2 – система газоочистки, 3 – технологический модуль.

### 13.5.5 Временное хранение кондиционированных РНИ

Главная цель хранения кондиционированных радиоактивных отходов состоит в том, чтобы обеспечить безопасные условия для упаковок отходов и защитить персонал и население от любых радиологических опасностей. Такая цель может быть достигнута, если условия хранения контролируются, упаковки можно извлечь и возможно регулярное обслуживание хранилища.

Самым простым хранилищем может быть большой транспортный контейнер (рис. 13.17,а). Другим способом хранения может быть возведение простого здания на поверхности земли, имеющего стальную несущую конструкцию (рис. 13.17,б).



(а)



(б)

Рис. 13.17. Транспортный контейнер (а) и общий вид здания временного хранения отходов (б).

### 13.5.6 Захоронение

Захоронение – заключительный шаг в схеме обращения с радиоактивными отходами. Оно заключается, главным образом, в размещении радиоактивных отходов в предназначенное для этой цели хранилище (могильнике) без намерения их извлечь в будущем при обеспечении разумных гарантий безопасности и не требующего долгосрочного наблюдения и обслуживания. В зависимости от типа радиоактивных отходов могут использоваться приповерхностные хранилища и хранилища в глубоких геологических формациях [13.13-13.15]. Однако для многих источников использование приповерхностного захоронения ограничено из-за высокой удельной активности радионуклидов. В принципе, приповерхностное захоронение подходит для короткоживущих радионуклидов с низкой или средней активностью. РНИ, содержащие долгоживущие радионуклиды в больших количествах, а также РНИ, которым из-за высокой активности радионуклидов необходимы тысячелетние сроки для распада до уровней освобождения, подлежат захоронению на относительно больших глубинах или в глубоких геологических хранилищах [13.16].

## ЛИТЕРАТУРА

- [13.1] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Nature and Magnitude of the Problem of Spent Radiation Sources, IAEA-TECDOC-620, Vienna (1991).
- [13.2] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, International Basic Safety Standards for Protection against Ionising Radiation and for the Safety of Radiation Sources, Safety Series No. 115, IAEA, Vienna (1996).
- [13.3] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Establishing a National System for Radioactive Waste Management, Safety Standard No. 111-S-1, IAEA, Vienna (1995).
- [13.4] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Handling, Conditioning and Storage of Spent Sealed Radioactive Sources, IAEA-TECDOC-1145, Vienna (2000).
- [13.5] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Regulations for the Safe Transport of Radioactive Material (1996 Edition), Safety Standards No. ST-1, IAEA, Vienna (1996).
- [13.6] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Clearance Levels For Radionuclides In Solid Materials (Application of exemption principles-Interim report for comment 1996), IAEA-TECDOC-855, Vienna (1996).
- [13.7] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Conditioning and Interim Storage of Spent Radium Sources, IAEA-TECDOC-886, Vienna (1996)
- [13.8] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Handling, Conditioning and Disposal of Spent Sealed Sources, IAEA-TECDOC-548, Vienna (1990).
- [13.9] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Management of Disused Long Lived Sealed Radioactive Sources (LLSRS), IAEA-TECDOC-1357, Vienna (2003).
- [13.10] M.I. Ojovan, W.E. Lee, I.A. Sobolev, O.K. Karlina, A.E. Arustamov. Metal matrix immobilisation of sealed radioactive sources for safe storage, transportation and disposal. Proc. Int. Conf. WM'04, Tucson, Arizona, USA, 4085.pdf (2004).
- [13.11] M.I. Ojovan, A.V. Gouskov, L.B. Prozorov, A.E. Arustamov, P.P. Poluektov, B.E. Serebriakov. Safety assessment of bore-hole repositories for sealed radiation sources disposal. Mat. Res. Soc. Symp. Proc., 608, 141-146 (2000).
- [13.12] M.O. Gallerand. Methodology of chemical safety assessment of radioactive waste disposal with an example presented for the Centre de l'Aube low level radioactive waste (LLW) repository. Proc. Int. Conf. WM'01, Tucson, Arizona, USA, CD-ROM (2001).
- [13.13] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Scientific and Technical Basis for Near-Surface Disposal of Low and Intermediate Level Waste, Technical Reports Series No. 417, IAEA, Vienna (2003).
- [13.14] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Scientific and technical basis for geological disposal of radioactive wastes. Technical Reports Series No. 413. IAEA, Vienna (2003).
- [13.15] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Safety Considerations in the Disposal of Disused Sealed Radioactive Sources in Borehole Facilities, IAEA-TECDOC-1368, Vienna (2003).
- [13.16] R.Dayal, J.M. Potier. Disposal of disused radioactive sources. Radwaste Solutions, July/August, 39-47 (2004).

## **14 ОРГАНИЗАЦИЯ И ТРЕБОВАНИЯ К ДОЛГОСРОЧНОМУ ХРАНЕНИЮ КОНДИЦИОНИРОВАННЫХ РАДИОАКТИВНЫХ ОТХОДОВ**

### **14.1 ВВЕДЕНИЕ**

Современная система обращения с радиоактивными отходами разработана при использовании интегрированного подхода, который рассматривает обеспечение безопасности на всех этапах обращения с отходами в целом, а не по отдельным элементам. В зависимости от типа и вида отходов основными этапами обращения с радиоактивными отходами могут быть: предобработка, обработка, кондиционирование, хранение, транспортирование и захоронение. Взаимосвязь между различными этапами обращения с отходами важна и должна быть принята во внимание при рассмотрении любого этапа. Кондиционирование радиоактивных отходов включает такие операции, которые преобразовывают исходные радиоактивные отходы в форму, приемлемую для хранения, перемещения, транспортирования и захоронения. Однако если захоронение упаковок не может быть осуществлено сразу после кондиционирования, требуется обеспечить их хранение до тех пор, пока отходы могут быть захоронены. Хранение должно быть организовано таким образом, чтобы гарантировать целостность упаковок и их пригодность для будущего захоронения.

### **14.2 ПРИНЦИПЫ БЕЗОПАСНОСТИ ХРАНЕНИЯ ОТХОДОВ**

Проектирование и эксплуатация временных хранилищ отходов должны удовлетворять основным принципам обращения с радиоактивными отходами [14.1] и нормам безопасности, разработанным МАГАТЭ для защиты человека и окружающей среды от ионизирующего излучения [14.2]. Последние основаны на рекомендациях, которые были опубликованы Международной Комиссией по Радиологической защите (МКРЗ) [14.3]. В совокупности и принципы, и нормативные рекомендации определяют национальную систему обращения с отходами, неотъемлемой частью которой является временное хранение. Хранение радиоактивных отходов, подобно всем другим этапам обращения с отходами, должно удовлетворять принципам радиологической защиты [14.3]:

- Облучение при нормальных условиях работников и населения должно быть ограничено и не превышать установленные пределы доз;
- Практика обращения с радиоактивными отходами должна быть оптимизирована, так чтобы обеспечить максимальную эффективность реализации, при этом облучение должно быть настолько мало, насколько это практически достижимо (ALARA – от “as low as reasonable achievable”).

Национальный регулирующий орган, такой как ГАН (Госатомнадзор) в России или EPA (Environmental Protection Agency) в США может устанавливать дополнительные ограничения на процесс обращения с отходами в отношении их хранения. Например, требования для обращения с радиоактивными отходами, содержащими опасные химические или биологические вещества, могут включать дополнительные требования и ограничения на временное хранение, включая требования к проекту хранилища и требования к административному контролю над перемещением отходов.

Государственным регулирующим органом должен применяться последовательный подход к обеспечению безопасности всех ядерных установок,

включая хранилища радиоактивных отходов, так чтобы гарантировать соблюдение международных и национальных требований безопасности.

Эксплуатация любой установки, включая хранилища отходов, должна осуществляться в соответствии с результатами оценки безопасности, которая включает тщательное рассмотрение таких сценариев как: 1) выбор площадки и других параметров проекта, относящихся к безопасности; 2) потенциальные аварийные ситуации и меры, принимаемые для того чтобы ограничить их последствия; 3) условия для наблюдения и периодической переоценки безопасности хранилища. В частности, при оценке безопасности рассматриваются как безопасность отдельной упаковки отходов, так и хранилища в целом. Кроме того, требования промышленной безопасности также должны учитываться при проектировании и эксплуатации хранилищ.

Хранилища отходов должны функционировать как интегральная часть общей системы обращения с отходами. Процесс лицензирования хранилища, включая оценку безопасности и оценку воздействия на окружающую среду, должен быть составной частью системы обращения с отходами [14.4].

### 14.3 ТРЕБОВАНИЯ К УПАКОВКАМ ОТХОДОВ

Существует широкое разнообразие возможных упаковок и контейнеров для радиоактивных отходов, которые могут применяться на разных предприятиях и в различных учреждениях, использующих радиоактивные материалы [14.5, 14.6]. Есть специфические конструкции упаковок, отвечающие специфическим условиям или требованиям. Однако в единой системе обращения с радиоактивными отходами целесообразно принятие стандартных контейнеров для обеспечения унифицированной системы перемещения, погрузки, выгрузки, складирования и хранения упаковок радиоактивных отходов. В качестве контейнеров для радиоактивных отходов наиболее часто применяются стальные 200-литровые бочки и железобетонные контейнеры. Изготовитель упаковки должен обеспечить ее определенное качество, отвечающее целому набору технических требований, накладываемых при перемещении, хранении, транспортировании и захоронении отходов. Часто хранение может длиться в течение многих лет (до 50 лет) и в течение всего этого времени упаковки должны сохранять свою целостность, прочностные характеристики и быть пригодными для транспортирования и захоронения без дополнительного кондиционирования.

Упаковки отходов, направляемые на хранение, должны соответствовать критериям приемлемости (WAC – “waste acceptance criteria”) для хранения, которые могут быть комбинацией критериев приемлемости отходов для захоронения, требований правил перевозки и дополнительных требований, наложенных на них условиями хранения. Типичные критерии включают широкий набор физических, химических, и радиологических параметров, необходимых для безопасных операций с упаковками. Так как некоторые упаковки могут иметь ограниченное время жизни (в зависимости от условий хранения и качества самой упаковки), критерии приемлемости играют важную роль для обеспечения пригодности упаковок к транспортированию по окончании планируемого срока хранения.

При разработке критериев приемлемости надо иметь в виду, что они эффективны только тогда, когда их возможно контролировать. Ввиду этого методы определения соответствия ключевых параметров предъявляемым требованиям являются

необходимой частью формирования критериев приемлемости. Критерии приемлемости можно разделить на три группы:

- Критерии, обеспечивающие безопасность. Они основаны на оценке эксплуатационной и долговременной безопасности и включают в себя, прежде всего, радиационные требования.
- Критерии технические. Они предусматривают, прежде всего, требования удобства обращения и манипуляций с упаковками.
- Критерии административные (формальные). Они необходимы для идентификации и хранения информации об отходах.

Некоторые из этих критериев приведены в таблице 14.1.

ТАБЛИЦА 14.1. КРИТЕРИИ ПРИЕМЛЕМОСТИ ОТХОДОВ ДЛЯ ХРАНЕНИЯ

Тип критериев	Описание критериев
Безопасности	Предельная удельная активность ( $\alpha, \beta, \gamma$ ) Мощность дозы на поверхности упаковки Предельное поверхностное загрязнение Ограничение газовыделения Химический состав отходов (агрессивные и токсические вещества) Предельная концентрация токсических веществ Предельная концентрация пирофорных веществ Предельное количество свободной жидкости в упаковке Предельная масса расщепляющихся материалов
Технические	Стандартная упаковка (совместимость с манипуляционными и транспортными средствами, приспособления для захвата) Механическая стабильность упаковки при манипуляции Механическая стабильность упаковки при штабелировании Предельный вес Предельное внутреннее давление Допустимый свободный объем упаковки Целостность упаковки
Административные	Индивидуальная идентификация упаковок Аттестат упаковки Регистрация информации об упаковках и их размещении Система учета и контроля

Так как упаковка отходов состоит из отходов (в основном иммобилизованных в цемент, битум, полимер или стекло) и контейнера, технические требования к упаковке в целом и отдельным ее элементам могут быть различными. Критерии приемлемости учитывают информацию об упаковках, материалах из которых они изготавливаются, химическом и радиационном составе отходов, свойствах иммобилизующих матриц, и их взаимодействие.

Дополнительные ограничения на упаковку могут быть обусловлены специфическими условиями временного хранения или захоронения. Например, предельная нагрузка на пол и размеры входных дверей могут ограничивать размер упаковки и вес при временном хранении, но не при захоронении. Если имеется могильник для захоронения со своими критериями приемлемости, они сравниваются с критериями, накладываемыми временным хранением, и выбираются единые критерии путем использования консервативного подхода.

## 14.4 ТРЕБОВАНИЯ К ХРАНИЛИЩАМ

### 14.4.1 Проектные требования

Главные функции хранилища кондиционированных радиоактивных отходов - обеспечить безопасное хранение упаковок отходов и защитить как персонал, так и население от любых радиологических опасностей, связанных с радиоактивными отходами при хранении. Проект хранилища должен удовлетворять национальным регулирующим требованиям и основным принципам безопасности, представленным в [14.1, 14.2]. Хранилище должно обеспечить сохранение целостности упаковки отходов до отправки её на захоронение. Оно должно защитить отходы от влияния окружающей среды, включая действие влаги, тепла и холода, или любого другого состояния окружающей среды, которое могло бы привести к деградации формы отходов или контейнера. Локальные климатические условия, которые могут повлиять на сохранность и качество упаковок должны приниматься во внимание во избежание такого негативного влияния.

Требования хранения определяют максимальные уровни мощности дозы и пределы наружного загрязнения для упаковок отходов. Хранилище должно обеспечить минимальное облучение персонала путем применения биологической защиты и ограничения несанкционированного доступа.

В хранилище может быть предусмотрена зона для осмотра, сортировки, неразрушающего контроля, сертификации и маркировки упаковок отходов. Хранилище обычно разделяется на области, в которых хранятся разные по свойствам упаковки, например: упаковки с низкими контактными мощностями дозы, и упаковки с высокими контактными мощностями дозы. Проект хранилища обычно позволяет накопление упаковок, сортировку и визуальный осмотр. Условие для поддержания хранения базы данных по “цепочке хранения” для каждой упаковки, поступившей на хранение, должно быть включено в проект. Ключевая информация относительно упаковки должна содержать количество, вид и активность радионуклидов, тип матрицы, используемой для иммобилизации, метод обработки и метод кондиционирования и индивидуальную идентификацию упаковки. Информация об упаковке должна следовать за упаковкой от момента кондиционирования до окончательного захоронения.

Хранилище должно быть спроектировано таким образом, чтобы обеспечить контроль любого возможного радиоактивного загрязнения как внутри хранилища, так и вне его. Вентиляция может потребоваться, чтобы решить проблему газообразования в процессе нормальной эксплуатации или при возможных аварийных ситуациях. Кроме того, должны быть предусмотрены меры противопожарной безопасности и средства для дезактивации индивидуальных контейнеров и поверхностей хранилища, а также меры по ликвидации последствий аварийных ситуаций.

При проектировании хранилища должно быть учтено следующее:

- Хранилище должно располагаться выше уровня грунтовых вод и вне затопляемых областей.
- Загрузка, хранение и извлечение отходов должны планироваться в соответствии с принципом ALARA.
- Вместимость хранилища должна быть такой, чтобы принять максимальное количество отходов, ожидаемое от системы, которую оно обслуживает.



- Должно быть обеспечено соответствующее оборудование для перемещения упаковок между операционными и запасными модулями.
- Ясная идентификация хранимых упаковок и их регистрация.
- Условия для осмотра и контроля хранимых отходов.
- Создание адекватного состояния среды хранения (температура и влажность).
- Охлаждение тепловыделяющих отходов.
- Контроль критичности, если присутствуют делящиеся материалы.
- Предотвращение несанкционированного доступа.
- Удобство извлечения отходов для захоронения или в аварийных ситуациях.
- Доступность обслуживания.

#### **14.4.2 Эксплуатационные требования**

Операции, которые будут выполняться в хранилище, включают получение, загрузку, контроль целостности, извлечение и подготовку к отправке упаковок отходов. Операции в хранилище по существу пассивны в течение длительного периода времени вплоть до извлечения отходов для захоронения (наиболее вероятно оптом). Все операции, связанные с хранением, должны выполняться в соответствии с письменно утвержденными процедурами.

##### ***Получение***

Получение отходов должно планироваться заранее. Администратор хранилища должен изучить всю доступную информацию, подтверждающую, что упаковки соответствуют требованиям, установленным для конкретного хранилища. Если упаковки не соответствуют критериям приемлемости, причины несоответствия должны быть зарегистрированы, а документы возвращены отправителю для получения объяснения или с запросом о дополнительной информации. В случае внешнего загрязнения, упаковка должна быть дезактивирована и повторно проверена перед выдачей разрешения на временное хранение.

##### ***Загрузка***

При получении отходов, оборудование, необходимое для транспортировки упаковок к хранилищу и внутри хранилища, должно быть выбрано и подготовлено для работы. Оператор хранилища должен подготовить документацию для регистрации полученных отходов. Оператор должен знать методы и средства радиологической защиты, которые следует применять при обращении с упаковками. Должно быть определено и зарегистрировано место расположения упаковки в хранилище.

Отходы разных категорий должны храниться отдельно. При хранении необходимо обеспечить условия для периодического осмотра упаковок, для определения возможной деградации контейнеров, для облегчения поиска и идентификации контейнеров. В случае, если имеются категории отходов, которые требуют специальных условий хранения, хранилище должно предусматривать наличие и обеспечение таких условий.

### ***Контроль состояния упаковок***

В течение всего времени хранения периодические осмотры упаковок должны производиться персоналом для контроля состояния упаковок. Частота контроля зависит от количества и типов упаковок отходов.

### ***Извлечение и отправка***

После получения запроса на извлечение упаковки из хранилища, администратор хранилища должен получить детальную спецификацию упаковки из регистрационных записей и передать их соответствующей стороне. Если данные в порядке, упаковку можно извлечь из хранилища. Как только администратор хранилища разрешил отправку упаковки, упаковка извлекается из хранилища и отправляется на место подготовки к отправке. Здесь упаковку проверяют на мощность дозы и поверхностное загрязнение. Результаты измерений передаются транспортной организации и той организации, в которую упаковка отправляется. В регистрационных документах хранилища отмечается дата отправки и место назначения.

#### **14.4.3 Оценка безопасности хранилищ**

Оценка безопасности должна быть выполнена как часть процесса лицензирования, чтобы продемонстрировать, что хранилище удовлетворяет регулирующим требованиям. В частности, оценка должна продемонстрировать, что дозы и риски остаются в пределах установленных пределов и удовлетворяют принципу ALARA. Безопасность должна быть оценена как для нормальных условий эксплуатации, так и для предполагаемых аварийных условий. Оценка безопасности должна предусматривать инциденты, являющиеся результатом внутренних процессов, например, пожара внутри помещения, падение упаковок, разрушение контейнера и т.д., и внешних событий (падение самолета, транспортные аварии вдали от установки, землетрясения, ураганы и внешние пожары).

#### **14.4.4 Обеспечение качества**

Программа обеспечения качества для хранилищ включает такие элементы, как контроль проектирования, независимая проверка, контроль сбора данных и программного обеспечения, спецификации упаковок и контроль поставок [14.7]. Программа обеспечения качества также оценивает:

- квалификацию персонала,
- качество материалов и процессов, включая взаимосвязи между иммобилизацией отходов, кондиционированием и хранением;
- процедуры приема, учета, перемещения и др.;
- контроль состояния упаковок и других эксплуатационных параметров, влияющих на безопасность;
- методы наблюдения и контроля;
- идентификацию критических областей для инспекций; и
- контроль измерительного оборудования.

Многолетний опыт показал, что любая система, без ее поддержания в рабочем состоянии, деградирует со временем. Периодический анализ и контроль системы является важной частью программы качества, потому что позволяет оценить

эффективность принятых мер безопасности, а также способствует усовершенствованию системы в случае необходимости.

## 14.5 ХРАНИЛИЩА ОТХОДОВ

### 14.5.1 Тип хранилищ

Хранилища отходов, которые использовались раньше или используются в настоящее время, подразделяются на общие категории:

- Открытые хранилища,
- Инженерные хранилища.

*Открытое хранение* состоит из размещения упаковок отходов на поверхности земли или на твердом основании под открытым небом или под простой крышей при условии, что герметичность упаковок обеспечена. Открытое хранение может рассматриваться для упаковок, обладающих повышенной устойчивостью к атмосферному воздействию. Этот метод хранения, ранее применявшийся в некоторых странах, в настоящее время приемлемым для радиоактивных отходов в основном не считается.

*Инженерное хранилище* – здание или иная структура (подземная), специально спроектированная и построенная для хранения кондиционированных отходов. Инженерные хранилища варьируются от простого здания до сложного инженерного сооружения со встроенной биологической защитой, системами вентиляции и охлаждения, дистанционным управлением перемещения упаковок и контролем радиационной обстановки.

### 14.5.2 Перемещение упаковок

Упаковки отходов могут перемещаться:

- вручную (для маленьких упаковок с очень низкой мощностью дозы на поверхности);
- механическим погрузчиком с приспособлениями для захвата контейнеров;
- подъемным краном с ручным управлением и с приспособлениями для захвата контейнеров;
- дистанционно управляемым подъемным краном, иногда с автоматизированным телескопическим подъемником и системой слежения;
- дистанционно управляемым транспортным средством.

### 14.5.3 Загрузка

Упаковки отходов могут располагаться на полках или внутри стеллажей. Бочки обычно ставят друг на друга, однако вертикальное размещение ограничивается прочностью контейнеров, расположенных внизу. В качестве альтернативы цилиндрические упаковки могут располагаться на боку или быть сгруппированы на поддонах.

#### 14.5.4 Регистрация

Регистрация упаковок в хранилище включает определение их индивидуального расположения в хранилище и детальную информацию о составе и свойствах. Эта информация должна сохраняться на все время хранения и передаваться с передачей отходов на захоронение. Очень важно дублирование регистрационной информации на случай повреждения или потери как электронных баз данных, так и журнальных регистраций.

#### 14.5.5 Возможная деградация упаковок в течение хранения

Опыт временного хранения упаковок показал, что при несоблюдении всех требований и надлежащих условий хранения, качество упаковок, принятых на хранение, может деградировать со временем. Возможные механизмы деградации упаковок были исследованы и объяснены, что позволяет избежать повторения ошибок в будущем. Были обнаружены следующие механизмы деградации форм отходов, контейнеров и упаковок:

- деградация контейнеров из-за дефектов во время изготовления или взаимодействия с формами отходов;
- деформация или полное разрушение контейнеров из-за внутреннего давления образующихся газов;
- физические изменения форм отходов (расширение битумной матрицы, образование жидкой фазы, полное разрушение формы отходов, ведущее к образованию пустот в упаковке);
- увеличение локальной мощности дозы из-за внутренней миграции радионуклидов;
- ускоренное разрушение контейнера из-за механических повреждений во время перемещений;
- ускоренное разрушение стальных контейнеров из-за коррозии;
- ускоренное разрушение стальных контейнеров из-за гальванических реакций.

Все вышеперечисленные явления необходимо принимать во внимание при формировании требований к упаковкам и требований к условиям хранения, учитывая при этом свойства отходов, свойства иммобилизирующих матриц, свойства контейнеров и упаковок.

### 14.6 ПРИМЕР ВРЕМЕННОГО ХРАНИЛИЩА

В качестве примера на рисунке 14.1 показано хранилище для отработавших закрытых радионуклидных источников и твердых радиоактивных отходов в Московском НПО “Радон”.

Кондиционированные радиоактивные отходы низкого и среднего уровня активности хранятся в 200-л бочках.

Хранение радионуклидных источников, содержащих короткоживущие радионуклиды, осуществляется в хранилищах колодезного типа. Источники иммобилизуются в металлические матричные материалы непосредственно в подземных резервуарах, что обеспечивает безопасность их хранения на пятисотлетний срок и выше.

Временное хранение радионуклидных источников, содержащих долгоживущие радионуклиды, проводится в железобетонных отсеках глубиной и шириной по 1 м, длиной 90 м, перекрытые сверху железобетонными плитами толщиной 0,4 м. Источники хранятся в стальных контейнерах.

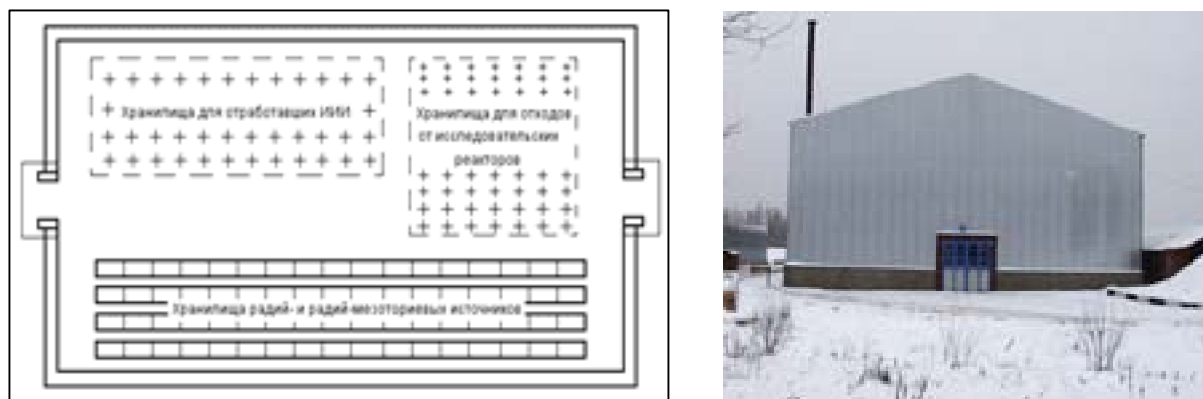


Рис. 14.1. Планировка (слева) и внешний вид (справа) хранилища для радиоактивных отходов.

Эксплуатационные отходы реакторов исследовательских центров, такие как отработанные ионообменные смолы, фрагменты конструкционных материалов хранятся в первичной упаковке. На месте образования эти отходы помещают в стальные контейнеры, снабженные герметичной крышкой и приспособлением для захвата грузоподъемным устройством. Хранилище этих отходов (рис. 14.2) имеют вид скважин-колодцев глубиной 4 м, диаметром от 200 до 400 мм, расположенных в бетонном монолите и закрытые железобетонными пробками высотой 0,9 м. Расстояние между хранилищами в монолите – 0,5 м.

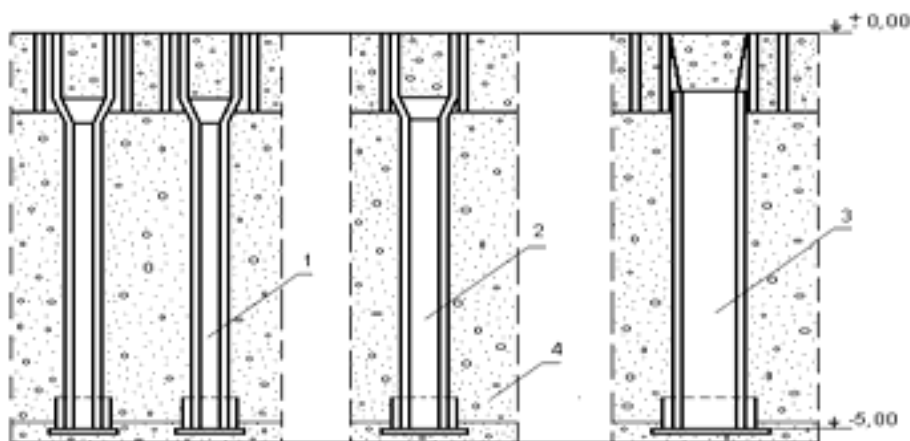


Рис. 14.2. Хранилище для высокоактивных отходов (1 – хранилище для упаковок диаметром 200 мм; 2 – хранилище для упаковок диаметром 300 мм; 3 – хранилище для упаковок диаметром 400 мм, 4 – бетонный монолит).

Основными защитными барьерами хранилища отходов исследовательских реакторов служат первичная упаковка отходов (металлический герметичный контейнер с толщиной стенки 5 мм), конструкционные элементы хранилища (стальной стакан с толщиной стенки 10 мм), бетонный монолит и ленточный фундамент здания.

Радиационный контроль в хранилище осуществляется посредством радиометрических измерений проб воды в контрольных скважинах за пределами здания, и воздуха, а также измерением мощности экспозиционной дозы. Общий объем хранилищ – 190 м<sup>3</sup>.

### ЛИТЕРАТУРА

- [14.1] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, The Principles of Radioactive Waste Management, Safety Series No. 111-F, IAEA, Vienna (1995).
- [14.2] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, International Basic Safety Standards for Protection against Ionising Radiation and for the Safety of Radiation Sources, Safety Series No.115-1, IAEA, Vienna (1994).
- [14.3] INTERNATIONAL COMMISSION ON RADIATION PROTECTION, 1990 Recommendations of the International Commission on Radiation Protection, Publication No.60, Ann. ICRP 21 1-3, Pergamon Press, Oxford and New York (1991).
- [14.4] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Storage of Radioactive Waste, IAEA-TECDOC-653, Vienna (1992).
- [14.5] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Containers for Packaging of Solid Low and Intermediate Level Radioactive Wastes, Technical Reports Series No. 355, IAEA, Vienna (1993).
- [14.6] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Interim Storage of Radioactive Waste Packages, Technical Reports Series No. 390, IAEA, Vienna (1998).
- [14.7] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Quality Assurance for Radioactive Waste Packages, Technical Reports Series No. 376, IAEA, Vienna (1995)

## 15 СПОСОБЫ ЗАХОРОНЕНИЯ ОТХОДОВ НИЗКОГО И СРЕДНЕГО УРОВНЯ АКТИВНОСТИ

### 15.1 ПРИНЦИПЫ ЗАХОРОНЕНИЯ ОТХОДОВ

Согласно глоссарию МАГАТЭ “Radioactive Waste Management Glossary”, IAEA, Vienna, 1993, захоронение – это размещение отходов в санкционированное, специальное сооружение (могильник) без намерения его извлечения. Словарь безопасности МАГАТЭ (“Safety glossary”, 2001) подчеркивает, что отсутствие намерения извлечения не означает его невозможность. Реализация возможности извлечения может стать актуальной, например, когда статус могильника меняется на хранилище радиоактивных отходов. “Захоронение” может подразумевать санкционированный прямой сброс предварительно разбавленных жидкостей и газов в окружающую среду, однако эта тема в данной главе не рассматривается.

Захоронение отходов преследует две цели:

- Защитить человека и окружающую среду от вредного воздействия радиоактивных отходов;
- Разместить отходы таким способом, чтобы возможные негативные последствия такого захоронения для будущих поколений были сведены к минимуму.

Значительные исследования на национальном уровне были посвящены переводу этих целей в конкретные требования, принципы и критерии безопасности. Эти цели могут быть достигнуты путем изоляции отходов на время, достаточное для распада радионуклидов до незначительных уровней активности. Общеизвестно, что для такой изоляции необходимо применение концепции многобарьерной защиты [15.1-15.9]. В данном случае барьер – это средство, которое замедляет или предотвращает миграцию радионуклидов из отходов и/или хранилища в окружающую среду. Так, естественными защитными барьерами являются геологические породы, в которых размещены могильники – глины, базальт, гранит, соляные отложения, песчаник и т.д. Технические защитные барьеры представляют собой инженерные элементы конструкции могильника, упаковки отходов и сами иммобилизованные формы радиоактивных отходов. Сочетание системы барьеров значительно повышает надежность захоронения.

### 15.2 ТИПЫ ЗАХОРОНЕНИЙ

К захоронению принимаются отходы в твердой форме. Это означает, что жидкие радиоактивные отходы иммобилизуются в твердую матрицу и кондиционируются в соответствующую упаковку перед захоронением. МАГАТЭ в [15.1] дает в качестве вариантов следующие типы захоронений:

- (1) *Глубоководное* (в контейнерах, на морском дне на глубине около 1000 м.). Осуществлялось до 1982 года согласно Лондонской конвенции (1975) и рекомендациям МАГАТЭ, под контролем NEA OECD (см. обзор [15.2]). С 1983 года такие захоронения отходов запрещены.
- (2) *Геологическое*. Предполагает изоляцию отходов в инженерных сооружениях в стабильных геологических формациях на глубине нескольких сотен метров. Предназначено, главным образом, для захоронения высокоактивных и долгоживущих радиоактивных отходов.

- (3) *Приповерхностное*. Предполагает размещение отходов в инженерных сооружениях на поверхности или ниже поверхности земли, а также в шахтах на глубине несколько десятков метров от поверхности. Предназначено для захоронения короткоживущих, низко и среднеактивных отходов.
- (4) *В глубинные отложения морского дна*. Предполагало размещение контейнеров с отходами в осадочные породы морского дна на глубине нескольких тысяч метров.
- (5) *Под морским дном*. Подразумевает размещение отходов в инженерных сооружениях, расположенных в коренных подстилающих породах прибрегового морского дна, с доступом с побережья.

Основные типы захоронения радиоактивных отходов, которые сейчас применяются или интенсивно разрабатываются, это приповерхностное захоронение и захоронение в глубокие геологические формации. При обращении с низко и среднеактивными отходами, которые содержат преобладающе недолгоживущие радионуклиды, принимается во внимание, что опасность отходов после относительно небольшого периода времени (нескольких сотен лет) уменьшится до уровня, при котором нет никакого остаточного риска для человеческого здоровья или окружающей среды. За это время большинство радионуклидов распадется, уменьшая или устраняя риск, связанный с любым возможным отказом (разрушением) удерживающих барьеров. Поэтому для низко и среднеактивных короткоживущих отходов наибольшее развитие во всем мире получил метод приповерхностного захоронения.

По данным МАГАТЭ в 1997 году метод приповерхностного захоронения применялся для захоронения низко и среднеактивных отходов в 37 странах [15.3]. Примерами эффективного применения данного метода могут служить опыт эксплуатации хранилищ приповерхностного типа в Эль Кабриле (El Cabri) в Испании, Центрах Ля Манш (Centre de la Manche, закрыт) и Ля Об (Centre de l'Aube) во Франции, Битти (Beatty, Невада, закрыт), в США, Дуковани (Dukovany) в Чехии, Роккашо (Rokkasho) в Японии, Дригге (Drigg) в Великобритании, Олкилуото (VLJ, Olkiluoto) в Финляндии. В тоже время накоплен большой опыт захоронения низко и среднеактивных отходов в геологических формациях в Германии (шахты Ассе и Морслебен), долгоживущих (трансурановых) отходов в США (хранилище WIPP).

Захоронение в глубинные отложения морского дна может рассматриваться как некий вид геологического захоронения. В 1977 году была создана рабочая группа по изучению этого метода, в которую вошли Бельгия, Канада, Франция, Германия, Италия, Япония, Голландия, Швейцария, Великобритания, США и Комиссия Европейского Сообщества. Захоронение в глубинные отложения морского дна предполагает размещение контейнеров с отходами на очень большой глубине в осадочные породы на глубоком морском дне в несколько тысяч метров. При этом изучаются два варианта размещения контейнеров: самозахоронение и размещение в пробуренные скважины. Натурные испытания с имитаторами (около 100 опытов) показали, что сброшенный в море пенетратор с титановыми или стальными контейнерами углубляется в морское дно до 70 метров. Захоронение в морское дно пока что проходит этап исследований, поэтому реального опыта его реализации пока нет [15.4].

К захоронению под морским дном можно отнести опыт Швеции по эксплуатации с 1989 года хранилища SFR, Фольцмарк, на глубине 60 метров под дном Балтийского моря.



В качестве еще одного варианта для захоронения низко и среднеактивных отходов необходимо отметить возможность захоронения отходов в вечной мерзлоте, разрабатываемого Минатомом России (см. также [15.4]).

### 15.3 КЛАССИФИКАЦИЯ ОТХОДОВ ДЛЯ ЗАХОРОНЕНИЯ

Классификация отходов с точки зрения их захоронения оперирует главным образом временем жизни радионуклидов, уровнем радиоактивности (см. таблицы 15.1 и 2.2) и основана на рекомендациях МАГАТЭ [15.5]. Европейское сообщество использует для классификации радиоактивных отходов именно эту схему [15.6], хотя в каждой стране есть свои нормативные документы, уточняющие классы отходов. В Российской Федерации классификация радиоактивных отходов по уровню содержания радионуклидов дана в ОСПОРБ-99 [15.7]. При захоронении реальных радиоактивных отходов происходит их дальнейшее категорирование в зависимости от конкретных свойств и критериев приема.

ТАБЛИЦА 15.1. МЕТОДЫ ЗАХОРОНЕНИЯ РАДИОАКТИВНЫХ ОТХОДОВ

Классы отходов	Типичные характеристики	Метод захоронения
1. Освобождаемые от контроля отходы (CW)	Уровни активности равны или ниже разрешенных, основанных на годовой дозе для населения не более 0,01 мЗв	Нет радиологических ограничений
2. Низко- и среднеактивные отходы (LILW)	Уровни активности выше разрешенных	
2.1. Короткоживущие отходы (LILW-SL)	Ограниченная концентрация долгоживущих радионуклидов (типичное ограничение для долгоживущих $\alpha$ -нуклидов: меньше 4000 Бк/г в отдельных упаковках отходов и в среднем 400 Бк/г для всех упаковок)	Приповерхностные или геологические хранилища
2.2. Долгоживущие отходы (LILW-LL)	Концентрация долгоживущих радионуклидов выше пределов для короткоживущих отходов	Геологические хранилища
3. Высокоактивные отходы (HLW)	Концентрация долгоживущих радионуклидов превышает наложенные ограничения	Геологические хранилища

Классификация МАГАТЭ [15.1] и Европейского Сообщества [15.6] к короткоживущим радионуклидам относит радионуклиды с периодом полураспада менее 30 лет, а к долгоживущим – с периодом полураспада более 30 лет.

### 15.4 ЭТАПЫ РЕАЛИЗАЦИИ ЗАХОРОНЕНИЯ

Реализация захоронения низко и среднеактивных отходов включает несколько обязательных этапов:

- (1) Выбор места, его описание (“characterization”).
- (2) Проектирование.
- (3) Анализ эксплуатационных характеристик (безопасности).
- (4) Лицензирование строительства.
- (5) Сооружение.
- (6) Лицензирование эксплуатации.
- (7) Эксплуатация.
- (8) Закрытие.
- (9) Административный контроль.

Несмотря на то, что конструкция могильника предполагает высокие удерживающие свойства инженерных барьеров, гидрогеологические и геохимические характеристики участка должны быть выбраны надлежащим образом в качестве дополнительного, естественного барьера. Тем самым безопасность захоронения обеспечивается на случай непредвиденного разрушения инженерных барьеров. Среди важных параметров места для захоронения особое значение имеют: стабильность и низкая сейсмичность, малая проницаемость пород, простая гидрогеология, ясно идентифицированный водосток атмосферных осадков и подземных вод, отсутствие ценных природных ресурсов и низкая заселенность. Действия и факторы, подлежащие оценке для конкретной площадки хранилища, суть следующие:

***А. Определение химических, физических, геологических, геомеханических и гидрогеологических параметров.***

- (1) Толщина и глубина геологической формации, ее литология, минералогия и стратиграфия;
- (2) Геологическая окружающая среда (включая топографию, структуру, геологическую историю, геоморфологию, тектонику и сейсмичность);
- (3) Гидрогеологическая окружающая среда (гидрогеологический режим, включая водоносные и водоупорные слои, площади питания грунтовыми водами и площади выхода грунтовых вод);
- (4) Геохимическая окружающая среда (включая химию воды и породы, вторичные минералы и сорбционные свойства);
- (5) Геотехнические и общезфизические свойства породы, в которой размещаются отходы.

***Б. Описание характеристик природной окружающей среды и поверхности земли.***

- (1) Климат (нормальные и разрушающие события, такие как наводнения, ураганы и т.д.);
- (2) Гидрология поверхности;
- (3) Фоновое излучение;
- (4) Флора и фауна.

***В. Описание характеристик геологической стабильности и устойчивости к следующим событиям:***

- (1) Климатические изменения (оледенение, дождевой цикл, изменения уровня моря);
- (2) Геоморфическая активность (эрозия, сейсмическая активность, образование разломов, поднятие или опускание земной коры, вулканическая деятельность);
- (3) Падение метеоритов.

***Г. Описание характеристик возможных взаимодействий между отходами и геологической формацией, в которой размещены отходы***

- (1) Температурные эффекты;
- (2) Эффекты, связанные с излучением;
- (3) Гидрологические эффекты;
- (4) Результаты химических реакций (сорбция радиоизотопов, коррозия контейнеров и кондиционированных отходов и т.д.).

***Д. Влияние деятельности человека***

- (1) Ранее существовавшие скважины и стволы шахт, последствия выемки грунта;
- (2) Вероятность других событий, вызываемых деятельностью человека, которые могут повлиять на безопасность установки (плотность движения транспорта, пожары, взрывы, разрушение искусственных сооружений, таких как дамбы и защитные насыпи и т.д.).

***Е. Рассмотрение экономических и социальных вопросов и планирование***

- (1) Потенциал ресурсов;
- (2) Пригодность земли и ее использование;
- (3) Распределение населения;
- (4) Доступность и необходимое обслуживание;
- (5) Юрисдикция и права на землю;
- (6) Отношение общественности;
- (7) Не связанное непосредственно с отказами влияние на окружающую среду.

Сооружение могильника для радиоактивных отходов основывается на руководствах и рекомендациях, данных официальными органами управления и контроля. Организации-исполнителю необходимо проводить соответствующий контроль качества и хранение записей по контролю качества; помимо того, она должна представлять эти данные для проведения соответствующими органами инспекций.

По окончании первой фазы строительства компетентные органы проводят оценку пригодности хранилища к принятию отходов. В том случае, если могильник будет признан пригодным к приему отходов, регулирующий орган выдает лицензию на эксплуатацию, в которой указываются условия эксплуатации. Лицензия на эксплуатацию может выдаваться на определенные промежутки времени.

Эксплуатация могильника должна проводиться на основе руководств и правил, изданных регулирующими органами. Путем проведения инспекции площадки и режима эксплуатации регулирующие органы должны убедиться в том, что эксплуатация проводится в соответствии с лицензией и с соблюдением руководства по эксплуатации. Эксплуатирующая организация должна вести документацию о ходе эксплуатации за определенные промежутки времени и немедленно составлять отчет в том случае, если произошло непредвиденное событие. Анализ данных об эксплуатации могильника позволяет определить возможные способы усовершенствования его работы.

После окончания срока эксплуатации могильника оно должно быть закрыто и законсервировано в соответствии с проектными требованиями, утвержденными органами регулирования. Перед консервацией может быть проведено наблюдение за могильником в течение некоторого времени. Закрытие и консервация должны быть выполнены в соответствии с требованиями и критериями, установленными регулирующими органами. Должна быть гарантирована изоляция отходов в могильнике для предотвращения миграции радиоизотопов в окружающую человека среду. После закрытия могильника вспомогательные установки могут быть сняты с эксплуатации в соответствии с установившейся практикой. Необходимые записи инвентарного количества отходов, чертежи площадки и данные по эксплуатации должны храниться в соответствующих архивах в течение надлежащего периода времени.

Может возникнуть необходимость наложить ограничение на использование площадки могильника и около него на определенный период времени. Следует подготовить рекомендации относительно дальнейшей пригодности площадки к повторному использованию для общественных нужд и осуществления любого последующего контроля, который может понадобиться.

Подробное описание всех этапов реализации захоронения можно найти в документах МАГАТЭ.

## 15.5 БЕЗОПАСНОСТЬ ЗАХОРОНЕНИЯ

Соответствие всей системы захоронения целям радиационной безопасности демонстрируется посредством оценок безопасности, которые основываются на опробированных и утвержденных моделях. Долгосрочная безопасность захоронения радиоактивных отходов демонстрируется путем оценки с использованием прогнозного анализа. Демонстрация соответствия количественным критериям безопасности связана с оценкой безопасности и сравнением результатов оценки с установленными критериями. Для проведения оценки безопасности могут использоваться методы детерминистического и вероятностного анализа. Эти методики не исключают друг друга, и на практике проводится сравнительный анализ с использованием обоих методов. Следует оценить риски для здоровья от вероятностных разрушительных событий, так называемых отказов барьеров.

В оценках безопасности, направленных на сравнение нескольких различных подходов к проектированию, следует применять реалистичные сценарии, модели и исходные данные. Следует, насколько возможно, провести анализ пригодности используемых моделей по данным лабораторных испытаний и полевых наблюдений, включая природные аналоги и исследования площадки, когда это практически осуществимо.

МАГАТЭ различает две разновидности анализа характеристик установки захоронения: анализ эксплуатационных характеристик хранилища (Performance Assessment) и анализ безопасности (Safety Assessment), определения которых можно найти в [15.1]. В первом случае результаты анализа эксплуатационных данных сравниваются с установленными критериями и требованиями. По окончании эксплуатации и закрытии могильника основные его конечные параметры и данные являются исходными для окончательного анализа безопасности.

Анализ эксплуатационных характеристик хранилища, являющийся итерационным процессом, состоит из ряда взаимосвязанных действий [15.11]:

- (1) Идентификация всех категорий свойств, событий и процессов (так называемые FEPs – сокращенно от английских: features, events and processes), которые могут инициировать выход радионуклидов из отходов и вызвать их транспорт через геосферу и биосферу к человеку, или влияют на скорость выхода и переноса.
- (2) Определение комбинации свойств, событий и процессов (FEPs) критической важности, которые должны быть оценены при описании эксплуатационных характеристик хранилища.
- (3) Идентификация тех сценариев, которые потенциально важны и требуют последовательной оценки.

- (4) Развитие, верификация и обоснование моделей, баз данных и компьютерных кодов для анализа систем захоронения и имитации (моделирования) их поведения.
- (5) Вычисление последствий значимых сценариев.
- (6) Оценка неопределенностей в результатах и идентификация параметров и предположений, которые наиболее важны.
- (7) Сравнение результатов с соответствующими стандартами и критериями.

В соответствующих отчетах стадию 1 называют “FEPs”, стадию 2 – “termed scenarios”, 1+2+3 – “scenario development”, 4+5 – “consequence analysis”, 6 – “uncertainty and sensitivity analysis”.

Есть три вида ситуаций, влияющих на безопасность захоронения: естественные природные процессы, вмешательство человека и эффекты в самом могильнике [15.12] (таблица 15.2).

Многобарьерная система, представляющая собой “эшелонированную защиту в глубину”, надежно изолирует отходы, как в нормальных, так и аномальных ситуациях. Таблица 15.3 дает временные оценки событий и процессов, происходящих при эксплуатации хранилищ, иллюстрирующих степень предсказуемости моделей поведения отходов в местах захоронения [15.12].

ТАБЛИЦА 15.2. СИТУАЦИИ, ВЛИЯЮЩИЕ НА БЕЗОПАСНОСТЬ ЗАХОРОНЕНИЙ

Природные процессы	Вмешательство человека	Эффекты в могильнике
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Движение грунтовых вод.</li> <li>• Незамеченные нарушения гетерогенности геосферы.</li> <li>• Химическая агрессивность грунтовой воды.</li> <li>• Внутренние напряжения.</li> <li>• Транспорт радионуклидов с малой задержкой в геосфере.</li> <li>• Влияние землетрясений на гидравлическую проницаемость.</li> <li>• Изменения климата (ледниковые периоды).</li> <li>• Геоморфологические изменения (подтопления, выветривание).</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Разведочное бурение.</li> <li>• Выкачка подземной воды.</li> <li>• Горное дело.</li> <li>• Производство геотермальной энергии.</li> <li>• Подземные работы (рытье туннелей, подземных укрытий).</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Разрушение вмещающей породы около шахт и туннелей доступа.</li> <li>• Обезвоживание.</li> <li>• Тепловыделение.</li> <li>• Газовыделение (коррозия, радиолиз, микробиальная деградация).</li> <li>• Миграция радионуклидов через эксплуатационные шахты и туннели доступа.</li> </ul>

Характерные времена для хранилищ низко- и среднеактивных отходов рассчитываются из следующих соображений. Хранилища радиоактивных отходов должны быть рассчитаны, по крайней мере, на сроки не менее, чем время, заданное формулой:

$$t > \tau = \max_i \left\{ \frac{\ln \frac{q_{oi}}{q_{ei}}}{\lambda_i} \right\} \quad (1)$$

где  $q_{oi}$  – начальная удельная активность  $i$ -того радионуклида в отходах,  $q_{ei}$  – концентрация освобождения от контроля,  $\lambda_i$  – константа распада радионуклида.

ТАБЛИЦА 15.3. ВРЕМЕННЫЕ ОЦЕНКИ ЭКСПЛУАТАЦИИ ХРАНИЛИЩА

Событие	Процессы и действия	Характерное время, лет
Циклы породообразования.	Существенное изменение естественных барьеров.	$10^6$
Циклы изменения климата.	Существенные изменения поверхности земли	$10^4$
Пассивный административный контроль.	Сохранение информации, маркеры.	$10^3$
Активный административный контроль.	Надзор, ремонтные работы, контроль использования земли.	$10^2$

По истечении времени  $\tau$  концентрация всех радионуклидов в отходах станет  $q_i(t) < q_{wi}$ . Тем самым захоронение более не будет представлять радиационной опасности. Если в формуле (1) подставить характерные данные среднеактивных отходов, содержащих  $^{137}\text{Cs}$ , то получим необходимое время жизни хранилища порядка 300 лет, т.е. примерно 10 периодов полураспада  $^{137}\text{Cs}$ . Вот почему считается, что через 10 периодов полураспада радиоактивные отходы низкого уровня активности не будут больше представлять опасности для окружающей среды.

Описание требований к отчетам безопасности приповерхностных хранилищ изложены в документе МАГАТЭ [15.14]. Для выполнения анализа безопасности хранилищ приповерхностного типа можно воспользоваться документами, подготовленными МАГАТЭ в рамках программы ISAM (“Improving Long Term Safety Assessment Methodologies for Near Surface Radioactive Waste Disposal Facilities”). Эта программа была начата в 1997 году и сейчас уже завершена. Из документов ISAM можно порекомендовать, например, обстоятельный документ [15.15]. МАГАТЭ открыло продолжение работ по оценке безопасности приповерхностных хранилищ по новой программе ASAM (“Application of Safety Assessment Methodologies for Near-Surface Radioactive Waste Disposal Facilities”). Описание этой методологии можно найти в обзоре [15.16].

## 15.6 КРИТЕРИИ ПРИЕМЛЕМОСТИ УПАКОВОК ДЛЯ ЗАХОРОНЕНИЯ

Критерии приемлемости упаковок радиоактивных отходов для захоронения устанавливаются на основе результатов анализа эксплуатационных характеристик хранилища (“Performance Assessment”) [15.11]. Критерии приемлемости отходов для хранения изложены в главе 14 “Организация и требования к долгосрочному хранению и захоронению кондиционированных радиоактивных отходов”. Критерии приемлемости делятся на 3 категории:

- критерии безопасности,
- технические критерии и
- административные критерии.

Требования безопасности накладывают условия согласно национальным стандартам и нормативам, которые обязаны соблюдаться. Технические требования вытекают из техники и технологии, используемой как при обработке отходов, так и в конструкции могильника. Административные требования включают маркировку, документирование, возможность инспектирования и др. МАГАТЭ подготовило специальный документ, описывающий требования приемлемости упаковок отходов при их захоронении [15.17]. В этом документе даются ключевые критерии приемлемости радиоактивных отходов. Список информации для индивидуальной упаковки может содержать следующие данные:

- Идентификационный номер упаковки.
- Тип и вариант упаковки.
- Спецификация.
- Информация о предприятии, изготовившем упаковку отходов.
- Дата изготовления.
- Содержание отходов и др. информация:
  - категория отходов,
  - источник отходов,
  - описание отходов,
  - радиологические характеристики,
  - физические характеристики,
  - химические характеристики,
  - биологические характеристики,
  - содержание отходов (вес) в контейнере.
- Детали контейнера:
  - тип и вариант,
  - спецификация.
- Детали иммобилизующей матрицы:
  - тип,
  - спецификация.
- Содержание радионуклидов: - всего альфа, - всего бета и гамма.
- Мощность дозы:
  - на поверхности,
  - на расстоянии 1 метр.
- Тепловыделение.
- Газовыделение.
- Поверхностное загрязнение:
  - всего альфа,
  - всего бета и гамма.
- Полный вес упаковки.

## 15.7 ОПЫТ ЗАХОРОНЕНИЯ НИЗКО И СРЕДНЕАКТИВНЫХ ОТХОДОВ

Успешная практика захоронения низко и среднеактивных отходов насчитывает более 40 лет, сейчас его используют несколько десятков стран. В обзоре [15.18] содержится подробный анализ практики захоронения радиоактивных отходов во всем мире и описание статуса могильников для низко и среднеактивных отходов к 1996 [15.18]. Авторы [15.18] разделили могильники радиоактивных отходов на 4 класса:

- простейшие приповерхностные (SNSF),
- конструированные приповерхностные (ENSF),
- заглубленные (шахты) (МС),
- геологические (GR).

Захоронение в шахтах можно отнести к типу приповерхностного, если только оно не расположено на очень большой глубине (в сотни метров).

Примером применения *простейших могильников* могут служить таковые в Барнуэлле, США, Ваалпутсе, ЮАР, или Маунт Уолтон Ист, Австралия (рис. 15.1). Такие могильники особенно привлекательны в случае сухого климата, когда воды, проникающей в хранилище, практически нет. Они сооружены, как правило, в малопроницаемых формациях, часто в глине.



Рис. 15.1. Вид простейшего могильника для низкоактивных отходов в Маунт Уолтон Ист, Австралия.

Могильники в Барнуэлле, Южная Каролина, США, имеют вид траншей со слегка наклоненным дном, покрытом песком, чтобы облегчить сбор инфильтрующей воды в траншее. Конец траншеи заканчивается контролируемым зумпфом. Отходы в боксах, барабанах и бочках укладываются в траншеи. Отходы большей активности кондиционируются цементом, битумом, другим маловыщелачиваемыми материалами, или размещаются в контейнеры высокой прочности (“High Integrity Container”). Пространство между контейнерами заполняется сухим грунтом, потом траншеи покрываются глиной и грунтом. В Ваалпутсе, ЮАР, длинные и широкие траншеи глубиной около 8 метров закрываются несколькими слоями уплотненной глины и природного песка.

Примерами эффективного применения захоронения низко и среднеактивных отходов в инженерных приповерхностных сооружениях могут служить могильники приповерхностного типа во многих странах. Мы остановимся подробнее на примере таких сооружений во Франции и в России.

Согласно национальной классификации РАО во Франции существуют два хранилища для низко- и среднеактивных отходов и одно – для хранения “очень” низкоактивных отходов с удельной активностью от 1 до 100 Бк/г. Общий план этих



хранилищ показан на рисунке 15.2. Эти хранилища принадлежат Национальному Агентству по обращению с радиоактивными отходами (ANDRA) [15.19].

Первое предприятие по захоронению радиоактивных отходов – Центр де Ля Манш – эксплуатировалось с 1969 по 1994 г.г. [15.20]. На рисунке 15.3 показано состояние хранилища в 1984 г. Общий объем отходов низкого и среднего уровня активности, захороненных в этом хранилище, составляет около 525000 куб. м. В настоящее время это хранилище для приема отходов закрыто, проводится радиоэкологический мониторинг, программа которого рассчитана на 300 лет.

Новый центр Центр де Ля Об, расположенный неподалеку от Центра де Ля Манш, начал работу в 1992 году. Он рассчитан на 50 лет эксплуатации, его полная емкость равна 1 млн. куб. м. Общая площадь, занимаемая центром, составляет 95 га, из них 30 га – непосредственно хранилища. Среднегодовое поступление отходов – 12000 куб. м.



(а) Центр де Ля Об



(б) Могильник для «очень» низкоактивных отходов



(с) Центр де Ля Манш

Рис. 15.2. Центры по захоронению радиоактивных отходов во Франции (а, б – действующие хранилища, с – закрытое хранилище).



Рис. 15.3. Хранилище радиоактивных отходов в Центре де Ля Манш., 1984 г.

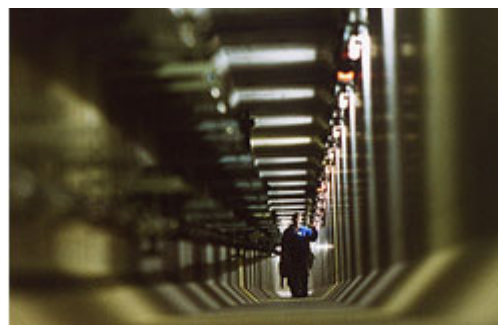
Ячейки для захоронения радиоактивных отходов выполнены из железобетона в виде прямоугольных секций размером 25х21 м, высотой 8,5 м и толщиной стен – 0,4 м, которые закрываются железобетонными крышками и покрываются водозащитными покрытиями (рис.15.4).

Отходы размещаются в могильнике после кондиционирования в упаковках нескольких типов:

- в бочках объемом 100, 200, 400 и 800 л,
- в металлических боксах объемом 5 и 10 куб. м,
- в цилиндрических бетонных контейнерах,
- в кубических бетонных контейнерах.



(а)



(б)

*Рис. 15.4. Хранилища радиоактивных отходов в Центре де Ля Об (а – секции хранилищ с мобильными крышками, б – подземная галерея).*

По мере наполнения секции контейнерами с кондиционированными отходами свободное пространство между ними заполняются цементным раствором в секциях с металлическими контейнерами и бочками, а в секциях с бетонными контейнерами – гравием (рис. 15.5).

С целью мониторинга за состоянием отходов под всеми секциями с кондиционированными отходами размещается подземная галерея для отбора проб грунтовой воды (рис. 15.4, б).

В соответствии с законом Франции об обращении с радиоактивными отходами от 30.12.1991г. в настоящее время в Морвилес (Morvilliers) неподалеку от Центра де Ля Об строится новый могильник для захоронения очень низкоактивных отходов (“very low level waste”). Площадка захоронения площадью 45 га расположена в глиняной формации и рассчитана на 30 лет эксплуатации. Отходы располагаются на пластиковых непроницаемых мембранах в больших траншеях (размеры 80х25 м, глубина 6,5 м) в слое глины (рис.15.6). Площадка расположена под мобильной крышей для защиты от атмосферных осадков. Отходы транспортируются в упаковках (большие мешки или металлические бочки) для предотвращения дисперсии радионуклидов в атмосферу. Пространство между упаковками засыпается песком, а затем укрывается пластиковой мембраной и засыпается толстым слоем глины (15–25 м), который изолирует отходы от

грунтовой воды. Для отбора проб грунтовой воды предусмотрены контрольные скважины (рис.15.6 и 15.7).



(a)



(б)

Рис. 15.5. Размещение упаковок отходов в секцию хранилища (a) и засыпка упаковок гравием (б) в Центре де Ля Об.

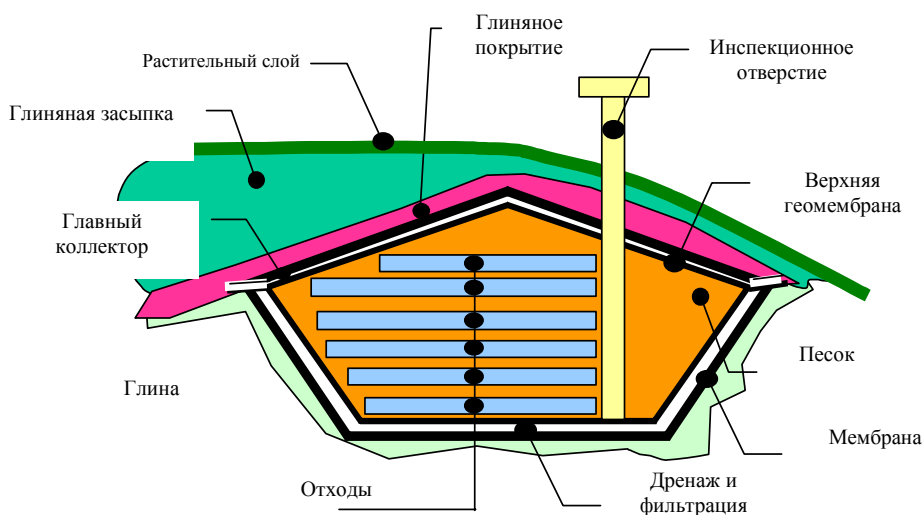


Рис. 15.6. Поперечный разрез приповерхностного хранилища для “очень низкоактивных” отходов

Могильник рассчитан на 650 000 куб. м отходов (750 тысяч тонн). Первые упаковки отходов были доставлены в Морвилес в октябре 2003 г., а к концу 2003 г. было захоронено 2045 упаковок (1,87 тонн) отходов.

Захоронение кондиционированных радиоактивных отходов в ГУП МосНПО “Радон” проводилось в приповерхностных траншеях с 1961 по 1990 гг. В 1990 году Правительством Москвы было принято решение о переходе от практики захоронения к долговременному хранению кондиционированных радиоактивных отходов [15.20, 15.21]. Полигон для хранения радиоактивных отходов занимает площадь 8 га. Хранилища приповерхностного типа представляют собой слабо заглубленные приповерхностные резервуары, разделенные вертикальными перегородками на отсеки (рис. 15.8). Емкость отсека – около 380 м<sup>3</sup>. Стены и перегородки толщиной 600 мм выполнены из железобетонных блоков, днище состоит из сборных железобетонных

плит толщиной 170 мм. Гидроизоляция днища и стен обеспечивается двумя слоями рубероида, приклеиваемыми посредством битумной мастики. С наружной стороны стен устраивается прижимная стенка из кирпича толщиной 120 мм на цементном растворе.



*Рис. 15.7. Приповерхностное хранилище для очень низкоактивных отходов*

Вокруг хранилища по периметру выполнена отмостка из дорожных плит для проезда автотранспорта и защиты от проникновения дождевой воды прилегающего к стенам рыхлого грунта. Кроме того, по периметру каждого сооружения предусмотрены водоотводные канавки. Некоторые хранилища выполнены по двухъярусной схеме: нижний ярус – заглубленный, верхний – расположен выше натуральных отметок. Проект слабо заглубленных приповерхностных хранилищ был изменен, и с 1996 г. хранилища изготавливаются из армированного железобетона, при этом днище и наружные стены составляют монолитную конструкцию (рис. 15.8). Хранилище разделено на отсеки продольной и поперечными перегородками из сборных бетонных блоков. Вместе с отмосткой по периметру здания уложен лоток для стока атмосферных осадков в общую дренажную систему. Для осуществления контроля над состоянием грунтовых вод на уровне дна котлована укладываются заполненные щебнем дренажные лотки. Со дна лотка вдоль углов емкости на поверхность выведены оборудованные съемными крышками металлические трубы, через которые осуществляется периодический отбор проб грунтовых вод.

При варианте захоронения (1961–1990г.г.) заполнение отсеков производилось последовательно по слоями РАО толщиной не более 1,5 м, причем промежутки между отходами заливались цементным раствором. При новой концепции долговременного хранения (после 1990 г.) промежутки между упаковками отходов засыпаются бентонитом. После заполнения отсеков производится их консервация на срок около 300 лет для создания надежной изоляции от атмосферных осадков, стабильного температурного режима, дополнительной защиты от воздействий разрушительных явлений природного и антропогенного происхождения. Консервирующее покрытие включает (по направлению снизу вверх):

- слой бетона толщиной 0,2 м, приготовленного на радиационно-чистой воде;
- плиты железобетонные;
- слой асфальта толщиной 0,1 м;
- уплотненный глинистый грунт толщиной 1,5-2,0 м.

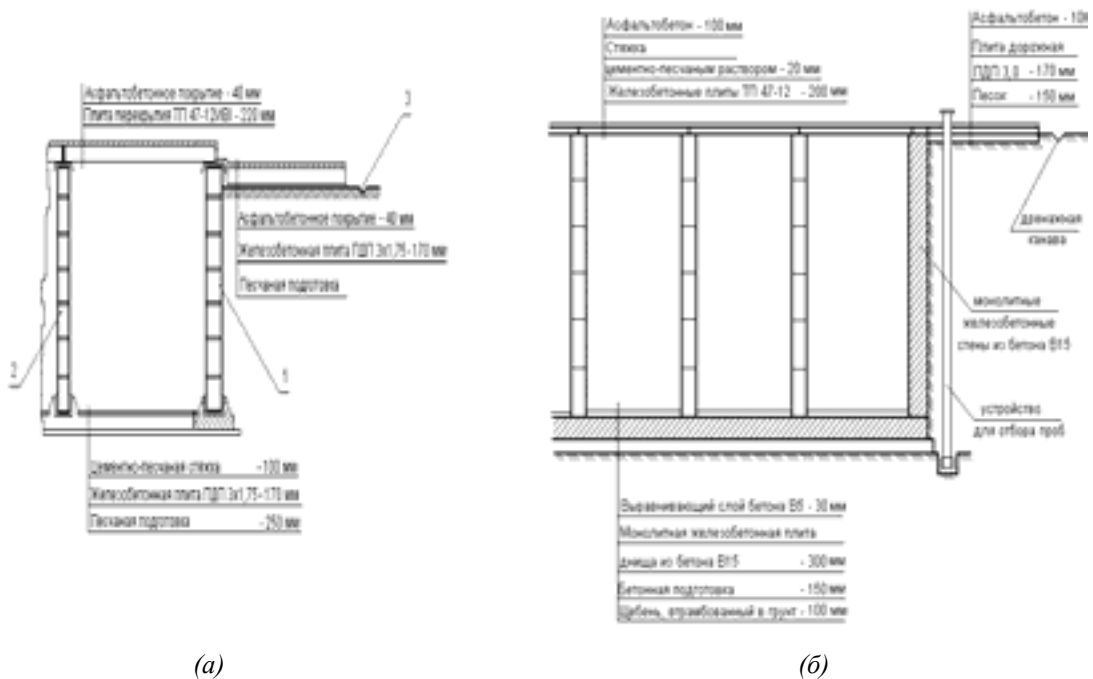


Рис. 15.8. Устройство резервуара для захоронения радиоактивных отходов: старая конструкция (а) (1 – внешняя сторона отсека, 2 – внутренняя перегородка, 3 – дренажная канава) и усовершенствованная конструкция, используемая с 1996 (б).

Вертикальная планировка слоя глинистого грунта должна обеспечивать сток атмосферных осадков. При необходимости, вызванной, например, результатами мониторинга или решением о применении новых разработок, создается дополнительное консервирующее покрытие или проводится реконструкция существующего верхнего слоя. Мощность дозы излучения на расстоянии 1 м от поверхности насыпного грунта не должна превышать  $28 \text{ мЗв/ч}$  ( $2,8 \text{ мбэр/ч}$ ). После консервации на площадке устанавливают знаки радиационной опасности.

Как уже упоминалось, в 1990 г. Правительством Москвы было принято решение о приостановке развития действующей промышленной площадки как предприятия окончательного захоронения радиоактивных отходов. Предполагается хранение кондиционированных отходов в условиях, обеспечивающих их последующее транспортирование к месту окончательного захоронения. Длительность такого хранения определяется сроком, который потребуется для разработки концепции федерального могильника, строительства и пуска его в эксплуатацию.

Проект нового хранилища для долговременного хранения и захоронения низко- и среднеактивных отходов (NUCRUS) разработан с участием фирм Belgatom (Бельгия), SGN (Франция) и AEA Technology (Великобритания) (рис. 15.9). Вместимость нового могильника равна 100 тыс. кубометров, оно рассчитано на срок эксплуатации (заполнения) в течение 20 лет. В качестве контейнеров для кондиционированных форм будут использоваться бочки емкостью 200 л. В качестве окончательной упаковки радиоактивных отходов будут использоваться железобетонные контейнеры (рис. 15.10).

В последнее время большое внимание уделяется хранилищам скважинного типа (borehole facilities). Скважинные хранилища заглублены ниже зоны промерзания и оттаивания, и поэтому рассматриваются как более надежные в долгосрочном плане. Кроме того, такие хранилища требуют меньшие площади для отчуждения. В настоящее



время на площадке захоронения радиоактивных отходов в ГУП МосНПО “Радон” сооружены несколько таких хранилищ, которые являются демонстрационными хранилищами для низко- и среднеактивных отходов, а также для кондиционированных отработавших источников ионизирующего излучения. Они предназначены для контролируемого хранения отходов в течение установленного проектом срока (30 лет), с возможностью последующего извлечения отходов.

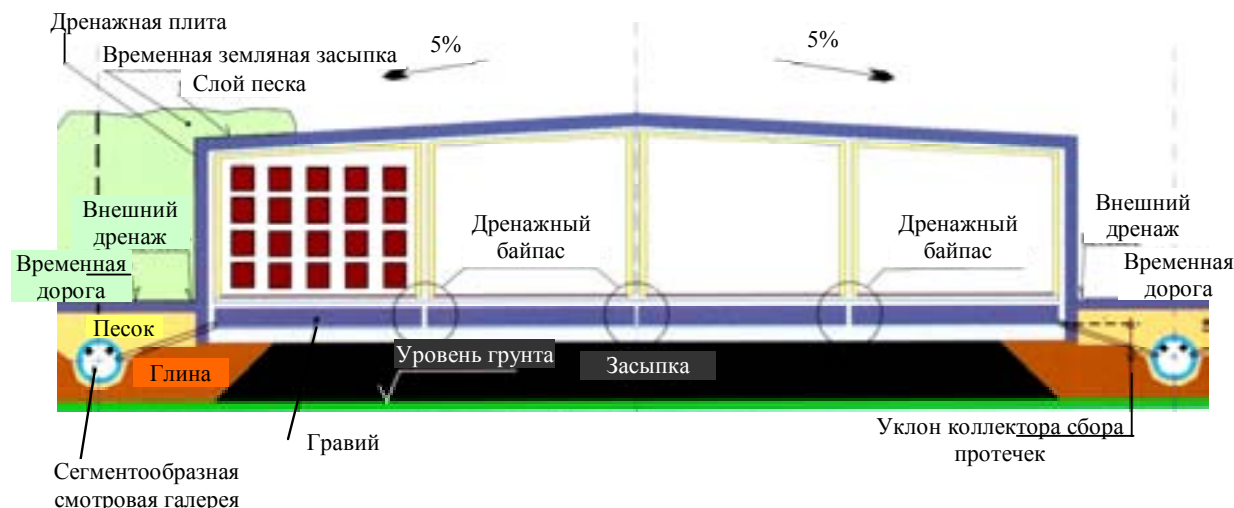


Рис. 15.9. Проектируемое хранилище долговременного хранения и захоронения низко и среднеактивных отходов (NUCRUS).

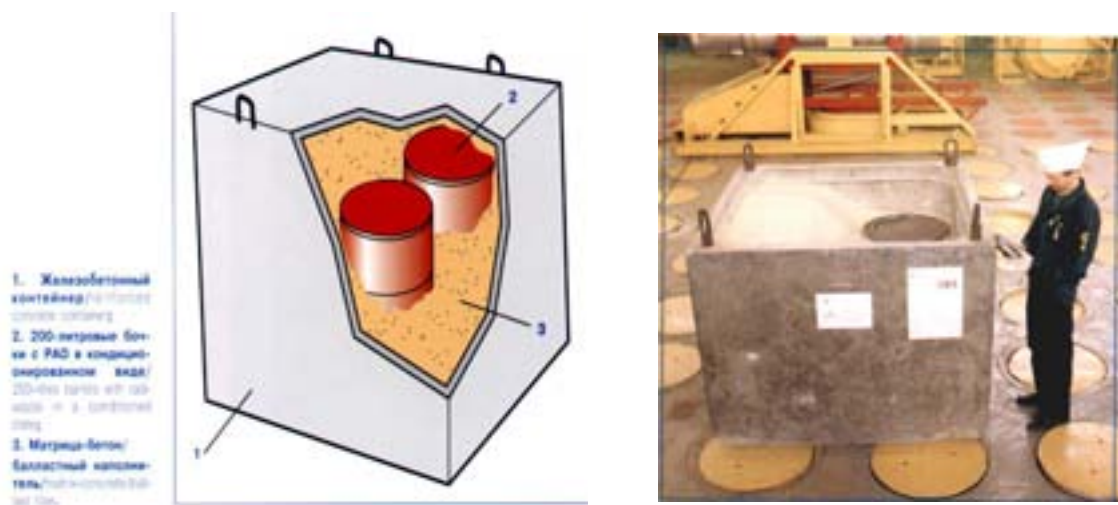


Рис. 15.10. Железобетонный контейнер – упаковка для долговременного хранения радиоактивных отходов.

Хранилище этого типа (рис. 15.11) представляет собой скважину большого диаметра (от 1,5 до 6,0 м). Стенки хранилища образованы стальной обсадной колонной толщиной 20 мм. Дополнительным слоем изоляции является бентонито-цементный камень в затрубном пространстве. В нижней части скважины создается дополнительный защитный барьер, выполненный из бентонито-цементного компаунда. Съемное защитное покрытие на поверхности служит для предотвращения попадания атмосферных и талых вод в хранилище.

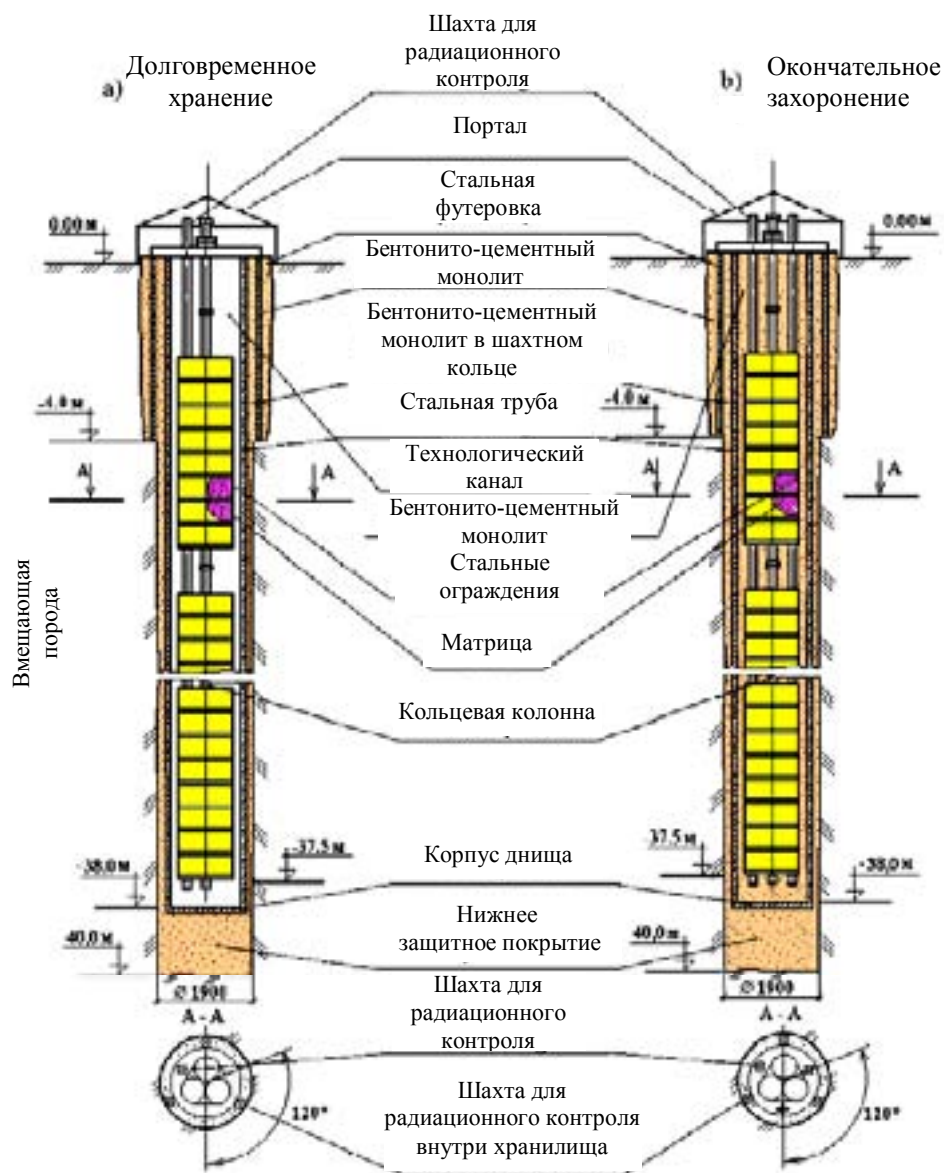
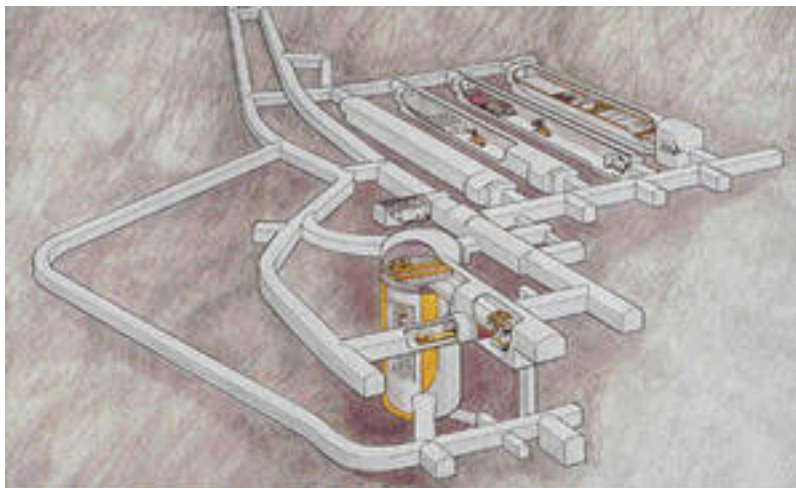


Рис. 15.11. Хранилище долговременного хранения и захоронения низко и среднеактивных отходов скважинного типа.

Отходы, кондиционированные в 200 л бочки, размещаются ярусами на площадках, закрепленных на центральной несущей трубе. Конструкция хранилища предусматривает возможность извлечения центральной трубы с размещенными на ней площадками. В случае принятия решения о переводе хранилища в статус захоронения пространство между бочками и стенками хранилища заполняется бентонито-цементным компаундом, над хранилищем создается консервирующее покрытие.

Захоронение радиоактивных отходов в шахтах производят в Чешской республике, Швеции, Финляндии, Норвегии. Так, в Чехии используется часть шахты Ричард II, расположенной на глубине от 70 до 80 метров. Окружающая порода в шахте состоит из маргелистых известняков, шахта сухая. В Швеции, как уже отмечалось, могильник SFR (сокращенно от "Final Repository for Radioactive Operational Waste") сооружен в

кристаллической породе под дном Балтийского моря около города Фольцмарк (рис. 15.12).



*Рис. 15.12. Хранилище SFR под дном моря, Швеция.*

Объем могильника равен  $60\,000\text{ м}^3$ , он в настоящее время заполнен примерно на  $25\,000\text{ м}^3$ . К могильнику ведут два тоннеля, один для транспортированию отходов, другой для доступа персонала. Он эксплуатируется с 1988 и принимает эксплуатационные отходы низкого и среднего уровня активности от АЭС Швеции. Кроме того, SFR принимает на захоронение радиоактивные отходы от малых производителей, т.е. отходы, образующихся вне ядерного топливного цикла. SFR имеет 4 горизонтальных отсека длиной 160 м для захоронения низкоактивных отходов и один большой вертикальный отсек (“silo”) диаметром 25 м и высотой 50 м для отходов требующих повышенной степени изоляции, таких как среднеактивные отходы. Этот отсек выполнен из бетона и засыпан снаружи слоем бентонита. В этом отсеке отходы размещаются в вертикальных шахтах и бетонируются. Отходы среднего уровня активности представлены главным образом иммобилизованными ионообменными смолами.

Аналогичный могильник сооружен в Олкилуото (Финляндия) на глубине от 60 до 100 метров. Он эксплуатируется с 1992, рассчитан на 40 лет и может принять до 40 тысяч 200-литровых бочек с отходами.

Геологическое захоронение радиоактивных отходов производят в шахтах Морслебен и Конрад в Германии, а также в США (WIPP). В Германии принято решение захоранивать все типы радиоактивных отходов в глубокие геологические формации. Могильник Морслебен сооружен в стабильной соляной формации (куполе) на глубине около 500 метров и имеет емкость около 40 тысяч кубометров отходов. Радиоактивные отходы размещались в шахтах слоями, которые затем закрывались породой. Он эксплуатировался с 1981 по 1998 г. Могильник Конрад сооружен в отработанной железорудной шахте на глубине 1000 м, в настоящее время проходит фазу лицензирования.

Могильник WIPP (сокращенно от “Waste Isolation Pilot Plant”) в Карслбаде, Нью-Мексико, США, эксплуатируется с 1999 года. Он сооружен в стабильной соляной формации мощностью (толщиной) 600 м на глубине около 650 м и предназначен для долгоживущих отходов, содержащих трансурановые элементы (рис. 15.13). WIPP рассчитан на прием свыше 175 тысяч кубометров отходов.



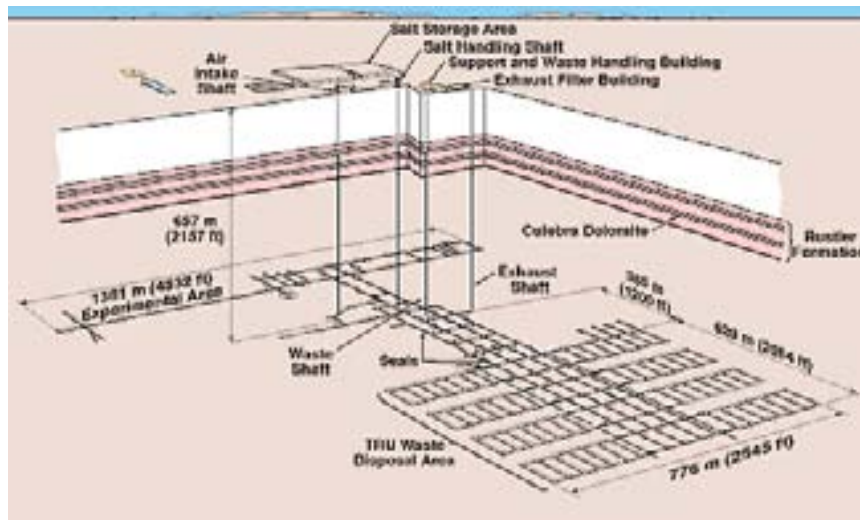


Рис. 15.13. Хранилище WIPP в соляной формации США.

## 15.8 ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящее время в ряде стран разработаны и успешно эксплуатируются могильники различных конструкций для захоронения радиоактивных отходов низкого и среднего уровня активности. Выбор типа могильника и места его размещения зависит от конкретных условий страны (геологических, географических, климатических, социальных и т.д.), характеристик и объемов отходов и многих других факторов (технических, экономических, юридических и т. д.). Для гарантированного обеспечения безопасности захоронения радиоактивных отходов необходим учет всех факторов, влияющих на поведение реальных упаковок отходов в реальных условиях захоронения. Осуществление надлежащего контроля на всех стадиях обращения с отходами является важным фактором обеспечения безопасности обращения с отходами, включая безопасность захоронения. Система организации такого контроля называют обеспечением качества [15.22].

Рекомендации МАГАТЭ и различные технические решения по захоронению радиоактивных отходов изложены в ряде документов [15.8, 15.9, 15.11, 15.23, 15.24]. Практика захоронения низко и среднеактивных отходов, в том числе в наиболее распространенных, приповерхностных могильниках, показала, что при надлежащем соблюдении требований стандартов и инструкций, безопасность захоронения обеспечивается в полной мере.

## ЛИТЕРАТУРА

- [15.1] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Radioactive Waste Management Glossary, IAEA, Vienna (1993) p. 56.
- [15.2] Опыт создания могильников радиоактивных отходов. Арустамов А.Э., Ожован М.И., Кашеев В.А. и др., М., ЦНИИатоминформ, 1990, 77 с.
- [15.3] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Radioactive Waste Management: Status and Trends. IAEA, Vienna (2001).
- [15.4] C.J. Allan, J. McMurry, "Disposal Concepts and Disposal Alternatives", Requirements for the Safe Management of Radioactive Waste, IAEA-TECDOC-853, IAEA, Vienna (1995). pp. 191-205.
- [15.5] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Classification of Radioactive Wastes, Safety Series No. 111-G-1.1, IAEA, Vienna (1994).
- [15.6] Radioactive Waste Management in the European Union. [www.rwm-eu.org](http://www.rwm-eu.org).
- [15.7] Основные санитарные правила обеспечения радиационной безопасности (ОСПОРБ-99), СП 2.6.1. 799-99, Минздрав России, 2000.

- [15.8] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Scientific and Technical Basis for Near-Surface Disposal of Low and Intermediate Level Waste, Technical Reports Series No. 417. IAEA, Vienna (2003).
- [15.9] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Scientific and Technical Basis for Geological Disposal of Radioactive Wastes, Technical Reports Series No. 413. IAEA, Vienna (2003).
- [15.10] A. Zurkinden, “Operational Safety of a Disposal Facility”, Requirements for the Safe Management of Radioactive Waste, IAEA-TECDOC-853, IAEA, Vienna (1995) pp. 217-222.
- [15.11] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Review of Available Options for Low Level Radioactive Waste Disposal, IAEA-TECDOC-661. Vienna (1992) p. 77.
- [15.12] C. Devillers, “Repository System Integration and Overall Safety”, Requirements for the Safe Management of Radioactive Waste, IAEA-TECDOC-853, IAEA, Vienna (1995) pp. 229-238.
- [15.13] Reviewing Post-Closure Issues. H. Rothermeyer. Ibid, pp.251-260.
- [15.14] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Preparation of Safety Analysis Reports (SARs) for Near Surface Radioactive Waste Disposal Facilities. IAEA-TECDOC-789, Vienna (1995) p. 23.
- [15.15] Derivation of Activity Limits for Disposal of Radioactive Waste to Near Surface Facilities. IAEA Working Material, Version 0.3, 22 January 2001, IAEA, Vienna, 130p (2001).
- [15.16] C. McCombie, “Safety Assessment Methodology and Confidence-Building Measures”, Requirements for the Safe Management of Radioactive Waste, IAEA-TECDOC-853, IAEA, Vienna (1995) pp. 239-249.
- [15.17] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Requirements and Methods for Low and Intermediate Level Waste Package Acceptability, IAEA-TECDOC-864, Vienna (1996) 49 p.
- [15.18] Radioactive Waste Disposal: Global experience and challenges. K.W. Han, J. Heinonen, A. Bonne. IAEA Bulletin, Vol. 39, No. 1, 1997, pp.33-41.
- [15.19] ANDRA’s Centre de L’Aube: Design, Construction, Operation of a State of the Art Surface Disposal Facility for Low and Intermediate Level Waste. J.M. Potier. Proceedings of an IAEA Symposium “Technologies for the Management of Radioactive Waste from Nuclear Power Plants and Back End Nuclear Fuel Cycle Activities”, Taejon, Republic of Korea, 30 August-3 September 1999, IAEA, Vienna, 2001, IAEA-CSP-6/C, IAEA-SM-357/27.
- [15.20] Обезвреживание радиоактивных отходов на централизованных пунктах. Соболев И.А., Хомчик Л.М., Москва, Энергоатомиздат, 1982.
- [15.21] Хранение и захоронение радиоактивных отходов. В.Ю. Флит. Обращение с радиоактивными отходами от неядерных применений. Лекции курсов по подготовке и повышению квалификации специалистов, работающих в области обращения с радиоактивными отходами. МГУ им. М.В. Ломоносова –МосНПО “Радон”, Москва - Сергиев Посад, 2000.
- [15.22] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Application of Quality Assurance to Radioactive Waste Disposal Facilities, IAEA-TECDOC-895, Vienna (1996) 28 p.
- [15.23] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Report on Radioactive Waste Disposal, Technical Reports Series No. 349, IAEA, Vienna (1993).
- [15.24] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Issues in Radioactive Waste Disposal, IAEA-TECDOC-909, Vienna (1996).

## 16 МЕТОДЫ ДЕЗАКТИВАЦИИ

### 16.1 ВВЕДЕНИЕ

Обращение с радиоактивными отходами требует соблюдения комплекса мер радиационной безопасности. В связи с тем, что исключить загрязнение объектов радиоактивными веществами не всегда представляется возможным, а в некоторых случаях принципиально не осуществимо, возникает проблема удаления с объектов радиоактивных веществ, или *дезактивации загрязненных поверхностей*. Термин “дезактивация” означает полное или частичное удаление радиоактивного загрязнения специально подобранными физическими, химическими или другими способами.

*Объектами дезактивации* могут быть оборудование, контейнеры, спецодежда, средства индивидуальной защиты и т.д. После закрытия ядерного объекта дезактивации могут подвергаться здания и различные сооружения на местности, а также сама местность. Уровень остаточного загрязнения объектов после проведения дезактивации должен гарантировать безопасность людей и окружающей среды.

Дезактивация является сопутствующим процессом практически всех операций по переработке и транспортировке РАО, призванным предотвратить распространение загрязнения и обеспечить необходимый уровень радиационной безопасности. При решении вопроса о дезактивации взвешиваются выгоды от ее проведения в сравнении со стоимостью самой дезактивации, а также кондиционирования образующихся вторичных отходов и их захоронения. Стратегия дезактивации строится на радиологической информации об объекте.

### 16.2 ВИДЫ ЗАГРЯЗНЕНИЙ

Для количественного выражения эффективности дезактивации введен коэффициент  $K_{\partial}$ , показывающий во сколько раз уменьшилось загрязнение поверхности в результате проведенных дезактивирующих мероприятий:

$$K_{\partial} = \frac{A_n}{A_k},$$

где  $A_n$  – начальная удельная активность образца (на единицу поверхности) и  $A_k$  – конечная удельная активность (после дезактивации).

Эффективность дезактивации зависит от характера связи радиоактивных веществ с поверхностью и применяемого способа дезактивации. В зависимости от прочности связи загрязнителей с поверхностью загрязнения разделяют на нефиксированные, слабо фиксированные и прочно фиксированные. В основе такой классификации загрязнений лежат разные механизмы взаимодействия поверхности и радиоактивного вещества:

- (1) адгезии (возникновение слабых связей между загрязняемой поверхностью и загрязнителями, обычно в жидкой или газообразной фазе);
- (2) адсорбции (поглощение радионуклидов из газообразной или жидкой среды за счет ионных или ковалентных взаимодействий с поверхностью тела);
- (3) диффузии (проникновение радионуклидов в глубь загрязняемого материала).

В результате адгезии радионуклидов на поверхности возникает нефиксированное загрязнение. Слабо фиксированное и прочно фиксированное загрязнения образуются при адсорбции радионуклидов и ионном обмене. Соотношение между различными видами загрязнений определяется и временем контакта радиоактивных веществ с поверхностью. С увеличением времени воздействия доля радиоактивного загрязнения, обусловленная адсорбционными и диффузионными процессами, увеличивается.

Характер поверхности и прочность удержания радиоактивных загрязнений определяет выбор метода или методов дезактивации. Наиболее легко дезактивируются химически стойкие материалы с гладкой поверхностью (стекло, эпоксидные смолы), поскольку они обладают слабыми сорбционными свойствами и слабо удерживают радиоактивные загрязнители. Хуже дезактивируются шероховатые поверхности склонные к сорбционному удержанию радионуклидов. Трудно дезактивируются пористые материалы (дерево, бетон), в которых происходит диффузия радионуклидов. Поэтому в процессе дезактивации таких материалов необходимо удалять весь загрязненный слой.

### 16.3 МЕТОДЫ ДЕЗАКТИВАЦИИ

В настоящее время методология дезактивации насчитывает большое число способов удаления радионуклидов с поверхностей. Наравне с применением самых простых методов, таких как протирание поверхностей ветошью или чистка щетками, используются сложные технологии, требующие привлечения дополнительного оборудования [16.1]. По *механизму действия* технологии дезактивации можно объединить в три группы:

- механическое удаление загрязнений,
- частичное растворение радиоактивных веществ при обработке поверхностей неагрессивными дезактивирующими растворами,
- физико-химические методы, применяемые для частичного разрушения или растворения поверхности или поверхностного слоя дезактивируемого материала.

На практике часто находят применение способы дезактивации, сочетающие в себе физико-химические и механические процессы. Так, весьма показательным примером могут служить технологии дезактивации, которые используются при выводе ядерного объекта или установки из эксплуатации (таблица 16.1).

В Московском НПО “Радон” методы дезактивации подразделяют на жидкостные (физико-химические), безжидкостные (в основном, это механические способы) и комбинированные [16.2].

#### 16.3.1 Химическая дезактивация

##### *Дезактивация при помощи химических растворов*

Процесс дезактивации и требования, предъявляемые к дезактивирующим растворам, определяются химическим составом загрязнений. Химические дезактивирующие растворы должны растворять загрязнения или переводить их в раствор и удерживать в растворе в растворенном состоянии.

Для некоторых материалов и отдельных видов загрязнений эффективная дезактивация возможна с помощью простейших неагрессивных растворов. Однако

чаще приходится использовать более сильные реагенты, выбор которых в каждом конкретном случае определяется свойствами материала и характером загрязнения. Удаление прочно фиксированных загрязнений (т.е. возникших в результате адсорбции или диффузии) сопряжено с определенными трудностями: в этих случаях поверхность обрабатывают специально подбираемыми растворами химических веществ. Поскольку полное удаление таких загрязнений с поверхности обычно невозможно, результаты дезактивации признаются удовлетворительными, если остаточное загрязнение не превышает установленное допустимое значение.

ТАБЛИЦА 16.1. ОСНОВНЫЕ МЕТОДЫ ДЕЗАКТИВАЦИИ ПРИ ВЫВОДЕ ЯДЕРНОЙ УСТАНОВКИ ИЗ ЭКСПЛУАТАЦИИ [16.1]

Метод	Большие объемы и замкнутые системы	Отдельные блоки	Поверхность зданий и строений <sup>а</sup>
<b><i>Химическая дезактивация</i></b>			
Химические растворы	* <sup>б</sup>	*	*
Многофазные процессы обработки	*	*	
Пенная дезактивация	*		*
Гели	*	*	*
Порошковая дезактивация	*	*	
Дезактивация аэрозолями	*	*	
Газовая дезактивация	*		
<b><i>Механическая дезактивация</i></b>			
Смывание водой	*	*	*
Обработка пылесосом, протирка, подметание		*	*
Абразивная чистка		*	*
Продувка CO <sub>2</sub>		*	*
Промывка жидким азотом под высоким давлением		*	*
Промывка струей фреона		*	*
Продувка влажным льдом		*	*
Водная струя высокого и сверхвысокого давления	*	*	*
Кирковка / скалывание / скобление			*
Вспучивающий раствор			*
<b><i>Другие методы дезактивации</i></b>			
Электрополировка	*	*	
Ультразвуковая очистка		*	
Плавление		*	
<b><i>Новые методы</i></b>			
Световая абляция		*	*
Микроволновое скалывание		*	*
Тепловое разрушение			*
Микробное воздействие			*
Электрополировка		*	*
Экзотермические металлизированные пасты			*
Сверхкритическое экстрагирование жидкостью			*

<sup>а</sup> Включая бетонные, кирпичные или металлические поверхности, например, облицовка, топливные резервуары и т.п.

<sup>б</sup> Знак \* означает основной метод использования

Иногда дезактивацию проводят сложными *моющими* растворами, что особенно эффективно на первой стадии дезактивации.

Состав дезактивирующего раствора должен быть подобран так, чтобы соблюдались следующие условия:

- раствор должен быстро и полностью смачивать обрабатываемую поверхность;
- разрушать связь радиоактивного вещества с поверхностью и переводить его в раствор;
- предотвращать повторную сорбцию радиоактивного загрязнения на поверхности.

Невыполнение хотя бы одного из указанных требований не даст желаемого эффекта или может привести к более прочной фиксации радиоактивного загрязнения. Отрицательный эффект нередко наблюдается в случае предварительной обработки поверхности водой: несмотря на то, что часть загрязнения удаляется, другая его часть равномерно распределяется по поверхности материала, причем нейтральная среда способствует прочной ионообменной сорбции поверхностью материалов многих радионуклидов. К более тяжелым последствиям приводит использование агрессивных растворов, повреждающих поверхность материалов, увеличивая их сорбционную способность. Как правило, дезактивировать такие поверхности при их повторном загрязнении не удастся.

Основными компонентами моющих растворов являются вода, поверхностно-активные вещества (ПАВ), комплексообразующие вещества и активные добавки.

Водные растворы коллоидных ПАВ обладают хорошей суспендирующей, эмульгирующей и пенообразующей способностью, определяющей моющие свойства растворов на их основе. Использование в моющих растворах ПАВ основано на их способности снижать поверхностное натяжение воды, что ведет к более полному смачиванию поверхности, десорбции загрязнений и удерживанию их в растворе. Эти вещества являются мягкими многоцелевыми очистителями, применимыми для обработки любых поверхностей, оборудования, одежды и стеклянных изделий. Следует учитывать, что они непригодны для удаления продуктов коррозии металлов и застарелой грязи.

По химической структуре ПАВ делятся на две основные группы: ионогенные и неионогенные. Если поверхностной активностью обладают анионы (катионы), то такие ПАВ называют анионоактивными (катионоактивными). Выбор типа ПАВ в значительной степени определяется условиями загрязнения поверхностей. Чаще всего радиоактивное загрязнение обусловлено наличием катионов, для таких загрязнений более эффективны доступные анионоактивные ПАВ.

Вводимые в состав дезактивирующих растворов комплексообразующие вещества образуют с радионуклидами устойчивые комплексы и препятствуют образованию осадка в растворах или повторной сорбции. В качестве таких веществ применяются полифосфаты, взаимодействующие с щелочноземельными и тяжелыми металлами. Из них часто используется гексаметафосфат натрия (ГМФН). Из органических комплексообразователей следует отметить этилендиаминтетрауксусную кислоту (ЭДТА) и ее натриевую соль, добавление которых позволяет связать радионуклиды, находящиеся в ионной форме (эффективность дезактивации стиркой при использовании ЭДТА увеличивается почти в 5 раз). Однако нужно учитывать, что проблемы могут возникнуть при кондиционировании отходов, содержащих комплексообразователи.

В состав дезактивирующих моющих растворов также вводят органические и неорганические добавки – активаторы процесса дезактивации.

Присутствие в дезактивирующих растворах *неорганических кислот* зачастую значительно повышает эффективность дезактивации, однако кислоты, будучи сильными окислителями, являются и наиболее агрессивным их компонентом. Минеральные кислоты применяются в основном для разрушения окисных пленок на поверхности металлов и для очистки растворов с низким рН для повышения растворимости и ионного обмена. Даже при дезактивации кислотостойких материалов использование неорганических кислот во время первой обработки может привести к нежелательному эффекту вследствие перехода радионуклидов в ионную форму, что может привести к усилению их диффузии в глубь материала. Поэтому для *первой обработки* следует применять щелочные растворы, содержащие ПАВ и комплексообразующие вещества.

Для дезактивации металлических поверхностей вместо самих кислот могут быть использованы их *соли*, а их действие в комбинации с различными кислотами особенно эффективно. Органические кислоты (муравьиная, лимонная и щавелевая кислоты, перекись щавелевой кислоты) можно использовать для очистки металлических поверхностей и изделий из пластика и других полимерных составов.

Органические кислоты (муравьиную, лимонную и щавелевую) можно использовать для очистки металлических поверхностей и изделий из пластика и других полимерных составов. Органические кислоты используются в основном для дезактивации действующих реакторных установок, при выводе ядерных установок из эксплуатации они используются в меньшей степени [16.1]. Для дезактивации металлических поверхностей вместо органических кислот могут быть использованы их *соли*, а их действие в комбинации с неорганическими кислотами особенно эффективно.

Основные и кислые соли (гидроксиды калия и натрия, карбонат и трифосфат натрия, карбонат аммония) используются как сами по себе, так и в растворе с другими веществами; они эффективны для удаления жировых и масляных пленок, для нейтрализации кислот. Также они используются как поверхностные пассиваторы, для удаления покраски и других покрытий, для удаления ржавчины. Кроме того, они действуют как средство обеспечения подходящей химической среды для других реагентов, например, окислителей.

Ни один из существующих методов химической дезактивации не является универсальным для любых составов загрязнения и типов поверхностей. Для повышения эффективности дезактивации используют **многофазные процессы обработки** – комбинации различных химических веществ и процессов. Хорошие результаты дает поочередное применение различных растворов, например, кислого и щелочного, окислительного и восстановительного.

Показательным примером многофазного процесса дезактивации служит окислительно-восстановительный процесс (REDOX). Большинство методов REDOX являются многоступенчатыми: первая ступень – процесс окисления с помощью перманганата калия в щелочной среде для повышения окислительного состояния ионов металлов; следующая ступень – восстановительный процесс с растворением и переводом загрязнителей в раствор. Еще один пример: после предварительной обработки дезактивируемых нержавеющей и углеродистых сталей перманганатом калия и промывки водой хорошо действует цитрат аммония за счет образования растворимых цитратных комплексов с окисленными формами метал-ионов. Добавка

EDTA (этилендиаминтетрауксусную кислоту) также способствует удержанию метал-ионов в растворе и предотвращает выпадение их в осадок [16.1].

Эффективность дезактивации можно повысить совместным использованием щеток и моющего средства. Полезно использование повышенных температур обработки (70–95°C), однако следует помнить, что зависимость эффективности дезактивации от температуры раствора для разных материалов различна. Так, *металлы и стекло* дезактивируются горячим моющим раствором значительно лучше, чем холодным, а значительное усиление диффузии радионуклидов в глубь полимерных материалов наряду с повышением их растворимости приводит к снижению эффективности процесса дезактивации. При дезактивации *полимерных материалов* следует учитывать, что некоторые из них нестойки при высокой температуре. Поэтому первую обработку объектов, выполненных из полимерных материалов, целесообразно начинать при невысокой температуре (20–30°C), последующее повышение температуры зависит от их термостойкости.

### ***Другие способы химической дезактивации***

*Пенная дезактивация.* Пена, образуемая чистящими и моющими средствами, являясь носителем химически активных компонентов дезактивации, при небольшом объеме исходных растворов позволяет обрабатывать большие площади и объемы. Метод хорошо отработан и широко используется, особенно при очистке объектов большого объема и сложной формы. Достоинство метода – небольшой объем вторичных отходов (т.е. объем исходных растворов после пенопогашения). Используемое оборудование недорого, просто в обращении и пригодно как для ручной, так и для дистанционной обработки. При дезактивации стальных конструкций сложной формы пенная дезактивация позволяет вернуть очищенный металл в производство (переплавку).

*Химические гели.* В качестве носителей очищающих химических веществ могут использоваться гели, которые наносятся на дезактивируемую поверхность с последующим смыванием, протиркой или соскабливанием. Метод эффективен в случаях, когда требуется длительное время контакта дезактивирующего состава с очищаемой поверхностью наряду с минимизацией вторичных отходов. Очень хорошо метод зарекомендовал себя при дезактивации бета- и гамма-излучателей на трубопроводах, выполненных из мягкой стали.

*Дезактивация пастами.* При дезактивации металлических поверхностей, в частности, из нержавеющей стали, широко применяются пасты. Пасты содержатся в контейнере с наполнителем, представляющим собой кислоту или смесь кислот. Иногда для разрушения поверхностной пленки на поверхности в пасту добавляют абразивный порошок, увеличивая таким образом химическое воздействие на поверхность.

*Дезактивация пастами.* При дезактивации металлических поверхностей, в частности, из нержавеющей стали, широко применяются дезактивирующие пасты. Пасты содержат наполнитель и дезактивирующие компоненты (кислоту или смесь кислот). Для обеспечения дополнительного механического воздействия на обрабатываемую поверхность в пасту иногда добавляют абразивный порошок.

*Аэрозольная дезактивация.* Метод заключается в нанесении химического реагента на обрабатываемую поверхность методом распыления (в виде аэрозоля). Например, в



России был применен водно-кислотный аэрозоль для дезактивации оборудования реактора с жидкометаллическим охлаждением.

В таблице 16.2 представлены некоторые дезактивирующие компоненты и их возможные области применения. Возможность применения конкретного метода для других материалов необходимо рассматривать в каждом конкретном случае. Помимо учета химического состава загрязнений и поверхности, при выборе дезактивирующих композиций следует учитывать и необходимость последующего удаления отходов, возникающих в ходе дезактивации [16.1].

Для нанесения раствора на небольшие загрязненные поверхности можно использовать простейшие разбрызгивающие устройства, рекомендуемые для дезактивации и дегазации: ранцевый дегазационный прибор, приспособления для специальной обработки автомобилей, гидропульт, приборы для опрыскивания растений.

Методы химической дезактивации с использованием *моющих растворов*, несмотря на их широкое применение, имеют недостатки, усугубляющиеся при дезактивации больших поверхностей.

- При дезактивации отдельных участков может происходить распространение загрязнения по всей поверхности.
- Существует необходимость удаления моющего раствора, что осложняется наличием труднодоступных мест.
- Образуются большие количества жидких РАО, требующих специальной переработки.

В связи с этим в последние два десятилетия все большее применение находят методы “сухой” дезактивации поверхностей, основанных на использовании дезактивирующих покрытий (см. следующий раздел).

Следует добавить, что разработка химических методов дезактивации продолжается; поскольку в ряде случаев необходимо учитывать, например, последствия некоторых нежелательных реакций, возникающих между различными компонентами образующихся химических систем.

### 16.3.2 Механические методы дезактивации

В общем, механические методы применимы для дезактивации любой поверхности, если загрязнение сконцентрировано в приповерхностном слое материала. Эти методы представлены в таблице 16.3 с указанием их наиболее оптимального применения (объекты и поверхности).

ТАБЛИЦА 16.2. ХИМИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ДЕЗАКТИВАЦИИ РАЗЛИЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ И ПОВЕРХНОСТЕЙ [16.1]

Метод	Очищаемые материалы / поверхности	Замечания
Концентрированные минеральные кислоты:	НН <sup>а</sup> , инконель	
Азотная	УС <sup>б</sup>	
Серная	УС, НН	
Фосфорная	УС	
Фтороборная	Металлы и окислы металлов	
Фторазотная	Металлы и окислы металлов	
Кислые соли	Металлические поверхности	
Органические кислоты	Металлы и пластиковые поверхности	
Муравьиная кислота	Металлы и окислы металлов	
Щавелевая кислота	УС, Al	Для удаления ржавчины, Nb и продуктов деления
Основные и щелочные соли	УС	Для обезжиривания и травления
Комплексообразователи	Металлы	Препятствуют образованию осадка
Отбеливатели	Металлоорганические материалы	Для удаления химикатов
Моющие и ПАВ	Металлоорганические материалы, пластик, бетон	Мягкие многоцелевые очистители
Органические растворители	Металлоорганические материалы, пластик, бетон	Для удаления органики
<b>Многофазные процессы:</b>		
REDOX <sup>в</sup>	УС, НН	Способствует растворимости
LOMI <sup>г</sup>	УС, НН, инконель, циркалой	
Перманганат в щелочной среде	НН	
CORD <sup>д</sup> / POD <sup>е</sup>	НН, инконель	Окислитель хрома
Перманганат калия с последующей обработкой цитратом аммония	УС, НН	
Перманганат калия с последующей обработкой цитратом аммония с EDTA <sup>ж</sup>	УС, НН	EDTA добавляется для удержания в растворе окислов железа
Перманганат калия с последующей обработкой лимонной кислотой	НН (только марок 300 серии), инконель	
Перманганат калия с последующей обработкой серной кислотой	УС, НН	
Перманганат калия с последующей обработкой щавелевой кислотой	УС, НН	
Азотная кислота, перманганат и плавиковая кислота	УС, НН	
Сильные окислители	Инконель 600, УС, НН	
Пенная дезактивация	Пористые и не пористые поверхности	
Химические гели	Пористые и не пористые поверхности	
Дезактивация пастами	УС, НН	
Дезактивация аэрозолями	УС, НН	
Дезактивация газом	Топливные системы АЭС	
Патентованные методы:		
CORPEX	УС, НН, Al, Cu, резина, пластик	
TechXtract	Бетон, Pb	
CAN-DECON	УС, НН	
EMMA	УС, НН, инконель	
DECOFOR	УС, НН	
DECOPAINT	УС, НН	
DECONCRETE	Бетон	
<sup>а</sup>	НН – нержавеющая сталь.	
<sup>б</sup>	УС – углеродистая сталь.	
<sup>в</sup>	Окислительно-восстановительный процесс.	
<sup>г</sup>	Низкая степень окисления ионов металла.	
<sup>д</sup>	Химическая окислительно-восстановительная дезактивация.	
<sup>е</sup>	PWR-окислительная дезактивация.	
<sup>ж</sup>	Тетрауксусная кислота.	

ТАБЛИЦА 16.3. МЕХАНИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ДЕЗАКТИВАЦИИ [16.1]

<i>Метод</i>	<i>Очищаемые материалы / поверхности</i>	<i>Замечания</i>
Смывание водой	Очень большие площади	Растворения химических веществ или смывание грязи.
Чистка пылесосом, щетками, протирка	Бетонные и другие поверхности	Используется обычно как предварительная обработка.
Обдирка покрытий	Легко доступные, не пористые поверхности	
Очистка паром	Большие поверхности со сложной формой	
Абразивный метод	Металлические и бетонные поверхности, ручной инструмент	
Обработка губкой	Краска, защитные покрытия, ржавчина, металлические поверхности	
СО <sub>2</sub> - продувка	Пластик, керамика, композит, нержавеющая и углеродистая стали, бетон, краска	Мягкие материалы могут разрушиться.
Промывка жидким азотом высокого давления	Металлы, бетон	Разновидность пескоструйной дезактивации.
Жидкоструйный фреон	Перчаточная камера на АЭС	Желательно не использовать
Продувка влажным льдом	Покрытия, бетонированная поверхность	
Водная струя высокого и сверхвысокого давления	Недоступные места, конструкционная сталь и внутренние поверхности	Загрязнение может попасть на пористые поверхности
Шлифование, скобление		Для удаления тонкого слоя загрязнения
Кирковка, скалывание, строгание	Бетонные и металлические поверхности	
Измельчение	Большое количество одинаковых элементов	
Сверление и дробление	Только бетон	Для удаления слоя толщиной в несколько сантиметров бетона
Вспучивающий раствор	Толстый слой бетона	Сверлить необходимо для закачки раствора

Ниже представлено краткое описание некоторых механических методов. Более полную информацию об этих и других методах можно найти в специальной литературе, например [16.1].

*Чистка пылесосом, щетками, протирка.* Метод заключается в физическом удалении с поверхности пыли, аэрозолей и частиц при помощи обычной очистительной техники. Предварительная чистка при помощи всасывающей аппаратуры весьма полезна для удаления больших количеств рыхлых загрязнений.

*Дезактивирующие покрытия.* Дезактивация происходит в два приема. Сначала наносят полимерный очиститель (композиция, содержащая полимеры, ПАВ и комплексообразователи) на грязную поверхность. После затвердевания эластичный полимерный слой удаляется вместе с загрязнением (т.е. происходит фиксация и локализация радионуклидов в пленке). Метод применим для различных загрязняющих веществ и любых материалов. Метод эффективен для больших не пористых поверхностей. Метод также применим для защиты поверхностей оборудования и помещений перед проведением операций, при которых возможно радиоактивное загрязнение.

В состав композиций входят водорастворимые полимеры типа поливинилового спирта (ПВС), поливинилацетатной эмульсии (ПВА), латекса (пленкообразующие); щавелевая, лимонная, азотная кислоты, трилон Б, ГМФН и т. п. (дезактивирующие). При дезактивации полимерными покрытиями удаляется более 90% радиоактивных загрязнений. В некоторых случаях хорошие дезактивирующие свойства показывают композиции на основе поливинилового спирта с добавкой азотной кислоты: 10%-ый водный раствор поливинилового спирта с добавкой 5% глицерина и 1% азотной кислоты.

*Абразивная очистка.* В методе используются различные типы абразивных порошков. Метод эффективен при удалении жидкофазных или твердофазных загрязнений с поверхности металлов и бетона. Особенно метод удобен при очистке плоских поверхностей, но может использоваться и при очистке труднодоступных мест.

*Продувка CO<sub>2</sub>* – разновидность пескоструйной обработки, когда для очистки используются гранулы CO<sub>2</sub>. Одно из преимуществ метода заключается в том, что образуются небольшие количества вторичных отходов. *Промывка жидким азотом под высоким давлением* также представляет собой разновидность пескоструйного метода, поскольку в струю жидкого азота инжектируется абразив. Удаление загрязнения основано на эффекте охрупчивания поверхностного слоя материала при воздействии жидкого азота и его удаление абразивом. *Промывка струей фреона* осуществляется путем направления на очищаемую поверхность струи фреона под высоким давлением. Из-за жестких нормативов по использованию фреона применение метода ограничено.

В методе *продувки влажным льдом* подача смеси воды и ледяных кристаллов на очищаемую поверхность осуществляется сжатым воздухом. Метод используется для удаления непрочных покрытий и некоторых твердофазных загрязняющих веществ с поверхности бетона.

Типичное применение метода *водной струи высокого и сверхвысокого давления* – очистка труднодоступных мест, например, внутренностей трубопроводов и ячеистых металлических конструкций. Давление в струе может быть в пределах от 10<sup>5</sup> до 10<sup>8</sup> Па. В зависимости от давления струя воды может удалять покраску, другие покрытия, гальванизированные слои с поверхности металлических листов, не разрушая их. Рекомендуется использовать этот метод для минимизации отходов, в частности при рециклировании и повторном использовании материалов.

При необходимости удаления тонкого слоя загрязнений используется *шлифование и скобление* поверхностей крупно гранулированными абразивами в виде охлаждаемых водой шлифовальных кругов или дисков из карбида вольфрама. При дезактивации коридоров и стен могут быть использованы алмазные шлифовальные диски.

Методы *кирковки* (нанесение насечек), *скалывания и строгания* используются при снятии загрязненного слоя бетона. Применение этого метода зависит от наличия специальных инструментов типа отбойного молотка, стреляющего иголками пистолета. Повышению производительности способствовали разработанные более совершенные инструменты, например, вращающийся скребок из карбида вольфрама, снабженный барабаном, куда при помощи вакуумной системы, снабженной фильтрами, собирается удаляемый материал.

Для удаления поверхностных загрязнений строительных конструкций могут использоваться *камнедробилки и отбойные молотки*, действующие как перфораторы. Обработанные ими поверхности становятся грубыми, неровными.

### 16.3.3 Альтернативные методы дезактивации

К разряду альтернативных методов дезактивации загрязненных поверхностей относятся их электрополировка и ультразвуковая чистка, а также плавление.

*Электрополировка* – метод анодирования, при котором с поверхности изделия удаляется определенное количество материала вместе с загрязняющим веществом. Метод пригоден для любого токопроводящего металла при отсутствии на нем изоляционного покрытия. Дезактивируемые изделия или погружают в ванну со специально подбираемым электролитом, или обрабатывают на месте путем аппликации влажных электродов и создания замкнутой цепи. Преимущества метода – высокая эффективность при небольшом объеме вторичных отходов.

Метод *ультразвуковой чистки* основан на преобразовании энергии высокочастотных звуковых колебаний в механическую энергию (вибрацию). Сильный разрыхляющий эффект создается кавитацией чистящего раствора на поверхности погруженного в жидкость изделия. Метод применим для небольших изделий преимущественно с нестойкими отложениями и нефиксированными (адгезионными) загрязнениями. Если в качестве жидкости использовать агрессивный химический раствор, то синергетическое воздействие ультразвука и химикатов могут усилить дезактивирующий эффект.

Переработка металлов и сплавов является одним из способов уменьшения объема отходов. Рассматривать *плавление* в качестве метода дезактивации можно лишь в некотором приближении, как сопутствующий плавлению металлов эффект отделения многих радионуклидов от расплава и их концентрации в шлаке.

Существует также ряд новых методов дезактивации, которые были разработаны в последнее десятилетие. Эти методы (иногда называемые “экзотическими”) еще не получили широкого распространения, их эффективность и применимость еще подлежат оценке. Информацию об этих методах можно получить в специальной литературе [16.1].

## 16.4 ДЕЗАКТИВАЦИЯ ТРАНСПОРТА, ОБОРУДОВАНИЯ И СПЕЦОДЕЖДЫ

### 16.4.1 Дезактивация транспорта

Транспортные средства, загрязненные радиоактивными веществами вследствие недостаточной герметизации тары, несовершенства погрузочно-разгрузочных механизмов и пр., являются потенциальными источниками загрязнения обслуживающего персонала, оборудования, дорожных покрытий и других объектов окружающей среды. Для дезактивации спецавтомобилей предназначены специальные моечные помещения с отдельно организованным их въездом и выездом. Пример моечного отделения, полы которого облицованы листами из нержавеющей стали, а стены и потолок покрыты химически стойкими эмалями, представлен на рис. 16.1. Обмывочные воды, загрязненные радиоактивными веществами, поступают в сливные трапы. Моечное отделение также оборудовано установкой дезактивации

крупногабаритных деталей и контейнеров, приточно-вытяжной вентиляцией с предварительным подогревом воздуха.

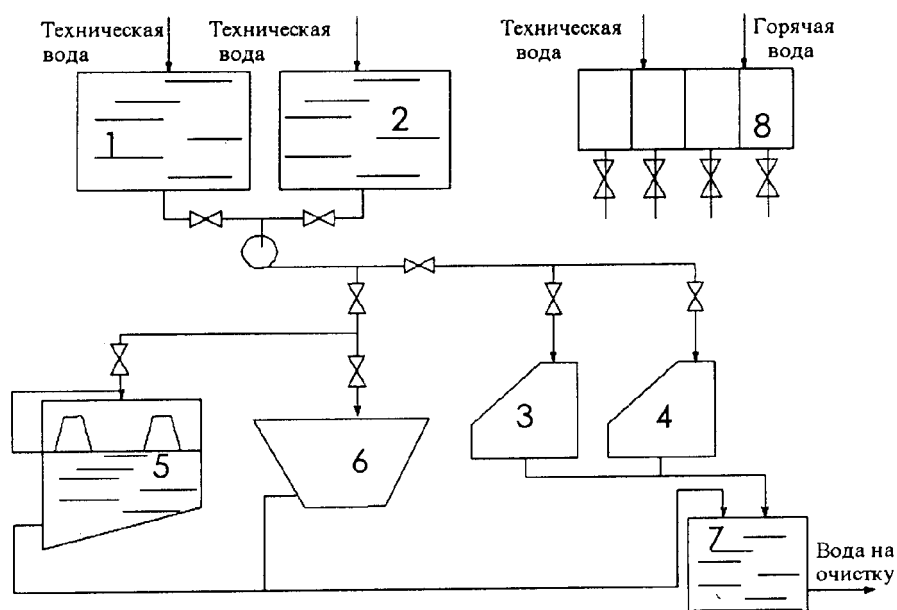


Рис. 16.1. Схема отделения мойки специального автотранспорта (1, 2 – емкости с технической водой; 3, 4 – боксы для дезактивации; 5 – установка мойки контейнеров; 6 – ванна для дезактивации крупногабаритных деталей; 7 – накопительная емкость; 8 – секционная емкость для дезактивирующего раствора).

Расход дезактивирующих веществ на обработку транспортного средства зависит от различных факторов: физико-химических свойств загрязняющего вещества, уровня загрязненности материала, площади загрязнения, времени контакта загрязняющих веществ с поверхностью материала, формы и доступности участков поверхности и пр. Продолжительность и качество дезактивации зависят от правильного подбора дезактивирующих средств и правильного проведения процесса.

#### 16.4.2 Дезактивация оборудования

Дезактивация инструментов и деталей оборудования производится в дезактивационных ваннах, заполненных дезактивирующим раствором. Для быстрой и эффективной дезактивации малогабаритных деталей может использоваться бачок, оборудованный мешалкой и подогревом дезактивирующего раствора до 90–100°C.

В помещениях, где производятся работы с радиоактивными веществами, следует производить влажную ежедневную уборку. В случае загрязнения радиоактивными веществами помещения или его отдельных участков (полов, стен, столов) необходимо немедленно приступить к дезактивационным мероприятиям. При этом сухое загрязняющее радиоактивное вещество следует собрать слегка увлажненной тряпкой, не размазывая по чистым участкам. Растворы собираются сухими, легко впитывающими влагу тряпками или фильтровальной бумагой; если пролито большое количество радиоактивных жидкостей, их необходимо засыпать сухими опилками.

После этих начальных операций оставшееся загрязнение устраняется обработкой дезактивирующими растворами.

Как уже отмечалось, эффективность дезактивации оборудования зависит от структуры поверхности и свойств материала, из которого оно изготовлено. При дезактивации поверхностей, покрытых пористыми или легко смачиваемыми материалами (керамическая плитка, цемент), не следует оставлять надолго дезактивирующий раствор во избежание впитывания материалом раствора с радиоактивным веществом.

По окончании дезактивации поверхности промывают водой и протирают сухой чистой тряпкой, после чего эффективность проведенных операций проверяется соответствующими радиометрическими приборами.

По окончании дезактивации поверхности промывают водой и протирают сухой чистой тряпкой, после чего эффективность проведенных операций проверяется соответствующими радиометрическими приборами.

#### **16.4.3 Дезактивация спецодежды**

Дезактивация спецодежды определяется особенностями радиоактивного загрязнения и свойствами материала, из которого она изготовлена. Поверхностное загрязнение одежды эффективно удаляется простой обработкой при помощи пылесоса; удаление глубинного загрязнения требует применения жидкостного способа, а именно стирки. Дезактивации стиркой подвергаются спецодежда, индивидуальные средства защиты и полотенца. Помимо дозиметрического контроля, перед стиркой проводится сортировка одежды, необходимость которой связана с тем, что допустимые уровни загрязнения  $\alpha$ -активными препаратами ниже, чем  $\beta$ -активными. Кроме того, производится сортировка по типу одежды: верхняя, защитная и специальная. Дезактивация производится в стиральных машинах; режим стирки выбирается в зависимости от вида загрязнения и свойств обрабатываемых изделий. Выбор композиции дезактивирующего раствора основан на тех же принципах, что и дезактивация загрязненных поверхностей.

Эффективность дезактивации неокрашенной одежды ниже, чем окрашенной, поскольку неокрашенная хлопчатобумажная ткань обладает большей сорбционной способностью и характеризуется менее полным излечением адсорбированных радионуклидов. Повышение температуры стирки и полоскания на 10 – 20°C снижает вероятность повторного загрязнения и уменьшает продолжительность операции. Недостатком описанного способа дезактивации является большой расход воды (на одну тонну сухой одежды требуется 60 м<sup>3</sup> воды), некоторое снижение которого достигается оптимизацией процесса. Сточные воды от стирки представляют собой низкоактивные отходы, подлежащие переработке.

При дезактивации спецодежды медицинских учреждений, где используются радиоактивные материалы, следует учитывать и необходимость проведения дезинфекции и другой специальной обработки.

## ЛИТЕРАТУРА

- [16.1] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, State of the Art Technology for Decontamination and Dismantling of Nuclear Facilities, Technical Reports Series No. 395, IAEA, Vienna (1999).
- [16.2] Дмитриев С.А. ред. Обращение с радиоактивными отходами от неядерных применений. (Лекции курсов – семинара по подготовке и повышению квалификации специалистов, работающих в области обращения с радиоактивными отходами). МГУ им. М.В. Ломоносова и МосНПО “Радон”, Москва - Сергиев Посад, (2000).
- [16.3] Зимон А.Д., Пикалов В.К. “Дезактивация” М., Энергоиздат, 1994г.
- [16.4] Ампелогова Н.И. и др. “Дезактивация в ядерной энергетике”, М. Энергоиздат, 1982г.



## **17 ОБЕСПЕЧЕНИЕ КАЧЕСТВА И КОНТРОЛЬ КАЧЕСТВА ПРИ ОБРАЩЕНИИ С РАДИОАКТИВНЫМИ ОТХОДАМИ**

### **17.1 ВВЕДЕНИЕ**

Обращение с радиоактивными отходами является важным компонентом национальных ядерно-энергетических программ, а также приложений и использования ядерных материалов и ядерных технологий в медицине, промышленности, научных исследованиях и в других областях. Сбор, обработка, транспортировка, переработка и кондиционирование, хранение и захоронение радиоактивных отходов должны проводиться с соблюдением необходимых мер безопасности и адекватной защиты от радиационного облучения, защиты здоровья человека и охраны окружающей среды. Требование обеспечения безопасности для будущих поколений является основой выработки стратегии обращения с радиоактивными отходами во многих странах. В этой связи обеспечение качества и контроль качества при обращении с радиоактивными отходами играют важную роль в осуществлении такой стратегии и поэтому должны быть составной частью всех этапов и процессов обращения с отходами от их образования до окончательного захоронения.

Обеспечение качества и контроль качества должны осуществляться с момента сбора радиоактивных отходов на месте их образования, а также на всех этапах обработки отходов вплоть до их окончательного захоронения (или санкционированного сброса после очистки). На рисунке 1 показаны различные аспекты системы обращения с радиоактивными отходами и их связь с обеспечением качества и контролем качества на примере обращения с отходами от использования радионуклидных источников в медицине.

Соблюдение требований качества необходимо для обеспечения и гарантирования эффективности и безопасности при выполнении всех операций с радиоактивными отходами, которые продиктованы требованиями регулирующих органов. Уровень требований к контролю и обеспечению качества может различаться и зависеть от реальных условий, потенциальной опасности отходов и процессов их обработки.

**Обеспечение качества** (QA – “Quality Assurance”) включает все планируемые и систематические действия, параметры процесса и требования, которые призваны обеспечить требуемый уровень качества получаемого продукта.

**Контроль качества** (QC – “Quality Control”) – это осуществление контролирующих процедур и практики, которые удостоверяют, что установленные нормы качества соблюдаются в требуемом объеме.

Эффективное выполнение программы обеспечения качества и требований контроля качества призваны гарантировать, с одной стороны, технологическую и экономическую эффективность всех процессов обращения с радиоактивными отходами, и с другой стороны, безопасность обращения с радиоактивными отходами для персонала предприятий, приемлемость обработанных отходов для хранения, транспортировки и захоронения, безопасности всего комплекса процедур и действий для населения и окружающей среды.



Рис. 17.1. Обращение с отходами и контроль качества.

Необходимо принимать во внимание, что степень сложности и комплексности обеспечения качества и контроля качества зависит от характеристик и потенциальной опасности отходов, их объемов, конкретных специфических условий. Соблюдение основных принципов обращения с радиоактивными отходами и требований руководств по безопасности должно соответствовать масштабам соответствующей деятельности по обращению с отходами.

## 17.2 ОБЕСПЕЧЕНИЕ КАЧЕСТВА

### 17.2.1 Общие принципы

Обеспечение качества (QA) является важным аспектом обращения с радиоактивными отходами. Международные требования к обеспечению качества сформулированы в публикациях Международной организации по стандартизации (ISO 9000). Обеспечение качества, как отмечалось выше, означает все планируемые и систематические действия, необходимые для того, чтобы обеспечить наиболее эффективное достижение основных целей обращения с отходами. Выбранные технологии и операции с радиоактивными отходами должны обеспечивать

необходимое качество окончательных форм и упаковок отходов, а также обеспечивать безопасность персонала, населения и окружающей среды.

Например, качество кондиционированных форм радиоактивных отходов может определяться и обеспечиваться требованиями:

- к исходным материалам (составу и характеристике исходных отходов),
- к технологическому оборудованию (приемлемость оборудования для данного типа отходов, исправность оборудования и т.д.),
- к параметрам технологических процессов (температура, давление, pH, концентрации компонентов и т.д.),
- к качеству используемых вспомогательных и расходных материалов (цемент, битум, присадки, добавки и т.д.),
- к квалификации эксплуатирующего персонала и др.

Обеспечение качества – это выполнение всех вышеперечисленных и других необходимых технологических требований, которые определяют в конечном счете качество (эффективность) процессов и качество получаемого продукта. На всех стадиях обработки отходов должны быть определены основные параметры процессов (температура, давление, состав компонентов, их химические характеристики и т.д.) и свойства и характеристики отходов (механическая прочность, химическая и радиационная стойкость и т.д.), которые подлежат измерению и контролю. Для обработки, транспортировки и хранения отходов эти параметры должны обеспечивать безопасность операционного персонала. Также должно учитываться поведение отходов в различных экстремальных ситуациях в случае аварийной обстановки.

Соблюдение требований качества необходимо для того, чтобы обращение с отходами проводилось в соответствии с требованиями проектной документации, с соблюдением требований безопасности и других требований и критериев, установленных органами государственного регулирования. Окончательные упаковки отходов (контейнеры с обработанными кондиционированными отходами) должны соответствовать установленным требованиям качества для безопасной транспортировки и хранения, соответствовать всем критериям приемлемости отходов для захоронения и обеспечивать безопасность для населения и окружающей среды.

### **17.2.2 Программы качества**

Для обеспечения качества при обращении с радиоактивными отходами должна быть разработана и утверждена органами регулирования программа качества. Программы обеспечения качества (QA) обычно охватывают все виды деятельности от сортировки и характеристики исходных отходов, обработки и кондиционирования до окончательного захоронения или долгосрочного хранения кондиционированных форм отходов.

Программа обеспечения качества (QA) должна быть разработана и внедрена каждой организацией, вовлеченной в процесс обращения с радиоактивными отходами. В принципе она представляет собой описание технологических процессов, их параметров, обеспечивающих требуемое качество производимого продукта. Эти программы должны соответствовать основным принципам обращения с радиоактивными отходами [17.1], а также требованиям, принятым на международном уровне [17.2].

В каждой программе обеспечения качества должно быть также описано планирование, выполнение и оценка действий, направленных на обеспечение качества. Рекомендации по разработке и осуществлению программы обеспечения качества можно найти в Руководстве по Безопасности № 50-SG-QA1 [17.3]. Ответственность за разработку, выполнение и поддержку программы обеспечения качества обычно возлагается на руководство предприятия.

Программа QA должна обеспечивать системный подход ко всем действиям, влияющим на качество упаковок отходов и включать, где это целесообразно, проверку достижения поставленных целей и подготовку документов (сертификатов) по качеству.

В пределах организации должны быть четко определены организационная структура, обязанности, уровни полномочий и персональной ответственности за управление, выполнение и оценку действий, направленных на качество упаковок отходов. Четко должны быть определены связи и их контроль внутри различных подразделений организации, а также с ее поставщиками.

Действия, контролируемые в соответствии с программой обеспечения качества, должны быть четко прописаны наряду с их любыми ограничениями. Эти действия могут включать:

- (1) Предэксплуатационные действия (анализ исходных необработанных отходов, разработка или выбор технологических процессов обработки и иммобилизации, конструкции контейнеров, проектирование, строительство, монтаж и ввод в эксплуатацию установок для обработки и кондиционирования отходов).
- (2) Эксплуатационные действия (приемка отходов, предобработка, обработка, кондиционирование, подтверждение соответствия упаковок отходов установленным требованиям, временное хранение).
- (3) Транспортные действия (подготовка к отправке, использование транспортных контейнеров, подготовка документации к перевозке и сама перевозка).

Для предэксплуатационных действий рекомендуется иметь отдельную программу обеспечения качества для каждого действия, особенно, если действия выполняются различными организациями (например, перевозка). Однако для эксплуатационной стадии в процессе изготовления упаковок программа обеспечения качества должна быть едина, основана на контроле всех взаимосвязанных процессов и включать следующее:

- (1) Идентификацию всех факторов, определяющих характеристики отходов;
- (2) Верификацию того, что характеристики поступающих отходов находятся в установленных пределах;
- (3) Идентификацию оборудования и параметров технологического контроля процесса, которые гарантируют, что характеристики обработанных отходов будут отвечать требуемым параметрам;
- (4) Идентификацию средств измерения и контроля, необходимых для достижения определенного стандарта точности и надежности;
- (5) Меры для периодической проверки приемлемости параметров процесса и изменения их по мере необходимости;
- (6) Заключительную проверку соответствия упаковок отходов требуемым параметрам качества;
- (7) Выдачу сертификата и других документов, подтверждающих, соответствие упаковок отходов заданным параметрам качества.

Программа обеспечения качества должна учитывать влияние всех систем, компонентов и процедур обращения с отходами на качество выполняемых работ и качество получаемых продуктов (промежуточных или конечных форм радиоактивных отходов). Следует отметить, что степень детализации программ обеспечения качества при обращении с радиоактивными отходами зависит и определяется объемом и потенциальной опасностью образующихся отходов, а также сложностью соответствующих технологических процессов. Требования к программам качества должны быть адекватными уровню потенциальной опасности радиоактивных отходов.

Программа обеспечения качества – это по сути выработка требований ко всем процедурам и параметрам технологических процессов обработки отходов, при соблюдении которых будет обеспечено необходимое качество продукта – кондиционированных форм (либо промежуточных форм) радиоактивных отходов.

Программа обеспечения качества обычно является частью заявки на получение лицензии на право ведения работ с радиоактивными материалами и радиоактивными отходами и должна анализироваться и утверждаться органами государственного регулирования. Программа должна определять наиболее важные параметры качества, и каким образом обеспечивается соблюдение этих параметров. Ответственность за соблюдение параметров и требований качества лежит на эксплуатирующей организации (операторах установок).

Программы обеспечения качества подлежат периодическому пересмотру с целью анализа их эффективности и соответствия существующим требованиям. Органы регулирования и контроля должны анализировать результаты аудиторских проверок технологических процессов и качества производимых упаковок отходов, их соответствие установленным требованиям качества и на основании такого анализа вводить коррективы в существующие программы качества. Если обнаружено несоответствие контролируемых свойств установленным требованиям, оно должно быть проанализировано с целью установления причины и внесения соответствующих корректив в технологический процесс, в его параметры, и, соответственно, и в программу обеспечения качества.

Поскольку национальные программы обращения с радиоактивными отходами могут значительно различаться в разных странах в зависимости от объема и характера образующихся отходов, выбранных технологий и способа захоронения, соответствующие различия будут и в программах обеспечения качества. В этой связи рекомендуется, чтобы каждая страна разработала свои критерии и требования качества радиоактивных отходов с учетом как международных рекомендаций, так и национальных особенностей, которые могут включать и учитывать как технические характеристики, так и правовые, социальные, природно-географические, экономические и другие национальные или местные факторы.

### **17.2.3 Аудиторские проверки**

Аудиторские проверки (аудит) – это документированные анализ и оценка технологических процессов и качества получаемых продуктов (например, кондиционированных упаковок отходов или всего процесса в целом) на соответствие установленным требованиям. Такая проверка включает анализ установленных процедур, исходных характеристик отходов, технологических параметров процессов, определяющих качество продукта, а также анализ инструкций, регламентов, стандартов, административных программ, проверку документации и т.д.

Для эффективной проверки программ качества обычно проводят три вида таких аудиторских проверок или анализа, а именно: всей системы, отдельных процессов и продукции.

### ***Аудиторский анализ всей системы***

Аудиторский анализ всей системы позволяет установить или проверить:

- КАК в технологических программах и планах отражены установленные требования обеспечения качества и безопасности всей системы;
- КАК эти требования отражены и соблюдаются в эксплуатационных процедурах;
- Достаточны ли эти требования и условия для обеспечения необходимого уровня эффективности и качества всей системы.

### ***Аудиторский анализ отдельных процессов***

Аудиторский анализ отдельных процессов необходим для проверки соответствия этих процессов установленным технологическим и проектным регламентам. Такой анализ может включать следующие элементы:

- соответствие ключевых параметров процесса проектным;
- наличие своевременной профилактики и квалифицированного ремонта оборудования;
- соответствие контролирующего оборудования и приборов необходимым требованиям;
- способность установки, оборудования или процесса выдавать продукт требуемого качества.

### ***Аудиторский анализ продукции***

Аудиторский анализ продукции обычно включает прямой анализ конечного продукта, его соответствия всем необходимым параметрам и характеристикам качества. В данном случае речь идет о конечной упаковке или контейнере отходов, предназначенном для захоронения или долгосрочного хранения. Такая проверка или анализ либо проводится на регулярной основе самой эксплуатирующей организацией, либо периодически сторонней проверяющей организацией, обладающей для этого необходимой квалификацией и оборудованием. Результаты всех аудиторских проверок должны быть соответствующим образом документированы.

Совершенно очевидно, что программы обеспечения качества и аудит должны быть неотъемлемой частью рабочих программ как централизованных предприятий по обращению с радиоактивными отходами, так и отдельных предприятий, генерирующих радиоактивные отходы или проводящих их предварительную обработку. По сравнению с последними, на централизованных предприятиях эта программа может быть более полной. Однако учет требований качества и наличие соответствующих программ важно и для тех и для других предприятий.

В Приложении приведен примерный перечень вопросов, которые могут входить в аудиторскую проверку небольших предприятий, производящих радиоактивные отходы.

#### **17.2.4 Обучение и повышение квалификации персонала**

Обучение персонала является интегральной частью как обеспечения качества, так и контроля качества. Качественное и квалифицированное выполнение всех операций и процедур по обращению с радиоактивными отходами персоналом предприятий может быть только в том случае, когда проводится регулярная проверка навыков и повышение квалификации специалистов. Руководство предприятий должно создавать такие условия, чтобы все работники понимали степень важности задачи в целом, взаимосвязь всех этапов обработки отходов, степень потенциальной опасности конкретных отходов и операций с ними, степень персональной ответственности персонала, вовлеченного в операции с радиоактивными отходами, необходимость и важность обеспечения качества и процедур контроля качества на всех этапах работ с отходами.

Персонал, выполняющий работы по сортировке и определению характеристик отходов, по их иммобилизации и кондиционированию, другим операциям с отходами, должен обладать необходимыми базовыми знаниями и опытом практической работы на конкретных операциях для обеспечения качественного выполнения соответствующих работ.

Руководство предприятия несет ответственность за выделение необходимых средств для обеспечения обучения и тренировок персонала. Все данные по проверке знаний и обучению должны быть должным образом запротоколированы. Рекомендуются проводить обязательные обучающие курсы со вновь принятым на работу персоналом, а также регулярно проводить проверку знаний и обучение действующего персонала. Обучение должно включать как теоретическую, так и практическую подготовку персонала с акцентом на специфику данного предприятия.

#### **17.2.5 Документация и отчетность**

Требования программы обеспечения качества (QA) должны быть изложены в рабочих процедурах и инструкциях. Процедуры должны использоваться для описания действий персонала путем обозначения того, что должно быть сделано и кем, и как каждое действие будет осуществляться и контролироваться, чтобы гарантировать его эффективность. Инструкции должны содержать описания индивидуальных задач, поддерживающих выполнение всего процесса в целом.

Все документы, описывающие программу обращения с отходами, процедуры и используемые инструкции при осуществлении программы обеспечения качества, должны формально контролироваться и должны быть предприняты меры для их подготовки, утверждения и периодической ревизии.

Как и в случае контроля документов, необходимых для осуществления программы обеспечения качества, должна быть установлена система ведения записей для демонстрации эффективности выполнения этой программы и для обеспечения доказательства достижения и поддержания безопасности и качества индивидуальных упаковок. Такая система должна предусматривать контроль всех необходимых записей, включая их идентификацию, хранение, и доступность для ревизии.

В программу обеспечения качества должно быть включено краткое описание систем и обязанностей по контролю документов и записей. Дальнейшие рекомендации по контролю документов и записей можно найти в Руководстве по безопасности № 50-SG-QA2 [17.4].

## 17.3 КОНТРОЛЬ КАЧЕСТВА

### 17.3.1 Общие принципы

Контроль качества (QC) включает в себя определенную деятельность и процедуры с целью определения и учета основных или важных параметров продукта или процесса. Эта деятельность, насколько это практически применимо, должна быть направлена на контроль отдельных элементов процессов обработки отходов, отдельных характеристик образующихся промежуточных или конечных форм радиоактивных отходов, которые могут включать:

- идентификацию всех факторов, определяющих характеристики отходов, таких как уровень радиоактивности, наличие других токсичных, вредных или опасных компонентов, других важных свойств и параметров,
- измерение этих характеристик и параметров для определения нахождения их в требуемых пределах,
- определение приборов и инструментов, позволяющих измерять нужные параметры в заданных или установленных пределах,
- установление необходимой точности при измерении заданных параметров,
- установление требуемой периодичности в измерениях ключевых параметров,
- документирование результатов измерения и контроля,
- периодический анализ данных измерений и контроля,
- периодический пересмотр и модернизация процедур и параметров контроля и т.д.

При определении процедур и параметров контроля должны учитываться все важные характеристики отходов, такие как физические характеристики, химический состав и свойства, биологическая активность или токсичность отходов. Требуемый контроль качества должен практиковаться для всех компонентов программ обращения с радиоактивными отходами, причем эти процедуры должны учитывать как нормальную эксплуатацию установок и оборудования, так и возможные аварийные ситуации.

### 17.3.2 Требования регулирующих органов

Перечень процедур и операций по контролю качества обычно должен включать все важные этапы обработки отходов, взаимосвязь различных стадий и этапов обработки, а также взаимодействие с другими организациями которые также должны участвовать в этом процессе вплоть до захоронения отходов. Всесторонняя программа обеспечения и контроля качества обычно является неотъемлемой частью заявки на лицензию, которую должен рассматривать, оценивать и на которую должен давать заключение орган государственного регулирования.

Должны быть определены те государственные структуры, которые являются ответственными за обеспечение программы контроля качества и которые должны иметь для этого соответствующую подготовку и квалификацию. В этот процесс может также быть вовлечено несколько организаций (например, Министерство охраны природы, Министерство здравоохранения и т.д.). В соответствии с установленной процедурой контроля качества, которая может различаться в разных странах, эти процедуры должны обеспечивать необходимый уровень безопасности обращения с отходами в организации, производящей отходы, и в организации, обеспечивающей их переработку и захоронение.



### 17.3.3 Оценка риска

Оценка риска является существенной частью программы обращения с радиоактивными отходами. Интегрированный подход к оценке риска должен осуществляться с соблюдением всех существующих требований и руководств по безопасности, а также с учетом потенциальной опасности, связанной с отдельными стадиями или этапами обращения с отходами. Оценка риска должна покрывать все виды существующей опасности, связанной как со свойствами отходов, так и с отдельными процедурами их обработки на существующих установках. Оценка риска также должна предусматривать и учитывать действия с отходами за пределами установок, т.е. во время транспортировки и хранения. Ответственность таких транспортных или других вовлеченных предприятий должна быть также определена.

Цель оценки качества и уменьшения потенциальной опасности отходов может эффективно достигаться с помощью оценки риска. Если критерии риска определены, они определяют также параметры контроля, процедуры контроля и необходимые навыки персонала для осуществления такого контроля. Если параметры процесса подвергаются изменению, должна пересматриваться оценка риска, для того чтобы убедиться, что изменение этих параметров не приведет к неприемлемому увеличению или изменению характера риска. Рекомендуется вести учет и анализ всех инцидентов и аварий (а также аварийных ситуаций, не приведших к реализации риска) с целью усовершенствования процесса в целом или отдельных его параметров. Такой анализ позволяет корректировать модели оценки риска с целью повышения их достоверности, а также корректировать параметры процесса и процедуры оценки качества.

### 17.3.4 Сбор, анализ и хранение информации

Создание механизма сбора и хранения ключевой информации является важным компонентом как системы обращения с отходами, так и системы контроля качества. О необходимости и важности учета и хранения специфической информации об отходах, включающей их исходные характеристики, способы обработки и параметры конечных продуктов говорится во многих руководствах и рекомендациях, подготовленных МАГАТЭ. Соответствующие базы данных должны содержать ясную, легко читаемую информацию. Эта информация должна отражать основные параметры, важные для учета и контроля качества и безопасности. Рекомендуется, чтобы эта информация собиралась и хранилась в компьютерном (электронном) виде и была доступна для анализа заинтересованных и ответственных организаций.

Важным компонентом системы обращения с радиоактивными отходами является подготовка простых и универсальных процедур документирования необходимой информации. Эти процедуры должны включать практические требования (рекомендации) к сортировке отходов в соответствующие контейнеры, операторы должны быть должным образом проинструктированы и обучены для квалифицированного выполнения требуемых операций. Должны быть определены ответственные на каждом этапе обработки отходов. Руководители работ должны четко представлять место и роль проводимых операций с отходами в рамках общей стратегии обращения с отходами, обеспечивать эти работы необходимой инженерно-технической поддержкой.

Система документации и ее учета должна давать интегральную картину об отходах и практике их обработки, начиная с момента образования отходов до их помещения в хранилище или могильник. Система должна позволять идентифицировать

каждую индивидуальную упаковку отходов в хранилище или могильнике. Один из способов такой идентификации является нанесение штрих-кодов на упаковки и компьютерный учет связанных с ними характеристик. Система контроля качества должна определять также срок хранения определенной информации, необходимые детали информации и ее объем. В соответствии с установленными требованиями и процедурами собранные и хранимые данные должны подтверждать соответствие упаковок отходов всем требованиям качества и безопасности. Эти данные могут подвергаться периодической аудиторской проверке, поскольку аудит является частью программы обеспечения качества.

Все документы, используемые в рамках программы обеспечения качества и программы обращения с отходами, также формально должны контролироваться в процессе их подготовки, утверждения или пересмотра. Если используется компьютерная система такой документации, соответствующее программное обеспечение должно проверяться на предмет адекватного отражения необходимых требований к ее функционированию и возможности анализа.

Система документации и контроля необходима для идентификации, сбора, индексации и хранения информации, а также для извлечения нужной информации для анализа и контроля. Поэтому хранение информации должно быть организовано таким образом, чтобы ее можно было в любое время извлечь, и в то же время хранение должно гарантировать защиту этой информации от несанкционированного доступа или потери. Доступ к системам сбора и хранения информации должны иметь только подготовленные операторы: система должна иметь необходимые средства защиты от ошибок и неправильных действий операторов, а также необходимые дубликаты (чаще всего в электронной форме) для предотвращения потери информации в случае отказа компьютера или аварии.

Детальная информация об объемах и характеристиках генерируемых отходов является базой для разработки и оценки программ обращения с радиоактивными отходами. Как часть процедур оценки качества информация для каждой установки должна собираться отдельно. Такие данные позволяют определять способы оптимизации процессов для уменьшения образования отходов, а также для усовершенствования их обработки. Информация должна включать следующее:

- данные обо всех радионуклидах, используемых на предприятии или установке и характеристике образующихся отходов;
- данные по сортировке отходов по периоду полураспада;
- данные о способе захоронения и детальная информация о требованиях к качеству захораниваемых упаковок;
- данные об организационной ответственности всех, участвующих в программе обращения с отходами;
- описание процедур и технологий, используемых при обращении с радиоактивными отходами;
- описание процедур проверки и верификации качества упаковок отходов;
- фактические данные по дозам и концентрациям радионуклидов;
- тип упаковок используемых для отходов;
- данные, подтверждающие соблюдение требований регулирующих органов;
- сертификация результатов измерений и т.д.

## 17.4 ЗАКЛЮЧЕНИЕ И РЕКОМЕНДАЦИИ

Применительно к небольшим количествам радиоактивных отходов от различных ядерных приложений в медицине и исследовательских работах рекомендации по контролю и обеспечению качества могут быть сформулированы следующим образом:

- Характеристики радионуклидов, применяемых в медицине и исследовательских работах, отличаются большим разнообразием. Источники отходов (радиоизотопы) должны быть полностью охарактеризованы по их радиологическим, химическим, биологическим и физическим свойствам. Эти данные являются основой для понимания характеристики образующихся отходов и выбора способа (способов) их обработки.
- Выбор адекватных методов обработки, минимизация или предотвращение образования отходов должны быть основой любой программы обращения с отходами.
- Кроме защиты от ионизирующего излучения должны учитываться все другие опасные компоненты отходов, такие как химическая или биологическая токсичность, взрыво- или пожароопасность и т.д. На всех рабочих местах также должна соблюдаться культура безопасности.
- Сортировка и отдельный сбор отходов на местах образования являются основой эффективного обращения с радиоактивными отходами.
- Сброс в окружающую среду отходов с очень низкими концентрациями радионуклидов и других опасных компонентов может производиться только по разрешению органов контроля на основании предварительного анализа безопасности.
- Возврат отработавших радиоактивных источников и некоторых видов радиоактивных отходов исходным поставщикам изотопной продукции является распространенной практикой. Возможность такого возврата должна рассматриваться и обсуждаться с поставщиками при заказе и поставке радиоактивной продукции.
- Многие радиоизотопы, применяемые в медицине и научных исследованиях, являются короткоживущими. Для отходов, содержащих такие радионуклиды, выдержка (хранение) до полного распада является наиболее приемлемым способом их обработки с последующим освобождением от регулирующего контроля.
- Технологии, выбранные и используемые для обработки и кондиционирования отходов, должны быть приемлемыми для данного типа отходов, соответствовать интегральной схеме обращения с отходами.
- Эффективная стратегия обращения с радиоактивными отходами должна предусматривать все компоненты и все этапы обработки с момента образования отходов до их окончательного захоронения, особенно с учетом возможных длительных временных интервалов, разделяющих начальные и конечные стадии процесса обращения с отходами.

- Обращение с отходами является довольно динамичным процессом, поэтому рекомендуется регулярно пересматривать существующие концепции с учетом возникших изменений в технологиях, в характеристике отходов, либо в требованиях регулирующего органа.
- Обеспечение качества и контроль качества должны соблюдаться на всех этапах обращения с отходами.

## 17.5 ПРИЛОЖЕНИЕ. ПРИМЕРНЫЙ ПЕРЕЧЕНЬ ВОПРОСОВ АУДИТОРСКОЙ ПРОВЕРКИ

Ниже представлен примерный перечень вопросов, на которые необходимо получить ответ при аудиторской проверке предприятия, производящего радиоактивные отходы, на соответствие требованиям, предъявляемым к деятельности, связанной с обработкой отходов.

- (1) Наличие лицензии на проведение работ с радиоизотопами.
- (2) Сколько лабораторий, участков, цехов, отделений предприятия используют радиоактивные материалы?
- (3) Существует ли централизованный учет поставки радиоактивных материалов на предприятие? Если нет, то какова существующая система учета радиоактивных материалов и радиоактивных отходов?
- (4) Собрать данные по всем радиоизотопам, используемым на предприятии, периодичность поступления отдельных радиоизотопов. Определить наличие неиспользованных источников и изотопов. Сможет ли централизованный учет поставок снизить количество заказываемых изотопов и уменьшить образование радиоактивных отходов на предприятии в целом?
- (5) Наличие разрешения на сброс отходов с незначительной остаточной активностью в окружающую среду, ответственные за контроль таких сбросов. Процедуры обеспечения или осуществления контроля сбросов.
- (6) Наличие организации, принимающей радиоактивные отходы на обработку, хранение и захоронение. Требования принимающей стороны к характеристике поступающих отходов.
- (7) Максимальный разрешенный период хранения радиоактивных отходов на предприятии и максимальное разрешенное количество отходов для хранения.
- (8) Кто на предприятии отвечает за обращение с радиоактивными отходами и ведение их учета?
- (9) Процедуры обеспечения радиационной защиты персонала, ответственные за радиационный контроль.
- (10) Периодичность сбора отходов от лабораторий, цехов и т.д.
- (11) Наличие проверки знаний персонала, необходимость в обучении и тренировках.
- (12) Количество отходов, образующихся на местах, их документирование. Качественные и количественные характеристики. Процедуры сбора и сортировки отходов.
- (13) Общая картина образования отходов на предприятии, объемы и характеристики (твердые, жидкие, взвеси и шламы, органические, биологические и т.д).
- (14) Упаковки, применяемые для различных типов отходов. Их соответствие требованиям хранения, транспортировки на площадке предприятия, а также за его пределами.
- (15) Внутренняя транспортировка отходов на площадке предприятия.

- (16) Существует ли и как осуществляется хранение отходов с короткоживущими радионуклидами до их полного распада. Контроль полноты распада.
- (17) Наличие и периодичность возникновения специфических отходов, не вписывающихся в общую схему обращения с отходами (долгоживущие изотопы, токсичные элементы и токсичные вещества, взрывоопасные соединения и т.д.). Предложения по обращению с такими отходами.
- (18) Какие методы предварительной обработки используются на предприятии? Кто проводит предобработку? Какие технологии используются?
- (19) Требования к отходам, принимаемым на обработку централизованной организацией. Контроль соблюдения этих требований.
- (20) Эффективность сортировки и сегрегации отходов в зависимости от их характеристик и последующих процедур обработки.
- (21) Наличие программы минимизации радиоактивных отходов.
- (22) Процедура дезактивации и контроль полноты дезактивации на предприятии, и т.д.

Конкретный перечень вопросов аудиторской проверки зависит от многих факторов и во многом определяется как характером самого предприятия и образующихся на нем отходов, так и общей инфраструктурой обращения с радиоактивными отходами в стране.

### ЛИТЕРАТУРА

- [17.1] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, The Principles of Radioactive Waste Management, Safety Series, No. 111-F, IAEA, Vienna (1996).
- [17.2] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, International Basic Safety Standards for Protection against Ionising Radiation and for the Safety of Radiation Sources, Safety Series No.115-1, IAEA, Vienna (1994).
- [17.3] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Preparation of the Quality Assurance Programme for Nuclear Power Plants, Safety Guide No. 50-SG-QA1, IAEA, Vienna (1978).
- [17.4] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Quality Assurance Records System for Nuclear Power Plants, Safety Guide No. 50-SG-QA2, IAEA, Vienna (1979).

**Список лиц принимавших участие в подготовке учебного пособия**

Батюхнова О.Г.	Российская Федерация
Бергман К.	Швеция
Ефременков В.М	Международное Агенство по Использованию Атомной Энергии
Нахмилнер Л.	Чешская Республика
Ожован М.И.	Великобритания
Цыпленков В.А.	Российская Федерация
Хейнонен И.	Финляндия