



ИНФОРМАЦИОННЫЙ БЮЛЛЕТЕНЬ

№ 10-11(16-17)

2010

СЕРИЯ: АТОМНАЯ ЭНЕРГЕТИКА

РАДИОАКТИВНЫЕ ОТХОДЫ АЭС

Основные принципы обращения с радиоактивными отходами

Радиоактивные отходы – вещества, материалы, изделия, оборудование, объекты биологического происхождения, радиоизотопные источники, загрязненные объекты внешней среды, содержание радионуклидов в которых превышает уровни, установленные нормами радиационной безопасности.

Основное требование любой стратегии обращения с радиоактивными отходами всех категорий – отходы должны обрабатываться, перерабатываться, храниться, транспортироваться и захораниваться таким образом, чтобы на протяжении всего срока их потенциальной опасности негативное воздействие на человека и окружающую среду как в настоящее время, так и в будущем не превышало пределов, установленных соответствующими нормативными документами, в независимости от того, где, когда и в какой форме радиоактивные отходы (РАО) образуются.

Для достижения этой цели обращение с радиоактивными отходами требует системного подхода, который в каждой стране определяется законодательством, отражающим нормы и правила по защите населения и охране окружающей среды, роль и ответственность всех, кто имеет отношение к этой проблеме, и т. д. Техническая политика любого государства должна предусматривать необходимость комплексного решения проблемы обращения с радиоактивными отходами на действующих, проектируемых и строящихся объектах, начиная с момента образования РАО и кончая их надежной изоляцией от биосферы на весь срок сохранения отходами потенциальной опасности.

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

Фундаментальные принципы обеспечения безопасности при обращении с радиоактивными отходами разрабатываются и постоянно совершенствуются путем достижения консенсуса среди стран, участвующих в их разработке и обсуждении. Эти принципы и требования обращения с РАО, принятые на международном уровне, сформулированы в документах международных организаций – МАГАТЭ, Международной комиссии по радиологической защите и др.

Основные положения этих документов заключаются в следующем. При обращении с РАО вне зависимости от их происхождения должны быть обеспечены: *защита здоровья персонала и населения, защита окружающей природной среды, защита будущих поколений, невозложение необоснованного бремени на будущие поколения, обеспечение*

безопасности за пределами национальных границ, обращение с РАО в рамках национальной правовой структуры, контроль генерации радиоактивных отходов, взаимосвязь между генерацией и последующими этапами обращения с РАО, безопасность установок для обращения с РАО на протяжении всего срока их службы и др.

Классификация радиоактивных отходов, образующихся при эксплуатации АЭС

Источником радиоактивных отходов АЭС являются процессы деления ядер топлива и активации нейтронами различных материалов, присутствующих в активной зоне реактора и околореакторном пространстве, – продуктов коррозии конструкционных материалов, примесей теплоносителя и замедлителя, ядер самого топлива, воздуха приреакторных помещений и др. Подавляющая часть радиоактивных веществ, образующихся в процессе работы реактора, сконцентрирована в топливе.

Некоторая, незначительная, часть продуктов деления, выделяющаяся при нормальной работе реактора из топлива в теплоноситель, и часть продуктов нейтронной активации, образующихся вне топливных элементов, в результате выполнения тех или иных технологических операций непрерывно или периодически выводятся в системы обработки и хранения станции и образуют эксплуатационные радиоактивные отходы АЭС.

К радиоактивным отходам АЭС относятся также отходы от снятия АЭС с эксплуатации (демонтажное оборудование, разборка зданий и сооружений и т. д.)

Классификация радиоактивных отходов осуществляется на всех стадиях обращения с РАО: в момент образования, в процессе обработки, при хранении, транспортировке, при определении способа окончательного удаления. В настоящее время нет универсальной системы классификации радиоактивных отходов, хотя попытки создания такой системы предпринимаются.

Существуют разные качественные и количественные системы классификации РАО, разработанные с учетом требований радиационной и экологической безопасности, технологических особенностей обработки, транспортирования, хранения, захоронения. Так, например, *классификация на уровне государственного регулирования* с целью регламентации требований обеспечения безопасности предполагает наличие информации о потенциальной опасности образующихся отходов. Радиоактивные отходы АЭС с точки зрения их потенциальной опасности классифицируются по нескольким параметрам:

по уровням активности и тепловыделения, с определением количественных характеристик, – отходы высокого уровня активности, отходы среднего уровня активности, отходы низкого уровня активности, отходы очень низкого уровня активности;

по периоду полураспада радионуклидов, который определяет время их потенциальной опасности, – очень короткоживущие, короткоживущие, среднеживущие, долгоживущие;

по характеру преобладающего излучения – α -излучатели, β -излучатели, β -, γ -излучатели.

Исходя из этих параметров классификацию отходов от эксплуатации АЭС в общем случае можно представить следующим образом:

высокоактивные долгоживущие отходы, характеризующиеся значительным α -, β -, γ -излучением, высокой радиотоксичностью, сохраняющейся сотни тысяч лет, большим тепловыделением. К этой категории относят отработавшее топливо, если не предполагается его переработка, и высокоактивные отходы, образующиеся в случае его переработки, а также небольшое количество высокоактивных эксплуатационных отходов;

среднеактивные долгоживущие РАО. Для них характерны средние уровни β -, γ -излучения, средние радиотоксичность и тепловыделение, значительное α -излучение. Сюда относятся фильтры, смолы, осадки, части оборудования;

низкоактивные долгоживущие РАО. Характеризуются низкой β -, γ -активностью, незначительными тепловыделением и радиотоксичностью, значительным α -излучением. Это

твердые отходы – сжигаемый мусор, металл, стекло, а также жидкие отходы от дезактивации оборудования;

среднеактивные короткоживущие РАО. Средний уровень β -, γ -излучения, незначительная α -активность. Это концентраты, осадки, реактивы, отказавшее оборудование;

низкоактивные короткоживущие РАО. Низкие α -, β -, γ -активность, радиотоксичность и тепловыделение. К ним относятся общий мусор, отходы от дезактивации оборудования, отслуживший инструмент и т.д.

На эксплуатационном уровне, помимо обязательной классификации РАО по степени их потенциальной опасности, осуществляется дополнительное разделение отходов на потоки внутри каждого класса, которое позволяет не только эффективно использовать существующие технологии обработки и кондиционирования, но и обеспечивает безопасность и требования к качеству конечных форм и упаковок отходов (эти требования определяются требованиями к транспортировке, хранению и захоронению для каждого класса отходов).

Начальная ступень классификации на эксплуатационном уровне – дифференцирование радиоактивных отходов согласно их физическому состоянию на *твердые (ТРО), жидкие (ЖРО) и газообразные (ГРО)*. Такая классификация основана на особенностях технологических процессов при обращении с отходами в разных агрегатных состояниях и часто связана с конкретными технологиями. Жидкие отходы могут быть далее классифицированы как водные и органические, твердые – подразделены на сухие и влажные и др. Даже в такой простой системе классификации необходимо применение количественного подхода, например, для отличия твердых отходов от жидких, влажных твердых от сухих твердых отходов. Жидкими отходами могут быть жидкости, содержащие относительно низкие концентрации твердых веществ (обычно менее одного процента), влажными твердыми отходами могут быть шламы, содержащие, по крайней мере, 10 % твердых веществ.

Для целей обработки отходы должны также подразделяться на категории в зависимости от их приемлемости (или непригодности) к имеющимся методам обработки и кондиционирования. Отнесение отходов АЭС к радиоактивным отходам и их классификация осуществляются в соответствии с критериями, установленными в «Основных санитарных правилах обеспечения радиационной безопасности».

Основные стадии процесса обращения с РАО и их последовательность

Основные стадии процесса обращения с РАО, начиная с момента их образования и до захоронения, схематически представлены в общем виде на рисунке 1 с указанием целей или операций, составляющих эти стадии.

Прохождение РАО через эти стадии зависит от вида отходов, для чего проводится определение их физических, химических и радиационных свойств (*характеризация*). В результате часть отходов может быть освобождена от контроля или направлена на повторное использование; кроме того, отходы разделяются на группы для обеспечения соответствия принятым методам обработки, а также требованиям хранения и захоронения. Данные о характере и свойствах отходов передаются с одной стадии обработки на другую для их регистрации, учета и документирования.

Предварительная обработка является первоначальной стадией обращения с отходами, начинающейся сразу после их образования. Эта стадия чрезвычайно важна: в ходе ее представляется наилучшая возможность для разделения отходов на потоки, предназначенные для освобождения от контроля, для конкретных методов обработки, поверхностного или геологического захоронения. Радиоактивные отходы должны быть собраны, проанализированы и разделены по категориям на месте их образования в соответствии с их физическими, химическими, биологическими и радиологическими свойствами. Эти действия облегчают последующую обработку отходов, повышают ее эффективность, способствуют снижению конечных объемов отходов, требующих хранения и захоронения.



Рисунок 1 – Основные стадии обращения с радиоактивными отходами (МАГАТЭ)

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

Кондиционирование РАО состоит из операций, в процессе которых они переводятся в форму, обладающую химической, термической и радиационной устойчивостью и сохраняющую стабильность в процессе перемещения, перевозки, хранения и захоронения.

Операции перевода отходов в твердую форму посредством их отверждения, включения в какую-либо матрицу или заключение в герметичные оболочки определяются термином *иммобилизация*. Имобилизованные отходы в свою очередь могут упаковываться в различные контейнеры, начиная от обычных 200-литровых стальных бочек до толстостенных контейнеров сложной конструкции.

В настоящее время наиболее распространенными методами иммобилизации являются отверждение ЖРО низкого и среднего уровней активности путем включения их в цемент (*цементирование*) или битум (*битумирование*), а также помещение высокоактивных ЖРО в стеклянную матрицу (*остекловывание*). Стадии обращения *обработка и кондиционирование* зачастую проводятся в тесной взаимосвязи. Между различными стадиями или в рамках нескольких стадий могут происходить *хранение и перевозка* РАО (эти стадии на схеме не указаны).

Хранение осуществляется с учетом классификационной сортировки отходов и возможности их изъятия и передачи на переработку или захоронение. Тип и конструкция инженерного сооружения для хранения РАО должна соответствовать характеристикам отходов и их упаковок. Временное хранение РАО в течение достаточно длительного времени для снижения уровня радиоактивности направлено на упрощение и повышение эффективности последующей обработки отходов.

Безопасное перемещение отходов от мест образования к установкам переработки, местам хранения и захоронения производится с использованием специальных транспортных и грузоподъемных средств.

Захоронение – заключительная стадия обращения с радиоактивными отходами, заключающаяся в локализации отходов без намерения их изъятия в специально оборудованном хранилище-могильнике при соответствующем обеспечении безопасности, долгосрочном наблюдении за хранилищем и техническом обслуживании. Захоронение предусматривает создание многобарьерной системы изоляции, т.е. сооружение вокруг РАО системы естественных и инженерных барьеров, препятствующих выходу радионуклидов в окружающую среду.

Эксплуатационные отходы АЭС и методы их переработки

Все эксплуатационные радиоактивные отходы АЭС с момента их образования претерпевают целый ряд процедур обращения с целью исключения негативного воздействия на человека и окружающую среду на весь срок сохранения отходами потенциальной опасности. При работе АЭС в штатных режимах образуются жидкие, твердые и газообразные радиоактивные отходы.

Газообразные радиоактивные отходы

Газообразные радиоактивные отходы образуются во всех эксплуатационных режимах работы АЭС, включая проектные аварии. К газообразным радиоактивным отходам АЭС относятся газы, аэрозоли, думы и туманы, содержащие в своем составе радионуклиды (инертные радиоактивные газы – аргон, ксенон, криптон, йоды, ^3H , ^{14}C , аэрозольные выбросы изотопов стронция – ^{89}Sr , ^{90}Sr , цезия – ^{134}Cs , ^{137}Cs и др.) в количествах, превышающих уровни, установленные нормами радиационной безопасности.

Наиболее значительную роль в формировании радиационной обстановки в районе размещения АЭС играют инертные радиоактивные газы (ИРГ) и изотопы йода. Реактор типа ВВЭР образует в год при нормальной эксплуатации около 40 кКи газообразных радиоактивных отходов.

Для локализации, сбора и обработки газообразных отходов с целью максимального снижения выхода радиоактивных веществ, содержащихся в газообразных радиоактивных отходах АЭС, в окружающую среду используется очистное оборудование по обращению с газообразными радиоактивными отходами – аппараты, устройства, фильтры, адсорберы, барботеры и др. Это оборудование устанавливается в вытяжных системах спецвентиляции помещений, в воздушную среду которых возможен выход газообразных радиоактивных отходов, а также в технологических линиях, по которым осуществляется контролируемый сброс газообразных радиоактивных отходов при работе оборудования. В результате очистки газообразных радиоактивных отходов в аппаратах, предусматриваемых на АЭС, образуются твердые РАО – фильтроэлементы, сорбенты, элементы вентиляционных систем и др.

Перед выбросом в атмосферу газообразные отходы вначале подвергаются выдержке, в течение которой их активность уменьшается за счет распада короткоживущих нуклидов; охлаждаются в теплообменниках, где отделяется большая часть влаги, содержащей радиоактивные примеси; очищаются в аэрозольных фильтрах; осушаются в цеолитовых фильтрах и освобождаются от радиоактивных примесей в фильтрах-адсорберах, заполненных активированным углем. Эти операции снижают радиоактивность газоаэрозольных выбросов в сотни раз (эффективность очистки – более 99%). В итоге, в выбрасываемом воздухе существенно уменьшаются количества ^{131}I , ^{137}Cs , инертных радиоактивных газов.

Для очистки отходящих газов АЭС с ректорами ВВЭР используется адсорбционный метод очистки, в частности, способ динамической адсорбции радионуклидов криптона и ксенона в колонне, работающей в режиме непрерывного потока. Она обеспечивает очистку более чем в 100 раз, что позволяет поддерживать активность газовых выбросов АЭС значительно ниже норм, установленных санитарными правилами. Для очистки газообразных радиоактивных отходов, содержащих короткоживущие радионуклиды, применяются хроматографические системы, основанные на задержке радионуклидов в угольном адсорбере в течение времени, достаточного для их распада. Для очистки отходящих газов от радиоактивного йода применяют адсорбцию на активированном угле, а также изотопный

обмен и химические реакции на импрегнированных углях. Для улавливания твердых аэрозольных частиц применяют высокоэффективные тонковолокнистые фильтры из синтетических волокон или из стекловолокна.

Процесс выведения газов из помещений АЭС обязательно сопровождается дозиметрическим контролем содержания радионуклидов в удаляемом воздухе, контролем работы систем вентиляции и эффективности фильтров. Очищенный газ выбрасывается в атмосферу через вентиляционную высотную трубу. Выбросы из вентиляционных труб смешиваются с большими объемами воздуха, рассеиваются на очень большой площади, а радионуклиды в значительной степени успевают распасться до встречи с земной поверхностью, заметно не увеличивая при этом радиоактивный фон.

Твердые радиоактивные отходы

Современные технологии обращения с твердыми радиоактивными отходами на АЭС исключают их контакт с внешней средой и влияние на человека, обеспечивая радиационную безопасность окружающей среды и населения. Основную долю общего объема твердых радиоактивных отходов, образующихся при работе АЭС в эксплуатационных режимах (~98%), составляют низкоактивные отходы.

При нормальной работе АЭС выделяются три основных потока эксплуатационных твердых РАО:

изначально твердые РАО (оборудование, трубопроводы, оборудование КИП, демонтированные при ремонтах, реконструкциях, профилактических работах, а также инструмент, технологические приспособления, спецодежда, расходные материалы, фильтры, зольные отходы);

твердые РАО, являющиеся результатом переработки жидких радиоактивных сред;

твердые РАО, являющиеся результатом очистки газообразных радиоактивных отходов.

Целью обработки ТРО является изменение размеров, объема и физико-химических характеристик отходов, что позволяет повысить эффективность иммобилизации и кондиционирования таких отходов для хранения или захоронения. ТРО собирают в специальные контейнеры в местах их образования. Одновременно с загрузкой в контейнеры производится сортировка ТРО по уровню активности.

Для уменьшения объема горючие ТРО сжигают в специальных печах, оборудованных фильтрами, не допускающими выбросов радионуклидов в окружающую среду вместе с дымовыми газами. Коэффициент сокращения объема при сжигании составляет от 50 до 100 для горючих ТРО. Негорючие ТРО подвергают дроблению и прессованию.

После такой переработки ТРО помещают в стальные емкости и заливают цементным раствором. В таком связанном виде твердые радиоактивные отходы поступают в ячейки хранилища ТРО, которое находится в спецкорпусе АЭС. Ячейки хранилища выполняются из железобетона, дно ячеек располагается выше уровня грунтовых вод и имеет гидроизоляцию снаружи строительных конструкций и поддон из нержавеющей стали. Над хранилищем отходов сооружаются кровля и перекрытие, исключающие попадание атмосферных осадков в ячейки для хранения ТРО. Хранилище находится под строгим дозиметрическим контролем.

Высокоактивные отходы капсулируются и хранятся отдельно от низко- и среднеактивных в специально оборудованных ячейках хранилища.

Кроме технологии сжигания ТРО, используется пиротехнический способ (пиролиз / газификация/сжигание пирогазов) при низкотемпературной переработке отходов с коэффициентом компактирования до 90 раз, низким выносом с пирогазами радионуклида ¹³⁷Cs и приемлемыми затратами при малых объемах отходов.

При кондиционировании горючих и негорючих ТРО с переводом радиоактивного материала в стекловидную форму может использоваться плазменная переработка ТРО. При этом существенно сокращается (в 1,5 – 2 раза) объем отходящих дымовых газов и снижается выброс опасных продуктов в окружающую среду. Для обработки теплоизоляционных

материалов эффективен термохимический метод остекловывания в холодном тигле. Термический метод плавления применяется для обработки металлических отходов, преимущества этого метода заключаются в том, что, значительно сокращая объем отходов, он позволяет очищать металл от многих радиоактивных загрязнителей.

На блоках типа ВВЭР-1000, по данным МАГАТЭ, осредненный поток ТРО составляет ~ 285 м³/год, в том числе горючих – до ~ 60%, то есть ~ 170 м³/год.

Согласно проектным данным АЭС-2006, для энергоблоков с реакторными установками ВВЭР-1200 общее количество низко- и среднеактивных твердых РАО, образующихся за год на одном энергоблоке в условиях нормальной эксплуатации, оценивается значением 100 м³, высокоактивных – 0,5 м³.

Жидкие радиоактивные отходы

В связи с особенностями конструкции и управления водо-водяными реакторами (ВВЭР, PWR), на АЭС с такими реакторами образуется большое количество жидких радиоактивных отходов – порядка 30-40 тыс. м³/год, часть которых относится к категории проблемных для обработки, так как имеет сложный химический и изотопный состав.

По удельной активности и радионуклидному составу жидкие радиоактивные отходы делятся на низко-, средне- и высокоактивные.

По физическим и химическим свойствам деление следующее: в зависимости от агрегатного состояния – *на гомогенные и гетерогенные*; по составу – *на органические* (масла, эмульсии масел в воде, растворы детергентов), *неорганические*, в том числе *малосолевые водные растворы* (с концентрацией солей менее 1 г/л), *высокосолевые водные растворы* (с концентрацией солей более 1 г/л). Радиоактивные водные растворы представляют более 99% всех образующихся ЖРО.

Переработка ЖРО направлена на решение двух главных задач: очистки основной массы отходов от радионуклидов и концентрирования последних в минимальном объеме.

Для очистки и переработки жидких отходов на АЭС используют термические, сорбционные, мембранные методы, включающие фильтрацию, соосаждение и коагуляцию осадков и взвесей, ионный обмен, осмос и обратный осмос, электродиализ, упаривание растворов и т.п. Однако не все эти способы еще нашли широкое применение в промышленных масштабах. Поскольку ни один из известных методов в отдельности не обеспечивает эффективной очистки, они обычно применяются комплексно. Поэтому система очистки ЖРО на станции представляет собой последовательную цепочку различных установок.

Термический метод (дистилляция или упаривание) – наиболее распространенный и удобный способ переработки жидких радиоактивных отходов, отличающийся высокой степенью очистки отходов от радиоактивных веществ: Коч = 104-106. Реализуют этот способ, используя специальные выпарные аппараты (перегонные кубы), с подводом тепла водяным паром через стенку аппарата.

Сорбционные методы предполагают удаление радионуклидов из жидких отходов в виде твердой фазы в результате адсорбции, ионного обмена, адгезии, кристаллизации и т. п. Сорбцию проводят также в специальных аппаратах в динамических или в статических условиях на насыпных или намывных фильтрах. На практике в качестве фильтрующих материалов в основном применяют специальные ионообменные смолы.

Из *мембранных* методов для переработки ЖРО наибольший интерес представляют обратный осмос, электродиализ и ультрафильтрация. Эти методы заимствованы из практики опреснения засоленных вод, где основная задача сводится к разделению воды и соли. Такое разделение достигается избирательным прохождением через мембраны ионов (электродиализ) или воды (обратный осмос) под воздействием, соответственно, разности электрических потенциалов или перепада давления. Ультрафильтрация отличается от обратного осмоса использованием мембран с более крупными порами, требующих для фильтрования меньших перепадов давления (обычно до 1 МПа). При этом через мембрану

проходят воды и соли, а коллоиды и крупные органические молекулы размерами от 2 до 10 000 нм задерживаются.

Таким образом, к настоящему времени сложился ряд основных, используемых на практике, технологических приемов, позволяющих оптимально проводить обработку радиоактивных отходов. Стандартные технологии, применяемые для обработки радиоактивных отходов, представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Стандартные технологии, применяемые для обработки радиоактивных отходов

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

Проблема обращения с радиоактивными отходами АЭС оказывает существенное влияние на развитие ядерной отрасли. Эффективная стратегия обращения с радиоактивными отходами АЭС должна предусматривать все компоненты и этапы обработки с момента образования отходов до их окончательного захоронения, учитывать динамичность процессов обращения в соответствии с появлением новых технологий, изменениями требований регулирующего органа, длительностью временных интервалов, разделяющих начальные и конечные стадии процесса обращения, и др.

Для подготовки информационного бюллетеня использованы следующие источники:

1. Технологические и организационные аспекты обращения с радиоактивными отходами // Серия учебных курсов МАГАТЭ. – Вена, МАГАТЭ, 2005.
2. Радиоактивные отходы АЭС и методы обращения с ними / А.А. Ключников [и др.]; под ред. Шигеры Ю.М. – Чернобыль, 2005.
3. <http://www.ecoatominf.ru>
4. <http://www.atomic-energy.ru>

Материал подготовили: Брылева В.А., Кузьмина Н.Д., Нарейко Л.М.

Адреса для контактов:

ГНУ «ОИЭЯИ-Сосны» НАН Беларуси, 220109, Минск, ул. академика А.К. Красина, 99
 тел.: 299-47-61, 299-45-56, факс: 299-43-55, E-mail: <http://www.sosny.bas-net.by>
 E-mail: valentina.bryliova@yandex.by

Для получения данного информационного бюллетеня просим подать заявку в электронном виде с указанием своего электронного адреса

©При перепечатке ссылка обязательна

По заказу Министерства энергетики Республики Беларусь