

УДК 622.28, 622.831

А.А. Неверов

ПРОГНОЗНАЯ ОЦЕНКА УСТОЙЧИВОСТИ БОРТОВ КАРЬЕРА «ЧЕРНОРЕЧЕНСКИЙ» НА КОНЕЧНОЙ СТАДИИ РАЗРАБОТКИ

Введение¹

Большинство действующих в настоящее время карьеров спроектированы, как правило, со значительным запасом прочности конструктивных элементов, и поэтому увеличение объемов добычи влечет за собой существенный рост вскрышных работ, за счет разноски бортов при действующих нормативных значениях их среднего угла наклона. Альтернативным вариантом при этом может служить увеличение углов наклона бортов карьера в конечном положении.

С подобной проблемой столкнулись на Чернореченском месторождении цементного сырья (г.

Метод исследования и краевые условия задачи

Существующие методы оценки устойчивости откосов уступов и бортов карьеров основываются преимущественно на положениях механики грунтов и в свое время были разработаны, главным образом, для относительно неглубоких разработок, представленных рыхлыми или непрочными массивами осадочных пород. Применение данных методов к скальным высокомодульным массивам приводит к завышенному запасу устойчивости при геомеханической оценке элементов карьерной выемки (бортов и уступов). Последнее обусловле-



Рис.1. План карьера известняков и расположение расчетных сечений I–V

Искитим, Новосибирская область), где повышение производительности карьера, изменение границ и порядка отработки потребовали научного обоснования устойчивости бортов при увеличении результирующего угла их наклона до 60° .

В геологическом строении месторождения принимают участие палеозойские образования и перекрывающие их неогеновые и четвертичные отложения. Основными полезными ископаемыми являются известняки и глинистые сланцы. По минералогическому составу они практически однородны. Параметры карьера и принятые к исследованию сечения I–V приведены на рис.1.

но тем, что в расчетах не учитываются особенности этих массивов – высокие упругие, прочностные свойства и напряженное состояние.

Вместе с тем, огромный опыт ведения открытых работ в скальных массивах показывает, что устойчивость откосов, достигающих по высоте первых сотен метров, сохраняется в течение многих лет даже при очень крутых углах вплоть до вертикальных.

В мировой практике имеются многочисленные примеры применения генеральных углов карьеров более 55° [1]: карьер Westfrob Mine (Канада) глубиной 244 м с общим углом наклона борта 55° ; карьер Palabora (ЮАР), на котором реализованы генеральные углы откосов бортов до 58° с использованием вертикальных откосов уступов высотой 30 м; карьер Sandsloot (ЮАР) с бортами высотой

¹ Работа выполнена при поддержке ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России на 2009–2013 гг.»

300 м и углом наклона 58°; карьер Flintkote Mine (Канада), борт которого выполнен в гранитах под углом 70°; карьер Cleveland Cliffs (США) борт при высоте 120 м отстроен под углом 80°; карьер "Айхал" (Якутия) углы откосов бортов в глубокой части составляют 70-80°.

В настоящее время в исследованиях и инженерной практике широко применяются аналитические подходы и конечно-разностные методы численного моделирования напряженно-деформированного состояния массива пород (НДС). Методы численного моделирования в полной мере позволяют оценить механические процессы, учитывают различные факторы (физико-механические свойства, реальную геометрию карьерной выемки, структурные особенности и строение месторождения) оказывающих влияние на устойчивость горных склонов.

Учитывая физико-механические свойства горных пород «Чернореченского» месторождения известняков, а именно упругие и прочностные составляющие, абсолютные значения которых характерны для скальных высокомодульных пород для проведения геомеханических расчетов был выбран метод конечных элементов (МКЭ),

что позволило: во-первых, задать реальные исследуемому объекту граничные условия по напряженному состоянию; во-вторых, учесть геологическое строение и физико-механические свойства, в-третьих, с достаточной детальностью учесть конструктивную сложность рельефа и очистного пространства [2]. Выбор упругой линейно-деформируемой модели, учитывающей особенности деформационных и прочностных характеристик пород, дает возможность получить достаточно полное представление о механическом поведении массива. Обусловлено это тем, что хрупкие высокомодульные породы не обладают в значительной степени реологическими свойствами.

Обоснование краевых условий задачи основывается на следующем. Согласно понятиям структурной геологии и геотектоники [3-4] все месторождения приурочены к тем или иным типам тектонических структур, определяющих, в основном, их происхождение и строение. Общность тектонических структур предопределяет и общность тектонических и геомеханических процессов протекающих в них [5].

В связи с тем, что на Чернореченском месторождении каких-либо исследований по оценке

Таблица 1. Физико-механические свойства горных пород

Наименование	Объемный вес, кг/м ³	Коэффициент Пуассона	Модуль упругости, МПа
Поверхностный слой (суглинок)	2000	0.35	500
Известняк	2700	0.3	45000
Вмещающий массив	2700	0.25	40000

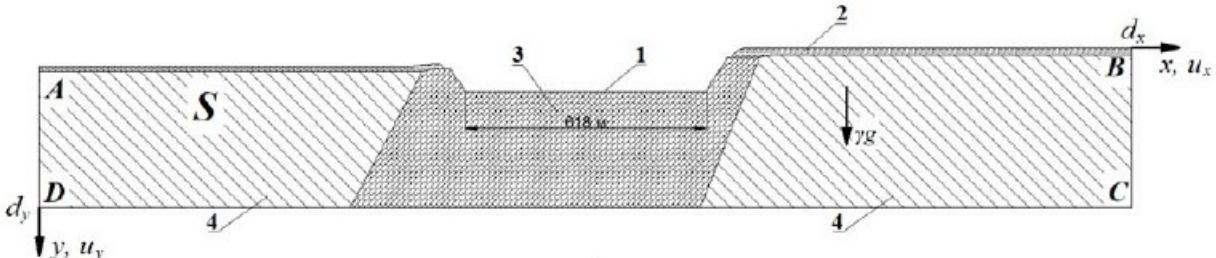


Рис.2. Схема и основные параметры расчетной области к определению НДС массива: 1 – проектная отметка дна карьера; 2 – поверхность слоя (суглинок); 3 – известняк; 4 – вмещающий массив

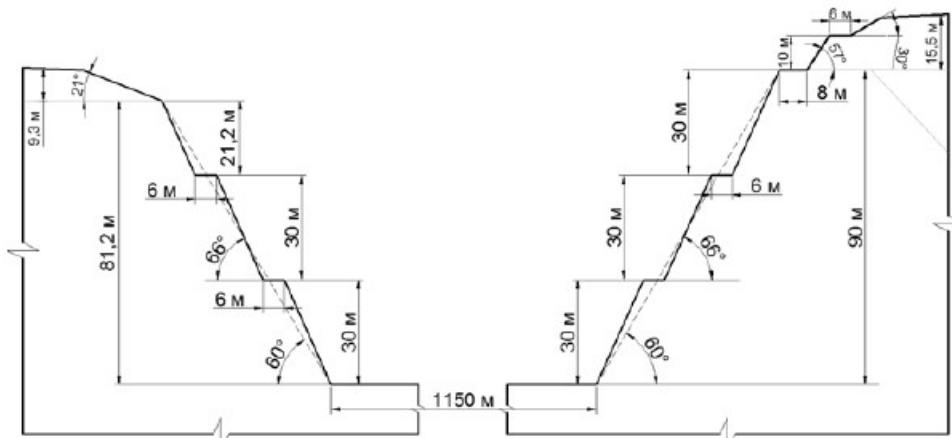


Рис.3. Типовое вертикальное сечение карьерной выемки для разреза V-V

НДС массива пород ранее не проводилось, то наиболее целесообразно основные параметры исходного поля напряжений принять по типу тектонической структуры.

Для массивов пород платформенных областей (Западносибирская платформа), к которым относится Чернореченское месторождение, характерно в общем случае относительно простое строение. В общей же структуре платформы выделяют относительно стабильные и подвижные щиты и участки с выдержаным и нестабильным режимом тектонических сил. Платформенные чехлы, практически повсеместно представлены осадочными породами с незначительной тектоникой пликативного вида. Последние, как правило, характеризуются общей тенденцией к опусканию и прогибанию фундамента. Поэтому в подобных областях уровень напряженного состояния ниже, чем в активных зонах и определяется, в основном, гравитационными силами [6-10].

Постановка задачи

Для проведения расчётов была выбрана двухмерная упругая модель в условиях плоского деформированного состояния, где в отдельные слои с усреднёнными упругими и плотностными характеристиками выделены вмещающие породы, рудное тело (известняк), и приповерхностный слой осадочных пород (суглинок). При определении НДС массива горных пород указанные слои моделировались как сплошные, упругие, изотропные, линейно-деформируемые, однородные материалы с заданными физико-механическими свойствами (табл. 1).

Условия на границе расчетной области (краевых условий задачи) определялись напряженным состоянием нетронутого массива. Общность горно-геологических и тектонических условий залегания пород «Чернореченского» карьера с территориями Томской области и северной частью Кузбасса позволила нам отнести природное поле напряжений на месторождении к условиям, характерным для регионов с преобладающей исходной вертикальной составляющей. Естественное напряженное состояние в таких регионах определяется силой тяжести (объемным весом) вышележащей толщи пород и хорошо описывается гипотезой «Динника»:

$$\sigma_y = \gamma g H, \quad \sigma_x = q\sigma_y, \quad \tau_{xy} = 0 \quad (1)$$

где $q = \mu/(1-\mu)$ – коэффициент бокового распора, γ – плотность пород, g – ускорение свободного падения, H – расстояние от элементарного рассматриваемого объема до земной поверхности, μ – коэффициент Пуассона.

На рис.2 представлена схема расчетной области (S – прямоугольник $0 \leq x \leq d_x, 0 \leq y \leq d_y$) и основные параметры. Средняя (проектная) глубина карьера – 105 м. Верхний уступ, представленный глинистыми породами в сочетании с выходами известняков, к настоящему времени сформирован на границе карьерного поля. Его высота на север-

ном, южном, восточном и западном бортах составляет соответственно 9.3; 15.5; 23.0; и 14.0 м. Уступы находятся в устойчивом состоянии более 20 лет при угле откоса $40-45^\circ$.

Окончательное формирование откосов бортов карьера принято сдвоенными уступами общей высотою 30 м с оставлением берм безопасности шириной $0.2h_{уст}$ или 6.0 м. Устойчивый угол откоса отрабатываемых уступов высотою 15 м в соответствии с данными многочисленных наблюдений составляет $70-75^\circ$. В расчетах для тридцати метрового уступа он принят 66° . Типовое вертикальное продольное сечение карьерной выемки для разреза V-V на конец отработки представлено на рис.3.

В расчетной области S выполнены:

уравнения равновесия:

$$\sigma_{y,j} + pF_i = 0 \quad (2)$$

уравнения Коши:

$$\varepsilon_{ij} = \frac{1}{2}(u_{i,j} + u_{j,i}) \quad (3)$$

физические уравнения (закон Гука):

$$\sigma_{ij} = 2G\varepsilon_{ij} + \lambda\theta\delta_{ij} \quad (4)$$

и граничные условия на плоскостях:

AB –

$$\sigma_y(0, x) = \gamma g H = 0, \quad \tau_{xy}(0, x) = 0$$

DC –

$$u_y(d_y, x) = 0, \quad \tau_{xy}(d_y, x) = 0 \quad (5)$$

BC –

$$\sigma_x(d_x, y) = q\sigma_y, \quad \tau_{yx}(d_x, y) = 0$$

AD –

$$u_x(0, y) = 0, \quad \tau_{yx}(0, y) = 0$$

где σ_{ij} – компоненты тензора напряжений (σ_y, σ_x и τ_{xy} – соответственно вертикальная и горизонтальная нормальные и касательная компоненты тензора напряжений); $pF_i = \gamma g \delta_{ij}$ – объемные силы; ε_{ij} – компоненты тензора деформаций ($\varepsilon_y, \varepsilon_x$ и ε_{xy} – соответственно вертикальная и горизонтальная главные линейные и угловая компоненты тензора деформаций); u_{ij} – компоненты вектора перемещений (u_y, u_x – вертикальная и горизонтальная компоненты вектора перемещений); $\theta = \varepsilon_x + \varepsilon_y$ – относительная объемная деформация, G и λ – параметры Ламе

$$G = \frac{E}{2(1+\mu)}, \quad \lambda = \frac{E\mu}{(1-2\mu)(1+\mu)};$$

δ_{ij} – символ Кронекера.

Получив конечно-элементную дискретизацию расчетной области S , соотношения (2)-(5) сводятся к решению системы линейных алгебраических уравнений МКЭ, являющихся уравнениями равновесия узлов в перемещениях (разрешающее уравнение статического анализа):

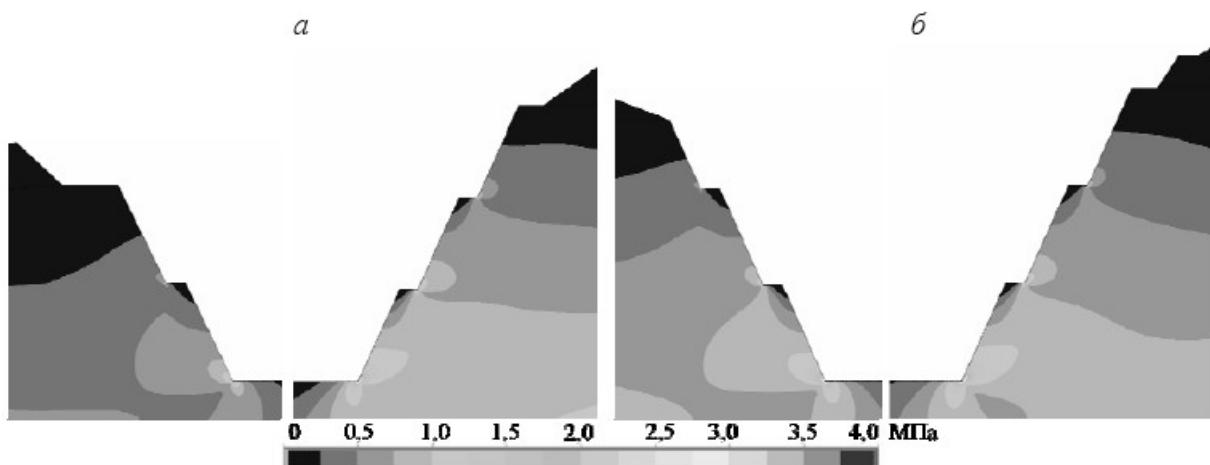


Рис.4. Распределение сдвиговых напряжений τ_{\max} в бортах карьера:
а – для сечения III-III; б – для сечения V-V

$$|K|\{\delta\} = \{F\} \quad (6)$$

где $|K|$ – матрица жесткости системы; $\{\delta\}$ – вектор перемещений всех узлов; $\{F\}$ – вектор узловых нагрузок (векторы объемных и граничных сил).

Для учета веса горных пород массива задавалась объемная сила \mathcal{G} , которая является основной активной нагрузкой действующей в модели. Верхняя граница расчетной области соответствует дневной поверхности – свободна от действия напряжений. На контактах разнородных пород выполняется условие жесткого сцепления. Открытые обнажения бортов карьера свободны от внешних усилий ($\sigma_y = \sigma_x = 0$). Границы модели выбраны в соответствии с принципом Сен-Венана. Значения горизонтальных напряжений $\sigma_x = \frac{\mu}{1-\mu}\sigma_y$, в

механическом смысле эквивалентны условию равенства нулю горизонтальных смещений ($u_x = 0$) на вертикальных границах расчетной области. Шаг дискретизации принят от 8 м на внешних контурах модели до 0.5 м при приближении к элементам карьерной выемки.

Расчеты выполнены для следующих компонент тензора напряжений (МПа): главных (σ_1, σ_3) и максимального касательного (τ_{\max}). За максимальное главное напряжение принималось σ_1 , за минимальное – σ_3 , растяжение – со знаком «минус».

В целом решаемая задача в такой постановке является приближением к реальной ситуации. Горные породы являются неоднородными средами, состоящими из минералов с различными механическими свойствами, имеющими различные геометрические размеры и разнообразные условия на границах их контактов. Тем не менее, для задач горного дела, связанных с расчетами НДС массива и его изменением в результате отработки запасов полезных ископаемых, предположение о сплош-

ности является вполне обоснованным и позволяет получить хорошо согласующиеся с практикой результаты.

Анализ результатов численного эксперимента

Геомеханическая оценка массива пород в бортах карьера для условий Чернореченского месторождения была выполнена по пяти вертикальным разрезам (см. рис.1), трем поперечным (I-I, II-II, III-III) и двум продольным (IV-IV, V-V).

Учитывая общую (идентичную) качественную и количественную закономерность изменения НДС массива пород в прибрежной области карьерной выемки к детальному рассмотрению были приняты поперечный III-III и продольный V-V разрезы. На рис.4 приведены картины распределения максимально касательных напряжений (τ_{\max}), возникших в бортах карьера для условий конечно-го их положения.

Анализ результатов расчета НДС массива показал, что области повышенных концентраций напряжений сжатия σ_1 локализуются, в основном, у сопряжений дна (уступов) и бортов карьера. На нижней площадке величина их достигает $\sigma_1 = 7-9$ МПа, на верхних наблюдается снижение – $\sigma_1 = 2-4$ МПа. При этом интенсивность и закономерность изменения τ_{\max} схожа с характером распределения напряжений σ_1 . Под дном проектного карьера давление σ_1 снижается более чем в 4 раз по сравнению с исходным напряженным состоянием.

Прибрежная область практически по всей высоте бортов карьера испытывает состояние одностороннего сжатия ($\sigma_1 = 0.2-2.0, \sigma_3 = 0.0$ МПа), с постепенным переходом вглубь боковых границ к двухосному. Следует отметить, что площадки уступов практически разгружены от возникающих в них напряжений ($\sigma_1 = 0.1-0.5, \sigma_3 = 0.0$ и $\tau_{\max} = 0-0.25$ МПа). Незначительная зона растяжения $\sigma_3 = -0.25$ МПа наблюдается на участке сопряжения дна карьера с бортом на расстоянии 1-1.5 м от послед-

него. Подобная ситуация отмечается на всех остальных рассматриваемых разрезах.

В целом, оценивая уровень действующих напряжений отметим, что максимальной является вертикальная составляющая, но ее абсолютные значения не превышают критических, ввиду высоких деформационно-прочностных характеристик пород. Наиболее нагруженными по сжимающим (σ_1) и сдвигающим (τ_{\max}) усилиям являются угловые зоны сопряжения уступов с бортами карьера. Уровень этих напряжений существенно ниже пределов прочности пород. Поэтому массив горных пород на данных участках прогнозируются как прочный.

Оценка устойчивости бортов карьера

Известно [11], что изменение напряженного состояния в прибортовом массиве захватывает широкую зону, а величины деформаций зависят от параметров открытой горной выработки, физико-механических свойств пород и геологического строения месторождения. В зоне прибортового массива создается поверхность с максимумом касательных усилий и соответствующим им максимумом деформаций, которая при предельных напряжениях переходит в поверхность скольжения, являющейся наиболее слабой, по которой происходит разрушение.

При оценке прочности горных пород наибольшее признание получили критерии хрупкого и сдвигового разрушения [12-16]. Хрупкое разрушение обусловлено превышением максимальных напряжений прочностных характеристик пород в массиве (способность пород разрушаться без заметной пластической деформации). Сдвиговые разрушения характеризуются превышением касательных напряжений сил сцепления и трения.

Теория максимальных нормальных (сжимающих и растягивающих) напряжений широкого применения при оценке устойчивости бортов карьеров не получила, ввиду огромного накопленного практического опыта и данных о видах разрушений элементов открытых работ. Основными причинами разрушений бортов карьеров (разрезов) являются, как правило, высокие сдвиговые напряжения и наличие природных или техногенных поверхностей ослабления. Однако в ус-

ловиях скальных высокомодульных массивов горных пород теория наибольших нормальных напряжений с определенным допущением может успешно реализована, особенно это относится к случаям, когда в элементах выемки возникают значительные растягивающие усилия.

Учитывая выше отмеченные особенности, а также отсутствие (практически) в бортах карьера зон растяжений, для дальнейшего определения устойчивости пород использовался критерий Кулона-Мора, физический смысл которого состоит в предположении, что разрушение происходит тогда, когда действующее касательное напряжение становится равным пределу прочности породы на срез [12-16]:

$$\tau = C + \sigma \cdot \operatorname{tg} \varphi \quad (7)$$

где τ – предел прочности породы по касательным напряжениям, МПа;

C – сцепление, МПа;

σ – нормальное напряжение, действующее на площадке разрушения, МПа;

φ – угол внутреннего трения, град.

Однако выражение (7) в таком виде практически не применяется для нахождения коэффициента запаса устойчивости. В этом случае, для расчетов используют функцию прочности, выраженную из этого уравнения (т.е. уравнения прямой огибающей предельные круги напряжений Мора):

$$2C \cos \varphi + (\sigma_1 + \sigma_3) \sin \varphi \geq (\sigma_1 - \sigma_3) \quad (8)$$

где σ_1 и σ_3 – соответственно главные максимальные и минимальные напряжения, действующие в массиве пород (получены из упругого решения), МПа.

Отсюда, коэффициент запаса устойчивости в каждой точке сплошного массива будет равен:

$$K_y = \frac{2C \cos \varphi + (\sigma_1 + \sigma_3) \sin \varphi}{(\sigma_1 - \sigma_3)} \quad (9)$$

Значения $K_y < 1$ характеризуют области за предельного деформирования пород.

Величины механических характеристик сплошного массива, входящих в соотношение (9), в расчетах были приняты из условия самой наихудшей ситуации, характеризующейся присутст-

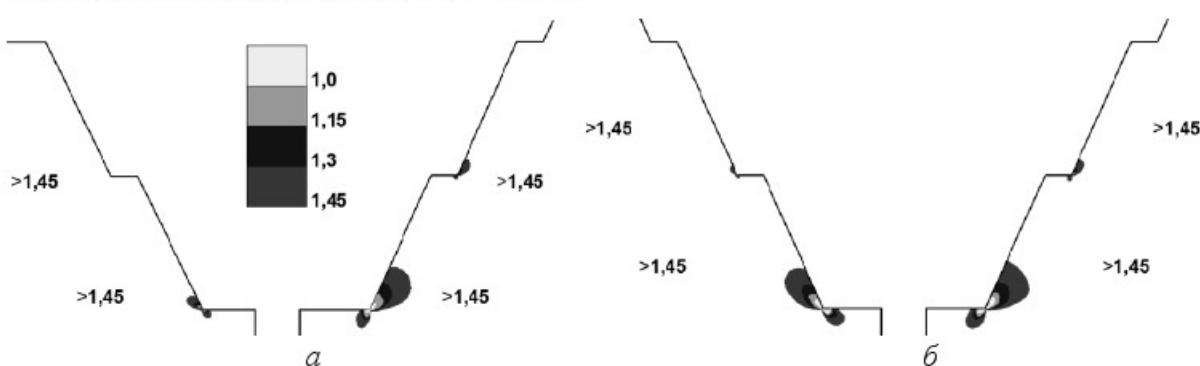


Рис. 5. Значения показателя устойчивости K_y для сечения III-III (а) и сечения V-V (б)

вием трещиноватости, нарушенности пород, и как следствием наличием поверхностей ослабления, которая может иметь место быть в границах карьерного поля Чернореченского месторождения. Последние приняты следующими: $C = 1.1 \text{ МПа}$, $\varphi = 28.35^\circ$ (по данным аналитических решений).

На рис.5 приведены фрагменты определения показателя устойчивости K_y для поперечного III-III и продольного V-V разрезов.

Из них следует, что снижение коэффициента устойчивости до предельного значения $K_y = 1$ наблюдается в угловых зонах вблизи примыкания уступа (дна) с бортом карьера, т.е. в тех местах, где концентрируются максимальные значения σ_1 и τ_{\max} . Размер этих зон в натуре по поверхности обнажения уступа и борта не превышает 2 м, а вглубь массива – 1.5 м (при рассмотрении наихудшей ситуации – сопряжения дна карьера с его бортом). В целом в прибрежной области величина показателя K_y превышает значение 1.45, что свидетельствует о достаточной устойчивости пород при результирующем угле наклона борта карьера 60° .

Необходимо отметить, что реальный прибрежный скальный массив горных пород характеризуется наличием поверхностей ослабления техногенного и природного происхождений. В этих условиях наибольшее распространение для оценки устойчивости бортов карьера получил метод, с помощью которого вычисляются удерживающие и сдвигающие силы по возможной поверхности скольжения. Учитывая, что в бортах Чернореченского карьера не установлено наличия протяженных поверхностей скольжения, обусловленных геологическими нарушениями (трещинами), то потенциально возможная поверхность ослабления (разрушения) отстраивалась по результатам численного эксперимента (рис.6).

Методика заключалась в следующем [16]. Периодически склону с определенным шагом строятся эпюры максимальных касательных напряжений, определяются точки экстремума для каждой эпюры и эти точки соединяются в одну линию. В итоге эта линия и определяет поверхность разрушения. Как видно из рис.6, для каждого

го уступа появилась своя возможная линия скольжения (пунктирная линия). Рассматривая наихудшую ситуацию, связанную с обрушением пород нижнего уступа, отметим, что это существенно повлияет на устойчивость пород верхних уступов. В связи с этим отстраивалась результирующая конечная поверхность скольжения вдоль концентрации максимальных касательных напряжений для борта в целом.

При этом коэффициент запаса устойчивости вдоль линии вероятного разрушения определялся по формуле:

$$K_y = \frac{\sum \{2C + \operatorname{tg}\varphi[\sigma_1 + \sigma_3 - (\sigma_1 - \sigma_3)\sin\varphi]\}}{\sum(\sigma_1 - \sigma_3)\cos\varphi} \geq 1.3 \quad (10)$$

На выделенной поверхности ослабления берутся точки. В каждой точке снимаются главные напряжения, и определяются удерживающие и сдвиговые усилия, которые суммируются. Коэффициент запаса устойчивости рассчитывается как отношение этих напряжений.

Расчетные величины K_y по этой поверхности в зависимости от сцепления пород и угла внутреннего трения для разреза V-V приведены в табл. 2.

Принимая во внимание рекомендуемые значения коэффициента запаса устойчивости для охраняемых объектов на поверхности, которые должны быть более 1.3 из табл. 2 следует, что при сцеплении пород менее 0.5 МПа и $\varphi = 25-35^\circ$ формируются критические значения коэффициента устойчивости на поверхности скольжения ($K_y < 1.3$). Схожая ситуация отмечается и на остальных рассматриваемых разрезах.

Таким образом, с учетом физико-механических свойств горных пород, а именно прочностных характеристик и принятых значений $C = 1.1 \text{ МПа}$ и $\varphi = 28.35^\circ$ обеспечивается требуемая устойчивость борта карьера с генеральным углом его наклона 60° ($K_y = 1.79$). Однако под влиянием фактора времени, атмосферных агентов, выветривания, сейсмических воздействий взрывных работ, сохранность откосов уступов и в целом бортов карьера может изменяться в сторону снижения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Козырев А.А. Методические основы технологии эффективного и безопасного освоения глубоких горизонтов месторождений полезных ископаемых открытым способом / А.А. Козырев, В.В. Рыбин, Д.В. Жиров и др. / Вестник МГТУ, том 12, № 4, 2009. 644-653 с.
2. Зенкевич О. Метод конечных элементов в технике / – М.: Мир, 1975.
3. Белоусов В.В. Структурная геология / Изд. 3-е. – М.: Изд-во Московского университета, 1986. – 248 с.
4. Структурная геология и тектоника плит. В-Зх томах. -М.: Мир. 1990-1991 г.
5. Айтматов И.Т. Научные основы геомеханической оценки рудных месторождений горно-складчатых областей: дис. докт. техн. наук / Айтматов Ильгиз Торокулович, Фрунзе, АН КиргССР, Ин-т физики и механики горных пород, 1985.
6. Кропоткин П.Н. Тектонические напряжения в земной коре / Геотектоника. – 1996. № 2. 3-5 с.
7. Марков Г.А. Напряженное состояние пород и горное давление в структурах гористого рельефа /

- Г.А. Марков, С.Н. Савченко / Л., Наука, 1984. – 140 с.
8. Поля напряжений и деформаций в земной коре. -М.: Наука 1987. 184 с.
9. Неверов С.А. Типизация рудных месторождений с ростом глубины по виду напряженного состояния. Ч. 1: Современные представления о напряженном состоянии массивов горных пород с ростом глубины / С.А. Неверов / ФТПРПИ. – 2012. – № 2.
10. Неверов С.А. Типизация рудных месторождений с ростом глубины по виду напряженного состояния. Ч. 2: Тектонотипы рудных месторождений и модели геосреды / С.А. Неверов / ФТПРПИ. – 2012. – № 3.
11. Методические указания по наблюдениям за деформациями бортов разрезов и отвалов, интерпретации их результатов и прогнозу устойчивости. - Л. ВНИМИ, 1972.
12. Казикаев Д.М. Геомеханика подземной разработки руд / Учебник для вузов, – М.: Изд-во МГТУ, 2005.
13. Литвинский Г.Г. Аналитическая теория прочности горных пород и массивов / Монография. – ДонГТУ. – Донецк: Норд-Пресс, 2008. – 207 с.
14. Фрейдин А.М. Устойчивость горных выработок при системах подэтажного обрушения / А.М. Фрейдин, А.А. Неверов, С.А. Неверов, П.А. Филиппов / ФТПРПИ. – 2008. – №1.
15. Методические указания по оценке устойчивости бортов карьеров (разрезов) и отвалов / сост. А.А. Григорьев, Е.В. Горбунова, А.Н. Девяткина. – Владивосток: Изд-во ДВГТУ, 2009. – 37 с.
16. Усманов С.Ф. Использование программного комплекса “STRESS” для оценки устойчивости бортов карьеров / С.Ф. Усманов / Вестник КРСУ. 2008. Том 8. № 1 – 85-88 с.

Автор статьи

Неверов

Александр Алексеевич,
канд. техн. наук., старший научный
сотрудник лаборатории подземной
разработки рудных месторождений
ИГД СО РАН,
Email: nnn_aa@mail.ru