

ОБЗОРЫ

УДК 621.039.7:661.666

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ИОНООБМЕННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ДЛЯ ОЧИСТКИ ЖИДКИХ РАДИОАКТИВНЫХ ОТХОДОВ

М.Г. Токмачев, Г.В. Токмачев

Авария на японской АЭС «Фукусима» в марте 2011 г., при ликвидации которой подвалы АЭС были затоплены радиоактивной морской водой [1], явилась толчком к развитию ионообменных технологий, применяемых для очистки жидких радиоактивных отходов. В большинстве своем это апробированные технологии, которые пришлось верифицировать и модернизировать для работы с морской водой. Были использованы и методы, разработанные ранее, но не получившие промышленного применения. Авария на АЭС «Фукусима» дала им вторую жизнь. Созданы и новые технологии.

Через несколько месяцев после аварии эксплуатирующая компания ТЕРСО разработала и построила временные системы для очистки воды, которые были введены в эксплуатацию в июне 2011 г. Первоначально они были основаны на системе очистки компании AREVA, а позднее были дополнены сначала одной, потом двумя линиями системы очистки Toshiba SARRY. Обе системы используют адсорбционные колонны с ионообменными смолами для захвата и фиксации радионуклидов, находящихся в воде [2].

Системы предназначены, главным образом, для удаления из воды относительно долгоживущих радионуклидов (^{134}Cs , ^{137}Cs), которые определяют основную долю активности воды, так как радиоактивный йод (^{133}I), имеющий сравнительно небольшой период полураспада, практически уже распался.

В последующие месяцы система была улучшена, в частности, была добавлена петля возврата с обессоливанием, так чтобы обработанная вода могла быть использована для охлаждения реакторов.

К концу мая 2012 г. системы очистки обработали 177 000 м³ воды. Однако в баках на площадке АЭС «Фукусима» содержалось почти 160 000 м³ высокоактивной воды. Кроме того, объем загрязненной воды постоянно увеличи-

вается из-за использования чистой воды для подпитки схемы охлаждения реакторов блоков 1–3, следовательно, ситуация остается экологически неустойчивой. Поэтому ТЕРСО начала разрабатывать систему для обработки всей загрязненной воды.

Три проектных требования к этой системе являются беспрецедентными.

Во-первых, установлены высокие требования к пропускной способности системы, каждый из двух работающих каналов которой (третий резервный канал находится в режиме ожидания) должен обрабатывать 250 м³ воды в сутки. Для сравнения, система очистки, разработанная компанией EnergySolutions для остановленной в Великобритании АЭС Bradwell, обрабатывает 500 м³ в год. Хотя ионообменная система SARRY, работающая в настоящее время на площадке, может перерабатывать вдвое больше требуемого объема, она может удалять только изотопы цезия.

Во-вторых, новая система будет удалять не один, а 62 радионуклида, которые можно разделить на три категории: (а) продукты деления и трансурановые элементы, образовавшиеся в результате цепной реакции в реакторе; (б) активированные продукты коррозии изначально инертного оборудования (Fe, Co, Mn); (в) тритий (бета-активный, период полураспада 12,5 лет), который ТЕРСО не в состоянии удалить.

В-третьих, ТЕРСО установила предельно жесткие параметры очистки. Максимальный уровень очистки, заявленный ТЕРСО, в 100 раз жестче законодательно установленного. Таким образом, концентрация радионуклидов будет близка пределу обнаружения или ниже его. Низкие пределы должны облегчить получение со временем одобрения правительства о сбросе воды в океан, хотя ТЕРСО еще не объявляла о таких планах.

ТЕРСО выбрала Toshiba в качестве основного партнера для создания так называемой «много-

нуклидной системы очистки». Компания EnergySolution имеет статус создателя концепции системы и тесно работает с Toshiba. Другие подрядчики, включая финскую компанию Fortum и субподрядчиков для поставок ионообменных смол, будут поставлять компоненты. Научно-исследовательские работы по проекту, которые длились шесть месяцев, окончились пилотными испытаниями на площадке АЭС «Фукусима», что позволило верифицировать возможность достижения концентрации ниже порога обнаружения для всех 62 радионуклидов.

Университет Хельсинки и финская компания Fortum разработали высокоселективные ионообменные материалы, которые используются для очистки радиоактивной воды на АЭС «Фукусима» [3, 4]. Компания Fortum поставляет компании EnergySolutions тысячи килограмм ионообменных материалов в гранулированной форме в рамках программы этих работ.

Процесс очистки основан на ионитах, изготовленных из неорганических твердых материалов, которые в виде гранул помещаются в металлические картриджи. Через картриджи могут прокачиваться большие объемы загрязненной воды. Их промышленное применение началось на АЭС «Ловииза» в Финляндии, а затем еще в нескольких странах. Благодаря высокой селективности ионита обеспечивается существенно большее снижение, по сравнению с другими ионообменными материалами, объема радиоактивных веществ, которые необходимо захоранивать, а протекающая через ионит вода является достаточно чистой для сброса в море. Финские авторитеты считают описанный метод лучшим в мире.

Сооружение системы началось в мае 2012 г. на месте бывшего теннисного корта рядом с административным зданием АЭС «Фукусима» [2]. Монтаж, холодное и горячее тестирование системы должны были занять несколько месяцев, ввод системы в эксплуатацию планировался к концу 2012 г. Новая система будет встроена в существующую систему очистки после подсистем сепарации масла и удаления цезия ^{134}Cs и ^{137}Cs , хотя она тоже будет способна выводить цезий. Основной объем очищаемой воды будет проходить стадию предварительного обессоливания, однако вода все же будет оставаться соленой.

В соответствии с данными компании Fortum, поставляющей собственные ионообменные смолы CSTreat и SFTreat для удаления

цезия и стронция, их эффективность в морской воде снижается в три раза (зафиксировано уменьшение максимальной емкости сорбента с 150 ТБк/кг до 50 ТБк/кг) [2]. Кроме того, концентрированная морская вода плотнее пресной, что также будет уменьшать эффективность ионного обмена.

Особую предосторожность должны вызывать процессы коррозии в морской воде, даже имеющей температуру окружающей среды. Как сообщает Toshiba, коррозионные риски будут снижены путем замены металлических труб и фланцев на полиэтиленовые с высокой степенью сшивки, а некоторые баки будут облицованы.

Основу системы очистки воды составляет модифицированная версия системы ALPS производства компании EnergySolutions, которая состоит из предварительной ступени, удаляющей осадок и органические соединения, и адсорбционной ступени, осуществляющей ионный обмен.

По информации от EnergySolutions, в предварительной ступени происходят два различных химических процесса: во-первых, флокуляция соединений железа с изотопами рутения и, во-вторых, выпадение в осадок карбонатов кальция, магния и стронция. В обеих ступенях вода, проходя через пористую керамическую трубу (диаметр пор 0,02 мкм), оставляет в ней твердые вещества и органику. Хлопья, осадок и органика, которые аккумулируются как шлам, перекачиваются насосами в цилиндрические контейнеры хранения радиоактивных отходов высотой 1,9 м и диаметром 1,6 м [2].

В адсорбционной ступени вода протекает через ряд из 16 адсорбционных колонн, что почти в три раза превышает число колонн в типовой установке EnergySolutions. Большое число колонн объясняется большим количеством удаляемых из воды радионуклидов, причем в системе использовано семь различных ионообменных механизмов захвата на молекулярном уровне.

В системе имеется два типа адсорбционных колонн. Вода сначала протекает через 14 колонн, в которых загрязненная ионообменная среда истекает в тот же самый контейнер хранения и заменяется. Шлам из обессоливаемой воды, как считает ТЕРСО, будет заполнять 1,3 контейнера в день. Ниже по течению воды две большие колонны, изготовленные из стекловолокна или сходного материала, очищают

небольшое количество оставшихся низкоактивных радиоизотопов. Так как концентрация радионуклидов относительно мала, постоянная замена ионообменной смолы последних двух колонн не предусматривается, а запланирована их полная замена после исчерпания ресурса смолы (как сообщает ТЕРСО, приблизительно ежемесячно, или 15 раз в год).

Во многих местах новой системы установлен пробоотбор, но контроль водно-химического режима будет проводиться не постоянно, а в «горячей» лаборатории. По информации Toshiba, он-лайн измерений не предусмотрено.

Компания ТЕРСО заявила, что обработанная вода первоначально будет храниться в новых специально сооруженных баках, так как до начала планируемых работ по сбросу воды в океан ТЕРСО имеет более насущные приоритеты по очистке. Эти задачи включают очистку утечек, их хранение и предотвращение течей в грунтовые воды из подвальных помещений зданий АЭС «Фукусима».

Для удаления радиоактивных веществ из более чем 43 миллионов галлонов (9500 м³) загрязненной воды на АЭС «Фукусима» [5] использовалась также технология национальной лаборатории США Sandia.

Sandia выдала лицензию компании Honeywell UOP с исключительным правом производства молекулярного сетчатого фильтра на основе кристаллического титаната кремния (crystalline silico-titanate — CST), который может сепарировать высоколетучие элементы из радиоактивной воды. CST является неорганическим ионитом, разработанным на молекулярном уровне. Технология основана на большей селективности определенного класса синтетических цеолитов CST в улавливании некоторых радиоактивных элементов, в частности цезия, по сравнению с другими способами. После удаления высокоактивных элементов из загрязненной воды с помощью CST оставшиеся низкоактивные отходы могут удаляться более экономичным способом.

Исследователи Sandia и компании UOP выполнили параллельно большой объем научно-исследовательских работ для доказательства того, что технология, разработанная в начале 1990-х и до аварии на АЭС «Фукусима» не применявшаяся в промышленности, эффективна для морской воды, использованной для аварийного охлаждения поврежденных энергоблоков. Проводилось экспериментальное

сравнение CST как с имеющимися на рынке, так и природными цеолитами, а также некоторыми глинами. CST показал наилучшие результаты, и его теперь планируется агрессивно продвигать на рынок.

Параллельно исследователи из национальной лаборатории США Savannah River доказали, что при использовании титаната натрия для очистки радиоактивной воды можно изготовить его в виде наночастиц цилиндрической или сферической формы размером 10–150 нм [6]. В ходе тестов было доказано, что это повышает площадь ионообменной поверхности и, соответственно, эффективность процесса. Испытывались щелочные условия для высокоактивных отходов, из которых удалялись стронций и актиниды, а также слабокислотные условия. В последнем случае было выведено свыше 90% ионов 17 различных металлов.

Литература

1. Блинова И.В., Соколова И.Д. Ликвидация последствий аварии на АЭС «Фукусима-1» в 2011 г. — Атомная техника за рубежом, 2012, № 4, стр. 3–15.
2. Dalrymple W. The ultimate water treatment system. — Nuclear Engineering International, 2012, v. 57, No 696, стр. 18–20.
3. Фортум. Пресс-релиз 15.03.2012, <http://www.fortum.com/en/mediaroom/pages/fortum-know-how-is-used-to-purify-radioactive-liquids-in-fukushima.aspx>
4. Help to Fukushima. — Университет Хельсинки. Пресс-релиз, 2012, <http://www.helsinki.fi/news/archive/3-2012/27-15-45-55.html>
5. Sandia Labs technology used in Fukushima cleanup. — Лаборатории Sandia. Пресс-релиз, 29.05.2012, https://share.sandia.gov/news/resources/news_releases/fukushima_cleanup/
6. Aiken S. Reducing ion exchange particles to nano-size shows big potential. — AAAS, the science society. 30.01.2012, http://www.eurekalert.org/pub_releases/2012-01/drnl-rie013012.php

Ключевые слова

Жидкие радиоактивные отходы, морская вода, системы очистки, ионный обмен, АЭС «Фукусима».

АННОТАЦИИ ПУБЛИКУЕМЫХ СТАТЕЙ

УДК 621.039.7:661.666

Токмачев М.Г., Токмачев Г.В. **Использование ионообменных технологий для очистки жидких радиоактивных отходов.** — Атомная техника за рубежом, 2013, № 6, с. 3–5.

Рассмотрено применение ионообменных технологий для извлечения радионуклидов из водных растворов. Описано их использование для ликвидации последствий аварии на АЭС «Фукусима». Охарактеризованы проблемы, связанные с морской загрязненной водой. Приведены современные требования компании ТЕРСО к системе очистки и ее описание. Дана характеристика последних разработок материалов, используемых в ионном обмене.

Список лит. 6 назв.

УДК 621.039.55

Стенбок С.В., Семеновская И.В. **Исследовательские реакторы Бразилии.** — Атомная техника за рубежом, 2013, № 6, с. 6–13.

Рассмотрены основные направления использования исследовательских реакторов Бразилии: фундаментальные и прикладные исследования в области ядерной и нейтронной науки и техники, реакторные испытания, производство изотопов для медицины, промышленности и сельского хозяйства, подготовка персонала. Подробно представлена схема плана вывода из эксплуатации исследовательского реактора IPR-R1, которая может послужить образцом при разработке государственных регулирующих норм по этому вопросу.

Табл. 1, список лит. 2 назв.

УДК 621.039.532.5:546.45

Г.Р. Лонгхерст и др. **Обращение с бериллием, применяемым в ядерных установках** (перевод с английского: G.R. Longhurst, K. Tsuchiya, C.N. Dorn, S.L. Folkman, T.H. Fronk, M. Ishihara, H.Kawamura, T.N. Tranter, R. Rohe, M. Uchida and E. Vidal. Managing beryllium in nuclear facility applications. — Nuclear Technology, 2011, v. 176, p. 430–441 (Dec.)) — Атомная техника за рубежом, 2013, № 6, с. 14–30.

Бериллий обладает уникальным сочетанием таких качеств, как малая плотность, исключительная жесткость, высокая теплопроводность и устойчивость к воздействию агрессивных кислотных окислителей, кроме того, бериллий имеет небольшую массу ядра. А благодаря реакции ($n, 2n$) на ядрах бериллия происходит умножение нейтронов. Именно по этим причинам бериллий на протяжении многих лет находит применение в ядерных реакторах в качестве отражателя и замедлителя нейтронов. В настоящее время бериллий используется в исследовательских реакторах во многих странах мира. Значительные количества облученного бериллия находятся также в ядерных реакторах, выведенных из эксплуатации.

Еще одно применение бериллия в ядерных технологиях — в качестве материала первой стенки в термоядерных реакторах с магнитным удержанием плазмы.

В настоящее время в мире количество облученного бериллия, который должен быть подвергнут захоронению, можно приблизительно оценить величиной около 14 тонн, ежегодный прирост составляет около 600 кг.

Как и любой изготовленный промышленным способом материал, бериллий, используемый в ядерных установках, содержит загрязняющие примеси. В результате его нейтронного облучения происходит активация этих примесей. В облученном бериллии могут накапливаться такие радионуклиды, как гамма-активный ^{60}Co , а также — бета-активные ^{14}C и ^{94}Nb . Наличие примеси урана может приводить к образованию долгоживущих изотопов трансурановых элементов, а также таких продуктов деления, как ^{137}Cs и другие.

В результате ядерных реакций с участием нейтронов в бериллии образуются атомы газообразных веществ, главным образом — гелия и трития, что приводит к набуханию бериллия, его охрупчиванию и растрескиванию.

Это означает, что бериллиевые отражатели подлежат замене через определенные промежутки времени.

Обращение с облученным бериллием в настоящее время связано с серьезными затруднениями. Его рециклирование оказывается экономически нецелесообразным. В США примерно до 1990 г. облученный бериллий захоранивали на полигонах, как и обычные радиоактивные отходы. Серьезные трудности возникли тогда, когда было принято решение об отнесении бериллиевых отходов к классу наивысшей опасности GTCC и признании их трансурановыми. В представленной статье рассматриваются вопросы обращения с облученным бериллием, технические и правовые ограничения на его захоронение, а также — возможные пути их преодоления.

Табл. 2, рис. 4, список лит. 49 назв.

УДК 621.039.53

Мьяцца П. **Вентиляционно-фильтрующие системы контейнентов швейцарских АЭС** (перевод с английского: Miazza P. Containment filtered venting in Switzerland. — A presentation at the USNRC's RIC 2012, the 24th annual regulatory information conference, 13–15 March 2012, Bethesda, Maryland, USA) — Атомная техника за рубежом, 2013, № 6, с. 31–33.

После событий на АЭС «Фукусима» швейцарский ядерный регулятор выполнил детальные инспекции систем вентиляции контейнентов на АЭС, которые дали положительные результаты. Эти 20-летние системы остаются важным инструментом безопасности при тяжелых авариях.

Рис. 4