

УДК 622.1:622.271

ОЖИГИНА С.Б.

Методика оценки устойчивости карьерных откосов с учетом погрешности определения прочностных свойств массива

Надежность конечных результатов при решении задач устойчивости карьерных откосов зависит от достоверности исходных данных, используемых в расчетах. Такими исходными данными являются, прежде всего, физико-механические характеристики пород, слагающих прибортовые массивы карьеров, и прочностные характеристики поверхностей ослабления.

Прочностные (механические) свойства горных пород определяются посредством лабораторных испытаний образцов на временное сопротивление одноосному сжатию и растяжению, на предел прочности на срез.

Статистическая обработка результатов лабораторных испытаний горных пород на прочностные свойства производится по ГОСТ 20522 – 96, который не позволяет оценить степень надежности получаемых результатов, так как не учитывает коррелированности прочностных характеристик горных пород (k и $tg\rho$) [1].

Расчету устойчивости карьерных откосов предшествует обоснование расчетных прочностных характеристик горных пород, слагающих прибортовой массив. Учитывая вероятностный характер информации о свойствах горного массива, предлагается статистико-вероятностная методика обоснования расчетных прочностных характеристик пород.

Прочностные характеристики (угол внутреннего трения ρ и сцепление k) определяются на основании регрессионного анализа данных лабораторных (натур-

ных) испытаний на срез. Данная методика позволяет построить как паспорт прочности $\tau = f(P)$, так и доверительные границы для неизвестной истинной зависимости при доверительной вероятности $\alpha = 0,95$.

Ниже приведены результаты обработки данных лабораторных испытаний туфов андезит-базальтовых пород месторождения Нурказган.

В табл. 1 представлены результаты для 16 пар испытаний на срез, в табл. 2 – для 30 пар испытаний.

На рисунке 1 показан график $\tau = f(P)$ регрессионного анализа для туфов андезит-базальтовых пород при количестве испытаний на срез – 30 пар.

Углы внутреннего трения пород в образце и массиве для одного и того же типа пород отличаются не существенно, поэтому их значения можно принять равными: $\rho_{обр} \approx \rho_{мас}$.

Сцепление же пород, полученное по лабораторным испытаниям, может быть в десятки раз больше, чем для той же породы в массиве. Согласно исследованиям ВНИМИ, эти величины связаны между собой коэффициентом структурного ослабления λ_0 , который может быть определен по формуле

$$\lambda_0 = \frac{1}{1 + a \cdot \ln H/l}, \quad (1)$$

где a – коэффициент, зависящий от прочности породы в монолитном образце и характера трещиноватости;
 H/l – отношение глубины залегания пород к среднему размеру элементарных блоков.

Таблица 1 – Результаты для 16 пар испытаний на срез

№ испытания	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
θ , град	25	25	25	35	35	35	35	45	45	45	45
P , МПа	9,21	14,93	11,11	25,18	34,34	31,14	34,65	42,53	29,79	34,50	52,72
τ , МПа	19,75	32,01	23,83	35,96	49,04	44,47	49,48	42,53	29,79	34,50	52,72
№ испытания	12	13	14	15	16						
θ , град	45	45	45	35	25						
P , МПа	29,79	35,21	34,02	21,06	8,02						
τ , МПа	29,79	35,21	34,02	30,56	17,02						

Таблица 2 – Результаты для 30 пар испытаний на срез

№ испытания	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
θ , град	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	35
P , МПа	5,31	6,83	7,79	8,67	8,71	8,78	9,21	9,95	11,11	14,93	18,53
τ , МПа	11,39	14,65	16,71	18,59	18,67	18,83	19,75	21,33	23,83	32,01	26,46
№ испытания	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22
θ , град	35	35	35	35	35	45	35	35	35	45	35
P , МПа	18,82	20,39	25,18	25,27	26,70	29,79	31,14	32,68	34,34	34,50	34,65
τ , МПа	26,88	29,12	35,96	36,09	38,14	29,79	44,47	46,66	49,04	34,50	49,48
№ испытания	23	24	25	26	27	28	29	30			
θ , град	45	45	45	45	45	45	45	45			
P , МПа	42,53	47,42	48,59	49,01	52,15	52,72	54,27	62,72			
τ , МПа	42,53	47,42	48,59	49,01	52,15	52,72	54,27	62,72			

Для нашего примера $\lambda_0 = 0,04127$. Поэтому расчетное сцепление горных пород в массиве по методике ВНИМИ, при использовании коэффициента структурного ослабления, вычисляется по формуле

$$k_M = k_{обр} \cdot \lambda_0. \quad (2)$$

Это равнозначно переносу регрессионной кривой вниз на соответствующую величину. График такой зависимости показан на рис. 2 (для 30 пар значений срезов).

Уравнение предельного равновесия для массива с учетом коэффициента структурного ослабления λ_0 примет вид

$$\bar{\tau}_{yo} = \bar{P} \cdot tg \rho + k \cdot \lambda_0, \quad (3)$$

а его погрешность определится как

$$\sigma_{\bar{\tau}_{yo}}^2 = \bar{P}^2 \sigma_{tg\rho}^2 + \lambda_0^2 \sigma_k^2 + 2\bar{P} \cdot r_{k, tg\rho} \cdot \lambda_0, \quad (4)$$

где $\bar{\tau}_{yo}$ – среднее удерживающее напряжение, действующее по поверхности скольжения в откосе, приведенном в предельное состояние;

\bar{P} – среднее нормальное давление;

k и $tg\rho$ – прочностные характеристики прибортового массива;

λ_0 – коэффициент структурного ослабления;

σ_k и $\sigma_{tg\rho}$ – погрешности определения сцепления и угла внутреннего трения;

$r_{k, tg\rho}$ – корреляционный момент для значений k , $tg\rho$.

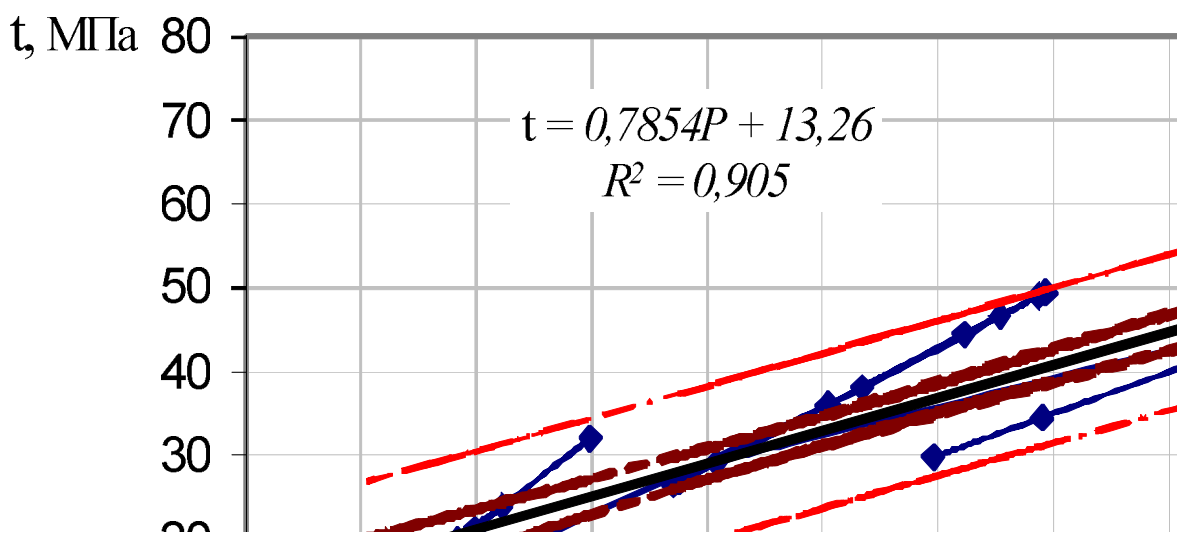


Рисунок 1 – График регрессионного анализа для туфов андезит-базальтовых пород месторождения Нурказган

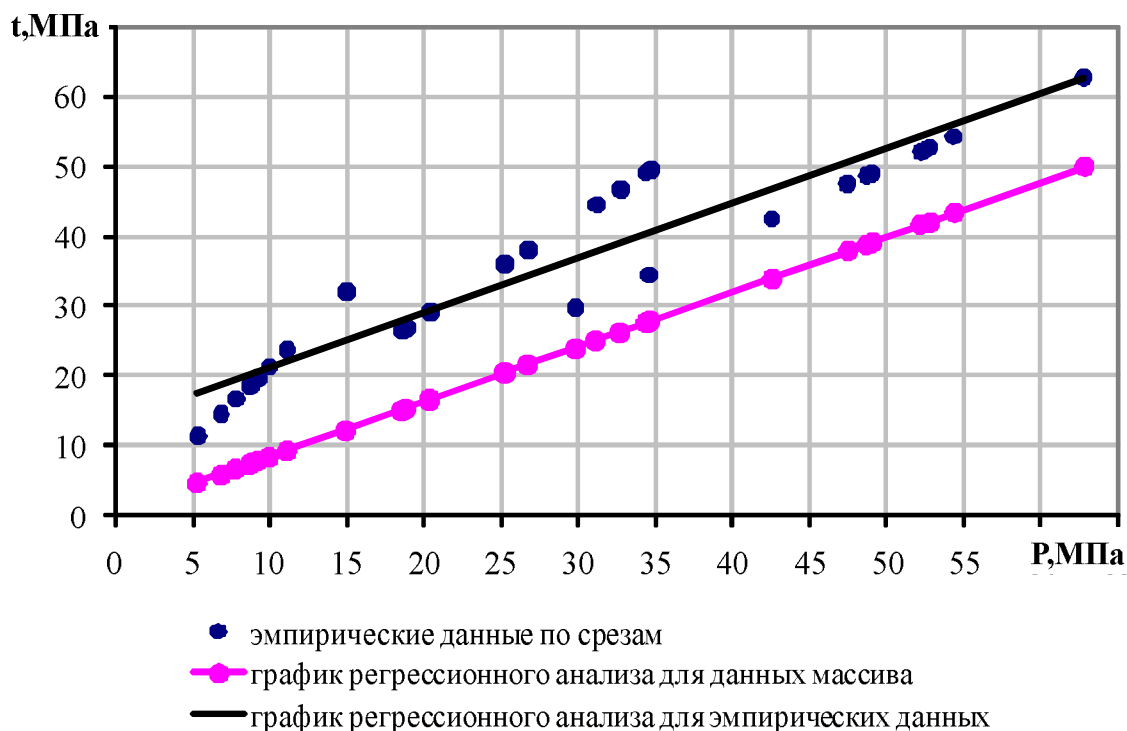


Рисунок 2 – Графики регрессионного анализа для массива и эмпирических данных

Среднее нормальное давление в блоке может быть определено из выражения

$$\bar{\tau}_{yo} = \frac{\sum \tau_{yoi}}{N} = \frac{\sum (P_i \cdot \operatorname{tg} \rho + k)}{N} = \bar{P} \cdot \operatorname{tg} \rho + k,$$

откуда $\bar{P} = \frac{\bar{\tau}_{yo} - k}{\operatorname{tg} \rho}$.

Для нахождения расчетных прочностных характеристик горных пород, согласно исследованиям ВНИМИ, в найденные их значения в массиве вводится коэффициент запаса n_3 , равный 1,3.

$$k_{расч.} = \frac{k_m}{n_3}; \quad \rho_{расч.} = \operatorname{arctg} \left(\frac{\operatorname{tg} \rho_m}{n_3} \right). \quad (5)$$

Для нашего случая эти значения будут равны

$$k_{расч.} = 0,4208 \text{ МПа}, \quad \rho_{расч.} = 31,14^\circ, \quad \gamma = 2,74.$$

При нормативных значениях

$$k_n = 0,547 \text{ МПа}, \quad \rho_n = 38,15^\circ, \quad \gamma = 2,74.$$

Значение вводимого в расчеты коэффициента запаса $n = 1,3$ носит эмпирический характер и не имеет строгого научного обоснования.

Предлагаемая методика, основанная на статистико-вероятностной обработке результатов исследований прочностных характеристик горных пород, позволяет судить о надежности полученных результатов расчета.

На рисунке 3 приведены совмещенные результаты расчетов по определению параметров прочности при количестве испытаний $N=16$ и $N=30$.

Анализ показывает, что ширина доверительных интервалов зависит от степени надежности получаемых результатов и, в том числе, от количества испытаний.

При оценке устойчивости реального борта карьера с применением численно-аналитического способа проф. П.С. Шпакова коэффициент запаса устойчивости определяется по следующему алгоритму [2]:

1) Расчетный откос приводится в предельное состояние методом последовательных приближений путем пропорционального изменения прочностных характеристик до предельных значений, т. е.

$$\frac{\operatorname{tg} \rho \sum p_i \cos \delta_i + \frac{k}{n} \sum l_i}{\sum p_i \sin \delta_i} = 1, \quad (6)$$

где k и $\operatorname{tg} \rho$ – прочностные характеристики прибортового массива;

p_i – вес i -го блока, Н;

n – коэффициент запаса устойчивости.

Перенос коэффициента n в формуле (6) в правую часть допустим только при достижении тождества, когда реальный откос с приведенными прочностными характеристиками достигает предельного состояния, так как изменение k и $\operatorname{tg} \rho$ влечет за собой и изменение местоположения поверхности скольжения, в связи с чем величины, стоящие под знаками суммирования в формуле (6), изменяются при каждой итерации.

2) Используя уравнение (6), определяем численное значение коэффициента запаса устойчивости как отношение фактических прочностных характеристик к расчетным значениям;

$$n = \frac{\operatorname{tg} \rho}{\operatorname{tg} \rho_{расч.}} = \frac{k}{k_{расч.}}. \quad (7)$$

Как видно из формулы (7), она принципиально отличается от определения коэффициента запаса как отношения удерживающих сил к сдвигающим силам, действующим в реальном откосе, хотя для приведенной к предельному состоянию схемы такая трактовка остается справедливой. Фактически в формуле (6) числитель представляет собой сумму удерживающих, а знаменатель – сумму сдвигающих сил, действующих по некоторой условной поверхности скольжения. Знаменатель уравнения (6) зависит только от конфигурации и параметров откоса, а числитель является функцией характеристик k и $\operatorname{tg} \rho$.

Решим задачу определения погрешности коэффициента запаса устойчивости как функции двух случайных взаимозависимых аргументов k и $\operatorname{tg} \rho$, так как их значения определяются опытным путем и содержат в себе погрешности. Уравнение (6) запишем в виде

$$\frac{\operatorname{tg} \rho \sum p_i \cos \delta_i + \frac{k}{n} \sum l_i}{\sum p_i \sin \delta_i} = \frac{\bar{\tau}_{yo} \cdot L}{\bar{\tau}_{cдв.} \cdot L} = \frac{\bar{\tau}_{yo}}{\bar{\tau}_{cдв.}} = 1$$

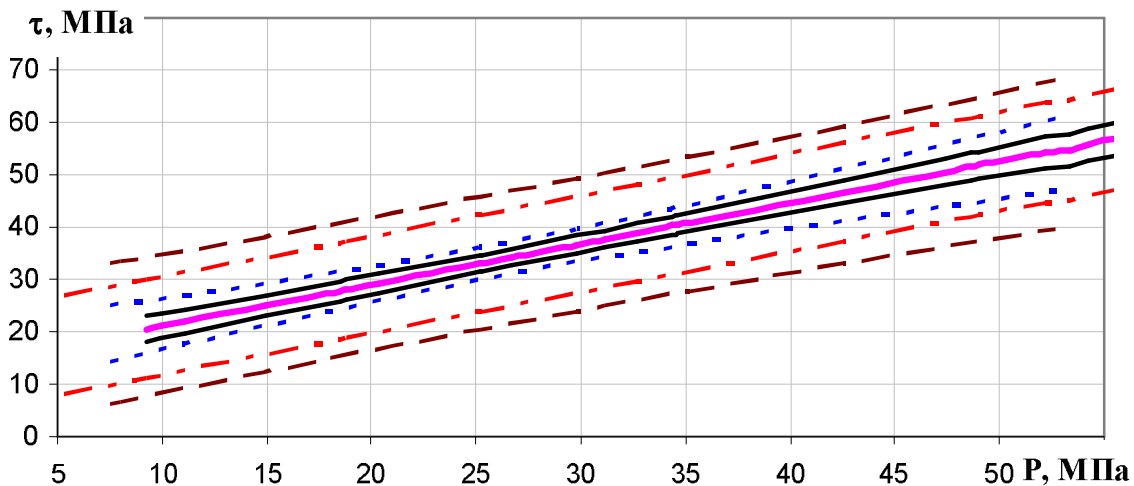


Рисунок 3 – Совмещенные результаты прочностных свойств пород при количестве испытаний $N=16$ и $N=30$

или в предельном случае,

$$n = \frac{\bar{\tau}_{yo}}{\bar{\tau}_{cde}} = \frac{\bar{P} \cdot tg \rho + k}{\bar{\tau}_{cde}} = 1. \quad (8)$$

Погрешность (дисперсия) коэффициента запаса устойчивости

$$\sigma_n^2 = \left(\frac{1}{\bar{\tau}_{cde}} \right)^2 \sigma_{\tau_{yo}}^2 = A^2 \sigma_{\tau_{yo}}^2, \quad (9)$$

где A – коэффициент, зависящий от геометрии откоса, величина постоянная для конкретного рассматриваемого откоса;

$\bar{\tau}_{cde}$ – среднее сдвигающее напряжение, действующее по поверхности скольжения в откосе, приведенном в предельное состояние;

$\bar{\tau}_{yo}$ – среднее удерживающее напряжение, действующее по поверхности скольжения в откосе, приведенном в предельное состояние.

Входящая в формулу (9) погрешность $\sigma_{\tau_{yo}}^2$ определяется из результатов испытаний прочностных свойств пород по формуле (4). Два других элемента A или $\bar{\tau}_{cde}$ можно определить из расчета предельной схемы численно-аналитическим способом [3];

3) Зная погрешность σ_n^2 , определив коэффициент Стьюдента t_{p_0} при заданной доверительной вероятности $\alpha = 0,95$ и заданном количестве испытаний, определяем доверительные границы, которые с заданной доверительной вероятностью содержат истинный коэффициент запаса устойчивости

$$\tilde{n} - t_{p_0} \sigma_n < n < \tilde{n} + t_{p_0} \sigma_n. \quad (10)$$

Если нижняя граница доверительного интервала окажется меньше единицы, то откос будет находиться в неустойчивом состоянии. Устойчивому состоянию откоса будет соответствовать нижняя граница доверительного интервала, равная единице

$$\tilde{n} - t_{p_0} \sigma_n = 1. \quad (11)$$

Произведем оценку реального борта карьера «Нурказган» при приведенных выше прочностных характеристиках и заданной высоте борта карьера $H = 600$ м.

Расчет выполнен по усовершенствованной методике проф. П.С. Шпакова. Расчет по этой методике позволяет определить не только численное значение коэффициента запаса устойчивости, но также и вычислить значения, входящие в формулы (4), (9), (10). По приведенному алгоритму составлена программа. Результаты оценки устойчивости борта карьера «Нурказган» при количестве испытаний горных пород на срез $N = 16$ и $N = 30$ приведены в таблице 3.

Расчетные данные для предельного откоса, т.е. значения, соответствующие нижней границе коэффициента запаса устойчивости $\tilde{n} - t_{p_0} \sigma_n = 1$ при $p = 0,95$, сведены в табл. 4.

Учитывая то, что для всех приведенных расчетов нижняя граница коэффициента запаса устойчивости равна единице, т.е. $n - t_{p_0} \sigma_n = 1$, то

$$n = 1 + t_{p_0} \sigma_n. \quad (12)$$

Это значит, что величину n , вычисленную по формуле (12), можно принимать как необходимый коэффициент запаса устойчивости, который в зависимости от принимаемого уровня риска r компенсирует ошибку исходных данных. Значение t_{p_0} определяется по количеству испытаний и доверительной вероятности (уровню риска).

На основании проведенных исследований можно заключить: коэффициент запаса устойчивости должен определяться, исходя из надежности определения прочностных свойств массива, учитывающей вероятностный характер закона распределения и коррелируемость этих показателей. Предельное значение коэффициента запаса устойчивости борта карьера должно соответствовать нижней границе доверительного интервала, определенного при заданной вероятности и заданном количестве испытаний прочностных свойств [4].

Таблица 3 – Результаты оценки реального борта карьера «Нурказган»

Предельный угол откоса α , градус	КЗУ (\tilde{n}) при норм. значениях прочн. характеристик ($N = 16$)	$\tilde{n} - t_{p_0} \sigma_n = 1$.	Предельный угол откоса α , градус	КЗУ (\tilde{n}) при норм. значениях прочн. характеристик ($N = 30$)	$\tilde{n} - t_{p_0} \sigma_n = 1$.	Предельный угол откоса α , градус	По ВНИМИ
43,65	1,3	1,128	43,65	1,3	1,23	43,65	1
48,1	1,176	1	50	1,128	1,055	47	0,927
48,6	1,163	0,989	52	1,081	1,007	53	0,814
49	1,153	0,978	52,3	1,074	1		
50	1,128	0,954	52,5	1,069	0,995		
53	1,058	0,882	53	1,058	0,984		

Таблица 4 – Расчетные данные для предельного откоса

Предельный угол откоса α , градус	КЗУ (\tilde{n}) при нормативных значениях прочностных характеристик	$\tilde{n} - t_{p_0} \sigma_n = 1$.	Методика
43,65	1,3	1	По ВНИМИ
48,1	1,176	1	Предлагаемая при N=16
52,3	1,074	1	Предлагаемая при N=30

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Долгоносов В.Н., Ожигина С.Б., Шпакова А.П. Методика определения расчетных значений прочностных характеристик горных пород с учетом их коррелированности // Мат. Второй Междунар. науч.-практ. конф. «Современное состояние и перспективы развития горно-добывающих отраслей промышленности». Рудный, 2004. С. 42-43.
2. Шпаков П.С., Поклад Г.Г., Омаров С.Т. Основы вероятностного способа решения задач устойчивости откосов уступов и бортов карьеров // Мат. Междунар. симп. Освоение месторождений минеральных ресурсов и подземное строительство в сложных гидрогеологических условиях. Белгород, 1991. Т. 2. С. 148-156.
3. Шпаков П.С. Маркшейдерское обоснование геомеханических моделей и разработка численно-аналитических способов расчёта устойчивости карьерных откосов: Автореф. дис... д-ра техн. наук. М., 1988. 40 с.
4. Ожигина С.Б. Совершенствование способа оценки устойчивости бортов карьеров // Тр. Междунар. науч.-практ. конф. «Актуальные проблемы горно-металлургического комплекса Казахстана». Караганда, 2005. С. 97-99.

УДК 622.278

ТПЛЕУХАН И.

ИСАБЕК Т.К.

БЕССОНОВ В.В.

СУДАРИКОВ А.Е.

НУРМАГАМБЕТОВА А.С.

Способы снижения разубоживания руды

Одним из актуальных вопросов при разработке крутопадающих жильных месторождений является разубоживание руды. В работе [1] выделены два вида разубоживания руды:

1) разубоживание от засорения руды вмещающей породой;

2) разубоживание от потерь руды с повышенным содержанием металла по сравнению со средним по очистному блоку.

При разработке сближенных рудных тел разного качественного содержания возникает еще один вид разубоживания – разубоживание от засорения рудой другого качественного состава или с меньшим содержанием руды.

Причинами первого вида разубоживания могут быть: неточная отбойка руды по контактам залежи; отслаивание пород с кровли и боков; подработка боковых пород при выемке тонких жил для обеспечения очистного пространства.

Разубоживание второго вида вызвано потерями: при доставке, транспортировании и в закладке обогащенной рудной мелочи; при оставлении целиков из сравнительно богатой руды по сравнению с соседними участками.

Какую бы природу не имело разубоживание руды, оно приводит к увеличению затрат на добычу и переработку рудной массы. В связи с этим существует необходимость снижения разубоживания руды. Мероприятия по снижению разубоживания руды должны быть предусмотрены на этапе проектирования: при выборе технологической схемы, способа отбойки руды и установлении продолжительности отработки блока и т.д.

При выборе способа отбойки руды следует учитывать, что применение шпуровой отбойки позволяет произвести наиболее полную выемку руды у контактов залежи и снизить разубоживание вмещающими породами за счет меньшего сейсмического эффекта.

Для снижения разубоживания при отработке сближенных рудных тел различного качественного содер-

жания следует применять селективную выемку. Так, при отработке сближенных марганцевых и железных руд на руднике Ушкатын-3 АО «Жайремский ГОК» была предложена следующая технологическая схема [2]. Очистной блок имеет следующие параметры:

ширина блока – 50 м;

высота блока – 48 м;

мощность обрабатываемой железомарганцевой руды – 2 м;

мощность железной руды – 4 м;

угол залегания рудных тел – 85 – 90°.

Отработку блока разделили на две стадии. В первую очередь предусматривается отработка железомарганцевых руд системой с магазинированием руды. Во вторую очередь, после полного выпуска отбитой руды, обрабатываются запасы железных руд, представленных в среднем мощностью 4 м, с отбойкой руды глубокими скважинами. В последнюю очередь производится отработка временных межблоковых целиков, междуэтажных целиков и запасов днища блока, и тем самым производится обрушение налегающих пород.

При I стадии отработки железомарганцевых руд нарезные выработки включают проведение разрезного орта по простиранию рудного тела и блоковых восстающих, из которых через 5 м по вертикали нарезаются короткие сбойки для сообщения с магазинами и проветривания очистных забоев (рисунок 1).

Очистные работы ведут в восходящем порядке полтокуступным забоем со шпуровой отбойкой и высотой забоя 1,4-1,8 м. Очистная выемка включает в себя обуривание с поверхности магазинированной руды горизонтальных или восходящих шпуров и их взрывание. По мере отбойки производят частичный выпуск руды, оставляя под кровлей свободное пространство высотой около 2,0 м. При необходимости всячий бок обнажения крепится металлопластиковыми штангами. Железомарганцевые рудные тела, расположенные в пределах блока, вовлекаются в отработку одновременно. Перед началом второй стадии отработки производится полный выпуск замагазинированной руды.