© Б.Р. Ракишев, А.А. Машанов, Т.Л. Тесленко, 2007

УДК 6252.271.04:551.213

Б.Р. Ракишев, А.А. Машанов, Т.Л. Тесленко

АНАЛИЗ ГЕОТЕКТОНИКИ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ ГОРНЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ

Семинар № 16

При проектировании горных предприятий необходимо учитывать тектоническую ситуацию данного региона, которая предопределена геодинамическими условиями формирования литосферы.

Расчет устойчивых углов бортов и уступов карьеров необходимо производить с учетом тектоники месторождения. Тектоническое районирование и расчет параметров тектонических блоков можно осуществлять, используя метод конечных элементов. Зоны концентрации напряжений считаются сейсмоопасными.

Верхняя часть литосферной оболочки Земли – кора состоит из литосферных пластин, расчлененных на блоки. Литосферные пластины – структурные единицы высшего порядка выделяются по геологическим формациям. Блоки – структурные единицы более низких порядков выделяются по разрывным нарушениям. Границами литосферных пластин являются границы формаций, границами блоков служат разрывные нарушения, долины рек, гребни хребтов (рис. 1).

Формирование континентальной коры происходит на активных окраинах континентов – в местах поглощения океанических литосферных плит в зоны субдукции. В зонах субдукции происходит преобразование осадков и пород океанического дна в новые породы, которые слагают литосферные пластины. Под влиянием сжимающих усилий литосферные пластины надвигаются на окраину континента. Поскольку процесс надвигания происходит в течение многих миллионов лет, те пластины, которые сформировали окраину в самом начале процесса, через сотни миллионов лет будут слагать уже центральную часть континента. Таким образом, была сформирована и территория Казахстана.

Но поскольку южная и восточная части Евразийского континента в настоящее время являются активными, т.е. происходит аккреция континента литосферными пластинами, следовательно, вновь причленяющиеся к континенту пластины оказывают давление на те пластины, которые нарастили окраину ранее. Давление осуществляется с разных сторон не одновременно и продолжительность сдвигающих напряжений различна. Таким образом, сдвижение пластин на окраине континента способствует росту напряжений в литосферных пластинах, располагающихся в центральной части континента. Разрядка напряжений в виде землетрясений происходит на границах перемещающихся пластин (блоков) и фиксируется зонами разломообразования и трещиноватости.

Для прогноза проявления разрядки геодинамического напряжения можно применить метод конечных элементов, напоминающий триангуляцию:

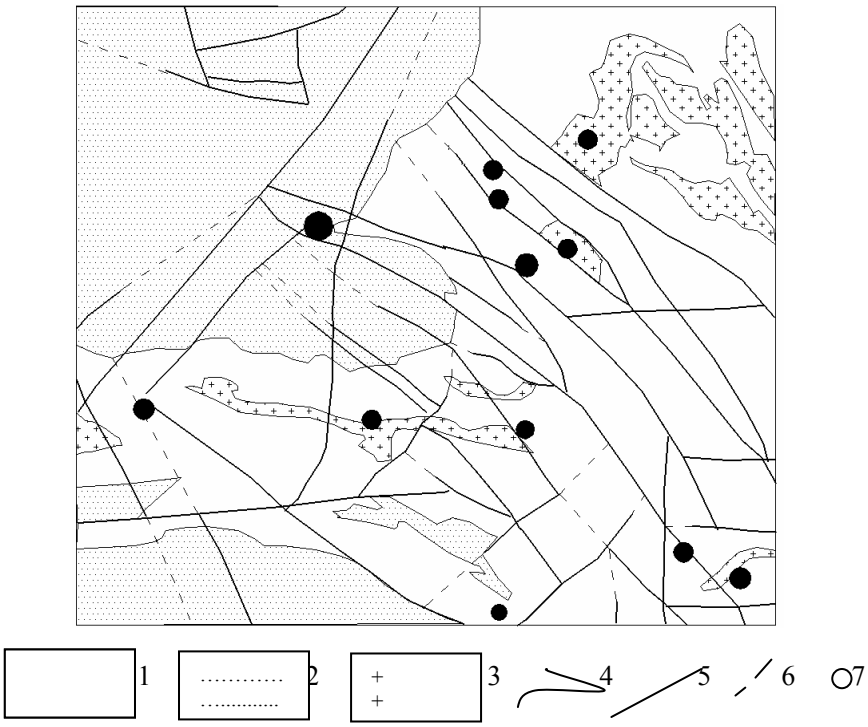

Рис. 1. Фрагмент геодинамической карты Рудного Алтая: *1* – литосферные пластины (кварц-кератофировая формация); *2* – литосферные пластины окраинного моря, надвинутые на энсиалическую дугу (терригенная формация); *3* – интрузивные образования.
Границы: *4* – литосферных пластин; *5* – литосферных блоков (достоверные); *6* – литосферных блоков (предполагаемые); *7* – месторождения

– разбивку земной поверхности на треугольники для точной съемки и изображение ее на карте. Если в литосферные пластины континентальной коры вписать ромбы, мы сможем определить направление сжимающих усилий, оказывающих влияние на смещение литосферных пластин. Причем, построение ромбов можно перенести на более детальные объекты – блоки коры, карьерное поле, стенку выработки, и т.д. [1].

Силы, воздействующие на узлы элементов, производят его смещение, т.е. деформируют элемент. В случае анизотропного материала деформации изменяются в зависимости от направления. Здесь целесообразно ввести дополнительную координату, совпадающую с основными направлениями деформации.

Деформация элемента, имеющего форму параллелограмма, определяется вектором узловых перемещений φ, который можно представить в виде:

$$\varphi = \{U_1 U_2 U_3 U_4 \cdot V_1 V_2 V_3 V_4\}. \qquad (1)$$

Проведены системы координат: декартова (x, y) и косоугольная (x', y') (рис. 2).

Соотношение между силами, приложенными к узловым точкам и вызываемыми ими перемещениями представляется матрицей жесткости элемента. В нашем случае это параллелограмм, а его

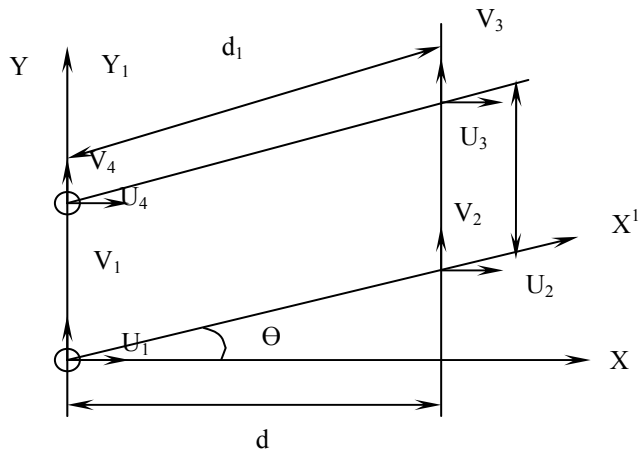

Рис. 2. Системы координат: декартова (x, y) и косоугольная (X′ и У′)

узлы – точки пересечения систем трещин.

Рассматриваемый случай можно сравнить с геометрической формой теории Кулона:

$$\tau = \sigma \cdot tg\rho + c \qquad (2)$$

Здесь направление с совпадает с элементом смещения V, а угол внутреннего падения ρ соответствует углу наклона θ. На оси σ расположен элемент смещения U (рис. 3).

Два члена формулы Кулона соответствуют двум системам трещин.

При этом одно направление системы скольжения совпадает с направлением оси, на которое проецируется другое направление. Однако это частный случай.

В общем случае, когда две системы скольжения симметричны к декартовой системе координат, то образуются два угла наклона.

Изложенное позволяет применить метод конечных элементов можно к решению задач теории прочности горных пород. Метод предельного равновесия близок к методу конечных элементов. В обоих случаях к объекту прикладывается сила, влияние которой определяется в узловых точках последнего. В однородном массиве горных пород этими точками будут точки пересечения двух систем скольжения или системы трещин.

Разница между этими методами в том, что в первом две пересекающиеся системы скольжения задаются теоретически равноценными и симметричными, а их искривление определяется из кривых условий давления способом Массо – Римана. Этот метод применим для однородных пластических пород, например, глин, плывунов. Для скально-трещиноватых массивов целесообразно руководствоваться естественными системами трещин, характеризующими напряженное состояние массива [2].

В области ОАС искривление сети осуществляется поворотом ромбического блока скольжения, измене-

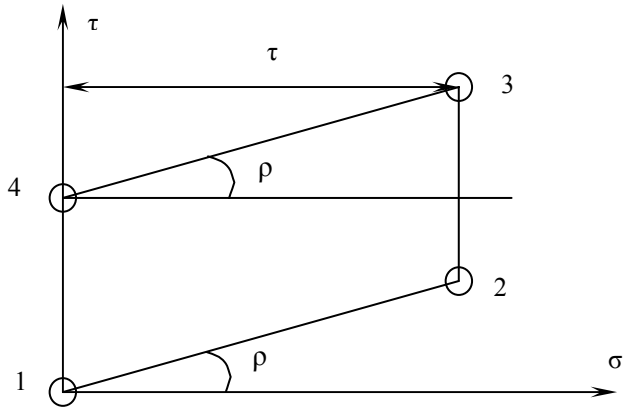

Рис. 3. Геометрическая форма двух сопряженных систем плоскостей скольжения

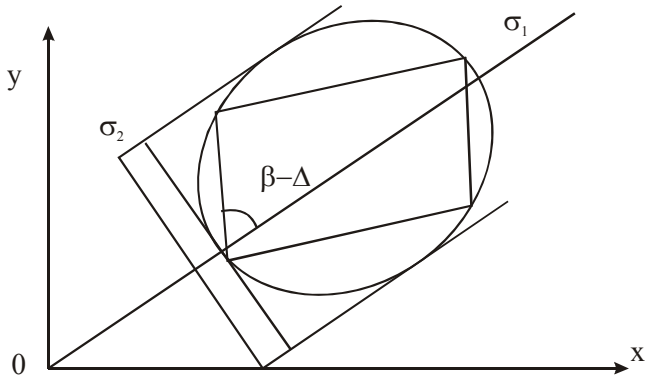

Рис. 4. Фигура деформации

нием его углового и линейного масштаба, а также их комбинации. Это не противоречит положению геомеханики о том, что двугранный угол между системами трещин – характеристический параметр массива горных пород. Общая фигура деформации – это параллелограмм (рис. 4).

Как видно из рисунка, правильная ориентация систем трещин по отношению к откосу карьера и построение соответствующего эллипсоида деформации определяет относительную величину главных нормальных напряжений, их направление, дает ориентацию касательно-сколовых напряжений. Последние не являются симметричными по отношению к нормальным. Поэтому углы ψ по обе стороны σ_1 не равны.

Так как двугранный угол между системами трещин $\beta = \frac{\pi}{2} - \rho$, то угол Δ связан с углом внутреннего трения ρ. В частном случае $\Delta = \rho$, а в общем: $\psi_1 = \Delta$, $\psi_2 = \beta - \Delta$.

Этот угол отражает переход от упругой деформации к пластической.

Системы трещин – это проявление предельного значения упруго-пластичес-кой деформации, выраженной эллипсоидом. Эллипсоиды трещинной деформации могут быть построены для целых участков рудного поля. Направление главных осей эллип-соидов указывают направления главных нормальных напряжений. Такой эллипсоид строится для участка карьера, это позволит определить, направление главного напряжения по формуле:

$$\mathrm{tg}(\varphi + \Delta), \quad \mathrm{tg}(\varphi + \Delta - \beta). \qquad (3)$$

В этом случае метод предельного равновесия будет применим для скально-трещиноватого массива горных пород.

Если эллиптические функции рассматривать как функции комплексного переменного аргумента, то этот метод будет одним из основных в анализе фигур деформации парал-лелограмма и эллипсоида трещин.

При построении эллипсоида деформации было отмечено, что плоскости трещин скольжения являются плоскостями комплексного типа. Было отмечено, что стереографическая проекция, применяемая при изображении систем трещин, дает также возможность рассматривать последние как комплексные. На основании изложенного можно использовать комплексные переменные для анализа трещинной деформации.

Длина дуги эллипса в параметрическом виде выражается:

$$S = a\int_0^{\varphi} \sqrt{1 - k^2 \sin^2 \varphi}\, d\varphi, \qquad (4)$$

где k = $\sin\theta$ – модуль интеграла (θ – модулярный угол); $\sqrt{a^2 b^2}/a$ – экс-

центриситет эллипса; φ – амплитуда: a и b – большая и малая полуоси эллипса.

От этой формулы интеграла происходит эллиптический интеграл, который может быть выражен:

$$\int_0^z \frac{dz}{1-z^2}, \qquad (5)$$

где z = a + bi.

Это представляет собой многозначную периодическую функцию с периодом n $\pi + (-1)^{n\cdot} \cdot \omega$, (n – целое число, ω – комплексный период).

Дальше этот метод развил Вейерштрасс. Нормальной формой его интегралов первого рода называют интеграл:

$$z = \int_n^\infty \frac{dt}{\sqrt{4t^2 - g_2 t - g_3}}, \qquad (6)$$

где g_2 и g_3 – комплексные числа.

Эллиптические являются двоякопериодическими функциями своего комплексного аргумента z и имеют два комплексных периода ω_1 и ω_2, которые представляются в виде:

$$f(z) = f(z + m_1 w_1 + m_2 w_2), \qquad (7)$$

где $m_1, m_2 = 0, \pm 1, \pm 2, \ldots$

По этой методике комплексную z-плоскость можно разбить на параллелограммы, которые называются параллелограммами периодов (рис. 5).

Вершины этих параллелограммов образуют решетку периодических величин $z_0 = m_1 w_1 + m_2 w_2$, (z_0 – начальная произвольная точка).

Если дискриминант $\Delta = g_2^3 - 27g^2$ - положительное число, то все корни многочлена $4t^2 - g_2 t - g_3$ вещественны и неодинаковы, т.е. $l_1 > l_2 > l_3$.

В этом случае происходит деформация в виде трехосного эллипсоида и можно применить интеграл

$$U = \int_z^\infty \frac{dz}{4(z-l_1)(z-l_2)(z-l_3)}. \qquad (8)$$

В нашем случае целесообразно воспользоваться преобразованием Якоби. Эллиптическая функция Якоби – обратная функция.

$$Z = F(k,y) = \int_0^y \frac{dy}{\sqrt{1-k^2 \sin\psi}}, \qquad (9)$$

где $0 < k^2 < 1$, y – amz (амплитуда z).

Если ввести x = sin φ, то формулы (9) и (10) преобразуются в соответственно:

$$Z = \int_0^t \frac{dt}{\sqrt{(1-t^2)(1-k^2t^2)}},$$

$$X = \sin(\mathrm{am}z). \qquad (10)$$

Математические формулы, приведенные выше, могут быть упрощены. Скажем, сложные формы эллиптических

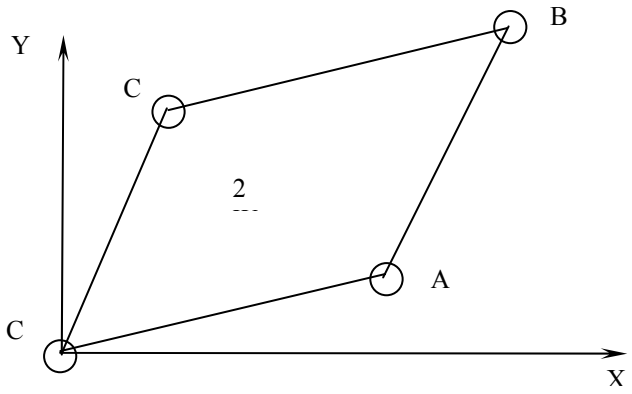

Рис. 5. Параллелограмм периодов

интегралов при решении задач трещинной тектоники могут быть приведены к простому виду апроксимизацией периодических закономерностей систем трещин конкретного массива горных пород.

Породный массив, расчлененный границами литосферных блоков можно рассматривать как поле комплексных чисел. Границы блоков, разбивающих массив на параллелограммы структурных отдельностей, являются аналогами комплексных плоскостей, которые разбиваются на параллелограммы периодов.

Числовые данные, полученные в результате замеров трещин массива горных пород, могут быть использованы при решении задач геомеханики с применением данной методики. Корни решения уравнений можно рассматривать как параметры деформаций массива по соответствующим осям [3].

Узловые точки литосферных пластин (блоков) являются зонами концентрации напряжений. Это необходимо учитывать при проектировании горных предприятий.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Оден Д.* Конечные элементы в нелинейной механике сплошных сред М.: Мир, 1976. 464 с.
2. *Машанов А.А., Байгурин Д.* К вопросу применения метода конечных элементов для исследования трещиноватости / Материалы международной конференции Усть-Каменогорск, 2001, С. 628-629.
3. *Ракишев Б.Р., Машанов А.А.* Структура массива и развитие горных работ на нерудных карьерах // В кн. Проблемы геомеханики и геотехнологического освоения горных территорий. Бишкек 2001, С. 384-288.

Коротко об авторах

Ракишев Б.Р. – академик НАН РК, профессор, доктор технических наук, зав. кафедрой открытых горных работ,

Машанов А.А. – доктор технических наук, профессор кафедры маркшейдерского дела и геодезии,

Тесленко Т.Л. – кандидат геолого-минералогических наук, доцент кафедры общей геологии, минералогии и петрографии,

Казахский национальный технический университет им. К.И. Сатпаева.

© С.Е. Гавришев, К.В. Бурмистров, А.А. Колонюк, 2007

УДК 622.271.32.013.3

С.Е. Гавришев, К.В. Бурмистров, А.А. Колонюк

ПОРЯДОК И ИНТЕНСИВНОСТЬ ОТРАБОТКИ УЧАСТКОВ РАБОЧЕЙ ЗОНЫ КАРЬЕРА ПРИ ИЗМЕНЕНИИ ПОТРЕБНОСТИ В ДОБЫВАЕМОМ СЫРЬЕ

Семинар № 16

В настоящее время эффективное функционирование и развитие горнодобывающих предприятий во многом зависит от гибкого изменения производительности карьера в соответствии с колебанием потребности в минеральном сырье, своевременного формирования в нерабочих бортах карьера подземных горных выработок, размещения в отработанной части карьера отвалов вскрышных пород и отходов металлургического производства. Это требует оперативного управления интенсивностью горных работ на участках рабочей зоны карьера путем оптимальной последовательности их разработки, обоснованного изменения конструкции рабочей зоны и концентрации технологического оборудования на различных ее участках, а также учета факторов, ограничивающих управление интенсивностью.

Для оценки влияния концентрации горных работ и оборудования на интенсивность разработки карьера и отдельных его участков был обобщен комплекс взаимосвязанных показателей, приведенных к величине площади активной части рабочей зоны. Интенсивность горных работ предложено оценивать нагрузкой, приходящейся на 1 м^2 рабочей зоны карьера (участка карьера); концентрацию горных работ – отношением активной площади рабочей зоны к общей площади рабочей зоны; концентрацию оборудования в рабочей зоне – величиной рабочей площади, приходящейся на 1 м^3 емкости ковша экскаватора.

Проведенные исследования позволили установить диапазон изменения концентрации горных работ для различных способов формирования рабочей зоны и определить значения предельных величин, до которых целесообразно увеличивать концентрацию оборудования (рис. 1). Увеличение концентрации оборудования свыше этих значений приводит к снижению интенсивности горных работ. При переходе от непрерывной рабочей зоны к дискретной по фронту и высоте интенсивность горных работ может быть увеличена более чем в 2 раза.

Для достижения расчетных значений интенсивности необходимо при проектировании и планировании горных работ учитывать факторы, ограничивающие управление интенсивностью разработки, и предусматривать способы снижения влияния данных факторов. Основными факторами, ограничивающими управление интенсивностью разработки участков карьера, являются: снижение производительности экскаваторов в добычной зоне при осуществлении селективной выемки полезного ископаемого и при подготовке новых горизонтов; возрастание объемов работ по заоткоске борта карьера при постановке его в нерабочее положение; увеличение взаимовлияния горных работ на смежных гори-

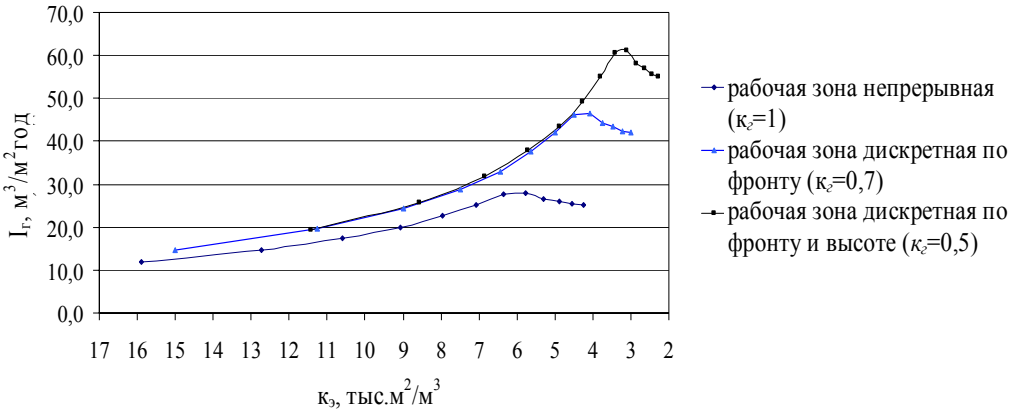

Рис. 1. Зависимость интенсивности горных работ ($I_г$) от концентрации оборудования в рабочей зоне ($к_э$)

зонтах при повышении концентрации оборудования в рабочей зоне. Способы производства работ, учитывающие влияние данных факторов, предусматривают:

- применение в добычной зоне комплексов оборудования с экскаваторами «обратная лопата»;
- применение комплексов бурового оборудования и способов производства буровзрывных работ по заоткоске борта карьера в зависимости от применяемых способов формирования рабочей зоны;
- детализированное планирование горных работ на основе комплексного использования сетевых и ленточно-сетевых графиков, позволяющих повысить достоверность планирования до 95-97 %.

Устранение влияния факторов, ограничивающих управление интенсивностью горных работ, обусловливает дополнительные затраты, оказывающие влияние на выбор оптимальной последовательности разработки участков рабочей зоны карьера. При этом целевая функция задачи управления интенсивностью горных работ будет зависеть от условий сбыта горнодобывающим предприятием готовой продукции. В случае, когда предприятие осуществляет продажу добываемой руды, целевая функция максимизирует дисконтированную прибыль

$$\sum_{t=1}^{T}\sum_{i=1}^{N}((Ц_t \cdot x_{i,t} - S_{i,t}) - (Ц_{t-1} \cdot x_{i,t-1} - S_{i,t-1})) \to max \qquad (1)$$

Когда карьер является структурным подразделением перерабатывающего предприятия, целевая функция минимизирует приращение затрат при изменении интенсивности горных работ

$$\sum_{t=1}^{T}\sum_{i=1}^{N}(S_{i,t} - S_{i,t-1}) \to min, \qquad (2)$$

где $t=1,2,...,T$ – период разработки месторождения, лет; $i=1,2,....,N$ – номер участка карьера; $Ц_t$ – цена на добываемую руду в t-й период, руб./т; $Ц_{t-1}$ – цена на добываемую руду в $(t-1)$-й период, руб./т; x_t – объем добываемой руды в t-й период, млн т; x_{t-1} – объем добываемой руды в $(t-1)$-й период, млн т; $S_{i,t}$ – затраты на разработку месторождения на i-м участке в t-й период, руб.; $S_{i,t-1}$ – затраты на разработку месторождения на i-м участке в $(t-1)$-й период, руб.

Управление интенсивностью отработки отдельных участков рабочей зоны карьера позволяет поэтапно снизить затраты на разработку месторождения и повысить конкурентоспособность горнодобывающего предприятия. Способ поэтапного снижения затрат основан на увеличении угла откоса бортов карьера в конечном положении и сокращении расстояния транспортирования вскрышных пород при формировании внутреннего пригружающего отвала.

На первом этапе осуществляется снижение объемов вскрышных работ за счет увеличения угла нерабочего борта участка карьера, отрабатываемого с максимальной интенсивностью. Борт карьера при этом ставится во временно устойчивое положение с коэффициентом запаса устойчивости ($к_{з.у}$), равным 1,1-1,2, обоснованного геомеханически с учетом фактора времени. Объем вскрышных пород, исключаемый из разработки, возрастает при увеличении высоты временно устойчивого борта и величины приращения угла нерабочего борта.

На втором этапе осуществляется формирование отвала, пригружающе-го временно устойчивый борт карьера. При этом снижается приведенное расстояние транспортирования вскрышных пород в 2-5 раз по сравнению с транспортированием во внешние отвалы. При формировании внутреннего отвала происходит восстановление запаса прочности массива с обеспечением его долговременной устойчивости.

Применение данного способа возможно при своевременном формировании внутреннего пригружающего отвала путем обеспечения необходимой интенсивности горных работ на участках рабочей зоны карьера. Условие достижения интенсивности разработки участков карьера от необходимого объема пригружающего отвала и срока стояния сформированного временно устойчивого борта представлено формулой:

$$\sum_{i=2}^{N}\sum_{t=1}^{T_{cm}} I_{i,t} \geq \frac{V_{no}}{\sum_{i=2}^{N}\sum_{t=1}^{T_{cm}} S_{a,i,t}}, \qquad (3)$$

где $i=2,3,\ldots,N$ – номер участка карьера; V_{no} – объем отвала, пригружающего временно устойчивый борт, млн м^3; T_{cm} – время стояния временно устойчивого борта, лет; $S_{a,i,t}$ – площадь активной рабочей зоны на i-м участке в t-й период, м^2.

Разработанные мероприятия были использованы при разработке рекомендаций по обеспечению необходимой производительности карьера «Малый Куйбас» ОАО «Магнитогорский металлургический комбинат». Проектом реконструкции карьера предполагается наращивание объемов добычи руды до 2,5 млн т/год, что требует увеличения производительности по вскрыше, приобретения дополнительного горно-транспортного оборудования и изменения интенсивности горных работ.

На основе проведенных исследований была определена целесообразность первоочередной отработки Южного участка карьера и формирование в отработанной части отвала вскрышных пород. Для обеспечения заданной интенсивности горных работ на Южном участке карьера разработан комплекс мероприятий: переход со способа формирования рабочей зоны, дискретного по фронту, на дискретный по фронту и высоте; увеличение концентрации оборудования на 35%; организация каскадного взрывания для снижения влияния горных работ на смежных горизонтах. Управление интенсивностью горных работ в карьере позволит увеличить угол нерабочего борта Южного участка до 55º, снизить объем вскрышных работ на

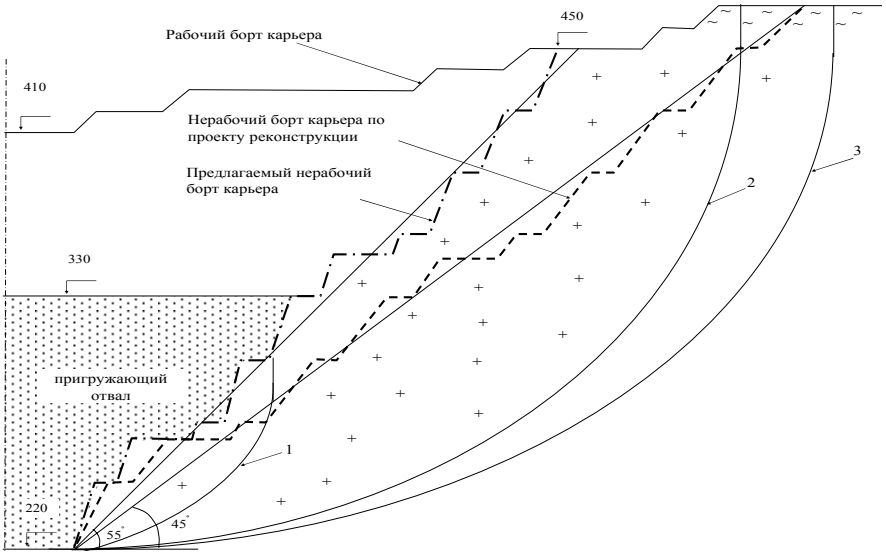

Рис. 2. Борт Южной части карьера «Малый Куйбас» на конец отработки: *1* – поверхность скольжения участка борта карьера, $к_{зу}$=1,1 ($Т_{ст}$ до 5 лет); *2* – поверхность скольжения участка борта карьера до отсыпки отвала, $к_{зу}$=1,2 ($Т_{ст}$ до 10 лет); *3* – поверхность скольжения участка борта карьера после отсыпки отвала, $к_{зу}$=1,2 ($Т_{ст}$ более 10 лет)

11,3 млн $м^3$, сформировать в отработанной части карьера внутренний пригружающий отвал объемом 11 млн $м^3$ и сократить приведенное расстояние транспортирования вскрыши в 2,5 раза по сравнению с транспортированием во внешние отвалы (рис. 2).

Сокращение объемов вскрышных работ, снижение приведенного расстояния транспортирования вскрыши, а также меньшее, по сравнению с проектом реконструкции. вовлечение в технологический процесс количества горнотранспортного оборудования позволит получить экономический эффект в размере 404,6 млн руб. за период с 2004 по 2018 гг.

Коротко об авторах

Гавришев С.Е., Бурмистров К.В., Колонюк А.А. – ГОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова».