

УДК 621.039.75

### Утилизация радиоактивных отходов

Салькевич Я. А.

Научный руководитель – ст. преподаватель ПРОНКЕВИЧ Е. В.

В настоящее время с целью предупреждения загрязнения окружающей среды радионуклидами допускается сброс отходов с такой активностью, уровень которой предупреждает возможность поступления в организм человека искусственных радионуклидов в количестве, превышающем предел их годового поступления для отдельных лиц из населения или предел дозы внешнего облучения от присутствия в воздухе радионуклидов аргона, криптона, ксенона и короткоживущих изотопов углерода, азота и кислорода.

К радиоактивным отходам относятся растворы, изделия, материалы, биологические объекты, содержащие радионуклиды в количестве, превышающем величины, установленные действующими санитарными правилами (СПОРО-2005) и не подлежащие дальнейшему использованию. К радиоактивным отходам относятся также отработавшие источники ионизирующих излучений.

Радиоактивные отходы по агрегатному состоянию подразделяются на жидкие, твердые и газообразные.

Газообразные радиоактивные отходы - радиоактивные отходы в виде аэрозолей, инертных газов, паров йода и его соединений.

Жидкие радиоактивные отходы - радиоактивные отходы в виде жидких продуктов (водных или органических) или пульп, содержащие радионуклиды в растворенной форме или в виде взвесей.

Твердые радиоактивные отходы - радиоактивные отходы в виде твердых материалов; отработавшие свой ресурс радионуклидные источники, не предназначенные для дальнейшего применения материалы, изделия, оборудование, биологические объекты, а также отвержденные жидкие радиоактивные отходы, в которых удельная активность радионуклидов превышает минимально значимую удельную активность.

Классификация радиоактивных отходов для обеспечения долгосрочной безопасности при захоронении.

1. Высокоактивные радиоактивные отходы, содержащие радионуклиды с удельной активностью:

- более 1011 Бк/г – для тритийсодержащих РАО;
- более 107 Бк/г – для РАО, содержащих бета-излучающие радионуклиды (за исключением трития);
- более 106 Бк/г – для РАО, содержащих альфа-излучающие радионуклиды (за исключением трансурановых);
- более 105 Бк/г – для РАО, содержащих трансурановые радионуклиды;

2. Среднеактивные радиоактивные отходы, содержащие радионуклиды с удельной активностью:

- от 108 до 1011 Бк/г – для тритийсодержащих РАО;
- от 104 до 107 Бк/г – для РАО, содержащих бета-излучающие радионуклиды (за исключением трития);
- от 103 до 106 Бк/г – для РАО, содержащих альфа-излучающие радионуклиды (за исключением трансурановых);
- от 102 до 105 Бк/г – для РАО, содержащих трансурановые радионуклиды;

3. Низкоактивные долгоживущие радиоактивные отходы, содержащие радионуклиды с периодом полураспада более 31 года и удельной активностью:

- от 107 до 108 Бк/г – для тритийсодержащих РАО;
- от 103 до 104 Бк/г – для РАО, содержащих бета-излучающие радионуклиды (за исключением трития);

- от 102 до 103 Бк/г – для РАО, содержащих альфа-излучающие радионуклиды (за исключением трансурановых);
- от 101 до 102 Бк/г – для радиоактивных отходов, содержащих трансурановые радионуклиды.

К настоящему времени накоплено большое количество различных видов РАО, представляющих потенциальную угрозу для людей и окружающей среды. Сложность состоит еще и в том, что прошло около 50-ти лет с начала промышленного использования ядерной энергетики, и многие объекты, созданные в начале этого периода, уже выведены из эксплуатации или находятся в аварийном состоянии

В деле охраны внешней среды от радиоактивного загрязнения большое значение имеет:

- 1) уменьшение до минимума объема и активности отходов за счет усовершенствования технологии производства
- 2) обезвреживание радиоактивных отходов
- 3) вынесение производств, связанных с выделением радиоактивных веществ за пределы населенных мест и установление санитарной защитной зоны на случай аварии
- 4) дозиметрический санитарный контроль за качеством обезвреживания отходов.

Изучено 14 методов утилизации РАО, представленных ниже

1. Битумирование радиоактивных отходов - отверждение жидких концентрированных или сухих радиоактивных отходов путем смешения их с расплавленным битумом и термического обезвреживания полученной смеси.

2. Цементирование с помощью жидких цементных растворов, приготовленных по специальным рецептам, позволяет обеспечивать иммобилизацию радиоактивных материалов, находящихся в твердом виде, в виде ила и осадков / гелей или активированных материалов.

Как правило, твердые отходы помещаются в контейнеры. Затем в этот контейнер заливается жидкий цементный раствор, где он и схватывается. Далее контейнер с теперь уже монолитным блоком бетона / отходов пригоден для хранения и удаления.

В случае если отходы находятся в виде ила и хлопьев, в контейнер, куда они помещаются, добавляется порошковая цементная смесь. Эти два компонента смешиваются внутри контейнера и оставляются для схватывания бетона, также как и при обращении с отходами в твердом виде.

Этот процесс использовался, например, для отходов среднего уровня активности в небольших бочках из-под нефтепродуктов и в 500-литровых контейнерах, затем его применение было расширено на половину контейнеров ISO (Международная организация по стандартизации] для отходов низкого уровня активности.

3. Изоляция. Вредные вещества концентрируются в контейнерах и защищаются специальными барьерными веществами. Природным аналогом контейнеров могут служить слои водоупоров. Однако, это не слишком надежный способ обезвреживания отходов: при хранении в изолированном объеме опасные вещества сохраняют свои свойства и при нарушении защитного слоя могут вырываться в биосферу, убивая все живое. В природе разрыв таких слоев приводит к выбросам ядовитых газов (вулканическая активность, сопровождающаяся взрывами и выбросами газов, раскаленного пепла, выбросы сероводорода при бурении скважин на газ - конденсат). При хранении опасных веществ в специальных хранилищах также иногда происходит нарушение изолирующих оболочек с катастрофическими последствиями. Печальный пример из техногенной деятельности человека - челябинский выброс радиоактивных отходов в 1957 году из-за разрушения контейнеров хранилищ. Изоляция применяется для временного хранения радиоактивных отходов; в будущем необходимо реализовать принцип многобарьерной защиты при их захоронении, одним из составных элементов этой защиты будет слой изоляции.

4. Рассеяние. Разбавление вредных веществ до уровня, безопасного для биосферы. В природе действует закон всеобщего рассеяния элементов В.И.Вернадского. Как правило, чем меньше кларк, тем опаснее для жизни элемент или его соединения (рений, свинец, кадмий). Чем больше кларк элемента, тем он безопаснее - биосфера к нему "привыкла".

Принцип рассеяния широко используется при сбросе техногенных вредных веществ в реки, озера, моря и океаны, а также в атмосферу - через дымовые трубы. Рассеяние использовать можно, но видимо, только для тех соединений, время жизни которых в природных условиях невелико, и которые не смогут дать вредных продуктов распада. Кроме того, их не должно быть много. Так, например,  $\text{CO}_2$  - вообще говоря, не вредное, а иногда даже полезное соединение. Однако, возрастание концентрации углекислоты во всей атмосфере ведет к парниковому эффекту и тепловому загрязнению. Особенно страшную опасность могут представлять вещества (например, плутоний), получаемые искусственно в больших количествах. Рассеяние до сих пор применяется для удаления отходов малой активности и, исходя из экономической целесообразности, будет еще долго оставаться одним из методов для их обезвреживания. Однако в целом в настоящее время возможности рассеивания в основном исчерпаны и надо искать другие принципы.

5. Геологическое захоронение. На сегодняшний день всеобщее признано (в том числе и МАГАТЭ), что наиболее эффективным и безопасным решением проблемы окончательного захоронения РАО является их захоронение в могильниках на глубине не менее 300-500 м в глубинных геологических формациях с соблюдением принципа многобарьерной защиты и обязательным переводом ЖРО в отвержденное состояние. Опыт проведения подземных ядерных испытаний доказал, что при определенном выборе геологических структур не происходит утечки радионуклидов из подземного пространства в окружающую среду.

Мировая практика подземного размещения РАО и ОЯТ, исследования геохимических и физико-химических свойств различных пород показали, что изоляцию РАО от биоцикла можно обеспечить путем захоронения в геологических формациях трех типов:

- магматические и метаморфические породы;
- глины;
- каменные соли.

Наиболее эффективным решением проблемы иммобилизации РАО в подземных объектах состоит в переводе их в состояние, близкое или аналогичное тому, в котором радиоактивные вещества находились до извлечения из природной среды. В природе радиоактивные элементы всегда окружены кристаллическими структурами, и эти кристаллы на протяжении многих тысяч и даже миллионов лет надёжно удерживают заключённые в них радионуклиды, препятствуют их проникновению в грунтовые воды. Типичный пример таких кристаллов - моноцит, минерал сложного химического состава, содержащий большое количество тория.

Таким принципиальным решением является включение РАО в химически и физически устойчивые соединения с близким к природному уровню радиоактивности и с расположением в пространственно локализованном виде в земной коре, вне прямых контактов с окружающей средой. Оно состоит в использовании природных геологических, гидрохимических, геохимических, гидрогеологических процессов образования физико-химически устойчивых соединений и формирования минеральных геологических тел для связывания РАО в природных условиях в пространственно локализованные геологические комплексы не опасные для биосферы - создание матрицы.

Однако данная технология является слишком дорогостоящей на сегодняшний день. Нехватка энергоресурсов также не позволяет использовать ее в должном объеме, еще одной проблемой является то, что в течение длительных сроков пребывания РАО (с периодом полураспада более 10000 лет) произойдет разрушение матрицы и исчезновение инженерного барьера.

6. Относительно недорогим и весьма эффективным методом утилизации ядерных отходов может стать лазерная трансмутация. Физики из Великобритании и Германии с помощью 360-джоулевого суперлазера VULCAN, сконструированного в Лаборатории им. Резерфорда и Эплтона (Великобритания), превратили  $^{129}\text{I}$  - изотоп йода, имеющий период полураспада 15,7 млн лет, - в  $^{128}\text{I}$ , период полураспада которого 25 минут.

Исследователи, поместив перед образцом,  $^{129}\text{I}$  тонкую золотую мишень, облучали ее импульсами длительностью 0.7 пс. Под действием лазерного луча (Интенсивность в фокусе  $5 \cdot 10^{20}$  Вт /см<sup>2</sup>) мишень испарялась до состояния плазменного облака, причем электроны плазмы приобретали огромные скорости. (Для этого достаточна плотность мощности лазерного излучения на мишени порядка  $10^{28}$  Вт/см, в этом случае за счет огромных значений электрических полей, возникающих в фокусе лазера, энергия электронов плазмы увеличивается по сравнению с массой покоя на три порядка). Поток ускоренных электронов при торможении на ярах золота образовывал вторичные  $\gamma$ - кванты, которые, в свою очередь, выбивали из образца,  $^{129}\text{I}$  нейтроны, превращая часть его ядер в ядра  $^{128}\text{I}$ . Каждый лазерный импульс позволял получить около 3 млн ядер  $^{128}\text{I}$ .

7. Захоронение в космическом пространстве. Проекты утилизации ядерных отходов путем удаления в космическое пространство прорабатывались ранее. В таком методе есть рациональное зерно. Но есть ряд технических, экономических и экологических проблем в осуществлении подобных проектов. В настоящее время получили распространение методы утилизации ядерных отходов в достаточно надежных сооружениях на Земле, обеспечивающих необходимую безопасность при хранении.

8. Более сложным методом нейтрализации высокоактивных РАО является использование материалов типа СИНРОК (synthetic rock — синтетическая порода). СИНРОК был разработан профессором Тедом Рингвудом в Австралийском национальном университете. Изначально СИНРОК разрабатывался для утилизации военных высокоактивных РАО США, однако в будущем возможно его использование для гражданских нужд. СИНРОК состоит из таких минералов, как пирохлор и криптомелан. Первоначальный вариант СИНРОК был разработан для жидких РАО (рафинадов пурекс-процесса) — отходов деятельности реакторов на легкой воде. Главными составляющими этого вещества являются голландит ( $\text{BaAl}_2\text{Ti}_6\text{O}_{16}$ ), цирконолит ( $\text{CaZrTi}_2\text{O}_7$ ) и перовскит ( $\text{CaTiO}_3$ ). Цирконолит и перовскит связывают актиноиды, перовскит нейтрализует стронций и барий, голландит — цезий.

9. Витрификация. Долговременное хранение РАО требует консервации отходов в форме, которая не будет вступать в реакции и разрушаться на протяжении долгого времени. Одним из способов достижения подобного состояния является витрификация (или остеклование).

В настоящее время в Селлафилде (Великобритания) высокоактивные РАО (очищенные продукты первой стадии пурекс- процесса) смешивают с сахаром и затем кальцинируют. Кальцинирование подразумевает прохождение отходов через нагретую вращающуюся трубу и ставит целью испарение воды и деазотирование продуктов деления, чтобы повысить стабильность получаемой стекловидной массы.

В полученное вещество, находящееся в индукционной печи, постоянно добавляют измельченное стекло. В результате получается новая субстанция, в которой при затвердении отходы связываются со стеклянной матрицей. Это вещество в расплавленном состоянии вливается в цилиндры из легированной стали. Охлаждаясь, жидкость затвердевает, превращаясь в стекло, которое является крайне устойчивым к воздействию воды. По данным международного технологического общества, потребуется около миллиона лет, чтобы 10 % такого стекла растворилось в воде.

После заполнения цилиндр заваривают, затем моют. После обследования на предмет внешнего загрязнения стальные цилиндры отправляют в подземные хранилища. Такое состояние отходов остается неизменным в течение многих тысяч лет.

10. Существует технология, при которой голодные бактерии «поедают» все, что им попадет, при этом им все равно, что есть. Но раньше все разработки и следования в этой области были строго засекречены.

Два года назад ученые реанимировали эту технологию «голодной бактерии», поставили биохимическую очистку на Бобровском изоляционном заводе, где были стоки воды, полные фенила, нефтепродуктов и прочих примесей. Результат - стопроцентная очистка. Стоимость такой технологии в сотни раз меньше традиционных методов.

Так же эти «голодные бактерии» использовались для переработки радионуклидов. Заместитель руководителя Департамента госконтроля и перспективного развития в сфере природопользования и охраны окружающей среды Российской Федерации Иван Солобоев сообщил что, первые результаты опыта по новой биохимической технологии очистки зараженных радионуклидами и химией воды дали положительные результаты. Сейчас ученые работают в Снежинске (Челябинская область). На очереди - установка оборудования по очистке жидких радиационных отходов производства.

Пока что эта технология находится в стадии разработки и исследования, но возможно в скором времени она займет главенствующее место в системах утилизации.

11. Еще одним применением изотопам, содержащимся в РАО, является их повторное использование. Уже сейчас цезий-137, стронций-90, технеций-99 и некоторые другие изотопы используются для облучения пищевых продуктов и обеспечивают работу радиоизотопных термоэлектрических генераторов.

12. Трансмутация. Существуют разработки реакторов, потребляющих в качестве топлива РАО, превращая их в менее вредные отходы, в частности, интегральный ядерный реактор на быстрых нейтронах, не производящий трансурановых отходов, а, по сути, потребляющий их. Проект был заморожен правительством США на стадии крупномасштабных испытаний. Другим предложением, более безопасным, однако требующим дополнительных исследований, является переработка подкритическими реакторами трансурановых РАО. Существуют также теоретические исследования, посвященные использованию термоядерных реакторов в качестве «актиноидных печей». В таком комбинированном реакторе быстрые нейтроны термоядерной реакции делят тяжелые элементы (с выработкой энергии) или поглощаются долгоживущими изотопами с образованием короткоживущих. В результате исследований, недавно проведенных Массачусетским технологическим институтом, было обнаружено, что всего 2-3 термоядерных реактора, схожих по параметрам с международным экспериментальным термоядерным реактором ИТЭР, способны преобразовывать количество актиноидов, вырабатываемое всеми ядерными реакторами на легкой воде. Кроме этого, каждый термоядерный реактор будет вырабатывать порядка 1 гигавайт энергии.

13. Сжигание. Технология сжигания (прокаливания) в основном используется для уменьшения объема горючих отходов низкого уровня активности. Это - технология, которая является также предметом беспокойства населения во многих странах, поскольку местных жителей волнует проблема образующихся при сжигании выбросов в атмосферу. Тем не менее, эта технология может использоваться для обработки как жидких, так и твердых отходов - древесины, бумаги, одежды, резины, а также органических отходов. Пока она используется согласно строгим нормам, установленным для выбросов в атмосферу.

Объем РАО при сжигании существенно (до 100 раз) сокращается, а 90% активности остается в золе, поступающей на захоронение. Современные технологии, такие как плазменное сжигание, индукционное плавление, позволяют получать конечный продукт в виде высокоустойчивого плавленного компаунда. Он обеспечивает надежную изоляцию радионуклидов от биосферы в течение многих сотен лет.

14. Уплотнение - зрелая, высокотехнологичная и надежная технология уменьшения объема, которая используется при переработке РАО, главным образом, при обращении с твердыми промышленными отходами низкого уровня активности (LLW). Некоторые страны (Германия, Великобритания и США) также используют эту технологию для уменьшения объема промышленных отходов промежуточного уровня активности ILW/трансурановые (TRU). Диапазон установок для уплотнения может быть достаточно широк: от систем уплотнения с низкой силой давления (~5 тонн или выше) до прессов с силой уплотнения более 1000 тонн, которые называются суперуплотнителями. Коэффициенты уменьшения объема обычно находятся между 3 и 10, в зависимости от обрабатываемых отходов.

Задача обезвреживания радиоактивных отходов является очень сложной, так как никакими доступными физическими, химическими или биологическими методами нельзя повлиять на радиоактивный распад, т. е. приостановить или, наоборот, ускорить его.

Уменьшить радиоактивность вещества и силу его излучения может только время. Поэтому значительно легче обезвреживать отходы, содержащие короткоживущие радиоактивные изотопы, выдерживая их до тех пор, пока активность за счет процесса самораспада не понизится до допустимого уровня.

#### Литература

1. Кузнецов Ю. В., Щebetковский В.Н., Труов А.Г. Основы очистки воды от радиоактивных загрязнений. - М.: Атомиздат, 1974. 366 с.
2. Постановление МЧС №47 с редакцией от 24 июля 2017 г. «Безопасность при обращении с радиоактивными отходами. Общие положения».
3. Правила безопасности при обращении с радиоактивными отходами атомных электростанций. ТКП 565-2015 (33130).
4. Хачатрян В. А., Межлумян Г. О. Обезвреживание радиоактивных отходов методом внутримолекулярной магнитной нейтрализации. – Ереван, 2014