

ОЦЕНКА ПРОЧНОСТИ ЛЕНТОЧНЫХ ЦЕЛИКОВ РАБОЧИХ ГОРИЗОНТОВ ПГЗРО НИЖНЕКАНСКОГО МАССИВА

Е. В. Кузьмин, М. Ю. Бамборин, С. Л. Спешилов, А. А. Пуголовкин, М. М. Хахунова

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

Статья поступила в редакцию 7 мая 2024 г.

В соответствии с проектом пункт глубинного захоронения радиоактивных отходов (ПГЗРО) Нижнеканского массива представляет собой систему горизонтальных параллельных выработок, расположенных на двух уровнях, на глубинах 450 и 525 м от земной поверхности. В статье рассмотрены вопросы прочности ленточных целиков между выработками рабочего горизонта (–70 м), находящегося на глубине 525 м от земной поверхности. Рассчитано горное давление, формируемое гравитационными, а также тектоническими силами, определены значения запаса прочности породных ленточных целиков, оценено, насколько они удовлетворяют требованиям долговременной безопасности. Сделаны предложения по возможной коррекции плана раскройки шахтного поля.

Ключевые слова: пункт глубинного захоронения радиоактивных отходов, радиоактивные отходы, горное давление, прочность ленточных целиков, вес столба налегающих пород, тектоника, долговременная безопасность, кристаллические породы, подземные лаборатории, камеры захоронения радиоактивных отходов, неизвлекаемые чехлы.

В мировой практике создания ПГЗРО первым этапом является сооружение подземных исследовательских лабораторий (ПИЛ) для изучения, подготовки и сопровождения последующего захоронения высокоактивных радиоактивных отходов (РАО). В ведущих странах с развитой атомной энергетикой имеется по несколько ПИЛ [1]. Госкорпорацией «Росатом» в 2018 году утверждено решение о создании ПИЛ и ПГЗРО на участке «Енисейский» Нижнеканского массива [2], [3], выполнен проект строительства объекта, заложена система научного сопровождения; в 2023 году начата проходка вертикальных стволов.

Участок «Енисейский» приурочен к северо-западному окончанию Нижнеканского гранитоидного массива и сложен кристаллическими породами исаевского метакомплекса, представленного

плагиогнейсами и биотит-полевошпатовыми гнейсами, с варьирующим содержанием мало-мощных кварц-полевошпатовых образований и секущих дайковых тел долеритов. Изучение геодинамики района в длительной геологической ретроспективе показало, что тектонические подвижки земной коры на большей части его территории происходили медленно и спокойно [9].

На основании выполненных инженерно-геологических исследований массив представлен как гнейсовая толща, пронизанная сетью крутопадающих даек основного состава и имеющая пологопадающее залегание в восточных румбах плоскостей напластования, осложненное узкими зонами резких (до 70°) флексурных перегибов, и характеризуется значительной петрографической изменчивостью (рис. 1) [9].

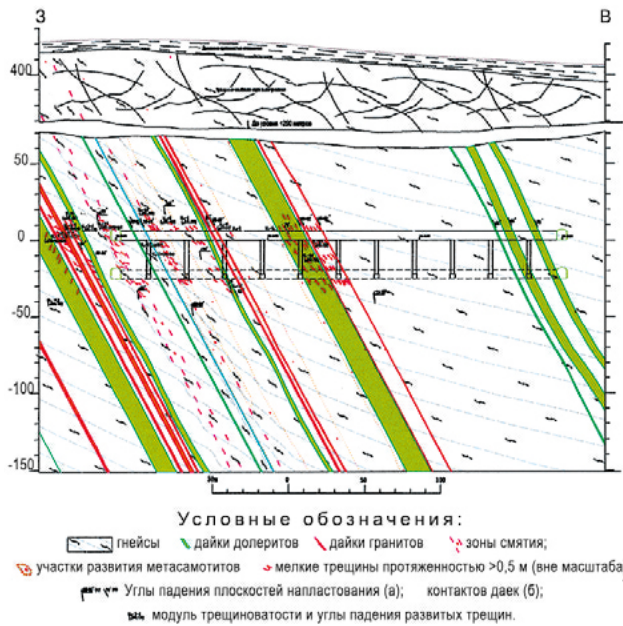


Рис. 1. Прогнозный геологический разрез породного массива ПГЗРО

Горное давление формируется наличием гравитации, а также сил тектонического происхождения.

Система параллельных камер рабочих горизонтов ПГЗРО на глубинах 450 м (гор. +5 м) и 525 м (гор. -70 м) участка «Енисейский», запроектированная для захоронения РАО 1 и 2 классов, занимает площади размером по 732 × 360 м на двух уровнях, одна над другой. Размер одного шахтного поля, без учета пространства для ПИЛ и вспомогательных выработок, составляет 263,5 тыс. м². На каждом из них запланировано создать по 28 горизонтальных параллельных камер с сохранением междукамерных ленточных целиков (МКЦ) между ними (рис. 2) [7].

В процессе эксплуатации ПГЗРО в период, когда на отметке -70 м будут пройдены все горизонтальные камеры (или большая их часть), распределение сил горного давления на уровне рабочих горизонтов изменится. При этом давление на ленточные целики между камерами возрастет.

Практика отработки горизонтальных и пологопадающих месторождений показывает: на шахтных полях большой площади горное давление формируется полным весом столба налегающих пород. В состоянии меньшего давления находятся лишь приграничные камеры по контуру шахтного поля. Статистика провалов от ведения подземных горных работ в Березняках, Соликамском, Старобинском, Жезказганском и других месторождениях показывает, что при недостаточной ширине оставляемых породных целиков происходит их раздавливание. Проседание массива развивается с глубины до поверхности, плоскости скольжения по контурам

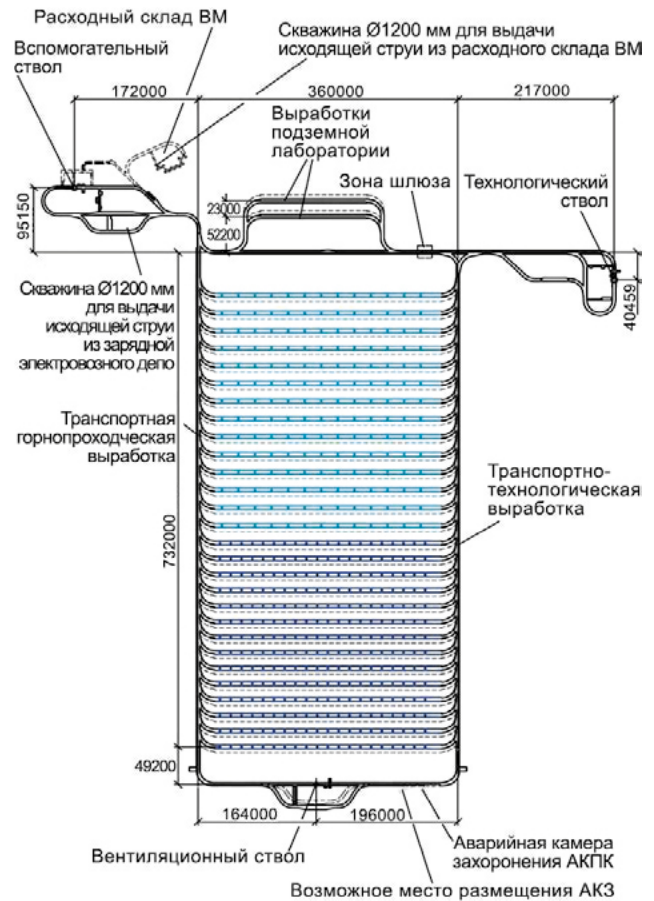


Рис. 2. План горизонта -70 м. Размеры шахтного поля, функции выработок на горизонте

при этом почти вертикальные. В Жезказгане из-за проседания пород поверхности, вызванного разрушением целиков на глубине 450 м, корпорации «Казахмыс» пришлось переселить город (Никольский).

Для выбранного участка заложения ПИЛ необходимо определить, насколько прочность горных пород в ленточных целиках рабочих горизонтов запроектированного ПГЗРО в состоянии выдержать вес налегающих пород, оценить действие тектонических сил, создающих дополнительное давление, установить достаточен ли запас прочности породного массива в целиках для их долговременной эксплуатации.

По мнению проф. Именитова В. Р., коэффициент запаса прочности ленточных целиков n , учитывающий неравномерность распределения нагрузки между разными целиками и неравномерность напряжений по сечению целика принимается равным 3–5, если целики должны стоять неопределенно долгий срок, с учетом необходимости сохранения дневной поверхности. Если же целики нужны лишь на время отработки данной панели, а в последующем допустимо их обрушение, то запас прочности принимается равным 2–3» [5].

Проф. Макаров А. Б. также рекомендует принимать коэффициент запаса прочности n , равный 2–3, при отработке пологопадающих рудных тел Жезказганского месторождения с допущением проседания поверхности [6].

Далее проведен предварительный, укрупненный расчет прочных размеров целиков, коэффициента запаса прочности и его соответствие требованиям долговременной устойчивости.

При вычислении принимается: на ленточные целики оказывает давление лишь вес налегающих пород. В наиболее сложных условиях горного давления оказывается нижний горизонт (–70 м); его параметры [7]:

- глубина от поверхности — 525 м;
- объемная масса пород — 2,7 (дайки долеритов); 2,87 (гнейсы) т/м³ [7];
- расстояние между осями соседних камер — 23 м (рис. 3);
- ширина целика между камерами — 17 м;
- ширина целика при наличии буровых камер для расширителей скважин — 12 м (рис. 3);
- данные о прочности пород весьма разнообразны.

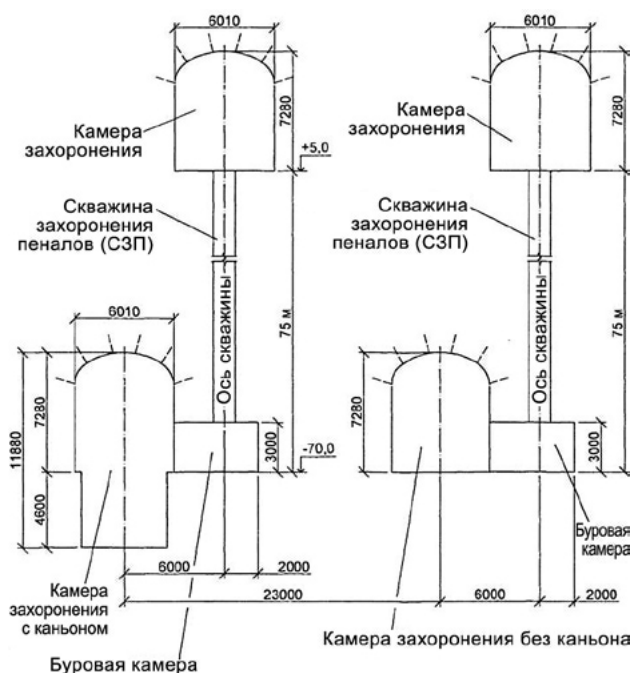


Рис. 3. Взаимное расположение выработок горизонтов +5 м и –70 м [7]

Испытания образцов кернов, взятых с участков прочных гнейсов, показали прочность на одноосное сжатие в сухом состоянии 60,8 МПа, в водонасыщенном — 89,5 МПа [11]. В породном массиве имеются более слабые участки — дайки долеритов, прочность которых на сжатие 36,7 МПа [7].

При консервативном подходе для расчетов принята прочность пород на указанной

глубине — 39 МПа (длительное сопротивление на сжатие). Согласно данным [7], камеры захоронения РАО имеют высоту 7,28 м, камеры с каньоном — 11,88 м (рис. 3). Захоронение контейнеров с РАО будет сопровождаться заполнением всех пустот изолирующими материалами: бентонитовыми блоками, глиной, породой, бетоном. За время активной эксплуатации хранилища (десяtkи лет) закладка даст усадку более 10%, высота пустого пространства между кровлей выработок и поверхностью закладки составит 1,1–1,8 м [12]. При недостаточной прочности целиков кровля выработок со временем опустится на поверхность закладки, создаст давление на нее и контейнеры с РАО. Необходимо избежать развития такого сценария, для чего размеры междукамерных целиков следует принять обеспечивающими долговременную устойчивость выработок ПГЗРО.

Нужно также учесть, что с проседанием столба налегающих пород образуются каналы фильтрации подземных вод всех горизонтов, что кардинально изменит гидрогеологическую обстановку в ПИЛ и в последующем ПГЗРО, притоки воды в горные выработки существенно возрастут. Если она не будет содержать радионуклиды в количестве, превышающем нормативные значения, потребуются большой объем работ по их откачке, в противном случае ситуация будет сложнее.

Предварительный расчет ведется на вес столба налегающих пород, приходящийся на ленточный целик одной камеры (горизонт –70 м). Камеры и отсеки, заполненные контейнерами, пеналами либо невозвратными чехлами (НЧ) с РАО, а также изолирующими материалами, не оказывают сопротивления такому давлению.

Предварительный расчет коэффициента запаса прочности целиков, (объемная масса пород — 2,7 т/м³)

Ширина целика между камерами равна 17 м. Пятая часть их длины через каждые 15 м проходит поперечными заходками длиной 5 м и шириной 3 м — буровые камеры для расширителей скважин (рис. 3). Ширина целика в данном сечении уменьшается на 5 м. С учетом того, что выработки проходятся буровзрывным способом, во вмещающем массиве будут наводиться трещины. При «щадящем» кумулятивном взрывании контурных шпуров глубина распространения трещин — до 0,5 м с каждой стороны, поэтому «рабочая» ширина целика между камерами в сечениях по поперечным заходкам принимается равной 11 м.

Ленточный целик между камерами характеризуется следующими параметрами:

- ширина 11 м, высота 7,3 м;
- коэффициент формы для данного соотношения — 1,5;
- поправочный коэффициент, учитывающий, что часть веса налегающих пород может восприниматься окружающим массивом, — 1,0 [5];
- давление столба налегающих пород на междукамерный ленточный целик шириной 23 м (на 1 м его длины): $525 \text{ [м]} \times 23 \text{ [м]} \times 2,7 \text{ [т/м}^3\text{]} = 32\,602 \text{ [т/м]}$.
- «линейная» прочность пород междукамерного целика шириной 11 м: $39 \text{ [МПа]} \times 11 \text{ [м]} \times 1,5 = 64\,350 \text{ [т/м]}$.

Коэффициент запаса прочности (в соответствии с теорией Турнера — Шевякова, отношение прочности к весу столба пород) определяется как:

$$n = 64\,350 : 32\,602 = 1,97.$$

На основании рекомендации [6], «рабочая» ширина ленточного целика (с допущением проседания поверхности) должна быть (при $n=2$) $32\,602 \times 2/39 \times 1,5 = 11$ м, при этом расстояние между осями соседних камер составит (+12 м) 23 м, что соответствует параметрам, заложенным в проекте.

Исходя из рекомендации [5] (при $n=3$), «рабочая» ширина целика долговременной устойчивости вычисляется как: $32\,602 \times 3/39 \times 1,5 = 16,7$ м. Расстояние между осями соседних камер составит (+12 м) 28,7 м. В этом случае не будет угрозы проседания поверхности.

Предварительный расчет коэффициента запаса прочности целиков (объемная масса пород — 2,87 т/м³)

Давление столба налегающих пород на междукамерный ленточный целик шириной 23 м (на 1 м длины камеры) рассчитывается следующим образом: $525 \text{ [м]} \times 2,87 \text{ [т/м}^3\text{]} \times 23 \text{ [м]} = 34\,655 \text{ [т/м]}$.

«Линейная» прочность пород междукамерного целика шириной 11 м вычисляется как: $39 \text{ [МПа]} \times 11 \text{ [м]} \times 1,5 = 64\,350 \text{ [т/м]}$.

Коэффициент запаса прочности (ширина 11 м) составляет: $n = 64\,350 : 34\,655 = 1,86$.

Принятые параметры проектирования не обеспечивают необходимой прочности междукамерных целиков: в сечениях с буровыми камерами не достигается требуемый коэффициент запаса прочности. По рекомендации [6], с допущением проседания поверхности, «рабочая» ширина ленточного целика должна быть (при $n=2$) $34\,655 \times 2/39 \times 1,5 = 11,8$ м. При этом расстояние между осями соседних камер составит (+12 м) 23,8 м.

В соответствии с [5] (при $n=3$), «рабочая» ширина целика определяется как: $34\,655 \times 3/39 \times 1,5 = 17,8$ м.

При этом расстояние между осями соседних камер составит 29,8 м.

По результатам скважинных геомеханических исследований на участке «Енисейский» на рабочих горизонтах ПИЛ (450 м, 525 м) вертикальное давление превышает вес налегающих пород в 1,50—1,56 раза [9]. Учитывая изрезанность породного массива на уровне системы горизонтальных выработок, можно предположить, что горизонтальная составляющая горного давления на уровне рабочих горизонтов будет оказывать влияние лишь на контурах выработок по границам шахтного поля, тогда как наличие вертикальной составляющей осложняет состояние целиков.

Расчет коэффициента запаса прочности целика при увеличенном горном давлении в 1,5 раза (объемная масса пород — 2,7 т/м³)

На горизонте –70 м на 1 м длины камеры суммарное давление столба налегающих пород составляет: $32\,602 \text{ [т/м]} \times 1,5 = 48\,903 \text{ [т/м]}$.

«Линейная» прочность междукамерного целика определяется как:

$$39 \text{ [МПа]} \times 11 \text{ [м]} \times 1,5 = 64\,350 \text{ [т/м]}.$$

Коэффициент запаса прочности (при ширине целика 11 м) вычисляется таким образом: $n = 64\,350 : 48\,903 = 1,32$.

Параметры проектирования в сечениях по буровым камерам не обеспечивают необходимой прочности междукамерных целиков с требуемым коэффициентом запаса прочности.

На основании [6], «рабочая» ширина ленточного целика (с допущением проседания поверхности) должна быть ($n=2$): $48\,903 \times 2/39 \times 1,5 = 16,7$ м.

При этом расстояние между осями соседних камер составит (+12 м) 28,7 м.

Согласно рекомендации [5] ($n=3$), «рабочая» ширина целика должна быть: $48\,903 \times 3/39 \times 1,5 = 25,1$ м, тогда расстояние между осями соседних камер станет (+12 м) 37,1 м.

Расчет ширины ленточного целика при увеличенном в 1,5 раза горном давлении (объемная масса пород — 2,87 т/м³)

Давление столба налегающих пород на ленточный целик (на 1 м его длины) определяется как: $34\,655 \times 1,5 = 52\,000$ т/м. «Линейная» прочность пород междукамерного целика шириной 11 м составит: $39 \text{ [МПа]} \times 11 \text{ [м]} \times 1,5 = 64\,350 \text{ [т/м]}$ его длины. Коэффициент запаса прочности составит: $n = 64\,350 : 52\,000 = 1,24$.

Параметры проектирования не обеспечивают необходимого запаса прочности междукамерных целиков.

По рекомендации [6], «рабочая» ширина ленточного целика должна быть (при $n=2$, допускается проседание поверхности): $52\,000 \times 2/39 \times 1,5 = 17,7$ м.

При этом расстояние между осями соседних камер составит (+ 12 м) 29,7 м.

Согласно [5] (при $n=3$), «рабочая» ширина целика определяется как: $52\,000 \times 3/39 \times 1,5 = 26,7$ м. В этом случае расстояние между осями соседних камер — 38,7 м.

Канд. техн. наук В. П. Бейгулом предложена иная конструкция камер, отсеков для захоронения упаковок РАО 1 и 2 классов, с поперечным горизонтальным расположением НЧ (рис. 4) [10].

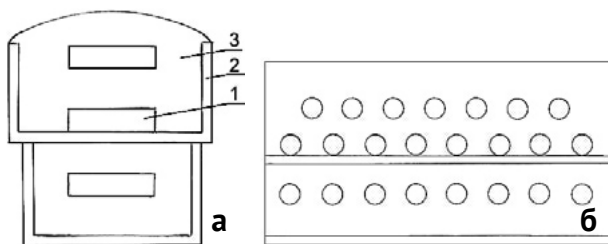


Рис. 4. Схема предлагаемого отсека: а – поперечный разрез выработки с каньоном предлагаемого отсека с размещением НЧ, б – продольный разрез отсека с размещением НЧ; на схеме (а) указано: 1 – чехол НЧ, 2 – прессованный бентонит, 3 – рыхлый наполнитель (бентонитовый порошок)

Габаритные размеры отсека для захоронения НЧ с РАО класса 1 и контейнеров с РАО класса 2 составляют: общая высота — 7,5 м, длина — 14 м, ширина — 7 м, расстояние по осям между параллельными камерами — 23 м.

Ширина ленточного целика уменьшается на 1 м (с 17 до 16 м). При действии сил гравитации (объемная масса — $2,7 \text{ т/м}^3$) давление столба налегающих пород на ленточный целик шириной 23 м (на 1 м его длины) составит: $525 \text{ [м]} \times 23 \text{ [м]} \times 2,7 \text{ [т/м}^3] = 32\,602 \text{ [т/м]}$.

«Линейная» прочность пород междукамерного целика (на 1 м его длины) шириной 16 м

рассчитывается как: $39 \text{ [МПа]} \times 16 \text{ [м]} \times 1,5 = 93\,600 \text{ [т/м]}$ длины целика.

Коэффициент запаса прочности составит: $n = 93\,600 : 32\,602 = 2,87$.

Рекомендуемые в [6] величины не рассматриваются, т. к. $n > 2$. С учетом рекомендаций [5] (при $n=3$) «рабочая» ширина целика должна быть 16,7 м.

Для горных пород с объемной массой $2,87 \text{ т/м}^3$ давление столба налегающих пород на ленточный целик шириной 23 м (на 1 м его длины) определяется как: $525 \text{ [м]} \times 23 \text{ [м]} \times 2,87 \text{ [т/м}^3] = 34\,655 \text{ [т/м]}$.

Коэффициент запаса прочности составит: $93\,600 : 34\,655 = 2,7$. В варианте [10] запас прочности целика приближается к минимальной величине долговременного запаса прочности, без проседания поверхности, при расстоянии между горизонтальными выработками по осям — 23 м. Рекомендуемые [6] величины не рассматриваются, т. к. $n > 2$. Согласно [5] (при $n=3$), «рабочая» ширина целика должна быть 17,8 м, расстояние между осями соседних камер — 24,8 м.

С учетом тектонических сил вертикальная составляющая горного давления увеличится в 1,5 раза. Коэффициент запаса прочности ленточного целика составит $n = 1,91$ при объемной массе $2,7 \text{ т/м}^3$; при $2,87 \text{ т/м}^3$ — $n = 1,8$.

Параметры целиков рабочего горизонта [10] (ширина 23 м) также не обеспечат необходимого запаса прочности целиков.

Согласно [6] (при $n=2$), ширина целика — 16,7 м (объемная масса — $2,7 \text{ т/м}^3$) и 17,7 м (объемная масса — $2,87 \text{ т/м}^3$); расстояние между осями выработок — 23,7 и 24,7 м соответственно.

Ширина целика, рекомендуемая [5] (при $n=3$), составляет 25,1 и 26,7 м, расстояние между осями выработок — 32,1 и 33,7 м соответственно.

Приведенные расчеты сведены в табл. 1.

Таблица 1. Значения коэффициента запаса прочности ленточных целиков горизонта – 70 м

№	Ширина целика, м	Давление налегающих пород, т/п. м	Прочность целика, т/п. м	Объемная масса, т/м ³	Коэф. запаса прочности, «п»	Рекоменд. ширина целика, $n=2$ (по Макарову), м	Рекоменд. ширина целика, $n=3$ (по Именитову), м
При вертикальном расположении скважин захоронения							
2	11	32 602	42 900	2,7	1,97	11	16,7
4	11	34 655	42 900	2,87	1,86	11,8	17,8
6	11	48 903	42 900	2,7	1,32	16,7	25,1
8	11	52 000	42 900	2,87	1,24	17,7	26,7
При горизонтальном расположении камер захоронения							
9	16	32 602	62 400	2,7	2,87	-	16,7
10	16	34 655	62 400	2,87	2,7	-	17,8
11	16	48 903	62 400	2,7	1,91	16,7	25,1
12	16	51 983	62 400	2,87	1,8	17,7	26,7

Заключение

Как следует из табл. 1, в рассмотренных вариантах конструкций рабочих горизонтов коэффициент запаса прочности n ленточных целиков на горизонте –70 м, при принятых прочностных характеристиках горных пород, ниже требуемого для долговременной прочности и устойчивости подземных сооружений ПГЗРО. Процесс обрушения налегающих пород может развиваться до поверхности либо не до нее, образовав на определенной высоте свод естественного равновесия. В этом случае опасность представляет подсечка им водоносных горизонтов, воды которых будут направлены в рабочие горизонты, со всеми вытекающими последствиями.

ПГЗРО является объектом особой ответственности с повышенными требованиями долговременной безопасности. В этой связи необходимо уточнить прочностные характеристики горных пород скального массива в ПИЛ и, возможно, провести корректировку проекта в части раскройки шахтного поля, конфигурации системы выработок рабочих горизонтов, создать систему их дополнительного укрепления. Коэффициент запаса прочности междукамерных ленточных целиков должен быть не ниже 3. Окончательное решение по их размерам и раскройке шахтных полей в целом необходимо будет принять после измерения напряженно-деформированного состояния и прочности пород прямыми испытаниями, а также замерами образцов, взятых в выработках на рабочих горизонтах.

Предложения по возможной корректировке проектных решений:

1. Рассмотреть горизонтальное расположение пеналов (упаковок, НЧ) с РАО класса 1.

2. В силу того, что коэффициент запаса прочности пород в целиках ниже требуемого, заложить под кровлю систему горизонтальных выработок максимально плотно бетоном, камеры горизонта –70 м с расстоянием по осям, полученным в расчете при $n=3$. Кровлю и стенки камер предварительно укрепить набрызг-фибробетоном толщиной до 300 мм либо другой крепью с высокой грузонесущей способностью.

3. Для ликвидации водопритока предварительно провести тросоинъекционное упрочнение породного массива.

Литература

1. *Цебаковская Н. С., Уткин С. С., Каприн И. В. и др.* Обзор зарубежных практик захоронения ОЯТ и РАО. — М. : Комтехпринт, 2015. 208 с.
2. Решение заседания НТС № 10 Госкорпорации «Росатом» «Экологическая, ядерная, радиационная безопасность» от 05.09.2013.
3. *Крюков О. В.* Стратегия создания пункта глубинного захоронения РАО // Радиоактивные отходы. 2018. № 2 (3). С. 114—120.
4. *Бейгул В. П.* Предложения к сводной оценке ФГУП «НО РАО» результатов исследований ИБРАЭ РАН за 2021—2022 гг.
5. *Именитов В. Р.* Процессы подземных горных работ при разработке рудных месторождений. — М. : Недра, 1978. 528 с.
6. *Макаров А. Б.* Практическая геомеханика : Пособие для горных инженеров. — М. : Горная книга, 2006. 391 с.
7. Обоснование технологии ведения горнопроходческих работ на основе оценки влияния на характеристики нарушенной приконтурной зоны при проходке горных выработок ПИЛ и ПГЗРО : Технический отчет. — ООО «СпецСтройИнжиниринг», 2017.
8. *Борщ-Компонице В. И., Макаров А. Б.* Горное давление при отработке мощных пологих рудных залежей. — М. : Недра, 1986. 270 с.
9. *Орехов В. В.* Результаты расчетов НДС и устойчивости выработок на отметке 450 м. — М. : Гидропроект, 2011.
10. *Бейгул В. П.* К обоснованию вариантов корректировки технических решений по обращению с радиоактивными отходами класса 1 при создании и эксплуатации ПГЗРО. — М. : ФГУП «НО РАО», 2023.
11. *Озерский Д. А., Орлова А. И.* Анализ прочностных характеристик горной породы для обоснования безопасности строительства подземных сооружений ПИЛ // Радиоактивные отходы. 2023. № № 1 (22). С. 70—76. DOI: 10.25283/2587-9707-2023-1-70-76.
12. Закладочные работы в шахтах : справочник / под ред. Бронникова Д. М., Цыгалова М. Н. — М. : Недра, 1989. 398 с.

Информация об авторах

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

Спешилов Сергей Леонидович, доктор геолого-минералогических наук, главный геолог, ФГУП «Национальный оператор по обращению с радиоактивными отходами» (119017, Москва, Пятницкая ул., д. 49А, к. 2), e-mail: SLSpeshilov@noraо.ru.

Пуголовкин Андрей Андреевич, главный инженер по проектно-изыскательским работам, ФГУП «Национальный оператор по обращению с радиоактивными отходами» (119017, Москва, Пятницкая ул., д. 49А, к. 2), e-mail: AAPugolovkin@noraо.ru.

Хахунова Мария Михайловна, кандидат технических наук, эксперт службы главного геолога, ФГУП «Национальный оператор по обращению с радиоактивными отходами» (119017, Москва, Пятницкая ул., д. 49А, к. 2), e-mail: MMKhahunova@noraо.ru.

Библиографическое описание статьи

Кузьмин Е. В., Бамборин М. Ю., Спешилов С. Л., Пуголовкин А. А., Хахунова М. М. Оценка прочности ленточных целиков рабочих горизонтов ПГЗРО Нижнеканского массива // Радиоактивные отходы. 2024. № 4 (29). С. 66–73. DOI: 10.25283/2587-9707-2024-4-66-73.

STRENGTH ASSESSMENT OF CHAIN PILLARS AT THE OPERATIONAL DEPTH OF THE DEEP RADIOACTIVE DISPOSAL FACILITY IN THE NIZHNEKANSKIY ROCK MASS

Kuzmin E. V., Bamborin M. Yu., Speshilov S. L., Pugolovkin A. A., Hahunova M. M.

National Operator for Radioactive Waste management FSUE, Moscow, Russia

Article received on May 7, 2024

According to the draft, deep radioactive waste disposal facility proposed to be excavated in the Nizhnekanskiy rock mass involves a system of horizontal parallel excavations arranged at two levels at depths of 450 and 525 m. The paper considers the issues of the strength of chain pillars between the excavations of the operational horizon (-70 m) at a depth of 525 m from the ground surface. The rock pressure generated by gravitational and tectonic forces is calculated as well as the safety margin for the rock chain pillars. The paper evaluates the extent to which they meet the long-term safety requirements. Certain proposals are being provided on possible adjustment of the mine layout.

Keywords: *deep radioactive waste disposal facility, radioactive waste, rock pressure, strength of chain pillars, weight of the overlying rock column, tectonics, long-term safety, crystalline rocks, underground laboratories, radioactive waste disposal chambers, non-removable covers.*

References

1. Tsebakovskaya N. S., Utkin S. S., Kaprin I. V. et al. *Obzor zarubezhnykh praktik zakhroneniya OYAT i RAO* [Overview of international practices in spent nuclear fuel and radioactive waste disposal]. Moscow, Komtekhpriint Publ., 2015. 208 p.

2. Reshenie zasedaniya NTS No. 10 Goskorporatsii “Rosatom” “Ehkologicheskaya, yadernaya, radiacionnaya bezopasnost” ot 05.09.2013 g. [Decision Made at the Meeting of the Scientific and Technical Council No. 10 of the State Corporation Rosatom Environmental, Nuclear, Radiation Safety of September 5, 2013].

3. Kryukov O. V. Strategiya sozdaniya punkta glubinnogo zakhoroneniya RAO [Strategy for the development of RW deep disposal facility]. *Radioaktivnye otkhody — Radioactive Waste*, 2018, no. 3 (4), pp. 114–120.
4. Beygul V. P. *Predlozheniya k svodnoy otsenke FGUP “NO RAO” rezul'tatov issledovaniy IBRAE RAN za 2021–2022 gg.* [Proposals on the consolidated assessment of IBRAE RAS research findings for 2021–2022 by NO RAO].
5. Imenitov V. R. *Protsessy podzemnykh gornykh rabot pri razrabotke rudnykh mestorozhdeniy* [Underground mining in the development of ore deposits]. Moscow, Nedra Publ., 1978. 528 p.
6. Makarov A. B. *Prakticheskaya geomekhanika* [Practical geomechanics]. Moscow, Gornaya kniga Publ., 2006. 391 p.
7. *Obosnovaniye tekhnologii vedeniya gorno-prokhodcheskikh rabot na osnove otsenki vliyaniya na kharakteristiki narushennoy prikonturnoy zony pri prokhodke gornykh vyrabotok PIL i PGZRO. Tekhnicheskii otchet* [Technical report Supporting the Feasibility Study of Mining Methods Considering Relevant Impacts on the Characteristics of the Excavation Damaged Zone Evolving Along with URL and DGR Excavation]. OOO SpetsStroyEngineering, 2017.
8. Borshch-Komponiyets V. I., Makarov A. B. *Gornoye davleniye pri otrabotke moshchnykh pologikh rudnykh zalezhey* [Rock pressure evolving when mining thick flat ore deposits]. Moscow, Nedra Publ., 1986. 270 p.
9. Orekhov V. V. *Rezul'taty raschetov NDS i ustoychivosti vyrabotok na otmetke 450 m* [Strain-stress state analysis and stability of excavations at the depth level of 450 m]. Moscow, Gidroproyekt Publ., 2011.
10. Beygul V. P. *K obosnovaniyu variantov korrektyrovki tekhnicheskikh resheniy po obrashcheniyu s radioaktivnymi otkhodami klassa 1 pri sozdanii i ekspluatatsii PGZRO* [Feasibility Assessment of Engineering Design Adjustment Options Intended for RW Class 1 Management During DGR Construction and Operation]. FSUE NO RAO. Moscow, 2023.
11. Ozersky D. A., Orlova A. I. Analiz prochnostnykh kharakteristik gornoj porody dlya obosnovaniya bezopasnosti stroitel'stva podzemnykh sooruzhenij PIL [Strength Characteristics of Rock and their Analysis in the Construction Safety Assessment of Underground URF Structures]. *Radioaktivnye otkhody — Radioactive Waste*, 2023, no. 1 (22), pp. 70–76. DOI: 10.25283/2587-9707-2023-1-70-76.
12. *Zakladochnyye raboty v shakhtakh. Spravochnik* [Backfilling operations in mines. Guide]. Edt. by Bronnikov D. M., Tsygalov M. N. Moscow, Nedra Publ., 1989. 398 p.

Information about the authors

Kuzmin Evgeny Viktorovich, Professor, Doctor of Technical Sciences, Chief Specialist of the Chief Geologist's Service, National Operator for Radioactive Waste management FSUE (49A, bld. 2, Pyatnitskaya st., Moscow, 119017, Russia), e-mail: EVKuzmin@norao.ru.

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

Speshilov Sergey Leonidovich, Doctor of Geological and Mineralogical Sciences, Chief Geologist, National Operator for Radioactive Waste management FSUE (49A, bld. 2, Pyatnitskaya st., Moscow, 119017, Russia), e-mail: SLSpeshilov@norao.ru.

Pugolovkin Andrey Andreevich, Chief Engineer for Design and Survey Work, National Operator for Radioactive Waste management FSUE (49A, bld. 2, Pyatnitskaya st., Moscow, 119017, Russia), e-mail: AAPugolovkin@norao.ru.

Hahunova Maria Mikhailovna, Candidate of Technical Sciences, expert of the Chief Geologist's Service, National Operator for Radioactive Waste management FSUE (49A, bld. 2, Pyatnitskaya st., Moscow, 119017, Russia), e-mail: MMHahunova@norao.ru.

Bibliographic description

Kuzmin E. V., Bamborin M. Yu., Speshilov S. L., Pugolovkin A. A., Hahunova M. M. Strength assessment of chain pillars at the operational depth of the deep radioactive disposal facility in the Nizhnekanskiy rock mass. *Radioactive Waste*, 2024, no. 4 (29), pp. 66–73. DOI: 10.25283/2587-9707-2024-4-66-73. (In Russian).