



УДК 621.039.58

СОСТОЯНИЕ И ОСНОВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ СОЗДАНИЯ ПАРКА КОНТЕЙНЕРОВ ДЛЯ КОНДИЦИОНИРОВАНИЯ И ЗАХОРОНЕНИЯ РАДИОАКТИВНЫХ ОТХОДОВ

Павлов Д.И., Сорокин В.Т., д.т.н. (info@atomproekt.com) (АО «АТОМПРОЕКТ»),
Гатауллин Р.М., д.т.н. (mail@345mz.ru) (АО «345 механический завод»),
Шарафутдинов Р.Б., к.т.н. (charafoutdinov@secnrs.ru) (ФБУ «НТЦ ЯРБ»)

Приведены конструкционные материалы, применяемые при изготовлении контейнеров для радиоактивных отходов всех классов. Представлены номенклатура и характеристики используемых и разрабатываемых контейнеров на предприятиях отрасли. Показаны варианты кондиционирования радиоактивных отходов 1 – 4 классов. Сформулированы направления создания парка контейнеров.

► **Ключевые слова:** радиоактивные отходы, конструкционные материалы, парк контейнеров.

THE STATE AND MAIN DIRECTIONS OF CREATING A FLEET OF CONTAINERS FOR CONDITIONING AND DISPOSAL OF RADIOACTIVE WASTE

Pavlov D., Sorokin V., Ph. D. (JSC «ATOMPROEKT»),
Gataullin R., Ph. D. (JSC «345 mechanical plant»),
Sharafutdinov R., Ph. D. (SEC NRS)

The structural materials, used in the production of containers for all classes of radioactive waste, are given in the article. The nomenclature and characteristics of containers, which used and develop in the industry, are shown. In the article are also presented the options for conditioning of 1 - 4 classes of radioactive waste and are formulated the ways for containers' fleet creation.

► **Key words:** radioactive waste, structural materials, containers' fleet.

Анализ существующей практики и проектных решений по обращению с радиоактивными отходами (РАО) показал необходимость создания парка унифицированных контейнеров, необходимых для кондиционирования и захоронения РАО. Это обусловлено тем, что существующий парк контейнеров весьма обширен, далеко не всегда оптимален и постоянно расширяется от проекта к проекту. В этой ситуации представляется целесообразной оптимизация парка контейнеров (упаковок) как один из действенных механизмов снижения финансовых затрат на подготовку РАО к захоронению [1].

Наличие унифицированного парка контейнеров позволит упростить транспортно-технологическую схему обращения с упаковками РАО на стадиях хранения, транспортирования и захоронения, а также исключить необходимость разработки контейнеров для каждого проекта.

При разработке парка контейнеров необходимо учитывать классификацию РАО для захоронения и критерии приемлемости отходов, определяющие требования к упаковкам РАО и регламентирующие способ захоронения в зависимости от уровня активности отходов и радионуклидного состава.

Для захоронения РАО подразделяются на шесть классов, каждый из которых характеризуется номенклатурой отходов, содержанием долгоживущих и короткоживущих радионуклидов, способом захоронения [2]. Классификация РАО представлена в табл. 1.

Для каждого класса РАО разработаны общие критерии приемлемости для захоронения, выраженные через требования к форме отходов и упаковке РАО [3].

В табл. 2 представлены наиболее важные требования к упаковкам для отходов 1, 2, 3 и 4 классов, определяющие требования к массогабаритным характеристикам контейнеров, их конструкциям и конструкционным материалам. Отсутствие критериев приемлемости для захоронения РАО 5 и 6 классов обусловлено тем, что для отходов этих классов не предполагается использование контейнеров с целью их кондиционирования и захоронения.

В настоящей статье авторы предлагают рассмотреть материалы, пригодные для изготовления контейнеров для РАО различных классов, номенклатуру и характеристики используемых и разрабатываемых контейнеров, а также обсудить направления создания парка унифицированных контейнеров для атомной отрасли.

Таблица 1

Классификация РАО для захоронения

Класс РАО	Критерии отнесения РАО	Способ захоронения
Первый	Твердые высокоактивные РАО, тепловыделяющие	Подлежат захоронению в пунктах глубинного захоронения РАО с предварительной выдержкой в целях снижения их тепловыделения
Второй	Твердые высокоактивные РАО и долгоживущие среднеактивные РАО	Подлежат захоронению в пунктах глубинного захоронения РАО без предварительной выдержки в целях снижения их тепловыделения
Третий	Твердые среднеактивные РАО и долгоживущие низкоактивные РАО	Подлежат захоронению в пунктах приповерхностного захоронения РАО, размещаемых на глубине до 100 метров
Четвертый	Твердые низкоактивные РАО и очень низкоактивные отходы	Подлежат захоронению в пунктах приповерхностного захоронения РАО, размещаемых на одном уровне с поверхностью земли
Пятый	Жидкие среднеактивные РАО, низкоактивные РАО	Подлежат захоронению в пунктах глубинного захоронения РАО, сооруженных и эксплуатируемых на день вступления в силу Федерального закона от 11 июля 2011 г. № 190-ФЗ «Об обращении с радиоактивными отходами ...»
Шестой	РАО с повышенным содержанием природных радионуклидов	Подлежат захоронению в пунктах приповерхностного захоронения РАО

Таблица 2

Требования к упаковкам для различных классов РАО

Требования	Классы РАО			
	1	2	3	4
Тепловыделение упаковки РАО	Не более 2 кВт/м ³	Не более 100 Вт/м ³	-	-
Мощность дозы, мГр/ч	-	-	Не более 10 мГр/ч	Не более 2 мГр/ч на поверхности РАО
Механическая прочность при сжатии	Не менее 10 МПа	Не менее 10 МПа	Не ниже требований к упаковке типа А, более 5 МПа	-
Сохранение изолирующей способности упаковки РАО, год	Не менее 1000 лет	Не менее 1000 лет	Не менее 100 лет	До размещения на захоронение
Скорость выхода радионуклидов из упаковки (массовая доля активности, вышедшей из упаковки РАО за год)	-	-	Не более 10 ⁻² /год для трития; не более 10 ⁻³ /год для β,γ- излучающих радионуклидов; не более 10 ⁻⁴ /год для α-излучающих радионуклидов	-
Термическая стойкость упаковки РАО	Сохранение структуры, прочности и изолирующих свойств при температуре до 450 °С	-	-	-
Устойчивость к термическим циклам	-	Сохранение прочности и изолирующих свойств после 30 циклов замораживания и оттаивания (-40... +40 °С)	Сохранение прочности и изолирующих свойств после 30 циклов замораживания и оттаивания (-40 ... +40 °С)	-
Радиационная стойкость упаковки РАО	Сохранение прочности не менее 20 % от установленной при облучении дозой до 10 ⁸ Гр для β,γ- излучающих радионуклидов, 10 ¹⁹ α-распадов /см ³	Сохранение прочности не менее 20 % от установленной при облучении дозой до 10 ⁶ Гр или прогнозируемой дозой	Снижение прочности не более, чем на 20 % от установленного предела при облучении дозой 10 ⁶ Гр или прогнозируемой дозой	-

Конструкционные материалы для контейнеров

При выборе конструкционного материала контейнеров необходимо учитывать ряд факторов, основными из которых являются: всевозможные виды коррозии со стороны отходов и внешней среды, радиация, тепло, внутреннее и внешнее давление, а также воздействия при транспортных операциях в нормальных условиях и при аварийных ситуациях. При выборе конструкционного мате-

риала необходимо также учитывать оптимизацию соотношения между защитными свойствами и стоимостью контейнера для различных классов РАО (принцип ALARA).

Для высокоактивных отходов в большинстве стран в качестве конструкционного материала наибольшее применение получила нержавеющая сталь. Также рассматриваются медь, карбид кремния, высокопрочный чугун. Для средне- и низкоактивных отходов используется углеродистая сталь, бетон и фибробетон, полиэтилен.

Нержавеющая сталь

Нержавеющая сталь используется как для изготовления контейнеров, так и в качестве облицовки в комбинации с другими материалами. Скорость коррозии стали 304L в условиях морского климата составляет по консервативной оценке менее 0,016 мм/год [4]. Хорошее сочетание обрабатываемости, механических свойств и коррозионной стойкости, низкая способность к сорбции радионуклидов и хорошая дезактивируемость обуславливают широкое применение нержавеющей стали в качестве конструкционного материала контейнеров, а благодаря широкому распространению нержавеющей стали в различных отраслях промышленности производство контейнеров и технология их герметизации (заварки) достаточно просты и хорошо освоены.

Рафинированная медь

В Швеции и Финляндии корпус контейнеров для захоронения отработавшего ядерного топлива (ОЯТ) планируется изготавливать из рафинированной меди с толщиной стенки 50 мм. Медь защищает сердцевину контейнера от коррозионного воздействия со стороны грунтовых вод. Установлено, что подземные воды в глубоких скальных породах, где будет осуществляться захоронение, не насыщены кислородом, поэтому скорость коррозии медной оболочки по результатам расчетов будет составлять порядка 1 нм/год. Научными сотрудниками SKB и «Posiva» проведена оценка долговечности медной оболочки в условиях захоронения. По данным [6] она позволит обеспечить герметичность упаковки на протяжении более чем миллиона лет. В настоящий момент в Швеции освоено опытное производство контейнеров для захоронения ОЯТ. Налажена оригинальная технология герметизации контейнера на основе фрикционной сварки.

Карбид кремния

Карбид кремния обладает высокой коррозионной стойкостью благодаря отсутствию электрохимической коррозии. Проведенные эксперименты показали, что скорость коррозии карбида кремния в воде различного состава составляет 0,5 – 0,8 мкм/год. То есть за 10 тыс. лет глубина коррозии карбида кремния составит 5 – 8 мм. Диффузионная проницаемость карбида кремния по стронцию составляет $5 \cdot 10^{-17} \text{ м}^2/\text{с}$, а по цезию – $6 \cdot 10^{-21} \text{ м}^2/\text{с}$ [7].

В настоящее время разработана технология

изготовления труб из карбида кремния с толщиной стенки до 40 мм, диаметром 600 мм и длиной 3 м. Освоена технология сварки этого материала, что обеспечивает герметичность контейнера [8].

Карбид кремния предлагается использовать для контейнеров во Франции и Великобритании для остеклованных высокоактивных отходов на заводах «La Hague» и «Sellafield», которые в настоящее время находятся в металлических контейнерах из нержавеющей стали объемом 170 литров. Предлагается размещать существующие контейнеры в контейнер из карбида кремния диаметром 465 мм, высотой 1390 мм, толщиной стенки 10 мм и массой 92 кг. Технология производства контейнеров в промышленном масштабе полностью разработана [4].

Чугун с шаровым графитом

По мнению специалистов компании «Siempelkamp» высокопрочный чугун с шаровидным графитом (ВЧШГ) – идеальный материал для изготовления контейнеров с целью хранения и захоронения РАО [9]. Плотность ВЧШГ составляет $7,1 \cdot 10^3 \text{ кг}/\text{м}^3$, предел прочности – более 330 МПа. Коррозионная стойкость ВЧШГ обеспечивается оксидной пленкой, образующейся на поверхности материала.

Корпус контейнеров для ОЯТ и РАО изготавливается без сварных швов методом отливки. Масса отливок для корпуса контейнеров ТУК-140, ТУК-153 достигает 100 тонн при толщине стенок 400 мм. Контейнеры для РАО (BluBox) имеют размеры 2000x1600x1700 мм и толщину стенок от 80 до 200 мм.

Бетон на основе портландцемента

Бетон на основе портландцемента является основным материалом при строительстве сооружений для хранения и захоронения упаковок РАО, а также широко применяется для изготовления контейнеров для низко- и среднеактивных отходов классов 3 и 4. Это объясняется тем, что свойства бетона наиболее полно отвечают требованиям к упаковкам этих классов РАО по механической прочности, радиационной устойчивости и изолирующим свойствам.

Плотность бетона составляет 2,45 – 2,65 т/м³ и, при необходимости, можно изготавливать бетон с плотностью 4,0 – 4,5 · 10³ кг/м³. Прочность бетона составляет 68 – 75 МПа.

Специальными исследованиями установлено, что бетон на портландцементе является радиационно стойким при суммарной поглощенной дозе γ -излучения не ниже $1,95 \cdot 10^7$ Гр [10], а скорость разрушения поверхности бетонных конструкций может составлять 10 см за 1000 лет [11].

Диффузионная проницаемость бетона по цезию составляет $2,4 \cdot 10^{-13}$ м²/с [12].

Во Франции для изготовления контейнеров используется фибробетон. По данным французских исследователей на основании моделирования деградация вследствие водного выщелачивания толщины слоя фибробетона составит 6 мм через 300 лет.

В работе [13] для снижения проницаемости бетона на портландцементе предлагается использовать бетон на основе полимера серы или на основе эпоксидной смолы. Оба этих материала характеризуются меньшей проницаемостью, а следовательно, меньшей деградацией под воздействием растворов солей и газов.

Наиболее полная информация об использовании бетона для изготовления контейнеров пред-

ставлена в монографии [14].

Полиэтилен и композиции на его основе

Полиэтилен, а также композиции на основе полиэтилена – перспективные материалы для изготовления контейнеров. Полиэтилен химически стоек, долговечен, не подвержен коррозии и технологичен в производстве. Низкая плотность полиэтилена (0,95 г/см³) обеспечивает малый вес упаковок, а высокая вязкость, гибкость и эластичность позволяют выдерживать механические воздействия. Кроме того, полиэтилен обладает наилучшей радиационной стойкостью среди полимеров. Допустимая доза облучения полиэтилена составляет до 30 МГр [15]. Широкое применение полиэтилен получил в качестве нейтронной защиты. В США эксплуатируются контейнеры на основе полиэтилена для сбора, хранения и захоронения низко- и среднеактивных отходов (НИС – high-integrity container).

На рис. 1 – 5 представлены некоторые контейнеры, используемые за рубежом.



Рис. 1. Первичные упаковки для среднеактивных отходов и высокоактивных отходов, используемые в проекте «Сигео» во Франции [5]



Рис. 2. Контейнер В5.2 из фибробетона для долгоживущих среднеактивных отходов после бросковых испытаний (Франция)



Рис. 3. Толстостенный контейнер для захоронения высокоактивных отходов и первичные упаковки с остеклованными отходами для проекта пункта захоронения радиоактивных отходов в Бельгии



Рис. 4. Контейнеры для РАО, используемые в Швеции



Рис. 5. Контейнер НИС на основе полиэтилена объемом 200 литров (слева показано оборудование для герметизации крышки) [16]

Номенклатура и характеристика используемых и разрабатываемых контейнеров для РАО на объектах ГК «Росатом»

Особенностью РАО класса 1 является высокое тепловыделение, существенно превышающее допустимое для захоронения, что приводит к необходимости длительного хранения таких упаковок в специальных хранилищах. К типичным представителям отходов класса 1 относятся отвержденные рафинаты экстракционной переработки ОЯТ, содержащие 99 % продуктов деления, следы урана, нептуния и плутония и практически все малые актиниды: америций и кюрий.

На радиохимическом заводе РТ-1 ФГУП «ПО «Маяк» тепловыделение остеклованных ВАО не превышает нескольких кВт/м³, что позволяет размещать их в металлические бидоны объемом 0,2 м³, которые устанавливаются в пеналы диаметром 0,63 м и высотой 3,4 м [17].

Для современных проектов радиохимических производств характерно получение отвержденных высокоактивных РАО с тепловыделением большим, чем на заводе РТ-1.

Этим обусловлена необходимость ограничения диаметра контейнера, определяемого условиями охлаждения временного хранения высокоактивных РАО класса 1.

Расчетами установлено, что при получении отвержденных высокоактивных РАО с тепловыделением до 25 кВт/м³ контейнер диаметром

0,34 м обеспечит их граничную температуру в хранилище с естественным воздушным охлаждением.

Существенным отличием требований к упаковкам РАО класса 2 от требований к упаковкам РАО класса 1 является удельное тепловыделение, которое позволяет снять ограничение массогабаритных характеристик контейнера. В современных проектах для РАО класса 2 предлагается использовать металлическую бочку из нержавеющей стали объемом 0,2 м³. Габариты бочки подобраны исходя из условий размещения фрагментированных элементов отработавших тепловыделяющих сборок (ОТВС) и различных картриджей систем газоочистки. Варианты исполнения контейнеров для высокоактивных РАО 1-го и 2-го классов представлены на рис. 6.

Захоронение упаковок РАО класса 1 и 2 планируется осуществлять в пункте глубинного захоронения, создаваемом в скальных породах Нижнеканского массива в 4-х км от ФГУП «ГХК» в пределах ЗАТО Железногорска [18]. Проектные решения по данному объекту предполагают использование нескольких типов упаковок, разрабатываемых специально для будущего пункта захоронения РАО.

Пеналы с остеклованными высокоактивных РАО ФГУП «ПО «Маяк» планируется упаковывать дополнительно в многослойный изолирующий контейнер, в котором предусмотрена защита из уплотненного бентонита и алюминатного бетона.

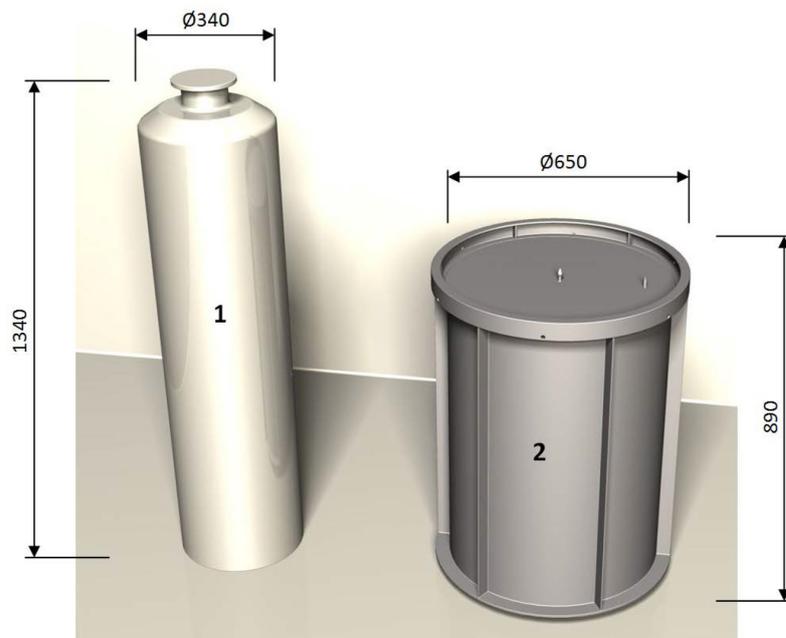


Рис. 6. Контейнеры для высокоактивных отходов класса 1 и 2, используемые в проектах современных радиохимических производств:

- 1 – бидон для остеклованных тепловыделяющих высокоактивных отходов (РАО класса 1);
- 2 – бочка для высокоактивных отходов с низким тепловыделением (РАО класса 2)

Для РАО класса 2 будет использоваться несколько контейнеров:

- возвратный металлический контейнер с невозвратной выемной частью (ВМК с НВЧ) – для захоронения высокоактивных отходов класса 2;
- тонкостенный металлический контейнер (ТНМК) – для захоронения среднеактивных отхо-

дов класса 2;

- невозвратный железобетонный контейнер (НЖБК) – для захоронения среднеактивных отходов класса 2.

В табл. 3 представлены используемые (бидон и пенал для бидона) и разрабатываемые контейнеры для высокоактивных отходов 1 и 2 класса.

Таблица 3

Варианты кондиционирования отходов 1 и 2 класса

Номенклатура РАО	Рекомендуемый тип контейнеров	
	Для РАО класса 1	Для РАО класса 2
Отвержденные продукты деления от переработки ОЯТ (стекло, керамика, синрок)	Бидон: Д-575, Н-1000 Пенал для бидона: Д-630, Н=3400 Чехол для пенала: Д-664, Н3520 Контейнер: Д-340, Н-1340	-
Слитки от переплавки конструкционных материалов ОТВС и оболочек твэлов и др.	Контейнер: Д-340, Н-1340	-
Конструкционные элементы реакторных установок, датчики контрольно-измерительных приборов, элементы оборудования и др.	-	НЖБК: А-1650, В-1650, Н-1375, НВЧ: А-1320, В-1320, Н-920, НЗК-III: А-1650, В-1650, Н-1340
Картриджи и фильтры систем газоочистки и др.	-	Контейнер: Д-650, Н-890

Для РАО классов 3 и 4 наиболее широко используются металлические бочки объемом примерно 0,2 м³ и контейнеры типа КРАД и КМЗ, а для РАО класса 4 – также и упаковки типа Биг-Бэг. В последнее десятилетие для кондиционирования РАО 3 и 4 классов на ряде объектов стали использоваться невозвратные бетонные контейнеры, которые отве-

чают требованиям к упаковкам для захоронения в приповерхностных пунктах захоронения. На рис. 7 и 8 представлены контейнеры НЗК, КМЗ и КРАД.

В табл. 4 представлены варианты кондиционирования для различных видов РАО 3 и 4 классов.

Таблица 4

Варианты кондиционирования отходов 3 и 4 класса

Номенклатура РАО	Рекомендуемый тип контейнеров	
	Для РАО класса 3	Для РАО класса 4
Цементированные РАО (кубовые остатки, смолы, шламы)	НЗК-150-1,5П	КРАД-1,36, КРАД-3, МК-1,36, КМЗ, НЗК-Радон
Битумированные жидкие РАО Солевой плав	КО 1340, НЗК-150-1,5П(С)	КО 1340, НЗК-150-1,5П(С)
Отработавшие ионообменные смолы (обезвоженные)	НЗК-150-1,5П НЗК-150-1,5П(ИОС)	НЗК-Радон
ТРО (металл, пластикат, СИЗ, зола от сжигания, строительный мусор, грунт и др.)	НЗК-150-1,5П, ЖЗК, ЖЗК-2 Бочки металлические*: А.11.1107.000, А.11.1108.000, А.00.659.000, А.00.617.000, А.110.000, А.00.884.000, Л.11.222.00.000, А.11.10028.000, УАХМ23.010.00.000, ГОСТ 13950-91	КРАД, КМЗ, НЗК-Радон, Биг-Бэг, Бочки металлические: А.11.1107.000, А.11.1108.000, А.00.659.000, А.00.617.000, А.110.000, А.00.884.000, Л.11.222.00.000, А.11.10028.000, УАХМ23.010.00.000, ГОСТ 13950-91

*Могут приниматься на захоронение при наличии заключения о сохранении изолирующей способности в течение 100 лет.



Рис. 7. Внешний вид контейнера НЗК-150-1,5П с вкладышем



Рис. 8. Контейнеры КМЗ и КРАД-1,36

Направления создания парка контейнеров

Анализ существующих и разрабатываемых контейнеров для РАО класса 1 и 2 показывает их несоответствие критериям приемлемости. Это обусловлено, прежде всего, высокими требованиями к долговечности данных упаковок (сохранение изолирующей способности в течение 1000 лет).

Создание парка контейнеров для РАО классов 1 и 2, полностью соответствующих современным требованиям к долговечности, сопряжено на данном этапе с рядом трудностей, в числе которых:

- необходимость длительной выдержки высокоактивных отходов класса 1 до захоронения (продолжительность хранения определяется временем снижения тепловыделения до установленных значений);
- отсутствие четких данных об условиях изоляции упаковок, позволяющих сделать точный прогноз их долговечности;
- очевидная «громоздкость» таких контейнеров (большая толщина стенки, масса) и связанные с этим трудности при обращении с ними;
- высокая стоимость контейнеров.

При разработке парка контейнеров для высокоактивных отходов класса 1 и 2 необходимо учитывать также возможность изменения класса отходов при выдержке за счет распада короткоживущих радионуклидов. Это позволяет оптимизировать решения по выбору типа контейнеров для кондиционирования РАО с учетом их радионуклидного состава, продолжительности хранения, затрат на хранение и захоронение.

В связи с этим кондиционирование высокоактивных отходов 1 и 2 классов целесообразно осуществлять в два этапа.

На первом этапе должны быть обеспечены требования к упаковкам, предназначенным для вре-

менного хранения, включающие:

- сохранение изолирующей способности упаковки РАО на период хранения (по нашей оценке – не менее 100 лет);
- возможность отвода тепла при хранении упаковок с естественным охлаждением;
- возможность размещения упаковки на втором этапе в контейнер, соответствующий требованиям пункта захоронения РАО.

На втором этапе упаковки с РАО 1 и 2 классов должны быть размещены в контейнеры, отвечающие требованиям захоронения. Они могут изготавливаться из материалов, описанных выше, а их номенклатура должна быть ограничена одним-двумя типоразмерами. Это исключит проблемы обращения с ними при транспортировании и захоронении.

Данный подход реализован, например, во Франции, Бельгии, Японии и в проектных решениях для пункта приповерхностного захоронения РАО в Нижнеканском гранитоидном массиве. На рис. 8 (справа) показан толстостенный контейнер для остеклованных высокоактивных отходов, используемый в проекте пункта приповерхностного захоронения РАО в Бельгии.

Разработанные в последние годы и широко используемые бетонные контейнеры типа НЗК и металлические контейнеры типа КРАД и КМЗ соответствуют требованиям к упаковкам РАО 3 и 4 классов и практически закрывают потребности рынка для имеющейся номенклатуры отходов.

Заключение

С целью унификации и ограничения разработок новых типоразмеров контейнеров необходимо создать комплект нормативных документов (федеральные нормы и правила, руководства по

безопасности, ГОСТы и др.), регламентирующих применение унифицированных контейнеров для всех классов РАО с учетом критериев приемлемости отходов для хранения, транспортирования и захоронения.

В основу нормативных документов должны быть положены проектные материалы на создание

установок кондиционирования РАО всех классов, хранилищ кондиционированных отходов, приповерхностных и глубинных пунктов захоронения, результаты исследований конструкционных материалов, расчетные программы обоснования безопасности, а также имеющийся опыт предприятий отрасли в области обращения с РАО.

Список литературы

1. Абрамов А.А., Хаустов О.В. Обращение с РАО в России. Стратегические подходы. Безопасность ядерных технологий и окружающей среды, № 3-4, 2013.
2. Постановление правительства № 1069 от 19.10.2012 «О критериях отнесения твердых, жидких и газообразных отходов к радиоактивным отходам, критериях отнесения радиоактивных отходов к особым радиоактивным отходам и к удаляемым радиоактивным отходам и критериях классификации удаляемых радиоактивных отходов».
3. Федеральные нормы и правила в области использования атомной энергии. Критерии приемлемости радиоактивных отходов для захоронения. НП-093-14: утверждены приказом Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 15 декабря 2014 г. № 572.
4. Субири Х. Повышение качества сухого контейнерного хранилища ОЯТ. Безопасность ядерных технологий и окружающей среды, № 1, 2011.
5. Research and studies on the disposal and storage of high-level and intermediate-level long-lived waste. Science and Technology. Andra publication series, 2008.
6. Fraser King, Christina Lilja, Marjut Vähänen «Progress in the Understanding of the Long-term Corrosion Behaviour of Copper Canisters», 2013.
7. Бабаянц Г.И. Использование карбида кремния для создания пеналов для долговременного хранения и захоронения ВАО и ОЯТ. Безопасность ядерных технологий и окружающей среды, 2013.
8. Кербер А., Кнорр Ю. Применение карбида кремния для герметизации высокоактивных отходов и их долгосрочной иммобилизации. Атомная техника за рубежом, 2013, № 9.
9. Вольфганг Ш. Материалы фирмы Siempelramp. М., февраль, 2016.
10. Ахмадьяров Д.М. Бетоны нового поколения для ядерной энергетики и промышленности России. Атомная энергия, Т.78, вып. 2, 1995.
11. Staldler F. Quality Assurance concept in the Field of Low- and Intermediate Radioactive Waste Packaging/ PARTRAM 86. Vol. 1. IAEA-SM-286/1.
12. Иванов И.А., Шатков В.В., Сорокин В.Т., Гулин А.Н. Диффузия радионуклидов в цементосодержащих материалах. Радиохимия, Т. 36, вып. 2, 1994.
13. Craig L. Porter. Engineered Barrier Durability: An Issue for Disposal near populated Areas. Radioactive Waste Management and Environmental Remediation – ASME 1995.
14. Гагауллин Р.М., Давиденко Н.Н., Свиридов Н.В., Сорокин В.Т. и др. Под ред. В.Т. Сорокина. М., Логос, 2012.
15. Петров В.В., Пупков Ю.А.. Испытания в ИЯФ радиационной стойкости материалов, используемых при создании магнитных систем ускорителей. ИЯФ, Новосибирск, 2010.
16. Homer Lowenberg and Mark D.Shaw. Development of a Composite Polyethylene-Fiberglass-Reinforced-Plastic High-Integrity Container for Disposal of Low-level Radioactive waste. Environmental Aspects of stabilization and solidification of hazardous and radioactive waste.
17. Баторшин Г.Ш.. Стратегия обращения с жидкими радиоактивными отходами на ПО «Маяк». Безопасность ядерных технологий и окружающей среды, № 1, 2011.
18. Лобанов Н.Ф., Бейгул В.П., Камнев Е.Н. и др. Федеральный объект окончательной подземной изоляции долгоживущих РАО. Безопасность ядерных технологий и окружающей среды, № 1, 2011.

References

1. Abramov A.A., Haustov O.V. Obrašenie s RAO v Rossii. Strategičeskie podhody. Bezopasnost' âdernyh tehnologij i okružaúšej sredey, № 3-4, 2013.
2. Postanovlenie pravitel'stva № 1069 ot 19.10.2012 «O kriteriâh otnesenia tverdyh, židkih i gazoobraznyh othodov k radioaktivnym othodam, kriteriâh otnesenia radioaktivnyh othodov k osobym radioaktivnym othodam i k udalâemym radioaktivnym othodam i kriteriâh klassifikacii udalâemyh radioaktivnyh othodov».
3. Federal'nye normy i pravila v oblasti ispol'zovaniâ atomnoj ènergii. Kriterii priemlemosti radioaktivnyh othodov dlâ zahoroneniâ. NP-093-14: utverždeny prikazom Federal'noj služby po èkologičeskomu, tehnologičeskomu i atomnomu nadzoru ot 15 dekabrá 2014 g. № 572.
4. Subiri H. Povyšenie kačestva suhogo kontejnernogo hraniliša OÂT. Bezopasnost' âdernyh tehnologij i okružaúšej sredey, № 1, 2011.
5. Research and studies on the disposal and storage of high-level and intermediate-level long-lived waste. Science and Technology. Andra publication series, 2008.
6. Fraser King, Christina Lilja, Marjut Vähänen «Progress in the Understanding of the Long-term Corrosion Behaviour of Copper Canisters», 2013.
7. Babaânc G.I. Ispol'zovanie karbida kremniâ dlâ sozdaniâ penalov dlâ dolgovremennogo hraneniâ i zahoroneniâ VAO i OÂT. Bezopasnost' âdernyh tehnologij i okružaúšej sredey, 2013.
8. Kerber A., Knorr Ū. Primenenie karbida kremniâ dlâ germetizacii vysokoaktivnyh othodov i ih dolgoščnoy immobilizacii. Atomnaâ tehnika za rubežom, 2013, № 9.
9. Vol'fgang Š. Materialy firmy Siempelramp. M., fevral', 2016.
10. Ahmad'ârov D.M. Betony novogo pokoleniâ dlâ âdernoj ènergetiki i promyšlennosti Rossii. Atomnaâ ènergiâ, T.78, vyp. 2, 1995.
11. Staldler F. Quality Assurance concept in the Field of Low- and Intermediate Radioactive Waste Packaging/ PARTRAM 86. Vol. 1. IAEA-SM-286/1.
12. Ivanov I.A., Šatkov V.V., Sorokin V.T., Gulín A.N. Diffuziâ radionuklidov v cementosoderžaših materialah. Radiohimiâ, T. 36, vyp. 2, 1994.
13. Craig L. Porter. Engineered Barrier Durability: An Issue for Disposal near populated Areas. Radioactive Waste Management and Environmental Remediation – ASME 1995.
14. Gataullin R.M., Davidenko N.N., Sviridov N.V., Sorokin V.T. i dr. Pod red. V.T. Sorokina. M., Logos, 2012.
15. Petrov V.V., Pupkov Ū.A.. Ispytaniâ v IÂF radiacionnoj stojkosti materialov, ispol'zuemyh pri sozdanii magnitnyh sistem uskoritelej. IÂF, Novosibirsk, 2010.
16. Homer Lowenberg and Mark D. Shaw. Development of a Composite Polyethylene-Fiberglass-Reinforced-Plastic High-Integrity Container for Disposal of Low-level Radioactive waste. Environmental Aspects of stabilization and solidification of hazardous and radioactive waste.
17. Batoršin G.Š.. Strategiâ obrašeniâ s židkimi radioaktivnymi othodami na PO «Maâk». Bezopasnost' âdernyh tehnologij i okružaúšej sredey, № 1, 2011.
18. Lobanov N.F., Bejgul V.P., Kamnev E.N. i dr. Federal'nyj ob'ekt okončatel'noj podzemnoj izolacii dolgoživuših RAO. Bezopasnost' âdernyh tehnologij i okružaúšej sredey, № 1, 2011.

