

Обращение с отработанным топливом и радиоактивными отходами

Согласно российскому «Закону об использовании атомной энергии» (от 21 ноября 1995 года № 170-ФЗ) **радиоактивные отходы (РАО)** – это не подлежащие дальнейшему использованию материалы и вещества, а также оборудование, изделия (в том числе отработавшие источники ионизирующего излучения), содержание радионуклидов в которых превышает уровни, установленные в соответствии с критериями, установленными Правительством Российской Федерации.

Отработанное (Облученное) ядерное топливо (ОЯТ)– это топливо, отработавшее цикл в реакторе АЭС. Отработавшее топливо содержит в себе как недовыгоревший в процессе работы реактора уран-235, его изотопы и другие трансурановые элементы, так и активированные конструкционные материалы. Поэтому в тепловыделяющих сборках продолжают происходить ядерные превращения, которые сопровождаются повышенным радиоактивным излучением, а также постоянным (слабо снижающимся в течении времени) выделением тепла.

Согласно российскому «Закону об использовании атомной энергии» (от 21 ноября 1995 года № 170-ФЗ) **радиоактивные отходы (РАО)** – это не подлежащие дальнейшему использованию материалы и вещества, а также оборудование, изделия (в том числе отработавшие источники ионизирующего излучения), содержание радионуклидов в которых превышает уровни, установленные в соответствии с критериями, установленными Правительством Российской Федерации.

Методы обращения с отработанным ядерным топливом (ОЯТ) и радиоактивными отходами (РАО) могут быть различны в стратегических подходах и по набору используемых технологий, однако все они объединяются общими принципами, связанными вопросами безопасности. Данные принципы разрабатываются и распространяются международными организациями, в частности МАГАТЭ, через соответствующие правила и руководства, а также устанавливаются международными договорами, в частности «Объединенной конвенцией о безопасности обращения с отработанным топливом и безопасности обращения с радиоактивными отходами».

Обращение и хранение отработанного топлива

Национальные концепции государств, связанные с ОЯТ, базируется на двух стратегических подходах. Первый рассматривает отработанное топливо в

качестве ценного сырья для получения компонентов нового топлива и ряда радиоактивных изотопов, используемых в медицине, сельском хозяйстве, промышленности. При этом переработка может выполняться по мере наработки ОЯТ или после временного/долговременного хранения. Второй подход определяет ОТВС в качестве РАО, подлежащих захоронению. Большинство стран поддерживает первый подход как более рациональный. Кроме того, требования к размещению ОЯТ на вечное захоронение технически трудно исполнимы и реализуемы на практике в полном объеме. Это является одной из причин того, что ни одного могильника ОЯТ в мире не было введено в эксплуатацию до настоящего времени.

Обращение с ОЯТ, помимо проблем общетехнической и физической безопасности, связанной с перемещением большегрузных, крупногабаритных устройств, имеющих повышенную опасность и высокую ценность, обладает рядом специфических особенностей.

Первая – ядерная опасность (критичность). Ядерный материал, содержащийся в ОТВС, способен создавать критические конфигурации, как в нормальных условиях эксплуатации, так и в случае аварий. Степень этой опасности тем выше, чем больше содержание делящихся компонентов (^{235}U , ^{233}U или ^{239}Pu) в нем. Поэтому, при обращении с ОЯТ требования ядерной безопасности обычно предписывают анализ всех возможных штатных и аварийных ситуаций. При этом эффективный коэффициент размножения систем во всех неблагоприятных условиях и без учета выгорания не должен превышать 0,95 с учетом погрешности расчетов.

Вторая – радиационной безопасности. Активность одного килограмма извлеченного из реактора топлива, обусловленная наличием в нем продуктов деления и активации, обычно составляет сотни тысяч Ки. В течение года, благодаря распаду короткоживущих радионуклидов, активность снижается до тысяч Ки. В последующие десять лет уменьшается еще на порядок. В любом случае, ОЯТ в течение времени, намного превышающего длительность жизни человек, будет относиться к разряду высокоактивных отходов энергетического производства. Поэтому любые операции с ним должны предусматривать соблюдение условий радиационной защиты и выполняться в условиях максимальной автоматизации производства. С другой стороны, высокая активность обеспечивает отработанному топливу высокую степень его физической самозащищенности от возможности несанкционированного использования или хищения.

Третья – остаточное тепловыделение. Высокая активность ОЯТ приводит к его радиационному разогреву, степень которого настолько высока (табл.1), что

явилась причиной двух из тех крупнейших аварий в атомной промышленности, связанных с разрушением активной зоны реакторов.

Таблица 1. Мощность остаточного тепловыделения после остановки реактора PWR

Время после остановки	1с	10с	100с	1000с	1 ч	10ч	100ч	1000ч	1 год
Мощность реактора в момент остановки, %	6,5	5,1	3,2	1,9	1,4	0,75	0,33	0,11	0,023

Исходя из перечисленных особенностей МАГАТЭ рекомендует следующие основные задачи безопасного обращения с ОЯТ на АЭС:

- обеспечение подкритичности в течение всего времени эксплуатации;
- предотвращение физического повреждения топливной сборки и/или тепловыделяющих элементов;
- обеспечение надежного теплоотвода;
- поддержание уровня радиационного облучения и выхода радиоактивных веществ при обращении с облученным топливом на разумно достижимом низком уровне.

Согласно выбранной стратегии, а также исходя из существующих условий и возможностей, перечень технологических операций по обращению с ОЯТ может включать:

- промежуточное хранение ОТВС в бассейне выдержки;
- транспортировку отработанного топлива на завод по переработке, временное хранилище или могильник;
- промежуточное хранение перед переработкой или захоронением;
- переработку или подготовку ОТВС к временному хранению или захоронению;
- временное хранение или захоронение.

С целью временной выдержки отработавшего топлива (до его отправки на переработку или захоронение) тепловыделяющие сборки помещают в бассейн выдержки, заполненный борной водой. Вода в бассейне выдержки служит как защитой от радиационного излучения, так и для съема выделяющихся тепловыделений. По мере разогрева воды бассейна выдержки возникает необходимость отвода тепла. Перегрев воды или снижение уровня с оголением тепловыделяющих сборок может привести к перегреву оболочек ТВЭЛ (тепловыделяющих элементов) и, как следствие, к их расплавлению. Через год

количество выделяемого топливом тепла снижается примерно в 200 раз, а радиоактивность – в 10 раз, через 5 лет радиоактивность уменьшается в 35 раз.

Хранение ОТВС в пристанционном бассейне выдержки является обязательным элементом технологической цепочки, что определяется высокой активностью свежееоблученного топлива и необходимостью отвода от него большого количества остаточного тепла. Исключение составляет только металлическое топливо реакторов Magnox, которое не может долгое время находиться в водной среде по причине деградации оболочки и поэтому должно перерабатываться. ТВС реакторов РНWR и РБМК перегружаются из реактора в ходе кампании. Для всех остальных установок перегрузка топлива может быть выполнена только на полностью заглушенном реакторе. Такие перегрузки выполняются ежегодно и являются основной причиной вынужденного продолжительного простоя в работе.

Все манипуляции по перемещению ОЯТ в бассейн и из него выполняются с помощью большегрузных устройств (мостовых кранов, перегрузочных контейнеров и т.д.), автоматически. Длительность хранения ОЯТ в бассейне-выдержки составляет от одного года до 5 лет. При этом на многих станциях топливо хранится и гораздо более длительное время (до 10 лет и более), что вызвано отсутствием окончательного решения по вопросу его дальнейшего использования. Топливо быстрых реакторов должно выдерживаться более короткие сроки, что обусловлено необходимостью его максимально быстрой переработки и возврата в замкнутый цикл. Охлаждение топлива в бассейне обычно осуществляется с помощью принудительной циркуляции воды. Причем вода является не только охладителем, но и защитой. Толщина ее слоя над верхними концевыми деталями ТВС составляет обычно несколько метров и должна поддерживаться на постоянном уровне. Особые требования предъявляются к составу воды, которая должна обеспечивать длительное нахождение в ней топлива без деградации, вызванной воздействием катионов и анионов растворенных веществ. Дополнительную проблему представляет разгерметизированное и разрушенное топливо, которое предварительно должно быть переупаковано в специальные герметичные пеналы, чтобы избежать выхода из него в окружающую среду продуктов деления и активации. Такая операция может быть проделана только в специально оборудованной горячей камере, находящейся в технических зданиях АЭС. Для станций с жидкометаллическим и другими видами неводяного теплоносителя предусматривается процедура отмывания его остатков от топлива.

В России в хранилищах ОЯТ на АЭС находится 12350 тонн ОЯТ, в т.ч. 10288 тонн РБМК.

ОЯТ реакторов типа РБМК и ЭГП хранится на АЭС в стационарных хранилищах.

ОЯТ реакторов типа ВВЭР-1000 хранится в приреакторных бассейнах выдержки и после трех лет хранения вывозится в централизованное мокрое хранилище на Красноярском ГХК.

ОЯТ реакторов ВВЭР-440 и БН-600 вывозится на ФГУП "ПО "Маяк".

ОЯТ остановленных реакторов АМБ Белоярской АЭС хранится на АЭС (5000 ОТВС) и на ФГУП "ПО "Маяк" (2200 ОТВС).

Таблица . Количество ОЯТ реакторов различного типа на предприятиях

Эксплуатирующая организация	Тип топлива	Количество ОЯТ, т
Кольская АЭС	ВВЭР-440	116
Нововоронежская АЭС	ВВЭР-440	745
	ВВЭР-1000	133
Балаковская АЭС	ВВЭР-1000	407
Волгодонская АЭС	ВВЭР-1000	84
Калининская АЭС	ВВЭР-1000	189
Курская АЭС	РБМК-1000	3808
Ленинградская АЭС	РБМК-1000	4240
Смоленская АЭС	РБМК-1000	2240
Белоярская АЭС	БН-600	47
	АМБ	192
Билибинская АЭС	ЭГП-6	136
ПО "Маяк"	ВВЭР-440+АМБ	360
ГХК	ВВЭР-1000	4300
ФЭИ	1-я атомная	12
ММП, ПТБ "Лепсе"		639*
ММП, ПТБ "Лотта"		3768*
ММП, ПТБ "Имандра"		1134*
* количество хранящихся облученных тепловыделяющих сборок		

После окончания срока выдержки ОЯТ транспортируют на завод по переработке.

Транспортировка отработанного топлива на завод по переработке осуществляется с помощью специально разработанных, испытанных и лицензированных контейнеров, обеспечивающих необходимый уровень радиационной и физической защиты топлива, а также достаточный уровень отвода в окружающую среду тепла.

Обычно такие контейнеры представляют собой многотонные конструкции из железа или железобетона, имеющие необходимую толщину защиты от нейтронов и фотонов гамма-излучения, а также механическую прочность. Внутри

контейнеров устанавливаются опорные и дистанционирующие решетки для загрузки ОТВС в конфигурацию, обеспечивающую ядерную безопасность. Сам контейнер располагается на железнодорожной или автомобильной платформе. Загрузка контейнера производится через специальный перегрузочный люк, куда ОЯТ подаются краном непосредственно из бассейна выдержки или специализированной станции сушки. Транспортировка является одним из наиболее опасных этапов обращения с отработанным топливом с точки зрения сохранения его целостности и физической защиты.

Промежуточное хранение перед переработкой или захоронением предусматривается либо на заводе по переработке, либо в комплексе сооружений, связанных с могильником ядерных отходов. Хранение в нем ОТВС может быть как сухим, так и мокрым и принципиально не отличается от процедуры, используемой на АЭС.

Подготовка ОТВС к временному хранению или захоронению может включать дополнительные процедуры, связанные с конкретной технологией хранения: переупаковку, размещение в контейнере хранения, транспортировку к месту хранения и т.п.

Временное хранение или захоронение могут осуществляться либо сухим, либо мокрым методами. Большинство методов захоронения являются сухими и предусматриваются в глубоких геологических формациях. Для топлива с оболочками из циркониевых сплавов температура при хранении на воздухе не должна превышать 140–150°C. Для хранения в среде инертного газа допустимая температура составляет 350–440°C. Временное хранение может быть организовано непосредственно на станции, на заводе по переработке или в их близи. При этом само хранилище может быть даже наружным, а также организованным в специальном здании или приземном сооружении.

По данным МАГАТЭ в 2009 г. в мире функционировало 30 мокрых хранилищ ОЯТ общей емкостью 65 641 тонна тяжелого металла. В 72 сухих хранилищах может быть размещено 313 909 тонн тяжелого металла.

Обращение с радиоактивными отходами

Радиоактивные отходы образуются в рамках широкого спектра видов деятельности, в которых применяются различные радиоактивные материалы, связанные, например, с эксплуатацией ядерных установок, использованием закрытых радиоактивных источников в промышленности, использованием антропогенных радионуклидов в больницах и лабораториях, а также снятием таких установок с эксплуатации, добычей полезных ископаемых, производством минеральных удобрений и т.д. Большое разнообразие РАО обуславливает значительные отличия процессов обращения с ними.

Классификация РАО

Существует достаточно большое количество критериев и признаков, по которым могут быть классифицированы радиоактивные отходы. Некоторые из них перечислены в табл. 2. Принятая классификация РАО, действующая на территории государств, обычно закрепляется в нормативной документации. Тем не менее, существуют общие подходы к классификации, которые формируются МКРЗ и МАГАТЭ.

В частности МАГАТЭ рекомендована классификация по степени опасности радиоактивных отходов для человека. В соответствии с этим выделяются три категории РАО (табл.2): безопасные; отходы, имеющие низкий и средний уровень активности; отходы высокой активности.

Таблица 2. Характеристики РАО, используемые для их классификации

п/п	Характеристика	Расшифровка характеристики
1	Происхождение	
2	Критичность	
3	Радиологические свойства	Период полураспада Энерговыделение Интенсивность проникающего излучения Активность и концентрация радионуклидов Поверхностное загрязнение Дозовый коэффициент для значимых радионуклидов
4	Другие физические свойства	Физическое состояние (твердое, жидкое или газообразное) Размер и вес

		Уплотняемость Дисперсность Летучесть Растворимость, смешиваемость
5	Химические свойства	Потенциальная химическая опасность Коррозия или сопротивляемость коррозии Содержание органических включений Горючесть Реакционная способность Сорбционная способность по отношению к радионуклидам
6	Биологические свойства	Потенциальная биологическая опасность

Таблица 3. Типичные характеристики для различных категорий РАО

Категория отходов	Характеристика отходов	Порядок размещения отходов
Безопасные	Уровень активности ниже установленного порога чистоты, при котором материалы не рассматриваются в качестве радиоактивных. Уровень определяется исходя из предела годовой эквивалентной дозы для населения не превышающей 0,01 мЗв.	Отсутствуют радиологические ограничения
Низко и средне активные РАО	Уровень активности выше установленного порога чистоты. Энерговыделение ниже 2 кВт	
2.1 Короткоживущие РАО	Ограничено содержание долгоживущих радионуклидов (ограничение по долгоживущим альфа-излучателям - 4000 Бк/г в группе упаковок или в среднем не более 400 Бк/г в упаковке)	Приповерхностные хранилища или геологические формации
2.2 Долгоживущие РАО	Концентрация долгоживущих радионуклидов в упаковках превышает пределы, установленные дл	Геологические формации

	короткоживущих РАО	
3. Высокоактивные отходы	Энерговыведение больше 2 кВт/м ³ и содержание долгоживущих радионуклидов, превышающее пределы, установленные для короткоживущих РАО	Геологические формации

На практике в России все РАО можно разделить на категории в зависимости от концентрации радиоактивных элементов и времени, в течение которого они сохраняют свою радиоактивность. Для каждой категории приняты свои методы сбора и удаления. Выделяются следующие категории РАО:

1. Низкоактивные отходы – это отходы с низкими концентрациями радионуклидов, не требующие специальных защитных мер. Поступают при работе ядерных установок, от деятельности исследовательских центров, госпиталей, промышленности. Обычно это салфетки, полотенца, шприцы, перчатки, фильтры, защитная одежда и обувь и т.д.

2. Среднеактивные отходы – это отходы с более высокими концентрациями радионуклидов, требующие защитных экранирующих и манипулирующих устройств используемых для защиты персонала. Поступают при работе атомных станций и перерабатывающих установок, от медицинских, промышленных и исследовательских предприятий и организаций, в которых используются радиоактивные изотопы и представлены металлическим ломом, полужидкими отходами, смолами и использованными радиоизотопными источниками и т.п.

3. Высокоактивные отходы – это отходы с наивысшими концентрациями радионуклидов, что приводит к физически горячему их состоянию. Требуют охлаждения, сильного экранирования и применения устройств манипуляции с дистанционным управлением. Поступают от установок регенерации ядерного топлива, это отработавшее ядерное топливо и жидкие отходы, образующиеся в процессе переработки (выделения) плутония и т.д.

В Российской Федерации в настоящее время принята следующая классификация радиоактивных отходов:

В соответствии с Федеральным законом от 11 июля 2011 года № 190-ФЗ «Об обращении с радиоактивными отходами и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации»:

Статья 4. Классификация радиоактивных отходов

1. В целях настоящего Федерального закона радиоактивные отходы подразделяются на:

1) удаляемые радиоактивные отходы - радиоактивные отходы, для которых риски, связанные с радиационным воздействием, иные риски, а также затраты, связанные с извлечением таких радиоактивных отходов из пункта хранения радиоактивных отходов, последующим обращением с ними, в том числе захоронением, не превышают риски и затраты, связанные с захоронением таких радиоактивных отходов в месте их нахождения;

2) особые радиоактивные отходы - радиоактивные отходы, для которых риски, связанные с радиационным воздействием, иные риски, а также затраты, связанные с извлечением таких радиоактивных отходов из пункта хранения радиоактивных отходов, последующим обращением с ними, в том числе захоронением, превышают риски и затраты, связанные с захоронением таких радиоактивных отходов в месте их нахождения.

2. Критерии отнесения радиоактивных отходов к особым радиоактивным отходам и к удаляемым радиоактивным отходам устанавливаются Правительством Российской Федерации.

3. Удаляемые радиоактивные отходы для целей их захоронения классифицируются по следующим признакам:

- 1) в зависимости от периода полураспада содержащихся в радиоактивных отходах радионуклидов - долгоживущие радиоактивные отходы, короткоживущие радиоактивные отходы;
- 2) в зависимости от удельной активности - высокоактивные радиоактивные отходы, среднеактивные радиоактивные отходы, низкоактивные радиоактивные отходы, очень низкоактивные радиоактивные отходы;
- 3) в зависимости от агрегатного состояния - жидкие радиоактивные отходы, твердые радиоактивные отходы, газообразные радиоактивные отходы;
- 4) в зависимости от содержания ядерных материалов - радиоактивные отходы, содержащие ядерные материалы, радиоактивные отходы, не содержащие ядерных материалов;
- 5) отработавшие закрытые источники ионизирующего излучения;
- 6) радиоактивные отходы, образовавшиеся при добыче и переработке урановых руд;
- 7) радиоактивные отходы, образовавшиеся при осуществлении не связанных с использованием атомной энергии видов деятельности по добыче и переработке минерального и органического сырья с повышенным содержанием природных радионуклидов.

4. Критерии классификации удаляемых радиоактивных отходов с учетом технологических особенностей обращения с радиоактивными отходами устанавливаются Правительством Российской Федерации.

5. Критерии отнесения твердых, жидких и газообразных отходов к радиоактивным отходам устанавливаются Правительством Российской Федерации.

Т.к. в настоящее время Правительством Российской Федерации критерии, определенные в п.п. 2, 4, 5 ст. 4 Федерального закона от 11 июля 2011 года № 190-ФЗ «Об обращении с радиоактивными отходами и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации», не установлены, то при обращении с радиоактивными отходами действует классификация РАО в соответствии с Основными санитарными правилами обеспечения радиационной безопасности (ОСПОРБ - 99/2010), утвержденными Постановлением Главного государственного санитарного врача Российской Федерации от 26.04.2010 № 40:

3. Обращение с радиоактивными отходами

3.12.1. К радиоактивным отходам относятся не подлежащие дальнейшему использованию вещества, материалы, смеси, изделия, удельная активность техногенных радионуклидов в которых превышает МЗУА (Сумма отношений удельных активностей техногенных радионуклидов к их МЗУА превышает 1). Значения МЗУА приведены в приложении 4 НРБ-99/2009. При неизвестном радионуклидном составе отходы являются радиоактивными, если суммарная удельная активность техногенных радионуклидов в них больше:

- 100 кБк/кг - для бета-излучающих радионуклидов;
- 10 кБк/кг - для альфа-излучающих радионуклидов (за исключением трансурановых);
- 1,0 кБк/кг - для трансурановых радионуклидов.

3.12.2. Радиоактивные отходы по агрегатному состоянию подразделяются на жидкие, твердые и газообразные. К жидким радиоактивным отходам относятся не подлежащие дальнейшему использованию органические и неорганические жидкости, пульпы и шламы, соответствующие требованиям пункта 3.12.1 Правил. К твердым радиоактивным отходам относятся отработавшие свой ресурс радионуклидные источники, не предназначенные для дальнейшего использования материалы, изделия, оборудование, биологические объекты, грунт, а также отвержденные жидкие радиоактивные отходы, соответствующие требованиям пункта 3.12.1 Правил. К газообразным радиоактивным отходам относятся не подлежащие использованию газообразные смеси, содержащие радиоактивные газы и (или) аэрозоли, образующиеся при производственных процессах, соответствующие требованиям пункта 3.12.1 Правил.

3.12.3. По удельной активности радиоактивные отходы подразделяются на 3 категории - низкоактивные, среднеактивные и высокоактивные (таблица 3.12.1). В случае, когда по приведенным в таблице 3.12.1 характеристикам радионуклидов радиоактивные отходы относятся к разным категориям, для них устанавливается наиболее высокое из полученных значение категории отходов.

Таблица 3.12.1

Классификация жидких и твердых радиоактивных отходов

Категория отходов	Удельная активность, кБк/кг			
	Тритий	Бета-излучающие радионуклиды (исключая тритий)	Альфа-излучающие нуклиды (исключая трансурановые)	Трансурановые радионуклиды
Низкоактивные	от 10^6 до 10^7	менее 10^3	менее 10^2	менее 10^1
Среднеактивные	от 10^{11} до 10^7	от 10^3 до 10^7	от 10^2 до 10^6	от 10^1 до 10^5
Высокоактивные	более 10^{11}	более 10^7	более 10^6	более 10^5

Для предварительной сортировки твердых отходов рекомендуется использование критериев по мощности дозы гамма-излучения на расстоянии 0,1 м от поверхности (при измерении в соответствии с утвержденными методиками):

- низкоактивные - от 1 мкЗв/ч до 0,3 мЗв/ч;
- среднеактивные - от 0,3 мЗв/ч до 10 мЗв/ч;
- высокоактивные - более 10 мЗв/ч.

Отдельно выделяются короткоживущие отходы, когда время распада содержащихся в них радионуклидов до безопасного уровня составляет менее одного года. Такие отходы допускается временно хранить в организации с последующим обращением с ними как с нерадиоактивными отходами.

Принципы обращения с РАО

МАГАТЭ рекомендуются следующие принципы обращения с РАО:

1. Защита здоровья человека. Обращение с РАО должно осуществляться таким образом, чтобы обеспечить приемлемый уровень защиты здоровья человека.
2. Защита окружающей среды. Обращение с РАО должно осуществляться таким образом, чтобы обеспечить приемлемый уровень окружающей среды.
3. Защита за пределами национальных границ. Обращение с РАО должен учитывать потенциальное воздействие на человека и окружающую среду за пределами национальных границ.
4. Защита будущих поколений. Обращение с РАО должно быть организовано таким образом, чтобы предполагаемое воздействие на здоровье будущих поколений не превышало предельных уровней воздействия, определенных в настоящее время.

5. Бремя для будущих поколений. Обращение с РАО должно осуществляться таким образом, чтобы не налагать чрезмерного бремени на будущие поколения.

6. Национальная правовая основа. Обращение с РАО должно осуществляться на в рамках соответствующей национальной правовой основы, предусматривающей четкое распределение обязанностей и обеспечение независимых регулирующих функций.

7. Контроль за образованием радиоактивных отходов. Образование РАО должно поддерживаться на минимально достижимом уровне.

8. Наличие взаимосвязей между процессами образование РАО и дальнейшего обращения с ними. Должна существовать взаимозависимость между всеми этапами образования и обращению с РАО.

9. Безопасность установок. Должна гарантироваться безопасность всех установок и объектов на протяжении всего срока их функционирования.

Порядок обращения с РАО

В соответствии с общепринятыми принципами во всех странах порядок обращения с РАО регламентирован национальным законодательством и международными соглашениями. Радиоактивные отходы после их образования, в целях уменьшения опасности и экономической обоснованности подвергаются ряду процессов преобразования и перемещения перед их долговременным хранением или окончательным захоронением. Последовательность процессов может различаться, но почти всегда она включает сбор и сортировку РАО по категориям; обработку и уменьшение объема; кондиционирование; транспортирование; хранение или захоронение. Для обращения с РАО задействуется собственный персонал предприятий, а также специализированные организации, имеющие лицензию на какой-то один (например, транспортировка) или все виды деятельности по обращению с радиоактивными отходами.

Сбор и сортировка РАО

Сбору и сортировке подвергаются все радиоактивные отходы, образующиеся в ядерном топливном цикле, при обращении с источниками ионизирующего излучения и в других видах деятельности человека, не связанных с применением ядерных и радиационных технологий (добыча нефти, газа, производство минеральных удобрений и т.д.). При этом для каждого вида деятельности имеется своя специфика. Сбором и сортировкой отходов на предприятиях ЯТЦ в большинстве случаев занимается собственный производственный персонал. Характер отходов, их характеристики и дальнейший порядок обращения определены и полностью обеспечивают необходимый уровень безопасности.

При разработке *урановых месторождений* проводится сортировка поднятых на поверхность пород. В зависимости от содержания урана в них, породу сортируют и направляют по соответствующей технологической цепочке в два отвала – для пустых пород и богатых руд. Масса рудного отвала подвергается дальнейшей переработке на рудообогатительном производстве, где происходит ее измельчение и обогащение механическим путем. После этого материал отправляется на гидрометаллургический завод. Объемы перерабатываемых пород составляет тысячи и миллионы тонн. Количество образующихся отходов имеет тот же порядок величины, однако большая их часть классифицируется как безопасные, а вся активность обусловлена естественными радионуклидами. Тем не менее, в процессе производства образуются также радиоактивные отходы низкой активности, которые могут быть захоронены в приповерхностных хранилищах без ущерба для человека и окружающей среды. При прямом выщелачивании урана количество отходов производства уменьшается на порядки. Тем не менее, оборудование в процессе эксплуатации загрязняется радионуклидами уранового и ториевого рядов распада и также может быть захоронено в приповерхностных хранилищах.

Дальнейший сбор и сортировка радиоактивных отходов происходит на *заводах по производству чистых соединений урана*, его обогащению и изготовлению топлива. Обычно в этих процессах используются различные неорганические и органические растворители и образующиеся жидкие и твердые отходы (загрязненное оборудование, обедненный уран и т.д.). Их активность обусловлена только радионуклидами естественного происхождения, а категория относится к низко и средне активным отходам. До своей переработки они хранятся на территории заводов. Объемы отходов значительно ниже, чем на этапе добычи и извлечения урана. Обедненный уран складировается и хранится для последующего использования (например, в быстрых реакторах).

Следующим этапом топливного цикла является «сжигание» ядерного топлива в *реакторах*. Радиоактивные отходы образуются в результате процессов деления и активации топлива и конструкционных материалов. Эти отходы незначительны по объему, но имеют высокую активность техногенных радионуклидов с периодами полураспада от долей секунды до тысяч лет и более (трансурановые элементы). Кроме того, на АЭС образуются газообразные отходы, обусловленные образованием газообразных продуктов деления и активацией воздуха в приреакторных помещениях. Они представляют собой радиоактивные благородные газы, а также йод и аэрозоли с достаточно высокой концентрацией микрочастиц твердых радионуклидов. Эти газы, перед их выбросом в атмосферу, проходят систему очистки и временной задержки в специальных фильтрах. Через определенные интервалы времени содержимое фильтров, обычно относящееся к категории твердых отходов низкой и средней активности, изымается и направляется на дальнейшую переработку. Жидкие радиоактивные вещества, в основном водные растворы, образующиеся в процессе эксплуатации реакторов, до момента дальнейшей обработки находятся в специальных временных хранилищах на территории станции. Твердые РАО – части и детали оборудования, использованный инструмент и расходные материалы (бумага, ветошь, сменная обувь и т.д.), - в ожидании переработки также собираются и хранятся во временных хранилищах. В основном это низкоактивные отходы.

Сбором и сортировкой отходов на предприятиях не связанных с ЯТЦ занимается как собственный персонал, так и специализированные организации. Они выполняют свою работу в рамках частных заказов, либо государственных программ. При планировании организационных и технических мер по отдельному сбору отходов во внимание принимаются следующие факторы:

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

Характер и состав радиоактивных отходов обычно определяется источником их образования. В частности, в медицине и в научных исследованиях, в определенных процедурах почти всегда используется один определенный радионуклид. В этом случае произвести отдельный сбор образующихся отходов в соответствии с их радионуклидным составом довольно просто. Отходы предприятий ЯТЦ могут и, как правило, содержат смесь радионуклидов. В этом случае разделение отходов должно основываться на результатах изучения радиохимических характеристик РАО, их удельной

активности или уровня загрязнения. Для измерения активности отходов необходимо наличие соответствующей измерительной аппаратуры и владение методиками проведения прямых и косвенных измерений, отбора или приготовления проб образцов. 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).

Методы и технологии подготовки и хранения РАО

На рис. Показана схема, отражающая последовательность операций по обращению с РАО.

Блок-схема обращения с РАО

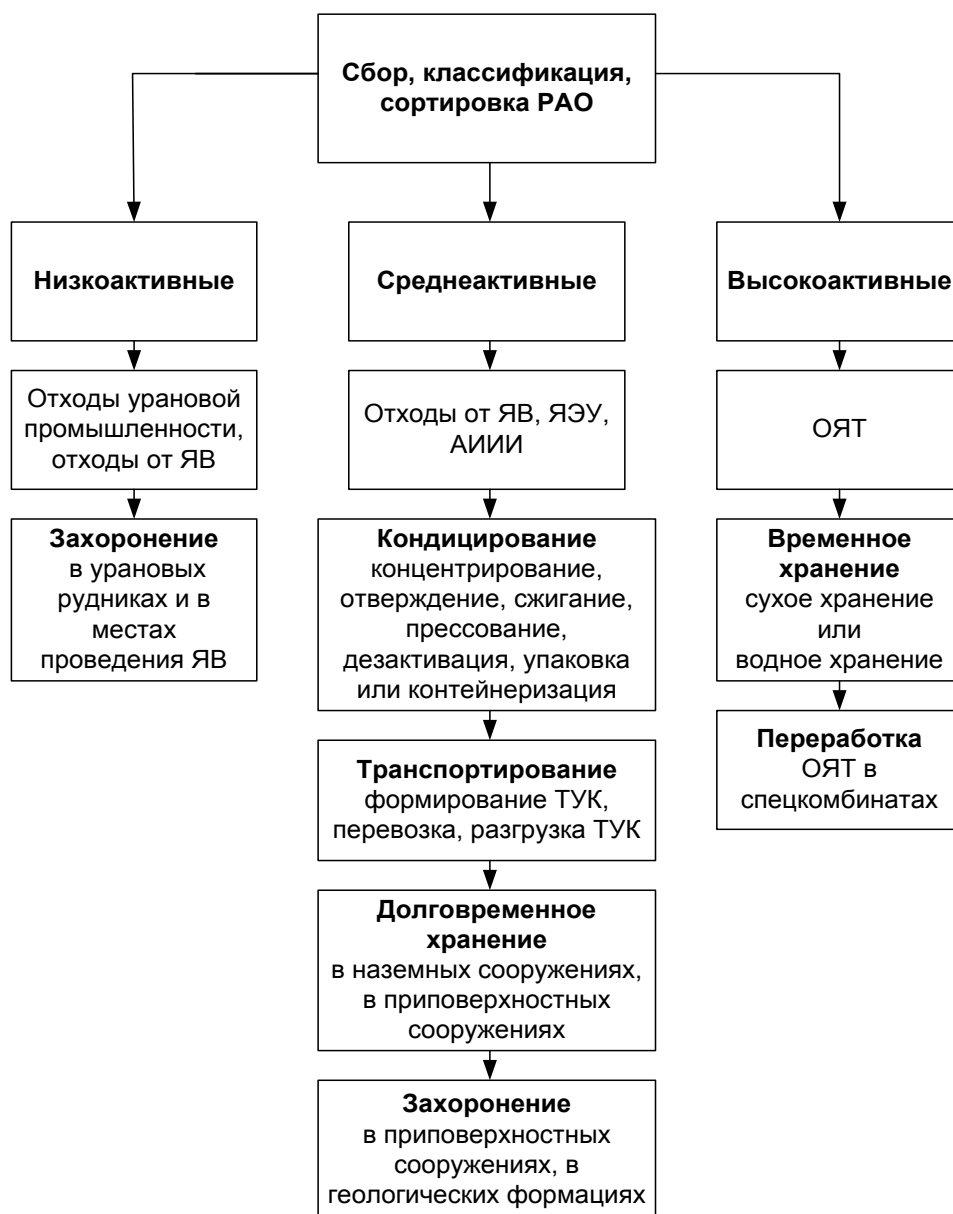


Рис. 20. Блок-схема обращения с РАО

Уменьшение объема и обезвреживание радиоактивных отходов

Одной из основных задач переработки радиоактивных отходов является уменьшение их объема, что облегчает их транспортирование и последующую изоляцию от окружающей среды.

Применяются четыре основных метода уменьшения объема отходов: прессование, обезвоживание, кристаллизация и сжигание. Прессование и сжигание используется преимущественно для низко- и среднеактивных отходов с короткоживущими изотопами, образующихся в процессе эксплуатации реакторов.

Технология сжигания (прокаливания) в основном используется для уменьшения объема горючих отходов низкого уровня активности. После прокаливания остается зола, которая содержит радионуклиды. Для нее может потребоваться дальнейшее кондиционирование вплоть до удаления посредством цементирования или битуминизации. Также для дальнейшего снижения объема зольных отходов может использоваться технология прессования. Процесс сжигания позволяет достигнуть коэффициента снижения объема вплоть до 100 в зависимости от плотности отходов.

Прессование – высокотехнологичная и надежная технология уменьшения объема, которая используется при переработке РАО, главным образом, при обращении с твердыми промышленными отходами низкого уровня активности. Некоторые страны (Германия, Великобритания и США) также используют эту технологию для уменьшения объема среднего уровня активности. Диапазон установок для прессования может быть достаточно широк: от систем уплотнения с низкой силой давления (~5 тонн или выше) до прессов с силой уплотнения более 1000 тонн. Коэффициенты уменьшения объема обычно находятся между 3 и 10, в зависимости от обрабатываемых отходов.

Уплотнение с низкой силой давления осуществляется на гидравлических или пневматических прессах для сжатия отходов в подходящие для этого контейнеры.



Рис. 21. Установка по прессованию радиоактивных отходов

По своей конструкции установка суперуплотнения может быть передвижной или стационарной, снабженной как базовой системой ручного управления, с минимумом вспомогательного оборудования, так и детально разработанной системой компьютерного управления, которая выбирает металлические бочки, предназначенные для обработки, измеряет вес и уровни излучения, сжимает бочки и размещает сжатые бочки в наружные контейнеры, записывает данные о содержании бочек и наружных контейнеров в автоматизированные системы памяти.

Уменьшение объема жидких высокоактивных отходов и перевод их в твердую фазу после временной выдержки проводится путем испарения, кристаллизации, пропускания через ионообменные смолы. В последнем случае из отходов извлекаются долгоживущие радионуклиды (в основном ^{90}Sr и ^{137}Cs) и происходит частичное их обезвреживание. Извлеченные радионуклиды используются в радиационной диагностике, для лучевой терапии, в качестве генераторов энергии (тепла и электричества) и т.п.

Обезвреживание применяется в основном для средне- и высокоактивных отходов. Единственным способом обезвреживания является переработка с последующим длительным хранением на специальных предприятиях (в хранилищах или могильниках). Наиболее предпочтительной в экологическом отношении является переработка отходов с получением твердого препарата (путем цементирования, битумирования, остекловывания) и дальнейшая его локализация на неопределенно длительное время в условиях, полностью исключающих воздействие излучения на людей и загрязнение окружающей среды радионуклидами.

Кондиционирование радиоактивных отходов

Основная цель процесса кондиционирования - снижение общего объема отходов при одновременной фиксации радионуклидов, позволяющей максимально уменьшить распространение радиоактивных продуктов на последующих стадиях обращения с РАО. *Кондиционирование* - это процесс, при котором создается устойчивая твердая форма отходов, пригодных для временного хранения и захоронения.

Кондиционирование радиоактивных отходов, которое представляет собой включение отходов в связывающие основы (матрицы), затвердевающие в виде блоков внутри наружных контейнеров, обеспечивает необходимую безопасность для временного или постоянного захоронения и транспортирования. Кондиционированию обычно подвергаются лишь высоко- и среднеактивные отходы с долгоживущими радионуклидами и высокоактивные ампульные источники.



*Рис. 22.
Нержавеющий
контейнер для
расплавленного
стекла*

Для локализации РАО используются различные материалы: цемент, битум, органические полимеры и др. Материалы выбираются с учетом вида радиоактивных отходов (изотопный состав, удельная активность), химических и физических свойств отходов. Кроме того, материалы должны быть относительно просты в технологической обработке, их использование не должно приводить к значительному увеличению объема конечного продукта по сравнению с исходным объемом. При выборе материала матриц должны приниматься во внимание также наличие его промышленного производства и связанные с этим экономические вопросы. Материалы, используемые в качестве матриц, должны обеспечивать однородность локализованных форм отходов,

устойчивость к выщелачиваемому действию воды и водонепроницаемость, механическую прочность, устойчивость к воздействию внешних факторов (химических, биологических и других), термическую и радиационную устойчивость, стабильность в процессе хранения. Наиболее предпочтительным материалом, используемым в качестве матрицы, является боросиликатное стекло.

Высокоактивные отходы остекловываются. Отходы этой категории состоят в основном из продуктов деления и трансурановых элементов, образующихся при выгорании топлива в реакторе. Их включают в стекломассу, которую разливают в герметичные контейнеры, закупоривают и помещают на хранение. Метод остекловывания радиоактивных отходов позволяет добиться оптимальных показателей по качеству матриц и их устойчивости к воздействию окружающей среды. Этот метод позволяет перерабатывать широкий спектр жидких и твердых радиоактивных отходов с получением стеклокристаллических матричных и стеклоподобных материалов.

Наиболее приемлемым, для большинства видов РАО от снятия с эксплуатации, представляется создание унифицированного ряда одноразовых, защитных неметаллических (из различных композиционных материалов, включая железобетон, армоцемент, полимербетон и др.) упаковок (в виде прессованных брикетов), предназначенных для сбора, хранения, транспортировки и захоронения РАО.

ТЕХНОЛОГИИ ПЕРЕРАБОТКИ РАДИОАКТИВНЫХ ОТХОДОВ

Все ядерные технологии связаны с использованием или сопровождаются образованием радиоактивных веществ. Например, свежие ТВС ядерных реакторов содержат радиоактивные изотопы урана, а облученные ТВС – радиоактивные изотопы урана, плутония, трансурановых элементов и ПД. Часть этих изотопов может быть выделена и полезно использована. Так делящиеся изотопы могут быть рециклированы в составе ядерного топлива, а некоторые ПД и трансурановые элементы могут применяться как тепловые источники или источники ионизирующего излучения в медицине и промышленности. Оставшиеся радиоактивные вещества, полезное применение которых пока не представляется возможным, относят к радиоактивным отходам (РАО). Итак, РАО – это радио-активные вещества, дальнейшее использование которых пока невозможно. Поэтому к РАО могут быть отнесены:

- продукты ядерных технологий, не пригодные для полезного применения в отраслях промышленности;
- все материалы и изделия, загрязненные радиоактивными веществами, до их дезактивации.

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

специализированных ядерных установок, в которых РАО подвергаются действию ионизирующих излучений (нейтроны или гамма-кванты) с целью трансмутации (превращения) долгоживущих, радиоактивных изотопов в короткоживущие или стабильные изотопы.

Наибольшую опасность представляют РАО процесса химической переработки ОЯТ. Эти РАО опасны по количеству и по интенсивности излучения, определяемым ПД. Количество ПД в ОЯТ составляет 30–40 кг/т ОЯТ тепловых реакторов и около 100 кг/т ОЯТ быстрых реакторов. Соответствующие величины активности ПД: 6 МКи/т ОЯТ-ТР и 20 МКи/т ОЯТ-БР (на момент выгрузки из реактора).

Для сравнения:

суммарный выброс радиоактивных веществ при аварии на Чернобыльской АЭС оценивается в 90 МКи;

суммарный выброс радиоактивных веществ при Кыштымской аварии (взрыв хранилища жидких РАО) оценивается в 20 МКи.

Переработка высокоактивных отходов (ВАО)

Существуют две основные формы ВАО:

1) ВАО химической переработки ОЯТ. Это, главным образом, жидкие отходы, так как промышленная переработка ОЯТ основана преимущественно на водной экстракционной технологии. Известно, что при переработке 1 т ОЯТ энергетических реакторов образуется примерно 45 м³ жидких ВАО, 150 м³ жидких среднеактивных отходов и до 2000 м³ жидких низкоактивных отходов.

2) Облученные ТВС (ОТВС) энергетических реакторов.

Эти ТВС рассматриваются в США, где введен мораторий на химическую переработку ОЯТ коммерческих АЭС, как контейнеры ВАО, готовые для временного хранения в бассейнах АЭС или в неглубоких (приповерхностных) хранилищах, а затем для окончательного захоронения в глубоких геологических хранилищах.

Основные этапы переработки ВАО

1. Промежуточное хранение:

а) для жидких ВАО – размещение в резервуарах из нержавеющей стали. Обеспечивается контроль за тепловыделением (при необходимости, принудительный теплоотвод) и за составом газовой подушки над уровнем ВАО (продувка воздухом, удаление водорода, образующегося при радиолизе воды);

б) для ОТВС – размещение в бассейнах-хранилищах на АЭС и на заводах по переработке ОЯТ.

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

а) повышение удельной активности концентрированных ВАО;

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

в) усиление коррозионной активности ВАО с повышенной концентрацией и с повышенной температурой;

г) усиленное газообразование из-за радиолиза воды и нитратов.

Повышается взрывоопасность водородо-воздушной смеси.

Для борьбы с этими процессами принимаются следующие меры:

- контроль за содержанием водорода в газовой подушке;
- продувка резервуаров ВАО воздухом для разбавления и удаления водорода;

- контроль за температурой газовой подушки (не выше 50–60°C);
- принудительное охлаждение резервуаров;
- использование коррозионностойких сплавов и нержавеющей сталей в испарительных установках и резервуарах ВАО;

- размещение резервуаров с концентрированными ВАО ниже

- уровня земли, на бетонных поддонах;

- добавление в ВАО реагентов, замедляющих коррозию.

Отверждение ВАО. Целью этого этапа переработки является внедрение ВАО в устойчивую матрицу, препятствующую миграции ВАО в окружающую среду. Другими словами, иммобилизация ВАО, существенное снижение их миграционной способности.

В настоящее время наиболее подходящей формой иммобилизации ВАО считается их включение в состав стекол. Разработаны две технологии стеклования ВАО.

Одностадийная технология. Жидкие концентрированные ВАО загружаются в тигель, куда также вводятся стеклообразующие добавки. При постепенном разогреве смеси последовательно происходит:

- окончательное выпаривание ВАО;

- прокаливание высушенных ВАО при температуре 300–400°C;

- плавление стекломассы при температуре 1100–1150°C.

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

Двухстадийная технология.

Примером двухстадийного стеклования ВАО является АVM-технология, разработанная во Франции.

Основные стадии АVM-технологии:

- прокаливание исходных ВАО при температуре 300–400°C;

- смешивание кальцината со стеклообразующими добавками и пересыпание в плавильную печь;

- разогрев и стеклование массы при 1100–1150°C;

- периодический слив стекломассы в стальные контейнеры;

- промежуточное хранение и захоронение контейнеров.

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

Остановимся подробнее на SYNROC-технологии. SYNROC – это сокращение от Synthetic Rock, т.е. синтетические скальные породы. Разработка технологии создания искусственных скальных пород и иммобилизации в них ВАО базируется на надежде, что эти материалы будут столь же устойчивы и долговечны, как и природные скальные породы. Эта технология разработана и опробована в Австралии.

Типичный пример применения SYNROC-технологии:

1) смешивание ВАО с предшественниками синтетических скальных пород. Пример смеси предшественников SYNROC-материала: $\text{TiO}_2(71\%)$, $\text{CaO}(11\%)$, $\text{ZrO}_2(7\%)$, $\text{BaO}(6\%)$, $\text{Al}_2\text{O}_3(5\%)$;

2) прокаливание при температуре $650\text{--}750^\circ\text{C}$;

3) горячее прессование порошка в таблетки SYNROC-материала (температура – $1100\text{--}1200^\circ\text{C}$, давление – $150\text{--}200$ атм).

4) контейнеризация таблеток SYNROC-материала, промежуточное хранение и окончательное захоронение.

Испытания показали, что:

минералоподобные SYNROC-материалы имеют физические, химические и коррозионные свойства, схожие со свойствами природных скальных материалов, т.е. могут оказаться устойчивыми к воздействию окружающей среды в течение длительного времени;

SYNROC-таблетки могут содержать до 20 вес.% ВАО;

скорость выщелачивания SYNROC-материалов обычной водой составляет $10^{-6}\text{--}10^{-5}$ г с 1 см^2 поверхности в сутки.

По указанным выше показателям SYNROC-материалы уступают только боросиликатному стеклу, у которого:

содержание ВАО достигает 30 вес.%. Это связано с тем, что стекло не обладает упорядоченной кристаллической структурой и поэтому способно удерживать широкий диапазон радионуклидов. Минералы с упорядоченной кристаллической решеткой (керамика, SYNROC-материалы) способны удерживать лишь радионуклиды с определенными размерами атомов и с определенной валентностью;

скорость выщелачивания стекла обычной водой составляет $10^{-8}\text{--}10^{-7}$ г/($\text{см}^2\cdot\text{сутки}$).

Итак, SYNROC-материалы проигрывают стеклу по способности удерживать большие количества ВАО и по скорости выщелачивания водой, но остаются вторым после стекла материалом для иммобилизации ВАО.

После иммобилизации ВАО в стеклблоках или в таблетках SYNROC-материала эти отвержденные формы помещают в стальные контейнеры. Дальнейшее обращение с ВАО предполагает 30–50 лет промежуточного хранения контейнеров в неглубоких хранилищах с воздушным или водным охлаждением. Предусматривается возможность извлечения контейнеров для обследования состояния твердых форм и, возможно, для дальнейшей обработки.

Следующая стадия – это окончательное захоронение контейнеров ВАО в подземных геологических формациях.

Переработка жидких среднеактивных отходов

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

Основные этапы переработки САО:

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

Достоинства битума как материала для иммобилизации САО:

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

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

Альтернативным вариантом иммобилизации САО является их цементирование, т.е. включение в состав бетона. Бетон, как материал для иммобилизации САО, имеет следующие достоинства:

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

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

стекло: $10^{-8} \div 10^{-7}$ г/(см²·сут);

SYNROC: $10^{-6} \div 10^{-5}$ г/(см²·сут);

битум: $10^{-6} \div 10^{-4}$ г/(см²·сут);

бетон: $10^{-3} \div 10^{-2}$ г/(см²·сут).

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

Химическая стойкость бетона может быть повышена за счет пропитки цемента органическими мономерами. При затвердевании такой цементной смеси мономеры полимеризуются, и химическая стойкость бетонных блоков существенно повышается.

Переработка жидких низкоактивных отходов (НАО)

Переработка НАО включает следующие этапы:

- осаждение НАО из растворов (адсорбция, отстаивание, фильтрация с применением коагулянтов);
- ионообменная очистка оставшихся растворов;
- упаривание для получения сухого остатка;
- отверждение сухих остатков, сорбентов, ионообменных смол и фильтров в бетоне (цементирование).

Переработка газообразных РАО

Негативные свойства газообразных РАО:

- непосредственное внешнее облучение и облучение от осевших радиоактивных веществ;
- внутреннее облучение при вдыхании воздуха, загрязненного газообразными РАО или аэрозолями;
- химическая токсичность газообразных РАО при попадании в организм человека.

После выдержки ОЯТ в течение 3–5 лет в нем остаются только сравнительно долгоживущие радионуклиды:

из благородных газов – только ^{85}Kr ($T_{1/2} = 10,7$ лет);

из изотопов йода – только ^{129}I ($T_{1/2} = 1,6 \cdot 10^7$ лет);

изотоп углерода ^{14}C ($T_{1/2} = 5730$ лет);

тритий ^3H ($T_{1/2} = 12,3$ года).

Удаление ^{85}Kr . Для удаления ^{85}Kr используются следующие методы:

низкотемпературная адсорбция на активированном угле и на молекулярных ситах;

адсорбция в жидком углекислом газе CO_2 ;

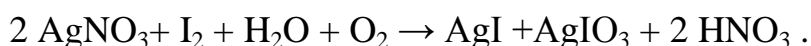
адсорбция жидкими фтор-углеродами, например, фреоном-12: CCl_2F_2 – дихлор-дифтор-метан.

Удаление ^{129}I . В газообразных РАО йод может находиться в виде молекулярного йода I_2 , йодидов (I^-) и йодатов (IO_3^-). Для удаления радионуклида ^{129}I используются следующие методы:

поглощение йода щелочами или азотной кислотой в скрубберах (установки для химического взаимодействия жидких и газообразных веществ с целью их очистки). Йод окисляется до твердого малорастворимого соединения HI_2O_8 ;

хемосорбция на цеолите (пористый минерал, хороший сорбент),

пропитанном нитратом серебра AgNO_3 . Молекулярный йод связывается в малорастворимом йодиде и йодате серебра:



Удаление ^{14}C . В газообразных РАО радиоизотоп ^{14}C содержится в виде оксидов ^{14}CO или $^{14}\text{CO}_2$ в небольших количествах. Радиоизотоп ^{14}C является

продуктом реакции $^{14}\text{N}(n,p)^{14}\text{C}$ на азоте, содержащимся в воздухе, в примесях теплоносителя или конструкционных материалов.

До сих пор не разработаны промышленные методы улавливания ^{14}CO или $^{14}\text{CO}_2$. В лабораторных условиях изучается возможность использования жидких поглотителей ^{14}C на основе гидроксидов, фтор-углеродов и алюмосиликатов. Найдены фтор-углероды, которые при низких температурах (от -40 до $+4^\circ\text{C}$) улавливают 99,9% ^{14}C .

Удаление трития. В ядерных реакторах тритий образуется в результате нейтронных реакций теплоносителя и примесей конструкционных материалов (водород, литий). Кроме того, тритий может образовываться при тройном делении ядерного топлива, т.е. при очень редком процессе деления, когда образуются не два, а три осколка. Поскольку тройное деление происходит с очень малой вероятностью, количество трития в топливе не превосходит $2 \cdot 10^{-5}$ вес. %.

Тритий обладает следующими свойствами:

является источником мягкого β -излучения;

легко вступает в реакции изотопного обмена с обычной водой, образуя тритиевую воду НТО или Т2О при переработке ОЯТ. Поэтому, тритий присутствует во всех жидких РАО процесса химической переработки ОЯТ.

Для выделения трития используются следующие методы:

волоксидация ОЯТ перед растворением (окисление в атмосфере кислорода при повышенной температуре; $t = 450\text{--}650^\circ\text{C}$). Присутствие влаги в газовой фазе приводит к связыванию трития в тритиевой воде;

улавливание тритиевой воды цеолитом.

Обработка аэрозолей и пыли. Газообразные аэрозоли представляют собой солевые и кислотные туманы с содержанием жидких частиц $10^{-2} - 10 \text{ г/м}^3$. Для их обработки применяются следующие методы:

гравитационное осаждение в пылеуловительных камерах;

центробежное выделение твердых и жидких частиц из газа при спиральном движении потока в циклонах. Поток газа вводится в циклоны под углом к оси цилиндра, и частицы аэрозолей и пыли, сталкиваясь со стенками цилиндра, выпадают из потока;

электростатическое осаждение (придание частицам заряда и осаждение в электрическом поле);

промывка газов в скрубберах;

ультрафильтрация с использованием специальных фильтров на основе стекловолокна и полимеров, с применением металлотканевых и металлокерамических фильтров.

Переработка твердых РАО

В состав твердых РАО входят:

детали оборудования, строительные материалы, мусор, спецодежда;

ионообменные смолы;

нерастворившиеся оболочки твэлов;

осадки на стенках оборудования.

Для переработки твердых РАО применяются следующие методы:

1. Уменьшение объема РАО:

сжигание с уменьшением объема РАО в 10–100 раз;

прессование с уменьшением объема до 10 раз.

2. Контейнеризация и захоронение. Особая технология используется при переработке оболочек ТВЭЛОВ. Их радиоактивность обусловлена следующими процессами:

образование радионуклидов в металлах, входящих в состав оболочек, под действием нейтронного облучения;

диффузия актинидов и ПД из топлива в оболочку ТВЭЛА, т.е. в поверхностном слое оболочки могут находиться α-активные актиниды;

остатки нерастворившегося топлива на поверхности оболочек.

Этапы обработки оболочек ТВЭЛОВ:

1) временное хранение в бетонных бункерах под слоем воды (из-за возможности возгорания циркония на воздухе);

2) химическая обработка плавиковой кислотой HF при повышенной температуре (550–600°C). На поверхности образуются рыхлые пленки, содержащие α-активные трансурановые изотопы. Затем эти пленки удаляются растворением в кислотных или щелочных составах;

3) плавление оболочек в слитки в электропечах;

4) контейнеризация слитков и захоронение.



Безопасное хранение радиоактивных отходов

Технологии подготовки РАО к хранению

Один из прогрессивных методов финальной переработки жидких РАО — **витрификация** (остекловывание)

! Остеклованные РАО надежно изолированы от окружающей среды



Способ хранения РАО зависит от степени их активности и срока жизни



Другие технологии подготовки:

- битумирование
- сжигание
- цементирование
- плазменно-химическая переработка

В 33 регионах России в 1170 хранилищах различного типа хранится почти половина всех радиоактивных отходов в мире



Существующая в России система обращения с радиоактивными отходами (РАО) сформировалась в процессе развития в СССР ядерных

технологий и в силу этого имеет ряд характерных особенностей. Прежде всего, она привязана к местам возникновения РАО и не объединена в единую систему обращения и контроля. Кроме того, места долговременного хранения и хранилища РАО различаются чрезвычайным разнообразием конструкций и форм, организацией защитных барьеров в зависимости от конкретной местности расположения объектов и пр. На начальных стадиях создания промышленных производств в отдельных случаях отходы сбрасывались в окружающую среду, а затем на загрязненных территориях сооружались хранилища.

Все эти недостатки характерны не только для России, но и для большинства стран, обладающих ядерным наследием. Однако за последние десятилетия за рубежом выполнен большой объем реабилитационных и рекреационных работ. В России же только в 2008 году стартовала масштабная программа реабилитации – ФЦП «Обеспечение ядерной и радиационной безопасности на 2008 год и на период до 2015 года». С началом ее реализации специалисты заговорили о создании единой системы обращения с РАО, включая АЭС Концерна "Росэнергоатом". Активно эта проблема обсуждается в связи с разработкой закона об обращении с РАО. Исходя из этого, целесообразно рассмотреть системы обращения с РАО в зарубежных странах.

Обращение с РАО в США

Американская система обращения с радиоактивными отходами может служить примером коммерческого решения вопроса на основе жесткой системы государственного регулирования. Эта система начала складываться во время Второй мировой войны в процессе реализации федерального проекта создания атомного оружия, и в первые годы полностью контролировалась государством. Только в 1954 году закон об атомной энергии (АЕА) разрешил коммерческим юридическим лицам иметь в собственности и использовать радиоактивные материалы. Поправка к этому закону (1959 год) уполномочила определенные штаты принимать регулирующие акты, позволяющие иметь в собственности, использовать и захоранивать многие виды радиоактивных материалов, включая низкоактивные РАО, произведенные в результате коммерческой деятельности.

В 1960 году Комиссия по атомной энергии (АЕС) объявила о постепенном сокращении использования своих хранилищ для захоронения таких отходов. Кроме того, АЕС или уполномоченные штаты, включенные в соглашение, должны были выдавать лицензии на частные хранилища этих РАО.

В 1962-1971 годах шести коммерческим хранилищам, расположенным в штатах Иллинойсе, Кентукки, Неваде, Нью-Йорке, Южной Каролине и Вашингтоне, было выдано разрешение на обращение с РАО. Однако к 1979 году хранилища в Иллинойсе, Кентукки и Нью-Йорке по разным причинам были надолго закрыты. Более того, в 1979 году губернаторы Невады и Вашингтона временно закрыли хранилища в своих штатах по результатам проверки

герметичности транспортных контейнеров, а губернатор Южной Каролины сообщил, что хранилище низкоактивных отходов Barnwell заполнено на 90%.

Это привело к тому, что в конце 1980 года Конгресс США принял закон о политике в области обращения с низкоактивными РАО. Документ поощрял штаты формировать региональные системы обращения с РАО, чтобы удовлетворить национальные потребности в хранилищах, минимизировать число новых хранилищ и более справедливо распределить ответственность за обращение с РАО низкого уровня активности среди штатов.

К концу 1983 года, после того, как стало ясно, что в ближайшие пять лет новые хранилища не будут введены в строй, почти 40 штатов сформировали семь объединений. В 1992 году были оформлены соглашения об использовании хранилищ Barnwell (Южная Каролина), Beatty (Невада), и Richland (Вашингтон). В марте 1991 года новое хранилище Envirocare в штате Юта получило государственную лицензию на прием РАО низкого уровня активности, имеющих ограниченный состав радионуклидов с максимальными удельными активностями, определенными в лицензии.

В 1962-1971 годах первые коммерческие хранилища (в Иллинойсе, Кентукки, Неваде, Нью-Йорке, Южной Каролине и Вашингтоне) использовали относительно простой подход – «мелкое захоронение в земле», при котором отходы помещались в траншеи. После закрытия в 1979 году хранилищ в Иллинойсе, Кентукки и Нью-Йорке стоимость хранения РАО начала расти. К 1986 году она достигла 750 долларов, а затем в течение короткого времени повысилась почти до \$9000 за кубометр. Причинами этого стали уменьшение объемов хранилищ, новые налоги и повышение цен на участки захоронения.

Повышение цен на хранение низкоактивных отходов стимулировало развитие индустрии переработки этого типа РАО. В 1985 году, когда стоимость хранения кубометра РАО составляла около \$600, компания SEG (Научно-экологическая группа) спроектировала, получила необходимые лицензии и построила предприятие по переработке отходов в Ок-Ридже (штат Теннесси) стоимостью \$5 млн. В 1989 году, когда рыночная цена удаления отходов повысилась до \$1800 за кубометр, компания SEG, уже имея лицензию на сортировку РАО, получила лицензию на эксплуатацию первой в США коммерческой установки по сжиганию отходов. Стоимость установок сортировки и сжигания составляла около \$15 млн. В установку сжигания отходов загружалось до 800 фунтов РАО. Радиоактивное масло и радиоактивная вода использовались для температурного контроля в первичной камере. За счет сортировки и сжигания горючей фракции удалось добиться 75-кратного сокращения объема низкоактивных отходов (ранее этот показатель составлял 3,8-6,6).

К 1992 году положение на рынке стимулировало SEG запустить вторую установку сжигания и завод по переплавке металлических РАО стоимостью \$20 млн., впервые в стране оборудованный дезактивационной плавильной установкой. Завод ежегодно перерабатывал 2000-6000 т загрязненного металла. Металл, который невозможно было дезактивировать полностью, добавляли в процессе плавления в 20-тонные индукционные печи для изготовления пяти- и

десятитонных защитных блоков. Они использовались министерством энергетики при создании радиационной защиты на принадлежащих ему установках высоких энергий в Лос-Аламосе и Брукхевене, а также установок Аргонской лаборатории. В 1992 году было переработано до 70 тыс. м³ РАО, при этом объем отходов сократился десятикратно.

Использование описанных выше принципов оказало существенное влияние на сокращение потока РАО. В течение 10 лет SEG приняла более 600 тысяч кубометров отходов, а отправила на захоронение менее 66 тысяч. Таким образом, переработка вывела из обращения более 530 тысяч кубометров РАО, что соответствует объему захоронения отходов в хранилище Barnwell за 10 лет. Кроме того, за этот период удалось сократить объем перевозок более чем на 8000 поездок. Многократное снижение количества РАО в результате переработки привело к значительному сокращению времени обращения с ними, что привело к серьезному уменьшению радиационного воздействия на персонал хранилищ.

По оценкам, за 40 лет эксплуатации герметичного водного реактора (PWR) образуется около 600 м³ РАО низкой активности, в реакторе с кипящей водой (BWR) – приблизительно 1900 м³. Суммарный объем РАО от операций вывода из эксплуатации оценивается в 1 млн м³. Кроме того, объем загрязненной почвы на предприятиях топливного цикла и участках, которые находятся в ведении NRC (Nuclear regulation committee), оценивается в 600 тыс. м³. Таким образом, в США имеется существенное количество низкоактивных РАО, которые необходимо захоронить.

За прошедшие 18 лет все штаты-участники соглашений потратили почти \$600 млн. на создание участков хранения РАО. В настоящее время Barnwell, Richland и Envirocare (всего 10 участков хранения) обслуживают 44 штата, восемь штатов не входят ни в одно из соглашений. Производители РАО из 11 северо-западных штатов и Рокки Маунтин передают отходы в хранилище Richland. Хранилище Barnwell принимает РАО у предприятий с Атлантического побережья.

Никакой штат кроме, возможно, Техаса, не пытается строить новые хранилища. Невадский испытательный полигон, ныне известный как Nevada Site Office (NSO), начал размещение низкоактивных отходов в 1978 году. Были выбраны две площадки (участки 5 и 3), которые уже принимали на хранение ограниченное количество трансурановых отходов. Участки расположены приблизительно на расстоянии 24 километров друг от друга, что позволяет NSO использовать, по крайней мере, две альтернативные технологии хранения для оптимизации стоимости длительного хранения.

На участке 5 для хранения используются ячейки мелкого залегания в земле, где отходы размещаются в упакованном виде. Здесь размещаются смешанные отходы низкого уровня, произведенные в пределах штата Невада, радиоактивно загрязненный асбест и т.д. Высокоактивные РАО ранее помещались в буровые скважины, однако в настоящее время они не используются. Кроме того, есть емкости для приема, характеристики и хранения трансурановых отходов.

В 2004 году на этой площадке проведена инвентаризация 25 ячеек суммарной емкостью более 300 тыс. м³. Доступный объем – около 160 тыс. м³,

включая 20 тыс. м³ для размещения смешанных РАО низкой активности. Экстраполяция размещения отходов на всю площадь участка (296 га), не учитывая развития технологий (использование более глубоких ячеек и т.д.), дает суммарный объем площадки, приблизительно равный 3,3 млн. м³.

По консервативным расчетам, общая емкость размещения РАО на NSO составляет приблизительно 3,6 млн. м³. При этом не рассматривается расширение полигона на окружающую участок 5 землю или включение дополнительных кратеров, смежных с участком 3, а также совершенствование технологий. Вопрос, когда NSO может достигнуть его предела емкости, зависит от объема получаемых отходов. Если размещать 45 514 м³ РАО ежегодно, на это потребуется приблизительно 79 лет. Зная, что объемы отходов в будущем уменьшатся, поскольку министерство энергетики заканчивает реабилитацию объектов ядерного оружейного комплекса, и учитывая консервативность приведенной оценки, емкость NTS можно считать фактически неограниченной.

Суммарный ежегодный бюджет NTS составляет \$21,7 млн., \$5 млн. покрывают текущие расходы на обслуживание хранилищ, включая мониторинг грунтовых вод, программы приемки отходов, оценки рисков и т.д., \$16,7 млн. идут непосредственно на операции по обращению с РАО.

Стоимость приемки кубометра РАО на NSO составляет около \$450, это существенно ниже, чем в других хранилищах США. Так, хранилище Barnwell в год принимает на хранение около 3300 м³ низкоактивных отходов и имеет бюджет \$7,6 млн. Себестоимость приемки в 2008 году достигла \$20000 за кубометр, цена в предыдущие годы составляла около \$15000, а в 2008 году поднялась до \$27000 за кубометр.

Обращение с РАО в Западной Европе

Общая ситуация. В Западной Европе ситуация в области обращения с РАО существенным образом отличается от ситуации в США. В Великобритании, Франции, Испании и других европейских странах существуют корпорации, отвечающие за обращение с РАО (NDA, ANDRA, ENRESA и т.д.). Практически это госкорпорации, так как они единственные организации в своих странах, уполномоченные принимать и хранить РАО. Такую систему обращения с РАО поддерживает своими решениями Еврокомиссия.

Согласно отчету о ситуации по обращению с РАО, ежегодное производство всех радиоактивных отходов в государствах, «старых» членах Европейского союза (ЕС15), составило около 40000 м³. Это приблизительно на 10000 м³ в год меньше, чем производилось до 1999 года. К этому количеству добавились 5000 м³ отходов низкого и среднего уровня активности, которые производятся каждый год в странах, недавно вступивших в союз (ЕС10), а также в других близких к ЕС государствах, обладающих ядерными электростанциями (в Болгарии и Румынии).

Общий объем РАО расширенного Европейского союза (ЕС25) составляет приблизительно 45000 м³/год. Количество ОЯТ и высокоактивных отходов (ВАО) вычислить труднее, поскольку они зависят от технологии, используемой при обращении с ОЯТ (переработка или прямое захоронение). Некоторые государства

вычисляют фактическое количество стекловидных компаундов, содержащих отходы от переработки ОЯТ, а не объем первоначальных отходов. Другие вычисляют вес тяжелых металлов, содержащихся в топливных элементах, а не объем упакованных отходов. Считается, что суммарный объем отходов, возникающих при обращении с ОЯТ, составляет около 400-500 м³/год для ЕС15 и от 50 до 70 м³/год для ЕС10. Приблизительно 250 м³/год этих отходов остекловывается, остальные перерабатываются в топливо. К настоящему времени около 2 млн. м³ низкоактивных и часть среднеактивных отходов окончательно размещены в хранилищах. Основные объемы РАО находятся в хранилищах Drigg в Великобритании, а также в центрах Манш и Об во Франции.

Финляндия, Франция, Испания, Швеция и Великобритания размещают РАО, содержащие небольшое количество долгоживущих радионуклидов, в основном в приповерхностных или мелкозалегающих хранилищах. Из новых государств-членов только в двух странах – Чешской республике и Словакии есть хранилища отходов низкого и среднего уровня активности; некоторые другие страны обладают хранилищами, которые принимают отходы только установленного типа.

Несомненно, самую большую проблему представляют ВАО. Большинство процессов, вовлеченных в обращение с ними, достигло стадии промышленного использования.

Единственный недостаток технологий – высокое энерговыделение ВАО. В некоторых странах не существует никаких планов относительно обращения с такими отходами. Несколько государств, имеющих атомные станции, в настоящее время решили отложить вопросы обращения с ВАО, по крайней мере, на 50 и более (до 100) лет. Только Швеция и Финляндия близки к созданию хранилищ, которые могут быть введены в строй к концу следующего десятилетия.

Большинство государств-членов все еще далеки от создания хранилищ ВАО, хотя Бельгия уже несколько лет обладает подземной лабораторией обращения с ними, а во Франции идет ее строительство. Новые государства-члены отстают от «старых» членов, многие из них первоначально предполагали экспортировать отработавшее топливо в Россию. Среди научной общественности имеется согласованное мнение о необходимости захоронения ВАО в геологических формациях. Европейская комиссия рассматривает захоронение в геологических формациях при современном уровне знаний как единственно безопасное и жизнеспособное решение для долгосрочного хранения ВАО.

Между тем существует оппозиция широкой общественности большинству предложений по местам размещения таких хранилищ. Учитывая это, все труднее и труднее получить политическую поддержку или даже политические решения по строительству хранилищ ВАО. Отказ переходить к следующей стадии в процессе обращения с отходами укрепляет начальные подозрения общественности и усиливает ее сопротивление. В свою очередь, в результате этого еще тяжелее принимать политические решения. Ясно обозначилась потребность в политической инициативе оказать поддержку тем государствам-членам, которые продвинулись вперед в своих программах обращения с РАО, и

дать необходимый импульс другим государствам, которые явно не в состоянии достичь существенных успехов в этом направлении.

В ноябре 2000 года Европейская комиссия приняла документ «Вперед к европейской стратегии энергетической безопасности» (Зеленая книга энергетической безопасности). В нем указано, что будущее атомной энергетики в Европе зависит от нескольких факторов, включая решение проблем обращения и хранения радиоактивных отходов.

Независимо от будущей стратегии выработки энергии, с отходами, которые уже существуют, надо уметь обращаться, соблюдая основные принципы защиты здоровья человека и окружающей среды. Действия в этой области должны быть направлены на обеспечение гарантий того, что ответственность и бремя обращения с растущим количеством ОЯТ и РАО, помещенных на временное хранение, не будут перекладываться на будущие поколения. Текущая политика в большинстве государств-членов не сделала (и не делает) соответствующих шагов для решения этих проблем.

Комиссия полагает, что существует потребность в свободном выборе развития ядерной энергетики, не только потому, что это – один из самых безопасных источников энергии Евросоюза, но и вследствие большого разнообразия источников поставок топлива, высокой плотности энергии, что облегчает возможность ее запасать и использовать обширные возможности топливного цикла. С точки зрения сообщества это обеспечит чрезвычайно низкий риск прерывания поставок. Другим преимуществом являются экологические льготы: это основной источник производства электроэнергии, который не вырабатывает существенных объемов парниковых газов. Все это обуславливает насущную необходимость добиваться прогресса в решении проблем обращения с радиоактивными отходами, особенно с отходами высокого уровня активности, что является очень важным элементом развития ядерной энергетики.

В ноябре 2002 года Европейская комиссия приняла первую часть так называемого Ядерного пакета. Это ряд документов, посвященных повышению ядерной безопасности в Европейском союзе. Проблема обращения с радиоактивными отходами стала одной из двух центральных тем пакета, другая тема – безопасность ядерных установок. Эти документы, более известные как «Директива об отходах», были предложены для внесения в новое законодательство ЕС, принятое Еврокомиссией в январе 2003 года. Цель законопроекта – безопасное долгосрочное обращение с ОЯТ и РАО. Директива охватывает все формы РАО и все ОЯТ, независимо от предполагаемого способа обращения (переработка, хранение или прямое захоронение). В то же время акцент делается на отходах высокого уровня активности, включая отработавшее ядерное топливо, от которого также нужно избавляться.

Директива основана на Объединенной конвенции по безопасности обращения с ОЯТ и РАО. Она включает множество основных требований и мер безопасного обращения, которые должны быть признаны всеми, кто изучил это соглашение. Предложенные меры можно рассматривать как признанный международный передовой опыт в области обращения с ОЯТ и РАО, охватывающий такие аспекты, как здравоохранение, экологическая защита,

ядерная безопасность, финансирование и управление. Многие из этих мер – часть текущей политики многих государств ЕС.

Директива требует, чтобы каждое государство-член установило определенную программу обращения с РАО, охватывающую все РАО, находящиеся под его юрисдикцией, и все стадии обращения, включая захоронение. Программа должна также касаться обращения со всем ОЯТ, которое не подвергается переработке или, в случае топлива исследовательских реакторов, возвращается на основе соглашений о его возврате. В частности, программа должна определить подходы к долгосрочному обращению и захоронению с точным расписанием каждого шага процесса где нет никакой другой альтернативы.

Государства-члены каждые три года должны делать сообщения о ходе выполнения своих программ, ЕК с помощью национальных экспертов их рассмотрит и опубликует собственный отчет о ситуации в области обращения с радиоактивными отходами в Евросоюзе.

В директиве недвусмысленно заявлено, что при современном уровне знаний захоронение в геологических формациях – лучший метод для долгосрочного хранения отходов высокого уровня активности. Между тем, следует принять во внимание, что существует широкий спектр отходов, которые не будут перерабатываться, и даже если бы переработка стала технически выполнимой и экономически привлекательной, это все равно не решит полностью проблемы обращения с отходами высокого уровня активности. Директива также поддерживает исследования по новым технологиям, использование которых может привести к уменьшению количества РАО.

В документе предложено разрешить отправку отходов третьим странам как альтернативу захоронению в национальном хранилище. Такая отправка должна производиться в рамках долгосрочных стабильных контрактов и только в страну, обладающую технологиями обращения, соответствующим стандартам, принятым в стране происхождения РАО. В случае отправки специальных материалов должны быть предоставлены адекватные гарантии. Ввиду существующего запрета на импорт радиоактивных отходов эта часть директивы вызвала активное обсуждение. Дебаты пока далеки от достижения согласия, но открытое обсуждение этого вопроса – значительный шаг вперед.

Наконец, директива поощряет исследования в области обращения с РАО. Обеспокоенность Еврокомиссии этими вопросами обусловлена двумя факторами. Во-первых, уровень исследований в области обращения с РАО все еще неадекватен ситуации. Во-вторых, исследования могут быть более эффективно скоординированы. Уровень затрат на исследования, выполненные в разных странах, включая разработку и конструирование хранилищ, должен приближаться к уровню затрат стран-лидеров в области обращения с отходами.

Затраты приблизительно можно оценить в зависимости от количества электроэнергии, произведенного на атомных станциях, и он оказывается тем же, что в США. Это разумное продолжение принципа «загрязнитель платит». Стоимость исследований составляет приблизительно €500 тыс. в год на каждый тераваттчас, произведенный атомными станциями. Только два или три

государства-члена ЕС тратят столько же на исследования в области обращения с РАО, и они же оказались самыми близкими к выработке долгосрочных решений в области обращения с отходами. Остальные страны тратят значительно меньше.

Еврокомиссия полагает, что в этих государствах и, в результате, в Европейском Союзе в целом в настоящее время уровень исследования неадекватен, особенно это касается определения и характеристики участков для размещения хранилищ. Для стимулирования более высокого уровня исследований Еврокомиссия рекомендует лучше скоординировать эту работу, причем в ближайшее время.

В результате обсуждений текст директивы стал приемлемым для существенного большинства государств-участников. Однако «точкой преткновения» стал вопрос, должна ли «Директива об отходах» быть принята в качестве нового закона ЕС, или это некий «юридически необязательный» акт, такой, как решение Европейского Совета? Другими словами, должно ли будущее сотрудничество в области обращения с РАО и продвижение в этом направлении на национальном уровне быть достигнуто на добровольной основе, или это требование закона? Европейский парламент склонялся в пользу обязательного закона. Однако, поскольку юридическим основанием для законопроекта было соглашение с Евроатом, только у Европейского Совета есть возможность принятия его в качестве европейского закона. Чтобы этого достичь, предложение должно получить одобрение квалифицированным большинством, что требует значительно большего числа голосов.

Франция. В некоторых европейских странах существуют национальные программы обращения с РАО, во Франции это программа компании ANDRA. Она планирует и управляет потоками РАО, поэтому приходится прогнозировать объемы отходов, принимаемых на хранение, и заранее строить хранилища. Рассматривая французскую программу вывода из эксплуатации реакторов первого поколения, прежде всего, газоохлаждаемых реакторов, ANDRA планирует создание мощностей по переработке и хранению облученного графита, которые будут запущены в течение ближайших десяти лет. Хранилище в геологических формациях предполагается ввести в действие в 2025 году. Хранилища низкоактивных отходов будут сосредоточены в центре Об (емкость – до 1 млн. м³), очень низкоактивных отходов – в Морвилье (емкость – до 650 тыс. м³). Бюджет программы – €10 млрд.

В настоящий момент ANDRA эксплуатирует три хранилища РАО – это центры Об и Манш, а также центр в Морвилье. Помимо этого ведутся работы в рамках двух других проектов. Важная программа по окончательной изоляции долгоживущих отходов реализуется в районе расположения лаборатории Мез-Верхняя Марна (центр Бюре). Кроме того, с 2006 года осуществляется проект по захоронению низкоактивных долгоживущих отходов, включая «исторические» РАО, содержащие радий. В 2008 году будет выбрана площадка, отвечающая всем техническим и научным требованиям к сооружению хранилища таких отходов. Стоимость хранения РАО очень низкой активности составляет около €450 за тонну, для короткоживущих РАО низкой и средней активности цена достигает €2500 за кубический метр.

К 2008 году ANDRA разработала проекты сооружений для хранения отходов очень низкого, низкого и среднего уровня активности, в частности, хранилище в центре Об. Это каркасное легкое хранилище, защищающее помещенные в него РАО от внешних осадков. Отходы размещаются в нем в упакованном виде. В 2005 году было предложено проектное решение по сооружению подземного хранилища высокоактивных отходов, расположенного в глиняной залежи. Проект прошел стадии научно-технического исследования и оценки безопасности.

Великобритания. Внутренний рынок обращения с РАО в Великобритании в настоящее время регулирует Nuclear Decommissioning Authority (NDA). NDA вертикально интегрирована, так как обращение с РАО в рамках проектов NDA направлено на удовлетворение собственных потребностей. Сторонние компании могут выйти на этот рынок только в случае, если они конкурентоспособны. Проблема в том, что на внутреннем рынке небольшая конкуренция, а без конкуренции нет снижения цен. По оценкам NDA, стоимость работ по реабилитации радиационно-опасных объектов в Великобритании ежегодно вырастает на 9%, следовательно, каждый год в той же пропорции растет цена хранения РАО.

NDA в любой проект по реабилитации объектов радиационного наследия закладывает стоимость отправки на длительное хранение РАО в размере 27-30%. Цена переработки и хранения средне- и высокоактивных отходов в соответствии с программой по выводу из эксплуатации ядерных объектов составляет £46 тыс. за кубометр. Если включить в нее стоимость строительства хранилища в геологической формации, цена вырастет до £67 тыс. за кубометр. Для сравнения: хранение низкоактивных отходов в хранилище Drigg в Камбрии стоит £2000 за кубометр, то есть цена обращения с высоко- и среднеактивными РАО в 34 раза выше.

Экспорт и импорт радиоактивных отходов в Великобритании запрещен с июля 1995 года. Но неформально другие страны торгуют отходами с Великобританией: иностранные компании платят за создание дополнительного коммерческого пространства для отходов среднего уровня активности в хранилище в геологической формации, создаваемом для захоронения отходов, возникающих при ликвидации ядерного наследия.

Испания. Обращение с радиоактивными отходами, возникающими в процессе вывода из эксплуатации и реабилитации ядерных установок и производств, является единственной функцией испанской компании ENRESA. Низко- и среднеактивные РАО поступают в хранилище El Cabril, где их кондиционируют и захоранивают. Эксплуатация хранилища обуславливает интегрированную систему управления РАО, которая включает не только вывоз отходов, но и сбор, транспортирование, обработку и создание условий для их безопасного хранения, а также получение точной информации об отходах, включая радиометрическую характеристику и проверку качества отходов.

Хранилище El Cabril ввели в действие в 1992 году. Оно было разработано и построено таким образом, чтобы выполнить две основные задачи: гарантировать прямую и опосредованную защиту людей и окружающей среды, используя

многоуровневую систему барьеров, и свободное использование участка в течение долгого времени - до 300 лет. Хранилище рассчитано на размещение 50 тыс. м³ низко- и среднеактивных отходов. К концу 2005 года было загружено 25557 м³ таких РАО (около 53% суммарного объема хранилища). Ежегодный поток отходов составляет около 2000 м³. Дополнительно здесь же сооружено хранилище для отходов очень низкого уровня активности емкостью 120 тыс. м³, которое введено в эксплуатацию в 2008 году.

Объем отходов более высоких активностей – части реакторного оборудования или реакторных зон – относительно мал по сравнению с низко- и среднеактивными отходами.

В настоящее время в Испании нет хранилища для ВАО. Стратегия в этой области сосредоточена на временном сухом хранении отработавшего топлива и высокоактивных отходов, гарантирующем безопасность людей и окружающей среды. Исходя из экономической целесообразности, было предложено ввести в эксплуатацию хранилище ОЯТ и ВАО в 2050 году; сюда будут помещать и другие РАО, которые нельзя разместить в El Cabril.

В 2007 году Испания приняла программу обращения с РАО вплоть до 2070 года. Общая стоимость программы составляет €13 023 млн., 48% этой суммы будут потрачены на обращение с ОЯТ и ВАО, 20% – на демонтаж и вывод из эксплуатации, 12% – на обращение с низко- и среднеактивными отходами, 3% – на исследования в области обращения с РАО. Денежные средства, поступающие из различных источников, будут сосредоточены в специальном фонде под контролем правительства. Накопленными средствами управляет ENRESA под наблюдением компетентных правительственных структур. Такая организация выполнения работ и их финансирования позволяет оперативно производить необходимые операции и накапливать деньги для будущих проектов.

Недостатком европейских систем обращения с РАО является отсутствие конкуренции в этой области и, как следствие, необходимость жесткого государственного контроля расходования средств.

Обращение с РАО в России

Краткий обзор работ в области обращения с РАО в мире показывает, что объемы отходов, принимаемые на хранение в странах, обладающих ядерным наследием, составляют десятки тысяч кубических метров в год. Ежегодно в европейских хранилищах размещается около 45 тыс. м³ РАО, в США столько же отходов принимает только один полигон в Неваде. Даже страны, не участвовавшие в ядерной гонке вооружений, помещают в хранилища по несколько тысяч кубометров РАО в год – например, в Испании ежегодный объем изоляции РАО составляет 2000 м³. Объемы хранилищ также значительны. В США емкость полигона в Неваде – более 3 млн. м³, полигонов в Хамфорде и Ок-Ридже с учетом возможного расширения – 1,5 млн. м³, емкость хранилища в Селлафилде (Великобритания) составляет около 500 тыс. м³, центра Об (Франция) – 1 млн. м³. Все эти данные иллюстрируют масштаб проблем, возникающих с началом работ по ликвидации ядерного наследия.

Россия стоит на пороге решения тех же проблем и, не решив вопрос о хранилищах, не сможет справиться с реабилитацией объектов и территорий, загрязненных в ходе гонки ядерных вооружений.

Объемы наших хранилищ не сравнимы с зарубежными. Самое большое хранилище РАО спроектировано на ГУП МосНПО «Радон», его объем – 100 тыс. м³, срок эксплуатации – 50-100 лет. Московский «Радон» принимает до 1500-2000 м³ РАО в год. Все филиалы «РосРАО», вместе взятые, не могут обеспечить такие объемы приемки.

Подобная инфраструктура обращения с РАО чрезвычайно затрудняет реализацию ФЦП «Обеспечение ядерной и радиационной безопасности на 2008 год и на период до 2015 года». Необходимо создание мощностей по хранению РАО и организаций, имеющих опыт и соответствующие лицензии на право обращения с радиоактивными отходами.

Надо быть готовыми тратить на исследования в области обращения с РАО средства, сравнимые с затратами ведущих ядерных стран на эти цели. Необходимо решать проблемы переработки и кондиционирования РАО, содержащих делящиеся вещества, это в основном изотопы урана и плутония.

Вопросы обращения с РАО и технологии дезактивации в стране не прошли проверки масштабными проектами. Например, простая технология – автоматизированная система радиационной сепарации радиоактивного грунта, строительных конструкций и других твердых сыпучих РАО не действует в промышленных масштабах. Необходимо создание установок производительностью несколько тонн в час. Нужно также развивать технологии сжигания низкоактивных отходов, витрификации РАО, содержащих долгоживущие и делящиеся вещества. В нашей стране над этими проблемами работают во ВНИИНМ, на ГУП МосНПО «Радон», в РИАН, Концерне "Росэнергоатм", однако промышленные установки, использующие эти технологии, до сих пор не нашли широкого применения.

Другой аспект, на котором хотелось бы остановиться, – вопрос о правах собственности на предприятия, занимающиеся хранением РАО. В США существует практика отдавать их в собственность частным инвесторам для привлечения инвестиционного капитала и «сглаживания» проблем финансирования работ по ликвидации ядерного наследия. Хранилища в Ок-Ридже, Хандфорде и других местах построены на инвестиционные или государственные средства. Хранилища строят на основе соглашений между штатами и отходы принимают у предприятий штатов-участников соглашения.

В Европе вопросы управления хранилищами отданы компаниям с государственным контролем для регулирования цен на хранение отходов. Между тем реального рынка приемки РАО в Европе нет, в то время как в США разброс в ценах приемки довольно значительный - от \$450 за кубометр на полигоне в Неваде до \$27 тыс. за кубометр в хранилище Barnwell.

Масштабные работы в рамках ФЦП «Обеспечение ядерной и радиационной безопасности в 2008 году и на период до 2015 года» требуют значительных объемов хранения отходов. Поэтому необходимо в 3-4 раза увеличить прием РАО на хранение, и, как следствие, объемы хранилищ, в том

числе на АЭС Концерна "Росэнергоатом". В свете решения Правительства РФ о подписании международного договора о страховании от инцидентов на ядерных и радиационно-опасных объектах встает вопрос о существенном улучшении технологий обращения с РАО и повышении безопасности этих работ. Решить эти проблемы могут только специализированные компании с высококвалифицированным персоналом. Их создание позволит улучшить технологии и методы обращения с РАО, обеспечит системный подход к средствам радиационного и входного контроля.