

<https://doi.org/10.52676/1729-7885-2026-3-176-185>
УДК 621.039.7

ЖИДКИЕ РАДИОАКТИВНЫЕ ОТХОДЫ, СВОЙСТВА, МЕТОДЫ ПЕРЕРАБОТКИ. ПРОБЛЕМЫ И ПУТИ ИХ РЕШЕНИЯ

В.В. Яковлев, Ю.Ю. Бакланова*, О.С. Букина, В.В. Бакланов, А.Г. Коровиков

Филиал «Институт атомной энергии» РГП НЯЦ РК, Курчатов, Казахстан

* E-mail для контактов: basalai@nnc.kz

В статье представлен обзор современных подходов к обращению с жидкими радиоактивными отходами (ЖРО), рассмотрены их основные свойства, классификация, химический и радионуклидный состав. Проанализированы основные проблемы переработки ЖРО, связанные с многообразием их состава, высоким содержанием, наличием органических примесей и необходимостью селективного извлечения радионуклидов. Выполнен анализ существующих технологий очистки и кондиционирования ЖРО, рассмотрен международный опыт переработки жидких радиоактивных отходов, а также приведена оценка современного состояния обращения с ЖРО в Республике Казахстан. Особое внимание уделено вопросам минимизации объемов образующихся отходов, внедрения технологий глубокой очистки и иммобилизации радионуклидов. Проведен анализ основных требований, предъявляемых к составу, структуре и физико-механическим свойствам матриц, используемых для кондиционирования радиоактивных отходов.

Обоснована целесообразность создания специализированных региональных комплексов по переработке ЖРО и внедрения единой системы государственного управления в данной области. Сделан вывод о необходимости комплексного применения современных технологий переработки, обеспечивающих снижение экологических рисков, повышение безопасности и соответствие обращения с радиоактивными отходами международным требованиям.

Ключевые слова: жидкие радиоактивные отходы, переработка ЖРО, требования к матрицам, иммобилизация, критерии.

ВВЕДЕНИЕ

Вопросы обращения с радиоактивными отходами (РАО) в Республике Казахстан регулируются Законом «Об использовании атомной энергии» [1], экологическим Кодексом Республики Казахстан [2], международными соглашениями и подзаконными актами. Эти нормативные правовые акты определяют основы государственной политики, регулирования и контроля в области использования атомной энергии. В настоящее время на заключительной стадии согласования находится проект Закона «Об обращении с радиоактивными отходами», направленный на усовершенствование системы государственного контроля, создание института национального оператора, внедрение единого учета отходов в Казахстане и конкретизацию финансовых обязательств для бизнеса.

В общем количестве образующихся РАО преобладают по объему жидкие радиоактивные отходы (ЖРО). При относительно невысоком удельном содержании радионуклидов они представляют значительную экологическую опасность вследствие их большого объема, возможности неконтролируемого распространения, различного химического и радиохимического составов, поэтому переработка ЖРО в современных технологиях предусматривает заключительную стадию – перевод в твердое состояние.

Образующиеся ЖРО в результате переработки полезных ископаемых, при эксплуатации, выводе из

эксплуатации ядерных и радиационных установок и при реабилитации загрязненных территорий должны пройти все стадии обращения с радиоактивными отходами — от сбора до захоронения, включая их переработку, хранение и перевозку. [3,4,5].

В статье рассмотрены существующие проблемы обращения с ЖРО в стране, проведен обзор перспективных технических и организационных решений с целью поиска и обоснований подходов к сокращению количества образующихся ЖРО на территории Республики Казахстан, к выбору технологий переработки ЖРО, направленных на снижение их вредного воздействия на человека и окружающую среду. Рассмотрены технологии переработки ЖРО, рекомендации МАГАТЭ по вопросам иммобилизации жидких радиоактивных отходов [6,7,8]

Методология поиска

Для выработки предложений по технологиям переработки ЖРО в Казахстане был выполнен сравнительный анализ перспективных технических решений, принятых в зарубежной и отечественной практике для обращения с ЖРО, которые были наработаны в результате эксплуатации, вывода из эксплуатации ядерных и радиационных установок, а также при реабилитации загрязненных территорий.

Для проведения сравнительного анализа промышленных методов иммобилизации отходов (цементи-

рование, битумирование, остекловывание и полимерное компаундирование) выполнено многофакторное структурирование нормативных критериев приемлемости конечной формы отходов согласно нормативам Республики Казахстан.

На основе интеграции текущих скоростей образования ЖРО по отходоформирующим отраслям Казахстана (ядерная энергетика, исследовательские реакторы, уранодобывающее и нефтегазовое производство) выполнена прогнозная оценка накопления объемов ЖРО на долгосрочную перспективу до 2050 года.

Основная часть

Технические решения, принятые в зарубежной практике

Анализ современного состояния инфраструктуры объектов прошлых ядерных испытаний и производств показывает, что наиболее эффективным организационно-технологическим решением является создание региональных специализированных комбинатов по централизованной переработке РАО. Локализацию площадок для строительства подобных комплексов целесообразно осуществлять по принципу максимальной географической близости к действующим объектам генерации ЖРО и местам их долговременного хранения, что минимизирует логистические риски при транспортировке жидких радиоактивных сред.

В мире в настоящее время функционирует несколько крупных промышленных комплексов по переработке ядерного топлива и радиоактивных отходов, в технологических процессах которых образуются и перерабатываются ЖРО.

Во Франции, на крупнейшем заводе переработки ядерного топлива, расположенном в городе La Hague, переработка ЖРО осуществляется в рамках гидрометаллургического процесса **PUREX** (Plutonium Uranium Refining by Extraction), в котором жидкость проходит через серию экстракционных колонн, где уран и плутоний отделяются от радиоактивных побочных продуктов. Оставшиеся высокоактивные ЖРО концентрируются с помощью выпаривания, что значительно уменьшает их объем, и смешиваются с расплавленным стеклом. Полученную стекломассу разливают в специальные стальные контейнеры. После остывания образуется монолит, устойчивый к выщелачиванию и коррозии. Низко- и среднеактивные ЖРО для предотвращения утечки связываются цементом или битумом, после чего упаковываются в бочки для временного хранения.

В США в 2021 году был введен в эксплуатацию крупный завод по переработке солевых отходов Salt Waste Processing Facility (SWPF), построенный на площадке Национальной лаборатории Саванна-Ривер (SRS), на которой за несколько десятилетий накопилось около 120 миллионов литров ЖРО, 90% которых составляют именно солевые отходы.

В процессе переработки происходит разделение отходов на три фракции – более радиоактивную (содержащую, в частности, цезий, стронций, актиниды и др.); слаборадиоактивный раствор и слаборадиоактивные твердые шламы.

Основные этапы технологии очистки солевых отходов состоят из таких ключевых шагов, как:

1. Удаление стронция и актинидов (Strontium and Actinide Removal): радиоактивный солевой раствор смешивается с титанатом моносодия (MST – Monosodium Titanate). Этот реагент связывает тяжелые металлы (уран, плутоний, стронций), заставляя их оседать в виде шлама, который затем отделяется от жидкой фазы с помощью фильтрации.

2. Экстракция цезия (CSSX – Caustic-Side Solvent Extraction): отфильтрованный раствор подается на экстракционные центробежные контакторы. Там используется специализированный органический растворитель на основе краун-эфиров (каликс-краун), который селективно извлекает радиоактивный цезий.

3. Иммобилизация очищенного солевого раствора с использованием цементной матрицы, при этом концентрат цезия направляется для остекловывания, шлам с актиноидами и стронцием также включается в стеклоподобную матрицу.

В Великобритании на крупнейшем и старейшем комбинате «Селлафилд» (Sellafield) осуществляется переработка ОЯТ и очистка высокоактивных ЖРО. Технологический процесс переработки ЖРО включает два основных этапа, позволяющих удалить из воды более 99% радиоактивных изотопов:

1. ЖРО пропускаются через песчаные фильтры – емкости с песком, которые задерживают мельчайшие взвешенные твердые частицы. Для повышения эффективности фильтрации предварительно добавляется флокулянт – высокомолекулярные реагенты, предназначенные для укрупнения мелких взвешенных частиц в воде.

2. Очищенные от взвесей ЖРО направляются в резервуары с природным минералом клиноптилолитом (добывается в пустыне Мохаве, США). Этот материал служит мощным ионообменником, который улавливает растворенные радиоактивные изотопы цезия и стронция.

3. Для очистки низкоактивных ЖРО, образующихся при переработке топлива и операциях с историческими отходами, используются методы флокуляции и осаждения – в жидкие кислые отходы добавляется гидроксид аммония, в результате чего растворенные металлы, включая такие трансурановые элементы, как плутоний и америций, превращаются в осадок (флокулянт) в виде металлического гидроксида. Осадок извлекается, а очищенная вода контролируемо сбрасывается.

В Российской Федерации на старейшем и крупнейшем предприятии производственного объединения

«Маяк», расположенном в Озерске Челябинской области, осуществляется переработка ОЯТ и утилизация ЖРО. Технологический процесс переработки ЖРО, предусматривающий комплексный подход обращения с жидкими отходами, включая высокоактивные (ВАО) и среднеактивные (САО) отходы, состоит из следующих последовательных этапов:

1. ЖРО проходят через процессы микрофильтрации, отстаивания и осветления для отделения жидкой фазы от радиоактивных шламов.

2. Осветленные и очищенные от шламов ЖРО поступают на участок сорбционной очистки, на котором селективно извлекаются наиболее опасные долгоживущие радионуклиды цезий-137, стронций-90 и другие. Для этого применяются специфические селективные сорбенты такие, как резорцинформальдегидные смолы и ферроцианидные комплексы.

3. Очищенный раствор подвергается выпариванию для уменьшения физического объема отходов и перевода их в категорию кубовых остатков.

Общий коэффициент очистки (отношение исходной активности к активности после очистки) от основных продуктов деления доходит до значений 10^7 – 10^9 . После глубокой очистки и концентрирования жидкие отходы переводятся в твердую, стабильную форму, исключаящую их выщелачивание и попадание в окружающую среду методом остекловывания или цементирувания.

Жидкие радиоактивные отходы Республики Казахстан

Казахстан занимает второе место после России среди стран СНГ по объемам добычи полезных ископаемых. Горно-металлургическая отрасль страны является одной из базовых в развитии экономического сектора государства. К крупным предприятиям данной отрасли страны можно отнести Eurasian Resources Group (ERG), TOO Корпорация «Казахмыс», TOO «Казцинк», АО «АрселорМиттал Темиртау», АО «НАК «Казатомпром», АО «Усть-Каменогорский титано-магний комбинат», TOO «Темиртауский электрометаллургический комбинат», TOO «Таразский металлургический комбинат», TOO «KSP Steel», АО «Жайремский ГОК», АО «Соколовско-Сарбайское горно-обогатительное производственное объединение», АО «Горно-металлургический концерн «Казалтын», KAZ Minerals PLC и другие.

Добыча урана является одной из ведущих отраслей горнодобывающей промышленности Казахстана. Страна занимает первое место в мире по добыче урана и второе по его запасам, уступая лишь Австралии.

Основные массы отходов, связанных с уранодобывающей промышленностью, расположены в Мангистауской, Северо-Казахстанской, Акмолинской, Карагандинской, Жамбылской, Южно-Казахстанской, Кызылординской и Восточно-Казахстанской областях.

При добыче и переработке полезных ископаемых возникают проблемы утилизации сопутствующих природных радиоактивных изотопов, которые в большинстве случаев классифицируются как РАО. На горно-обогатительных комбинатах в местах добычи полезных ископаемых для хранения и захоронения радиоактивных, токсичных и других отходов создаются комплексы специальных сооружений – хвостохранилища.

Отходы обогащения полезных ископаемых (хвостов) при помощи средств гидромеханизации (перемещение материала движущимся потоком воды) поступают в хвостохранилище, где происходит постепенное оседание твердой фазы хвостов. По мере осветления, вода из хвостохранилища возвращается на технологические участки.

Жидкая фаза отходов, размещенных в хвостохранилищах, представляет собой рассол, образовавшийся за все время эксплуатации хвостохранилища в результате концентрации минеральных солей при постоянном испарении с поверхности накапливаемых промышленных, в том числе и радиоактивных отходов. При эксплуатации хвостохранилищ количество жидкой фазы в хвостохранилище не является постоянным, а зависит от природно-климатических условий, района расположения и производственной программы перерабатывающего предприятия, поэтому накопленное количество отходов, в основном, оценивается по твердым РАО. Хвостохранилища горно-обогатительных комбинатов на 80–90% заполнены твердой фазой отходов обогащения руд.

Нефтегазовая отрасль Республики Казахстан также является одной из ведущих отраслей промышленного производства. Значимую роль в развитии страны в нефтегазовом комплексе играют три крупнейших месторождения: «Тенгиз» и «Кашаган» в Атырауской области, «Карачаганак» в Западно-Казахстанской области.

На месторождениях «Каламкас» и «Жетыбай» в Мангистауской области созданы участки для очистки и дезактивации труб и оборудования. В Жетыбае и Жана-Озени введены в эксплуатацию пункты хранения радиоактивных отходов на 70 000 т и 100 000 т соответственно.

В нефтегазовой отрасли основными видами радиоактивных отходов являются осадки и отложения на трубах и технологическом оборудовании, пластовые воды и нефтешламы.

К потокам нефти и газа примешивается вода, содержащая растворенные неактивные сульфаты и карбонаты Cu, Sr и Ba, с которыми на стенках труб сосаждаются ^{226}Ra и его дочерние продукты. Главными загрязнителями нефти и газа, а также поступающих на поверхность вод являются ^{226}Ra , ^{210}Pb и ^{210}Po .

В Республике Казахстан имеется опыт эксплуатации четырех исследовательских реакторов разных

типов – импульсного графитового реактора (ИГР), импульсного высокотемпературного газоохлаждаемого ИВГ.1 и его модификации ИВГ.1М, исследовательского реактора для групповых исследований ТВЭЛ «ИРГИТ» и его модификации РА, казахстанского водо-водяного реактора ВВР-К и опытно-промышленного энергетического реактора на быстрых нейтронах БН-350. Три из них находятся в Институте атомной энергии РГП НЯЦ РК (ИГР, ИВГ.1М, РА), установка РА в настоящее время не эксплуатируется, один – в РГП ИЯФ (ВВР-К), и БН-350, остановленный в 1999 году, находится на территории «Мангистауского атомно-энергетического комбината» (МАЭК).

ЖРО, образующиеся в процессе эксплуатации исследовательского реактора ИГР, перевозятся в установленном порядке на площадку КИР «Байкал-1» (Майский район, Павлодарская область) и размещаются в специально предназначенном для ЖРО сооружении.

На реакторе ВВР-К РАО образуются в результате как эксплуатации и внутриреакторных испытаний, так и при производстве медицинских радиоизотопов и гамма-источников, нейтронного легирования кремния и нейтронно-активационного анализа. ЖРО и ТРО, наработанные на реакторе ВВР-К, цементируются и хранятся на площадке реактора в ПХРО поселка Ала-тау около города Алматы.

Для сбора и хранения ЖРО реакторной установки БН-350 используется хранилище (ХЖРО), в котором расположены 10 емкостей для длительного хранения ЖРО.

В 1993 году в рамках работы над «Концепцией захоронения радиоактивных отходов Республики Казахстан» был составлен кадастр радиоактивных отходов для всей территории Республики Казахстан по всем без исключения отходоформирующим отраслям народного хозяйства и военного ведомства. Основная доля накопленных РАО приходится на Восточный Казахстан. Это связано с деятельностью Семипалатинского испытательного полигона, АО «УМЗ» и ИХМЗ, при этом в настоящее время ЖРО нарабатываются только в процессе эксплуатации исследовательских реакторов ИГР и ИВГ.1М и деятельности АО «УМЗ».

Второй по количеству накопленных ЖРО является Мангистауская область, образовавшихся в процессе деятельности Прикаспийского горно-металлургического комплекса и эксплуатации реактора БН-350. Количество накопленных к настоящему времени ЖРО на реакторной установке БН-350 – 1675 м³ [9].

Значительно большее количество РАО находится на ТОО Степногорского горно-химического комбината (ТОО «СГХК») – 178 000 м³ и общей активностью 1,752 ГБк. [11].

Отходы АО «УМЗ», включающие стоки и шламы всех производств, размещаются в приемниках хвостохранилища АО «УМЗ». Приемники откры-

того типа, выполнены в виде прудов (карт). По данным на 2014 год общее количество РАО составило 6 411 667,7 м³ с суммарной активностью 194,33 ГБк.

ЖРО, нарабатываемые в процессе деятельности исследовательского реактора ИВГ.1М, поступают в специальную канализацию. По системе специальной канализации ЖРО поступают в емкости сбора сточных загрязненных вод. Затем жидкие слабоактивные отходы концентрируются в специальных сооружениях путем выпаривания. Сооружение, предназначенное для сбора ЖРО, принимает отходы КИР «Байкал-1» и КИР ИГР РГП НЯЦ РК, имеет полезный объем – 46 000 м³, а фактически в настоящее время объем заполнен до уровня замачиваемого слоя – 18000 м³, т.е. заполнен на 40%.

ЖРО, нарабатываемые в результате деятельности ВВР-К, цементируются совместно с ТРО и поступают в пункт захоронения радиоактивных отходов (ПЗРО), при этом оценить весь объем ЖРО не представляется возможным. Общая активность захороненных с 1988 года на ПХРО жидких и твердых отходов на данное время составляет 328,011 ТБк [11].

Объемы ЖРО ежегодно увеличиваются за счет работы предприятий атомной отрасли – исследовательских реакторов, уранодобывающей промышленности и обогатительных фабрик для переработки руд.

Скорость образования ЖРО в ИЯФ составляет в среднем от 6 до 24 м³/год [11].

Средняя скорость образования ЖРО на реакторных комплексах ИГР, ИВГ.1М – 2,0...3,0 м³/год [11].

На выведенной из эксплуатации реакторной установке БН-350 в настоящее время ЖРО не образуются, но оценочное количество ЖРО от проведения работ, связанных с приведением РУ БН-350 в состояние безопасного хранения, может составить до 12 000 м³ [12].

На АО «УМЗ» по данным на 2014 год ежегодно образуется около 50 000 тонн ЖРО, что составляет около 45 000 м³/год (при средней плотности ЖРО 1120 кг/м³) [11].

Учитывая динамику образования ЖРО к 2050 году, без учета переработки, в Казахстане будет накоплено около 18 350 тыс. м³.

Таким образом, при обращении с ЖРО первым шагом является их сбор и сортировка. ЖРО подлежат разделному сбору по видам в местах образования (п. 717–720 Санитарных правил [5]). Все действия – от сбора до хранения – должны быть документированы с использованием форм (журналы, паспорта, акты) согласно Правилам [10].

Емкости для накопления должны быть герметичными, устойчивыми к коррозионному и химическому воздействию, при обязательном обеспечении радиационного контроля (п. 718–719 Санитарных правил [5]). Временное хранение допускается только в специальных баках или хранилищах с системами вторичных барьеров, исключающих миграцию радионукли-

дов в окружающую среду (п. 724–725 Санитарных правил [5]).

Выбор метода переработки определяется физико-химическими характеристиками ЖРО (состав, активность и т.д.), свойствами матричных материалов и предполагаемым способом хранения или захоронения кондиционированных отходов.

Свойства ЖРО

В зависимости от источника образования ЖРО имеют различный химический и радионуклидный состав. Основой классификации радиоактивных отходов являются их агрегатное состояние, происхождение, уровень радиоактивности, период полураспада радионуклидов [2].

Естественные радионуклиды в составе ЖРО представлены α -излучающими радионуклидами урана (^{235}U , ^{238}U), тория (^{232}Th) и продуктами их радиоактивного распада ($^{230,234}\text{Th}$, $^{224,226,228}\text{Ra}$, ^{210}Po , ^{228}Ac и др.). К естественным относится также β -излучающий радионуклид ^{40}K .

Компоненты отработавшего ядерного топлива представлены в ЖРО продуктами деления урана и других делящихся материалов и трансурановыми элементами (ТУЭ). К основным продуктам деления относятся: ^{90}Sr , ^{95}Zr , ^{95}Nb , ^{99}Tc , ^{106}Ru , ^{125}Sb , ^{131}I , $^{134,137}\text{Cs}$, ^{144}Ce , $^{152,154}\text{Eu}$ и др. ТУЭ в составе ЖРО представлены радионуклидами: ^{237}Np , ^{239}Pu , $^{241,243}\text{Am}$, ^{244}Cm .

Продукты нейтронной активации теплоносителей и конструкционных материалов в ЖРО в основном представлены следующими радионуклидами: ^3H , ^{24}Na , ^{54}Mn , ^{60}Co , ^{63}Ni , ^{65}Zn .

Основными формами существования радионуклидов в водных растворах являются: ионная (простые и комплексные положительно и отрицательно заряженные мономерные и полимерные ионы); коллоидная (истинные коллоиды); псевдоколлоидная (радионуклид сорбирован на коллоидных частицах с размером 0,001–0,1 мкм); грубодисперсная (радионуклид ассоциирован с частицами более 0,1 мкм).

Состав ЖРО определяется следующими основными показателями: общим солесодержанием; концентрацией неорганических катионов и анионов; концентрацией водородных ионов (рН); окисляемостью; концентрацией органических веществ; концентрацией взвешенных веществ; суммарной активностью и радионуклидным составом.

Общее солесодержание представляет собой сумму всех растворимых веществ, присутствующих в ЖРО. Солевой состав ЖРО определяется в основном присутствием неорганических соединений, образованных катионами Na^+ , K^+ , NH_4^+ , Ca_2^+ , Mg_2^+ и анионами Cl^- , SO_4^{2-} , NO_3^- , HCO_3^- , CO_3^{2-} , PO_4^{3-} . Солесодержание ЖРО может значительно варьироваться в зависимости от источника образования, выделяют следующие группы ЖРО с общим солесодержанием:

- бессолевого (менее 0,01 г/дм³);
- малосолевого (0,01–1,0 г/дм³);
- среднесолевого (1–10 г/дм³);
- высокосолевого (более 10 г/дм³).

Кроме того, в ЖРО могут присутствовать примеси, которые условно можно разделить на четыре группы:

В первую группу входят нерастворимые в воде взвеси, песок, продукты коррозии (нерастворимые оксиды и гидроксиды), некоторые органические вещества, например, измельченные ионообменные смолы, а также сорбированные на частицах взвеси радионуклиды.

Во вторую группу объединяются примеси, находящиеся в коллоидном состоянии (тонкодисперсные образования), и высокомолекулярные вещества. К примесям этой группы относятся минеральные масла, различные моющие препараты, некоторые органические вещества, используемые для дезактивации, радиоколлоиды, а также органоинеральные частицы почв и грунтов.

В третью группу входят молекулярно-растворимые соединения – вещества, растворяющиеся в растворителе на уровне отдельных молекул, не распадаясь на ионы, растворенные газы (O_2 , CO_2 , N_2 и другие), некоторые органические соединения, молекулы которых обязательно содержат атомы углерода, связанные с водородом, кислородом, азотом и другими элементами.

В четвертую группу входят электролиты – вещества диссоциирующие в воде на ионы (сильные и слабые). Сильные электролиты – вещества, которые в водном растворе практически полностью распадаются на ионы, слабые электролиты – вещества, которые в растворе распадаются на ионы лишь частично.

Основная сложность переработки многокомпонентных ЖРО заключается в необходимости выделения радионуклидов, иногда селективного, из агрессивных химических растворов с высоким содержанием солей, в большинстве случаев, имеющих нерастворимые примеси и органические вещества.

При выборе метода очистки ЖРО определяющим фактором является форма нахождения радионуклидов в очищаемом растворе. Основными методами удаления радиоактивных примесей в зависимости от их фазово-дисперсного состояния в водных растворах являются.

Нерастворимая форма:

- грубодисперсные частицы (взвеси) с размером частиц $>10^4$ нм (>10 мкм), для удаления радионуклидов применяются методы отстаивания, механической фильтрации, коагуляции;
- мелкодисперсные частицы (микровзвеси) с размером частиц $10^2 \dots 10^4$ нм (0,1–10 мкм), для удаления радионуклидов применяются методы микрофильтрации, коагуляции;
- коллоиды (псевдоколлоиды) с размером частиц с размером частиц 10...100 нм (0,01–0,1 мкм), для уда-

ЖИДКИЕ РАДИОАКТИВНЫЕ ОТХОДЫ, СВОЙСТВА, МЕТОДЫ ПЕРЕРАБОТКИ. ПРОБЛЕМЫ И ПУТИ ИХ РЕШЕНИЯ

ления радионуклидов применяются методы ультра-фильтрации, коагуляции.

Растворимая форма:

- молекулы с размером 1...10 нм (0,001–0,01 мкм), для удаления радионуклидов применяются методы адсорбции, нанофильтрации;

- ионы размером <1 нм (<0,001 мкм), применяются методы удаления ионного обмена, нанофильтрации, обратного осмоса, электродиализа, химического осаждения.

Анализ подходов к переработке ЖРО

Одно из ключевых требований в системе обращения с ЖРО является их перевод в твердое состояние с целью обеспечения долговременной радиационной, химической и механической стабильности.

Этот процесс реализуется посредством выбора и применения подходящей матрицы, в которую отходы включаются или иммобилизуются. От свойств матрицы зависит способность кондиционированного продукта сохранять целостность, предотвращать миграцию радионуклидов и выдерживать внешние воздействия в течение всего времени хранения или захоронения. Краткая информация о методах отверждения на основании требований [3, 4, 5, 11, 12, 16, 17, 18] приведена в таблице 1.

Стандарт [18] устанавливает единый перечень показателей, которым должны соответствовать все

кондиционированные ВАО по прочностным характеристикам, химической и радиационной стойкости, водоустойчивости и совместимости с упаковкой. В таблице 2 систематизированы основные требования к составу, структуре и физико-механическим свойствам матриц, используемых для кондиционирования ЖРО [10,13,14,15,16,17,18]

Ограничения по составу и допустимой нагрузке минимизируют возможность перенасыщения матрицы и обеспечивают сохранение ее прочности и стабильности в различных условиях внешней среды. Требования к однородности структуры направлены на предотвращение локальных зон повышенной миграции радионуклидов. Ограничения пористости продиктованы задачей минимизации путей фильтрации воды и выщелачивания радионуклидов.

Для обеспечения механической стабильности при транспортировке и хранении нормируются показатели прочности на сжатие. Морозостойкость обеспечивает сохранение прочностных характеристик в условиях сезонных колебаний температур. Водоустойчивость служит критерием ограничения выщелачивания радионуклидов в окружающую среду и гарантией стабильности структуры матрицы в условиях затопления подземных хранилищ подземными водами.

Радиационная стойкость является контрольным параметром, исключающим разрушение структуры под воздействием ионизирующего излучения. Тер-

Таблица 1. Сводная информация о применимости разных методов отверждения ЖРО

Тип отверждения	Ограничения	Преимущества	Недостатки
Цементирование	- удельная активность до 3,7 МБк/л, - содержание солей до 200 г/л, - химический состав: отсутствие значительных количеств органики, масел, ПАВ и комплексобразователей, - кислотность / щелочность: допускается pH в диапазоне 6...12 после нейтрализации, - газообразование: содержание нитратов/органики ограничивается во избежание выделения газов	технологическая простота, низкая температура процесса	выщелачивание солей при высокой минерализации, снижение прочности при наличии органических примесей
Битумирование	- минерализация: более 200 г/л, - солевая нагрузка в готовом компаунде ≤ 50%, - удельная активность: не выше 10¹⁰ Бк/кг (β-излучатели) и 10⁶ Бк/кг (α-излучатели), - не допускаются горючие органические примеси, окислители и нестабильные соединения, способные вызывать самонагрев или радиолиз	гидрофобность полученного компаунда. Допустимые компоненты: растворы с высоким содержанием солей	пожароопасность, возможность газообразования и радиолиза; необходимо применение систем вентиляции и контроля
Остекловывание (витрификация)	- минерализация: возможно введение солей до 15...20% масс. от стекломассы, - удельная активность: допустима для высокоактивных отходов (ВАО), включая продукты деления (Cs-137, Sr-90) и актиниды, - химический состав: наличие нитратов и сульфатов учитывается при подборе состава стекла (устойчивые боросиликатные или фосфатные системы), - органика должна быть предварительно удалена	обеспечивает высокую химическую и радиационную стойкость полученной матрицы	высокая энергоемкость процесса и необходимость подбора состава стекла
Полимерное компаундирование и иные методы	- минерализация: допустима умеренная; избыток солей может снижать долговечность компаунда, - активность: в основном низко- и среднеактивные ЖРО (НАО и САО). - химический состав: отходы с высоким содержанием органики, масел, эмульсий, где цемент и стекло неэффективны	допускаются как альтернатива при демонстрации соответствия Нормативам [11] и условиям размещения на ПХ/ПЗРО	Ограничения: радиационная стойкость полимеров ниже, чем у стекла и цемента, поэтому не применяются для ВАО

ЖИДКИЕ РАДИОАКТИВНЫЕ ОТХОДЫ, СВОЙСТВА, МЕТОДЫ ПЕРЕРАБОТКИ. ПРОБЛЕМЫ И ПУТИ ИХ РЕШЕНИЯ

Таблица 2. Основные требования к составу, структуре и физико-механическим свойствам матриц, используемых для кондиционирования ЖРО

№ п/п	Требование	Тип матрицы		
		Цементная	Битумная	Стеклообразные
1	Состав матрицы			
1.1	Совместимость с отходами	Матрица должна обеспечивать химическую инертность по отношению к радионуклидам и солям, присутствующим в ЖРО		
1.2	Ограничение содержания отходов	Доля введенных ЖРО должна находиться в пределах, установленных нормативами:		
		≤ 30...40 масс.%	≤ 50 масс.% солей	≤ 15...20 масс.% солей
2	Структура матрицы			
2.1	Однородность	Матрица должна быть однородной, без трещин, пустот, слоистости и фазовых включений		
2.2	Пористость	≤ 10...15%	≤ 10...15%	≤ 5%
2.3	Распределение радионуклидов	Исключается локальная концентрация солей или зон повышенной активности		
2.4	Сохранение формы	Устойчивость к деформациям, усадке, растрескиванию и вспучиванию		
3	Физико-механические свойства матрицы			
3.1	Прочность на сжатие	≥ 4,9 МПа (50 кг/см²)	устойчивость к нагрузкам и вибрациям без разрушения	≥ 30 МПа
3.2	Ударная вязкость и механическая стойкость	Компактные формы должны выдерживать механические воздействия при транспортировке		
3.3	Морозостойкость (термоциклирование)	≥ 25...30 циклов замораживания/оттаивания при сохранении ≥ 75...80% исходной прочности		
4	Химическая стойкость матрицы			
4.1	Допустимые скорости выщелачивания радионуклидов	Cs ≤ 1·10 ⁻³ г/см² сут	Cs ≤ 1·10 ⁻⁴ г/см² сут	Cs ≤ 1·10 ⁻⁵ г/см² сут; Sr ≤ 1·10 ⁻⁶ г/см² сут
4.2	Коррозионная совместимость	Матрица не должна выделять агрессивные среды, вызывающие коррозию контейнеров		
4.3	Стабильность при контакте с подземными водами	Обеспечение долговременной изоляции радионуклидов, выдержка в воде 90 сут, при которой допускается снижение механической прочности ≤ 25%		
5	Радиационная стойкость матрицы			
5.1	Поглощенная доза ИИ, при которой снижение механической прочности менее 25%	до 10 ⁷ Гр	до 10 ⁷ Гр	до 10 ⁸ Гр
5.2	Термостойкость	устойчивость до 200 °С	температура вспышки ≥ 250 °С, воспламенения ≥ 300 °С, самовоспламенения ≥ 400 °С	устойчивость до 1000 °С
		Матрица должна сохранять целостность при тепловыделении радионуклидов.		

мостойкость гарантирует устойчивость матрицы к тепловыделению радионуклидов и внешним температурным воздействиям. Для битумных компаундов параметр газовыделения критичен: его соблюдение предотвращает накопление горючих и взрывоопасных газов. Отсутствие коррозионного воздействия матрицы на материалы контейнеров обеспечивает сохранение целостности упаковки в течение всего срока хранения кондиционированных отходов.

Каждый из описанных методов иммобилизации зависит от состава ЖРО и свойств его компонентов, поэтому выбор метода или комплекса методов имеет свои специфики и ограничения. В каждом отдельном случае следует разработать индивидуальную технологическую схему очистки ЖРО, учитывая большое разнообразие в химическом и радионуклидном составе ЖРО.

Анализ применимости разных методов отверждения ЖРО (таблица 1) и требований к конечной форме отходов (таблица 2) показывает, что универсальной технологии для всех типов ЖРО не существует.

Максимальный объем отходов зафиксирован в Восточно-Казахстанской области на картах хвостох-

ранилища АО «УМЗ», однако при оценке данных массивов необходимо разделять фазово-дисперсное состояние РАО. Около 80–90% этих открытых прудов-приемников заполнено твердой фазой отходов, а технологические растворы низкого уровня активности (НАО) находятся в постоянном динамическом цикле поверхностного испарения и восполнения солевого баланса. Жидкие РАО предприятия АО «УМЗ» представляют собой кислый раствор, содержащий высокие концентрации нитратов и фторидов, а также урановые радионуклиды (²³⁸U, ²³⁵U, ²³⁴U). Наличие азотной и плавиковой кислот приводит к низкому pH и значительной коррозионной активности такого ЖРО. При подготовке к захоронению необходимо перевести эти отходы в стабильную твердую матрицу, нейтрализовав кислотность и прочно зафиксировав как токсичные анионы (NO₃⁻ и F⁻) так и уран.

В отличие от этого, большая часть жидкой фазы отходов ТОО «СГХК» находится в виде пульпы (желеобразном состоянии). Переработка такого типа отходов возможна методами ультрафильтрации и обратного осмоса [19]. Образующийся в результате переработки

концентрат, содержащий радионуклиды, после обезвреживания захоранивается как твердые радиоактивные отходы (ТРО).

С радиохимической и инженерной точек зрения наиболее сложным объектом для кондиционирования являются кубовые остатки и щелочные эмульсии реакторной установки БН-350 (ТОО «МАЭК»). Несмотря на то, что их объем минимален в масштабах страны, данные отходы относятся к категории CAO, характеризуются высокой минерализацией (до 530 г/л сухого остатка) и высокой удельной активностью основного долгоживущего нуклида-излучателя – ^{137}Cs (до $2,1 \cdot 10^8$ Бк/л). Для обеспечения надежной изоляции и безопасного длительного хранения высокосолевых жидких радиоактивных отходов рекомендуется внедрение комплексной многоступенчатой технологической схемы кондиционирования. Данный подход должен сочетать предварительную сорбционную очистку с использованием селективных неорганических сорбентов для избирательного извлечения и локализации доминирующих долгоживущих нуклидов (^{137}Cs и ^{90}Sr), последующее глубокое концентрирование остаточного макрокомпонентного солевого раствора с целью минимизации его физического объема, и финальный перевод полученных высокоактивных шламов и кубовых остатков в химически и радиационно-стойкую твердую матрицу (боросиликатное стекло или модифицированный цементный компаунд).

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Рассматривая современные технологии переработки ЖРО в мире необходимо обратить внимание на ключевые аспекты и современные методы, базирующиеся на принципах минимизации объемов и глубоком кондиционировании.

При переработке полиметаллического минерального сырья, содержащего редкие и редкоземельные элементы (РЗЭ), образуются значительные объемы ЖРО, содержащие естественные радионуклиды – торий, уран и дочерние продукты их распада. В целом, действующие технологии обеспечивают соблюдение установленных норм, но имеют ряд существенных недостатков. Одним из них является то, что радиоактивные элементы разбавляются неактивными веществами, входящими в состав сырья, реагентов и других материалов, используемых в технологии. Это приводит к тому, что объем отходов, направляемых в хвостохранилища, неоправданно завышен из-за разбавления нерадиоактивными веществами, что требует существенных некомпенсируемых и возрастающих капитальных вложений для строительства новых хранилищ. В целях минимизации образования отходов используются замкнутый водооборот и создание систем, базирующихся на дифференцированном сборе и переработке ЖРО в зависимости от химического состава и уровня активности.

При разработке технологических схем АЭС нового поколения предусматривается организация раздельного сбора и переработки теплоносителя первого контура и трапных вод. Перспективной для минимизации отходов является технология селективного выделения из ЖРО долгоживущих радионуклидов Cs и Co в небольшие объемы в форме труднорастворимых соединений. Для повышения эффективности очистки проводится предварительная обработка ЖРО по удалению масел, растворителей, механических примесей фильтрацией или другими методами, что приводит к сокращению общих объемов ЖРО.

На АЭС с ВВЭР получило распространение глубокое концентрирование кубового остатка ЖРО на прямоточных кожухотрубных выпарных аппаратах. В процессе охлаждения концентрата образуется монолитная масса, основу которой составляют кристаллогидраты полиборатных солей натрия. Осушенные отходы подвергают сухому цементированию, включению в полиэфирные смолы, битумные компаунды и т.д.

Мировая практика переработки ЖРО направлена на их концентрирование, очистку воды и перевод опасных компонентов в твердую, стабильную форму. Это достигается комбинацией технологических процессов, предусматривающих:

- предварительную обработку и концентрирование методами выпаривания (дистилляции), ультрафильтрации, обратного осмоса, ионного обмена;
- очистку от органических соединений методами коагуляции, сорбции, окисления;
- отверждение (кондиционирование) методами цементирования, битумирования, остекловывания (витрификации).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенный обзор показал, что жидкие радиоактивные отходы являются одним из наиболее сложных объектов обращения вследствие значительного разнообразия их химического и радионуклидного состава, различного уровня активности, наличия органических примесей и высокого содержания солей. Универсальной технологии переработки ЖРО не существует, поэтому выбор технологической схемы должен осуществляться с учетом происхождения отходов, формы нахождения радионуклидов и требований к конечному продукту переработки.

Мировая практика подтверждает, что наиболее эффективными являются комплексные технологии, сочетающие предварительную подготовку отходов, селективное извлечение наиболее опасных долгоживущих радионуклидов, концентрирование растворов и последующее кондиционирование радиоактивных концентратов методами цементирования, битумирования или остекловывания. Такой подход позволяет существенно уменьшить объемы отходов, направляе-

мых на долговременное хранение и захоронение, повысить экологическую безопасность и снизить затраты на создание новых объектов хранения.

Для Республики Казахстан совершенствование системы обращения с жидкими радиоактивными отходами приобретает особую актуальность в условиях развития атомной энергетики, реализации проекта по строительству первой атомной электростанции и дальнейшего развития предприятий ядерного топливного цикла. Принятие Закона Республики Казахстан «Об обращении с радиоактивными отходами», создание института национального оператора и внедрение единой системы учета радиоактивных отходов будет способствовать формированию необходимых организационно-правовых условий для повышения эффективности государственного регулирования в данной сфере.

Перспективными направлениями развития системы обращения с ЖРО в Казахстане являются внедрение технологий минимизации образования отходов, организация их раздельного сбора, применение современных методов глубокой очистки и селективного извлечения радионуклидов, а также создание специализированных региональных комплексов по переработке и кондиционированию радиоактивных отходов. Реализация указанных мероприятий позволит обеспечить безопасное обращение с ЖРО на всех этапах жизненного цикла, снизить экологические риски, оптимизировать затраты на их хранение и захоронение и привести национальную систему обращения с радиоактивными отходами в соответствие с современными международными требованиями и рекомендациями МАГАТЭ.

Работа проводилась при финансовой поддержке Комитета науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан в рамках ИРН BR24993140 «НИР по обоснованию выбора и реализации технологии переработки жидких радиоактивных отходов».

ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES:

1. Об использовании атомной энергии: Закон Республики Казахстан от 12 января 2016 года № 442-V ЗРК.
2. Экологический кодекс Республики Казахстан: Кодекс Республики Казахстан от 2 января 2021 года № 400-VI ЗРК.
3. Правила организации сбора, хранения и захоронения радиоактивных отходов и отработавшего ядерного топлива: утв. приказом Министра энергетики Республики Казахстан от 8 февраля 2016 года № 39.
4. Правила транспортировки ядерных материалов, радиоактивных веществ и радиоактивных отходов: утв. приказом Министра энергетики Республики Казахстан от 28 мая 2021 года № 183.
5. Санитарно-эпидемиологические требования к радиационно-опасным объектам: Санитарные правила: утв. приказом Министра здравоохранения Республики Казахстан от 25 августа 2022 года № КР ДСМ-90.
6. Технологические и организационные аспекты обращения с радиоактивными отходами. – Вена: МАГАТЭ, 2005. – (IAEA-TCS-27).
7. Обращение с радиоактивными отходами низкого и среднего уровня активности перед их захоронением. – Вена: МАГАТЭ, 2005. – STI/PUB/1150. – ISBN 92-0-410705-7. – ISSN 1020-5845.
8. Обращение с радиоактивными отходами атомных электростанций и исследовательских реакторов перед захоронением: специальное руководство по безопасности № SSG-40. – Vienna: International Atomic Energy Agency, 2016.
9. Национальный доклад Республики Казахстан по Объединенной конвенции о безопасности обращения с отработавшим топливом и о безопасности обращения с радиоактивными отходами. – Астана, 2014. – 123 с.
10. Правила обеспечения промышленной безопасности при обращении с источниками ионизирующего излучения: утв. приказом исполняющего обязанности Министра по инвестициям и развитию Республики Казахстан от 26 декабря 2014 года № 301.
11. Нормативы на радиоактивные отходы: утв. приказом Министра энергетики РК от 16 июня 2021 года № 200.
12. Гигиенические нормативы к обеспечению радиационной безопасности: утв. приказом Министра здравоохранения Республики Казахстан от 2 августа 2022 года № КР ДСМ-71.
13. Disposal of Radioactive Waste. – Vienna: International Atomic Energy Agency, 2011. – (IAEA Safety Standards Series No. SSR-5).
14. Классификация радиоактивных отходов: руководство по безопасности № GSG-1: Нормы безопасности МАГАТЭ для защиты людей и окружающей среды. – Вена: МАГАТЭ, 2014.
15. Predisposal Management of Radioactive Waste. – Vienna: International Atomic Energy Agency, 2009. – (IAEA Safety Standards Series No. WS-R-2).
16. СТ РК 3723–2021. Отходы радиоактивные цементированные. Общие технические требования. – Введ. 2021-11-04. – Нур-Султан: Госстандарт Республики Казахстан, 2021.
17. СТ РК 3722–2021. Отходы радиоактивные битумированные. Общие технические требования. – Введ. 2021-11-04. – Нур-Султан: Госстандарт Республики Казахстан, 2021.
18. СТ РК 3741–2021. Отходы высокоактивные отвержденные. Общие технические требования. – Введ. 2021-11-02. – Нур-Султан: Госстандарт Республики Казахстан, 2021.
19. Испытания мембранно-сорбционной очистки воды конечного водоема Теченского каскада / А. В. Савкин, С. А. Токарев, Ю. В. Глаголенко [и др.] // Атомная энергия. — 2008. — Т. 104, вып. 3. — С. 165–171. — URL: springer.com.

**СҰЙЫҚ РАДИОАКТИВТІ ҚАЛДЫҚТАР, ҚАСИЕТТЕРІ, ҚАЙТА ӨНДЕУ ӘДІСТЕРІ.
ПРОБЛЕМАЛАР ЖӘНЕ ОЛАРДЫ ШЕШУ ЖОЛДАРЫ**

В. В. Яковлев., Ю. Ю. Бакланова*, О. С. Букина, В. В. Бакланов, А. Г. Коровиков

ҚР ҰЯО «Атом энергиясы институты» филиалы, Курчатова, Қазақстан

** Байланыс үшін e-mail: basalai@nnc.kz*

Мақалада сұйық радиоактивті қалдықтармен (СРҚ) жұмыс істеудің қазіргі заманғы тәсілдеріне шолу беріліп, олардың негізгі қасиеттері, жіктелуі, химиялық және радионуклидтік құрамы қаралды. СРҚ-ны қайта өңдеудің олардың құрамының әртүрлілігіне, тұздың жоғары болуына, органикалық қоспалардың болуына және радионуклидтерді селективті алу қажеттілігіне байланысты негізгі проблемалар талданды. СРҚ тазарту және баптаудың қолданыстағы технологияларын талдау орындалды, сұйық радиоактивті қалдықтарды өңдеудің халықаралық тәжірибесі қаралды, сондай-ақ Қазақстан Республикасында СРҚ-мен жұмыс істеудің қазіргі жай-күйін бағалау келтірілді. Пайда болатын қалдықтардың көлемін азайту, радионуклидтерді терең тазарту және иммобилизациялау технологияларын енгізу мәселелеріне ерекше назар аударылды, сондай-ақ радиоактивті қалдықтарды баптау үшін пайдаланылатын матрицалардың құрамына, құрылымына және физикалық-механикалық қасиеттеріне қойылатын негізгі талаптарға талдау жүргізілді.

СРҚ қайта өңдеу жөніндегі мамандандырылған өңірлік кешендерді құрудың және осы салада мемлекеттік басқарудың бірыңғай жүйесін енгізудің орындылығы негізделген. Экологиялық тәуекелдерді төмендетуді, радиоактивті қалдықтармен жұмыс істеу қауіпсіздігін арттыруды және халықаралық талаптарға сәйкестікті қамтамасыз ететін заманауи қайта өңдеу технологияларын кешенді қолдану қажеттілігі туралы қорытынды жасалды.

Түйін сөздер: *сұйық радиоактивті қалдықтар, СРҚ-ны қайта өңдеу, матрицаларға қойылатын талаптар, иммобилизация, критерийлер.*

**LIQUID RADIOACTIVE WASTE, PROPERTIES AND PROCESSING METHODS.
PROBLEMS AND WAYS TO SOLVE THEM**

V.V. Yakovlev, Yu.Yu. Baklanova*, O.S. Bukina, V.V. Baklanov, A.G. Korovikov

Branch "Institute of Atomic Energy" RSE NNC RK, Kurchatov, Kazakhstan

** E-mail for contacts: basalai@nnc.kz*

The article provides an overview of modern approaches to the management of liquid radioactive waste (LRW), their basic properties, classification, chemical and radionuclide composition are considered. The main problems of LRW processing related to the diversity of their composition, high salinity, the presence of organic impurities and the need for selective extraction of radionuclides have been analyzed. The existing technologies for the LRW treatment and conditioning have been analyzed, the international experience in the processing of liquid radioactive waste has been reviewed, and an assessment of the current state of LRW management in the Republic of Kazakhstan has been given. Special attention is paid to the issues of minimizing the volume of the generated waste, the introduction of technologies for deep treatment and radionuclide immobilization, and the analysis of the basic requirements for the composition, structure and physico-mechanical properties of matrices used for conditioning radioactive waste.

The expediency of developing specialized regional LRW processing facilities and introducing a unified public management system in this area has been substantiated. It has been concluded that the integrated use of contemporary recycling technologies is necessary to reduce environmental risks, improve the safety of radioactive waste management and comply with international requirements.

Keywords: *liquid radioactive waste, LRW processing, matrix requirements, immobilization, criteria.*