DOI: 10.25283/2587-9707-2022-1-62-76 УДК 621.039.(58:7)

ОБОСНОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ТЕХНОЛОГИИ ЗАХОРОНЕНИЯ РАО 2 И 3 КЛАССОВ В ПРОСТРАНСТВЕ ПОДЗЕМНЫХ РУДНИКОВ ПАО «ППГХО»

Е. В. Кузьмин[1], Е. П. Маянов[1], И. М. Игин[1], А. В. Минин[1], М. Ю. Бамборин[1], А. В. Калакуцкий[2], А. А. Морозов[3], А. Н. Каманин[1], Ю. В. Трофимова[1]

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

[2]ООО «Московский научно-исследовательский проектно-изыскательский институт технологий и инноваций», Москва

[3]ПАО «Приаргунское производственное горно-химическое объединение имени Е. П. Славского», Краснокаменск, Забайкальский край

Статья поступила в редакцию 13 декабря 2021 г.

Поиск новых решений проблемы обращения с радиоактивными отходами (далее — РАО) является одним из приоритетных направлений исследований в странах с атомной энергетикой.

В соответствии с классификацией, установленной Постановлением Правительства Российской Федерации от 19.10.2012 № 1069, РАО класса 2 должны размещаться в ПЗРО, построенных на глубине более 100 м, захоронение РАО класса 3 возможно в приповерхностных ПЗРО на глубине до 100 м. Возможность совместного захоронения нетепловыделяющих РАО 2 и 3 классов в камерах на больших глубинах, с определенной подготовкой камер для обеспечения безопасности, является перспективным направлением работ. При использовании для захоронения РАО существующих выработок подземных рудников может быть достигнуто снижение финансовой нагрузки за счет существующей поверхностной и подземной инфраструктуры. Возможность эксплуатации пространства горных выработок для размещения ПЗРО вызывает необходимость исследований и обоснований безопасности, включая долговременную, с целью подтверждения требований, предъявляемых к объектам захоронения РАО.

В настоящей статье приведены инженерные технологии, позволяющие приступить к обоснованию возможности захоронения РАО 2 и 3 классов в подземных рудниках. Представлены результаты анализа горно-геологических характеристик горных пород месторождений Стрельцовской кальдеры, в которой сосредоточены урановые рудники ПАО «ППГХО», рассмотрены основные геомеханические свойства пастовой закладки на основе материалов переработки урановых руд, параметры тросоинъекционного упрочнения трещиноватых пород для ликвидации трещин, минимизации фильтрации подземных вод и газов, дано описание процессов подготовки камер, находящихся на глубинах до 1000 м и более.

Ключевые слова: *обращение с РАО, радиоактивные отходы, контейнеры с РАО, отработанные камеры, подземное пространство, тросоинъекционные штанги, подземные хранилища РАО, захоронение РАО, упрочнение трещиноватого массива, горные породы, пастовая закладка, урановые руды, радоновыделение.*

Введение

В странах с атомной энергетикой глубинное геологическое захоронение РАО изучается в течение нескольких десятилетий. Для этих целей имеются подземные исследовательские лаборатории (ПИЛ), проводящие крупномасштабные испытания. В проектах подземных сооружений для длительного хранения РАО низкого и среднего уровня активности предусматривается создание в однородных слабопроницаемых породах нескольких тоннелей с вертикальными или наклонными стволами, различными схемами транспортировки и штабелирования

упаковок с РАО, системами вентиляции и отвода воды. Имеется несколько пространственных компоновок выработок ПЗРО в зависимости от характеристик захораниваемых РАО, места заложения, свойств горных пород, планируемого объема захоронения [1].

Подземные выработки используются для хранения и захоронения РАО в Испании, Франции, Швеции, Финляндии и других странах. На шахте Конрад (Германия) в пласте ожелезненных терригенно-карбонатных пород, на глубинах до 800 метров, создается ПЗРО для нетепловыделяющих отходов низкого и среднего уровня активности. Для захоронения упаковок с РАО будут готовиться новые камеры длиной до 1000 м и сечением до 40 м^2. Пространство вокруг сложенных в три яруса упаковок с РАО (около 40 % объема выработки) заполняется сорбирующим буфером. Общая емкость составит около 1 млн м^3. ПЗРО Батаапати (Венгрия) предназначен для низко- и среднеактивных РАО общим объемом 20 тыс. м^3. Имеется кольцевая схема откатки, тупиковые камеры-заходки для размещения контейнеров с РАО. Сечение камер — около 40 м^2, общая длина — 1000 м [1].

В РФ первый приповерхностный пункт финальной изоляции твердых РАО 3 и 4 классов (ППЗРО) построен в районе г. Новоуральск, в эксплуатации он находится с 2016 года. Два ППЗРО — около г. Озерск, емкостью до 200 тыс. м^3, и г. Северск, емкостью до 150 тыс. м^3, — находятся в стадии строительства. Разработан проект создания пункта глубинного захоронения РАО 1 и 2 классов (ПГЗРО) в Нижнеканском массиве высокопрочных монолитных пород (Красноярский край). В соответствии с разработанной и утвержденной Стратегией создания ПГЗРО первым этапом станет строительство ПИЛ [2]—[5].

Характеристики горных пород Стрельцовской кальдеры

Осадочно-вулканогенный комплекс пород Стрельцовской кальдеры проседания состоит в основном из фельзитов, конгломератов, гравелитов, трахидацитов, базальтов, андезито-базальтов и их лавовых брекчий. Коэффициенты крепости пород по шкале проф. М. М. Протодьяконова варьируют от 8—10 (для песчаников и туфов) до 10—18 (для трахидацитов и гранитов) [6]. По крепости руды и вмещающие породы отличаются незначительно.

Их объемная масса в среднем принята равной 2,45 т/м^3, пористость меняется в пределах 0,11—14,7 %, влажность в естественном залегании — 2,89—3,14 %. При шпуровой и скважинной отбойке коэффициент разрыхления пород и руд составляет в среднем 1,6.

Вне зон тектонических нарушений породы характеризуются как среднеустойчивые, проходка горных выработок в них может выполняться без крепления или с облегченными видами крепи (табл. 1) [6].

Таблица 1. Характеристики трещиноватости пород Стрельцовского урановорудного поля

Группа трещиноватости	Наименование группы трещиноватости	Размер элементарного структурного блока, $d_{ср, м}$	Удельный вес группы трещиноватости пород, %
I	Раздробленные	менее 0,05	3—30
II	Сильнотрещиноватые	0,05—0,15	30—50
III	Трещиноватые	0,6—0,30	10—50
IV	Слаботрещиноватые	более 0,30	10—20

Хорошей устойчивостью обладают мелкогалечные конгломераты и гравелиты, крепление которых при проходке горных выработок требуется только на отдельных участках — в местах пересечения крупных тектонических нарушений. Трахидациты разбиты разноориентированной трещиноватостью со средним размером элементарного блока 15—25 × 60 см. Вне зон тектонических нарушений, при небольшом сроке службы выработки, проходка может осуществляться без крепления. При длительной эксплуатации горных выработок, в зависимости от трещиноватости пород, для крепления применяются железобетонные штанги, в том числе с затяжкой кровли сеткой и торкретированием бетоном. Фельзиты нарушены столбчатой отдельностью. Характерной особенностью этих пород является образование заколов в стенках и кровле выработки при продвижении забоя буровзрывным способом.

В соответствии с характеристиками трещиноватости горных пород наиболее подходящими для выбора и подготовки камер-хранилищ РАО 2 и 3 классов являются участки IV группы (табл. 1), сложенные из мелкогалечных конгломератов, гравелитов, трахидацитов, базальтов, андезито-базальтов; их удельный вес составляет 10—20 % (рис. 1) [6].

По гидрогеологическим характеристикам Стрельцовская кальдера проседания отличается выраженной автономией. Воды четвертичных отложений не имеют гидравлической связи с подземными водами района месторождений, поэтому радиоактивная шахтная вода не загрязняет окружающий артезианский бассейн.

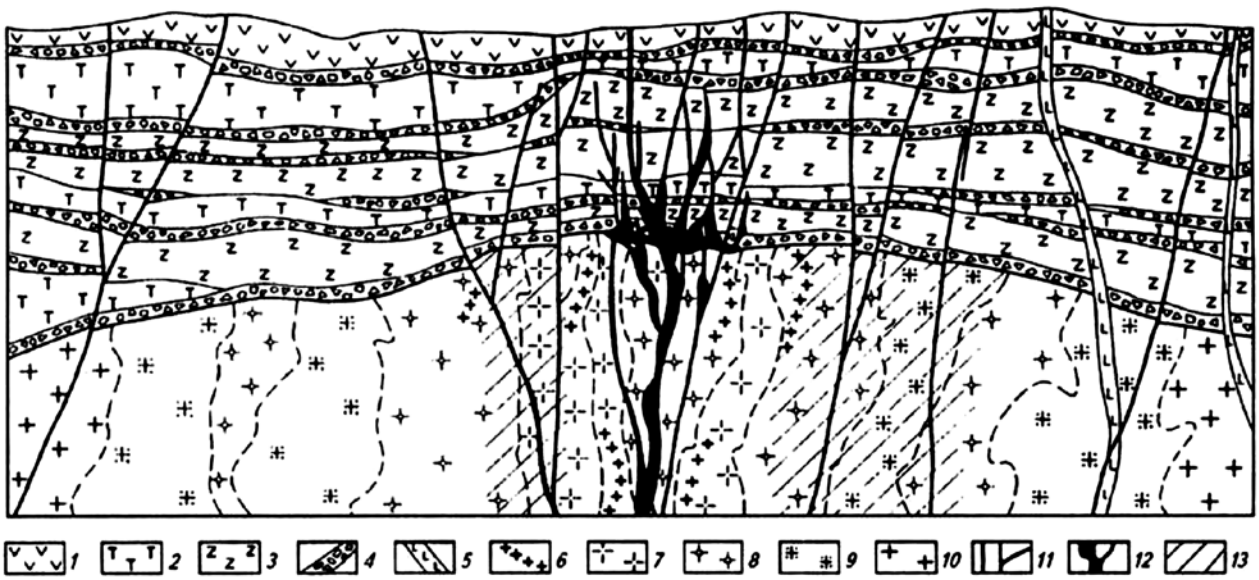

Рис. 1. Геологический разрез Стрельцовской кальдеры: 1 — фельзиты, 2 — андезито-базальты, 3 — трахидациты, 4 — конгломераты, гравелиты, песчаники, 5 — дайки основного состава, 6–10 — гранитоиды (6 — аплитовидные, 7 — пегматоидные, 8 — лейкократовые, 9 — биотитовые, 10 — гранитогнейсы), 11 — разрывные нарушения, 12 — рудные тела, 13 — области пониженных содержаний урана

Таблица 2. Стрельцовская кальдера, гидрогеологические характеристики

№	Тип подземных вод	Глубина, м, типы пород	Фоновые концентрации радиоактивных веществ, г/л	Гидравлическая связь с другими типами вод
1	Пластово-поровые воды аллювиальных и пролювиальных четвертичных отложений	20–40, осадочные породы	За зоной горных работ U – $1{,}6\cdot10^{-5}$ ($4{,}06\cdot10^{-4}$ Бк/кг); Ra – $1{,}2\cdot10^{-11}$; Rn – 110 Бк/кг	Ограниченное распространение, не связаны с подземными водами района месторождений
2	Пластово-трещинные воды коры выветривания осадочно-вулканогенных пород	50–200 м, осадочные породы	U – $9\cdot10^{-7}$ (до $2\cdot10^{-4}$ в рудных зонах); Ra – до 740 Бк/кг; $K_ф$=0,0033; м/сут pH – 7–8	Нет гидравлической связи с водами зон тектонических нарушений осадочно-эффузионных гранитоидных интрузий
3	Трещинно-жильные воды зон тектонических нарушений осадочно-эффузионных гранитоидных интрузий	200–360 и более, граниты	U – $22{,}8\cdot10^{-3}$ (25,4 Бк/кг); Ra – 6000 Бк/кг. Ниже зоны 300 м: U – $5\cdot10^{-4}$ (до 12,7 Бк/кг); Ra – 37 Бк/кг	Нет гидравлической связи с водами коры выветривания осадочно-вулканогенных пород

Пластово-трещинные воды коры выветривания и трещинно-жильные воды зон тектонических нарушений не имеют гидравлической связи между собой (табл. 2) [8].

Из фонда подземного пространства рудников ПАО «ППГХО» наиболее подходящими являются отработанные камеры рудников № 1 и «Глубокий», с общим объемом пустот до 1,5 млн м^3 [9].

Способ захоронения РАО, конструкции сооружений, состав и свойства барьеров безопасности определяются в зависимости от характеристик РАО, планируемых для захоронения, их объема, природных параметров в районе расположения и результатов оценки безопасности ПЗРО [11]. В соответствии с требованиями постановления Правительства от 19.10.2012 № 1069 подлежат захоронению:

- РАО 1 и 2 классов — в глубинных ПЗРО;
- РАО 3 и 4 классов — в приповерхностных ПЗРО — сооружениях, размещаемых выше, на одном уровне с поверхностью земли или ниже, на глубине до 100 м.

Строительство ПЗРО на площадках, расположенных непосредственно в активных разломах или геодинамических зонах, не допускается. На территории рудников № 1 и «Глубокий» расположены разломы: Стрельцовский, Восточная зона, Центральная зона, Мало-Тулукуевская зона, образованные в палеозойский, мезозойский и меловой периоды, около 100 млн лет назад и ранее, которые отсутствуют в списке активных разломов Геологического института РАН [7].

Не допускается размещать ПЗРО на площадках, сейсмичность которых характеризуется интенсивностью максимального расчетного землетрясения, превышающей 8 баллов по шкале МСК-64. На карте ОСР-2016-D рудники № 1 и

«Глубокий» расположены в зоне с максимальной интенсивностью землетрясений в 7 баллов. Период их повторяемости — 1000 лет. Вероятность превышения расчетной интенсивности в течение 50 лет — 0,5 % [27].

При захоронении РАО 2 и 3 классов (нетепловыделяющих), с использованием отработанных камер подземных рудников и их предварительной подготовкой, предусмотрено создание системы барьеров безопасности [11], включающей:

1) контейнеры — основные изолирующие барьеры, выполненные из металла или железобетона. Рассматривается, как вариант, использование контейнеров НЗК-150-1,5П [12]. Они укладываются в штабели до 9 ярусов с зазором у стенок шириной 1—2 м для перемещения опор крана и персонала (погрузчики целесообразно использовать при укладке контейнеров в штабели высотой до 4 ярусов);

2) пастовую закладку пустот между контейнерами и стенками камер на основе материалов переработки урановых руд (РАО 6 класса), обладающую радиационной стойкостью (содержит природные нуклиды), низкой первоначальной вязкостью (< 400 мПа·с), с возможностью трубопроводной транспортировки и заполнения пустот в камере, и необходимой прочностью при отверждении;

3) тросоинъекционное упрочнение вмещающих пород вокруг камер путем нагнетания в трещиноватый массив твердеющих составов. Упрочняющий материал из пробуренных шпуров или скважин проникает в трещины с раскрытием до 0,06 мм, адгезия с породой и собственная прочность превышают прочность породы на растяжение, состав сохраняет прочность во времени, не растворяется в воде, препятствует фильтрации воды и газов;

4) глубинное расположение хранилищ РАО, до 1000 м и более: мощный массив налегающих пород, сложенный гранитами, конгломератами, гравелитами и др. с долгосрочной геохимической стабильностью, высокой прочностью и теплопроводностью, малой пористостью.

Контейнеры для изоляции РАО 2 и 3 классов

Формы и размеры некоторых контейнеров РАО, изготавливаемых АО «345 Механический завод», приведены на рис. 2 [12].

Для размещения РАО в отработанных очистных камерах крутого падения большой и средней мощности целесообразно использовать железобетонные контейнеры НЗК-150-1,5П размерами 1,65 × 1,65 × 1,375 м. Внутренний объем для укладки РАО составляет до 1,5 м^3, если же имеются пустоты (поверхности отражения сейсмических и ударных волн), то они должны заполняться бетоном. Как правило, при укладке в хранилищах формируются комбинации из различных контейнеров.

Пастовая закладка на основе материалов переработки урановых руд

Пастовая закладка пустот в отработанных подземных камерах широко распространена в ведущих горнодобывающих странах, и в нашей стране в частности. Более 20 лет существует международное общество «PASTE», которое проводит ежегодные конференции, выпускает сборники докладов с результатами исследований и практического применения этой технологии.

В подземных камерах ПАО «ППГХО» пространство между штабелем из контейнеров с РАО и стенками предлагается заполнять пастовой закладкой, приготовленной из материалов переработки урановых руд (выдаваемых ГМЗ в количестве около 2,5 млн м^3/год), с добавлением флокулянтов и упрочняющих добавок (цемент, зола уноса, песчано-гравийная смесь (ПГС), дробленая порода).

Исследования свойств данной пастовой закладки выполнены в АО «ВНИПИпромтехнологии» и ПАО «ППГХО» [13, 14]. Пастовая закладка — гелеобразная минеральная масса с плотностью до 1,2—1,8 т/м^3. Она не вступает в химические реакции с металлическими и бетонными

КМЗ **НЗК** **Бочка** **КРАД**

Рис. 2. Контейнеры, используемые в качестве упаковок РАО

контейнерами и в течение 28—60 суток набирает прочность на сжатие 1,0—2,0 МПа и более.

Шламовые частицы составляют большую часть твердой фракции пульпы (табл. 3), их сгущение производится с помощью флокулянтов. Наиболее приемлемыми являются Magnaflok (марки 919, 155, 10, 342), а также BEESFLOK (марки K6732), FLONOR (марок MA-19, MA-20, MA-22, PA-265E, PA-287E, PA-287X), ПАА КНР [13].

Таблица 3. Гранулометрический состав твердой фракции пульпы хвостов переработки карбонатных урановых руд (по данным ЦНИЛ ПАО «ППГХО») [14]

Наименование материала	Гранулометрический состав, %, с размером частиц, мм					
	+0,2	−0,2—+0,1	−0,1—+0,07	−0,07—+0,05	−0,05—+0,02	<0,02
Твердая фракция полученной пульпы	0	8±2	12±2	16±2	24±2	40±2

В чановом сгустителе шламовые частицы хвостовой пульпы с помощью флокулянта объединяются в крупные флокулы (рис. 3) [14].

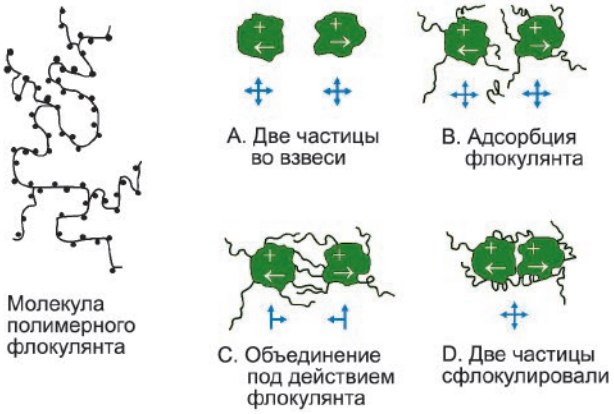

Рис. 3. Образование крупных флокул из мономеров-флокулянтов и шламовой части хвостовой пульпы

К технологическим параметрам пастовой закладки относятся реологические свойства (вязкость, сопротивление на сдвиг, плотность) и прочность. Реологические свойства материала пасты определены методом осадки конуса (рис. 4) [13, 14].

Рис. 4. Определение реологических свойств пасты методом осадки конуса при содержании твердого материала: а) 53%, б) 58%, в) 62%

Хвостовая пульпа, образующаяся на гидрометаллургическом заводе (ГМЗ), имеет содержание твердого материала 34,4%, после сгущения пастовая закладка содержит 45—65% и может изменяться в зависимости от требований решаемой задачи.

Чановые сгустители — цилиндрические емкости диаметром от 10 до 50 м с коническим дном. Образующиеся тяжелые флокулы осаждаются в нижней части сгустителя, и чем медленнее этот процесс происходит, тем плотнее получаемая в донной части паста за счет выдавливания из нее свободной воды. Осветленная вода вытесняется из пульпы на верхний уровень сгустителя и пускается в оборот.

Технологическая схема и стадии приготовления пасты в чановом сгустителе приведены на рис. 5 [13].

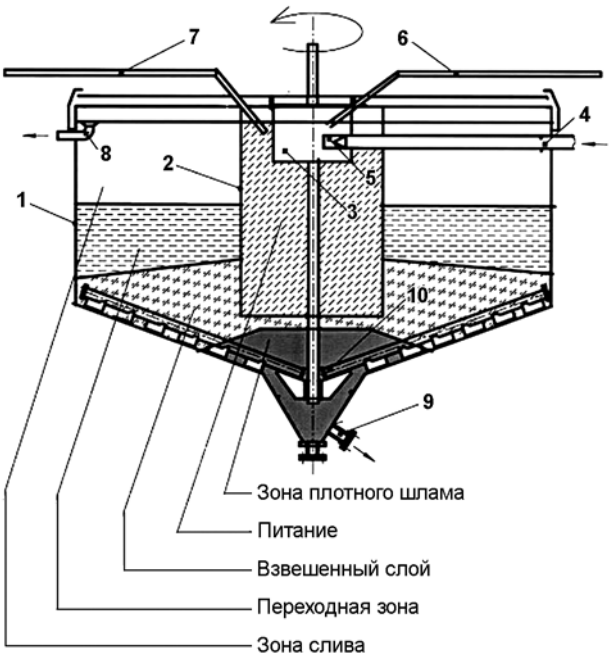

Рис. 5. Технологическая схема чанового сгустителя: 1 — чан сгустителя, 2 — камера хлопьеобразования, 3 — смесительная камера, 4 — трубопровод питания, 5 — тангенциальный ввод в смесительную камеру, 6 — трубопровод флокулянта первой стадии, 7 — трубопровод флокулянта второй стадии, 8 — сливной короб, 9 — выгрузка шлама, 10 — механизм удаления шлама

Пастовая закладка транспортируется по трубопроводу в виде густой однородной массы с плотным ядром в центре и разжиженной структурой по периферии. Это объясняется концентрацией однополярных ионов флокулянта на поверхности контакта пасты с трубопроводом, тем самым достигается эффект смазки, что позволяет транспортировать плотную пасту на большие расстояния без дополнительных насосных станций (рис. 6).

Рис. 6. Трубопроводная транспортировка пастовой закладки, содержание твердого материала: 45—65% и более

Графики изменения прочности на сжатие отвержденной пастовой закладки на основе материалов переработки карбонатных и алюмосиликатных урановых руд ПАО «ППГХО» во времени (14, 28, 56, 180 суток) приведены на рис. 7 [13, 14].

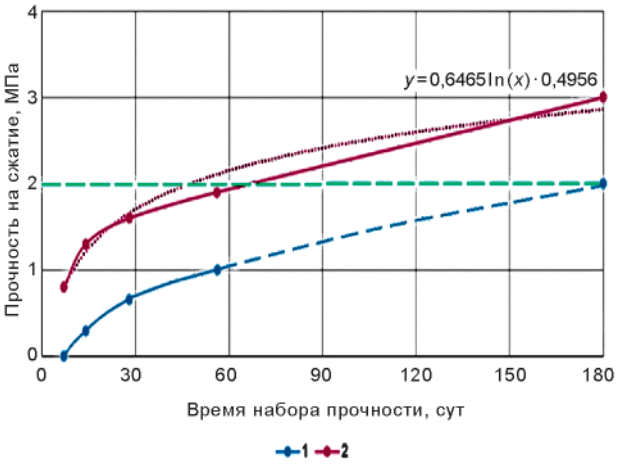

Рис. 7. Прочность образцов пасты на основе материалов переработки урановых руд на сжатие (МПа) при добавлении цемента (10%): 1 — карбонатных руд, 2 — алюмосиликатных руд

Для увеличения прочности в пастовую закладку добавляются цемент, ПГС, зола уноса, дробленые породы. Внесение упрочняющих веществ производится в смесителе, установленном после чанового сгустителя либо непосредственно перед камерой-хранилищем РАО. Добавляются присадки, позволяющие избежать трещин и усадки отвержденной пасты в камере.

Качество смешивания пасты и распределения добавок по объему смесителя в значительной степени влияет на прочность пастовой закладки при отверждении (рис. 8) [28].

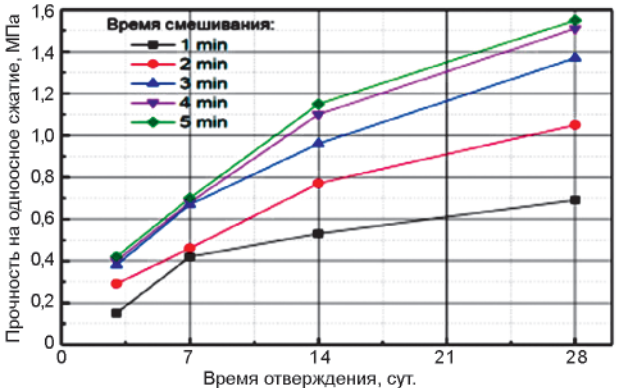

Рис. 8. Зависимости прочности пастовой закладки на сжатие от времени смешивания компонентов

Активность материалов переработки урановых руд снижается при наличии упрочняющих добавок. Выделение радона происходит из приповерхностных слоев пастовой закладки глубиной 6—8 см; плотность потока радона (ППР) пасты из материалов переработки алюмосиликатных урановых руд — до 500 мБк/м^2·с; ППР пасты из тонко измолотых материалов переработки карбонатных урановых руд — до 1500—2000 мБк/м^2·с [13, 14].

Добавление вяжущих, упрочняющих материалов позволяет не только увеличить прочность пастовой закладки, но и снизить ППР. Результаты исследований лаборатории радиационной безопасности ПАО «ППГХО» по снижению ППР в зависимости от добавления в пасту цемента (10%) и ПГС (5—20%) приведены на рис. 9 [14].

Из графика рис. 9 видно, что плотность потока радона снижается вдвое при добавлении 20% ПГС.

Анализ параметров пастовой закладки показывает, что данный материал является приемлемым для использования в качестве изолирующей оболочки вокруг контейнеров РАО 2 и 3 классов, размещенных в камере. Для оценки изменения свойств пастовой закладки при

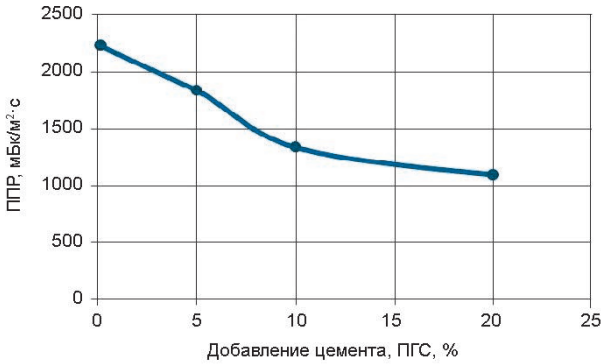

Рис. 9. Изменение плотности потока радона (ППР, мБк/м^2·с) из пасты на основе материалов переработки карбонатных урановых руд в зависимости от количества добавленного цемента (10%) и ПГС (20%)

нахождении в камере в течение длительных периодов времени требуются специальные исследования.

Упрочнение вмещающих пород вокруг камер-хранилищ РАО

Упрочнение горных пород — известный процесс в технологии подземной добычи руд. На стадии проектирования укрепление трещиноватых вмещающих пород вокруг камер предусматривается проводить в два этапа. Первый этап — предварительное тросоинъекционное упрочнение пород висячего, лежачего боков и кровли (перед отбойкой руды в блоке) с нагнетанием твердеющего состава через скважины в природные трещины и поры тектонического, сейсмического происхождения.

Второй этап — упрочнение контуров из самой камеры, проводимое после выемки руды для ликвидации технологических трещин. Проводится укрепление стен сеткой и набрызг-бетонирование поверхности. При подготовке уже существующей камеры, отработанной ранее без укрепления боков, проводятся работы только второго этапа.

Инъекционное упрочнение пород может быть анкерным (на глубину до 5 м) и тросовым. Укрепление тросоинъекционными штангами является наиболее эффективным, т. к. тросы имеют наибольшую прочность на растяжение и способны заводиться в скважину из узких выработок благодаря поперечному изгибу, притом что длина тросовых штанг может составлять 6—15 м и более. На рис. 10 приведены некоторые типы тросовых штанг [24].

Основной элемент тросоинъекционной штанги — несущий трос, свитый из 7 стальных проволок. Сечение штанги определяется исходя из того, что в массиве трос испытывает напряжения:

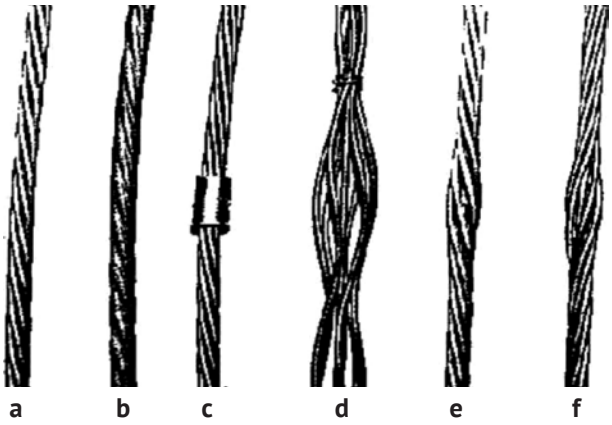

Рис. 10. Типы тросовых штанг: a — сплошной; b — с эпоксидной оболочкой от коррозии, для долгосрочной эксплуатации; c — со стальным зажимом; d — с расчалкой; e — со вставным ядром; f — с грушевидным утолщением

растяжения, растяжения и сдвига, чистого сдвига, сжатия и сдвига.

Для приготовления цементного раствора оптимальным водоцементным соотношением является В:Ц=0,35—0,4. При этом соотношении прочность цементного камня на сжатие наиболее высокая, его модуль упругости также наиболее высокий [24]. При установке тросоцементной штанги, в варианте с предварительным натяжением, в скважину сначала помещается полимерная ампула, которая раздавливается концом троса в забое и затвердевает за несколько минут с высокой собственной прочностью и адгезией с тросом и породами.

Высокопрочные безусадочные бетонные смеси с различной энергией самонапряжения и первоначальной вязкостью ниже вязкости воды разработаны компанией «Парад Русь» (г. Смоленск).

Полимерные смолы широко используются в качестве упрочняющих составов горных пород, некоторые из них приведены в табл. 4 [16].

Таблица 4. Отечественные полимерные материалы и свойства упрочняющих составов на их основе

№	Тип смол	Отвердитель	Динамическая вязкость, мПа·с	Время гелеобразования, мин	Прочность по контакту смола-порода, МПа	
					на разрыв	на сдвиг
1	Эпоксидные	Амины	>400	3–40	20–50	35–65
2	Полиуретановые ППУ-328, ППУ-329	Полиизоцианат марки «Б», «Д»	230–350	3–45	3,0–45	4,0–45
3	Полиэфирные	Диоксид бензола 8–10 %	200–350	3–50	2,0–12	3,0–14
4	Карбамидные КФ-БЖ	Рр щавелевой кислоты	140–230	5–300	2,7–2,9	2,9–3,3
5	КФ-Б	«	140–230	5–300	2,7–3,0	3,0–3,4
6	КФ-Ж	«	140–230	5–300	2,5–3,0	2,7–3,2
7	КФ-МТ	«	140–230	3–100	3,2–3,8	3,6–4,1
8	Акриловые	Персульфаты аммония	150–250	10–50	0,8–2,5	1,0–2,5
9	Магнезиальные составы	Хлорид магния	200–250	15–300	0,5–5,5	0,7–5,8
10	Фенолформальдегидные	Кислоты	180–280	5–200	2,0–3,5	2,4–3,8

С помощью высоконапорных насосов через пробуренные шпуры или скважины упрочняющие составы подаются в трещиноватый массив горных пород под высоким давлением (до 15—20 МПа), в результате чего имеющиеся трещины заполняются составом, который твердеет с высокой адгезией с породами.

Внутреннее напряжение укрепленного массива зависит от давления нагнетания и свойств используемых твердеющих составов, которые должны быть достаточно прочными и не разрушаться при деформациях и подвижках массива. Вспенивающиеся полиуретаны (ППУ-328, ППУ-329, выпускаемые АО «Полимерсинтез», г. Владимир) проникают в микротрещины за счет молекулярной дисперсности и дополнительного давления при вспенивании, обладают эластичностью при высокой прочности, менее всего подвержены разрушению при подвижках массива, сотрясениях от взрывных работ и природных сейсмических процессов (рис. 11) [16].

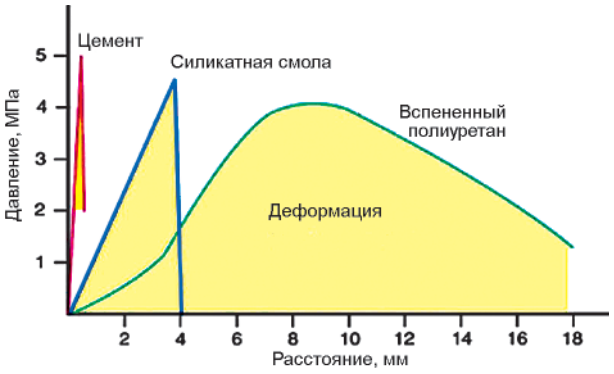

Рис. 11. Сравнение прочностных (на растяжение) эластичных свойств заполнителей трещин при нагнетании: цемента, силикатных смол, вспенивающихся полиуретанов

Параметры упрочнения трещиноватых пород

Имеется несколько методов расчета параметров тросоинъекционного упрочнения трещиноватого массива [18, 19], далее приводится один из них. Расчетная модель с использованием элементов теории оболочек основана на представлении упрочненной зоны в виде податливой вантовой крепи: на ванты нанизаны вплотную блоки омоноличенной упрочненной породы [18]. Условие сохранности упрочненной кровли:

$$F_э = 0{,}125\, k_з\, \rho\, h_н (L^2 + 4h^2)\, h,$$

где: $F_э$ — удельное усилие выдергивания троса из цементной оболочки, кН/м; $k_з$ — коэффициент запаса прочности (равен 1,5—2); ρ — средняя плотность пород, создающих нагрузку на упрочненную зону, кг/м^3; $h_н$ — высота слоя пород, создающих нагрузку на упрочненную зону (укрупненно, высота свода обрушения), м; L — длина троса в контурах выработки, м; h — допустимая вертикальная деформация кровли, м.

Расстояние между соседними тросами принимается как наименьшее из трех, определяемых:

1) по пределу прочности троса на разрыв, $\sigma_{тр.р.}$, МПа:

$$\alpha < 1000\, \sigma_{тр.р} S/(k_з\, \rho\, h_н L),$$

где S — площадь свода обрушения по оси троса, м^2;

2) по пределу прочности массива (после укрепления) при сдвиге $\tau_{у.сд.}$, МПа:

$$\alpha < 2\tau_{у.сд.} rL/(k_з\, \rho\, h_н L \cdot 10^{-3} - 2\tau_{у.сд.} r),$$

где r — радиус распространения упрочняющего состава в трещинах массива;

3) по пределу прочности верхней части упрочненного массива при продавливании тросом цементной оболочки $\sigma_{у.сж.}$, МПа:

$$\alpha < 1000\, \sigma_{у.сж.} d/(k_з\, \rho\, h_н),$$

где d — диаметр скважины (цементной оболочки), м.

Длина замковых частей тросов должна быть не менее 1,5—2,5 м.

С использованием полученного расстояния между тросами составляется сетка бурения скважин для установки тросоинъекционных штанг. Их длина и направление определяются с учетом направления основных систем трещин и размеров зоны трещиноватости.

В массиве имеется, как правило, от 5 до 9 пересекающихся систем трещин, под давлением все они заполняются жидким составом, поэтому при нагнетании упрочняющего состава блоки-отдельности и весь массив в целом испытывают давление объемного сжатия. После отверждения состава массив становится монолитным конгломератом с высоким внутренним напряжением, близким к равнокомпонентному. Качество упрочнения, полнота заполнения трещин проверяются сейсмоакустическими методами неразрушающего контроля [16].

При высоком давлении нагнетания происходят значительные изменения в напряженно-деформированном состоянии (далее — НДС) массива: упрочняющий состав, заполняя пространство трещины, раскрывает ее с силой до 2 000 т/м^2, что сравнимо с весом породного столба высотой 740 м (при среднем объемном весе 2,7 т/м^3). Массив находится в состоянии объемного сжатия, подобно конструкциям из предварительно напряженного железобетона.

а б

Рис. 12. Технические средства по упрочнению горных пород полиуретановыми смолами: а) пневмоприводная двухплунжерная установка S-35PU (Карботех, Германия) для нагнетания одно- и двухкомпонентных составов, давление — до 20 МПа, подача — 5л/мин, вес — 25 кг.; б) самоходная установка Unigrout E-800-100WB (АтласКопко, Швеция) по нагнетанию упрочняющих составов в шпуры и скважины с регулируемой подачей и давлением

Прочные породы месторождения «Антей» (рудник «Глубокий») на горизонтах ниже 500 м имеют склонность к горным ударам — мгновенным переходам породного массива из состояния объемного сжатия к одноосному с одновременным его раздавливанием. Прочность, например, серых песчаников при объемном сжатии составляет 270 МПа (с боковым сжатием 80 МПа), а при одноосном сжатии — 160 МПа, т. е. в 1,7 раза ниже. Естественно, при переходе из состояния объемного сжатия в одноосное (возникновение трещины от взрывных работ) и условии, что оставшаяся действующая сила превосходит предел прочности на одноосное сжатие, образовавшаяся в трещине свободная полоска массива будет раздавлена [17].

Этот процесс и последующее по цепочке раздавливание образующихся слоев-поверхностей происходят со скоростью механической волны, составляющей 3,5—7,0 км/с, процесс раздавливания массива происходит мгновенно, подобно взрыву.

Породный массив, находящийся в состоянии напряжения сжатия, укрепленный тросоинъекционными штангами, «связывающими» его в различных направлениях, менее подвержен трещинообразованию, разрушению при взрывных работах и других воздействиях. Тросовые штанги и отвержденный в трещинах упрочняющий состав препятствуют возникновению и развитию горного удара.

Имеется большой выбор отечественного и импортного высоконапорного насосного оборудования для нагнетания одно- и многокомпонентных цементных растворов и полимерных составов. При выборе насосов следует принимать во внимание возможность регулирования подачи состава (для выбора ламинарного движения состава по трещинам), а также схему — в какое число скважин принято вести нагнетание состава одновременно и какое давление нагнетания будет предельным для упрочняемого породного массива (до давления гидроразрыва). На рис. 12 представлено оборудование для нагнетания упрочняющих составов.

Пример высокопроизводительной самоходной машины для тросоинъекционного упрочнения горных пород приведен на рис. 13. Длина выносной стрелы-манипулятора для установки штанг и нагнетания твердеющих составов может достигать 20 м. Укрепление стенок камеры сеткой и набрызг-бетоном механизировано. Задачи по роботизации технологических процессов подготовки камер и укладки контейнеров в многоярусные штабели решаются компаниями «Вист», Epiroc, Sandvik, RCT, GHH Group и другими.

Рис. 13. Машина по установке тросоинъекционных штанг DD 420 компании Sandvik (Швеция), производительность — 50 тыс. м/год

Технология захоронения контейнеров с РАО 2 и 3 классов в отработанных камерах

Выбирается наиболее устойчивая камера требуемых размеров в отработанном руднике «сухой» консервации либо на удаленном изолированном участке действующего рудника без водопритока, расположенная на исходящей вентиляционной струе, не препятствующая подземному транспорту, удаленная от мест ведения буровзрывных и очистных работ. Под ней не должно быть отработанных камер, а горные работы не ведутся и не планируются. Соседние камеры и над ней максимально заполняются твердеющей закладкой с безусадочной добавкой. Выбор камеры подтверждается и обосновывается на основе оценок безопасности.

Камера очищается от руды и породы дистанционно управляемыми погрузо-доставочными машинами (ДУ ПДМ) с возможностью захода в очистное пространство. Ее стенки освобождаются от заколов машиной-оборщиком. Лежачий бок по возможности выравнивается до вертикального (рис. 14). Проводится зачистка, укрепление стенок и кровли тросоинъекционными штангами длиной 6—15 м и более с нагнетанием упрочняющего состава в трещины, металлической сеткой и набрызг-бетоном поверхности камеры.

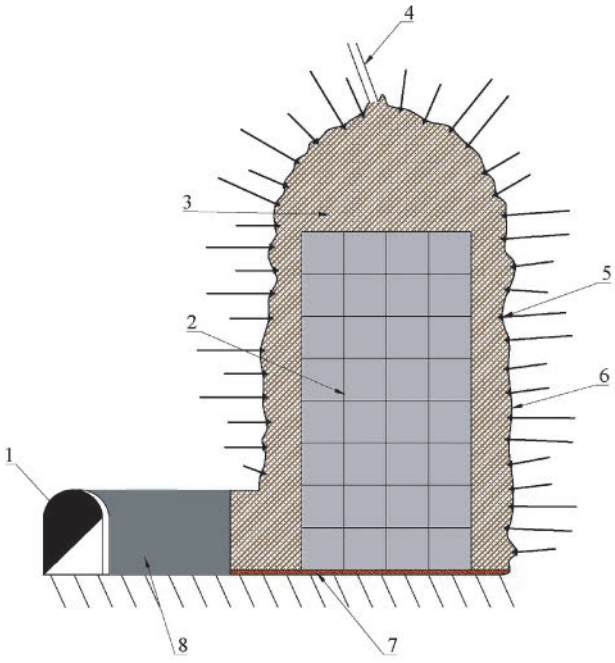

Рис. 14. Захоронение контейнеров с РАО 2 и 3 классов в отработанной камере: 1 — штрек, 2 — контейнеры НЗК-150-1,5П, 3 — пастовая закладка, 4 — скважина для подачи пастовой закладки, 5 — тросоинъекционные штанги, 6 — сетка и набрызг-бетон, 7 — бетонное основание и бентониовый слой, 8 — перемычка

По почве камеры и в прилегающих выработках создается дренажная система, предотвращающая проникновение вод, и система вентиляции. На почве камеры укладываются изолирующий слой глины и бентонита толщиной 0,5 м, слой железобетона толщиной 0,5 м или иной мощности с соответствующим обоснованием. На созданное основание монтируется кран, и с его помощью устанавливаются в штабель контейнеры с РАО [20, 21].

По длине камеры контейнеры могут устанавливаться в количестве, которое определяется ее размерами и подтверждается оценкой безопасности. Как правило, длина камеры составляет 45—50 м. В ней возможно устанавливать до 25 контейнеров с габаритами в плане 1,7 × 1,7 м, с оставлением зазоров до стен 1,0—2,0 м для опор крана. В камере шириной 9—11 м возможно размещение 4 контейнеров (рис. 14). При высоте камеры 15—17 м потенциально допустимо установить контейнеры в 8 ярусов. Вместимость камеры-хранилища с размерами 50 × 11 × 17 м может составлять до 800 контейнеров объемом до 1200 м^3 РАО (при использовании всего внутреннего объема контейнеров).

После укладки контейнеров в хранилище устанавливаются видеокамеры наблюдения уровня заполнения пустот пастой, датчики контроля параметров РАО и пастовой закладки, сейсмодатчики монолитности пастовой закладки и массива вмещающих пород. Кран, оборудование и машины удаляются, орты-заезды и все выработки перекрываются бетонными перемычками повышенной прочности, толщиной от 8 м и более.

Через скважину в верхней точке кровли камеры подается пастовая закладка, строго определенными порциями — стадиями, во избежание выдавливания бетонных перемычек незатвердевшей пастой на уровне ортов-заездов. Паста имеет такую первоначальную вязкость, при которой она заполняет не только пространство между контейнерами и стенками камеры, но и контейнерами в штабеле и их ярусами. Последняя порция подается под давлением для заполнения камеры «под кровлю». Паста при отверждении не имеет усадки, трещин.

После заполнения камеры система наблюдения переходит в режим долгосрочного мониторинга параметров состояния хранилища (монолитность массива, ППР, активность, влажность, температура и др.).

С учетом особой ответственности возводимых объектов оценка безопасности ПЗРО и конкретных камер-хранилищ РАО 2 и 3 классов с обоснованием параметров изолирующих

барьеров может быть представлена после подбора добавок и испытаний свойств пастовой закладки, а также параметров тросоинъекционного упрочнения вмещающих пород. Для освоения технологии захоронения РАО 2 и 3 классов в подземном пространстве урановых рудников ПАО «ППГХО» необходимо проведение ряда лабораторных и опытно-промышленных испытаний.

Заключение

В работе рассмотрены инженерные технологии — пастовая закладка на основе материалов переработки урановых руд, обладающая радиационной стойкостью, метод тросоинъекционного упрочнения вмещающих пород вокруг камер на больших глубинах, включая удароопасные, процессы подготовки камер для размещения контейнеров с РАО, горно-геологические характеристики пород месторождений Стрельцовского урановорудного поля, позволяющие приступить к обоснованию возможности использования отработанных камер подземных рудников ПАО «ППГХО» для захоронения РАО 2 и 3 классов.

Наличие подземных камер, приемлемых для захоронения РАО, а также готовой поверхностной и подземной инфраструктуры (подъездные дороги, поверхностный комплекс рудника, оборудованные вертикальные стволы для спуска-подъема людей, спуска контейнеров с РАО, транспортные выработки, системы вентиляции, водоотлива и др.) позволит сооружать ПЗРО с меньшими затратами.

Технология захоронения РАО в пространстве подземных рудников найдет свою экологическую нишу в решении задач обращения с ними. Освоение данной технологии позволит расширить географию размещения ПЗРО с учетом потребностей организаций, в процессе деятельности которых образуются РАО, получить дополнительные площадки для их надежной финальной изоляции.

Для развития и реализации технологии захоронения РАО 2 и 3 классов в подземном пространстве рудников ПАО «ППГХО» необходимы натурные исследования в специализированной лаборатории с целью отработки методик получения пасты с требуемыми параметрами, упрочнения трещиноватых породных массивов, укладки контейнеров в камерах, мониторинга НДС среды на рудниках [26], получения геодинамических, гидродинамических параметров состояния массива в районе участков захоронения РАО.

Литература

1. *Цебаковская Н. С., Уткин С. С., Капырин И. В. и др.* Обзор зарубежных практик захоронения ОЯТ и РАО. — М. : Комтехпринт, 2015. 208 с.
2. Стратегия создания пункта глубинного захоронения радиоактивных отходов // Радиоактивные отходы. 2018. № 2 (3). С. 114—120.
3. *Абрамов А. А., Большов Л. А., Дорофеев А. Н., Игин И. М., Казаков К. С., Красильников В. Я., Линге И. И., Трохов Н. Н., Уткин С. С.* Подземная исследовательская лаборатория в Нижнеканском массиве: эволюционная проработка облика // Радиоактивные отходы. 2020. № 1 (10). С. 9—21. DOI: 10.25283/2587-9707-2020-1-9-21.
4. *Дорофеев А. Н., Большов Л. А., Линге И. И., Уткин С. С., Савельева Е. А.* Стратегический мастер-план исследований в обоснование безопасности сооружения, эксплуатации и закрытия пункта глубинного захоронения радиоактивных отходов // Радиоактивные отходы. 2017. № 1. С. 32—41.
5. *Гупало В. С., Казаков К. С., Коновалов В. Ю., Демин А. В.* О синхронизации мероприятий программы исследования массива с проходческими работами при создании подземной исследовательской лаборатории в Нижнеканском массиве // Горный журнал. 2020. № 3. С. 72—78. DOI: 10.17580/gzh.2020.03.14.
6. *Ищукова Л. П.* Геология Урулюнгуевского рудного района и молибден-урановых месторождений Стрельцовского рудного поля. — Москва — Иркутск, пос. Октябрьский, 1995—1996. 382 с.
7. База данных активных разломов. Список разломов / Геологический институт РАН. Лаборатория неотектоники и современной геодинамики. 2015—2021 гг.
8. Экспертное заключение о гидрогеологических условиях урановорудных месторождений рудника № 6. 1981.
9. Календарный план погашения и наличие выработанного пространства по действующим рудникам ПАО «ППГХО» на 2018 г.
10. *Карманов Р. Г., Ищукова Л. П., Брель А. И., Губкин Г. Н., Сиротенко Е. П., Овсов В. К.* Аргунское и Жерловое месторождения (Юго-Восточное Забайкалье). Отчет о результатах разведочных работ на месторождениях с подсчетом запасов урана и молибдена по состоянию на 1 января 1993 года. Том 1. — Пос. Октябрьский — Иркутск, 1993.
11. *Кузьмин Е. В., Калакуцкий А. В., Морозов А. А.* Технология захоронения радиоактивных отходов в пространстве подземных рудников // Радиоактивные отходы. 2021. № 2 (15). С. 49—62. DOI: 10.25283/2587-9707-2021-2-49-62.
12. Сертификаты на контейнеры КМ3, КРАД, НЗК-150-1,5П АТ 9 00.00.000 / АО «345 Механический завод».

13. Исследования параметров твердеющей и пастовой закладки на основе материалов переработки урановых руд, разработка мер по снижению радоновыделения : Заключительный отчет по НИР, договор № 100-10-05/24027 / АО «ВНИПИпромтехнологии», 2016. 160 с.
14. Разработка технологий глубокого сгущения радиоактивных отходов (РАО) переработки урановых руд для поверхностного и подземного размещения : Заключительный отчет о НИОКР (исследовательская часть) / АО «ВНИПИпромтехнологии», 2019. 406 с.
15. *Potvin Y., Hudima M.* Open Stope Mining in Canada // In: Proceedings of the Conference: Massmin. Brisbane, Australia, 2000.
16. *Кузьмин Е. В.* Упрочнение горных пород при подземной добыче руд. — М. : Недра, 1991. 252 с.
17. *Кузьмин Е. В., Ляшевич С. И.* Предотвращение удароопасности массива методом инъекционного упрочнения горных пород // Горный журнал. 1989. № 11.
18. *Баранов А. О.* Расчет параметров технологических процессов подземной добычи руд. — М. : Недра, 1985. 224 с.
19. *Рогинский В. М.* Проектирование и расчет железобетонной штанговой крепи. — М. : Недра, 1971. 80 с.
20. *Кузьмин Е. В., Калакуцкий А. В., Тарасов М. А., Морозов А. А.* Обоснование возможности размещения радиоактивных отходов 2 и 3 классов в подземном пространстве урановых рудников // Горная промышленность. 2020. № 5. С. 32—37. DOI: 10.30686/1609-9192-2020-5-32-37.
21. *Кузьмин Е. В., Калакуцкий А. В., Тарасов М. А., Морозов А. А.* Концепция размещения радиоактивных отходов 2 и 3 классов в подземных выработках с изоляцией пастовой закладкой на основе материалов переработки урановых руд // Горная промышленность. 2020. № 6. С. 31—37.
22. *Ищукова Л. П., Карманов Р. Г., Брель А. И. и др.* Аргунское и Жерловое месторождения (Юго-Восточное Забайкалье) : Отчет о результатах разведочных работ на месторождениях с подсчетом запасов урана и молибдена по состоянию на 01.01.1993 года. / ГТП «Сосновгеология». П. Октябрьский — Иркутск, 1993. 2249 с.
23. *Калакуцкий А. В.* Концепция размещения РАО 2 и 3 классов в отработанных горных выработках с использованием контейнеров НЗК и изоляцией пастовой закладкой // Труды Международной конференции Tech Mining Russia, Москва, 2019.
24. *Hutchinson D. J., Diederichs M. S.* Cablebolting in Underground Mines. BiTech Publishers Ltd., Richmond, Canada. 1996. 406 p.
25. *Кузьмин Е. В., Калакуцкий А. В., Тарасов М. А.* Способ подземного захоронения радиоактивных отходов. Решение о выдаче патента на изобретение. Заявка № 2020107782 от 20.02.2020 г.
26. *Рассказов И. Ю., Петров В. А., Гладырь А. В., Тюрин Д. В.* Геодинамический полигон Стрельцовского рудного поля: практика и перспективы // Горный журнал. 2018. № 7. С. 17—21. DOI: 10.17580/gzh.2018.07.02.
27. ОСР–2016-D. Общее сейсмическое районирование территории Российской Федерации.
28. Материалы Международного симпозиума «PASTE», Пекин, Китай, 2017.

Информация об авторах

Кузьмин Евгений Викторович, профессор, доктор технических наук, главный специалист, ФГУП «Национальный оператор по обращению с радиоактивными отходами» (119017, Москва, Пятницкая ул., д. 49А, к. 2), e-mail: EVKuzmin@ norao.ru.

Маянов Евгений Павлович, директор департамента инновационного развития и технологий, ФГУП «Национальный оператор по обращению с радиоактивными отходами» (119017, Москва, Пятницкая ул., д. 49А, к. 2), e-mail: EPMayanov@norao.ru.

Игин Игорь Михайлович, генеральный директор, ФГУП «Национальный оператор по обращению с радиоактивными отходами» (119017, Москва, Пятницкая ул., д. 49А, к. 2), e-mail: IMIgin@norao.ru.

Минин Андрей Васильевич, заместитель генерального директора по лицензированию и разрешительной деятельности, ФГУП «Национальный оператор по обращению с радиоактивными отходами» (119017, Москва, Пятницкая ул., д. 49А, к. 2), e-mail: AVMinin@norao.ru.

Бамборин Михаил Юрьевич, кандидат технических наук, директор департамента лицензирования и разрешительной деятельности ФГУП «Национальный оператор по обращению с радиоактивными отходами» (119017, Москва, Пятницкая ул., д. 49А, к. 2), e-mail: MYBamborin@norao.ru.

Калакуцкий Алексей Васильевич, кандидат технических наук, генеральный директор, ООО «Московский научно-исследовательский проектно-изыскательский институт технологий и инноваций» (117105, Москва, Нагатинский 1-й проезд, д. 4), e-mail: info@mnipiiti.ru.

Морозов Александр Анатольевич, кандидат технических наук, директор по науке и инновационным технологиям ПАО «Приаргунское производственное горно-химическое объединение имени Е. П. Славского» (674673, Краснокаменск, Забайкальский край, пр-т Строителей, д. 11), e-mail: morozovAA@ppgho.ru.

Каманин Антон Николаевич, начальник отдела, ФГУП «Национальный оператор по обращению с радиоактивными отходами» (119017, Москва, Пятницкая ул., д. 49А, к. 2), e-mail: ANKamanin@norao.ru.

Трофимова Юлия Васильевна, эксперт, ФГУП «Национальный оператор по обращению с радиоактивными отходами» (119017, Москва, Пятницкая ул., д. 49А, к. 2), e-mail: YVTrofimova@norao.ru.

Библиографическое описание статьи

Кузьмин Е. В., Маянов Е. П., Игин И. М., Минин А. В., Бамборин М. Ю., Калакуцкий А. В., Морозов А. А., Каманин А. Н., Трофимова Ю. В. Обоснование параметров технологии захоронения РАО 2 и 3 классов в пространстве подземных рудников ПАО «ППГХО» // Радиоактивные отходы. 2022. № 1 (18). С. 62—76. DOI: 10.25283/2587-9707-2022-1-62-76.

FEASIBILITY STUDY OF PROCESS PARAMETERS PROVIDING RW CLASS 2 AND 3 DISPOSAL IN THE PJSC PIMCU'S UNDERGROUND MINES

Kuzmin E. V.[1], Mayanov E. P.[1], Igin I. M.[1], Minin A. V.[1], Bamborin M. Yu.[1], Kalakutskii A. V.[2], Morozov A. A.[3], Kamanin A. N.[1], Trofimova Iu. V.[1]

[1]**National Operator for Radioactive Waste management FSUE, Moscow, Russia**

[2]**Moscow Research and Development Institute of Technology and Innovation LLC, Moscow, Russia**

[3]**Priargunsky Industrial Mining and Chemical Union PJSC, Krasnokamensk, Trans-Baikal Territory, Russia**

Article received on December 13, 2021

Countries with nuclear power are searching for new opportunities to address the challenge of radioactive waste (hereinafter — RW) management which is seen as a priority area of their research.

In accordance with the classification established by the Decree of the Government of the Russian Federation № 1069 of October 19, 2012, RW Class 2 shall be disposed of in DDF built at a depth of over 100 m, whereas RW Class 3 can be disposed of in near-surface disposal facilities at a depth of up to 100 m. Joint disposal of non-heat-generating Class 2 and 3 RW in mining chambers at great depths assuming certain safety arrangements implemented in the chambers is seen as a promising research area. RW disposal in existing underground excavations provides cost reduction due to the use of existing surface and underground infrastructure facilities. To evaluate the potential of DDF RW siting within already existing underground excavations, research and safety assessments, including the long-term ones, should be performed to check their compliance with the requirements set for RW disposal facilities.

This paper presents engineering technologies allowing to start the process of safety demonstration assuming RW Class 2 and 3 disposal in underground mines. It presents the mining and geological rock characteristics evaluated for the Streltsovskaya caldera deposits confining the PJSC PIMCU uranium mines. The paper also discusses the main geomechanical properties of paste backfilling based on uranium ore processing byproducts, the parameters of a rope-injection method used to strengthen the fractured rocks, to eliminate the cracks and to minimize the groundwater and gas flows. It also presents the processes implemented to upgrade the waste chambers located at depths of up to 1,000 m and more.

Keywords: *radioactive waste management, radioactive waste, RW containers, waste chambers, underground space, rope-injection rods, RW storage facilities, RW disposal, fractured massif strengthening, rocks, paste backfilling, uranium ores, radon release.*

References

1. Tsebakovskaya N. S., Utkin S. S., Kapyrin I. V. et al. *Obzor zarubezhnykh praktik zakhoroneniya OYAT i RAO* [Overview of International Spent Nuclear Fuel and Radioactive Waste Disposal Practices]. Moscow, Komtekhprint Publ., 2015. 208 p.

2. Strategiya sozdaniya punkta glubinnogo zakhoroneniya radioaktivnykh otkhodov [Strategy for the development of RW deep disposal facility]. *Radioaktivnye otkhody — Radioactive Waste,* 2018, no. 2 (3), pp. 114—120.

3. Abramov A. A., Bolshov L. A., Dorofeeev A. N., Igin I. M., Kazakov K. S., Krasilnikov V. Y., Linge I. I., Trokhov N. N., Utkin S. S. Podzemnaya issledovatel'skaya laboratoriya v Nizhnekanskom massive: ehvolyutsionnaya prorabotka oblika [Underground Research Laboratory in the Nizhnekanskiy

Massif: Evolutionary Design Study]. *Radioaktivnye otkhody — Radioactive Waste,* 2020, no. 1 (10), pp. 9—21. DOI: 10.25283 / 2587-9707-2020-1-9-21.

4. Dorofeev A. N., Bolshov L. A., Linge I. I., Utkin S. S., Saveleva E. A. Strategicheskii master-plan issledovanii v obosnovanie bezopasnosti sooruzheniya, ehkspluatatsii i zakrytiya punkta glubinnogo zakhoroneniya radioaktivnykh otkhodov [Strategic Master Plan for R&D Demonstrating the Safety of Construction, Operation and Closure of a Deep Geological Disposal Facility for Radioactive Waste]. *Radioaktivnye otkhody — Radioactive Waste,* 2017, no. 1, pp. 32—41.

5. Gupalo V. S., Kazakov K. S., Konovalov V. Yu., Demin A. V. O sinkhronizatsii meropriyatii programmy issledovaniya massiva s prokhodcheskimi rabotami pri sozdanii podzemnoi issledovatel'skoi laboratorii v Nizhnekanskom massive [On the Synchronization of Activities Implemented Under the Rock Mass Research Program and Tunneling Operations During Underground Research Laboratory Construction in the Nizhnekanskiy Massif]. *Gornyi zhurnal — Mining Journal,* 2020, no. 3, pp. 72—78. DOI: 10.17580/gzh.2020.03.14.

6. Ischukova L. P. *Geologiya Urulyunguevskogo rudnogo raiona i molibden-uranovykh mestorozhdenii Strel'tsovskogo rudnogo polya* [Geology of the Urulyunguysky Ore Region and Deposits of the Streltsovsky Ore Field]. Moscow — Irkutsk, pos. Oktyabr'skii, 1995—1996. 382 p.

7. *Baza dannykh aktivnykh razlomov. Spisok razlomov* [Active Fault Database. List of Faults]. Geological Institute of RAS. Laboratory of Neotectonics and Contemporary Geodynamics, 2015—2021.

8. Expert opinion on the hydrogeological conditions of uranium ore deposits at Mine No. 6, 1981.

9. Maturity schedule and the availability of excavated space in the PJSC PIMCU operating mines as of 2018.

10. Karmanov R. G., Ishukova L. P., Brel A. I., Gubkin G. N., Sirotenko E. P., Ovsov V. K. *Argunskoe i Zherlovoe mestorozhdeniya (Yugo-Vostochnoe Zabaikal'e)* [Argunskoe and Zherlovoe Deposits (South-Eastern Transbaikalia)]. Report on the Deposit Exploration Presenting Calculated Uranium and Molybdenum Reserves as of January 1, 1993. Volume 1. Pos. Oktyabr'skii — Irkutsk, 1993.

11. Kuzmin E. V., Kalakutsky A. V., Morozov A. A. Method for Radioactive Waste Disposal in Underground Mines. *Radioaktivnye otkhody — Radioactive Waste,* 2021, no. 2 (15), pp. 49—62. DOI: 10.25283/2587-9707-2021-2-49-62.

12. Certificates for KMZ, KRAD, NZK-150-1.5P containers AT 9 00.00.000 / 345 Mechanical Plant JSC.

13. *Issledovaniya parametrov tverdeyushchei i pastovoi zakladki na osnove materialov pererabotki uranovykh rud, razrabotka mer po snizheniyu radonovydeleniya* [Evaluated Parameters of Solidifying Paste Backfilling Based on the Byproducts from Uranium Ore Processing, Development of Measures Reducing Radon Emission]. Final report on R&D, contract No.100-10-05 / 24027, JSC VNIPIpromtechnologii, 2016. 160 p.

14. *Razrabotka tekhnologii glubokogo sgushcheniya radioaktivnykh otkhodov (RAO) pererabotki uranovykh rud dlya poverkhnostnogo i podzemnogo razmeshcheniya* [Development of Deep Thickening Methods for Radioactive Waste (RW) from Uranium Ore Processing Assuming their Further Surface and Underground Disposal]. Final Report on R&D, JSC VNIPIpromtechnologii (research part), 2019. 406 p.

15. Potvin Y., Hudima M. Open Stope Mining in Canada. In: Proceedings of the Conference: Massmin. Brisbane, Australia, 2000.

16. Kuzmin E. V. *Uprochnenie gornykh porod pri podzemnoi dobyche rud* [Rocks Strengthening During Underground Ore Mining]. Moscow, Nedra Publ., 1991. 252 p.

17. Kuzmin E. V., Lyashevich S. I. Predotvrashchenie udaroopasnosti massiva metodom in"ektsionnogo uprochneniya gornykh porod [Prevention of Rock Burst Hazard via the Injection-based Rock Hardening Method]. *Gornyi zhurnal — Mining Journal,* 1989, no. 11.

18. Baranov A. O. *Raschet parametrov tekhnologicheskikh protsessov podzemnoi dobychi rud* [Parameters Calculated for the Process of Underground Ore Mining]. Moscow, Nedra Publ., 1985. 224 p.

19. Roginsky V. M. *Proektirovanie i raschet zhelezobetonnoi shtangovoi krepi* [Reinforced Concrete Rod Support: Design Development and Calculations]. Moscow, Nedra Publ., 1971.

20. Kuzmin E. V., Kalakutskiy A. V., Tarasov M. A., Morozov A. A. Obosnovanie vozmozhnosti razmeshcheniya radioaktivnykh otkhodov 2 i 3 klassov v podzemnom prostranstve uranovykh rudnikov [Feasibility Study of Radioactive Waste Class 2 and 3 Disposal in the Underground Space of Uranium Mines]. *Gornaya promyshlennost' — Mining Industry,* 2020, no. 5, pp. 32—37. DOI: 10.30686/1609-9192-2020-5-32-37.

21. Kuzmin E. V., Kalakutskiy A. V., Tarasov M. A., Morozov A. A. Kontseptsiya razmeshcheniya radioaktivnykh otkhodov 2 i 3 klassov v podzemnykh vyrabotkakh s izolyatsiei pastovoi zakladkoi na osnove materialov pererabotki uranovykh rud [The concept of RW Class 2 and 3 Disposal in the Underground Excavations with the Sealing Provided by Paste Backfilling Based on the Byproducts from Uranium Ore Processing]. *Gornaya promyshlennost' — Mining Industry,* 2020, no. 6, pp. 31—37.

22. Ishchukova L. P., Karmanov R. G., Brel' A. I. i dr. *Argunskoe i Zherlovoe mestorozhdeniya (Yugo-Vostochnoe Zabaikal'e) : Otchet o rezul'tatakh razvedochnykh*

rabot na mestorozhdeniyakh s podschetom zapasov urana i molibdena po sostoyaniyu na 01.01.1993 goda [Report on the Deposit Exploration (Argunskoye and Zherlovoe) Presenting Calculated Uranium Reserves as of January 1, 1993]. GGP Sosnovgeologiya. P. Oktyabr'skii — Irkutsk, 1993. 2249 p.
23. Kalakutskiy A. V. Kontseptsiya razmeshcheniya RAO 2 i 3 klassov v otrabotannykh gornykh vyrabotkakh s ispol'zovaniyem konteynerov NZK i izolyatsiyey pastovoy zakladkoy [Concept for RW Classes 2 and 3 disposal in abandoned underground excavations using NZK containers and paste filling insulation]. *Proc. of the International conference Tech Mining Russia*. Moscow, 2019.
24. Hutchinson D. J., Diederichs M. S. *Cablebolting in Underground Mines*. BiTech Publishers Ltd., Richmond, Canada. 1996. 406 p.
25. Kuz'min E. V., Kalakutskii A. V., Tarasov M. A. *Sposob podzemnogo zakhoroneniya radioaktivnykh otkhodov* [Method of underground disposal of radioactive waste]. Decision to grant a patent for an invention no. 2020107782. application date: 20.02.2020.
26. Rasskazov I. Yu., Petrov V. A., Gladyr' A. V., Tyurin D. V. Geodinamicheskii poligon Strel'tsovskogo rudnogo polya: praktika i perspektivy [Geodynamic Test Site of the Streltsovskoe Ore Field: Practice and Prospects]. *Gornyi zhurnal — Mining Journal,* 2018, no. 7, pp. 17—21. DOI: 10.17580/gzh.2018.07.02.
27. OSR-2016-D. *Obshchee seismicheskoe raionirovanie territorii Rossiiskoi Federatsii* [General Seismic Zoning of the Territory of the Russian Federation].
28. *Proceedings of International Symposium PASTE,* Beijing, China, 2017.

Information about the authors

Kuzmin Evgeny Viktorovich, Doctor of Science, professor, Chief Specialist, National Operator for Radioactive Waste management FSUE (49A, bld. 2, Pyatnitskaya st., Moscow, 119017, Russia), e-mail: EVKuzmin@ norao.ru.

Mayanov Evgeny Pavlovich, Director of the Innovative Development and Technologies Department, National Operator for Radioactive Waste management FSUE (49A, bld. 2, Pyatnitskaya st., Moscow, 119017, Russia), e-mail: EPMayanov@norao.ru.

Igin Igor Mikhailovich, General Director, National Operator for Radioactive Waste management FSUE (49A, bld. 2, Pyatnitskaya st., Moscow, 119017, Russia), e-mail: IMIgin@norao.ru.

Minin Andrey Vasilievich, Deputy General Director for Licensing and Permitting Activities, National Operator for Radioactive Waste management FSUE (49A, bld. 2, Pyatnitskaya st., Moscow, 119017, Russia), e-mail: AVMinin@norao.ru.

Bamborin Mikhail Yurievich, PhD, Director of the Licensing and Permitting Activities Department, National Operator for Radioactive Waste management FSUE (49A, bld. 2, Pyatnitskaya st., Moscow, 119017, Russia), e-mail: MYBamborin@norao.ru.

Kalakutskii Aleksei Vasilievich, PhD, General Director, Moscow Research and Development Institute of Technology and Innovation LLC (4, Nagatinsky 1st passage, Moscow, 117105, Russia), e-mail: info@mnipiiti.ru.

Morozov Aleksandr Anatolyevich, PhD, Director of the Science and Innovation Development, Priargunsky Industrial Mining and Chemical Union PJSC (11, Stroiteley Ave, Trans-Baikal Territory, Krasnokamensk, 674673, Russia), e-mail: morozovaa@ppgho.ru.

Kamanin Anton Nikolaevich, Head of Department, National Operator for Radioactive Waste management FSUE (49A, bld. 2, Pyatnitskaya st., Moscow, 119017, Russia), e-mail: ANKamanin@norao.ru.

Trofimova Iuliia Vasilievna, expert, National Operator for Radioactive Waste management FSUE (49A, bld. 2, Pyatnitskaya st., Moscow, 119017, Russia), e-mail: YVTrofimova@norao.ru.

Bibliographic description

Kuzmin E. V., Mayanov E. P., Igin I. M., Minin A. V., Bamborin M. Yu., Kalakutskii A. V., Morozov A. A., Kamanin A. N., Trofimova Iu. V. Feasibility Study of Process Parameters Providing RW Class 2 and 3 Disposal in the PJSC PIMCU's Underground Mines. *Radioactive Waste,* 2022, no. 1 (18), pp. 62—76. DOI: 10.25283/2587-9707-2022-1-62-76. (In Russian).