УДК 622.831

В.Л.ТРУШКО, А.Г.ПРОТОСЕНЯ
Санкт-Петербургский государственный горный институт (технический университет)
В.Ф.ПЛАЩИНСКИЙ
ООО «Металл-групп», филиал «Яковлевский рудник»

ОЦЕНКА УСТОЙЧИВОСТИ ОБНАЖЕНИЙ И РАСЧЕТ НАГРУЗОК НА КРЕПЬ ВЫРАБОТОК ЯКОВЛЕВСКОГО РУДНИКА

Обоснованы критерии для оценки устойчивости обнажений выработок Яковлевского рудника и зависимости для расчета вертикальных и горизонтальных нагрузок на их крепь в рыхлых рудах, основанные на теории свода. Предложены типы и параметры крепей выработок рудного массива.

The criterions of excavation stability are validated for Jacovlevskiy mine and relationships essential to estimate horizontal and vertical support loads in the condition of weak ore, which are based on the «theory of Arch», are found. Type and parameters of excavation supports are suggested.

Рудный массив представлен мощной толщей переслаивающихся разностей руд с прослойками железисто-слюдковых мартитовых, тонкополосчатых железисто-слюдковых кварцитов и жильного кварца мощностью от долей до нескольких метров. Залегание рудоносной толщи наклонное, почти крутое, протяженность рудного тела по трассе квершлагов 240-280 м и более. Массив расчленен на блоки несколькими крупными геологическими нарушениями. Физико-механические характеристики пород и руд рудно-кристаллического комплекса представлены в табл.1.

Из табл.1 следует, что свойства руд разного минералогического состава существенно отличаются. Хлорит-лимонит-мартитовые, гидрогематит-мартитовые, железно-слюдково-мартитовые руды более плотные и прочные. Пределы прочности при сжатии в среднем от 18,6 до 29,7 МПа, углы внутреннего трения 39-42 , сцепление от 4,7 до 9,2 МПа. Прочность железистых кварцитов выше. Низкими показателями характеризуются прочностные свойства железно-слюдково-мартитовых хлоритизированных и особенно рыхлых мартит-железно-слюдковых руд. Пределы прочности при сжатии последних составляют всего 0,62-1,7 МПа, сцепление 0,13-0,40 МПа, углы внутреннего трения от 22 до 36°.

Возможно и эти низкие показатели завышены. При отборе образцов самые слабые прослойки разрушаются и, соответственно, не испытываются. При проходке ортов гор.–425 м местами вскрыты прослойки рыхлых руд, представляющих собой слабосвязную, склонную к вывалам массу, требующую возведения крепи до груди забоя и даже опережающего крепления. Такие разности правомерно отнести к VIII категории «Землистые породы» по классификации Протодьяконова с коэффициентом крепости 0,6 и даже к IX категории «сыпучие породы» (коэффициент 0,5).

Все руды месторождения отличаются высокой пористостью. Средние значения пористости находятся в пределах 15,7-27,8 %, для рыхлых руд 21,4 %. По этому показателю можно предварительно прогнозировать характер дилатансионных процессов в рудах. В работе [4, с.11] указывается, что при пористости 7,4 % породы обладают отрицательной дилатансией (разрыхляются), при пористости более 18 % – уплотняются. Породы с пористостью от 7,4 до 18 % объем при сдвиге практически не изменяют. В нашем случае сдвиг и другие деформации вокруг выработок будут сопровождаться уп-

Таблица 1

Обобщенные показатели свойств пород и руд рудно-кристаллического комплекса

Наименование пород и руд	Удельный вес $\gamma \cdot 10^4$, Н/м^3	Объемная масса $\gamma_o \cdot 10^3$, кг/м^3	Пористость n, %	Угол внутреннего трения ρ, градус	Удельное сцепление С, МПа	$\sigma_{сж}$, МПа	$\sigma_р$, МПа	Модуль упругости $E, \cdot 10^{10}$ Па	Коэффициент Пуассона μ
Руда хлорит-лимонит-мартитовая, среднеблочная, плотная	3,25-4,70 3,77	2,73-3,53 3,13	3,08-24,90 15,70	41-43 42	2,30-17,00 9,22	10,23-41,76 29,77	1,83-8,42 5,99	1,64-2,50 2,07	0,27
Руда гидрогематит-мартитовая, тонкозернистая, крепкая	4,29-5,12 4,70	3,01-3,84 3,42	15,8-29,5 22,65	35-42 39	2,51-7,00 4,78	7,80-31,94 20,63	1,71-6,28 4,00	2,2-3,0 2,6	0,20-0,22 0,21
Руда мартит-железно-слюдковая, рыхлая	2,98-5,01 4,38	2,73-3,90 3,34	8,32-29,9 21,4	27-38 34	0,17-0,40 0,28	0,62-1,70 1,10	0,17-0,41 0,27	1,3	
Руда железно-слюдково-мартитовая, хлоритизированная	4,38-5,01 4,70	3,31-3,67 3,49	24,4-26,7 25,6	36-44 40	1,65-1,67 1,66	6,35-6,39 6,37	0,99-1,64 1,31	1,9-4,5 3,2	0,17-0,24 0,20
Руда железно-слюдково-мартитовая, карбонатизированная, плотная	4,47-4,90 4,68	3,15-3,63 3,38	25,9-29,4 27,8	42-43 42	3,51-7,20 5,32	15,81-23,53 18,66	2,54-4,82 3,48	3,10-3,92 3,52	0,25-0,30 0,27
Сланцы хлорит-серицитовые, железистые	3,20-4,21 3,72	2,88-3,12 3,00	10,0-28,5 23,0	34-42 37	5,20-11,70 9,17	19,9-50,20 37,27	5,34-11,16 8,71	2,80-2,95 2,90	0,15-0,30 0,22
Железистые кварциты мартит-железно-слюдковые	3,85-4,02 3,92	3,13-3,55 3,40	9,0-18,2 14,8	38-41 39,6	12,46-27,80 17,35	55,49-121,3 76,44	11,53-24,50 15,57	6,0-14,1 11,3	0,21-0,28 0,23

Примечание. В числителе значение показателя от минимального до максимального, в знаменателе – среднее.

лотнением руд. Это обстоятельство затрудняет образование эффективных сил отпора разрушенных пород по контуру свода естественного равновесия и, таким образом, может быть отнесено к числу неблагоприятных факторов, способствующих развитию зоны неупругих деформаций.

В настоящее время известно много критериев оценки устойчивости обнажений [1], предложенных различными авторами, всю совокупность которых можно разделить на два класса.

К первому классу относятся критерии, основанные на прочностном расчете устойчивости обнажений выработок, т.е. на оценке их прочности.

Ко второму классу относятся критерии, основанные на деформационном подходе, т.е. оценка устойчивости производится по величине предельных деформаций или перемещений контура выработок.

Смещения пород в выработках для рудных месторождений намного меньше их значений для пластовых месторождений, где они могут достигать десятки сантиметров.

В СНиП II-94-80 для оценки устойчивости горизонтальных выработок принят деформационный критерий, поскольку величина перемещений контура значительная. Прочностной критерий принят для оценки устойчивости вертикальных выработок.

Наибольшее распространение для оценки устойчивости обнажений выработок при разработке рудных месторождений получил прочностной критерий. По нашему мнению, это объясняется тем, что смещения пород в выработках относительно небольшие, а их устойчивость определяется прочностью, структурными особенностями и трещиноватостью массива пород.

Состояние статической устойчивости незакрепленной горной выработки будем

оценивать критерием напряженности элементов выработки (кровли и боков), выражающим соотношение в них величин расчетных напряжений (числитель) и расчетной прочности (знаменатель) [3, 6]:

$$П_в = \frac{\sigma K_1 K_2}{R K_c \xi_в}, \qquad (1)$$

где σ – статическое вертикальное напряжение в нетронутом массиве в месте расположения выработки, МПа; K_1 – коэффициент концентрации напряжений вследствие проведения выработки; K_2 – коэффициент изменения напряжений в результате влияния других выработок; R – среднее значение сопротивления пород в образце одноосному сжатию при кратковременном нагружении, МПа; K_c – коэффициент структурного ослабления массива за счет трещиноватости, слоистости и микронеоднородности; $\xi_в$ – коэффициент, учитывающий снижение сопротивления породы вследствие водонасыщения, равный отношению пределов прочности в водонасыщенном и естественном состояниях.

Статические вертикальное и горизонтальное напряжения в нетронутом рудном массиве Яковлевского месторождения, полученные в результате численных экспериментов, приведены в статье Д.А.Потемкина (см. настоящий сборник). Анализ расчетных данных показывает, что нетронутый рудный массив разгружен от вертикальных и горизонтальных напряжений.

Испытания мартитовых, железно-слюдково-мартитовых (рис.1) и гидрогематитовых слабых руд (рис.2) Яковлевского месторождения показывают, что в допредельной области зависимость между напряжениями и деформациями нелинейная.

Анализ экспериментальных данных деформирования пород в условиях объемных напряженных состояний показывает, что зависимость между наибольшим сдвигом и максимальным касательным напряжением также является нелинейной.

Решения физически нелинейных задач о распределении напряжений вокруг выработок различных форм поперечного сечения приведены в работе [5]. На основе этих решений получены оценки значений коэффициентов концентрации напряжений для горных выработок. Значения K_1 для выработок сводчатой формы поперечного сечения приведены в табл.2.

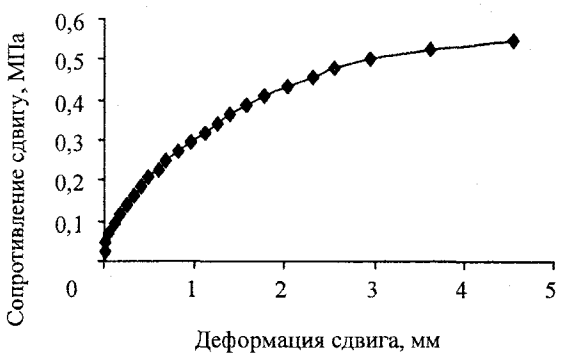


Рис.1. Характер изменения сопротивления сдвигу железно-слюдково-мартитовой руды



Рис.2. Экспериментальные зависимости между напряжениями и деформациями для гидрогематитовой руды

Таблица 2

Коэффициенты концентрации напряжений K_1 в боках и кровле выработок сводчатой формы поперечного сечения

Наименование пород и руд	Коэффициент концентрации напряжений	
	Бока	Кровля
Кварциты, сланцы	1,8	1,5
Руды гидрогематитовые	1,33	1,25
Руды рыхлые мартитовые	1,25	1,15
Руды рыхлые железно-слюдково-мартитовые	1,25	1,15

Таблица 3

Коэффициенты структурного ослабления руд и пород

Наименование руд и пород	$\sigma_{сж}$, МПа	Размер структурного блока, м	Величина коэффициента структурного ослабления	
			ВИОГЕМ	СНиП-II-94-80
Руда мартитовая, низкой прочности, рыхлая	0,7-2,7 / 1,02	–	–	–
Руда мартитовая, хлоритизированная, средней плотности	2,4-9,3 / 5,7	0,13	0,15	0,4
Руда мартитовая, карбонатизированная, плотная	8,6-39,0 / 20,1	0,13	0,15	0,4
Руда железно-слюдково-мартитовая, низкой прочности, рыхлая	0,5-2,8 / 1,2	–	–	–
Руда железно-слюдково-мартитовая, хлоритизированная, средней плотности	1,9-7,6 / 5,1	0,1	0,13	0,4
Руда железно-слюдково-мартитовая, карбонатизированная, плотная	6,5-31,4 / 16,7	0,2	0,22	0,4
Руда гидрогематит-мартитовая, глиноподобная, низкой прочности, рыхлая	1,4-2,6 / 2,1	0,1	0,1	0,4
Руда гидрогематит-мартитовая, глиноподобная, хлоритизированная, средней плотности	2,6-8,4 / 6,9	–	–	–
Руда гидрогематит-мартитовая, глиноподобная, карбонатизированная, плотная	7,3-43,6 / 19,4	–	–	–
Сланец хлорит-серицитовый	16,4-34,7 / 28,9	0,2	0,2	0,4
Кварциты железно-слюдково-мартитовые, массивные	53,2-96,3 / 67,8	0,42	0,3	0,4

Значения коэффициента K_2 концентрации напряжений от взаимного влияния параллельно расположенных выработок, найденные с учетом физической нелинейности и работы [2], приведены ниже:

Отношения расстояния между центрами выработок к приведенному диаметру выработки $2R_0$	1,25	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5
Коэффициент K_2	1,8	1,45	1,2	1,1	1,07	1,05

Для выработок некругового очертания значение R_0 определяется по формуле $R_0 = \sqrt{S/\pi}$, где S – площадь поперечного сечения выработки вчерне, м^2.

Натурные данные о структурных свойствах массивов пород в настоящее время недостаточны для надежного определения значения структурного ослабления K_c. Значения коэффициента K_c, предложенные ВИОГЕМ на основе размера структурного блока, приведены в табл.3.

Коэффициент структурного ослабления K_c предлагается определить в соответствии со СниП II-94-80 по данным количественного анализа нарушенности массива пород в местах проектируемого расположения выработки на основании данных инженерно-геологических изысканий по среднему расстоянию между поверхностями ослабления пород (табл.3).

Величину $П_в$ по формуле (1) следует определять раздельно для кровли и боков.

По величине критерия $П_в$ состояние устойчивости обнажений горных выработок разделяется на четыре критерия устойчивости:

Величина $П_в$, категория и состояние устойчивости пород	Модели деформирования массива
I категория – устойчивое состояние, $П_в < 1,0$	Допредельное линейное и нелинейное деформирование
II категория – предельное состояние, $П_в = 1,0$-$1,3$	Приконтурная зона массива переходит в предельное состояние

III категория – неустойчивое состояние, $П_в$ = 1,3-3,0	Вокруг выработки формируется зона предельного состояния
IV категория – весьма неустойчивое состояние, $П_в$ > 3,0	Около выработки формируется зона предельного состояния и свод обрушения

Для выявления характера деформирования рыхлых руд вокруг выработок выполнены специальные экспериментальные исследования. Результаты натурных наблюдений за состоянием обнажений кровли экспериментальной выработки в рыхлых рудах показывают, что контур обнажений имеет форму вертикального свода (рис.3). Поэтому для расчета нагрузок на крепь выработок в рыхлых рудах можно воспользоваться теорией свода.

Предельное состояние рыхлых руд руд в объемном напряженном состоянии согласно экспериментальным исследованиям описывается условием Кулона

$$\tau = C + \sigma_п \operatorname{tg}\rho, \qquad (2)$$

где C – сцепление рыхлой руды; τ – наибольшее касательное напряжение на площадке сдвига; $\sigma_п$ – нормальное напряжение на плоскости сдвига; ρ – угол внутреннего трения.

Высота свода обрушения над выработкой в рыхлых рудах естественной влажности согласно П.М.Цимбаревичу определяется по формуле

$$h_c = \frac{B}{2\operatorname{tg}\beta}, \qquad (3)$$

где B – ширина выработки; β – кажущийся угол внутреннего трения, связанный с углом внутреннего трения зависимостью

$$\frac{C}{\sigma_п} + \operatorname{tg}\rho = \operatorname{tg}\beta. \qquad (4)$$

Для определения угла β по формуле (4) используем экспериментальные данные по разрушению рыхлых руд (см. табл.1).

При одноосном сжатии разрушение руд происходит под углом 45°. Тогда предельное нормальное напряжение на площадке сдвига

$$\sigma_п = \sigma_{пр}\cos 45^\circ = 1{,}1\frac{\sqrt{2}}{2} = 0{,}77 \text{ МПа}.$$

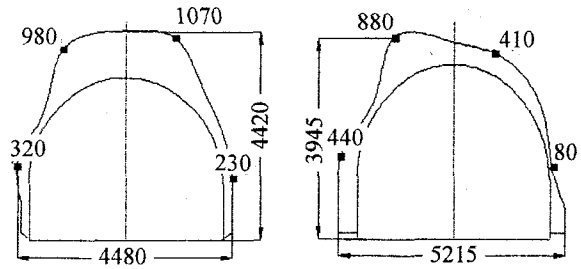


Рис.3. Очертания обнажений поверхности горных выработок

Величина tg кажущегося угла внутреннего трения

$$\operatorname{tg}\beta = \frac{C}{\sigma_п} + \operatorname{tg}\rho = \frac{0{,}28}{0{,}77} + \operatorname{tg}34^\circ = $$
$$= 0{,}36 + 0{,}67 = 1{,}03. \qquad (5)$$

При данном угле β соотношение между шириной выработки и высотой свода обрушения, найденное по формуле (3), будет равно

$$h = \frac{B}{2\cdot 1{,}03} = 0{,}48B. \qquad (6)$$

Для уточнения соотношения (6) используем натурные наблюдения за размером свода предельного состояния, полученные в экспериментальной выработке в рыхлых рудах на гор.–425 м Яковлевского рудника.

Натурные измерения геометрических параметров поперечных сечений в экспериментальной выработке подтверждают результаты расчета высоты свода по формуле (6).

В табл.4 приведены измеренные в натуре ширина свода выработки B, его высота h_c и их соотношение. Измерения проведены зондированием закрепного пространства выработки, закрепленного крепью КМП-А-3 сечением в свету 18,8 м^2, пролетом вчерне 5,1 м и высотой свода вчерне 1,84 м.

Из данных табл.4 следует, что

$$h_c = 0{,}42B.$$

Расхождение с расчетом не более 14,0 %.

Таким образом, имеет место согласие расчетных и натурных данных по определению размеров свода предельного состояния над горной выработкой.

Таблица 4

Натурные данные высоты свода обрушения

Порядковый номер арки от орта № 2	Ширина свода выработки в проходке $B_ф$, м	Высота свода h_c, м	Соотношение $h_c / B_ф$
2	6,50	2,70	0,42
4	6,54	2,88	0,43
6	6,78	2,43	0,42
8	6,04	2,46	0,41
10	6,21	2,95	0,47
22	6,29	2,69	0,43
24	6,38	2,80	0,44
26	6,88	2,88	0,42
28	6,38	2,41	0,38
Среднее значение			0,42

Для расчета примем среднюю высоту свода

$$h_c = 0{,}45B.$$

Наличие влаги приводит к снижению прочностных характеристик руд.

Для оценки характеристик сцепления и угла внутреннего трения для железно-слюдково-мартитовых и мартитовых руд во времени проф. Р.Э.Дашко были проведены их испытания при влажности от 10 до 16,5 %. Испытания до 0,5 месяца проведены на образцах, отобранных в выработках. Испытания через 1,5-2 и более месяцев проведены после хранения образцов и их водонасыщения. Испытания, проведенные в 2005 г. на образцах богатых рыхлых руд, отобранных из транспортного орта при влажности 11,4-13,6 %, показали, что величина сцепления C = 0,52-0,57 МПа, а угол внутреннего трения ρ = 8-9°.

Найдем величину tgβ кажущегося угла внутреннего трения для влажных рыхлых руд при C = 0,28 МПа и ρ = 6°. Расчет по приведенной методике показывает, что для указанных значений C и ρ величина tgβ = = 0,72. При данном угле β соотношение между шириной выработки и высотой свода обрушения, найденное по формуле (3), составляет $h_c = 0{,}69B$.

Расчет по приведенной методике для рыхлых руд с прочностными характеристиками C = 0,52 МПа, ρ = 8° и C = 0,38 МПа, ρ = 13° показывает, что соотношение между шириной и высотой свода обрушения составило, соответственно, $h_c = 0{,}65B$ и $h_c = 0{,}63B$.

Средняя величина для трех выполненных расчетов

$$h = 0{,}65B. \qquad (7)$$

На рис.4 приведены очертания и размеры свода обрушения во влагонасыщенных рыхлых рудах откаточного орта № 2 Яковлевского рудника.

Из анализа натурных данных следует, что соотношение между высотой свода обрушения и шириной выработки равно

$$h_c = 0{,}72B. \qquad (8)$$

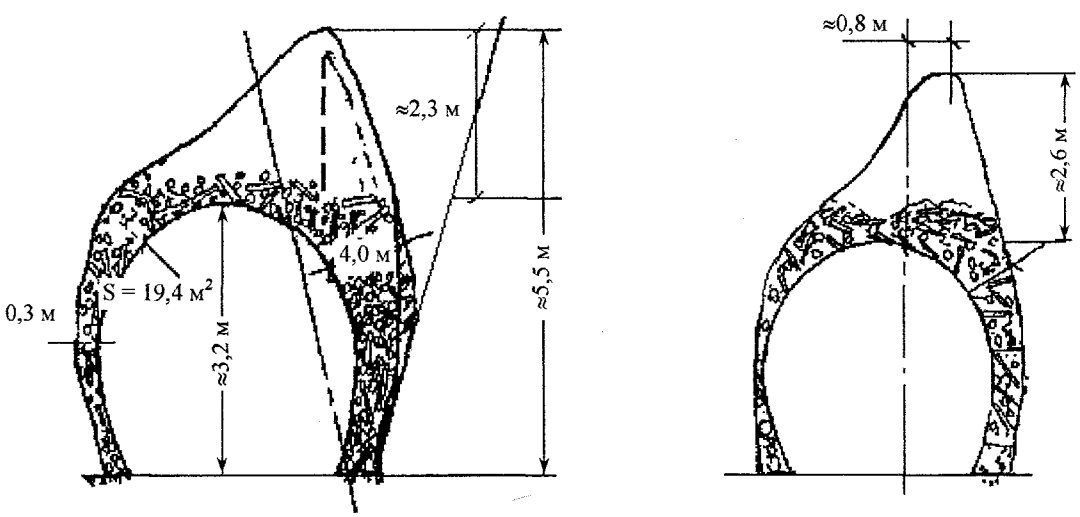


Рис.4. Очертания и размеры зон разрушения вокруг откаточного орта № 2 в рыхлых влагонасыщенных рудах Яковлевского рудника

В качестве расчетного размера свода обрушения над выработкой во водонасыщенных рыхлых рудах примем среднее значение между величинами (7) и (8)

$$h_c = 0{,}68B. \qquad (9)$$

На основании изложенного высоту свода обрушения h_c (рис.5) над горной выработкой сводчатой и трапециевидной формы поперечного сечения в рыхлых рудах находим по формуле

$$h_c = nB, \qquad (10)$$

где B – ширина выработки вчерне на уровне кровли, м; n – показатель, характеризующий прочность руды и высоту обрушения, $n = 0{,}45$ – для руд естественной влажности, $n = 0{,}68$ – для водонасыщенного рудного массива.

Величину вертикальной равномерно распределенной нагрузки на поддерживающую крепь горных выработок находим по формуле

$$P_в = \frac{2}{3}\gamma h_c, \qquad (11)$$

где γ – объемная масса руды, кН/м^3.

Величина горизонтальной равномерно распределенной нагрузки на поддерживающую крепь

$$P_2 = \gamma(h_c + 0{,}5h)\mathrm{tg}^2(45 - \beta/2). \qquad (12)$$

В рудах средней плотности и плотных породах вокруг выработки может формироваться область предельного состояния, имеющая форму эллипса [5],

$$\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{в^2} = 1, \qquad (13)$$

и полуосями $a = C_0 + C_1$; $в = C_0 - C_1$.

Значения неизвестных [5]:

$$C_0 = \left[\frac{0{,}5(\sigma_y + \sigma_x) + CK_c\xi_в \operatorname{ctg}\rho}{CK_c\xi_в \operatorname{ctg}\rho + P}(1 - \sin\rho)\right]^{1/\alpha};$$

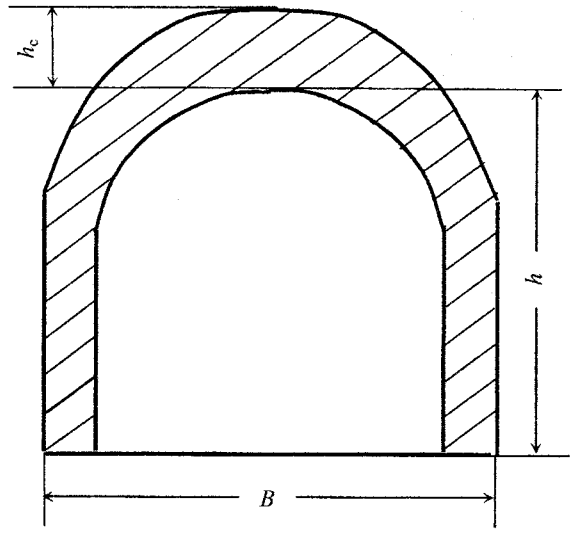


Рис.5. Схема формирования зоны разрушения пород вокруг выработки в рыхлых породах

$$C_1 = \left[\frac{(\sigma_y - \sigma_x) + C_0^{1/\alpha}}{\alpha(K + CK_c\xi_в \operatorname{ctg}\rho)}\right];$$

$$\alpha = \frac{2\sin\rho}{1 - \sin\rho}, \qquad (14)$$

где σ_y, σ_x – вертикальное и горизонтальное напряжения в нетронутом массиве в центре будущей выработки до момента ее сооружения.

Решение (13) справедливо, если область предельного состояния захватывает контур выработки, для этого необходимо выполнение условия

$$C_0 - C_1 \geq 1.$$

Средняя величина области предельного состояния вокруг выработки, отсчитываемая от ее контура в метрах, может быть оценена по формуле

$$R_L = R_0(C_0 - 1). \qquad (15)$$

На основании предложенной выше методики для крепления выработок в рудном массиве разработаны типы и параметры крепей (табл.5).

Таблица 5

Типы и параметры крепи подготовительных выработок в рудном массиве

Величина $П_в$, категория и состояние устойчивости пород	Типы и параметры постоянной крепи
I категория – устойчивое состояние, $П_в < 1,0$	1. Постоянная крепь не требуется. Регулярные осмотры состояния выработок с оборкой контура в местах заколообразований.
	2. На участках вероятного заколообразования – анкерная крепь по кровле из анкеров Swellex длиной 1,8 м с опорными плитками и металлической сеткой-затяжкой по кровле. Сетка анкерования от 0,9 × 0,9 до 1,1 × 1,1 м.
II категория – предельное состояние, $П_в = 1,0$-$1,3$	1. Анкерная крепь с металлической сеткой-затяжкой по кровле и бокам выработки. Анкера типа Swellex длиной 1,8 м. Сетка анкерования от 0,7 × 0,7 до 1,0 × 1,0 м. Расстояние от нижнего ряда анкеров до почвы выработки до 1,2 м.
	2. Металлическая арочная податливая крепь типа КМП-А3 из спецпрофиля СВП с металлической решеткой-затяжкой и забутовкой закрепного пространства. Шаг арок 1,0 м.
	3. Металлическая рамная трапециевидная крепь из СВП с затяжкой из арматурной сетки из арматуры А-II, А-III ∅ 10÷12 мм. Шаг рам 0,75 м.
III категория – неустойчивое состояние, $П_в = 1,3$-$3,0$	1. Металлическая арочная податливая крепь типа КМП-А3 из СВП-22 и СВП-27 с металлической решетчатой затяжкой кровли и боков. Забутовка закрепного пространства. Шаг арок от 0,75 до 1,0 м.
	2. Металлическая трапециевидная рамная крепь из СВП-22, СВП-27 с затяжкой кровли и боков выработки. Шаг рам 0,5-1,0 м.
	3. Комбинированная анкерная крепь с подхватами и с металлической сеткой-затяжкой по кровле и бокам выработки. Анкера типа Swellex длиной 1,8 м. Сетка анкерования от 0,7 × 0,7 до 0,8 × 0,8 м. Расстояние от нижнего ряда анкеров до почвы выработки до 1,0 м.
IV категория – весьма неустойчивое состояние, $П_в > 3,0$	1. Металлическая арочная крепь со сварной металлической решетчатой затяжкой и забутовкой закрепного пространства. Применение предохранительной крепи. Расстояние между арками 0,5-0,75 м. Элементы крепи из СВП-22, СВП-27 с опорными площадками под стойки. Межрамные стяжки (стойки, верхняк).
	2. Металлическая трапециевидная крепь из СВП-22, СВП-27 со сварной металлической решетчатой затяжкой и забутовкой закрепного пространства. Предохранительная крепь. Шаг рам 0,5 м. Опорные площадки под стойки, 3-4 межрамные стяжки.
	3. В зонах тектонических нарушений, в зонах контакта рыхлых и плотных руд и в зонах значительного водопритока металлическая арочная крепь (см. п.1) с применением передовой крепи.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Булычев Н.С.* Расчет крепи капитальных горных выработок / Н.С.Булычев, Б.З.Амусин, А.Г.Оловянный. М.: Недра, 1974.

2. *Вайнберг Д.В.* Концентрация напряжений в пластинах около отверстий и выкружек. Киев: Техника, 1969.

3. Инструкция по креплению подготовительных горных выработок в руде на шахтах Североуральского бокситового бассейна / СПГГИ. СПб, 1993.

4. *Ставрогин А.Н.* Механика деформирования и разрушения горных пород / А.Н.Ставрогин, А.Г.Протосеня. М.: Недра, 1992.

5. *Ставрогин А.Н.* Пластичность горных пород / А.Н.Ставрогин, А.Г.Протосеня. М.: Недра, 1979.

6. *Трушко В.Л.* Геомеханика массивов и динамика выработок глубоких рудников / В.Л.Трушко, А.Г.Протосеня, П.Ф.Матвеев, Х.М.Совмен. СПб: Наука, 2000.