

УДК: 622.838.5:622.273.3

DOI: 10.25635/2313-1586.2019.04.144

**Зотеев Олег Вадимович**

доктор технических наук,  
ведущий научный сотрудник  
лаборатории геодинамики и горного давления,  
Институт горного дела УрО РАН,  
620075 г. Екатеринбург,  
ул. Мамина-Сибиряка, 58  
e-mail: [zoteev.o@mail.ru](mailto:zoteev.o@mail.ru)

**Zoteev Oleg V.**

Doctor of Engineering Sciences,  
Leading Researcher,  
Institute of Mining, Ural Branch of RAS,  
620075, Ekaterinburg,  
58 Mamina-Sibiryaka Str.,  
e-mail: [zoteev.o@mail.ru](mailto:zoteev.o@mail.ru)

**Криницын Роман Владимирович**

заведующий лабораторией  
геодинамики и горного давления,  
Институт горного дела УрО РАН,  
e-mail: [Roman\\_krincyn@mail.ru](mailto:Roman_krincyn@mail.ru)

**Krinitcyn Roman V.**

Head of the Laboratory,  
Institute of Mining, Ural Branch of RAS,  
620075, Ekaterinburg, 58 Mamina-Sibiryaka Str.  
email: [Roman\\_krincyn@mail.ru](mailto:Roman_krincyn@mail.ru)

**ВЛИЯНИЕ СУХОЙ ЗАКЛАДКИ  
НА НЕСУЩЮЮ СПОСОБНОСТЬ  
ЦЕЛИКОВ****EFFECT OF DRY BACKFILL  
ON SUPPORTING STRENGTH  
OF PILLARS***Аннотация:*

Саткинское месторождение (шахта «Магнезитовая») ПАО «Комбинат Магнезит») отрабатывалось камерно-столбовой системой разработки восходящими горизонтальными слоями высотой 5 м с поддержанием кровли ленточными (столбчатыми) целиками с заполнением отработанного пространства сухой закладкой из хвостов обогащения или дробленых пустых пород карьера, из которой велась выемка вышележащего слоя.

При применении сухой закладки возникает вопрос о ее влиянии на несущую способность целиков. Поэтому была проведена оценка прочностных и деформационных свойств сухой закладки, исследовано влияние закладки на несущую способность целиков.

При отработке месторождения было выявлено, что наличие наклонных тектонических нарушений, по которым зачастую развиты зеркала скольжения, оказывает существенное влияние на устойчивость междукамерных (как столбчатых, так и ленточных) целиков.

*Ключевые слова:* сухая закладка, целик, тектоническое нарушение, зеркало скольжения, магнезит, устойчивость, прочностные свойства сухой закладки.

*Abstract:*

The deposit Satkinskoye (the mine Magnesite of PSJC Kombinat Magnezit) has been developed by chamber-and-pillar mining system with ascending and horizontal layers 5 m high and roof supporting with the rib (columnar) pillars by filling the worked out space with the dry backfill from tailings or crushed waste of the open-pit mine, which provided the extraction of the overlying layer.

When using the dry backfill, a question arises about its effect on the supporting strength of the pillars. Therefore, we have estimated the strength and deformation properties of the dry backfill and studied the influence of the backfill on the supporting strength of the pillars.

During mining the deposit, it was revealed that the presence of inclined tectonic disturbances, which often develop glide planes, has a significant impact on the stability of the inter-chamber (both columnar and rib) pillars.

*Key words:* dry backfill, pillar, tectonic disturbance, glide plane, magnesite, stability, strength properties of dry backfill.

*Введение*

Саткинское месторождение магнезитов (Южный Урал) представлено серией рудных тел пласто- и линзообразной формы длиной по простиранию 1,3÷3,6 км, по падению 100÷500 м. Азимут простирания рудных тел 45÷55°, углы падения на юго-восток изменяются в пределах 10÷850, составляя в среднем 30÷45°, нормальная мощность рудных тел находится в диапазоне 8÷30 м.

Литологический разрез месторождения представлен комплексом прочных осадочных и метаморфизованных пород: магнезитами, доломитами и сланцами углисто-карбонатного состава. Незначительное распространение имеют изверженные породы

типа диабазов, приуроченные к дайковым жилам крутого падения мощностью до 20 см. Магнетитовые залежи местами осложнены карстовыми полостями. Активные разломы северо-восточного простирания (азимут  $60^\circ$ ) представляют собой малоамплитудные сбросы.

В целом вся осадочная толща разбита системами трещин двух типов. К первому типу относятся разнонаправленные трещины с вертикальными или близкими к ним углами падения протяженностью до первых десятков метров, часто без заполнителя, иногда раскрытые. Ко второму типу относятся межпластовые трещины, располагающиеся в магнетитах строго параллельно их слоистости и характеризующиеся значительной протяженностью по простиранию и падению рудных тел. Углы падения трещин второй группы, изменяются от  $15\div 20^\circ$  до  $45\div 50^\circ$ , четко повторяя все изгибы рудных тел.

Основная система разработки при выемке руды на месторождении – камерно-столбовая с сухой закладкой выработанного пространства. Длина добычного блока по простиранию рудного тела на гор. +340, +260, +180 м при камерно-столбовой системе разработки с учетом междублоковых целиков составляет 240 м. Параметры камер и целиков в ходе отработки очистных блоков в ходе отработки запасов неоднократно претерпевали изменения. Например, ширина очистных камер увеличилась с 8 до 12 – 13 м, что привело к увеличению полноты выемки магнетита и, следовательно, к уменьшению потерь и разубоживания руды [1].

Оценка прочностных и деформационных свойств сухой закладки

Влияние сухой закладки на несущую способность целиков может быть оценено на основе закона Кулона:

$$\sigma_{\text{ц}} \leq \sigma_{\text{ц}}^{\text{сж}} + \sigma_3 \frac{1 + \sin \varphi_{\text{ц}}}{1 - \sin \varphi_{\text{ц}}}, \quad (1)$$

где  $\sigma_{\text{ц}}$  – предельная несущая способность целика;  $\sigma_{\text{ц}}^{\text{сж}}$  – прочность целика на одноосное сжатие;  $\sigma_3$  – отпор, создаваемый сухой закладкой;  $\varphi_{\text{ц}}$  – угол внутреннего трения материала целика.

Отпор, создаваемый закладкой, размещаемой в массиве, который претерпел деформации, но сохраняет устойчивость, может быть оценен исходя из условий стесненного деформирования:

$$\sigma_3 = \frac{\nu_3}{1 - \nu_3} \gamma_3 h_3, \quad (2)$$

где  $\nu_3$  – коэффициент Пуассона закладки;  $h_3$  – высота столба закладки;  $\gamma_3$  – удельный вес закладки.

Для закладки из несвязных грунтов, а именно такая и применяется на шахте «Магнетитовая», величина отпора (пассивного давления) может быть определена через прочностные свойства:

$$\sigma_3 = \frac{1 - \sin \varphi_3}{1 + \sin \varphi_3} \gamma_3 h_3, \quad (3)$$

где  $\varphi_3$  – угол внутреннего трения закладки.

В том случае, когда начинается запредельное (неупругое) деформирование целика, сопровождающееся его разрушением, отпор закладки существенно увеличивается:

$$\sigma_3 = \frac{1 + \sin \varphi_3}{1 - \sin \varphi_3} \gamma_3 h_3. \quad (4)$$

Удельный вес закладки может быть оценен через плотность минеральной части материала закладки и пористость насыпного материала:

$$\gamma_3 = \gamma_{\text{м.ч.}} (1 - n), \quad (5)$$

где  $\gamma_{м.ч.}$  – плотность минеральной части материала ( $\gamma_{м.ч.} \approx 2,8$  тс./м<sup>3</sup>);  $n$  – пористость закладки.

Таким образом, для оценки влияния сухой закладки на несущую способность целиков необходимо оценить ее пористость, коэффициент Пуассона и угол внутреннего трения.

Для определения начальной (максимально возможной) пористости  $n_0$  грунтов из неокатанных обломков было предложено следующее уравнение [7]:

$$n_0 = 0,4584\eta^{-0,1003} + 0,06617, \quad (6)$$

где  $\eta$  – коэффициент неоднородности грунта:

$$\eta = \frac{d_{60}}{d_{10}}, \quad (7)$$

где  $d_0$  – нормирующая величина ( $d_0 = 1$  мм);  $d_{10}$  и  $d_{60}$  – диаметры частиц, соответствующие накопленной частоте 10 и 60 %, соответственно, на кривой гранулометрического состава, мм.

Зависимость пористости несвязных грунтов от действующей нагрузки описывается следующим образом:

$$n_i(\sigma_i) = n_0 - \frac{\sigma_i}{E(\sigma_i)} \beta(\sigma_i); \quad (8)$$

$$\beta(\sigma_i) = 1 - \frac{2\mu(\sigma_i)^2}{1 - \mu(\sigma_i)},$$

где  $n_i$  – пористость грунта при сжимающей нагрузке  $\sigma_i$ ;  $E(\sigma_i)$  – модуль деформации;  $\mu(\sigma_i)$  – коэффициент Пуассона.

Величина модуля деформации  $E$  в зависимости от грансостава грунта и величины действующей нагрузки определяется следующим образом [7]:

$$E = 1,05325K \left( \frac{\sigma}{\sigma_0} \right)^b + 0,45911; \quad (9)$$

$$K = 1,4840n_0^{-27678} d_{50}^{-0,0360}; \quad b = 0,729n_0^{0,3196}.$$

Величина же коэффициента Пуассона  $\nu$  определяется соотношениями [7]:

$$\mu = 0,99051K \exp \left( b \frac{\sigma}{\sigma_0} \right) - 0,04640; \quad (10)$$

$$K = 0,5113n_0^{0,8184} \left( \frac{\sigma_{\max}}{\sigma_0} \right)^{0,2301}; \quad b = -0,1400(d_{50})^{0,2039},$$

где  $\sigma_{\max}$  – максимально возможная нагрузка, МПа.

Таким образом, для определения средних значений физико-механических свойств закладки, применяемой на шахте «Магнезитовая», необходимо оценить величину контролирующих диаметров  $d_{10}$ ,  $d_{50}$  и  $d_{60}$ , а также прочность обломков на одноосное сжатие. Для изучения гранулометрического состава закладки совместно работниками шахты и сотрудниками лаборатории геодинамики и горного давления ИГД УрО РАН был проведен ситовой анализ материала, поступающего на шахту в качестве закладки. Результаты ситового анализа приведены в табл. 1. Всего на анализ поступило чуть более 43-х проб материала. К сожалению, испытания проводились зимой, и поэтому просеиваемый материал не удалось полностью просушить. Поэтому мелкий материал не рассеивался, и получить детализацию распределения фракций мельче 2,5 мм не удалось.

Таблица 1

## Результаты ситового анализа закладочного материала

Частоты	Интервал фракций, мм						
	2,5–5,0	5,0–10,0	10,0–15,0	15,0–20,0	20,0–25,0	25,0–40,0	более 40
Интервальная частота, %	32,79	24,10	12,63	11,36	5,45	9,27	5,33
Накопленная частота, %	32,79	56,89	69,52	80,88	86,33	95,6	100,00

Очевидно, что контролирующий диаметр  $d_{10}$ , необходимый для вычисления коэффициента неоднородности, может быть оценен по полученным результатам весьма приблизительно. Контролирующие же диаметры  $d_{50}$  и  $d_{60}$  оцениваются величинами 4,28 и 6,23 мм, соответственно.

Для детализации распределения частот мелких фракций были привлечены данные ситового анализа хвостов, проведенного институтом Уралмеханобр. При анализе рассматривался грансостав трех классов крупности отходов: 120 – 60 мм (выход этого класса составляет около 20 % от всего объема хвостов), 60 – 8 мм (выход составляет 35 – 40 % от всего объема хвостов) и 8 – 0,1 мм (45 – 40 %) от всего объема хвостов). Результаты ситового анализа для второго и третьего классов приведены в табл. 2. При этом для каждого класса крупности в верхней строке приведены интервальные частоты, а в нижней – накопленные. Первый класс крупности (120 – 80 мм) в обработке не рассматривался, поскольку содержание в нем частиц с размером более 40 мм не превышает 12 %.

С учетом накопленных частот для частиц менее 5,0 мм можно составить уравнение для определения долей классов крупности в смеси, близкой по гранулометрическому составу к закладочному материалу:

$$A \cdot 56,0 + (100 - A) \cdot 1,9 = 32,79, \quad (11)$$

где  $A$  – доля класса 8 – 0,1 мм в смеси.

Таблица 2

## Результаты ситового анализа хвостов по классам крупности

Класс крупности	Частоты (%) по фракциям															
	< 1,25мм	1,25–2,5	2,5–5,0	5,0–7,5	7,5–10	10–12,5	12,5–15	15–20	20–25	25–30	30–40	40–50	50–60	60–70	70–80	>80
60–8 мм	0,6	0,2	0,5	0,6	4,3	6,	5,5	12,5	9,4	9,0	19,3	12,0	11,9	2,5	4,0	1,1
	0,6	0,8	1,9	2,5	6,8	12,8	18,3	30,8	40,2	49,2	68,5	80,5	92,4	94,9	98,9	100
8–0,1 мм	29,0	7,5	19,5	18,8	20,5	3,3	0,8	0,6								
	29,0	36,5	56,0	74,8	95,3	98,6	99,4	100								

Решив в соответствии с (11) относительно  $A$ , можно уточнить распределение мелких фракций в закладочной смеси:  $A = 57$  %, доля обломков с размером 1,25 мм составляет 16,8 %, доля обломков с размерами от 1,25 до 2,5 мм составляет 4,38 % (накопленная частота 21,18 %). Экстраполяция кривой накопленных частот в

направлении уменьшения обломков позволяет оценить величину контролирующего диаметра  $d_{10}$ :

$$d_{10} = \frac{2,5-1,25}{21,18-16,8}(10,0-16,8)+2,5 = 0,56 \text{ мм.} \quad (12)$$

Искомые контролирующие диаметры определяются следующим образом:  $d_{10}=0,56$ ,  $d_{50}=4,28$  и  $d_{60}=6,23$  мм. Коэффициент неоднородности закладочного материала в соответствии с (7) равен  $\eta=11,125$ .

В качестве прочности обломков на одноосное сжатие примем прочность на одноосное сжатие образцов доломита, т.е.  $R_{сж}=193$  МПа. Максимально возможные вертикальные напряжения в закладке определяются ее весом. Принимая максимальную высоту столба равной 60 м, плотность доломита в массиве равной  $2,8 \text{ т/м}^3$ , а среднее значение пористости равной 0,32, имеем следующую оценку максимальной величины вертикальной нагрузки:

$$\sigma_{\max} = 0,028 \cdot 60 \cdot (1-0,32) = 1,14 \text{ МПа.}$$

Таким образом, в соответствии с (6) среднее значение начальной пористости может быть оценено в долях единицы величиной  $n_0=0,4262$ . Средние величины тангенса угла внутреннего трения, модуля деформации и коэффициента Пуассона будут зависеть от величины напряжений, которыми нагружена закладка:

$$\begin{aligned} \operatorname{tg}\varphi &= 0,92 \left( \frac{\sigma}{\sigma_0} \right)^{-0,0859} - 0,0422; & E &= 15,7177 \left( \frac{\sigma}{\sigma_0} \right)^{0,555} + 0,45911; \\ \nu &= 0,2597 \exp \left( -0,1883 \frac{\sigma}{\sigma_0} \right) - 0,046. \end{aligned} \quad (13)$$

Получив соотношения с (13), можем оценить изменение физико-механических свойств и отпора, который может оказать закладка в пределах каждого слоя. При вычислениях физико-механических характеристик будем исходить из последовательности возведения столба: первый слой закладки возводится самым первым. При этом закладка в шахте выравнивается бульдозером, который создает уплотняющую нагрузку величиной 0,3 МПа. Эта нагрузка создает насыпной массив с определенной пористостью, плотностью, модулем деформации и т.д. На этапе возведения второго слоя в зависимости от его веса материал первого слоя может уплотниться, а может и остаться без изменений. В том случае, если происходит дополнительное уплотнение материала первого слоя, его характеристики пересчитываются. После расчетов, связанных с возведением второго слоя, операции повторяются для третьего, четвертого и т.д.

Приведенная методика расчетов позволяет оценить средние для каждого слоя величины пористости  $n$ , плотности закладки  $\gamma_z$ , действующего угла внутреннего трения  $\varphi$ , модуля деформации  $E$  и коэффициента Пуассона  $\nu$ . Кроме того, появляется возможность оценить изменение в пределах слоя веса столба закладки и величину создаваемого ей отпора (пассивное и активное давление). Результаты расчетов, проведенных вышеописанным способом, приведены в табл. 3. При этом считается, что слой № 11 возводился самым последним, а слой № 1 – первым.

Низкая уплотняемость закладочного материала и малая величина оказываемого ей отпора объясняются малым размером обломков и низким коэффициентом неоднородности смеси. Единственным способом повышения прочностных и деформационных свойств закладки является существенное увеличение (до 30 %) в смеси доли крупнообломочных (80 – 400 мм) фракций.

Влияние сухой закладки на несущую способность целиков без учета влияния тектонических нарушений

Таблица 3

**Изменение физико-механических свойств закладки по слоям**

№ слоя	n	$\gamma_z$ , тс/м м	$\phi$ , град	E, МПа	$\nu$	$\sigma_z$ , МПа	Отпор закладки, МПа	
							минимальный	максимальный
11	0,394	1,695	44,36	8,52	0,199	0÷0,085	0÷0,0211	0,00÷0,48
10	0,394	1,695	44,36	8,52	0,199	0,085÷0,170	0,0211÷0,0422	0,48÷0,96
9	0,394	1,695	44,36	8,52	0,199	0,170÷0,254	0,0422÷0,0633	0,96÷1,44
8	0,394	1,695	44,36	8,52	0,199	0,254÷0,339	0,0633÷0,0844	1,44÷1,92
7	0,392	1,701	44,05	9,08	0,198	0,339÷0,424	0,0844÷0,1047	1,92÷2,36
6	0,389	1,712	43,75	10,22	0,194	0,424÷0,510	0,1047÷0,1228	2,36÷2,80
5	0,385	1,722	43,00	11,27	0,190	0,510÷0,596	0,1228÷0,1398	2,80÷3,15
4	0,382	1,731	42,60	12,25	0,186	0,596÷0,682	0,1398÷0,1558	3,15÷3,54
3	0,379	1,740	42,25	13,17	0,182	0,682÷0,769	0,1558÷0,1711	3,54÷3,92
2	0,376	1,748	41,95	14,05	0,177	0,769÷0,857	0,1711÷0,1843	3,92÷4,31
1	0,373	1,756	41,67	14,88	0,175	0,857÷0,945	0,1843÷0,2004	4,31÷4,69

Система разработки, применяемая на шахте “Магнетитовая”, рассчитана на применение жестких, т.е. работающих в упругом режиме целиков. Кроме сохранения дневной поверхности условие упругого деформирования заложено и в расчет предельного пролета кровли камер. Несущая способность целика в этом случае определяется соотношением (1), причем воздействие закладки определяется лишь ее пассивным давлением, т.е. соотношением (2).

Прочность целика на одноосное сжатие, являющееся первым слагаемым соотношения (1), может быть оценена через прочность массива на одноосное сжатие  $\sigma_{сж}$  и коэффициент формы целика  $K_{\phi}$ :

$$\sigma_{сж}^{\Pi} = \sigma_{сж}^M K_{\phi}. \quad (14)$$

Прочность ненарушенного массива на одноосное сжатие для условий шахты «Магнетитовая» была получена в работах ИГД УрО РАН и оценена величиной 40 - 50 МПа. Коэффициент формы учитывает неравномерность распределения напряжений в теле целика, проявляющуюся в снижении прочности целика с ростом его высоты [2 – 6]. Коэффициент формы ленточных целиков определяется следующим выражением:

$$K_{\phi}^{\Pi} = \begin{cases} K_{\phi} \left( 1,31 + 0,09 \frac{b}{h} \right), & \text{при } b \leq h \\ K_{\phi} \left( 1,49 - 0,09 \frac{b}{h} \right), & \text{при } b > h \end{cases}, \quad (15)$$

где  $h$  – высота целика;  $K_{\phi}$  – коэффициент формы столбчатого целика [1]:

$$K_{\phi} = 0,75 + 0,5 \frac{b}{h}. \quad (16)$$

Как показывает практика, разрушение целика при отсутствии в нем крупных тектонических нарушений начинается в его средней по высоте части. При этом целик может принять со временем классическую «рюмочную» форму. Поэтому для оценки влияния закладки на несущую способность целика достаточно рассмотреть прочность средней части наиболее высокого (наименее прочного) целика высотой 60 м и шириной 6 м.

Прочность целика на одноосное сжатие в соответствии с (14) – (16) определится следующим образом:

$$K_{\Phi} = 0,75 + 0,5 \frac{b}{h} = 0,75 + 0,5 \frac{6}{60} = 0,8;$$
$$K_{\Phi}^{\text{II}} = K_{\Phi} \left( 1,31 + 0,09 \frac{b}{h} \right) = 0,8 \left( 1,31 + 0,09 \frac{6}{60} \right) = 1,0552;$$
$$\sigma_{\text{сж}}^{\text{II}} = \sigma_{\text{сж}}^{\text{M}} \quad K_{\Phi}^{\text{II}} = 40 \cdot 1,0552 = 42,208 \text{ МПа.}$$

По технологическим условиям разрыв между верхней кромкой закладки и кровлей камеры всегда составляет два слоя, т.е. 10 м. Таким образом, над центральной по высоте частью целика находится слой закладки мощностью 20 м. Величина пассивного давления закладки в соответствии с расчетами, приведенными в табл. 3, составляет 0,339 МПа. Угол внутреннего трения массива магнезита составляет в среднем  $\varphi = 30 - 33^{\circ}$  (среднее значение для большинства ненарушенных пород) [7]. Таким образом, увеличение несущей способности целика, обусловленное влиянием закладки, может быть оценено следующей величиной:

$$\Delta \sigma_{\text{сж}}^{\text{II}} = \sigma_3 \frac{1 + \sin \varphi}{1 - \sin \varphi} = 0,339 \frac{1 + \sin 33^{\circ}}{1 - \sin 33^{\circ}} \approx 1,15 \text{ МПа.}$$

Увеличение несущей способности целика за счет отпора закладки не превышает 3 % и является пренебрежимо малой величиной.

*Влияние сухой закладки на несущую способность целиков, пересеченных тектоническими нарушениями.*

В тех случаях, когда целик насквозь пересечен тектоническим нарушением, возникает опасность развития больших сдвиговых деформаций, которые могут привести как к разрушению целика, так и к растягивающим деформациям кровли камеры. Несущая способность целика будет в первую очередь определяться прочностными характеристиками и углом падения нарушения. Условие равновесия на трещине, т.е. условие специального предельного равновесия, определяется законом Кулона:

$$\tau_{nt} \leq C' + \sigma_n \operatorname{tg} \varphi', \quad (17)$$

где  $\tau_{nt}$  – касательные напряжения на трещине;  $\sigma_n$  – нормальные напряжения на трещине;  $C'$  и  $\varphi'$  – соответственно, сцепление, – угол трения по контакту (для зеркал скольжения сцепления по контакту в среднем составляет  $C' = 0,1 \div 0,05$  МПа, а угол трения по контакту  $\varphi' \approx 12^{\circ}$ ).

Однако отпор закладки, участвующий в формировании как нормальных, так и касательных напряжений, непостоянен по высоте целика. Поэтому для определения условий равновесия на трещине удобнее переписать в силовой форме, проинтегрировав напряжения, действующие на площадке скольжения.

Силовая форма записи имеет следующий вид:

$$T \leq F_{\text{уд}}; T = F_{\text{в}} \sin \alpha - F_{\text{г}} \cos \alpha; F_{\text{уд}} = C' l_{\text{T}} + N \operatorname{tg} \varphi';$$
$$N = F_{\text{в}} \cos \alpha + F_{\text{г}} \sin \alpha; F_{\text{в}} = \sigma_z (a + b); F_{\text{г}} = \frac{1}{2} h_3 \sigma_3, \quad (18)$$

где  $T$  и  $F_{уд}$  – соответственно, сдвигающие и удерживающие силы;  $F_e$  и  $F_T$  – вертикальные и горизонтальные силы, действующие на трещине;  $l_T$  – длина трещины в целике;  $N$  – сила, нормальная плоскости трещины;  $\alpha$  – угол падения трещины;  $a$  и  $b$  – соответственно, пролет камеры (12 м) и толщина целика (6 м);  $h_3$  – высота столба закладки над трещиной;  $\sigma_3$  – отпор закладки, действующий на нижней точке трещины.

В расчетах будем принимать, что высота столба закладки на 10 м меньше, чем высота участка целика, пересеченного трещиной. Длина участка трещины в целике может быть определена исходя из угла падения трещины и толщины целика:

$$l_T = \frac{b}{\cos\alpha}. \quad (19)$$

Наиболее опасную ориентировку трещины можно найти в предположении о незначительности влияния закладки: в этом случае плоскость трещины должна быть ориентирована к оси целика под углом  $45^\circ - \varphi'/2$ . С учетом угла трения по контакту  $\varphi'=12^\circ$  наиболее опасные трещины ориентированы под углом  $39^\circ$  к оси целика, т.е. их угол падения составляет  $51^\circ$ . Из трещин отрыва, имеющих более высокий угол трения по контакту  $\varphi'=28 - 30^\circ$ , наиболее опасными углами падения будут  $31 - 30^\circ$ . Однако для трещин с таким падением высота участка, на котором они пересекают целик насквозь, не превышает 7 м. Таким образом, закладка не может оказывать влияние на устойчивость, поскольку ее верхняя кромка отстает от кровли камеры на 10 м.

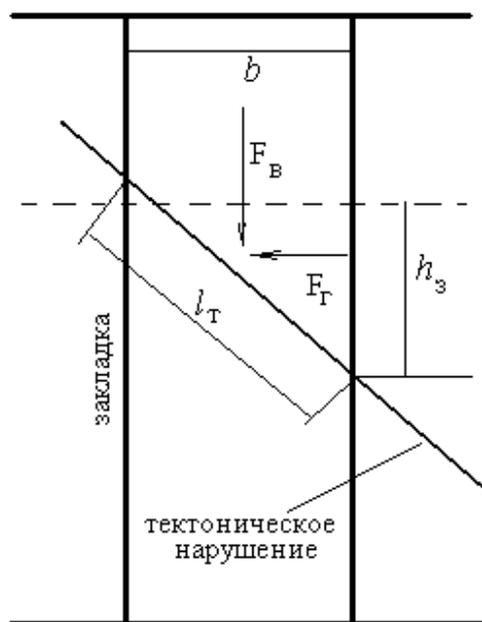


Рис. 1 – Схема сил, действующих на целик, пересеченный тектоническим нарушением

Максимальное влияние закладка окажет на устойчивость крутопадающих трещин, поскольку в этом случае высота ее столба, перекрывающего нарушение, достигает максимума (рис. 1). Рассмотрим для определенности нарушение с углом падения  $80^\circ$ . Легко убедиться, что в случае целика толщиной 6 м высота участка, на котором трещина пересекает тело целика, составит 34 м, а высота столба закладки – 24 м. Длина участка трещины в целике будет равна  $l_T=34,55$  м. Силы, определяемые отпором закладки, могут быть оценены по табл. 3: пассивное давление закладки на подошве пятого слоя составляет 0,1228 МПа, а предельная величина

активного давления равна 2,8 МПа. Подставляя исходные данные в (18), имеем в случае пассивного отпора закладки:

$$F_B = 5 \cdot (12 + 6) = 90 \text{ МН}; F_c = \frac{1}{2} \cdot 24 \cdot 0,1228 = 1,47 \text{ МН};$$

$$T = 90 \sin 80^\circ - 1,47 \cos 80^\circ = 88,4 \text{ МН}; N = 90 \cos 80^\circ + 1,47 \sin 80^\circ = 17,1 \text{ МН};$$

$$F_{y.d} = 0,1 \cdot 34,55 + 17,1 \cdot \operatorname{tg} 12^\circ = 7,09 \text{ МН}; n = \frac{F_{y.d}}{T} = 0,08.$$

Таким образом, крутопадающее зеркало скольжения неустойчиво, и целик должен перейти в запредельное деформирование, которое закончится его полным разрушением, если не будет остановлено активным давлением со стороны закладки или за счет ограниченной податливости кровли.

Рассмотрим устойчивость крутопадающего нарушения при активном отпоре закладки. Величина горизонтальных сил при этом возрастет до 33,5 МПа. Баланс сил в этом случае будет выглядеть следующим образом:

$$T = 90 \sin 80^\circ - 33,5 \cos 80^\circ = 82,8 \text{ МН}; N = 90 \cos 80^\circ + 33,5 \sin 80^\circ = 48,6 \text{ МН};$$

$$F_{y.d} = 0,1 \cdot 34,55 + 48,6 \cdot \operatorname{tg} 12^\circ = 713,79 \text{ МН}; n = \frac{F_{y.d}}{T} = 0,17.$$

Даже активный отпор закладки не может предотвратить полного разрушения целика по крутопадающему тектоническому нарушению. Более того, деформация закладки, при которой она разовьет отпор в 2,8 МПа, может быть оценена следующим образом:

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} \left( 1 - \frac{2\mu^2}{1-\mu} \right) = \frac{2,36}{9} \left( 1 - \frac{2 \cdot 0,198^2}{1-0,198} \right) = 0,236.$$

Если предположить, что отпор закладки определяется деформированием ее полосы шириной 1 – 2 м, то смещение целика по плоскости нарушения составит 24 – 47 см, т.е. осадка кровли должна составить 22 – 45 см. Естественно, что подобные осадки кровли недопустимы. Единственным способом обеспечения несущей способности целика в подобной ситуации является применение крепей [8]. Необходимо отметить, что именно широкое распространение подобных зеркал падения с субмеридианальным падением и послужило причиной отказа от применения в блоке № 1 столбчатых целиков.

В целом необходимо сделать вывод, что сухая закладка, применяемая на шахте «Магнетитовая», не влияет на несущую способность целиков и в дальнейшем может быть исключена из расчетных схем.

Оценка несущей способности наклонных целиков при наличии пологих зеркал скольжения.

На шахте «Магнетитовая» установлено, что прослеженные на верхних горизонтах трещины со следами зеркал скольжения и наличием углисто-графитового заполнителя, являются протяженными с размерами до сотен метров по падению и простиранию и расчленяют рудное тело на плиты. Зеркала скольжения располагаются строго параллельно полосчатости, повторяя изгибы рудных тел. Часто зеркала скольжения развиты по контактам магнетитовых залежей с доломитом. Другая группа протяженных нарушений (до десятков метров) – субвертикальные, разноориентированные без заполнителя или с прочным заполнителем.

Плоскости зеркал скольжения по опыту отработки блока № 1 и частично блока № 2 имели углы падения около 30° и проходили согласно падению рудного тела. Нагрузки на границы модели задавались в соответствии со следующими результа-

тами натуральных измерений первоначальных напряжений: вертикальные равны давлению веса пород от дневной поверхности, горизонтальные как по простиранию, так и вкрест простирания рудного тела – 10 МПа [6].

Условие устойчивости трещины, пересекающей наклонный целик, боковые грани которого не нагружены никакими силами, может быть записано следующим образом:

$$\sigma_{oc} \sin \gamma \cos \gamma \leq \sigma_{oc} \cos^2 \gamma \operatorname{tg} \varphi' + C', \quad (20)$$

где  $\sigma_{oc}$  – напряжение, действующее по оси целика;  $\alpha$  и  $\beta$  – соответственно, угол падения трещины и угол наклона целика к горизонту (рис. 2);  $\varphi'$  и  $C'$  – угол трения по контакту и сцепление на контакте;  $\gamma$  – угол между стенкой целика и нормалью к плоскости нарушения (см. рис. 2).

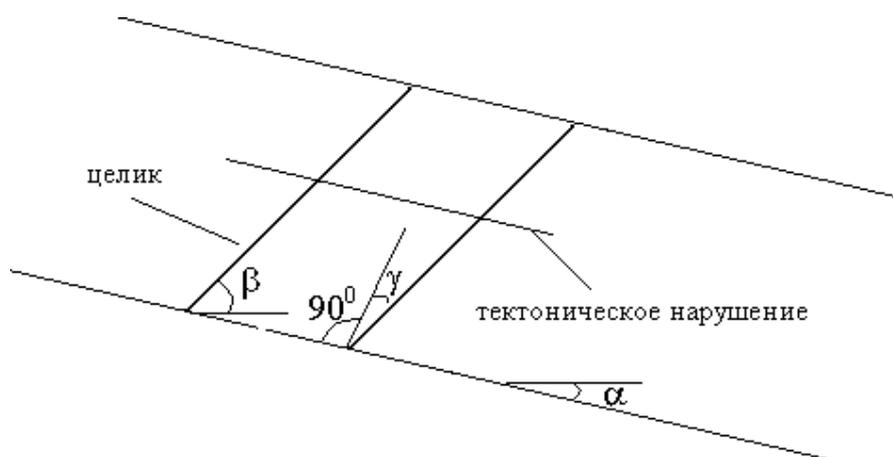


Рис. 2 – Расчетная схема устойчивости трещины в наклонном целике

Напряжение, действующее по оси целика, определяется его наклоном, величиной первоначальных напряжений и коэффициентом их концентрации, зависящим от отношения поддерживаемой площади к площади опоры:

$$\sigma_{oc} = \frac{a+b}{b} (\sigma_x \cos^2 \beta + \sigma_z \sin^2 \beta), \quad (21)$$

где  $a$  и  $b$  – соответственно, пролет камеры (12 м) и толщина целика (6 м);  $\sigma_x$  и  $\sigma_z$  – соответственно, первоначальные горизонтальные и вертикальные напряжения (для отметки +198 м  $\sigma_z = -5$  МПа,  $\sigma_x = 17$ ,  $\sigma_z = -8,5$  МПа).

Если в соотношении (20) пренебречь сцеплением по трещине, что вполне допустимо при моделировании зеркал скольжения, то можно получить довольно простое соотношение для определения устойчивости трещины в наклонном целике:

$$\operatorname{tg} \gamma \geq \operatorname{tg} \varphi'. \quad (22)$$

Таким образом, для обеспечения устойчивости тектонического нарушения отклонение оси целика от нормали к тектоническому нарушению не должно превышать угла трения по контакту. При угле трения по контакту 10 – 12° и падении тектонического нарушения под углом 30° угол наклона целика не должен быть меньше 70°.

Для оценки геомеханической ситуации, когда целик расчленен несколькими зеркалами скольжения, была решена плоская задача методом конечных элементов. Задача решалась в упругопластической постановке. Упругие и прочностные характеристики для вмещающих пород и трещин были приняты следующими: модули деформации массива и трещины, соответственно, равны  $E_m = 15000$  МПа,  $E_T = 2000$  МПа, коэффициент Пуассона  $\mu$  для всех элементов разреза был принят

равным 0,3, плотность среды  $\gamma = 2,8 \text{ т/м}^3$ , начальное раскрытие трещин 0,002 м, угол трения по контакту  $\varphi = 10^\circ$ . Первоначальное напряженное состояние массива задавалось таким же, как и при постановке объемной задачи. Размеры выработанного пространства совместно с наклонными целиками составили в нижней части 45 м, в верхней части 50 м, высота составила 30 м. Результаты расчетов приведены на рис. 3 в виде зон неупругого деформирования по зеркалам скольжения (выделены на рисунке жирными линиями).

Причиной перехода участков зеркал скольжения в неустойчивое состояние является воздействие горизонтальных напряжений: вблизи от контакта целик – камера напряженное состояние целика не является одноосным. При этом на участках зеркал скольжения, находящихся вблизи от этого контакта, под воздействием горизонтальных напряжений происходят подвижки массива по восстанию поверхности ослабления. Поскольку каждая из камер набирает свою высоту постепенно, эти подвижки захватывают и зеркала скольжения, расположенные в средней части рудного тела.

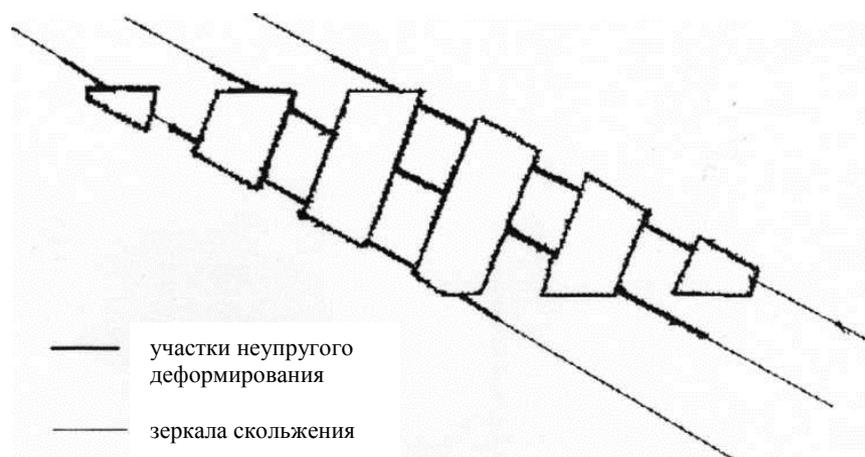


Рис. 3 – Расположение участков неупругого деформирования на зеркалах скольжения

Таким образом, с учетом вариации прочностных свойств и ориентировки зеркал скольжения наклон целиков под  $70^\circ$  к горизонту не может гарантировать их упругое деформирование при отработке нижних слоев. При отработке верхних слоев горные работы приблизились к Гологорскому карьеру, где соотношение между горизонтальными и вертикальными напряжениями уменьшается, и подвижки по тектоническим нарушениям должны прекратиться. Более того, даже на нижних слоях подвижки по тектоническим нарушениям происходят на локальных участках, а величина смещений не превышает 4 – 8 см.

#### Выводы

1. Закладка, применяемая на шахте «Магнетитовая», представляет собой мелкий щебень с низким коэффициентом неоднородности, и практически не оказывает влияния на несущую способность целиков.
2. Наклон целиков под углом, определяемым соотношениями (20) и (21), не может полностью гарантировать отсутствия смещений по тектоническим нарушениям.
3. Единственными технологически достижимыми способами, если не принимать во внимание увеличение толщины целиков, предотвращения деформаций по тектоническим нарушениям, являются использование ленточных целиков, крепление их приконтурной части и мероприятия по снижению влияния буровзрывных работ на несущую способность целиков.

## Литература

1. Шевляков Е.В. Совершенствование технологии отработки запасов Саткинского месторождения в пределах этажей +180/+260 м и +100/+180 м шахты «Магнезитовая» / Е.В. Шевляков, И.С. Шелковый // Инновационные геотехнологии при разработке рудных и нерудных месторождений: сборник трудов конференции / отв. за выпуск Н.Г. Валиев. – Екатеринбург: УГГУ, 2016. - С. 22 - 33.
2. Прочность и деформируемость горных пород / Ю.М. Карташов, Б.В. Матвеев, Г.М. Михеев, А.Б. Фадеев. – М.: Недра, 1979. – 269 с.
3. Зубков А.В. Геомеханика и геотехнология / А.В. Зубков. – Екатеринбург: УрО РАН, 2001. – 335 с.
4. Криницын Р.В. Повышение устойчивости кровли камер при отработке месторождений подземным способом / Р.В. Криницын, В.И. Полховский, С.В. Худяков // Проблемы недропользования. – 2018. - №1. - С. 22 - 28.
5. Аглюков Х.И. Перспективы подземной отработки охранного целика гологорского участка на Саткинском месторождении магнезита / Х.И. Аглюков // Добыча, обработка и применение природного камня: сборник / Г.Д. Першин, А.И. Косолапов, М.С. Уляков, Ю.А. Павлов, В.С. Федосихин. - Магнитогорск: Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, 2014. - С.113 - 120.
6. Худяков С.В. Обеспечение устойчивости кровли камер при отработке блока на шахте «Магнезитовая» / С.В. Худяков, Р.В. Криницын // Известия вузов. Горный журнал. – 2011. - № 2. - С.18 - 20.
7. Зотеев В.Г. Расчетный метод определения нормативных и прочностных показателей физико-механических свойств несвязных грунтов / В.Г. Зотеев, О.В. Зотеев, Е.О. Зотеева // Водное хозяйство России. – 2004. - № 5. - Том 6. – С. 519 - 547.
8. R.V.Krinityn «Designing support for narrow rib pillars with subvertical fractures» / R.V.Krinityn, S.V.Khudyakov // Eurasian mining. – 2017. - No. 2.- P. 16-19.