

7. I.C. Noyan and J.B. Cohen. Residual Stress Measurement by Diffraction and Interpretation, Springer-Verlag, New York, 1987.г.– 350 p.
8. Genzel C., Reinmers W. A Study of X-ray Residual-Stress Gradient Analysis in Thin-Layers with Strong Filer Texture // Phys. Stat. Solidi: A-Applied Research. – 1998. Vol.166, №2. - P.751-762
9. D. R. McKenzie, Y. Yin, W. D. McFall, and N. H. Hoang. The orientation dependence of elastic strain energy in cubic crystals and its application to the preferred orientation in titanium nitride thin films // Phys. Condens. Mater. 8, 5883-5890 (1996).

УДК 544.54; 544.546:544.35

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ТЕХНОЛОГИЙ ОЧИСТКИ РАДИОАКТИВНЫХ МАТЕРИАЛОВ

У статті проводиться порівняльний аналіз технологій очищення радіоактивних матеріалів. Показано, що технології, засновані на процесах фізико-хімічної адсорбції, є найбажанішими. Порівняння проводиться згідно з технологічним і економічними критеріями

Ключові слова: очистка радіоактивних матеріалів, радіаційна модифікація

В статье проводится сравнительный анализ технологий очистки радиоактивных материалов. Показано, что технологии, основанные на процессах физико-химической адсорбции, являются наиболее предпочтительными. Сравнение проводится по технологическим и экономическим критериям

Ключевые слова: очистка радиоактивных материалов, радиационная модификация

The article presents a comparative analysis of the cleaning technology of radioactive materials. It is shown that techniques based on the processes of physical and chemical adsorption are most preferred. Comparison is done according to the technological and economic criteria

Key words: cleaning of radioactive materials, radiation modification

А. Б. Бабич

Кандидат физико-математических наук, ученый секретарь*
Контактный тел.:(057) 700-41-11
E-mail: avbabich@yahoo.com

В. Ф. Клепиков

Доктор физико-математических наук, член.-кор. НАН Украины, заведующий кафедрой
Кафедра электрофизики и радиационных технологий
Харьковский национальный университет им. В.Н. Каразина
пл. Свободы, 4, г. Харьков, 61022
Контактный тел.:(057) 704-13-60

В. В. Литвиненко

Доктор технических наук, заместитель директора*
Контактный тел.:(057) 700-41-11

В. Н. Робук

Кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник
Институт электрофизики и радиационных технологий НАН Украины
Объединенный институт ядерных исследований
ул. Жолио-Кюри, 6, г. Дубна, Московская обл., Россия, 141980
Контактный тел.:(057) 700-41-11

В. В. Шатов

научный сотрудник
*Институт электрофизики и радиационных технологий НАН Украины.
ул. Чернышевского, 28, г. Харьков, а/я 8812, 61002
Контактный тел.:(057) 700-41-11

Введение

Ядерная энергетика является одной из важнейших отраслей промышленности в современном мире. В развитых странах ядерный сектор энергетики составляет от 20% до 80% всей вырабатываемой электроэнергии.

Несмотря на спад промышленного производства в Украине за последние 2 десятилетия, в сфере ядерной энергетики Украина остается среди мировых лидеров. Однако ядерная энергетика порождает и ряд серьезных проблем, в первую очередь, экологических, связанных с утилизацией отходов топлива и других

ядерных материалов [1]. Проблема утилизации радиоактивных материалов (РМ) сводится, по сути, к двум задачам: максимально возможная очистка от долгоживущих радиоактивных изотопов и последующее захоронение. Радиоактивные материалы условно делят на 3 категории: низкоактивные, среднеактивные, высокоактивные. В состав последних входит большое число различных тяжелых радиоактивных изотопов, с различными периодами полураспада (в том числе и трансурановых). Последние требуют особого внимания, потому что все трансурановые элементы являются искусственными и поведение в окружающей среде и в организме человека некоторых из них плохо изучено. Выделение тяжелых радиоактивных элементов необходимо не только в целях безопасного захоронения, но также и в связи с возможностью повторного использования ядерного топлива. Связано это с тем, что накопление ряда продуктов деления, называемых «нейтронными ядами», приводит к затуханию цепной реакции. Переработка с целью удаления таких продуктов деления с последующим дообогащением позволяет повторное использование топлива.

Постановка задачи

Существует ряд технологий очистки РМ, основанных на различных физико-химических методах [2]. Актуальной задачей является выбор оптимальной технологии очистки в зависимости от конкретного изотопического и химического состава РМ. Задачей данной статьи является сравнительный анализ наиболее популярных технологий с учетом ряда технологических и экономических критериев

Сравнительный анализ технологий очистки радиоактивных отходов

Задача определения изотопного состава РМ может быть решена различными способами. В первую очередь это спектральный анализ излучения РО. Однако результаты такого анализа нуждаются в дополнительной теоретической проверке. Для такой проверки можно использовать программные технологии, основанные на применении эволюционного алгоритма. Принципиальная возможность динамического контроля компонентного состава радиоактивных образцов обусловлена тем, что зависимость полной активности радиоактивного образца от времени определяется законом радиоактивного распада [3,4,5]. Динамически контролируя полную активность образца и оптимизируя параметры закона радиоактивного распада для совокупности различных изотопов радиоактивных ядер, мы имеем возможность определить количество радиоактивных ядер данного сорта в любой (будущий) момент времени [6].

Сравним эффективность различных технологий очистки радиоактивных отходов: технологии, основанные на применении ионообменных смол; технологии, основанные на электродиализе; технологии, основанные на использовании неорганических сорбентов (НС). Для оценки эффективности методов очистки РМ будем использовать следующие критерии:

1. эффективность очистки;
2. количество переработанных РМ (производительность);
3. степень уменьшения объема отходов при отделении радиоактивного концентрата;
4. стоимость очищенных РМ;
5. степень необратимости фиксации (сорбции) поглощенных радиоактивных изотопов в конечном концентрате (на отработанном сорбенте), что является гарантией последующего безопасного захоронения;
6. радиационная, термическая и химическая стойкость материала конечного концентрата, предназначенного для захоронения;
7. область применения метода.

Методы очистки, основанные на применении ионообменных смол, удовлетворяют первым трем пунктам, т.е. они имеют:

- а) высокую обменную емкость;
- б) высокую кинетику обмена, что позволяет проводить быструю обработку больших объемов РМ;
- в) концентрирование радиоактивных изотопов в небольшом объеме смолы.

Но эти методы не удовлетворяют пунктам 4 – 7, которые являются основными требованиями в проблеме очистки РМ. Так, высокая стоимость ионообменных смол приводит к необходимости их регенерации, а это, в свою очередь, приводит к появлению больших дополнительных количеств высокоактивных РМ, которые нуждаются в захоронении или новой переработке. Процесс регенерации ионообменных смол сложен и дорог, особенно при использовании смеси катионита и анионита. Применение ионообменных смол без регенерации не только нерентабельно, но и, ввиду относительно слабой фиксации радиоактивных изотопов на смолах, делает невозможным их захоронение после истощения их обменной емкости. Ионообменные смолы как сорбент имеют также ряд других недостатков. Так, сорбируя изотопы в ионном состоянии, смолы практически не сорбируют радиоактивные взвеси и коллоиды, которые являются основным состоянием радиоактивных изотопов в длительно хранящихся РМ. Присутствующие в растворах разнообразные органические вещества снижают фильтрующие и обменные свойства смол. Наконец, ионообменные смолы теряют обменную емкость и разрушаются под действием ионизирующего излучения.

Очистка РМ методом электродиализа удовлетворяет первым четырем пунктам. При этом 1 м^3 РО, очищенный двухступенчатым электродиализом, на 70% дешевле, чем в случае ионного обмена.

Принцип протекания процесса электродиализа должен обеспечить получение высоких коэффициентов очистки РМ. Это подтверждено на практике применения электродиализа в США, Великобритании, России. Серьезным ограничением этого метода является невозможность извлекать из очищенного раствора коллоидные и псевдоколлоидные формы радиоактивных элементов, что требует предварительной очистки растворов дисперсной фазы. Существенным ограничением электродиализных установок с ионообменными мембранами является также недостаточная высокая механическая прочность мембраны и их высокая стоимость. Так как радиоактивные изотопы концентрируются в прикатодных камерах, то конеч-

ным продуктом процесса очистки являются высокоактивные растворы с высокой концентрацией солей. В ряде случаев, такие РМ составляют 2 - 3% от исходного перерабатываемого объема (от 1000 м³ исходного раствора отходы составляют вместе с промывным раствором камер ~ 20 - 30 м³). Захоронение этих отходов требует дальнейшей их переработки, что в настоящее время не реализовано.

Указанные недостатки методов ионного обмена и электродиализа заставляют во многих случаях обратить внимание на неорганические сорбенты (как природные (ПНС), так и синтетические (СНС)).

Сразу отметим, что применение НС удовлетворяют всем требованиям предъявляемым к методам переработки РМ (пункты 1 - 7). Кроме того, неорганические сорбенты обладают такими достоинствами:

1. Доступность и низкая стоимость. Это позволяет использовать их неоднократно, при этом конечный продукт сразу готов к захоронению.

2. Высокая необратимость (вплоть до абсолютной) сорбции (фиксации) поглощенных изотопов, которую можно существенно усилить термической обработкой сорбентов, что обеспечивает надежность и безопасность их захоронения.

3. Сейчас имеются ПНС и СНС с обменной емкостью 4,5 - 10 мг-экв/г, не уступающей обменной емкости ионообменных смол.

4. Исключительная контролируемая селективность.

5. Высокая механическая, термическая и радиационная ($\approx 10^{10}$ рентген) устойчивость.

6. Некоторые виды неорганических сорбентов наряду с ионами могут поглощать коллоиды и псевдоколлоиды радиоактивных элементов.

7. Широкий спектр селективности позволяет подбирать для РМ определенного состава конкретные СНС, что важно при работе в труднодоступных районах.

8. При равной обменной емкости с ионообменными смолами неорганические сорбенты занимают меньший объем, который не изменяется (в отличие от ионообменных смол) в процессе работы.

9. После очистки РМ с помощью НС не остаётся высокоактивных жидких отходов, как это происходит и в случае применения ионообменных смол, и в случае применения электродиализа.

Следует отметить, что НС являются, в известной степени полифункциональными сорбентами. Они способны поглощать из водных растворов радиоактивные изотопы как ионообменным, так и неионообменным путем, проявляя при этом высокую специфичность к отдельным формам, в виде которого тот или иной элемент присутствует в водных растворах. НС могут обладать и свойствами молекулярных сит. Например, исключительно высокая селективность в отношении изотопов цезия характерна для синтетических цеолитов, ферроцианидов тяжелых металлов, солей гетерополикислот, фосфатов циркония. В случае ферроцианидов тяжелых металлов захват цезия практически необратим, что важно при захоронении радиоактивных отходов. Сорбенты на циркониевой основе, гидроксиды и гидратированные окислы тяжелых металлов, силикагели, сорбенты на основе металлов также эффективно поглощают гидрозольные формы элементов. Диффузионные процессы, на которых основано применение сорбентов, активно исследуются теоретически. Построен ряд математических моделей, позволяющих описывать такие процессы [7].

Для большинства искусственных НС характерна высокая радиационная устойчивость, что позволяет применять их для переработки высокоактивных радиоактивных отходов. Неорганический сорбент после сорбции радиоактивных изотопов РМ уже сам является продуктом, готовым к захоронению.

Выводы

Из сравнительного анализа технологий очистки РМ видно, что технологии, основанные на процессах физико-химической адсорбции радиоактивных элементов, представляются наиболее перспективными. Следует заметить, что в качестве сырья для получения сорбентов используются естественные материалы: цирконий-фосфаты, титанаты, цирконаты, алюмосиликаты и др. Достижение требуемых характеристик возможно с использованием технологий прямого синтеза стабильных соединений из компонентов, содержащих радионуклиды.

Литература

1. Кесслер, Г. Ядерная энергетика [Текст]: пер. с англ. – Ю. Митяев; М.: Энергоатомиздат, 1986. 264 с.
2. Кельцев Н.В. Основы адсорбционной техники [Текст] / Н.В. Кельцев. – М.: Химия, 1984. – 357.
3. Рыкалин Н.Н. Воздействие концентрированных потоков энергии на материалы [Текст] / Н.Н.Рыкалин. –М.:Наука. 1989-268 с.
4. Кольчужкин А.М. Введение в теорию прохождения частиц через вещество [Текст] / А.М. Кольчужкин, В.В. Учайкин В.-М.:Энергоатомиздат, 1978.- 180 с.
5. Ляпидевский В.К. Методы детектирования излучений [Текст] / В.К. Ляпидевский. – М.: Энергоатомиздат, 1987.- 408 с.
6. Самоорганизация в программных средах [Текст]. В.Ф. Клепиков, В.Ю. Корда, В.А. Ямницкий и др. Харьков: Акта, 1998, -108 с.
7. Бабич, А. В. технологии переработки и выделения тяжелых металлов из отходов ядерной энергетике [Текст] / А.Б.Бабич, Клепиков В.Ф., Литвиненко В.В., Робук В.Н., Шатов В.В. // Восточно-Европейский журнал передовых технологий.— 2011. – Вып. 3/5 (51).— С. 12–14.