

УДК 622.273.2 (031)

## ОБОСНОВАНИЕ ПРОЧНОСТИ ЗАКЛАДОЧНОГО МАССИВА С УЧЕТОМ ДЕЙСТВИЯ ВЗРЫВА ПРИ КАМЕРНЫХ СИСТЕМАХ РАЗРАБОТКИ

Е.Т.ВОРОНОВ<sup>1</sup>, В.Н.ТЮПИН<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Забайкальский государственный университет, Чита, Россия

<sup>2</sup> Белгородский государственный национальный исследовательский университет, Белгород, Россия

Отработка урановых рудных тел подэтажно-камерной системой разработки на рудниках ПАО «Приаргунское производственное горно-химическое объединение» (ППГХО) на всю высоту этажа (60 м) без закладки, как правило, приводит к обрушению вмещающих пород, существенному разубоживанию руды и большому выходу негабаритных кусков пустых пород. Многолетние промышленные экспериментальные и теоретические исследования показывают, что устойчивые вертикальные обнажения на рудниках ПАО «ППГХО» в массивах трахидацитов, конгломератов, песчаников, фельзитов имеют размеры до 20–40 м. Причем размеры устойчивых обнажений существенно зависят от степени трещиноватости вмещающих пород. Для пород с размером отдельности до 0,05 м вертикальный устойчивый размер обнажения не превышает 5–10 м. В связи с этим весьма актуальным является своевременная закладка отработанной части камер. Однако встает вопрос: какую нормативную прочность должен иметь закладочный массив?

Расчеты параметров закладочного массива по справочнику «Закладочные работы в шахтах» дают для подэтажно-камерной отработки заниженные показатели нормативной прочности закладки на сжатие (1,4 МПа), что приводит к увеличению разубоживания руды закладкой и дополнительных затрат на повторную закладку объемов разрушения.

На основе отечественного опыта использования твердеющей закладки для отработки рудных тел мощностью 15 м камерами прочность закладки принимается 3–5 МПа при суммарной величине статических напряжений без учета характера динамических напряжений от последовательного действия взрывов всеров скважин в камере. Завышенная нормативная прочность закладочного массива приводит к большому расходу вяжущих материалов. На основе теоретических исследований авторами предложена теоретическая зависимость расчета нормативной прочности закладочного материала, учитывающая сжимающее напряжение закладки под действием взрывных работ.

Доказано, что при камерных системах разработки с твердеющей закладкой экономически целесообразно формировать разнопрочный закладочный массив. Нижняя зона массива должна обладать повышенной прочностью (3–4 МПа), а верхняя часть – прочностью до 2–2,5 МПа.

**Ключевые слова:** закладочный массив, камерные системы разработки, нормативная прочность, действие взрыва, формулы расчета

**Как цитировать эту статью:** Воронов Е.Т. Обоснование прочности закладочного массива с учетом действия взрыва при камерных системах разработки / Е.Т.Воронов, В.Н.Тюпин // Записки Горного института. 2018. Т. 229. С. 22–26. DOI: 10.25515/PMI.2018.1.22

**Актуальность и изученность проблемы.** ОАО «ППГХО» является крупнейшим в мире и единственным в России горно-химическим комплексом по добыче и переработке урановых руд. Это объект стабильной добычи урана. Месторождения Стрельцовского рудного поля характеризуются разнообразием параметров залегания рудных тел, проявлением целого ряда неблагоприятных горно-геологических факторов: тектоническая нарушенность рудных тел и рудовмещающих пород, высокая радонообильность рудных залежей, возрастающая опасность проявления горных ударов при отработке нижних горизонтов месторождений и зачастую усложнение горно-геологических условий разработки в процессе эксплуатационных работ на длительно действующих урановых рудниках, что создает предпосылки к снижению технико-экономических показателей.

Базовая технология, основанная на доминирующем использовании затратной слоевой нисходящей системы разработки с твердеющей закладкой, может оказаться нерентабельной при отработке бедных и средних урановых руд.

Грядущее снижение запасов урановых руд с высоким содержанием металла предопределяет необходимость максимально возможного перехода на подземных горных работах ОАО «ППГХО» на более экономичные и высокопроизводительные камерные системы разработки с твердеющей закладкой, с массовой отбойкой руды скважинами [1].

В настоящее время на рудниках ПАО «Приаргунское производственное горно-химическое объединение» (ППГХО) 77,5 % крутопадающих урановых рудных тел имеют мощность до 2,6 м, 20 % – до 1,2 м. При нисходящей слоевой выемке данных рудных тел (со средним содержанием 0,12 %) заходками шириной 3,6 м разубоживание иногда приводит к переводу их в забалансовую



руды, при этом весьма низка производительность добычи. Подэтажно-камерная отработка маломощных рудных тел позволяет резко увеличить производительность добычи, а при правильном выборе и реализации параметров БВР и прочностных параметров закладочного массива снизить первичное и вторичное разубоживание руды.

Однако, как показывает опыт, отработка рудных тел подэтажно-камерной системой разработки на всю высоту этажа (60 м) без закладки, как правило, приводит к обрушению вмещающих пород, существенному разубоживанию руды и большому выходу негабаритных кусков пустых пород. Многолетние промышленные экспериментальные и теоретические исследования показывают, что устойчивые вертикальные обнажения на рудниках ПАО «ППГХО» в массивах трахидацитов, конгломератов, песчаников, фельзитов имеют размеры до 20-40 м [6]. Причем размеры устойчивых обнажений существенно зависят от степени трещиноватости вмещающих пород и заполнителя трещин. Например, для пород с размером отдельности до 0,05 м вертикальный устойчивый размер обнажения не превышает 5-10 м. В связи с этим весьма актуальным является своевременная закладка отработанной части камеры. Однако встает вопрос: какую нормативную прочность должен иметь закладочный массив?

На массив закладки в зависимости от условий применения воздействуют [2] статические (гравитационные и тектонические) силы и динамические (от взрывных работ) нагрузки, накладывающиеся на имеющееся статическое поле напряжений. Искусственные массивы из закладки могут испытывать напряжения и деформации сжатия, растяжения, сдвига, изгиба и «работать» в условиях одноосного, двухосного и объемного напряженных состояний. Для определения и контроля на производстве нормативной прочности независимо от характера деформаций искусственного массива ее приводят к пределу прочности на одноосное сжатие.

Количественное значение напряжений и деформаций в массиве закладки определяется величиной сближения боков выработанного пространства в условиях упругопластического деформирования пород зоны разгрузки за счет гравитационных, тектонических сил [4], напряжений от взрывных волн и реакции закладочного массива [4].

Согласно обобщенным теоретическим и практическим данным, приведенным в справочнике «Закладочные работы в шахтах» [2], при горизонтальной подработке искусственного массива камерами нижележащего подэтажа нормативная прочность закладки на сжатие определяется по формуле Ферз:

$$\sigma_{\text{н}}^{\text{зак}} = 2,5 \sqrt{(\sigma_{\text{рас}}^{\text{зак}})^3}, \quad (1)$$

где  $\sigma_{\text{рас}}^{\text{зак}}$  – нормативная прочность закладки на растяжение, МПа.

Растягивающие напряжения (в мегапаскалях) на контуре горизонтального обнажения искусственного массива при подэтажно-камерной системе разработки рассчитывают по преобразованной формуле [2]

$$\sigma_{\text{рас}}^{\text{зак}} = 10^{-5} \rho_3 h_{\text{пр}} (0,95 - e^{-0,12a}) K_3 K_d^{-1}, \quad (2)$$

где  $\rho_3$  – объемная масса закладки, кг/м<sup>3</sup>;  $h_{\text{пр}}$  – приведенная высота слоя нагрузки, м;  $a$  – пролет обнажения камеры;  $K_3$  – коэффициент запаса, равный 1,5;  $K_d$  – коэффициент длительной прочности, учитывающий время стояния обнажения.

При кратковременном обнажении закладки (до 1 года)  $K_d = 1$ , при больших сроках  $K_d = 0,5-0,7$ .

Формула (2) применима при  $a < 0,85h_3$ , где  $h_3$  – высота закладочного массива.

Приведенная высота слоя нагрузки при наличии пригружающего слоя разрушенных пород высотой  $H_{\text{пр}}$  составляет [2]

$$h_{\text{пр}} = \frac{\rho_{\text{н}} H_{\text{пр}} + \rho_3 h_3}{\rho_3}, \quad (3)$$

где  $\rho_{\text{н}}$  – объемная масса разрушенных пород, кг/м<sup>3</sup>.

Определим нормативную прочность закладки для нашего случая – подэтажно-камерной отработки маломощных рудных тел. Численные значения параметров:  $\rho_3 = 1,8 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup>,  $a = 3,5$  м,

**Нормативная прочность закладки при горизонтальной подработке искусственного массива для камерных вариантов разработки**

Пролет подработки, м	Нормативная прочность, МПа	
	На растяжение	На сжатие
5	0,7	1,5
10	1,0	2,5
15	1,17	3,2
20	1,26	3,5
25	1,35	3,9

$K_3 = 1,5$ ,  $K_d = 0,7$ ,  $\rho_n = 1,75 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$ ,  $h_3 = 60 \text{ м}$ ,  $H_{пр} = 0$  (учитывается, что выше блока пригружающий слой обрушенных пород отсутствует). Тогда по формуле (3)  $h_{пр} = 60 \text{ м}$ .

Подставляя численные значения в (2), а затем в (1), получим необходимую прочность закладки на растяжение  $\sigma_{рас}^{зак} = 0,7 \text{ МПа}$ ; нормативная прочность закладки на сжатие по формуле (1) составляет  $\sigma_n^{зак} = 1,4 \text{ МПа}$ .

Расчеты нормативной прочности закладки на сжатие по формулам (1)-(3) при поэтажно-камерной системе разработки показали их соответствие основным научно-практическим данным справочника [2], где в зависимости от пролета камеры приводятся прочностные характеристики (см. таблицу).

Однако отечественный и зарубежный опыт применения поэтажно-камерной системы разработки, в том числе на урановых рудниках [5, 9], показывает, что прочность закладки на сжатие при мощности рудного тела до 10 м должна быть не менее 3-5 МПа. В работе [3] при закладке выработанного пространства прочность закладочного материала на сжатие принимается 7-8 МПа. Вероятно, это связано с тем, что в расчетах (формулы 1-3) не учитывается динамическое и сейсмическое действие взрыва.

Завышенная прочность закладочного массива приводит к большому расходу вяжущих материалов. Заниженная прочность искусственного массива увеличивает разубоживание руды закладкой и дополнительные затраты на повторную закладку объемов обрушения.

Необходимая нормативная прочность закладочного материала на сжатие должна учитывать не только статическую нагрузку, определяемую по формулам (1)-(3), но и динамическую нагрузку от периодического воздействия взрывных работ при отбойке руды.

**Аналитический анализ динамического воздействия взрывных работ на закладочный массив.** На основе анализа численных расчетов установлено, что нормативная прочность закладки при поэтажно-камерной отбойке определяется гравитационной и тектонической составляющей напряжений (статическая компонента), а также действием взрывных работ (динамическая компонента).

Численными расчетами статической компоненты по данным технической литературы [2] для условий рудников ПАО «ППГХО» при поэтажно-камерной разработке предел прочности закладки на сжатие составляет 1,4 МПа, что в несколько раз меньше фактической прочности закладки на урановых рудниках (3-5 МПа) [5].

Прочность закладки на сжатие можно определить по формуле

$$[\sigma_{сж}] = \sigma_n^{зак} + \sigma_{сж,д}, \quad (4)$$

где  $\sigma_n^{зак}$  – статическая компонента, нормативная прочность закладки на сжатие [см. формулу (1)];  $\sigma_{сж,д}$  – динамическая компонента, величина сжимающего напряжения, создаваемого последовательным короткозамедленным взрывом вееров скважин.

Согласно исследованиям [7] волны деформаций от взрыва веера скважин (см. рисунок) «преломляются» в точке С и движутся по наиболее напряженной части массива (с минимальными потерями), затем – в точке D, обеспечивая сжимающие напряжения в закладке.

Величина сжимающих напряжений на расстоянии от группы короткозамедленно взрывааемых вееров, воздействующих на закладочный массив [7; 8],

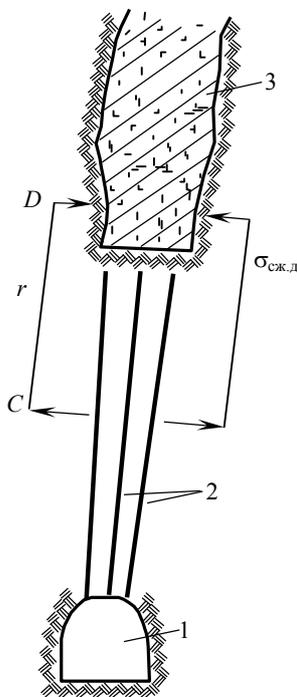


Схема к определению сжимающих напряжений в закладочном массиве при взрыве вееров скважин

1 – поэтажный штрек; 2 – взрывные скважины; 3 – закладочный массив



$$\sigma_{\text{сж.д}} = \frac{\sqrt{\pi}}{8} \frac{D\rho_{\text{в}}d_3c}{r\Phi} \left(1 - \frac{\mu\nu}{1-\nu}\right) \left(\frac{\nu}{1-\nu}\right)^2 K_{\text{от}}K_{\parallel}(l)K_{\parallel}(n)K_{\perp}(N), \quad (5)$$

где  $r$  – расстояние от центра (по длине) скважин (точка  $C$ ) до точки  $D$ ;  $D$ ,  $\rho_{\text{в}}$ ,  $d_3$ ,  $c$ ,  $\mu$ ,  $\nu$  – детонационные характеристики и физико-технические свойства горных пород;  $\Phi$  – показатель деформируемости трещиноватого горного массива;  $K_{\text{от}}K_{\parallel}(l)K_{\parallel}(n)K_{\perp}(N)$  – показатели, учитывающие соответственно долю энергии взрыва, излучаемую в окружающий массив, длину скважин, число скважин в веере, число короткозамедленно взрывааемых вееров,

$$K_{\text{от}} = \left(1 - \frac{a_{\text{к}}}{\pi W}\right)^{0,5}; \quad (6)$$

$$K_{\parallel}(l) = \ln 2,7 \left[ \frac{l_3}{d_e} - 2\mu \left( \frac{l_3}{d_e} - 1 \right) \right]; \quad (7)$$

$$K_{\parallel}(n) = \ln 2,7 [n - 2\mu(n - 1)]; \quad (8)$$

$$K_{\perp}(N) = \ln(1,7N + 1). \quad (9)$$

Показатель, зависящий от числа скважин в веере, в неявном виде учитывает ширину камеры. Показатель, зависящий от числа взрывааемых вееров, в неявном виде учитывает длину камеры.

Численные значения параметров в формулах (5)-(9) для условий рудников ПАО «ППГХО» при отработке руды в массивах трахидацитов: глубина 500 м, пролет подработки 3,5 м, диаметр скважин 57 мм, ВВ – гранулит А6, длина заряда 8 м, расстояние  $r = 5$  м. Остальные параметры:  $D = 3,3 \cdot 10^3$  м/с;  $\rho_{\text{в}} = 1,1 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup>;  $d_3 = 0,057$  м;  $c = 4,35 \cdot 10^3$  м/с;  $\mu = 0,45$ ;  $\nu = 0,29$ ;  $E = 4,75 \cdot 10^{10}$  Па;  $\Phi = 8$ ;  $n = 3$ ;  $N = 5$ ;  $d_e = 0,4$  м;  $l_3 = 8$  м;  $a_{\text{к}} = 3,5$  м;  $W = 1,5$  м.

По формулам (6)-(9) получим  $K_{\text{от}} = 0,5$ ;  $K_{\parallel}(l) = 2,05$ ;  $K_{\parallel}(n) = 1,17$ ;  $K_{\perp}(N) = 1,8$ .

Подставляя численные значения в (5), получим величину динамических напряжений в нижней части закладочного массива (см. рисунок). Численными расчетами величина  $\sigma_{\text{сж.д}} = 1,8$  МПа в самой нижней части закладочного массива на расстоянии 5 м от центра по длине скважин.

В этом случае, согласно формуле (1), при расчетной величине  $\sigma_{\text{н}}^{\text{зак}} = 1,4$  МПа нормативная прочность нижней части закладочного массива [ $\sigma_{\text{сж}}$ ] = 3,2 МПа. Это соответствует практическим данным при отработке урановых рудных тел подэтажно-камерной системой разработки [5].

Однако с увеличением расстояния от центра зарядов ВВ до закладки величина  $\sigma_{\text{сж.д}}$  значительно уменьшается. Расчетные значения  $\sigma_{\text{сж.д}}$  и нормативной прочности закладки с расстоянием от центральной части веерных зарядов ( $r$ ):

Расстояние от центра зарядов до закладки, м	5	8	12	15
Величина сжимающих напряжений от взрыва, МПа	1,8	1,1	0,7	0,6
Нормативная прочность закладки, МПа	3,2	2,5	2,1	2,0

Таким образом, закладочный массив может быть разнопрочным: нижняя часть должна иметь повышенную прочность 3,0-4,0 МПа, оставшаяся верхняя часть – прочность до 2,0-2,5 МПа.

## Выводы

На основании теоретических и экспериментальных исследований, а также анализа существующих численных методов расчета нормативной прочности закладочного материала при подэтажно-камерной отработке маломощных рудных тел можно сделать следующие выводы:



1. Расчеты параметров закладочного массива по справочнику «Закладочные работы в шахтах» [2] не учитывают динамические напряжения от последовательного действия взрывов веером скважин в камере и дают для поэтажно-камерной отработки заниженные показатели нормативной прочности закладки на сжатие (1,4 МПа), что приводит к увеличению разубоживания руды закладкой и дополнительных затрат на повторную закладку объемов разрушения.

2. На основе отечественного опыта использования твердеющей закладки для отработки рудных тел мощностью до 10 м камерами фактическая прочность закладки принимается 3-5 МПа.

3. На основе теоретических исследований авторами установлена новая теоретическая зависимость расчета нормативной прочности закладочного материала, учитывающая сжимающее напряжение закладки под действием взрывных работ.

4. Доказано, что при камерных системах разработки с твердеющей закладкой экономически рационально формировать разнопрочный закладочный массив. Нижняя зона массива должна обладать повышенной прочностью (3-4 МПа), а верхняя часть – прочностью до 2-2,5 МПа.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Воронов Е.Т. Перспективы развития подземных геотехнологий для разработки урановых месторождений с учетом радиационного фактора / Е.Т.Воронов, С.В.Шурыгин // Вестник Забайкальского государственного университета. Чита, 2014. № 3. С.3-9.
2. Закладочные работы в шахтах: Справочник / Под ред. Д.М.Бронникова, М.Н.Цыгалова. М.: Недра, 1980. 400 с.
3. Мосинец В.Н. Безотходная технология добычи радиоактивных руд / В.Н.Мосинец, О.К.Абрамов, В.М.Мельниченко / Под ред. В.Н.Мосинца. М.: Энергоатомиздат, 1987. 240 с.
4. Синкевич Н.И. Оценка природного напряженного состояния массива Абаканского месторождения // Горный журнал. 2003. № 11. С. 30-31.
5. Слепцов М.Н. Подземная разработка месторождений цветных и редких металлов / М.Н.Слепцов, Р.Т.Азимов, В.Н.Мосинец. М.: Недра, 1986. 206 с.
6. Тюпин В.Н. Установление динамически устойчивых размеров обнажений трещиноватого напряженного горного массива при камерных вариантах систем разработки // Вестник Забайкальского государственного университета. Чита, 2016. Т. 22. № 6. С. 31-39.
7. Тюпин В.Н. Действие взрыва в напряженном трещиноватом массиве горных пород при проведении горных выработок и железнодорожных тоннелей / В.Н.Тюпин, А.В.Михайловский // Вестник Читинского государственного университета. 2009. № 6 (57). С.74-78.
8. Тюпин В.Н. Влияние взрыва на напряженное состояние горного массива и обделки при сооружении железнодорожных тоннелей // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование / ИрГУПС. 2011. № 3 (31). С. 87-90.
9. Хомяков В.И. Зарубежный опыт закладки на рудниках. М.: Недра, 1984. 187 с.

**Авторы:** **Е.Т.Воронов**, *д-р техн. наук, профессор, kafedra.bjd@mail.ru (Забайкальский государственный университет, Чита, Россия);* **В.Н.Тюпин**, *д-р техн. наук, профессор, tyupinvn@mail.ru (Белгородский государственный национальный исследовательский университет, Белгород, Россия).*

Статья принята к публикации 28.04.2017