

Радиоактивные отходы

8.1. Определение, источники образования и классификация

Появление радиоактивных отходов поставило перед человечеством глобальную проблему. Она состоит в разработке эффективной общей концепции и технических решений на всех стадиях обращения с этими материалами, включая их улавливание, концентрирование, упаковку, транспортирование, хранение и захоронение. Проблема возникла вместе с рождением и развитием атомной промышленности, энергетики, ядерного оружия, которые, как и все другие отрасли человеческой деятельности, породили свои, в данном случае радиоактивные, отходы.

К *радиоактивным отходам* относят не подлежащие дальнейшему использованию вещества и материалы технологического происхождения, в которых ионизирующая активность радионуклидов превышает допустимые уровни. Следует отметить, что РАО локализуются в относительно небольших объемах. Этим они отличаются от радиоактивных выбросов, которые поступают в окружающую среду неконтролируемо и рассеиваются в ней. От радиоактивных веществ природного происхождения РАО отличаются тем, что их активность определяется в основном не природными радионуклидами, поступающими в биосферу при извлечении радиоактивного сырья из недр, а искусственными, не существовавшими ранее в геосфере в ощутимых количествах. В принципе они могут содержать любые из 1300 известных радионуклидов, однако практически встречаются лишь те из них, у которых период полураспада составляет не менее нескольких часов. Ядра с меньшим временем жизни обычно исчезают еще при выполнении технологических процессов.

Источниками РАО являются:

- добыча и переработка радиоактивных руд;
- производство ядерного топлива и эксплуатация АЭС;
- переработка облученного ядерного топлива АЭС;
- производство оружейных материалов;
- эксплуатация и снятие с эксплуатации кораблей и судов с ЯЭУ;
- научно-исследовательские работы с использованием радиоактивных веществ и делящихся материалов;
- применение радионуклидов в медицине, науке и технике;

техногенные катастрофы с участием радиоактивных веществ.

Разработано несколько классификаций РАО. Для природопользования наиболее важны классификации по периоду полураспада (продолжительности существования), активности и агрегатному состоянию.

По *периоду полураспада* различают короткоживущие (менее 1 года), среднего времени жизни (1-100 лет) и долгоживущие элементы радиоактивных отходов. Последние представляют наибольшую экологическую опасность практически вечного порядка, так как среди них насчитывается около 20 элементов с периодом полураспада свыше 10000 лет (табл. 8.1).

Таблица 8.1

Потенциально опасные радиоактивные элементы
с периодом полураспада τ свыше 10000 лет (КэЙ...)

Изотоп	τ , лет	Изотоп	τ , лет
Be-10	3000000	Th-230	80000
Ca-41	100000	U-233	162000
Ni-59	80000	U-234	252000
Se-79	60000	U-236	24000000
Zr-93	1000000	Np-237	2200000
Nb-94	20000	Pu-239	24400
Tc-99	200000	Pu-242	380000
I-129	20000000	Cm-245	13000
Cs-135	2000000	Cm-247	40000000
Bi-210	2600000		

По *активности* РАО делят на низко-, средне- и высокоактивные (табл. 8.2 и 8.3).

Таблица 8.2

Характеристика твердых РАО различной степени активности
(Кривохатский)

Тип отходов	Активность, Ки/кг		Доза γ -излучения, Р/ч*
	α -излучатели	β -излучатели	
Низкоактивные	$2 \cdot 10^{-7} - 10^{-5}$	$2 \cdot 10^{-6} - 10^{-4}$	$3 \cdot 10^{-7} - 3 \cdot 10^{-4}$
Среднеактивные	$10^{-5} - 10^{-2}$	$10^{-4} - 10^{-1}$	$3 \cdot 10^{-4} - 10^{-2}$
Высокоактивные	$> 10^{-2}$	$> 10^{-1}$	$> 10^{-2}$

Примечание*. На расстоянии 0,1 м от поверхности.

Таблица 8.3

Характеристика пылегазообразных и жидких РАО
различной степени активности (Охрана окружающей...)

Тип отходов	Удельная активность, Бк/м ³	
	Пылегазообразные	Жидкие
Низкоактивные	$\leq 3,7$	$\leq 3,7 \cdot 10^8$
Среднеактивные	$3,7 - 3,7 \cdot 10^4$	$3,7 \cdot 10^8 - 3,7 \cdot 10^{13}$
Высокоактивные	$\geq 3,7 \cdot 10^4$	$\geq 3,7 \cdot 10^{13}$

По агрегатному состоянию РАО классифицируют на твердые, жидкие и газообразные.

Газообразные РАО редки. К ним прежде всего относятся радионуклиды криптона и ксенона, образующиеся при делении ядерного топлива, а также газы, содержащие радиоактивные изотопы водорода Н-3 и углерода С-14, а также радон.

Жидкие РАО, напротив, наиболее распространены. Они возникают на радиохимических предприятиях, АЭС, в исследовательских центрах и т.п. За счет энергии радиоактивного распада ЖРО могут нагреваться. При этом развиваются различные химические реакции (радиолиз), в которых выделяются так называемые радиолизные газы. Для их улавливания ЖРО, особенно высокой активности, необходимо охлаждать.

Твердые РАО включают:

отвержденные и остеклованные жидкие отходы средней активности от АЭС и радиохимических предприятий, содержащие в основном Sr-90, Cs-137, Co-60;

отвержденные газообразные отходы, включающие Н-3 и Kr-85;

высокоактивные отходы с трансурановыми элементами от регенерации топлива АЭС, которые могут также содержать редкоземельные элементы. Основные радионуклиды здесь — Am-241; Pu-238, -239, -240, -241; Np-237; Cm-243, 244;

корпуса выработавших ресурсы реакторов, ускорителей, разные виды оборудования и снятые с вооружения ядерные боеприпасы, другие негабаритные изделия с высокой и средней наведенной активностью. Это наиболее масштабные твердые отходы, поскольку, например, только бетонные обломки зданий реакторов и другие строительные материалы составляют до 30% общего объема РАО;

отработавшие ресурс радиоактивные источники на основе изотопов в блоках из различных веществ: Sr-90 (титанат), Cs-137 (боросиликатное стекло), Co-60 (металл), Po-210 (бериллий).

8.2. Масштабы и проблемы радиоактивного загрязнения

Масштабы и проблемы радиоактивного загрязнения определяются наличием уранодобывающих и перерабатывающих предприятий, объектов ядерного военно-промышленного комплекса, включая полигоны испытаний ядерного оружия, энергетикой, системой пунктов хранения и захоронения РАО, исследовательскими реакторами, ядерным оружием, техногенными катастрофами.

Наличие данных объектов привело к тому, что в СНГ радиационно неблагополучно более 10% территории (свыше 2 млн км²). В Белоруссии поражено 80, на Украине — 30 и в Казахстане — 40% их площадей. В России в 1991 г. насчитывалось около 1 млн км² радиационно дестабилизированных территорий с населением до 10 млн человек, в том числе 6 млн непосредственно пострадавших от радиации.

Особенно перегружен радиационно опасными объектами бассейн Оби и Енисея. Здесь находятся Семипалатинский ядерный полигон, заводы по производству ядерного топлива и оружейного плутония (бывшие Челябинск-65, -70; Златоуст-36; Свердловск-44, -45; Томск-7), Красноярский ядерный и Норильский атомный комплексы, другие объекты.

Суммарная активность РАО на территории России в настоящее время составляет, по различным оценкам, от 5,4 до 6 млрд Ки, что эквивалентно пятидесяти Чернобылям (Довгуша... 1997. № 2). Их объем равен 600 млн м³. На долю ВАО приходится только 420 тыс. м³, но их суммарная активность достигает 5,3 млрд Ки, или до 98% общей для всех РАО. Объем ВАО, подлежащих захоронению в 2005-2010 гг., оценивается в 1 млн м³. Характерная особенность ВАО — их чрезвычайно высокий индекс токсичности (коэффициент разбавления до безопасных концентраций). После 100 лет хранения отходов он равен 50 км³ на 1 т ВАО или ОЯТ, что эквивалентно ПДК, равной $2 \cdot 10^{-5}$ мг/л. Большая часть ВАО (4 млрд Ки) имеет уровень токсичности, превышающий аналогичный показатель сильнейших химических водных загрязнителей, например фенолов (ПДК равно 10^{-3} мг/л), более чем в 200 раз. При этом она заключена в незахороненных материалах, временно находящихся в специальных емкостях, открытых бассейнах, водоемах и т.п.

Одним из основных источников радиоактивности являются объекты атомной энергетики. В мире эти источники только по линии АЭС включают более 530 действующих, свыше 85 остановленных и 100 строящихся блоков, 20 огромных остановленных, функционирующих или строящихся радиохимических комбинатов.

Отходы АЭС России содержат 1,7 млрд Ки и находятся в 227 хранилищах, из которых 81 законсервировано и 146 эксплуатируются.

На девяти действующих АЭС России имеется около 100 тыс. м³ жидких и 110 тыс. м³ твердых РАО. При выработке 1 ГВт электроэнергии образуется 300-500 м³ твердых отходов и 25 т облученного топлива. При их обработке появляется соответственно 10, 40 и 130 м³ высоко-, средне- и низкоактивных отходов. При переработке 1 т исходных твердых РАО возникает минимум 4,5 т ВАО, 150 т жидких среднеактивных и более 2000 т низкоактивных отходов (Яблоков). К двухтысячному году на АЭС ожидалось накопление 41600 т ВАО (Answer to...).

Из изложенного следует, что выбросы в атмосферу и загрязнение водного бассейна при работе АЭС являются, как правило, вторичными.

В выбросах АЭС преобладают инертные радиоактивные газы — изотопы ксенона, криптона, аргона. Для уменьшения активности осуществляется временная задержка этих газов перед выпуском в атмосферу, достаточная для распада короткоживущих радионуклидов. В окружающую среду поступают также С-14, Sr-90, Ru-106, I-131, Cs-134, -137, Се-144, активированные продукты коррозии. Однако в целом радиоактивное загрязнение от АЭС гораздо меньше его естественного уровня. Последнее, как правило, в 10^{-5} - 10^{-6} раз ниже допускаемого НРБ-99.

Наличие на АЭС поверхностных водоемов-хранилищ ЖРО приводит к проникновению радиоактивных веществ в грунтовые и подземные воды. Однако доля их сброса в окружающую среду, как и выбросов, значительно ниже допустимого уровня. По различным объектам она изменяется от $10^{-5}\%$ (Ленинградская АЭС) до 39,5% (Калининская АЭС) последнего.

Совокупность воздействия всех видов отходов АЭС приводит к существенному загрязнению почвы. Так, в радиусе до 40 км от станций загрязнение территорий составляет 0,32-600 Ки/км² по Cs-134, -137 и 0,2-440 Ки/м² по Sr-90. Оно сочетается с ЭМИ, которое в диапазоне промышленных частот (50 Гц) по электрической компоненте достигает 0,1-25 кВ/м, по магнитной — 60-2500 мкТл.

В дальнейшем проблема отходов атомных реакторов станет еще более острой. По данным МАГАТЭ, к 2000 г. более 65 ядерных реакторов АЭС и 260 используемых в научных целях ядерных устройств должны были превысить 30-летний срок службы и быть остановленными. Однако вывод АЭС из числа действующих — чрезвычайно сложная и дорогостоящая проблема, решенная пока для считанного числа объектов (разд. 8.5).

Не менее опасны для окружающей среды другие предприятия атомно-энергетического комплекса.

Производственное объединение «Маяк» Челябинской области с конца 40-х годов 20 в. выпускает ядерные устройства. Его высоко- и среднеактивные ЖРО в 1949-1956 гг. напрямую спускали в р. Теча, приток Оби. Их общая активность составила 76 млн Ки. С 1951 г. эти отходы сбрасывают также в оз. Карачай, самое грязное место в мире. Уровень радиации в нем достиг 120 МКи. Часть радиоактивности попала в другие водоемы и почву — уже загрязнено более 3 млн га земель. Загрязнена и атмосфера. Например, выпадения из нее в течение 1994 г. цезия-137 превышали средние по стране в 50-100 раз. Сфера влияния ПО «Маяк» стала зоной экологического бедствия, где в 2 раза возросли онкологические заболевания, на 2/3 выше детские лейкозы.

Более благополучна обстановка в районе НПО «Радон» Московской области, производящего сбор, транспортирование, переработку и захоронение средне- и низкоактивных РАО. За два с лишним десятилетия здесь захоронено около 90 тыс. м³ ЖРО. Вокруг предприятия созданы СЗЗ (2,5 км) и зона наблюдения. В последней имеется 25 пунктов постоянного и 150 пунктов периодического контроля, отслеживающих радиационный фон местности.

В целом на атомных предприятиях России в настоящее время ежегодно образуется не менее 7 млн м³ ЖРО низкой и средней активности, содержащих более 2 млн Ки. Общее их накопление оценивается более чем в 400 млн м³, или, по различным оценкам, в 0,2-1,3 млрд Ки.

Очистка территорий от радиоактивности весьма трудоемка и дорогостояща. Так, для реабилитации площадок закрытых оружейных заводов Министерства энергетики США потребуется до 75 лет и 230-250 млрд дол. (Clean up...).

Весьма актуальными становятся проблемы мирового значения, связанные с исчерпанием срока службы и прекращением эксплуатации созданных в 60-70-х годах ЯЭУ транспорта (подводных лодок, ледоколов, крейсеров, авианосцев).

Только АПЛ в мире к концу 20 в. было построено 475 единиц, в том числе 245 российских, 187 американских, 25 английских, 12 французских и 6 китайских. В начале 21 в. в России, США, Великобритании необходимо было вывести из эксплуатации более 280 АПЛ, в том числе нашей стране — 191. Утилизированы, и лишь частично, только 72 АПЛ, в 95 из 119 неутилизированных лодок не выгружено ОЯТ. Сроки отстоя на плаву списанных АПЛ превысили 20, а некоторых — 35 лет (Тихонов...). По состоянию на 2005 г. в российском МВФ осталось всего 12 АПЛ, однако на него приходится почти 1/3 ядерного потенциала сдерживания страны (Известия, 2005. — №105).

Утилизация АПЛ предусматривает строгие меры радиационно-экологической безопасности: длительную (15-20 лет) стоянку на плаву списанных субмарин; выгрузку и транспортирование на переработку большого количества отработанных тепловыделяющих сборок; безопасное хранение и переработку значительных объемов ЖРО; длительное (не менее 70-100 лет) хранение вырезанных РО, при котором мощность источников γ -излучения уменьшится в среднем в тысячу раз; разделку корпусов АПЛ.

Столь длительные сроки утилизации АПЛ обусловлены тем, что на всех стадиях обращения с ними радиационные потоки чрезвычайно велики. Так, при ремонте АПЛ мощность излучения в кессоне реактора достигает 400, вблизи корпуса реактора — 20-40, в кессоне парогенератора — 2 мЗв/ч. Уровень радиоактивного загрязнения поверхности внутриреакторных конструкций может составлять 2 млн Бк/см², внутренней поверхности элементов оборудования первого и третьего контуров — 100 тыс. и 20 тыс. Бк/см² соответственно. Во внутриреакторных конструкциях сосредоточено свыше 90% долгоживущих радионуклидов, но они составляют не более 5-7% от общей массы радиоактивных материалов.

Эксплуатация, утилизация АПЛ и других судов атомного флота сопровождается образованием значительных количеств жидких и твердых отходов.

Объемы ЖРО (без учета поступающих из санпропускников и спецпрачечных) колеблются в пределах 5-14 тыс. м³/год. Примерно 30% из них составляют среднеактивные и около 70% — слабоактивные отходы. Последние образуются в технологических операциях (отмывка контура, дезактивация съемного и несъемного оборудования, отбор проб и проведение радиохимических анализов, перегрузка ионообменных фильтров и т.д.). Среднеактивные ЖРО появляются, как правило, только в аварийных ситуациях, но их суммарная активность достигает 95% общей активности жидких РАО (высокоактивные на кораблях ВМФ практически не возникают).

Ежегодное поступление твердых и отвержденных РАО составляет около 9 тыс. м³, в том числе ВАО — 41,1, САО — 52,2 и НАО — 6,7%.

После выгрузки жидких и твердых РАО в объеме реакторного отсека сохраняются два вида излучения: объемный (активированный материал элементов оборудования ЯЭУ) и поверхностный, обычно обусловленный продуктами коррозии оборудования и конструкций (в основном Со-60) или радиоактивными продуктами деления Cs-137, -139; Се-144; Ru-106; Sr-90.

Интегральная активность всех объемных и поверхностных источников излучения при времени выдержки 1-3 года достигает $(1-2) \cdot 10^{15}$ Бк.

Утилизация выработавших ресурс единиц атомного флота сдерживается чрезвычайной дороговизной работ. Обеспечение безопасной разделки атомных субмарин, захоронение их ядерных реакторов и РАО требует больше средств, чем создание АПЛ. В частности, для утилизации одной АПЛ в 1992 г. требовалось 9 млрд, а в 1995 г. — 40 млрд р. в ценах соответствующих лет. Только дезактивация снятого с единичной АПЛ оборудования сопровождается образованием ~ 1000 м³ ЖРО и 40 т ТРО. При полной ее утилизации ожидается 350-1000 т твердых РАО. Принятое Правительством СССР еще в 1985 г. решение о создании к 1993 г. хранилищ для реакторных отсеков АПЛ не выполнено, поэтому сегодня на базах ВМФ радиоактивные материалы накапливаются на открытых площадках.

Наиболее опасной угрозой окружающей среде и человечеству являются огромные запасы ядерного оружия. К середине 80-х годов 20 в. в пересчете на тротиловый эквивалент они составляли 11,3 млрд т, т.е. ~ 2 т на каждого жителя Земли. Этих запасов достаточно, чтобы в случае всеобщей ядерной войны основные их обладатели (США и Россия) могли 10-20 раз гарантированно уничтожить противостоящую сторону и ее союзников. Наземный взрыв водородной бомбы с тротиловым эквивалентом 1 млн т образует воронку глубиной 100 и диаметром 400 м. При воздушном взрыве зона сплошного огня достигает 33, пожаров — 80, ожогов третьей степени на открытой местности — 487 км². Стратегический бомбардировщик ВВС США несет 4 таких бомбы. Залп из подводного положения американской стратегической АПЛ способен полностью вывести из строя Транссибирскую магистраль и прилегающие территории на всем ее протяжении. Российские ракетные установки шахтного базирования имеют заряды с тротиловым эквивалентом до 9 млн т. Стратегические мобильные ракетные системы нового поколения «Тополь-М» (Россия) с тротиловым эквивалентом 0,3 Мт преодолеют любую противоракетную систему. Они непредсказуемо и непрерывно изменяют траекторию движения, но в конечном итоге точно попадают в цель.

Значительный ущерб окружающей среде нанесли испытания ядерного оружия. К моменту их запрещения в 1991 г. страны-члены так называемого ядерного клуба провели 2053 ядерных взрыва, в том числе США — 1093 с 1945 г., СССР — 715 с 1949 г., Великобритания — 22 с 1952 г., Франция — 188 с 1960 г., Китай — 35 с 1964 г. Однако в 1996 г., нарушив договоренность, Франция выполнила еще 8 ядерных взрывов. В 1998 г. в ядерный клуб вошли Индия и Пакистан, осуществив по 3 взрыва ядерных устройств. На пороге создания ядерного ору-

жия или тайного обладания им находится еще порядка 10 стран, в том числе с одиозным политическим режимом (КНДР). Таким образом, до сих пор существует угроза дальнейшего распространения ядерного оружия, что лишь усиливает нестабильность мирового сообщества.

Основным местом испытаний наиболее мощных ядерных зарядов в СССР был полигон на Новой Земле. С 1954 по 1990 г. здесь проведено 132 взрыва, из них 87 — в атмосфере, 8 — в Баренцевом и Карском морях, остальные — под землей. Суммарное энерговыделение от них превысило 273 Мт тротила, что составляет 94% мощности всех ядерных взрывов, произведенных в СССР. На Новой Земле выполнены самые мощные в мире взрывы в 58 Мт (1961 г.) и в 30 Мт (1962 г.). Несколько мощных (20-25 Мт) бомб взорвано в прибрежной зоне к западу и востоку от пролива Маточкин Шар. Плотность испытаний ядерного оружия в 1958, 1961 и 1962 гг. иногда достигала 7-8 ежемесячно. Суммарная активность радиации, сопровождавшей ядерные испытания, составила $5,2 \cdot 10^{17}$ Бк по Sr-90. По данным Госкомгидромета, максимальная плотность радиоактивных выпадений в 1962 г. в 11 тыс. раз превышала современные фоновые значения.

Подобной колоссальной нагрузки не знал ни один из атомных полигонов мира. Так, суммарная мощность 467 взрывов (124 — в атмосфере), произведенных на Семипалатинском полигоне в Казахстане, равна 16 Мт (4,5%). На 115 мирных взрывов в различных районах страны, оставивших в недрах 100 млн Кц, приходится тротильный эквивалент всего лишь в 1,5 Мт (Довгуша... 1997. № 2).

В последние годы привлекли внимание возможные последствия применения боеприпасов, содержащих обедненный уран-236 (обедненная урановая руда). Он используется как утяжелитель в артиллерийских снарядах, что усиливает их пробивную мощь. В 1990-х годах этот тип вооружения использовался в период Косовского кризиса войсками НАТО на территории южной Сербии против Югославии. Полученная информация свидетельствует, что обедненный уран имеет на 60% меньшую радиоактивность в сравнении с природным и не представляет собой серьезной опасности при внешнем воздействии. Уровень радиационного излучения на территории, подвергшейся обстрелу содержащими его боеприпасами, лишь незначительно выше, чем на участках, где обедненный уран не применялся, т.е. не представляет серьезной опасности при внешнем воздействии. Попадание его в пищевые продукты и воду в местах применения боеприпасов мало влияет на их токсичность. Однако примеси этого утяжелителя при попадании внутрь человеческого организма вместе с пылью могут привести к нарушению функций дыхательных и других органов (Bleise...; Actinide...).

Следует отметить, что деятельность ВПК, ядерные испытания, неустанный наращивание военного потенциала сверх всяких разумных пределов не только создали угрозу экологической безопасности страны, но и обескровили ее экономику. Бывший СССР по ряду позиций не только добился стратегического паритета с США, но и произвел оружия больше, чем остальные страны, вместе взятые: по уже упоминавшимся АПЛ 245 единиц против 230, по химическому оружию 40 тыс. т против 30 тыс. т, по танкам 80 тыс. против 60 тыс. и т.д. Выполнение этих задач требовало отвлечения, по некоторым оценкам, до 30% ВВП (США — не более 6%), 60-70% металлообрабатывающего оборудования, 40% электроэнергии, более 30% автотранспорта, 50% металлов, моторного топлива и масел, 85-90% ученых негуманитарных специальностей и инженеров. К сожалению, в плане структурной перестройки народного хозяйства с ориентацией его прежде всего на удовлетворение десятилетиями откладывающегося потребительского спроса населения и в постсоветской России ничего существенного пока не сделано.

Чрезвычайно опасные долговременные последствия может иметь радиоактивное загрязнение морей и океанов. Его основные источники: испытания ядерного оружия, до 1963 г. проводившиеся в атмосфере; РАО, непосредственно сбрасывавшиеся в море; крупномасштабные аварии судов с атомными реакторами; техногенные катастрофы типа Чернобыльской; захоронение РАО на дне и др.

В СССР, затем в России наибольшее количество радиоактивных веществ погружено в воды северных морей и северной части Тихого океана.

Захоронение в северных морях началось в 1964 г. с твердых отходов. Их объемы в конце 70-х и в 80-е годы 20 в. составляли 6-7 тыс. м³ ежегодно. Из них 70% приходилось на долю Северного флота. В открытых районах Баренцева и в мелководных заливах Карского моря у Новой Земли (преимущественно в границах полигона) сброшено 13 реакторов аварийных АПЛ (6 из них — с невыгруженным ядерным топливом) и 3 реактора и экранная сборка с частично невыгруженным топливом ледокола «Ленин». Там же затоплено почти 17 тыс. контейнеров с РАО (Будьков).

В общей сложности активность РАО, затопленных в арктических морях России, составляет 2/3 от захороненной в Мировом океане.

Эти, а также, вероятно, другие источники поступления радионуклидов привели к загрязнению акваторий арктических морей. Так, в западной части Баренцева моря зафиксированы максимальные концентрации цезия-137. Они в 6 раз превышали его средние уровни в водах Северной Атлантики. За весь 20-летний период наблюдений

(1963-1982 гг.) содержание другого загрязнения (Sr-90) в Белом и Баренцевом морях уменьшилось всего в 3-5 раз.

На Дальнем Востоке Тихоокеанский флот России сбрасывал РАО в Тихий океан в районе Камчатки, в Японское и Охотское моря. За 35 лет на глубине 1900-3300 м затоплено 6846 контейнеров, 38 судов и 100 других крупных загрязнений с суммарной активностью 19265 Ки (Danilian...). Следует выделить два реактора без топлива, затопленные в Японском море, и реакторную сборку, сброшенную у Камчатки. В настоящее время на ТОФ скопилось еще 16 тыс. м³ ЖРО, находящихся в переполненных временных хранилищах, в том числе на полузатопленных списанных судах.

Загрязнение цезием-137 и стронцием-90 наблюдается также в Черном море (разд. 1.8.4).

До 42% общего объема ТРО, затопленного в 1964-1992 гг. в своих морях Россией (свыше 22400 м³ с суммарной активностью более 5600 Ки), приходится на долю 60 судов атомно-технологического обслуживания (Довгуша..., 2001, 2003).

В целом с конца 50-х по 1992 г. СССР с явным нарушением требований МАГАТЭ затопил РАО суммарной активностью 2,5 млн Ки.

Значительный вклад в загрязнение морей и океанов внесли и другие страны. В 1971-1983 гг. отходы военной и атомной промышленности регулярно топили Бельгия, Великобритания, Нидерланды, Франция и Швейцария, эпизодически — Япония, Новая Зеландия, Италия, ФРГ, Швеция, Ю.Корея. Особенно значителен вклад Великобритании, которая сбросила 76,6% всех захоронений РАО (без учета СССР). По данным МАГАТЭ, с 1949 по 1982 г. в 15 местах Северной Атлантики, Ла-Манша, Бискайского залива и Канарских островов она провела 34 захоронения ТРО с общей активностью 949 тыс. Ки. Кроме того, предприятия ее атомной промышленности широко практиковали сброс ЖРО в Ирландское море. В целом английские и французские атомные заводы загрязнили радиоактивными элементами практически всю Северную Атлантику, особенно Северное, Норвежское, Гренландское, Баренцево и Белое моря. Только за 1967-1982 гг. в Атлантике оказалось более 188 тыс. контейнеров массой почти 95 тыс. брутто-тонн, содержавших 1 млн 222 тыс. Ки.

Вклад США в загрязнение Мирового океана равен 87 тыс. контейнеров, затопленных в 1946-1970 гг. в Мексиканском заливе (общая активность 96673 Ки).

На дне океанов в настоящее время находится 7 атомных подводных лодок, в том числе 6 — СССР и России, 9 атомных реакторов, 7 самолетов с ядерными устройствами на борту, более 50 ядерных боепри-

пасов, сотни тысяч контейнеров с РАО, десятки реакторов АПЛ, в том числе с невыгруженным ядерным топливом. К этому следует добавить сотни тонн не растворяемого в морской воде плутония, который попал в Мировой океан в ходе ядерных испытаний 60-х годов 20 в.

Уже достигнутые масштабы загрязнения привели к тому, что на пороге третьего тысячелетия рождается новое отношение к Мировому океану. Конференция в Рио-де-Жанейро в 1992 г. запретила сброс РАО в море. В 1972 г. Лондонская конвенция призвала к постоянному мораторию на их дампинг в моря (ратифицирована СССР в 1975 г.).

Экономическое положение нашей страны таково, что для строительства новых хранилищ недостает средств, а имеющиеся хранилища ядерных отходов переполнены. Постоянно решается дилемма: либо строить новые хранилища, либо продолжить сливы и сбрасывание РАО в моря. Уже после 1992 г. такие сливы велись в Японское море. Полагали, что Россия ввиду тяжелого экономического положения минимум до 2000 г. будет вынуждена затоплять в море РАО всех видов (Довгуша... 1996).

Проблемы, связанные с ядерной безопасностью, будут только нарастать, если социально-экономическая ситуация страны кардинально не изменится к лучшему. Еще в 1993 г. один из координаторов Гринпис, в официальном порядке посетивший ядерные объекты ВМФ России, в докладе президенту США Б.Клинтону сделал вывод: «Правительство и ВМФ России самостоятельно не в состоянии справиться с надвигающейся на нее экологической угрозой. Без своевременного вмешательства извне возникает риск ряда серьезных региональных экологических катастроф, которые будут иметь последствия для жителей прибрежных районов и богатых рыбных запасов в водах Северного Ледовитого океана и Северной части Тихого». В 1994 г. аналогичное мнение изложено в докладе правительству России комиссии советника Президента по экологии и здравоохранению А.Яблокова: «Очевидно, что сейчас сложилась критическая ситуация, исключающая дальнейшую эксплуатацию атомного подводного флота» (Довгуша... 1997. № 2).

Беспорядочное загрязнение Мирового океана РАО, имевшее место до принятия Лондонской конвенции, может вызвать необратимые процессы гибели флоры и фауны. Наиболее опасны радионуклиды цезия-137, стронция-90, церия-144, иттрия-91, ниобия-95. Они легко биоаккумулируются, переходят по пищевым цепям, концентрируются в морских организмах высших трофических уровней, создавая опасность для гидробионтов и человека.

Наши знания о Мировом океане, значительно расширившиеся в последние десятилетия, подводят к мысли, что реальные опасности от глубоководных захоронений РАО более существенны, чем представля-

лось ранее. Так, опровергнуты представления о покое глубин Океана, в которых, как оказалось, нередки крупномасштабные вихревые явления, глубоководные течения, внутренние волны, бентические (донные) штормы, гидротермальные проявления с температурой порядка 300°C и высоким содержанием сероводорода. Эти и другие факторы могут быть одной из причин быстрого (за 10-30 лет) разрушения контейнеров, корпусов затонувших судов, реакторных отсеков и т.п. Возможно, что сама стратегия (даже регламентированная) захоронения РАО в море была глубоко ошибочной.

Весьма опасным и заранее непредсказуемым источником радиоактивного загрязнения окружающей среды являются аварии и катастрофы на ядерных объектах. Горькую славу лидера этого направления заслужил бывший СССР.

Крупнейшая авария произошла в 1957 г. на упоминавшемся выше ПО «Маяк». При тепловом взрыве одной из емкостей для хранения высокоактивных ЖРО было выброшено около 20 МКи, из которых ~10% рассеялось на площади 1000 км^2 , загрязнив ее стронцием-90, цезием-137, церием-141, рутением-106, актинидами и другими элементами. Около 2 млн Ки образовали облако, которое прошло над Челябинской, Свердловской и Тюменской областями, оставив после себя так называемый восточно-уральский след (ВУРС). Он охватил территорию ~30 тыс. км^2 с количеством облученных порядка 500 тыс. человек.

Навсегда вошла в анналы истории авария 1986 г. на четвертом энергоблоке Чернобыльской АЭС. По своим последствиям она стала крупнейшей экологической катастрофой человеческой цивилизации. Суммарный выброс радиоактивных продуктов в атмосферу достиг 77 кг, что более чем в 100 раз превышает выброс атомного взрыва над Хиросимой. В его состав вошло около 30 радионуклидов с периодом полураспада от 11 ч (криптон-85) до 24390 лет (Pu-239). Их суммарная радиоактивность в 1986 г. оценивалась в $5 \cdot 10^{18} \text{ Бк}$, что в 10 раз больше полученной на пике испытаний ядерного оружия в 1954-1962 гг.

Общая площадь радиоактивного загрязнения при Чернобыльской катастрофе превысила 130 тыс. км^2 . На ней было расположено 7000 городов и поселков с населением 4,2 млн человек. Большая часть выбросов отмечалась в радиусе 300-400 км от станции, 70% их попало на территорию Белоруссии. Масштабы загрязнения земель России цезием-137 (изотопом со смешанным бета- и гамма-излучением и периодом полураспада 30 лет) по состоянию на начало 1995 г. представлены в табл. 8.4. Российская зона загрязнения затронула 14 областей (от Брянской до Ульяновской) и одну республику (Мордовия), включающих 15 городов, 138 административных районов, около 8 тыс. населенных пунктов (число жителей ~3 млн человек). Радиоактивные облака

Чернобыля накрыли также значительную часть Европы, особенно Австрию, Венгрию, Румынию, Польшу, Финляндию, Швецию, Турцию.

Следствием радиоактивного заражения стало снижение в Белоруссии нормальных родов с 54,3 до 34%, увеличение числа заболеваний раком щитовидной железы у детей с 0,42 на 100 тыс. человек в 1986 г. до 2,42 в 1992 г. (в Гомельской области — с 0,25 до 12). Возросла патология пищеварительной, мочевыделительной и эндокринной систем. В пострадавших районах России резко повысились заболевания анемией, участились сердечно-сосудистые, легочные болезни, вспышки инфекций. В зонах загрязнения с уровнем более 40 Ки/км² у взрослых и детей стали проявляться симптомы «чернобыльской болезни», вызванные наличием йода-131: головная боль, сухость во рту, увеличение лимфоузлов с последующим раком гортани и щитовидной железы.

Таблица 8.4

Площади РФ, загрязненные цезием-137
вследствие Чернобыльской катастрофы (Довгуша... 1997. № 2)

Объект	Интенсивность загрязнения, Ки/км ²				
	1-5	5-15	15-40	> 40	всего
Общая территория, км ²	49760	5450	2130	310	57650
Сельхозугодья, тыс. га	1576	367	99	17	2059
Земли лесного фонда, тыс. га	871,2	85,6	42,0	2,5	1001,3

Экономические потери от Чернобыльской катастрофы огромны. Они включают долгосрочное изъятие из хозяйственного оборота 144 тыс. га сельхозугодий, 492 тыс. га лесов, затраты на отселение жителей. По некоторым оценкам, ущерб составляет около 300 млрд р. (цены 1984 г.), или ~180 млрд долл США, что сопоставимо со всей прибылью от АЭС за время их эксплуатации в нашей стране (Довгуша... 1997. № 2).

Чернобыль еще не сказал последнего слова. Под дырявым саркофагом, сквозь щели которого уже может пролететь птица, находится около 200 т ядерного горючего и 3000 м³ радиоактивной воды. Проникновение этой потрясающей смеси в грунтовые воды, неконтролируемый разогрев и возможный взрыв активных компонентов топлива могут в конечном итоге привести уже к глобальным социально-экологическим последствиям. Полное осознание человечеством этого факта еще не наступило.

Известны и другие ядерные инциденты в нашей стране: аварии на Сибирском химическом комбинате (1993 г.) и АПЛ: К-219, К-159, «Комсомолец», «Курск» (Тихонов..., 2005 г.).

Однако ядерные катаклизмы — не только наше «достижение». Потерпели катастрофу и затонули АПЛ «Трешер» и «Скорпион» ВМФ США. Имели место аварии на АЭС и нефтеперерабатывающих заводах: «Три Майл Айленд» (Гаррисберг, США, 1979 г.), Уиндскейл (Великобритания, 1957 г.), Токай-Мура (Япония, 1997 г.). Из аварий самолетов США с ядерным оружием на борту с наиболее ужасающими последствиями могли стать катастрофы над Паламоресом (Испания) и Туле (Гренландия). Так, во время патрульного полета над Южным побережьем Испании в 1966 г. стратегический бомбардировщик В-52 с четырьмя водородными бомбами столкнулся при дозаправке горючим с самолетом-заправщиком. Оба самолета разбились. Три бомбы упали у деревни Паламорес, две из них разрушились из-за взрыва обычных детонаторов. Одна бомба упала в Средиземное море, откуда с глубины 870 м была поднята после 80 сут. поисковых работ.

Суммируя изложенное относительно масштабов и проблем радиоактивного загрязнения в России, укажем, что, по данным государственного доклада «О санитарно-эпидемиологической обстановке в Российской Федерации в 2003 г.», наибольший вклад в облучение населения вносят природные (69%) и медицинские (30%) источники ионизирующего облучения. На долю других источников, в том числе прошлых радиационных аварий, в целом приходится менее 1%. В частности, уровень коллективной дозы при добыче и переработке урана, нормальной эксплуатации АЭС мощностью 12 ГВт составляет менее 0,01% от естественного радиационного фона (Крышев...).

8.3. Обращение с РАО

Порядок обращения с отходами изложен в НРБ-99. Они регламентируют сбор, удаление, обезвреживание и хранение твердых и жидких РАО, а также очистку от радионуклидов вентиляционных и технологических выбросов в атмосферу. Принятые на основе разработок 40-50-х годов 20 в., эти правила не являются оптимальными и экологически безопасными с позиций нашего времени. Однако они позволили в кратчайшие сроки решить задачи обеспечения ядерного паритета и развития ядерной энергетики.

Существующая схема обращения с РАО включает несколько стадий: улавливание — технологическая обработка (концентрирование, упаковка) — хранение — захоронение. В зависимости от ряда факторов, прежде всего агрегатного состояния и активности отходов, эта схема может видоизменяться, усиливая, снижая или даже полностью исключая ту или иную стадию.

8.3.1. Сбор и удаление

низко- и среднеактивных отходов

В настоящее время относительно надежно решены вопросы, связанные с пыле-газовыми выбросами.

Низкоактивные, обычно вентиляционные, выбросы удаляют через трубу и рассеивают. Ее высота и условия выбросов должны гарантировать соблюдение $ДК_B$ — допустимой объемной концентрации радионуклидов в атмосфере и воде, безопасной для населения категории Б. Последнее по условиям проживания или размещения рабочих мест может подвергаться воздействию радиоактивных веществ и других источников излучения, применяемых в учреждениях и/или удаляемых во внешнюю среду. Значение $ДК_B$ рассчитывают как отношение ПГП радиоактивного вещества к объему воды (800 л) или воздуха (7,3 млн л), с которыми оно поступает в организм человека в течение года. Величина ПГП представляет собой *предел годового поступления* радионуклидов через органы дыхания и пищеварения.

При наличии смеси радионуклидов неизвестного состава значения ПГП через органы дыхания и $ДК_B$ в атмосфере составляют соответственно 3,7 Бк/год и $3,7 \cdot 10^{-7}$ Бк/л. Величина ПГП через органы пищеварения и $ДК_B$ в воде для этого же случая равны $1,1 \cdot 10^3$ Бк/год и 1,11 Бк/л (*Охрана окружающей...*).

Для установленных веществ допускают $ДК_B$ существенно более высокие. Для радиоактивных инертных газов в воздухе они изменяются от 1,1 (Кг-89) до 96,2 Бк/л (Кг-85). Значения $ДК_B$ известных жидких и твердых нуклидов в атмосфере варьируют от 11,1 у трития до $8,14 \cdot 10^{-5}$ Бк/л для урана-238. В воде $ДК_B$ конденсированных веществ находятся в пределах от $1,48 \cdot 10^5$ (третий) до 1,48 Бк/л (Sr-89).

Вентиляционный воздух, выбрасываемый в окружающую среду без очистки, должен также иметь объемные активности на выходе, не превышающие допустимых для воздуха рабочих помещений. При этом суммарный выброс необходимо иметь ниже предела дозы, установленной НРБ-99 (разд. 6.3).

В варианте очистки выбросов от радиоактивных аэрозолей используют пылеуловители всех типов (глава 3). Для высокодисперсных частиц широко применяют фильтры различных конструкций с фильтро-элементом из материала ФПП (разд. 3.2.4.3). С уловленной пылью, в зависимости от уровня ее радиоактивности, поступают как с твердыми низко-, средне- или высокоактивными отходами.

Для очистки вентиляционных выбросов и технологических сдувок от радиоактивных инертных газов (изотопы криптона, ксенона, аргон-41) применяют газгольдеры и адсорбционные колонны. Газгольдеры представляют собой устройство для приема, хранения и выдачи газа. В них короткоживущие радионуклиды с периодом полураспада ~1-3 ч находятся столько, сколько необходимо для снижения их активности до приемлемого уровня. Обычная степень очистки в газгольдерах составляет 80-90%. Адсорбционные колонны используют, если требуется высокая (более 99%) степень удаления радиоактивных инертных газов из выбросов. В этом случае основная схема очистки включает охлаждение газа с сепарацией влаги, глубокую его осушку в колоннах с цеолитом и последующую подачу в адсорбер с углем для поглощения загрязняющих примесей.

Жидкие слабо- и среднеактивные отходы перед сбросом в окружающую среду во всех случаях подвергают очистке. Для этого используют методы упаривания, двухступенчатый ионный обмен с предварительной очисткой от механических примесей, органических веществ и обработкой регенерационных растворов; электролиз, селективные мембранные сорбенты, ультрафильтрацию, мембранную дистилляцию, химические методы и др.

В качестве примера приведем краткие данные по обезвреживанию ЖРО на Московской станции переработки. На ней очистку сточных промышленных вод от РАО после предварительного кондиционирования осуществляют методами коагуляции и фильтрации с последующей двухступенчатой ионообменной очисткой. Очищенные стоки упаривают и вывозят на захоронение. Они имеют объемную активность 10^6 Бк/л, в том числе α -активность — 10^3 - 10^4 Бк/л. Их объем по отношению к объему очищаемых РАО сокращается до 500 раз, составляя 0,2-2,2%. Добавим, что система очистных сооружений должна предусматривать не только дезактивацию сточных вод, но и возможность их применения в технологических целях.

Более упрощенные схемы очистки сбросных вод реализуются на установках для облучения резины, нефтепродуктов, фторопластов, древесины и т.п., где в качестве облучателей применяют Со-60, который до использования хранят в воде. Ее осветление от микровзвесей проводят на скорых механических фильтрах с целлюлозно-тканевой насадкой, а дезактивацию воды осуществляют на ионообменных фильтрах из синтетической смолы (сильнокислотной или слабоосновной).

Иногда возможен сброс радиоактивных сточных вод в хозяйственно-бытовую канализацию. В этом случае концентрация радионуклидов в них не должна превышать ДКБ более чем в 10 раз. В коллекторе данного предприятия необходимо обеспечить десятикратное разбавле-

ние радиоактивных сточных вод нерадиоактивными, а суммарный сброс радионуклидов следует ограничить величиной, не превышающей установленных ДКБ. Допустимые сбросы ЖРО в поверхностные водоемы согласуются с органами Госсаннадзора.

При невозможности разбавления, а также при малых (менее 200 л/сут) количествах ЖРО они должны собираться в специальные емкости с последующим удалением на пункты захоронения радиоактивных отходов.

Запрещается удаление ЖРО в колодцы, скважины, поглощающие ямы, поля орошения и фильтрации, системы подземного орошения, а также в пруды, озера и водохранилища рыбохозяйственного назначения и водоплавающей птицы.

Сбор твердых РАО должен производиться отдельно от обычного мусора, по определенным их типам, с учетом ряда характеристик (состава, периода полураспада радионуклидов, взрывопожаробезопасности, методов переработки). Однако если удельная активность отходов меньше предусмотренной для НАО (табл. 8.2), то их удаляют с обычным мусором. Аналогично поступают с ТРО, содержащими короткоживущие нуклиды с периодом полураспада, не превышающим 15 сут. В последнем случае отходы с целью снижения активности до приемлемого уровня перед захоронением выдерживают в специальных емкостях.

Вывоз ТРО на обработку и/или захоронение также производится в контейнерах на специально оборудованных автомашинах с крытым кузовом. Мощность дозы излучения на расстоянии 1 м от емкости не должна превышать 0,1 мЗв/ч. Допустимые уровни загрязнения наружной поверхности транспортных контейнеров и его тары β -частицами составляют соответственно 2000 и 200 см²·мин⁻¹. Транспортирование ЖРО осуществляется в цистернах. Автомашины и сменные сборники после каждого рейса необходимо дезактивировать.

Рост масштаба использования ядерной энергии ведет к увеличению перевозок РАО. В 1965-1990 гг. в мире они составили 30 тыс. т облученного урана, в 1950-1990 гг. — до 800 млн т упаковок. Потенциальный риск транспортирования составляет менее 0,1% от величин полного риска, обусловленного производством энергии на основе плутониевого цикла.

8.3.2. Технологическая обработка

Радиоактивные отходы — уникальные материалы, по отношению к которым не существует методов, способных изменить их естественную

радиоактивность, т.е. самопроизвольное превращение неустойчивых атомных ядер в ядра других элементов, сопровождаемое альфа-, бета-, гамма- или протонным излучениями. Единственным способом снижения активности РАО, внутренне присущего им свойства, до безопасного уровня является более или менее длительная их выдержка, ведущая к естественному распаду содержащихся в них радионуклидов.

В свете изложенного обычные понятия, связанные с технологическими приемами обращения с нерадиоактивными отходами, такие, например, как обезвреживание и переработка, не имеют смысла по отношению к РАО. Согласно Н.Ф.Реймерсу, обезвреживание и переработка отходов — это разрушение или связывание их вредных веществ в безвредные соединения при физических, химических, физико-химических или биохимических воздействиях на них. Однако ни разрушения радиоактивных соединений, ни их связывания в безвредные вещества при всех этих способах воздействия не происходит, поскольку они не затрагивают строения ядра элементов, ответственного за их радиоактивность. Можно говорить лишь о технологиях *обработки* РАО, изменяющих ряд их свойств (агрегатное состояние, плотность, концентрацию и др.). Это делает РАО более удобными для хранения и захоронения или даже использования при естественном снижении их радиоактивности до приемлемого уровня. Обычно технологии обработки ставят задачей свести к минимуму объем собственно РАО и запечатать их в материалы, поглощающие поток радиоактивного излучения. Тем не менее в данном учебнике при рассмотрении работ других авторов сохраняется используемая в них терминология.

Начнем рассмотрение технологий обработки радиоактивных отходов с ЖРО, как имеющих наибольший объем накопления. Обычно для очистки слабо- и среднеактивных вод применяют методы, используемые для нерадиоактивных стоков. Однако в ряде случаев очистка жидких РАО от радионуклидов требует специальных решений.

Так, обработка ЖРО первой в мире АЭС (г. Обнинск) осуществляется их выпаркой и ионным обменом с коэффициентом очистки 10^8 . Затем стоки сбрасывают в р. Протва. Там после десятикратного разбавления они имеют активность $2 \cdot 10^{-11}$ Ку/л. По основному радионуклиду (Cs-137), вносимому в ЖРО 90% всей активности, это в 1000 раз меньше его ПДК для открытых водоемов. За 40 лет эксплуатации (1954-1994 гг.) на установке обработано ~ 365 тыс. м^3 отходов. Совершенствование технологии за последние 10 лет этого периода обеспечило сброс радионуклидов при объеме переработки около 6-7 тыс. $\text{м}^3/\text{год}$, равный всего лишь 1 мКу/год. Очищенные стоки используют в системе оборотного водоснабжения для дезактивационных работ, промывки обо-

рудования, приготовления химических реактивов и технологических растворов (Молчанов...).

Проведены первые коммерческие испытания ионообменной очистки ЖРО цеолитами на установке по переработке облученного ядерного топлива вблизи Уэст-Велли (штат Нью-Йорк, США). Отходы ($\sim 2400 \text{ м}^3$) в виде щелочных жидкостей и пульп хранятся в цистернах. Из них предстоит выделить плутоний, цезий и стронций. Оставшиеся низкоосновные отходы предполагается подвергнуть отверждению с последующим захоронением.

В ряде случаев экономически целесообразно использование мобильных установок по переработке ЖРО. Их изготовление начато в середине 80-х годов прошлого века на МосНПО «Радон» (установки ЭКО-1, ЭКО-2, ЭКО-3 с производительностью по очищенным радиоактивным водам $0,5\text{-}1,0 \text{ м}^3/\text{ч}$). Для их доставки на место выполнения работ использовали автомобильный, железнодорожный или водный транспорт. В 1996-2002 гг. с их помощью были освобождены все емкости для временного хранения ЖРО на ФГУП «МП «Звездочка». Установка ЭКО-3 включала фильтрационный, ионоселективный, ионообменный, электродиализный и УФ-облучения блоки. ЭКО-3М дополнительно снабжен блоками обратноосмотической очистки, реагентного умягчения с электроосмотическим концентратором, цементации концентратов в металлических бочках.

Следующее поколение передвижных водоочистных комплексов («Аква-Экспресс») основано на модульном принципе комплектования, в зависимости от состава перерабатываемых отходов. Комплекс также использовался на «Звездочке». В 2002 г. модульные передвижные установки поставлены в ядерные центры Сирии, Ирана, Бангладеш (Переработка...).

К изложенному можно добавить, что в 2000-2001 гг. приняты в эксплуатацию плавучие заводы по переработке ЖРО: «Ландыш» в Дальневосточном регионе и на «Звездочке». Они перерабатывают НАО и САО (с удельной активностью до $3,7 \cdot 10^5 \text{ Бк/л}$) и пока не имеют законченного цикла по отверждению остатка (Тихонов..., 2003).

Следует отметить, что обработка остатков ЖРО представляет весьма сложную проблему, обусловленную длительными сроками естественного распада радиоактивных элементов.

Наиболее простой является технология, в соответствии с которой ЖРО средней и низкой активности после обезвоживания до влажности 20% транспортируют на хранение в виде порошка или прессованных таблеток.

Однако обычно используют технологии отверждения, предусматривающие упаривание ЖРО с последующим их включением в трудно-

растворимые битумные, цементные, остеклованные и другие матрицы. Их, в свою очередь, часто помещают в стальные бочки или контейнеры, отправляемые на хранение. *Битуминирование* применяют к ЖРО средней и низкой активности. Высоко- и среднеактивные ЖРО отверждают в *цементных* и *бетонных* блоках. Отходы высокой активности *остекловывают*.

Битумные блоки содержат 40-50% сухих радиоактивных веществ. Они устойчивы при температурах до 350°C, возгораются при 550°C, их саморазогревание происходит при тепловыделении свыше 3 Вт/м³. При транспортировании или в начальной стадии хранения, если температура превышает 110-120°C, битумная смесь может расслаиваться; она также подвержена бактериальному разложению. При общей поглощенной дозе 10⁷ Гр битум набухает и выделяет взрывоопасные газы.

Новое техническое решение проблемы ликвидации ЖРО средней и низкой активности с использованием органических отвердителей предполагает применение био- и фитосорбентов, в том числе отходов сельского хозяйства (свекловичный жом, солодовые ростки, пшеничные и ржаные отруби), деревообработки (древесные опилки), микробиологических производств (биомасса мицелиальных грибов). Однако опытные испытания данного способа пока не проведены.

Цементно-бетонные блоки, в отличие от битумных, негорючи, их радиационная стойкость выше. Наполнение блоков сухими РАО достигает 40%. Выщелачивание из них радионуклидов уменьшается добавлением жидкого стекла, вермикулита, цеолитов. Известно также использование в качестве отвердителя смеси цемента и волокнистого адсорбента (угля волокнистой структуры с размером пор 10-20 Å). Адсорбент не только дополнительно удерживает радиоактивные вещества, но и повышает прочность блоков. Содержание отходов в матрице может составлять 25-60% (Solidifying...).

Стекланные матрицы дают наибольшее сокращение объема отходов при отверждении. Так, 1 м³ ЖРО в боросиликатном стекле образует лишь 0,2-0,3 м³ твердых отходов, что в 3,7 раза меньше, чем в битумном блоке и в 10 раз — в бетонном. Скорость выщелачивания радионуклидов падает соответственно в 100 и 10000 раз. Кроме боросиликатных и фосфатных стекол, для отверждения используют другие стеклообразные соединения с высокой температурой плавления: синрок, плавленый базальт, пористую керамику, керметы (керамика на основе металлов) и др. Керметы особенно эффективны, так как имеют высокую теплопроводность, большую прочность, пониженную выщелачиваемость, содержат до 70% сухих РАО, что выгодно отличает их

от обычных стеклообразных масс. Включая ЖРО в керметы, можно сократить их объем в 100 раз.

Этот способ используют для отверждения жидких и твердых отходов от переработки ОЯТ АЭС, АПЛ и других реакторов. При эксплуатации АЭС мощностью 1 ГВт в течение года образуется около 25 т ОЯТ. При остекловании этих отходов объем их сокращается до 3-4 м³ (или до 1,0-1,2 тыс. м³ в мире). Однако активность ВАО чрезвычайно велика, что до сих пор исключает использование каких-либо методов их захоронения.

Остеклование жидких ВАО реализовано на ПО «Маяк», где в 1986 г. запущена печь ЭП-500 прямого электрического нагрева. За 10 лет ее эксплуатации переработано более 10,5 тыс. м³ отходов, содержащих 254 млн Ки, получено 2030 т стекла (*Опыт эксплуатации...*).

На Чепецком механическом заводе, являющемся одним из крупнейших комбинатов России по переработке уранового, циркониевого и кальциевого сырья, с 1994 г. обезвреживают промышленные стоки с последующим их *подземным захоронением*. Обезвреживание проводят в три этапа.

Первый этап. В цехах самих производств из стоков доизвлекают нерадиоактивные и радиоактивные цветные металлы. Второй этап. Накопление и усреднение пульп в двух хвостохранилищах (уранового и циркониевого производств). Осадки накапливаются, а декантаты, которые, в соответствии с НРБ-99 и ОСПОРБ-99, относятся к РАО, поступают на переработку. Третий этап. Декантаты нейтрализуют до pH 7,5-8,5 и фильтруют (механических взвесей не более 50 мг/л). Это обеспечивает концентрацию сульфата кальция в фильтрате, подаваемом в подземные пласты через нагнетательные скважины, ниже предела его растворимости в пластовых водах, исключает быструю кольматацию фильтрующих пород. Засоленность нагнетаемых стоков в 10-20 раз ниже, чем подземных потоков. Не увеличивается также радиоактивность последних.

Пластовое хранилище расположено на глубине 1400-1600 м, сложено трещиноватыми карбонатными породами, в основном известняками и доломитами. К 2003 г. в нем размещено около 3,5 млн м³ стоков. Результаты контроля через наблюдательные скважины показывают, что фронт распространения стоков в пласте не превышает 600 м, т.е. не выходит за границы 2000-метрового горного отвода.

Осадки хвостохранилищ относятся к твердым НАО. После заполнения хвостохранилищ осадки предполагается изолировать от окружающей среды по специальной технологии (*Обезвреживание...*).

Проблема обращения с твердыми отходами, в частности с отработанным топливом ядерных реакторов АЭС, АПЛ, атомно-ледокольного флота и др., чрезвычайно сложна. К настоящему време-

ни в мире уже накоплено около 250 тыс. т ОЯТ и ежегодно добавляется еще 10-12 тыс, в том числе ~800 т в России. Применительно к ним центральной является их регенерация.

Услуги по переработке ОЯТ оказывают всего три компании: французская SOG EМА, британская BNFL и ПО «Маяк». Рынок делят, по существу, первые две, так как «Маяк» принимает в основном ОЯТ АПЛ и топливо реакторов ВВЭР-400 ИБН. Емкость рынка превышает 200 млрд дол (Ввоз...).

Регенерация ядерного горючего включает ряд радиохимических и химико-металлургических процессов, имеющих целью извлечение невыгоревшего первичного (уран) и накопление вторичного (Pu) горючего, а также других ценных элементов (нептуний, америций) для дальнейшего использования.

Схема регенерации на одном из американских заводов выглядит следующим образом. ОЯТ из бассейна-хранилища передают на начальные участки обработки, где твэлы специальными механическими ножницами режут на куски длиной в несколько сантиметров. Затем урановую топливную матрицу переводят в раствор азотной кислоты, содержащий соли ртути, при этом оболочка из циркония в виде нерастворимого осадка переходит в отходы.

Для извлечения из раствора урана и плутония применяют трехступенчатую экстракцию. На первой из них экстрагентом служит трибутилфосфат (ТБФ). Здесь удаляется ~99% высокоактивных продуктов радиоактивного распада, в частности урана в виде $UO_2(NO_3)_2 \cdot TBF$. На двух следующих ступенях в качестве экстрагента используют гексон, разлагая соли урана и плутония до их оксидов. Степень обогащения ОЯТ по U-235 достигает 50-93%. Извлеченные делящиеся материалы могут быть повторно использованы при изготовлении твэлов, при этом UO_2 и PuO_2 разделяют химическими способами.

Высокоактивные отходы регенерации топлива АЭС в качестве основных содержат трансурановые элементы в виде радионуклидов Am-241; Pu-238, -239, -240; Np-237; Cm-243, -244. Многие из них относятся к разряду «вечных» с периодом полураспада до миллионов лет (табл. 8.1). Эти радионуклиды удаляют, что делает отходы значительно менее опасными и уменьшает их объем. Количество ВАО составляет ~25-30% от первоначального объема ОЯТ, образуются также значительные массы низко- и среднеактивных отходов. Твердые и жидкие РАО переработанного ОЯТ перед будущим захоронением в федеральном хранилище отверждают.

На заводе имеется единственная в мире установка для улавливания криптона и ксенона из газообразных отходов, выделяющихся из аппа-

ратов-растворителей. Она работает эпизодически по мере возникновения спроса на эти элементы (Батырев...).

К 1994 г. общий объем переработки ОЯТ АЭС в мире составил 47,3 тыс. т при годовой мощности заводов около 56 тыс. т.

Другой известный способ обработки ОЯТ предусматривает его окисление. Однако в окисленном состоянии оно интенсивно выделяет тепло (до 25 МВт/м³), гелий и кислород, что приводит к необходимости длительного хранения отходов перед захоронением.

Большинство стран приняло решение после выгрузки из реакторов выдерживать ОЯТ 30-50 лет в специальных наземных хранилищах. За это время активность и тепловыделение отработанного топлива снижаются в 25-30 раз по сравнению с топливом годовой выдержки. Лишь затем должно следовать окончательное захоронение. Его сроки пока не наступили для ОЯТ ни одной АЭС.

Применительно к АПЛ считают, что на ближайшее время единственно реальна концепция утилизации, предусматривающая вырезку РО без предварительной выгрузки радиоактивного оборудования ЯЭУ, герметизацию и выдержку реакторного отсека в течение 70-100 лет в защищенных от атмосферных осадков бетонированных ямах. Полагают, что после этого срока РО могут быть разрезаны без больших разовых затрат и, как правило, без специального оборудования. Так, например, за 70 лет мощность источника активационного γ -излучения уменьшается в среднем в 1000 раз.

Перспективными технологиями разделки реакторных отсеков, корпусов АПЛ, ускорителей, других видов оборудования и негабаритных изделий с высокой и средней наведенной активностью являются механическое и гидрорезание, электрохимическая, лазерная, химико-механическая (с использованием жидких взрывчатых веществ) резка. Для компактирования загрязненных радиоактивностью металлов наиболее подходит их переплавка в индукционной печи со специальной очисткой отходящих газов. Компактные слитки металлов наиболее приемлемы для хранения. Шлак плавки подлежит захоронению.

Переплав загрязненного радиоактивностью металла может быть выполнен с получением металлогранул диаметром 2-8 мм с активностью на уровне 5-10% от исходной шихты. Их используют для изготовления гранульно-бетонных контейнеров. Производство последних налажено в Германии и других странах. Они применяются для хранения и транспортировки радиоактивных и других опасных отходов (Вертман).

Для радиоактивных отходов, содержащих легко воспламеняемые металлы, например цинк, компактирование переплавом опасно. Такие отходы предлагается загружать в контейнеры и подавать в них инерт-

ные газы (азот, аргон). Закрытые контейнеры прессуют, и металл оказывается в безопасной нейтральной атмосфере (Jack...).

Наряду с крупномасштабными отходами типа ОЯТ, корпусами реакторов ЯЭУ, АПЛ и т.п. обработке подлежит ряд других типов РАО, некоторые из которых рассмотрены далее.

Для локализации отходов щелочных (Na, K, Cs) металлов с наведенной активностью, использовавшихся в качестве расплавленных теплоносителей, предложены шлакощелочные цементы (ШЩЩ) на основе гранулированных металлургических шлаков, а также керамика на базе глин, песка, цеолитов, трехкальциевого алюмината. Для упрочнения на ШЩЩ пригодны методы пропарки, автоклавной обработки, сушки. Для отверждения в керамике эффективна теплообработка при 400-1000°C. Щелочные металлы отходов, иммобилизованные вяжущими и керамикой, резко снижают скорости выщелачивания, г·м⁻²·сут⁻¹: в керамике — до 10⁻⁶-10⁻⁸; в щелочных вяжущих — до 10⁻⁵-10⁻⁶ (для сравнения, скорость выщелачивания в портландцементной матрице — 10⁻¹-10⁻³, в битумной — 10⁻⁴-10⁻⁶) (Экологически...).

Известны также положительные результаты применения ШЩЩ для локализации РАО с большим содержанием нитрата натрия, золы древесины из района Чернобыльской АЭС, илов открытых хранилищ РАО.

Несортированные радиоактивные ТБО переплавляют при 1400°C в единственной в России плазменной шахтной печи МосНПО «Радон». В шлак переходит до 98-99% радионуклидов, его объем в ~100 раз меньше, чем исходного материала. Шлак можно захоронять без дополнительной локализации радиоактивных элементов. Скорость их выщелачивания из шлака незначительна и для наиболее подвижного радионуклида (Cs-137) через 28 сут локализации не превышает 10⁻⁵ г·см⁻²·сут⁻¹, что соответствует требованиям МАГАТЭ. Удельная активность шлака по различным элементам невелика (2·10⁴-3·10⁶ Бк/кг), что позволяет отнести его к числу низкоактивных РАО (Характеристика...). Техничко-экономические показатели переплава, система и эффективность газоочистки приведены в специальной публикации (*Переработка ...*).

Для ТРО, включающих хлорсодержащие полимерные материалы и биологические объекты, МосНПО «Радон» предложило оригинальный способ сжигания с использованием экзотермической смеси и отходов, при этом верхний и нижний слои обязательно должны быть представлены этой смесью. Последнюю помещают в емкость так, чтобы между слоями и ее стенками оставался зазор, также заполняемый смесью. Поджог «пирога» осуществляют, начиная с верхнего слоя (Способ...).

Ионообменные смолы, зараженные радионуклидами, а также литий- и борсодержащие вещества предлагается смешивать с глиной и

водой, полученный материал высушивать, а затем обжигать в проходной печи при 500-1200°C. Соединения бора и лития образуют при обжиге жидкую фазу, которая при охлаждении обращается в стекловидную массу. Она связывает радионуклиды и предотвращает их вымывание при последующем хранении продукта. Последний рекомендуется заливать битумом или серой (Hollwedel...).

МосНПО «Радон» предложило способ совместного цементирования радиоактивных грунтов, содержащих органические компоненты, и ЖРО. Технология предусматривает нагревание грунта до 500-800°C, размалывание полученного продукта до удельной поверхности 1000 см²/г, смешивание его с 10% и более цемента. К полученной смеси добавляют 25-30% ЖРО и выдерживают до образования цементного камня (Соболев...).

Наряду с твердыми и жидкими иммобилизации подлежат газообразные отходы с тритием и криптоном. Тритий связывается в блоках из материала типа бетона или цеолитовых сорбентов с тритиевой водой, а также из органических полимеров. В бетонах и цеолитах он более подвижен, однако при отсутствии грунтовых вод эти блоки можно хранить необходимое время. Криптон-85 связывают в трех вариантах: в псевдотвердой форме под давлением 200 атм в коррозионностойких баллонах; имплантированным в медную матрицу; в соединениях включения (клатратах), в которых атомы криптона удерживаются в микроскопических порах за счет сил межмолекулярного взаимодействия.

Степень переработки РАО, особенно наиболее активных материалов, в частности ОЯТ, в целом невелика. По сути, необходимо создание специальной отрасли для обращения с отработанными твэлами, так как в России утилизируют только 30% ОЯТ АЭС и корабельных ядерных установок. Единственный завод ПО «Маяк» (Челябинск-40) предназначен лишь для переработки топливных сборок АЭС с реакторами ВВЭР и БН, транспортных судовых установок и исследовательских ядерных реакторов (порядка 3000 т/год). Обработывается также часть ЖРО низкой и средней активности — на Сибирском химическом комбинате (СХК) под Томском и на горно-химическом комбинате (ГХК) под Красноярском.

В настоящее время нет полного комплекта установок по обработке РАО и на АЭС России. Битуминирование ЖРО используют на двух станциях, их глубокое упаривание — на трех. Твердые отходы прессуют на трех и сжигают на двух АЭС. На остальных станциях они хранятся без переработки. В целом на предприятиях атомной энергетики утилизируют 22,4% САО и НАО, передают другим предприятиям 31,2%, отправляют в специальные хранилища 46,4%.

Помимо названных, имеются региональные хранилища НПО «Радон» под Сергиевым Посадом (Московская область) и г. Сосновый Бор (Ленинградская область). В первый поступают РАО из центральных районов России. В год оно принимает более 3 тыс. м³ твердых и 300 м³ жидких отходов с суммарной активностью 100-200 тыс. Ки. Объемные отходы здесь прессуют, горючие — сжигают. Зола и ЖРО включают в твердую матрицу — цементную, битумную, стекло. Блоки хранят в гидроизолированных приповерхностных саркофагах. Обращение с РАО под Сосновым Бором предусматривает их сбор, накопление и транспортировку от мест образования в Санкт-Петербурге и Северо-Западном регионе, переработку и кондиционирование. Размещение обработанных РАО на временное хранение (50-70 лет) осуществляется в наземных хранилищах, в которых в начале нашего века уже было размещено свыше 60 тыс. м³ НАО и САО (Якушев).

8.3.3. Хранение и захоронение

Термины «хранение» и «захоронение» применяются здесь в том же смысле, что и ранее (разд. 7.1). Хранить — это значит иметь возможность в случае необходимости переместить РАО, изменить их форму, упаковку, модернизировать метод и место хранения. Хранение является временной мерой обращения с отходами, после которой должны следовать их переработка и/или захоронение. Захоронить — означает навечно поместить РАО в специальные пункты (могильники), находясь в которых они выводятся из сферы человеческой деятельности и биологических процессов на времена геологического масштаба, значительно более длительные, чем жизнь многих поколений людей. После захоронения вмешаться в судьбу отходов ныне доступными средствами уже невозможно. Таким образом, захоронение — это финишная операция, один из кардинальных способов решения проблемы РАО. Оно позволяет изолировать любые виды отходов, в том числе, в перспективе, наиболее опасные (высокоактивные с фантастически продолжительными периодами полураспада).

Как уже отмечалось, в настоящее время в России накоплено ~600 млн м³ РАО с активностью около 1,5 млрд Ки. Кроме того, на предприятиях Минатома и других ведомств России хранится около 8,5 тыс. т ОЯТ с активностью около 4,5 млрд Ки. Основная цель хранения отходов, особенно высокоактивных, — в контролируемых условиях снижение их радиоактивности и тепловыделения до уровня, обеспечивающего безопасное транспортирование и предсказуемое некатастрофическое поведение при окончательном захоронении. Другие причины —

недостаток мощностей для обработки РАО, отсутствие необходимых технологий, не полностью решенная проблема надежного захоронения.

Для хранения жидких отходов используют емкости из нержавеющей стали (для ВАО и САО), специальные водоемы, пульпо- и подземные хранилища (для САО, НАО).

Высокоактивные твердые отходы чаще всего помещают в наземные или слабозаглубленные металлические и железобетонные емкости (рис. 8.1), а отходы средней и низкой активности — в хранилища траншейного типа (см. далее) или подземные камеры.

Отработанные твэлы должны находиться под водой, непосредственно вблизи реакторов. Таким образом хранят основное (99%) количество ОЯТ, лишь около 1% его размещено в сухих хранилищах. В бассейнах твэлы с ОЯТ располагают на специальных стойках или стеллажах. Эти стальные или алюминиевые конструкции фиксируют сборки, исключая возможность сдвига ядерного топлива и образования критической массы, в том числе при сейсмическом воздействии на хранилище. Минимальная толщина защитного слоя воды составляет ~3 м, но обычно она достигает 8 м, что эквивалентно 3,4 м бетона. Такая технология хранения обусловлена тем, что твэлы из реактора вынимают разогретыми до 700-800°C.

Поскольку в нашей стране полный комплект оборудования по подготовке ТРО к хранению и захоронению отсутствует, то хранятся они, как правило, без сортировки на группы по виду, материалам и способам обработки. Поэтому большинство хранилищ переполнено, хотя степень их использования зачастую не превышает 50-60%.

РАО при хранении представляют потенциальную экологическую опасность. Ее степень зависит от герметичности, прочности, долговечности тех техногенных барьеров, которыми они отделяются от окружающей среды.

Распределение ядерных отходов России (без ОЯТ) по источникам образования и месту хранения дано в табл. 8.5 и 8.6. Поясним их.

В России имеется единственное разработанное месторождение урана — Краснокаменский рудник в Забайкалье. Переработку руды осуществляет Приаргунский ГХК.

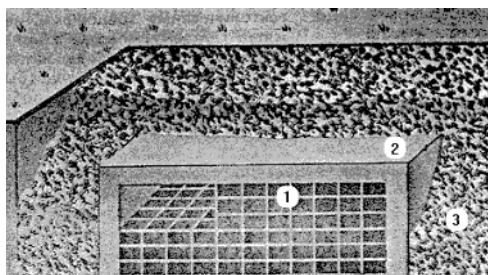


Рис. 8.1. Схема приповерхностного хранилища РАО

1 — контейнеры с отходами; 2 — облицовка ямы (бетон и т.д.); 3 — засыпка (глины, цеолиты и пр.)

На АЭС обращение с РАО заключается в хранении твердых, отвержденных и концентрированных (упаренных) их видов на площадках станций. Это можно допускать только как временную меру, поскольку, например, токсичность ВАО превышает аналогичный показатель сильнейших химических ядов более чем в 2000 раз. Еще значительнее опасность РАО, образующихся при переработке ядерных оружейных материалов на предприятиях Минатома России. Активность их составляет $14,8 \cdot 10^8$ Ку, т.е. превышает ее в РАО электростанций ($4,4 \cdot 10^4$ Ку) более чем в 30 тыс. раз (табл. 8.5). В настоящее время отходы от производства оружейных ядерных материалов хранятся на территории предприятий.

Основной источник радионуклидов — ОЯТ. Их активность (табл. 8.6) втрое превышает ее во всех других типах РАО (табл. 8.5). При этом активность ОЯТ реакторов РБМК составляет $3,0 \cdot 10^9$ Ку или 2/3 содержащейся на АЭС. Однако именно это ОЯТ не перерабатывается и хранится в контейнерах на открытых площадках трех станций, где скопилось более 45 тыс. тепловыделяющих сборок. Отработавшее топливо АЭС с реакторами ВВЭР (частично) и БН, транспортных энергетических установок и исследовательских реакторов отправляется на обработку и последующее хранение в ПО «Маяк» или поступает для промежуточного хранения на ГХК под Красноярском.

Непосредственную угрозу экологической безопасности страны создает ситуация с хранением радиоактивных материалов на ВМФ и гражданском морском флоте. Хотя общая активность ОЯТ ($3,2 \cdot 10^7$ Ку), жидких ($6,8 \cdot 10^2$ Ку) и твердых ($2,0 \cdot 10^4$ Ку) РАО в данном случае многократно ниже, чем на АЭС и предприятиях Минатома России, положение чрезвычайно опасно, так как эти материалы размещены в переполненных штатных и временных береговых хранилищах, в плавучих базах. Более 600 т ОЯТ остаются невыгруженными из реакторов АПЛ, выведенных из состава ВМФ. На Северном и Тихоокеанском флотах скопилось свыше 30 тыс. тепловыделяющих сборок, значительная часть которых — в аварийном состоянии.

Зарубежные концепции временного хранения отходов аналогичны российским. В большинстве случаев временными хранилищами служат слабозаглубленные траншеи и железобетонные бункера в глине, в других аллювиальных отложениях. В них помещают сравнительно большие битумные, бетонные или стеклообразные блоки средней активности. Если основными радионуклидами являются Sr-90, Cs-137, Co-60, то их миграция в блоках за период обезвреживания отходов невелика. Вокруг бункера иногда создают дополнительные барьеры в виде облицовки, засыпки сорбентом, слоем глины толщиной 2-3 м. Известны также хранилища курганного типа (Чемерис).

Таблица 8.5

Характеристики радиоактивных отходов на предприятиях
(Довгуша... 1997. № 4; Поляков)

Источник	Вид	Объ- ем, м ³	Актив- ность, Ки	Место хранения
Добыча и переработка руд	Шламы и отвалы пород	$1,0 \cdot 10^8$	$1,8 \cdot 10^5$	Площадки
Обогащение урана и производство ТВЭЛОВ	Жидкие и твердые	$1,6 \cdot 10^6$	$4,0 \cdot 10^3$	Хвостохранилища, склады и площадки
АЭС	Концентрированные жидкие	$1,5 \cdot 10^5$	$4,2 \cdot 10^4$	Емкости-хранилища на АЭС
	Твердые	$1,2 \cdot 10^5$	$1,0 \cdot 10^3$	Хранилища АЭС
	Отвержденные	$1,6 \cdot 10^4$	$1,0 \cdot 10^3$	Хранилища АЭС
Переработка ТВЭЛОВ, регенерация и производство оружейных ядерных материалов	Жидкие ВАО	$2,5 \cdot 10^4$	$5,7 \cdot 10^8$	Стальные емкости в ПО «Маяк»
	Остеклованные	$9,5 \cdot 10^3$	$2,0 \cdot 10^8$	Спецхранилища в ПО «Маяк»
	Жидкие НАО и САО	$4,0 \cdot 10^8$	$7,0 \cdot 10^8$	Емкости, водоемы и бассейны
	Твердые	$1,0 \cdot 10^8$	$1,2 \cdot 10^7$	Железобетонные приповерхностные хранилища
Эксплуатация атомных подводных лодок	Жидкие	$1,4 \cdot 10^4$	$1,8 \cdot 10^2$	Береговые и плавучие базы
	Твердые	$1,3 \cdot 10^4$	$8 \cdot 10^2$	Бетонные хранилища
ГМФ (ледоколы и контейнеровозы)	Жидкие НАО	$3,9 \cdot 10^2$	0,6	Береговые хранилища
	Твердые ВАО	$1,5 \cdot 10^3$	$2,0 \cdot 10^4$	Береговые хранилища
	Твердые НАО	$1,4 \cdot 10^3$	$2,1 \cdot 10^2$	Береговые хранилища

Строительство и дислокация АПЛ	Жидкие	$2,5 \cdot 10^3$	$5,0 \cdot 10^2$	Береговые и плавучие базы Хранилища на предприятиях
	Твердые	$1,5 \cdot 10^3$	$1,0 \cdot 10^2$	
Применение радионуклидных источников	Жидкие, твердые и отвержденные, капсулированные	$2,0 \cdot 10^5$	$2,0 \cdot 10^6$	На 16 предприятиях «Радона»
Итого:		$6 \cdot 10^8$	$1,5 \cdot 10^9$	

Таблица 8.6

Виды отработанного ядерного топлива на предприятиях (Поляков)

Тепловыделяющая сборка	Масса, т	Активность, Ки	Местонахождение
Реакторов РБМК	6000	$3,0 \cdot 10^9$	Смоленская, Ленинградская, Курская АЭС
Реакторов ВВЭР	1000	$8,0 \cdot 10^8$	Калининская, Балаковская, Кольская, Белоярская, Билибинская и Нововоронежская АЭС
Реакторов ВВЭР-1000	1000	$5,0 \cdot 10^8$	Красноярский горно-химический комбинат
Реакторов ВВЭР-440, БН-350/600, ЕС-150, транспортных ЯЭУ АПЛ	465	$1,1 \cdot 10^8$	ПО «Маяк»
	30	$1,5 \cdot 10^7$	Береговые и плавучие хранилища Плавучие технические базы
Реакторов атомно-ледокольного флота	7,7	$1,7 \cdot 10^7$	
Итого:	~8500	$\sim 4,45 \cdot 10^9$	

Следует отметить, что физические процессы, происходящие при хранении РАО, еще далеко не изучены. Однако можно полагать, что наиболее опасные из них связаны с интенсивным тепловыделением, весьма тяжелые последствия которого показала катастрофа 1957 г. на

Южном Урале, приведшая к появлению восточно-уральского следа (разд. 8.2).

Проблема захоронения радиоактивных веществ также далека от окончательного разрешения. В настоящее время она частично реализована лишь для низко- и среднеактивных РАО.

В России освоено захоронение ЖРО закачкой их под землю — на единственных в мире полигонах под Дмитровградом, Томском и Красноярском. За 40 лет их эксплуатации через скважины на глубины до 1500 м подано 50 млн м³ растворов, или около половины радиоактивности России от жидких САО и НАО. В частности, на опытно-промышленном полигоне Дмитровграда использованы два горизонта среднего и нижнего карбона на глубине 1140-1470 м. Их мощность составляет 84-143 и 33-72 м с объемом нагнетания растворов соответственно 320-960 и 240-340 м³/сут. Первый горизонт находится в работе с 1973 г., второй эксплуатировали с 1966 по 1973 г. Пробы грунтов с глубины 180-1550 м контрольных скважин показали, что дальность распространения нуклидов достигает 1,2-6,0 км. В пласты-коллекторы полигона «Северный» Красноярского ГКХ удалено более 6 млн м³ отходов с суммарной активностью около 400 млн Ки (Кудинов...).

За рубежом накоплен более значительный опыт обоснования, проектирования, модельного и натурного испытаний хранилищ и пунктов захоронения.

Там основополагающим принципом экологической безопасности и надежности изоляции РАО является их удаление из окружающей человека среды в слабопроницаемые подземные геологические формации с использованием естественных и инженерных барьеров. Они обеспечивают сохранность системы изоляции при различных, в том числе маловероятных, ситуациях. При этом геологические формации выполняют долговременные изолирующие функции. Значение инженерных барьеров во времени ограничено.

Подземная изоляция предназначена прежде всего для твердых, а также отвержденных РАО и может проводиться в могильниках различного типа:

в специально создаваемых подземных сооружениях, камерах, других емкостях с малой (до 100 м), средней (до 100-300) и большой (свыше 300-500 м) глубиной заложения;

в буровых скважинах различной глубины;

в специально оборудованных выработках закрытых рудников, шахт, других подземных сооружениях;

в приповерхностных сооружениях слабозаглубленного типа.

В настоящее время наиболее универсальной и типичной конструкцией для подземного захоронения представляется первый тип могиль-

ника, включающий шахтные стволы, транспортные, вентиляционные и другие вспомогательные выработки, необходимые для обслуживания сооружения, рабочие камеры или скважины для размещения отвержденных РАО или ОЯТ. На поверхности такого могильника должны располагаться пункты для приема упаковок, контейнеров, канистр, бочек и других емкостей с отходами, дезактивационные помещения, бытовые комбинаты, санпропускники и пр.

В ряде случаев для изоляции ВАО предпочтительнее буровые скважины различной глубины. Они обеспечивают меньшие затраты и сроки строительства сооружений в сравнении с подземными хранилищами. Контейнеры с отходами размещают по оси скважины. В ее верхней части устанавливают герметизирующую пробку, перекрывающую не только водоносные горизонты, но и толщу пород над отходами в пределах защитной зоны. Пространство между отходами и стенками скважины необходимо заполнять температурно-устойчивой смесью, например бентонитовой глиной или специальным бетоном.

Предлагается также в массивах горных пород на расстоянии 10 м друг от друга бурить скважины диаметром 2-4 и глубиной до 100 м. Скважины обсаживаются внешней (диам. 2,5 м) и внутренней (диам. 2,0 м) стальными обечайками с ребрами жесткости. Затрубное пространство, дно скважины и пространство между обечайками заполняются бетоном. После обсадки скважины производится загрузка внутренней обечайки корзинами с твелями. Далее организуется вентиляция через свободное пространство между корзинами и внутренней обечайкой, а также через центральную тяговую трубу, проходящую через все корзины. Для полной изоляции ОЯТ скважину закрывают сверху колпаком. Предполагаемые сроки хранения ОЯТ — до 300 лет, с возможным замещением в дальнейшем (после извлечения отработанного топлива) САО и НАО на период до 600 лет. По предварительным оценкам, способ может оказаться в 3,5 раза дешевле сухого хранения в приповерхностных железобетонных хранилищах (Кедровский...).

Использование выработанных рудников и шахт диктуется наличием в них уже имеющихся больших объемов свободного пространства, что обещает экономию капитальных затрат. Однако более глубокий анализ показывает, что перестройка рудника или шахты в могильник является весьма сложной технической задачей и влечет капитальные вложения, сопоставимые с затратами на создание специальных сооружений. Они необходимы, например, на гидроизоляцию и разрыв гидравлической связи рудников и шахт с поверхностью, на укрепление массивов пород и т.д. Обследование 200 рудников Урала показало, в частности, что их состояние не соответствует требованиям к могильникам. За рубежом известен только один

пример использования бывших выработок для захоронения НАО и САО (железорудные рудники в Зальцгиттере, ФРГ).

Могильники приповерхностного типа функционируют во всех странах, имеющих РАО, вследствие относительно небольших временных и финансовых затрат на строительство. Обычно их создают открытым способом в отложениях глин на глубине до 50 м, оставляя защитный слой не менее 6 м между дном хранилища и верхним уровнем воды. Сооружения этого типа подразделяют на траншеи, котлованы, колодцы.

Траншеи и котлованы используют для размещения НАО и САО в местах, удаленных от населенных пунктов. Содержание в этих отходах долгоживущих нуклидов либо совсем не допускается, либо разрешается в количествах, не подлежащих контролю. Изоляция материалов достигается инженерными барьерами (упаковочные контейнеры, ограждения, засыпка, глинистые, цементные, битумные экраны и пр.). Они играют основную защитную роль в течение всего периода сохранения радиотоксичности, когда проводится контроль состояния сооружений и окружающей среды.

Обычно новые методы захоронения предусматривают размещение контейнеров с отходами в бетонных сооружениях с защитными подстилающими слоями толщиной до 1,5-2,0 м. На выровненный фундамент хранилища укладывается до пяти таких слоев из природных и искусственных (дробленый до 1,5-3,0 мм полиэтилен) материалов, сооружается дренаж. Габариты траншей, м: ширина — 25; глубина — 8; длина — около 700 (полигон в Селлафилде, Великобритания). Доза радиации на поверхности заполненной траншеи близка к естественной, составляя 0,2 Гр/ч.

Колодцы (коллекторные трубы большого диаметра) для размещения отходов применяют в районах с резкими колебаниями климата, что может ухудшить физико-механические свойства материалов, используемых при строительстве хранилищ.

Решающее значение при выборе места для подземного захоронения и/или долговременного хранения отвержденных и твердых РАО имеет характер пород геологической формации. В соответствии с современными представлениями (разд. 8.4.1) формации должны быть представлены кристаллическими или многолетними мерзлыми горными породами, каменной солью или глинами.

В практическом плане проблема захоронения ТРО находится на начальной стадии реализации. Только Франция и Германия имеют промышленную практику в этом вопросе. Первая размещала β -излучатели в хранилище (объем 300 тыс. м³) приповерхностного типа в глине на мысе Ар, вторая располагала отходы в соляных шах-

тах в Горлебене, Ассе и Морслебене. Во всех случаях захоронялись низко- и среднеактивные материалы.

В шахте Горлебена (объем 7000 м^3) выполнены работы по прокладке над соляным куполом двух стволов на глубину 950 м и тоннеля между ними на глубине 700 м. В эксплуатацию введено также временное централизованное хранилище размером $89 \times 61 \times 5$ м для 35 тыс. барабанов емкостью по 200 л, способное принять на промежуточное размещение 1500 т ОЯТ.

В выработках и камерах шахты Ассе в 1967-1978 гг. размещено ~125 тыс. двухсотлитровых бочек со сцементированными отходами низкой активности. Бочки складировали в штабеля или навалом, пересыпая их дробленой солью. В 1972-1978 гг. с целью отработки технологии захоронения делались попытки размещения в камере 1300 бочек по 200 л со среднеактивными отходами.

Камеру рудника Морслебен (бывшая ГДР) заполняли смесью жидких НАО со шлаком ТЭС, т.е. производили закладку камер твердеющей массой.

Работы в Ассе и Морслебене, носившие опытный характер, в настоящее время прекращены.

Остальные страны пока находятся на стадии исследований, полевых экспериментов и опытных захоронений, отложив окончательное решение проблемы на 2020 г. В частности, сейчас в мире нет ни одного полностью введенного в строй могильника для глубинного захоронения ТРО. Это обусловлено не только сложностью проблемы, но и тем, что при временном хранении РАО на поверхности земли легче контролировать процессы тепловыделения, в частности наступления его спада.

Вместе с тем необходимо отметить проектирование, строительство и пуск в эксплуатацию экспериментального могильник WIPP (waste isolation pilot plant). Могильник расположен в США (штат Нью-Мексико, 30 миль на юго-восток от г. Карлсбад), принят в эксплуатацию в 1999 г. Он предназначен только для захоронения короткоживущих *трансурановых отходов*, образующихся в военном производстве: оружейного плутония, ядерных боеголовок, при демонтаже ядерных боеголовок и очистке площадок ядерных военных центров.

Могильник находится в середине мощного (около 900 м) соляного пласта в возрасте 225 млн лет. Горизонт размещения отходов (650 м) состоит по проекту из восьми секций. Каждая из них включает семь камер размерами $91,5 \times 10 \times 4$ (высота) метров. Хранилище имеет объем 175,5 тыс. м^3 и разделено на две части. В одной (168,5 тыс. м^3) можно разместить отходы с уровнем активности, допускающим выполнение ручных операций, в другой (7 тыс. м^3) — с уровнем, требующим применения технических средств с дистанционным управлением

(Radioactive...). Общая длина тоннелей, соединяющих секции, составляет 7,5 км. Первые заложения включили 50 тыс. стальных контейнеров, содержащих 13 т плутония с активностью 5,1 млн Ки (Larson).

Предполагается, что WIPP будет принимать отходы до 2033 г. К этому времени намечено провести очистку 137 площадок в 33 шахтах с суммарной площадью территории 8500 км² (Ильенко...).

Более обширен зарубежный опыт захоронения жидких и отвержденных отходов, в котором проявляется тенденция их размещения в одном могильнике на значительных глубинах. Для этого используют шахты и штольни, преимущественно в массивах каменной соли. Средне- и низкоактивные материалы складывают навалом или в бочках и канистрах. Высокоактивные РАО опускают в скважины в основании камер и штреков. В некоторых случаях создают дополнительные инженерные барьеры.

Наиболее продолжительный опыт захоронения РАО накоплен в США. Первый из полигонов был открыт на территории Хэндфордского военного комплекса площадью 1450 км², основанного в 1943 г. (р. Колумбия, штат Вашингтон). Сейчас здесь сосредоточено 60% ВАО США. В грунтовых траншеях содержится ~75 тыс. т химически опасных отходов и 90 тыс. Ки радионуклидов. Военные отходы хранят в основном в подземных стальных емкостях государственного резерва. Около 750 млн м³ водных растворов НАО закачано в пруды-испарители, бассейны выдержки, 64 подземные емкости, ямы и траншеи. Предполагалось, что подземные базальтовые слои, на которых размещен комплекс, являются уникальной средой для размещения РАО и опасные радионуклиды достигнут р. Колумбия не ранее чем через 200 лет, в течение которых их активность снизится до приемлемой. Реальность оказалась иной. Захоронение РАО и опасных химических отходов непосредственно в грунт привело к обнаружению загрязнений за пределами комплекса уже в 1956 г. (Довгуша..., 1996).

В настоящее время в США активно разрабатываются технологии глубокого подземного захоронения. На полигоне в штате Невада (разд. 8.4.2) начато экспериментальное хранение ЖРО. Канистры с отходами размещают на глубине 420 м в штреках, являющихся продолжением пройденных для испытательных взрывов выработок. На бывшем ядерном полигоне Юкка-Флетс проводятся эксперименты по хранению ВАО в контейнерах из нержавеющей стали, помещенных в скважину глубиной 420 м (Кривоухатский).

Кардинально, в масштабах всей страны, решается проблема подземного захоронения РАО в Германии. Министерство по делам окружающей среды земли Нижняя Саксония недавно вынесло окончательное решение о предоставлении фирме Конрад под хранение РАО за-

крытых железорудных рудников в Зальгиттере. Они имеют два вертикальных ствола, расположенных на расстоянии 1500 м друг от друга: на Конрад-1, эксплуатировавшемся в 1957-1960 гг., до глубины 1232 м, и на Конрад-2 (1960-1962 гг.) до глубины 999 м. Хранилище организовано на горизонтах 800-1300 м. Оно особенно удобно для размещения крупногабаритных РАО, образующихся при монтаже АЭС, учитывая, что диаметр ствола шахты составляет 7 м. Контейнеры с отходами предполагается укладывать в штабеля в галереях длиной 80 м и более, засыпая их сверху перемолотыми горными породами. Вместимость первой очереди хранилища — 90 тыс. м³, общая — 650 тыс. м³. Уже в первоначальный (до 1991 г.) период использования хранилища в нем были помещены α -излучатели общей активностью $1,5 \cdot 10^{17}$ Бк, β - и γ -излучатели с активностью $5 \cdot 10^{18}$ Бк. По прогнозам, потребность в объемах захоронения к 2080 г. достигнет 400 тыс. м³. Окончательное оборудование складов в соответствии с нормативами последнего времени потребует не менее 4 лет и инвестиций, равных 1,4 млрд марок ФРГ (Stines...).

В Испании организовано централизованное захоронение НАО и САО, поступающих от 7 АЭС. К месту захоронения El Cabrid в Ю.Испании железнодорожным транспортом (расстояние 350-950 км) ежегодно перевозится 9 тыс. бочек емкостью по 220 л. Поступающие бочки укладывают по 18 штук и заливают бетоном, образующиеся кубы массой по 25 т после проверки уровня радиации краном помещают в склад.

В Финляндии уже более 20 лет функционирует подземный могильник объемом 5400 м³ для НАО электростанций, расположенный в скальном грунте на глубине 60-100 м. Отходы в стальных бочках или коробках размещают в емкости-цилиндры диаметром 24 и высотой 34 м. После заполнения емкости ее на подушке из гравия герметизируют цементным раствором. Битуминизированные САО складывают в хранилище объемом 3100 м³, используя стальные бочки.

В Великобритании для размещения могильников РАО и САО выбрана площадка вблизи заводов по переработке ОЯТ в Селлафилде. Эти предприятия дают почти 60% РАО, подлежащих захоронению. Вначале будут сооружены 8 камер в вулканических породах на глубине 700-1000 м, затем начнется оборудование камер для НАО. Хранилище предполагается ввести в действие в 2006 г., законсервировать в 2055 г. Проектная мощность могильника — до 6 млн м³, суммарные затраты на разработку и реализацию проекта составляют 2,5-3,5 млрд ф. ст. (в ценах 1991 г.).

Бельгия строит экспериментальное хранилище в глинах, на глубине 250 м. Оно представляет систему галерей, из которых пробурены

наклонные скважины для спуска канистр. Сами галереи также закладывают упаковками с отходами.

В Швейцарии создано опытное хранилище Гринзель — тоннели в кристаллической породе.

Таким образом, приняв концепцию окончательного глубокого подземного захоронения РАО, разные страны используют для этого различные геологические формации: глины (Бельгия, Италия, Франция, Япония), скальные породы (Аргентина, Великобритания, Индия, Испания, Канада, США, Финляндия, Франция, Швейцария, Швеция, Япония), каменную соль (Испания, Нидерланды, США, Франция, Германия), шахты (Бельгия, США, Германия).

Заканчивая рассмотрение проблемы хранения и захоронения РАО, необходимо отметить наличие в ней двух тенденций, относящихся к способам организации работ, — локальному или централизованному размещению отходов.

Локальная концепция предусматривает хранение-захоронение отходов по месту их возникновения. Это экономит время, средства, снимает проблему безопасной транспортировки. Однако такой подход постепенно приведет к «расползанию» радиоактивных веществ, увеличению числа охранных зон.

Централизованная схема предполагает организацию пунктов захоронения для всей страны или группы стран в немногих наиболее подходящих местах. Такой подход в стратегической перспективе экологически более приемлем, позволяя выбрать наилучшие решения по захоронению отходов на неопределенное время. Однако в этом случае обостряется вопрос о стоимости и безопасности перевозок РАО, о противодействии им значительных групп населения, более обеспокоенных сохранением радиационной безопасности для своего поколения, чем угрозой будущим поколениям спустя многие сотни и тысячи лет.

Можно полагать, что не только современный уровень развития науки и техники не позволяет сделать окончательный выбор. По-видимому, универсального решения проблемы захоронения РАО не существует.

8.4. Стратегические решения по захоронению высокоактивных долгоживущих радионуклидов

Рассмотренные практически используемые решения по обработке, хранению и захоронению относятся в основном к НАО и САО (разд. 8.3.2, 8.3.3). Опыт размещения ВАО незначителен. Однако далее откладывать практические работы по решению проблемы локализации ВАО нельзя, поскольку они содержат подавляющую долю

радионуклидов и во все возрастающих масштабах, часто в необработанном виде, скапливаются на земной поверхности.

Сложившееся положение в значительной степени объясняется чрезвычайно высокой активностью ВАО, обуславливающей интенсивное тепловыделение в течение многих лет после их образования. Однако главная проблема — долгоживучесть многих радионуклидов, периоды полураспада которых составляют от сотен до многих миллионов лет. Именно этим объясняется безмерно высокая цена принимаемых ныне решений, позитивные или негативные последствия которых будут решающим образом сказываться на условиях и самой возможности существования неисчислимых поколений землян.

При дефиците опыта на первый план здесь выходят научная разработка фундаментальных принципов и прогноз последствий захоронения долгоживущих ВАО. В ряде случаев глубина прогноза — миллионы лет, в частности применительно к оружейному плутонию и другим элементам (табл. 8.1).

8.4.1. Общие представления

В настоящее время полагают, что необходимы такие надежное захоронение веществ с долгоживущими радионуклидами и изоляция отходов в течение длительного времени, при которых даже при выбросе радиоактивных материалов инженерное обеспечение места захоронения исключало бы их воздействие на окружающую среду. Это возможно лишь при подземном захоронении долгоживущих активных отходов. Захоронению последних должно предшествовать их контролируемое временное хранение в течение 40-100 лет в приповерхностных хранилищах с целью снижения активности и тепловыделения. Окончательное захоронение ДАО производится в глубоких геологических формациях после начала охлаждения отходов.

Временное хранение и окончательное захоронение ДАО являются основными элементами так называемой многобарьерной концепции защиты окружающей среды от распространения радионуклидов в биосфере. В эту защиту входят:

- иммобилизация отходов с помощью химических соединений, связывающих радионуклиды, и их матрицирование (боросиликатное или алюмосиликатное стекло);

- помещение иммобилизованных РАО в контейнеры и другие емкости с охранным слоем;

- временное хранение отходов в приповерхностных хранилищах;

перемещение ДАО в подземный могильник с защитой контейнера буфером толщиной 2-3 м из затампонированной глины;

гидроизоляция пункта захоронения и отчуждение блока.

Изложенная схема позволяет захоронить ДАО практически навечно, поскольку, по оценкам, утечка любого радионуклида спустя 1000 лет не превысит 10^{-5} их исходного содержания.

Основным барьером на пути миграции радиоактивных веществ должны явиться вмещающие геологические формации, которые при надлежащем выборе их типа и участка гораздо стабильнее, чем любые искусственные барьеры. Такой подход, возможно, позволит в дальнейшем отказаться от последних и ограничиться только мероприятиями, обеспечивающими безопасность транспортирования РАО и обращения с ними лишь в период загрузки пункта захоронения.

Пункту захоронения на поверхности земли необходима санитарно-защитная зона. В ней допускается появление радионуклидов, но за ее границами их активность не должна достигать опасного уровня. В частности, после заполнения и консервации могильника радиоактивность над его поверхностью, с учетом доли других техногенных и естественных загрязнителей и при хроническом облучении человека, не должна превышать 1 мЗв/год (предел риска $1 \cdot 10^{-5} \text{год}^{-1}$). Посторонние для могильника объекты следует удалять на расстояния не меньше трех радиусов зоны захоронения. Под землей СЗЗ представляет собой отчужденный блок горного массива, который необходимо изымать из сферы человеческой деятельности на период распада всех радионуклидов до безопасного уровня.

Сформулировано несколько основных требований к геологической среде могильника:

возможно создание подземных выработок шахтного типа на глубинах свыше 300 м в непроницаемых горных породах, исключаящих движение подземных вод;

не допустимы геологические среды с тектонической нестабильностью, с сейсмической активностью, превышающей 6 баллов по шкале MSK-64;

необходимо удаление места захоронения от очагов вулканической деятельности не менее чем на 500 км;

в геологической формации не должно быть месторождений полезных ископаемых, так как в будущем они могут стать причиной непреднамеренного проникновения людей в могильник;

следует допустить, что за время функционирования хранилища возможно наступление, по крайней мере, одного ледникового периода и ущерба от изменения климата более катастрофического, чем от аварии непосредственно в могильнике.

Многолетние исследования показали, что этим требованиям отвечают три типа геологических формаций: скальные породы магматического и метаморфического типов (гранит, базальт, амфиболиты, габбро, диабазы и др.); каменная соль; отложения глин. Эти материалы широко распространены, имеют необходимую мощность пластов (более 30 м).

Из скальных пород более предпочтительны формы с повышенной основностью (габбро, диабазы, амфиболиты и т.п.). Для них типичны гидротермальные преобразования, обуславливающие замещение первичных минералов вторичными с высокой сорбционной емкостью по радионуклидам и меньшими плотностями. Последнее должно приводить к колюматации пор и трещин, снижению проницаемости горных пород. Аналогичные процессы в гранитоидах протекают с гораздо меньшей интенсивностью и практически не изменяют их проницаемости. Для основных пород последняя минимальна при 200-300°C, что соответствует предполагаемым температурным условиям в могильнике. Перспективность скальных пород значительно возрастает, если они представлены мелкозернистыми формами, залегающими между толщами сланцев. По петрографическим оценкам, данная комбинация относится к вязкопрочным средам с наиболее высокой механической стабильностью. Различные варианты размещения могильников в скальных породах разработаны в ряде стран (США, Швеция, Канада, Швейцария, Финляндия, Франция).

Наиболее перспективны соляные массивы. В них отсутствуют воды (иначе массив не мог бы сформироваться и существовать 200-400 млн лет), почти нет включений жидких или газообразных примесей. Они достаточно прочны (на уровне 15-35 МПа) и пластичны, поэтому при нагрузке более 20 МПа нарушенные структуры в них могут самозалечиваться. Для них характерна высокая теплопроводность, поэтому в соляные массивы можно помещать РАО с более высокой активностью (тепловыделением), чем в другие породы. Наконец, известны многие разнообразные и недорогие способы создания в соли горных выработок и полостей объемом 300-500 тыс. м³ и выше, например геотехнологические методы. К недостаткам соляных залежей относится их незначительная сорбционная емкость.

Кроме того, необходимо учитывать, что в структуре соляного массива всегда содержится до 3% жидких и газожидких включений, заполненных насыщенным водным раствором соли (рассолом) и парами воды. Размер их варьирует от нескольких микрон до нескольких метров. При загрузке контейнеров, температура которых вследствие тепловыделения ВАО превысит 100°C, включения могут мигрировать в направлении источника тепла (к нише с отходами). При этом жидкая их часть принесет соль, количество которой может оказаться достаточ-

ным для активной коррозии контейнера (Амандосов...). Необходимо также учитывать эффект «всплытия» соляного свода (см. далее).

Из двух основных разновидностей соляных массивов предпочтительнее сложенные каменной солью (NaCl). Залежи поташа (KCl) являются более ценным сырьем для народного хозяйства, поэтому их целесообразно использовать после промышленной отработки месторождения.

Пластовые и купольные месторождения каменной соли, пригодные к использованию для захоронения РАО и ОЯТ, имеются в ряде стран (США, Германия, Франция, Испания, Нидерланды, Дания, страны СНГ).

Отложения глин — наиболее распространенные осадочные породы. Их положительными свойствами являются низкая проницаемость, высокие сорбционная емкость по многим нуклидам и пластичность. Ряд стран (США, Великобритания, Франция, Италия, Бельгия и др.) предполагают использовать различные глинистые формации для захоронения ВАО и ОЯТ.

Одно из требований к пунктам захоронения — совместимость конструктивных материалов, особенно наружного слоя упаковки РАО, с породами и грунтовой водой. Необходимо учитывать неодинаковый характер выщелачиваемости блоков из различных материалов (бетон, битум, керамика, стекло), коррозию стальных или других контейнеров. На эти процессы влияют температура, тип вод и породы, другие факторы. Так, при выделении влаги из разогревающихся РАО в соляных камерах, как отмечено выше, будет достаточно интенсивно протекать коррозия металлических контейнеров. В этом случае защитная роль технических барьеров невелика. В скальных породах типа базальта достаточно надежным считают захоронение остеклованных ВАО в многослойных контейнерах из меди или нержавеющей стали с добавками В, Cd, Cu, Ti, Pb. В этом случае при толщине стенки 10 см срок службы медного контейнера оценивается в 1 млн лет, стального — 30-100 лет.

Возможное влияние радиационных эффектов на окружающую среду после захоронения представляется несущественным. Даже наиболее жесткое γ -излучение в основном поглощается в матрице РАО. Лишь небольшая часть проникает в окружающую породу на расстояние ~1 м. Излучение дополнительно ослабляется тем, что на этом же расстоянии развиваются наибольшие термические воздействия, облегчающие залечивание радиационных повреждений. Радиолиз воды с выделением газов также ограничен по расстоянию.

Оптимальная глубина захоронения признается равной 300-1500 м. Его верхняя граница должна проходить ниже горизонта, в котором возможны трещины, связанные с поверхностью, или процессы денудации

(разрушение горных пород). Нижняя граница захоронения диктуется наличием устойчивых массивов и экономической целесообразностью.

Таким образом, пункты захоронения — это геотехнологические системы, к которым предъявляется ряд обязательных требований. Прежде всего горная порода, в которой размещается ВАО, должна иметь низкое содержание вод и высокую водонепроницаемость. Безопасность захоронения в длительный период времени всецело зависит от того, перейдут ли радионуклиды в воду или будут находиться в твердой фазе. В последнем случае коэффициент диффузии радионуклидов в матрице и грунте настолько мал (10^{-19} см²/с), что за миллионы лет они переместятся всего на несколько метров даже при разрушении конструкции и прямом контакте отходов с породой. Коэффициент диффузии веществ в воде больше, чем в твердой фазе, на 2-5 порядков. Таким образом, скорость переноса нуклидов при наличии воды может увеличиться в тысячи раз даже в отсутствие ламинарных и, тем более, конвективных потоков. Наличие последних резко увеличивает вынос радионуклидов из матрицы в горный массив и за его пределы.

Подобрать участок, удовлетворяющий требованиям по водонепроницаемости, сложно. Так, при прохождении Кольской сверхглубокой скважины трещины и воды были обнаружены на глубине более 10 км. Наименее водопроницаемы, как отмечено выше, массивы каменной соли. Однако и они неидеальны. В них присутствуют полости, заполненные рассолом, передвигающимся к источнику тепла (в сторону РАО). Вода, достигнув соляной полости, испаряется с последующей конденсацией на более холодном своде могильника. В результате свод растворяется и постепенно перемещается вверх — «всплывает». Хотя этот процесс идет весьма медленно, оценка показывает, что за время существования пункта захоронения свод может всплыть на десятки метров.

Другой важный фактор, который необходимо учитывать при захоронении, — температурный режим могильника. При захоронении НАО и САО температура стенки полости или скважины не превышает среднюю по массиву более чем на 50°C. В этом случае испарения воды и разложения минералов не происходит. При размещении ВАО мощное тепловыделение приводит к плавлению породы (скальной или соли) с последующим застыванием расплава и фиксированием в нем радионуклидов. При этом из жидких ВАО испаряется вода, т.е. в конечном счете захороняются твердые РАО, но процесс упаривания ЖРО переносится под землю.

В целом вопрос об оптимальном температурном режиме могильника остается дискуссионным. Одни специалисты полагают, что температура на границе контейнер-горная порода не должна превышать 100-110°C, чтобы исключить образование пара и механических напряжений, которые могут

привести к деформации породы и появлению трещин в массиве. Другие считают, что для предотвращения нежелательных последствий достаточно установить размер отчуждаемого блока, равный нескольким сотням метров, и тогда вне его цельность горного массива будет сохранена даже при сильном разогреве в пункте размещения РАО. В любом случае тепловыделение и повышение температуры относительно краткосрочны. По расчетам, максимальный нагрев среды достигается через несколько десятков лет после захоронения, затем температура начинает падать.

Недавнее выдающееся научное открытие позволило укрепить мнение, что захоронение РАО на времена, сопоставимые с геологическими периодами, не нанесет значительного ущерба окружающей среде. В Окло (Габон) выявлен природный ядерный реактор, активная фаза работы которого закончилась 2 млрд лет тому назад. Это позволяет изучить долговременные геохимические последствия нахождения ядерного реактора в геологической среде. Так, поведение продуктов деления и трансурановых элементов природного реактора помогает оценить последствия размещения ОЯТ в породах. Выявлено, в частности, что вулканизм (внедрение долеритов за ~750 млн лет до н.э.) не оказал заметного влияния на распределение элементов. Новые зоны реактора отличаются высокой степенью сохранности. Исследования показали, что наибольшую миграционную подвижность в геологической среде имеют Cr, Sr, Ba, Mo, наименьшую — Nb, Zr, редкоземельные элементы, Th, U, Pu.

В заключение следует отметить, что одно из важнейших требований к подземному могильнику состоит в том, чтобы информация о его местонахождении дошла до людей далекого будущего. Их необходимо предупредить о захоронении такими указателями и уведомляющими надписями, которые будут видны с земли и воздуха, доступны для обнаружения средствами геологической разведки и понятны.

8.4.2. Перспективные инженерные решения

В настоящее время суммарная активность ОЯТ ($\sim 4,45 \cdot 10^9$ Ку), жидких и отвержденных ВАО, образующихся при регенерации и производстве оружейных ядерных материалов ($7,7 \cdot 10^8$ Ку), составляет 87% накопленной в России (табл. 8.5 и 8.6). Аналогично положение и других стран с развитой атомной энергетикой и производством ядерного оружия. Вместе с тем именно эти категории материалов еще не захороняют, ни один могильник твердых ВАО в мире пока не эксплуатируется, хотя они уже проектируются, строятся и известны отдельные попытки захоронения.

Разработанные инженерные решения относятся прежде всего к захоронению ОЯТ — как в виде отходов его регенерации (закрытый цикл использования топлива), так и непереработанного (открытый цикл). Варианты могильников смешанных отходов, т.е. суммы ВАО регенерации и нерегенерированного топлива, приняты в ФРГ и США. Технологии выбора и изучения площадок, подходящих для захоронения, а также размещения и изоляции контейнеров в могильниках, исследуют и в других странах (Канада, Япония, Франция, Великобритания, Швеция, Швейцария, Бельгия и т.д.).

Полагают, что в настоящее время имеются достаточные данные для демонстрации осуществимости эксплуатации могильника ОЯТ. Так, ряд технологий, планируемых для подготовки отработанного топлива к захоронению, проверен на стадии временного хранения ВАО и захоронения НАО и САО. Это, например, практиковавшееся десятилетиями складирование топливных сборок в мокрых и строящихся в последние годы сухих хранилищах. Переупаковка ОЯТ из контейнеров мокрого в контейнеры сухого хранения, освоенная в ряде стран, очень похожа на операцию перемещения ОЯТ из контейнеров временного хранения в контейнеры конечного захоронения. Имеется также широкий мировой опыт транспортирования ОЯТ. Частично опробованы инженерные мероприятия, которые необходимо проводить непосредственно перед захоронением: обеспечение нужного объема и плотности размещения РАО, систем безопасности и надзора, в том числе долговременного контроля за температурой, давлением и активностью в пункте захоронения и отчужденном блоке, за миграцией радионуклидов по горному массиву.

Вместе с тем нужны новые разработки будущих операций в могильниках, оценка всех аспектов их безопасной эксплуатации, определение стоимости таких систем, выявление проблем, нуждающихся в значительной технологической проработке до того, как сооружение будет задействовано, преодоление уже известных трудностей (заливка контейнеров металлическим уплотнителем, применение большегрузных контейнеров, масса которых превышает возможности существующих машин и механизмов).

В наибольшей степени в разработке процессов захоронения ОЯТ продвинулись Германия и США.

В ФРГ эти исследования с 1979 г. проводились применительно к ОЯТ открытого ядерного цикла. В 1985 г. Федеральное правительство объявило, что данная технология будет разрабатываться до степени технической готовности. Существует также проект технологии захоронения отходов регенерации ОЯТ. В связи с этим выполнен концептуальный проект опытного многоцелевого завода, на котором будут разрабатываться и демонстрироваться кондиционирование (разбор-

ка/разрезка) и контейнеризация крупногабаритных и тяжелых упаковок всех типов ДАО, предназначенных для захоронения. Площадка завода находится в солевых массивах Горлебена (Нижняя Саксония), рядом с промежуточным хранилищем (разд. 8.3.3). Лицензия на строительство выдана в 1990 г.

Важную роль при захоронении ОЯТ открытого типа германский проект отводит контейнерной системе «Pollux» (рис. 8.2).

Она предназначена как для долговременного хранения отходов, так и для их окончательной изоляции в отложениях каменной соли. Контейнер «Pollux» имеет двойную упаковку и рассчитан на восприятие внешнего давления в 30 МПа. Первая упаковка рассматривается как контейнер для захоронения и состоит из газонепроницаемого сварного кожуха из стали, обеспечивающего безопасную изоляцию ОЯТ. Вторая упаковка повышает степень механической защиты изделия в це-

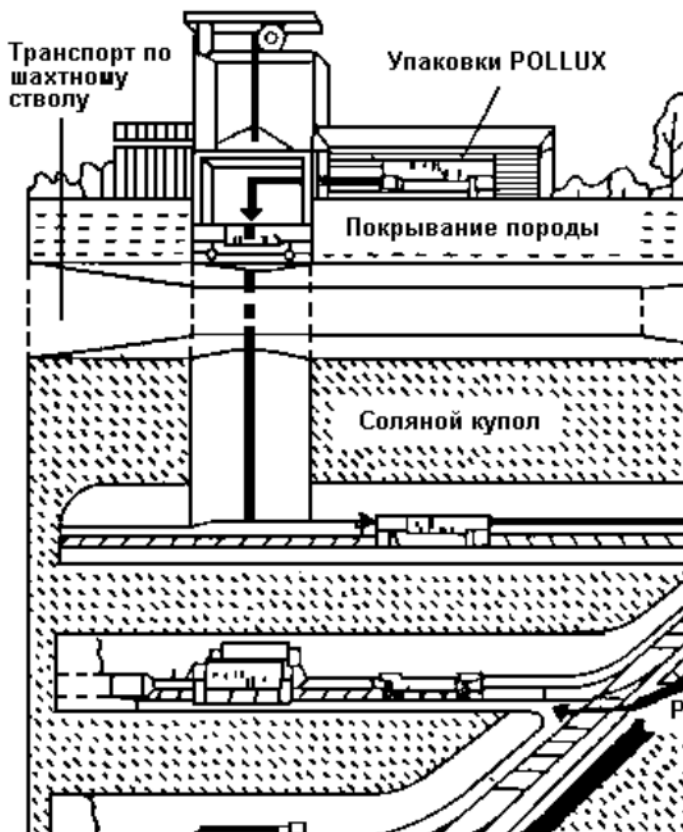


Рис. 8.2. Схема подземного транспорта и размещения упаковок Pollux

лом. Система может быть применена при захоронении через скважины и горные выработки, в зависимости от массы ОЯТ в контейнере.

Контейнеры «Pollux» имеют значительные габариты (диаметр×длина=1,5×6 м) и массу (65 т). Поэтому главной задачей программы немецких исследований и разработок является демонстрация в натуральном масштабе безопасного перемещения в могильнике крупногабаритных и тяжелых контейнеров. Схема их транспортирования выглядит следующим образом. В надшахтном здании могильника контейнеры грузят на самоходную платформу рельсового транспорта, которая клетью горизонтально опускается по стволу шахты ($d = 7$ м) до уровня захоронения на глубине 830-1140 м. Далее она по рельсовым путям перемещается к камере захоронения. Здесь контейнер подъемным механизмом вначале приподнимают, выкатывая из-под него платформу, а затем опускают его на подошву камеры и закрывают эту часть выработки дробленой солью. С течением времени тепловыделение и горное давление деформируют выработку и уплотняют солевую засыпку, которая, по расчетам, через несколько десятков лет достигнет прочности окружающих пород.

Контейнеры с отходами регенерации топлива также будут опускаться в шахту, возможно, перемежаясь с контейнерами «Pollux».

Разработаны также контейнеры более легкого типа ($d = 0,43$ м, масса 1,2 т). Их предполагается размещать в вертикальных скважинах, пробуренных из выработок. Они имеют более высокую дозу излучения на своей внешней поверхности (~ 105 мЗв/ч), чем контейнеры «Pollux» (0,2 мЗв/ч), поэтому их доставка по выработкам будет производиться в специальных транспортных устройствах, надежно защищающих персонал от воздействия радиации.

Демонстрационные опыты по захоронению, помимо транспортирования по стволу, подземного перемещения и укладки отходов, предусматривают также исследования теплового и механического поведения заложной камеры, оптимизации конструкции могильника, других подземных и наземных операций с отходами.

Помимо рассмотренных, в Германии с 1983 г. разрабатывается особая программа захоронения ОЯТ высокотемпературных газоохлаждаемых реакторов HTGR (high temperature gas reactor). Его предполагается осуществлять в вертикальных скважинах, пройденных в соляных пластах (рис. 8.3). В соответствии с предлагаемой схемой сферические твэлы упаковывают в контейнеры емкостью 400 л, заполняя пустоты инертным материалом (песком). Затем упаковки помещают на специальную тележку, которая загрузочной машиной опускается в необсаженные вертикальные скважины глубиной 310 м. Заполненные сква-

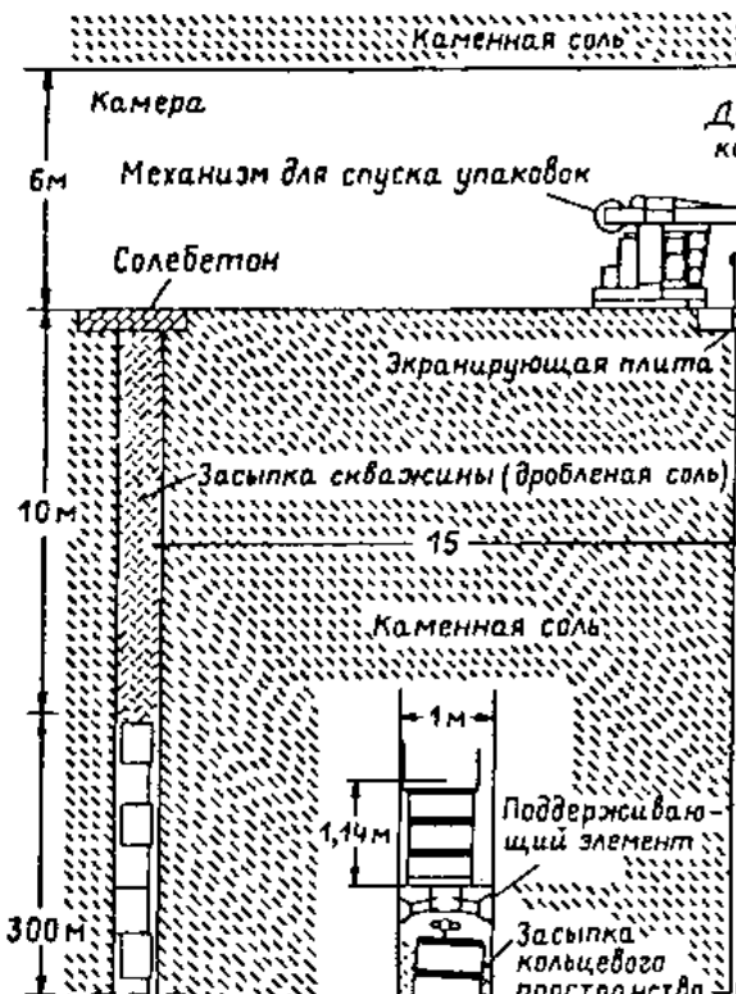


Рис. 8.3. Схема захоронения упаковок с топливом HTGR в необсаженных вертикальных скважинах

жины герметизируют забивкой, в основном из дробленой соли, и закрывают бетонной плитой.

В США первоначально были приняты к исследованию 9 участков возможного расположения пункта глубокого захоронения. Среди них — базальтовый массив в районе Хэндфорда (штат Вашингтон), туфы испытательного ядерного полигона в штате Невада, соляные пласты в

штатах Техас и Юта, соляные купола в штатах Луизиана и Миссисипи. К 1986 г. для дальнейших исследований оставили участки в Юкка Маунтейн (Невада), Хэндфорде и Диар Смит Каунти (Техас). Из них в 1987 г. для строительства первого национального постоянного хранилища был выбран район Юкка Маунтейн. Работы на нем ведутся с 1982 г. Министерством энергетики с санкции Конгресса и президента США. Участок находится в 160 км северо-западнее г. Лас-Вегас и предназначен для захоронения в подземном могильнике преимущественно ОЯТ, а также ограниченного количества отходов регенерации топлива. Могильник проектируется на глубине свыше 230 м от поверхности, уровень подземных вод находится на 200-400 м ниже этого горизонта.

Совокупность природных, сейсмических и тектонических условий, по оценкам многих специалистов, обеспечивает стабильность района Юкка Маунтейн, по крайней мере, в течение ближайших 10 тыс. лет, на которые рассчитывается проект захоронения. Предполагается, что время первого выхода радиоактивных частиц за пределы контрольной зоны наступит не ранее 1000 лет. Полигон и зона отчуждения займут площадь соответственно 100 и 10 тыс. км². Ближняя зона, как прогнозируется, будет, по существу, безводной в ближайшие 300, а возможно, и свыше 1000 лет.

ОЯТ будет поступать на захоронение в виде цельных сборок или контейнеров ($d = 0,7$ м; длина — 4,0-7,5 м) с топливными стержнями. Сборки предполагается размещать цельными или после уплотнения на площадке могильника. Контейнеры смогут вмещать топливные стержни от 7 сборок PWR (pressuring water reactor) или 14 сборок BWR (boiling water reactor), отделенных от арматуры и спрессованных перед загрузкой. Прогнозируемый срок их службы в условиях могильника — 300-1000 лет.

Контейнеры опустят в скважины (вертикальные или горизонтальные), оставляя между ними и вмещающими породами свободное пространство. Предельные тепловые нагрузки на одну упаковку приняты равными 3,3 кВт (PWR) и 2,66 кВт (BWR). Это должно гарантировать температуру разогрева не более 350°C, что исключает разрушение цирконовой оболочки ОЯТ. Начальная тепловая нагрузка в могильнике задана в 12 Вт/м², что обеспечивает размещение 18 тыс. контейнеров на площади 6,2 км².

Могильник проектируют с учетом возможности извлечения размещенных в нем продуктов в любое время в течение 50 лет после начала заполнения. В первые 5 лет масса принимаемых отходов возрастет с 400 до 1800 т/год, а затем стабилизируется на уровне 3000 т ежегодно. Хранилище сможет принимать ОЯТ уже через 5 лет после выгрузки из реактора. Его общее количество или эквивалентная масса

ВАО от регенерации ОЯТ составят ~70 тыс. т. Однако уже к 2000 г. ожидается накопление более 41,6 тыс. т отходов АЭС, объем ВАО оборонных программ после их отверждения может достичь 10 тыс. т. В связи с этим рассматривается возможность строительства второго могильника.

Предполагается, что могильник начнет функционировать в 2010 г. и будет эксплуатироваться 25 лет с последующим его закрытием в течение 4-10 лет.

В последнее время появилась информация о том, что Юкка Маунтейн не пригодна для размещения ВАО и шансы Министерства энергетики США на получение лицензии для строительства хранилища невысоки. Из возможных причин отказа отмечается, в частности, присутствие неустойчивых пород, приходящих в движение уже при ускорении менее $0,02 \text{ м/с}^2$, а также результаты обработки палеогидрологических данных J.S.Srymansky. Этот специалист пришел к заключению, что возможен подъем уровня подземных вод выше хранилища, так как в геологическом прошлом воды фиксировались над пластом спекшихся туфов — кандидата для размещения отходов (*Радиоактивные...*). Однако Конгресс и президент США приняли окончательное решение о депозитарии РАО в штате Невада (Chu).

Стоимость всей системы захоронения отходов США оценивается в 30 млрд дол., из которых к началу 21 в. на Юкка Маунтейн затрачено до 7 млрд (Macilvain).

Интересна программа Швеции по обращению с высокоактивными долгоживущими радионуклидами. Как известно, эта страна в 1980 г. приняла решение о прекращении строительства новых АЭС. Ее ядерная программа завершается в 2010 г., к которому будет накоплено почти 7000 т ОЯТ. Программа предусматривает его промежуточное хранение, последующее кондиционирование и упаковку топливных сборок в коррозионноустойчивые герметичные контейнеры, захоронение последних в глубоком могильнике.

В соответствии с этой схемой после выгрузки из реакторов и хранения на АЭС в течение одного года ОЯТ транспортируют в центральное промежуточное хранилище CLAB, где его должны выдерживать 30-40 лет в подземном водоеме. Окончательное захоронение ОЯТ предусматривается в 2015-2025 гг. Транспортная система и CLAB уже функционируют. В стране применяется морская перевозка ОЯТ от всех АЭС на специально построенном корабле, поскольку атомные предприятия расположены на морском побережье. Промежуточное хранилище построено в Форсмарке в гранитном массиве на глубине 50-100 м ниже уровня моря. Массив поднимается со скоростью 6 мм/год, и при сохранении данной тенденции через 1000 лет возможно попадание радионук-

лидов в воду. В связи с этим содержание трансураниевых долгоживущих элементов в отходах намерены ограничивать.

После промежуточного и перед окончательным захоронением ОЯТ будет перевозиться на специальное предприятие для контейнеризации. Лучшим материалом контейнера признана медь, толщина его стенок принята равной 200 мм, предполагаемая температура на поверхности не должна превышать 100°C. Изучались различные конструкции контейнера. В одном из вариантов он вмещает 8 топливных сборок BWR, залитых свинцом и запаянных электронно-лучевой сваркой. В другом варианте в контейнере находится 9 топливных сборок BWR, засыпанных медным порошком и загерметизированных горячим изостатическим прессованием. При этом медный порошок уплотняется и спекается в твердую матрицу, охватывающую стержни ОЯТ.

Пункт окончательного захоронения предполагается создать на глубине 500-1000 м в массиве кристаллических пород бывшей железорудной шахты в Стриле. Контейнеры намечают опускать по одному в каждую скважину диаметром 1,5 м и длиной 7,5 м, скважины закладывать блоками прессованного бентонита. После заполнения отходами в 2060 г. все выработки и шахтные стволы должны быть загерметизированы смесью песка и бентонита. Срок хранения рассчитан на 10 тыс. лет.

Другой шведский проект предусматривает удаление контейнеров с ОЯТ в скважины большой глубины. К преимуществам варианта относят снижение гидрогеологической активности на больших глубинах, создание пробки большой высоты в верхней части скважины, значительно более протяженные пути миграционных процессов. Данный проект (1991 г.) требует детального обоснования возможного воздействия отходов на окружающую среду, разработки техники и технологии бурения скважин большого диаметра (~1 м) на глубину 4-6 км.

В Канаде способы захоронения ОЯТ начиная с 1978 г. изучаются применительно к районам Онтарио, Саскачеван, Новая Шотландия. Могильник предполагается создать в гранитах Канадского щита. Его емкость определяется из расчета накопления 225 т ОЯТ к 2035 г. Их временное хранение намечается в транспортных контейнерах, которые обеспечивают, как считают, защиту от облучения при нормальных и аварийных условиях. При перевозке к могильникам их крепят к транспортным средствам. После доставки к могильникам отходы из транспортных контейнеров перегружают в контейнеры для захоронения. Последние представляют собой цилиндрические емкости, изготовленные из титана, с внешним диаметром около 630, высотой 2300 и толщиной стенки 4-6 мм. Емкости вмещают стальные барабаны с 72 топливными пучками CANDU. Пустоты между пучками с применением вибра-

ции заполняют стеклянными шариками. Затем крышки контейнеров вдавливают и замазывают клеящим составом, чем достигается полная герметизация емкости.

Проектируемый могильник имеет один горизонт на глубине 1000 м, занимает площадь 2×2 км и состоит из 8 панелей размером ~500×1000 м. Панели будут иметь по 60 камер захоронения длиной 220 м, на 240 контейнеров каждая.

Контейнеры захоронения предусматривается подавать в экранированных транспортных устройствах и опускать в вертикальные скважины (диаметр 1,2 и высота 5 м), расположенные тремя рядами в подошве камер по их длине. Спуск предполагается осуществлять на спрессованную бетонно-песчаную смесь. Свободное пространство над контейнерами заполняется смесью из равных долей бентонита и песка. После заполнения могильника его камеры, выработки и шахтные стволы должны быть герметично заложены.

Рассмотренные выше и другие, например Швейцарии, Финляндии, Франции, Бельгии, Италии, проекты захоронения ОЯТ и отходов его регенерации вышли на такую стадию освоения, когда поступление пробных партий радиоактивных материалов на «вечное захоронение» реально уже в первом десятилетии 21 в.

В России работы по созданию могильников ВАО в геологических формациях планируется начать после 2010 г. (Лапочкин). При сохранении нынешнего уровня атомной энергетики в ядерные могильники России ежегодно будет поступать 9,5 тыс. м³ отходов (6,5 тыс. — твердых, 3 тыс. — жидких).

Ряд специалистов считает, что захоронению ДАО в специально создаваемых пунктах глубокого заложения имеется альтернатива. Они полагают, что изоляция радиоактивных веществ возможна в подземных полостях, возникших при испытаниях ядерного оружия, исследовательских, а также других взрывах, осуществленных в интересах различных отраслей народного хозяйства. Эти полости представляют своеобразные пункты захоронения РАО, причем количество последних, включая долгоживущие α -излучающие радионуклиды, в них гораздо больше, чем предполагается разместить в специализированных хранилищах. И хотя только часть элементов полостей (Pu, Np, трансплутониевые и редкоземельные) «остеклована», включена в застывшую силикатную матрицу, а другая часть (третий, значительные доли Sr-90, Cs-137) находится в подвижной форме, пока нет данных об утечке радионуклидов из зон взрыва и их выходе на поверхность. В развитие этой технологии СССР в 1970-1984 гг. в соляных отложениях осуществил 25 подземных взрывов на глубинах 700-1500 м, приведших к образо-

ванию полостей объемом 30-70 тыс. м³ и более. Практически все они находятся в эксплуатации.

Идея использования ядерных взрывов для захоронения РАО положена в основу предложения Центрального физико-технического института Министерства обороны РФ и федерального ядерного центра «Арзамас-16». Предлагаемое место для захоронения — старые штольни центрального ядерного полигона архипелага Новая Земля. Проект получил официальную поддержку и планомерно разрабатывается. В соответствии с ним на Новой Земле не нужно строить специальный могильник, так как на полигоне для испытаний ядерного оружия (прекращены в 1975 г.) в достаточном количестве на глубине 600-700 м имеются заброшенные штольни. В них предлагается разместить отработанные твэлы АЭС, реакторы АПЛ, отходы ядерных предприятий, различные крупногабаритные загрязненные металлические конструкции и т.п. Пространство между ними намечается заполнить другими материалами, способными резко снизить потоки радиоактивного излучения. Ожидается, что при ядерном взрыве на поверхности штольни будет образовано стекловидное вещество, которое само по себе станет надежным барьером на пути распространения радионуклидов. По мнению разработчиков, проект является наиболее дешевым из известных. Он имеет ряд сторонников. Однако его противники утверждают, что реализация проекта приведет к тотальной экологической катастрофе на Новой Земле и прилегающих обширных территориях.

В последние годы появились проекты захоронения, предусматривающие вывод РАО в Космос — на околоземную или околосолнечную (в поле астероидов) орбиты, а также их удаление из Солнечной системы. Скорость перемещения РАО на околоземную орбиту должна составлять более 8-10 км/с, а в далекие области Солнечной системы — около 20 км/с. В качестве транспортного космического аппарата, в частности для особо опасных РАО, предполагается использовать двухступенчатую ракету-носитель «Энергия». Известен также проект вывода РАО в Космос электронной пушкой.

Размещение РАО в Космосе потребует разработки методов перевода их в твердое состояние и создания специальных контейнеров. Поскольку радиоактивные отходы выделяют тепло, то должен быть предусмотрен его отвод из контейнера. Для предотвращения столкновений с другими небесными предметами последнему необходим также управляющий радиомаяк, устойчиво работающий при повышенных температурах и давлении.

Однако в некоторых публикациях отмечается, что радиоактивные могильники-контейнеры будут засорять околоземное пространство с отрицательными последствиями для человечества. По этой же причине

нельзя засорять дальний Космос, Луну или необитаемые планеты (*Радиоактивные...*).

8.5. За и против атомной энергетики

Проблемы безопасного функционирования атомной энергетики, надежной и долговременной изоляции РАО вызывают большой интерес, особенно после черновобильской трагедии. По этой животрепещущей теме высказываются средства массовой информации, выступают защитники окружающей среды, специалисты. Однако единства в их позициях нет, точки зрения участников дискуссии зачастую исключают друг друга.

Во многих публикациях, призывающих прекратить строительство АЭС и вывести из эксплуатации уже имеющиеся, постулируется невозможность надежного изолирования РАО и подчеркивается, что их потенциальная опасность десятикратно превышает черновобильский выброс.

Неясно, по какому (открытому или закрытому) ядерному циклу пойдет развитие атомной энергетики. В открытом цикле ОЯТ должны захоронять без его регенерации. Это резко увеличит объем отходов, приведет к безвозвратным потерям недогоревшего первичного (уран) топлива, а также вторичного (плутоний), образующегося в реакторах при ядерных превращениях. Закрытый цикл предусматривает захоронение только ВАО регенерации ОЯТ, составляющих ~30% от исходного материала. Регенерированное топливо следует, казалось бы, направлять для получения урана и плутония, которые затем можно использовать для работы АЭС. Однако и этот путь в настоящее время экономически нецелесообразен. Отмечается (А.В.Яблоков), что уран для новых твэлов гораздо выгоднее извлекать непосредственно из руды.

Значительное количество высокообогащенного урана (около 1250 т в России), а также плутония получают при ликвидации ядерных боеголовок. При разбавлении уран можно использовать как топливо для АЭС (Яблоков), но этот путь экономически нецелесообразен. Что касается плутония, то авторитетнейшая «Рэнд корпорэйшн», научно-исследовательский центр ВВС США, считает, например, что в течение ближайших 50-100 лет его применение как топлива неэффективно.

Однако наработанные на АЭС материалы можно использовать в военных целях (Великобритания, Франция, Китай), в том числе для изготовления ядерных бомб. Последнее в 1970 г. показали США.

У ряда других специалистов иное мнение, хотя они согласны с тем, что уровень проработки некоторых вопросов, необходимых для лицензирования могильников ОЯТ или ВАО, недостаточен. Это, например, сроки коррозии контейнеров, поведение герметизированных материалов, перенос радионукли-

дов подземными водами. Не доведены также до уровня промышленной демонстрации различные методы контейнеризации, перемещения и захоронения тяжелых контейнеров в подземных условиях. Вместе с тем отмечается, что уже выполнен ряд оценок безопасного захоронения ОЯТ и ВАО в геологических формациях. Их результаты показывают, что долговременные риски можно снизить до весьма малых уровней. Привлекают неторопливость и высокая мера ответственности, проявляемые многими странами в вопросах обращения с РАО. Некоторые из них (США, Канада, Германия и др.) накопили уже 35-летний опыт в этой области. Однако окончательные решения не форсируются и будут приниматься по конкретным вариантам захоронения не ранее, чем в последующие 5-15 лет. Таким образом, мнение данной группы специалистов сводится к тому, что захоронение РАО — сложная, но разрешимая задача и для ее реализации сейчас нужны даже не столько дополнительные научные исследования, сколько выбор способа, наиболее приемлемого с экономической точки зрения.

Такая же поляризация существует во взглядах на демонтаж атомных электростанций, выработавших ресурс. Нередко утверждается, что решения безопасного демонтажа не найдены и каждая строящаяся АЭС грозит через несколько десятков лет превратиться в неразрешимую проблему. Уже отмечавшийся авторитетный и широко известный специалист, чл.-кор. АН России А.В.Яблоков писал в 1995 г., что никто не знает, как быть с огромным количеством радиоактивных материалов от разборки выведенных из эксплуатации атомных блоков и как вообще их разбирать. Он отмечал, что остановленные соответственно 14 лет и 4 года тому назад два реактора Белоярской АЭС с тех пор лишь потребляют энергию. Аналогичная ситуация на Ново-Воронежской АЭС, где блоки остановили 10 лет и 3 года назад по отношению к 1995 г.

Однако не менее авторитетный специалист в области захоронения РАО проф., докт. хим. наук А.С.Кривохатский еще ранее, в 1989 г., указывал, что демонтаж АЭС хотя пока и не рутинная, но вполне осуществимая операция, а выбор конкретного его варианта определяется в первую очередь лишь экономическими соображениями. Он отмечал, что в рассматриваемый момент в мире прекратили работу и находятся в разных стадиях демонтажа около 40 реакторных блоков. Четыре из них уже полностью обезврежены, доведены до состояния «зеленой лужайки», в одном (Шинон, Франция) разместился атомный музей.

Такая полярность точек зрения на перспективы развития атомной энергетики сказалась и на позиции государств. Одни, подстегнутые черныбыльским опытом, заявили об отказе от программ развития атомной энергетики и закрытии всех АЭС по мере выработки их ресурса (Швеция, Германия). Другие всемерно развивают эту отрасль народного хозяйства, доведя выработку электроэнергии на АЭС до

77% общенациональной; располагают престижные жилые районы, имеющие ряд налоговых льгот, в 200 м от АЭС; широко открывают станции и демонстрируют их безопасность каждому заинтересованному гражданину страны (Франция).

Время многое расставит по своим местам и покажет, какая из этих позиций более верна. Однако и теперь очевидно, что ядерная безопасность страны есть функция ее экономического развития и культуры. В богатых процветающих странах проблемы экологической безопасности в целом и ядерной в частности не только привлекают внимание, но и получают должное финансовое обеспечение. Так, ежегодные затраты на охрану окружающей среды в США составляют около 300 млрд дол. (2,5% ВВП). Этого не могут позволить себе бедные страны. Россия, весь ВВП которой сопоставим с ВВП среднего североамериканского штата, выделяет на природоохранные цели не более 1 млрд дол./год. Такая бедная страна, обладающая ядерным оружием и АЭС, представляет чрезвычайную опасность и для самой себя, и для окружающего мира. В этом плане пример на все времена — трагедия Чернобыля.