

О ВАРИАНТАХ ТЕХНИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ ПО ОБРАЩЕНИЮ С РАДИОАКТИВНЫМИ ОТХОДАМИ КЛАССА 1 ПРИ СОЗДАНИИ И ЭКСПЛУАТАЦИИ ПГЗРО

В. П. Бейгул

ФГУП «Национальный оператор по обращению с радиоактивными отходами», Москва

Статья поступила в редакцию 2 июля 2023 г.

В статье рассмотрены технические решения по транспортировке и горизонтальному захоронению в ПГЗРО радиоактивных отходов класса 1 (РАО-1) с использованием коррозионно-стойких чехлов или упаковок. Учитывая, что пеналы с РАО-1 транспортируются с территории ФГУП «ПО «Маяк» в ТУК-108/р, предлагается создать специальный Пункт комплектации для формирования упаковок с этими отходами, соответствующих критериям приемлемости для захоронения на ПГЗРО. Рассмотрены предложения по созданию невозвратных упаковок и их доставке от Пункта комплектации к горизонтальному отсеку захоронения РАО. Предложена схема конструкции отсека. Приведены предварительные оценки возможных объемов захоронения РАО-1 и РАО-2 в ПГЗРО при использовании концепции с горизонтальным размещением упаковок РАО-1.

Ключевые слова: радиоактивные отходы, невозвратная упаковка для РАО-1, коррозионно-стойкий материал, транспортно-технологическая схема, отсек захоронения РАО, Пункт комплектации упаковок.

Введение

Проектные решения по строительству пункта глубинного захоронения радиоактивных отходов (ПГЗРО) [1] по объективным причинам были приняты при отсутствии на момент проектирования в 2013–2015 гг. полной информации по объемам и характеристикам захораниваемых радиоактивных отходов классов 1 и 2 (РАО-1 и РАО-2) и описания транспортно-технологических схем (ТТС) вывоза накопленных пеналов с площадки ФГУП «ПО «Маяк».

После 2017 г. были проанализированы полученные фактические данные о радионуклидном составе и удельном тепловыделении накопленных на ФГУП «ПО «Маяк» остеклованных высокоактивных отходов (ВАО).

С учетом результатов исследований, специалистами ФГУП «НО РАО» в 2020 г. было предложено

рассмотреть варианты с горизонтальным захоронением РАО-1 или с использованием укороченных вертикальных скважин [2].

С 2018 г. работы по созданию ПГЗРО проводятся в соответствии со «Стратегией создания ПГЗРО» [3]. В рамках фаз 1–3 предусмотрено актуализировать концепцию захоронения РАО с учетом результатов исследований в Подземной исследовательской лаборатории (ПИЛ) и наземном Демонстрационно-исследовательском центре и разработать скорректированную проектно-сметную документацию на создание и эксплуатацию ПГЗРО.

На заседании секции №1 НТС-10 Госкорпорации «Росатом» от 13.05.2022 были определены приоритетные на ближайшие годы направления совершенствования технических решений по

обращению с РАО-1 при создании и эксплуатации ПГЗРО, в том числе исследования перспективных материалов для создания контейнеров для РАО-1, а также обоснование концепции их захоронения.

Там же были определены для дальнейшего исследования перспективные конструкции невозвратных упаковок. В данной статье рассмотрены три упаковки, а именно:

- коррозионно-стойкий контейнер на 3 бидона из нержавеющей стали,
- коррозионно-стойкий стальной контейнер на 3 бидона с медным покрытием,
- тонкостенный стальной контейнер с тремя толстостенными упаковками из коррозионно-стойкого материала (КСМ) на 1 бидон.

Предлагается рассмотреть варианты технических решений по обращению с РАО-1 при использовании горизонтального размещения упаковок, с учетом фактических данных по характеристикам накопленных остеклованных ВАО и параметров перспективных упаковок, рекомендованных на заседании секции № 1 НТС-10.

1. Параметры упаковок для РАО-1

Параметры коррозионно-стойких чехлов НЧ и толстостенной упаковки из КСМ на 1 бидон, а также уточненные показатели длительной коррозионной стойкости материалов для их изготовления можно будет определить и обосновать на основании экспериментальных исследований на специальном стенде, создание которого рекомендовано в соответствии с решениями секции № 1 НТС-10.

В пеналах на ФГУП «ПО «Маяк» размещены по 3 бидона, высотой 990 мм, заполненных стеклом только частично, в их верхней части остается пустое пространство высотой не менее 260 мм. В связи с этим, до загрузки в чехол НЧ или упаковку, целесообразно обрезать его пустую верхнюю часть, при этом высота бидона с остеклованными ВАО составит около 720 мм. Это позволит уменьшить размеры пустотного пространства и высоту чехла НЧ и упаковки, снизить их стоимость.

С этой целью, а также для равномерного распределения тепла и давления, демпфирования внешних воздействий внутрь чехла НЧ и упаковки из КСМ рекомендуется засыпать мелкодисперсный прокаленный кварцевый песок. Схемы чехла НЧ и упаковки из КСМ показаны на рис. 1.

В табл. 1 указаны предварительные значения параметров чехлов НЧ и упаковки из КСМ.

Ниже показано, что сформированный чехол НЧ внутри перегрузочного контейнера ПК/1 доставляется к Зданию перегрузки ПГЗРО и далее

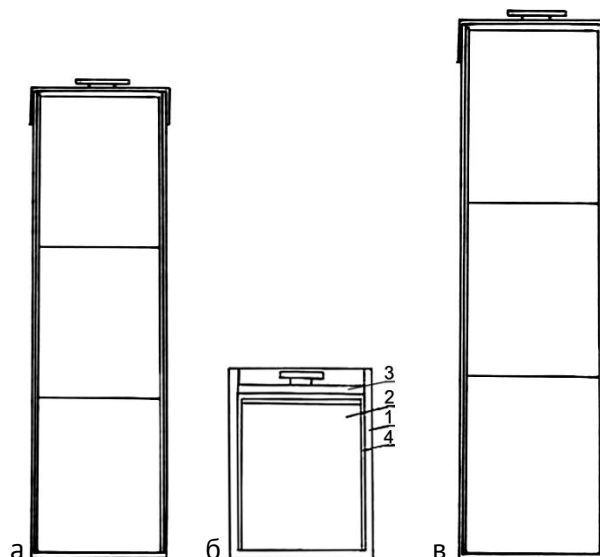


Рис. 1. Предварительные схемы:

- а – коррозионно-стойкий чехол НЧ на 3 бидона;
б – упаковка из КСМ: 1 – корпус упаковки, 2 – остеклованные ВАО, 3 – крышка упаковки; 4 – песок;
в – чехол НЧ с тремя упаковками

Таблица 1. Предварительные параметры чехла НЧ и упаковки из КСМ

Наименование параметра	Коррозионно-стойкий чехол НЧ на 3 бидона	НЧ и упаковка из КСМ на 1 бидон	
		Упаковка	Чехол НЧ
Внешний диаметр, мм	до 670	680	до 730
Толщина стенки, мм	до 30	до 40	до 8
Материал	сталь с медным покрытием*	КСМ	Ст3
Общая высота (с крышкой), мм	до 2500	до 900	до 2900
Буфер внутри упаковки и чехла (песок), мм	15	10	15

*В соответствии с рекомендациями НТС-10 от 13.05.2022.

по стволу и горизонтальной выработке на отметке – 70 м к отсеку захоронения.

2. Транспортно-технологические схемы доставки упаковок с территории ФГУП «ПО «Маяк» на ПГЗРО

При разработке предложений по корректировке ТТС обращения с РАО-1 следует учитывать, что в настоящее время на ФГУП «ПО «Маяк» имеется более 100 готовых транспортно-упаковочных комплектов ТУК-108/р, сертифицированных для перевозки по железной дороге пеналов с остеклованными ВАО [4]. Кроме того, в 2016 г. Санкт-Петербургским филиалом АО «ФЦНИВТ «СНПО «Элерон»-«ВНИПИЭТ» разработана технология вывоза пеналов с РАО-1 с территории ФГУП «ПО «Маяк».

Для вывоза накопленных РАО-1 в ТУК-108/р может быть использована существующая на ФГУП «ПО «Маяк» система обращения с пенами с ВАО. С учетом снижения прочности части накопленных пеналов в результате длительного хранения, потребуются перегрузить некоторые бидоны с РАО-1 в новые аналогичные пеналы. На ФГУП «ПО «Маяк» такие технологические операции штатно выполняются.

Использование ТУК-108/р позволит технически эффективно, безопасно и экономически приемлемо организовать вывоз всех накопленных остеклованных РАО-1 и их транспортирование по железной дороге на ПГЗРО.

Однако при этом потребуются дополнительно создать специальный Пункт комплектации (рис. 2) за пределами ПГЗРО, в котором будет выполнена перегрузка доставляемых бидонов с РАО-1 из пеналов в чехлы НЧ, соответствующие критериям приемлемости для захоронения [5].

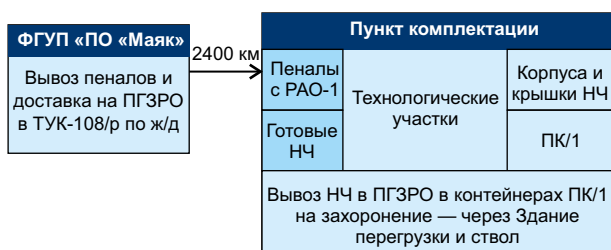


Рис. 2. Состав Пункта комплектации

В соответствии с требованиями федерального закона 190-ФЗ [5], на площадку ПГЗРО (в т. ч. в Здание перегрузки) должны поступать упаковки, приведенные в соответствие с критериями приемлемости. Поэтому рекомендуется разместить Пункт комплектации для формирования НЧ, полностью готовых к захоронению, до поступления на площадку ПГЗРО.

Использование перегрузочного контейнера ПК/1, который является близким аналогом разработанного в ПД контейнера ПК, позволит исключить значительную часть технологических операций по обращению с РАО-1 в Здании перегрузки. Чехлы НЧ с тремя бидонами будут без перегрузочных операций доставляться от Пункта комплектации до отсека захоронения.

Транспортирование будет выполняться в пределах промплощадки ГХК и ПГЗРО. Сертификация ПК/1 может начаться после отработки соответствующих ТТС и должна быть проведена до начала перевозок НЧ с загруженными РАО-1. По предварительным оценкам, соответствующий момент может наступить не ранее чем через 8–10 лет.

В создаваемом Пункте комплектации должна быть обеспечена возможность безопасного выполнения работ в дистанционном режиме.

В дальнейшем его можно будет использовать для подготовки к захоронению РАО-1, которые будут образовываться при переработке отработавшего ядерного топлива (ОЯТ) на ФГУП «ГХК». Предполагаемая длительность эксплуатации Пункта комплектации составит не менее 50 лет.

В нем предполагается выполнять следующие операции:

- прием и временное хранение пеналов с РАО-1, доставленных с территории ФГУП «ПО «Маяк» с использованием ТУК-108/р;
- прием и временное хранение корпусов и крышек НЧ, изготовленных на специализированном предприятии;
- формирование укороченных бидонов, поочередная перегрузка трех бидонов с РАО-1 из пенала в коррозионно-стойкий чехол НЧ, герметизация чехлов, временное хранение перед отправкой на захоронение;
- загрузка чехла НЧ с РАО-1 в перегрузочный контейнер ПК/1, вывоз на захоронение.

Технологические операции по формированию укороченного бидона с захватом для перегрузочных операций рекомендуется выполнять в Пункте комплектации. Для интерактивной отработки ТТС обращения с упаковками в Пункте комплектации и при перегрузочных операциях предлагается разработать динамические цифровые модели, которые войдут в состав виртуального Демонстрационно-исследовательского центра.

При использовании толстостенных упаковок из коррозионно-стойкого материала емкостью 1 бидон с РАО-1, возможность создания которых предусмотрена в решении секции № 1 НТС-10, в Пункте комплектации должно быть предусмотрено создание участка для выполнения технологических операций обращения с такими упаковками.

В связи с тем, что перегрузка бидонов с РАО-1 в коррозионно-стойкие чехлы НЧ или в толстостенные упаковки из КСМ будет выполняться уже после вывоза пеналов из ФГУП «ПО «Маяк», ограничения на внешние размеры упаковок или чехлов практически снимаются.

Пункт комплектации должен быть создан по отдельному проекту, и технические решения по его созданию и эксплуатации необходимо увязать с техническими решениями по созданию и эксплуатации ПГЗРО. Один из предлагаемых к рассмотрению возможных вариантов его размещения — в районе станции «Заводская» и объекта ИХЗ ГХК, где заканчивается существующая железная дорога

из ФГУП «ПО «Маяк» и начинается ее новый участок, предусмотренный к созданию в соответствии с утвержденной проектной документацией (ПД) на создание ПИЛ и ПГЗРО [1].

Создание дополнительного Пункта комплектации на территории промплощадки ФГУП «ГХК» позволит исключить излишние затраты и отказаться от:

- разработки и изготовления новых контейнеров ТУК-140/1, с тем чтобы использовать имеющийся на предприятии ФГУП «ПО «Маяк» большой парк транспортно-упаковочных комплектов ТУК-108/р, сертифицированных для перевозки пеналов с РАО-1;
- изменения существующей на предприятии ФГУП «ПО «Маяк» ТТС вывоза упаковок с РАО-1;
- создания на предприятии ФГУП «ПО «Маяк» технологического участка для изготовления коррозионно-стойких чехлов НЧ или упаковок из КСМ из поставленных заготовок;
- сооружения на предприятии ФГУП «ПО «Маяк» дополнительного временного хранилища для новых чехлов НЧ или толстостенных упаковок из КСМ до их отправки на ПГЗРО.

По-видимому, создание Пункта комплектации на новом месте более перспективно и менее затратно, чем выполнение значительных переделок действующего производства на ФГУП «ПО «Маяк» для реализации аналогичных функций. Значительная экономия затрат будет получена в результате использования существующего парка ТУК-108/р и имеющейся технологии вывоза пеналов с РАО-1 с территории ФГУП «ПО «Маяк». При этом на ПГЗРО, в соответствии с требованиями федерального закона 190-ФЗ [5], после Пункта комплектации будут поступать упаковки с РАО-1, соответствующие критериям приемлемости.

3. Описание схемы конструкции отсека для захоронения РАО-1

Для захоронения РАО-1 и РАО-2 предлагается создавать отдельные специализированные отсеки, что позволит сделать взаимно независимыми графики их подвоза и захоронения, оптимизировать технические решения по созданию инженерных барьеров безопасности (ИББ) с учетом характеристик РАО, согласовывать годовое количество и размещение создаваемых отсеков с объемами и текущими темпами захоронения каждого вида РАО.

При разработке конструкции отсеков для горизонтального захоронения чехлов НЧ с РАО-1 предлагается в качестве аналога принять

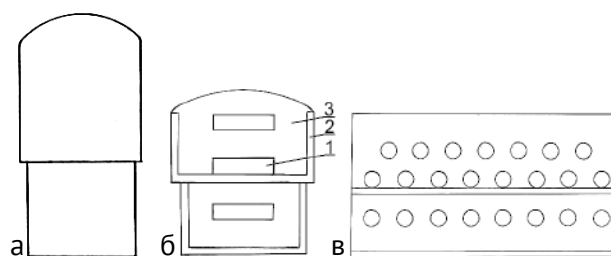


Рис. 3. Схемы выработки с каньоном и предлагаемого отсека: (а) и (б) – поперечные разрезы выработки и отсека с размещением НЧ, (в) – продольный разрез отсека с размещением НЧ; в (б) указано: 1 – чехол НЧ, 2 – прессованный бентонит, 3 – бентонитовая фракция

схему подземной выработки с каньоном, разработанную в ПД для захоронения контейнеров с РАО-2 [1], [14]. На рис. 3 для сравнения приведены такие схемы.

Габаритные размеры отсека для захоронения невозвратных чехлов с РАО-1 и контейнеров с РАО-2 составляют: общая высота отсека — 7,5 м, длина — 14 м, ширина верхней галереи — 6,5 м (каньон — 11,8 м, 14 м и 6,0 м соответственно).

В 2011 г. специалистами института «Гидропроект» были выполнены моделирование и расчеты устойчивости подземных выработок ПГЗРО при расстояниях между осями 22 м и сечением до 7×7 м. Запас устойчивости составил 2,5. В предлагаемом варианте расстояние между осями выработок составит 23 м, что повысит запас устойчивости.

С целью обеспечения долговременной безопасности ПГЗРО в качестве одного из ИББ предлагается использовать пластины из прессованного бентонита, которые, с учетом нисходящего движения подземных вод, рекомендуется закрепить на стенах отсека, на дне траншеи и на перемычке между траншеей и верхней галереей. Толщину пластин из прессованного бентонита предварительно можно принять 300 мм [6].

Пустотное пространство внутри галереи и траншеи отсека рекомендуется заполнить бентонитовой изолирующей смесью (БИС), например смесью песка с глинопоршком [7].

Между отсеками при эксплуатации ПГЗРО следует устанавливать технологические перемычки в соответствии с технологией заполнения отсека БИС. Изолирующие барьеры между ними не требуются. По краям рабочих зон длиной 300 м на всю высоту выработки предварительно рекомендуется установить барьеры из прессованного бентонита толщиной 0,5 м.

При определении предварительного расположения НЧ в отсеке были учтены количественно обоснованные рекомендации специалистов

ИФХЭ РАН о том, что для значительного задержания радионуклидов из РАО-1 в пределах ИББ целесообразно создать бентонитовый барьер толщиной не менее 1,5 м [7]:

- в отсеке захораниваются 23 чехла НЧ диаметром 670 мм и высотой 2,5 м: в нижнем и среднем слоях — по 8 НЧ, в верхнем — 7 НЧ (рис. 3);
- оси чехлов НЧ в нижнем слое находятся на расстоянии 2,0 м от дна траншеи, на которой между нижней траншеей и верхней галереей размещаются слои прессованного бентонита толщиной 0,3 м;
- по горизонтали чехлы НЧ направлены к стенам отсека торцами и изолированы от них слоями БИС: толщиной 1,45 м (в траншее) и 1,85 м (в галерее), а также слоями прессованного бентонита по 0,3 м.

Для оптимизации ТТС обращения с НЧ и с учетом параметров ИББ, обоснованных в исследованиях на специальном стенде, предлагается использовать динамические цифровые модели. В настоящее время разработаны предложения по содержанию исследований на экспериментальном стенде для оптимизации параметров ИББ, состав которых должен быть уточнен и дополнен с участием специалистов из организаций РАН, выполняющих соответствующие исследования под методическим руководством ИБРАЭ РАН.

Обоснование и уточнение параметров ИББ, с учетом плотности БИС и расположения в отсеке упаковок с РАО-1, следует выполнить на основании расчетов и экспериментальных исследований, в т. ч. с учетом тепловыделения пеналов, накопленных на ФГУП «ПО «Маяк».

Технологические исследования по заполнению отсека БИС и лабораторные исследования изолирующих свойств ИББ предлагается выполнять на специальном экспериментальном стенде. В результате исследований будет обосновано, какая тепловая нагрузка на отсек является допустимой, в т. ч. с учетом нагревания БИС.

4. Транспортно-технологическая схема доставки чехлов НЧ от Пункта комплектации в отсек захоронения

Для безопасной доставки чехла НЧ (в пределах промплощадки ФГУП «ГХК») от Пункта комплектации до отсека захоронения РАО предлагается создать перегрузочный контейнер ПК/1, который будет близким аналогом контейнера ПК, разработанного в ПД для доставки чехлов с РАО-1 от Здания перегрузки до скважины захоронения [1]. Сравнение параметров контейнеров ПК/1 и ПК приведено в табл. 2.

Таблица 2. Предварительные параметры перегрузочных контейнеров ПК/1 и ПК

Параметр	ПК (в ПД)	ПК/1	
		для НЧ с 3 бидонами	для НЧ с 3 упаковками из КСМ
Высота (диаметр) внутренней полости, мм	3530 (до 680)	до 2600 (до 690)	до 3000 (до 1000*)
Толщина стенки, мм	350	до 300	до 300
Масса упаковки с РАО, т	до 40	до 40	до 40
Материал корпуса ТУК	сталь	сталь	сталь

*С учетом демпфирующего слоя для механической защиты упаковки из КСМ.

При необходимости в ПК/1 может быть предусмотрен слой для нейтронной защиты. При использовании ПК/1 практически исключаются риски возникновения аварийных ситуаций при доставке НЧ и упаковок с РАО-1 до отсека, т. к. на всем маршруте, от Пункта комплектации до отсека, упаковки будут находиться в контейнере со стальной стенкой толщиной 300 мм.

Описание технологических операций при доставке чехла НЧ с использованием ПК/1 и размещении в отсеке захоронения (для предварительного рабочего варианта размещения Пункта комплектации в районе ИХЗ ГХК):

1. НЧ с тремя бидонами или упаковками из КСМ помещается в перегрузочный контейнер ПК/1. Три загруженных ПК/1 устанавливаются вертикально на транспортер (аналогично перевозке пеналов в ТУК-108/р) и доставляются в Здание перегрузки ПГЗРО.

2. В Здании перегрузки ПК/1 снимается с транспортера, размещается горизонтально на тележке и доставляется на ней по технологическому стволу и затем по горизонту – 70 м через шлюз в безлюдную зону непосредственно до горизонтального отсека захоронения РАО-1 (рис. 3). Операции обращения с чехлами НЧ выполняются в дистанционном режиме с видеоконтролем.

3. Перед отсеком захоронения тележка с ПК/1 пристыковывается к вспомогательной тележке с поворотным механизмом и вытягивающим устройством.

4. После открытия шибера чехол НЧ извлекается из ПК/1, устанавливается на примыкающей вспомогательной тележке вдоль выработки, поворачивается на тележке и размещается на ней поперек оси выработки.

5. Затем чехол НЧ захватывается краном с тележки, переносится горизонтально на небольшой высоте над слоем БИС и опускается на место захоронения поперек оси отсека (рис. 3).

6. После извлечения НЧ порожний ПК/1 возвращается на поверхность в Здание перегрузки,

в случае необходимости дезактивируется и затем возвращается в Пункт комплектации.

5. Определение плотности захоронения РАО-1 в отсеках ПГЗРО

Для определения оптимальной плотности захоронения РАО-1 предлагается использовать фактические данные по удельному тепловыделению накопленных остеклованных ВАО, полученные в 2017 г. из ФГУП «ПО «Маяк».

С учетом этих данных и на основании исследований, выполненных в 2019 г., можно сделать вывод, что средневзвешенное удельное тепловыделение РАО-1 в накопленных пеналах на 2017 г. составляет около $1,12 \text{ кВт/м}^3$. При темпах захоронения по 165 пеналов/год, 7000 пеналов из ФГУП «ПО «Маяк» могут быть захоронены в период 2038—2080 гг.

К 2038 г. средневзвешенное удельное тепловыделение РАО-1 в накопленных пеналах составит около $0,7 \text{ кВт/м}^3$, в 2080 г. — около $0,3 \text{ кВт/м}^3$. Соответственно, при удельном тепловыделении $0,5 \text{ кВт/м}^3$ его суммарное начальное значение для 23 пеналов в отсеке составит 115 кВт. С целью снижения интенсивности нагревания глинистых материалов в отсеке, на начальных этапах захоронения РАО-1 в ПГЗРО могут направляться пеналы с низким тепловыделением.

В варианте с захоронением РАО-1 в вертикальных скважинах [1], [14] тепловое поле в их приконтурных зонах и во всем горном объеме размещения скважин, $700 \times 300 \times 75 \text{ м}$, формируется и поддерживается в результате совместного теплоизлучения скважин. В концепции с горизонтальным захоронением РАО-1 условия для теплообмена и охлаждения приконтурных зон и инженерных барьеров более благоприятные. Тепловое поле от подземных выработок с отсеками на горизонте -70 м с рабочими зонами по 300 м (расстояние между осями выработок — 23 м) не ограничивается по вертикали вверх и вниз на десятки метров и свободно конвектируется в массив, при этом температура в ИББ снижается более интенсивно, в т. ч. вследствие использования БИС с высокой долей песка.

На основании обобщения результатов международных исследований по оценке влияния длительного нагревания на изолирующие свойства бентонита в [8], [9], [10] показано, что после его длительного нахождения при температуре до $200 \text{ }^\circ\text{C}$ и последующего возвращения к нормальной температуре не всегда происходит значительное ухудшение изолирующих свойств вследствие иллитизации. Важным условием для

протекания этого процесса является не только длительное воздействие повышенной температуры, но также и наличие калия в подземных водах.

На основании анализов химического состава подземных вод в интервале горизонтов от $+5 \text{ м}$ до -70 м , проведенных АО «Красноярскгеология» в ходе изысканий в 2011—2015 гг. с использованием глубоких скважин, повышенного содержания калия в подземных водах не обнаружено.

Для обоснования оптимальной плотности захоронения РАО-1 следует выполнить моделирование тепловых условий в отсеке и экспериментальные исследования изменения изолирующих свойств ИББ для различных составов и плотности БИС, химического состава подземных вод в зоне захоронения РАО, с учетом нагревания глиноматериалов в диапазоне $120\text{—}200 \text{ }^\circ\text{C}$ в течение нескольких сотен лет и последующего возвращения к нормальной температуре, на основе методик и результатов, изложенных в [6], [7], [11], [12], [13].

6. О необходимости корректировки концепции захоронения упаковок с РАО-1 в ПГЗРО

Краткое обоснование преимуществ концепции с горизонтальным захоронением упаковок с РАО-1 приведено в табл. 3.

С целью повышения эксплуатационной и долговременной безопасности и технико-экономической эффективности ПГЗРО, с учетом полученных в 2017—2019 гг. фактических данных по характеристикам накопленных РАО-1, при создании и эксплуатации ПГЗРО автором рекомендуется применить концепцию с горизонтальным захоронением РАО-1, при использовании которой не предъявляются какие-либо дополнительные требования к параметрам массива по сравнению с установленными в ПД.

7. О полезной емкости ПГЗРО и перспективах развития

Наиболее важным параметром, определяющим эффективное использование подземного пространства ПГЗРО и длительность его функционирования как важного элемента ЗСЖЦ ЯЭ, является не объем, а удельное тепловыделение захораниваемых долгоживущих РАО-1.

Для предварительной оценки полезной емкости ПГЗРО в пределах выбранной рабочей площадки использованы параметры фактического тепловыделения накопленных РАО-1, приведенные в разделе 5.

Таблица 3. Обоснование целесообразности применения концепции с горизонтальным захоронением РАО-1 при создании и эксплуатации ПГЗРО

Снижение стоимости строительства и эксплуатации ПГЗРО вследствие:
<ul style="list-style-type: none"> отказа от сооружения и обустройства 416 вертикальных технологических скважин диаметром 1,3 м глубиной по 75 м и 416 буровых камер габаритами 4,5 × 3,0 × 3,0 м; уменьшения высоты Здания перегрузки на ПГЗРО на 5,0 м; замены перегрузочного оборудования в Здании перегрузки – замена кранового оборудования грузоподъемностью 120 т на 40 т, в подземных условиях – отказа от использования многофункциональной платформы МФЗП для загрузки упаковок с РАО-1 в скважины; изготовления 7500 более дешевых невозвратных чехлов НЧ в связи с возможностью экономически приемлемого значительного усиления долговременных изолирующих свойств ИББ; отказа от создания новых ТУК-140/1 и транспортеров
Повышение эксплуатационной безопасности ПГЗРО за счет исключения:
<ul style="list-style-type: none"> риска потенциально возможных аварийных ситуаций при установке и спуске в скважины диаметром 1,3 м глубиной по 75 м загруженных РАО-1 контейнеров КИ массой 10 т, диаметром 1,2 м и длиной 4,1 м; облучения персонала при ликвидации потенциальных аварий и затрат на ликвидацию последствий аварий
Повышение долговременной и ядерной безопасности ПГЗРО благодаря:
<ul style="list-style-type: none"> повышению изолирующих свойств горного массива в ближней зоне ПГЗРО вследствие отказа от создания 416 скважин диаметром 1,3 м глубиной по 75 м по сетке 15 × 23 м, что привело бы к значительному нарушению монолитности массива пород между горизонтами; исключению перетока долгоживущих радионуклидов по закрепному пространству скважин и их ускоренного выхода за пределы ПГЗРО; улучшению долговременных изолирующих свойств ИББ в связи с увеличением их толщины до 1500–2000 мм, при создании которых будут использованы природные стабильные материалы (бентонит и песок); размещению упаковок РАО-1 горизонтально в окружении мощного барьера из песчано-бentonитовой смеси, таким образом исключаются условия для возникновения СЦР, гарантированно обеспечивается ядерная безопасность ПГЗРО
Значительное улучшение сводных эксплуатационных показателей ПГЗРО таких как:
<ul style="list-style-type: none"> возможность увеличения полезной емкости ПГЗРО в отношении захоронения РАО -1 (по предварительной оценке в 1,6 раза); потенциальная возможность создания двух дополнительных промежуточных горизонтов для захоронения РАО; возможность независимого строительства и эксплуатации подземных камер на горизонтах и реализации отдельных графиков приема на захоронение упаковок с РАО-1 и РАО-2
Сохранение существующих технологических решений ФГУП «ПО «Маяк» и основных проектных решений в утвержденной ПД по:
<ul style="list-style-type: none"> эффективной организации вывоза упаковок с РАО-1 из ФГУП «ПО «Маяк» и транспортирования по ж/д с использованием существующего парка сертифицированных ТУК-108/р, разработанной в 2016 г. Отказ от использования ТУК-140/1; созданию горно-капитальных подземных сооружений ПГЗРО (три ствола и горизонты с поперечными выработками) с исключением только вертикальных эксплуатационных скважин; созданию наземных сооружений ПГЗРО и горизонтальных подземных камер с каньоном
Подтверждение пригодности горного массива для размещения ПИЛ и ПГЗРО на основании:
<ul style="list-style-type: none"> заключения ГКЗ «Роснедра» от 15.04.2016, «участок «Енисейский» по своим геологическим, гидрогеологическим, тектоническим и сейсмическим условиям является пригодным для глубинного захоронения РАО-1»; комплексного анализа, выполненного специалистами ИБРАЭ РАН с участием организаций-соисполнителей, «детальные исследования в пределах площадки, выполненные к настоящему моменту, не выявили каких-либо дефектов среды, исключающих возможность размещения объекта» [15]

По предварительной оценке, на горизонте – 70 м в 30 горизонтальных выработках, с расстоянием между осями 23 м и рабочими зонами по 300 м, в которых созданы по 20 отсеков длиной 14 м, можно разместить 13800 чехлов НЧ на 3 бидона. С учетом возможной отбраковки 10% общей длины рабочих зон из-за выявленных при проходке

повышенных водопритоков, на горизонте – 70 м можно разместить 12400 чехлов НЧ с РАО-1.

При использовании концепции с горизонтальным захоронением упаковок с РАО-1, по видимому, может быть реализован перспективный сценарий строительства и эксплуатации ПИЛ и ПГЗРО, приведенный в табл. 4.

Таблица 4. Предварительный сценарий строительства и эксплуатации ПИЛ и ПГЗРО

Этапы	Сроки
1. Строительство ПИЛ в соответствии с существующими планами	до 2028 г.
2. Исследования в ПИЛ, обоснование возможности промышленной эксплуатации ПГЗРО	до 2033 г.
3. Оформление лицензии на эксплуатацию ПГЗРО, разработка и утверждение скорректированной ПД на создание ПГЗРО, строительство 1-й очереди (с горизонтами +5 м и –70 м), ввод в эксплуатацию	до 2038 г.
4. Эксплуатация 1-й очереди ПГЗРО (загрузка РАО-1 в отсеки на горизонте –70 м и РАО-2 в камеры на горизонте +5 м)	до 2080 г.
5. Разработка и утверждение ПД на расширение ПГЗРО (с созданием дополнительных горизонтов –20 м и –45 м)	после 2080 г.
6. Строительство и эксплуатация 2-й очереди ПГЗРО	до 2130 г.

В 2019 г. специалистами ФГУП «НО РАО» было показано, что при использовании концепции с горизонтальным размещением упаковок РАО могут быть созданы дополнительные горизонты для захоронения РАО на уровнях –20 м и –45 м. Для подтверждения решения по использованию в перспективе промежуточных горизонтов, по-видимому, потребуется после 2080-го года выполнить обоснование долговременной безопасности ПГЗРО с дополнительными горизонтами с учетом изолирующих свойств горного массива и системы ИББ.

Для реализации указанного сценария, вероятно, потребуется отработать и использовать в дальнейшем, в т. ч. на ФГУП «ГХК», технологию переработки ОЯТ с выделением фракции «Cs + Sr» с высоким начальным тепловыделением [17], [18], ранее опробованную на ФГУП «ПО «Маяк» и разрабатываемую в настоящее время в рамках проекта «Прорыв». В результате удельное тепловыделение направляемых в дальнейшем на глубинное захоронение (в рамках 2-й очереди ПГЗРО) образующихся долгоживущих РАО может быть значительно снижено.

Это позволит на длительный период обеспечить экономически и технически эффективное, безопасное захоронение больших объемов РАО-1 и РАО-2 на выбранном участке. В соответствии с проводимыми в настоящее время работами с участием ИБРАЭ РАН, фракцию «Cs + Sr» с высоким начальным удельным тепловыделением можно безопасно и экономически эффективно захоронить на меньшей глубине и с менее высокими требованиями к изолирующим свойствам горного массива [18].

Заключение

Автором статьи рассматриваются предварительные предложения вариантов технических решений по обращению с РАО в ПГЗРО. Предлагается размещать невозвратные чехлы с РАО-1 не в глубоких скважинах, а в горизонтальных горных выработках. Благодаря этому создается возможность создать вокруг упаковок мощный изолирующий барьер из стабильных природных материалов.

Рассмотрены технические решения по захоронению РАО-1 в ПГЗРО с использованием трех типов перспективных упаковок, предложенных на заседании секции №1 НТС-10 Госкорпорации «Росатом» от 13.05.2022.

С учетом наличия на ФГУП «ПО «Маяк» большого парка ТУК-108/р, сертифицированных для перевозки остеклованных ВАО, и разработанной в 2016 г. технологии вывоза пеналов с территории ФГУП «ПО «Маяк» с использованием ТУК-108/р, рекомендуется отказаться от изготовления ТУК-140/1 для перевозки накопленных пеналов.

Для формирования невозвратных упаковок, соответствующих критериям приемлемости для захоронения РАО-1 на ПГЗРО, предварительно рекомендуется рассмотреть возможность создания по отдельному проекту специального Пункта комплектации, что позволит усовершенствовать ТТС при обращении с РАО-1.

В статье предлагаются к рассмотрению предварительные параметры невозвратного чехла НЧ, упаковки из коррозионно-стойкого материала, перегрузочного контейнера ПК/1 для доставки чехлов НЧ от Пункта комплектации до горизонтального отсека захоронения РАО-1. Предложена к рассмотрению схема конструкции горизонтального отсека.

При использовании концепции с горизонтальным захоронением РАО-1 значительно повысится эффективность и длительность полезного использования подземного пространства ПГЗРО. По предварительным оценкам, в составе 1-й очереди ПГЗРО на горизонте –70 м могут быть захоронены 12400 невозвратных чехлов с РАО-1, на горизонте +5 м 250 000 м³ (брутто) РАО-2. Предлагается к рассмотрению сценарий создания и эксплуатации ПИЛ и ПГЗРО на долгосрочную перспективу.

При использовании концепции с горизонтальным захоронением РАО-1 к массиву пород не предъявляются дополнительные требования по сравнению с установленными в ПД. Сохраняются разработанные в ПД основные проектные решения по созданию подземных сооружений ПГЗРО.

Благодарность

Автор выражает благодарность заместителю генерального директора по эксплуатации ФГУП «НО РАО» А. В. Барышеву, директору Департамента инновационного развития и технологий В. Я. Красильникову, руководителю проекта Управления капитального строительства А. А. Пуголовкину за ценные критические замечания при обсуждении первоначального варианта статьи.

Литература

1. Материалы обоснования лицензии на размещение и сооружение не относящегося к ядерным установкам пункта хранения РАО, создаваемого в соответствии с проектной документацией на строительство объектов окончательной изоляции РАО (Красноярский край, Нижне-Канский массив) в составе подземной исследовательской лаборатории (включая материалы оценки воздействия на окружающую среду). — Москва, ФГУП «НО РАО», 2015. — URL: <http://www.norao.ru/ecology/mol/> (дата обращения: 25.03.2021).

2. Бейгул В. П., Павлов Д. И. Сравнение альтернативных схем захоронения РАО класса 1 в составе ПГЗРО // Безопасность ядерных технологий и окружающей среды. 2019. — URL: <http://atomic-energy.ru/articles/2019/11/12/98998> (дата обращения: 25.03.2021).

3. Крюков О. В. Стратегия создания пункта глубинного захоронения РАО // Радиоактивные отходы. 2018. № 2 (3). С. 114—120.

4. Сертификат-разрешение на конструкцию упаковки и перевозку. Транспортно-упаковочный комплект ТУК-108/р с остеклованными ВАО. RUS/397/B(U)-96T (Rev-1). 22.04.2022.

5. Федеральный закон от 11.07.2011 № 190-ФЗ «Об обращении с радиоактивными отходами и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации».

6. Крупская В. В., Закусин С. В., Лехов В. А., Доржиева О. В., Белоусов П. Е., Тюпина Е. А. Изоляционные свойства бентонитовых барьерных систем для захоронения радиоактивных отходов в Нижнеканском массиве // Радиоактивные отходы. 2020. № 1 (10). С. 35—55. DOI: 10.25283/2587-9707-2020-1-35-55.

7. Мартынов К. В., Захарова Е. В., Кулюхин С. А. Альтернативная концепция устройства защитных барьеров при глубинном захоронении РАО класса 1 на Енисейском участке Нижнеканского массива // Радиоактивные отходы. 2022. № 2 (19). С. 68—84. DOI: 10.25283/2587-9707-2022-2-68-84.

8. Омеляненко Б. И. Процессы околорудного изменения вмещающих пород / В кн.: Гидротермальные месторождения урана. — М. : Недра, 1978. С. 264—292.

9. Brusewitz A. M. Chemical and physical properties of Paleozoic potassium bentonites from Kinnekule, Sweden // Clays and Clay Minerals. 1986. Vol. 34. No. 4. Pp. 442—454.

10. Eslinger E., Highsmith P., Albers D., deMayo B. Role of Iron Reduction in the Conversion of Smectite to Illite in Bentonites in Disturbed Belt, Montana // Clays and Clay Minerals. 1979. Vol. 27. No. 5. Pp. 327—338.

11. Богатов С. А., Болдырев К. А., Крючков Д. В. Эволюция инженерных защитных барьеров в проекте пункта глубинного захоронения ОВАО в Нижнеканском массиве: Препринт ИБРАЭ РАН № IBRAE-2018-15. — М. : ИБРАЭ РАН, 2018. 45 с.

12. Мартынов К. В., Захарова Е. В. Анализ локализации и сценария эволюции ПГЗРО на участке «Енисейский» (Красноярский край) // Радиоактивные отходы. 2018. № 2 (3). С. 52—62.

13. Мартынов К. В., Захарова Е. В., Дорофеев А. Н., Зубков А. А., Прищеп А. А. Функциональные свойства глинистых материалов для защитных барьеров радиационно опасных объектов // Радиоактивные отходы. 2020. № 4 (13). С. 42—57. DOI: 10.25283/2587-9707-2020-4-42-57.

14. Абрамов А. А., Бейгул В. П. Создание подземной исследовательской лаборатории на участке «Енисейский» Нижнеканского массива: состояние и дальнейшее развитие работ // Безопасность ядерных технологий и окружающей среды. 2017. — URL: <http://www.atomic-energy.ru/articles/2017/08/22/78690> (дата обращения: 15.09.2022).

15. Захоронение РАО на участке «Енисейский» в Красноярском крае: история выбора площадки и современное состояние исследований. — М. : ИБРАЭ РАН, 2023. 357 с.

16. Озерский Д. А., Гупало В. С., Казаков К. С., Неуважеев Г. Д. Изучение параметров геологического массива в рамках создания и эксплуатации подземной исследовательской лаборатории на участке «Енисейский» в Красноярском крае // Радиоактивные отходы. 2022. № 4 (21). С. 78—89. DOI: 10.25283/2587-9707-2022-4-78-89.

17. Кащеев В. А., Логунов М. В., Шадрин А. Ю., Рыкунова А. А., Шмидт О. В. Стратегия фракционирования ВАО от переработки ОЯТ // Радиоактивные отходы. 2022. № 2 (19). С. 6—16. DOI: 10.25283/2587-9707-2022-2-6-16.

18. Гусаков-Станюкович И. В. Сбалансированный ЯТЦ. Новый бренд на рынке заключительной стадии ЯТЦ. — URL: <http://www.atominform.ru/newsz05/a0501.htm> (дата обращения: 11.04.2023).

Информация об авторе

Бейгул Валерий Прокопьевич, кандидат технических наук, эксперт Департамента инновационного развития и технологий, ФГУП «Национальный оператор по обращению с радиоактивными отходами» (119017, Москва, Пятницкая ул., 49А, стр. 2), e-mail: vpbevgul@noraо.ru, v-bgl@yandex.ru.

Библиографическое описание статьи

Бейгул В. П. О вариантах технических решений по обращению с радиоактивными отходами класса 1 при создании и эксплуатации ПГЗРО // Радиоактивные отходы. 2023. № 3 (24). С. 92–102. DOI: 10.25283/2587-9707-2023-3-92-102.

ON DESIGN OPTIONS PROVIDING THE MANAGEMENT OF RADIOACTIVE WASTE CLASS 1 DURING DGR ESTABLISHMENT AND OPERATION

Beygul V. P.

National Operator for Radioactive Waste management FSUE, Moscow, Russia

Article received on July 2, 2023

The article focuses on design options proposed for radioactive waste Class 1 (RW-1) transportation and horizontal disposal in DGR using corrosion-resistant overpacks or packages. Since canisters with RW-1 are going to be shipped from the PA Mayak site in TUK-108/r, the article suggests that a special Pick Up and Packaging Station can be arranged to provide RW-1 packaging in accordance with the DGR waste acceptance criteria for disposal. It also considers the proposals on the fabrication of non-returnable packages and their transportation from the Pick Up and Packaging Station to the horizontal RW disposal compartment. The article presents the proposed compartment layout. It provides preliminary estimates regarding possible RW-1 and RW-2 disposal volumes assuming the concept of horizontal RW-1 disposal in the DGR.

Keywords: radioactive waste, non-returnable package for RW-1, corrosion-resistant material, transportation flowchart, RW disposal compartment, Pick-up and Packaging Station.

Acknowledgments

The author would like to express his gratitude to A. V. Baryshev, Deputy General Director, FSUE NO RAO; V. Ya. Krasilnikov, Director of Innovation and Technology Department; A. A. Pugolovkin, Project Manager of the Capital Construction Department for valuable critical feedback on the original edition of the article.

References

1. *Materialy obosnovaniya litsenzii na razmeshcheniye i sooruzheniye ne odnosyashchegosya k yadernym ustanovkam punkta khraneniya RAO, sozdavayemogo v sootvetstviy s proyektnoy dokumentatsiyey na stroitel'stvo ob'yektov okonchatel'noy izolyatsii RAO (Krasnoyarskiy kray, Nizhne-Kanskiy massiv) v sostave podzemnoy issledovatel'skoy laboratorii (vkluchaya materialy otsenki vozdeystviya na okruzhayushchuyu sredu)* [Siting and construction license application for a RW storage facility not referred to the category of nuclear installations established in accordance with the designs developed for the construction of final RW disposal facilities (Krasnoyarsk Territory, Nizhnekansk rock mass) as part of an underground research facility (including the environmental impact

assessment reports)]. Moscow, Federal State Unitary Enterprise NO RAO, 2015. — URL: <http://www.noraо.ru/ecology/mol/> (accessed on: 25.03.2021).

2. Beygul V. P., Pavlov D. I. *Sravneniye al'ternativnykh skhem zakhroneniya RAO klassa 1 v sostave PGZRO* [Comparison of alternative RW Class 1 disposal layouts under the DGR designs]. *Bezopasnost' yadernykh tekhnologiy i okruzhayushchey sredy — Safety of Nuclear Technologies and the Environment*, 2019. — URL: <http://www.atomic-energy.ru/articles/2019/11/12/98998> (accessed on: 25.03.2021).

3. Kryukov O. V. *Strategiya sozdaniya punkta glubinnogo zakhroneniya RAO* [Strategy for the development of RW deep disposal facility]. *Radioaktivnye otkhody — Radioactive Waste*, 2018, no. 3 (4), pp. 114–120.

4. *Sertifikat-razresheniye na konstruktsiyu upakovki i perevozku. Transportno-upakovochnyy komplekt TUK-108/r s osteklovannymi VAO* [Certificate-permit for package design and transportation. Transport and packaging overpack TUK-108/r with vitrified HLW]. RUS/397/B(U)-96T (Rev-1). April 22, 2022.

5. *Federal'nyi zakon ot 11.07.2011 No. 190-FZ "Ob obrashchenii s radioaktivnymi otkhodami i o vneseanii izmenenii v ot-del'nye zakonodatel'nye akty Rossiiskoi Federatsii"* [Federal Law No. 190-FZ of July 11, 2011 On Radioactive Waste Management and

Amendments to Certain Legislative Acts of the Russian Federation].

6. Krupskaya V. V., Zakusin S. V., Lekhov V. A., Dorzhieva O. V., Belousov P. E., Tyupina E. A. Izolyatsionnye svoystva bentonitovykh bar'ernykh sistem dlya zakhoroneniya radioaktivnykh otkhodov v Nizhnekanskom massive [Properties of Bentonite Barrier Systems for Radioactive Waste Isolation in Geological Repository in the Nizhnekanskiy Massif]. *Radioaktivnye otkhody — Radioactive Waste*, 2020, no. 1 (10), pp. 35–55. DOI: 10.25283/2587-9707-2020-1-35-55.

7. Martynov K. V., Zakharova E. V., Kulyukhin S. A. Al'ternativnaya kontseptsiya ustroystva zashchitnykh bar'erov pri glubinnom zakhoronении RAO klassa 1 na Eniseiskom uchastke Nizhnekanskogo massiva [Alternative Conceptual Designs of Safety Barriers Proposed for Deep RW Class 1 Disposal at the Yeniseiskiy Site in the Nizhnekanskiy Rock Mass]. *Radioaktivnye otkhody — Radioactive Waste*, 2022, no. 2 (19), pp. 68–84. DOI: 10.25283/2587-9707-2022-2-68-84.

8. Omelianenko B. I. Protsessy okolorudnogo izmeneniya vmeshchayushchikh porod [Processes of near-ore host rock alteration]. *Gidrotermal'nyye mestorozhdeniya urana [Hydrothermal Uranium Deposits]*. Moscow, Nedra Publ., 1978. Pp. 264–292.

9. Brusewitz A. M. Chemical and physical properties of Paleozoic potassium bentonites from Kinnekule, Sweden. *Clays and Clay Minerals*, 1986, vol. 34, no. 4, pp. 442–454.

10. Eslinger E., Highsmith P., Albers D., deMayo B. Role of Iron Reduction in the Conversion of Smectite to Illite in Bentonites in Disturbed Belt, Montana. *Clays and Clay Minerals*, 1979, vol. 27, no. 5, pp. 327–338.

11. Bogatov S. A., Boldyrev K. A., Kryuchkov D. V. *Engineering protective barriers evolution for design project of vitrified high-level waste geological disposal in Nizhnekansky massif*. Preprint, Nuclear Safety Institute RAS, IBRAE-2018-15). — Moscow: NSI RAS, 2018. — 45 p. — Bibliogr.: 93 items.

12. Martynov K. V., Zakharova E. V. Analiz lokalizatsii i stsenariya ehvolyutsii PGZRO na uchastke Eniseiskii (Krasnoyarskii krai) [The Analysis of Localization and the Scenario of Evolution of DGDF for RW at the Yeniseisky Site (Krasnoyarsk Region)]. *Radioaktivnye otkhody — Radioactive Waste*, 2018, no. 2 (3), pp. 52–62.

13. Martynov K. V., Zakharova E. V., Dorofeev A. N., Zubkov A. A., Prishchep A. A. Funktsional'nye svoystva glinistyykh materialov dlya zashchitnykh bar'erov radiatsionno opasnykh ob'ektov [Performance of Clay Materials Constituting to Safety Barriers in Radiation Hazardous Facilities]. *Radioaktivnye otkhody — Radioactive Waste*, 2020, no. 4 (13), pp. 42–57. DOI: 10.25283/2587-9707-2020-4-42-57.

14. Abramov A. A., Beygul V. P. Sozdaniye podzemnoy issledovatel'skoy laboratorii na uchastke “Yeniseyskiy” Nizhnekanskogo massiva: sostoyaniye i dal'neysheye razvitiye rabot [Development of an underground research facility at the Yeniseiskiy site in the Nizhnekansk rock mass: the state-of-art and future prospects]. *Bezopasnost' yadernykh tekhnologiy i okruzhayushchey sredy — Safety of Nuclear Technologies and the Environment*, 2017. — URL: <http://www.atomic-energy.ru/articles/2017/08/22/78690> (accessed on: 15.09.2022).

15. *Zakhoroneniye RAO na uchastke “Yeniseyskiy” v Krasnoyarskom krae: istoriya vybora ploshchadki i sovremennoye sostoyaniye issledovaniy* [RW disposal at the Yeniseiskiy site in the Krasnoyarsk Territory: site selection milestones and current progress in R&D]. Moscow, IBRAE RAN Publ., 2023. 357 p.

16. Ozerskiy D. A., Gupalo V. S., Kazakov K. S., Neuvazhaev G. D. Izuchenie parametrov geologicheskogo massiva v ramkakh sozdaniya i ehkspluatatsii podzemnoi issledovatel'skoi laboratorii na uchastke “Yeniseyskiy” v Krasnoyarskom krae [Studying the Parameters of a Geological Rock Mass for the Establishment and Operation of an Underground Research Facility at the Yeniseyskiy Site in the Krasnoyarsk Region]. *Radioaktivnye otkhody — Radioactive Waste*, 2022, no. 4 (21), pp. 78–89. DOI: 10.25283/2587-9707-2022-4-78-89.

17. Kashcheev V. A., Logunov M. V., Shadrin A. Yu., Rykunova A. A., Shmidt O. V. Strategiya fraktsionirovaniya VAO ot pererabotki OYAT [Strategy for the fractionation of HLW from SNF reprocessing]. *Radioaktivnye otkhody — Radioactive Waste*, 2022, no. 2 (19), pp. 6–16. DOI: 10.25283/2587-9707-2022-2-6-16.

18. Gusakov-Stanyukovich I. V. *Sbalansirovannyy YATTS. Novyy brend na rynke zaklyuchitel'noy stadii YATTS* [Harmonized NFC. A new brand in the market of the final NFC stage]. — URL: <http://www.atominfo.ru/newsz05/a0501.htm> (accessed on: 11.04.2023).

Information about the author

Beygul Valery Prokopievich, Candidate of Technical Sciences, Expert of the Department of Innovative Development and Technologies, National Operator for Radioactive Waste management FSUE (49A, b. 2, Pyatnitskaya st., Moscow, 119017, Russia), e-mail: vpbeygul@norao.ru, v-bgl@yandex.ru.

Bibliographic description

Beygul V. P. On Design Options Providing the Management of Radioactive Waste Class 1 during DGR Establishment and Operation. *Radioactive Waste*, 2023, no. 3 (24), pp. 92–102. DOI: 10.25283/2587-9707-2023-3-92-102. (In Russian).