

ОПРЕДЕЛЕНИЕ УГЛОВ УСТОЙЧИВЫХ ОТКОСОВ ОТКРЫТО-ПОДЗЕМНОГО ЯРУСА

У статті запропонована методика визначення кутів стійких укосів відкрито-підземного ярусу. Розроблено графо-аналітичний метод їх визначення. Наведені приклади крутих укосів бортів відкрито-підземного ярусу на рудниках світу.

DETERMINATION OF CORNERS SUSTAINABLE SLOPES OPEN-UNDERGROUND LAYER

The paper proposed a method of determining the angles of stable slopes open-underground level. A graphical-analytical method to determine them. Examples of the steep slopes of the sides of open-storey underground in the mines of the world.

Для определения предельной устойчивости откосов ОПЯ были использованы различные методы. На основе апробации расчетных формул для слоистых руд сделаны следующие выводы. Если угол падения рудных слоев $\varphi_p > 45^\circ$, то угол откоса ОПЯ должен быть равным φ_p . Это условие приемлемо для лежащего бока залежи.

В этом случае

$$h_{\text{ОПЯ}} = H_{90} \left(\frac{1}{1 - \text{ctg } \alpha_y \cdot \text{tg } \varphi_p} \right), \quad (1)$$

где $h_{\text{ОПЯ}}$ – глубина ОПЯ, м; α_y – угол устойчивого откоса ОПЯ, град; φ_p – угол сдвига по контактам рудных слоев, град; H_{90} – высота вертикальной трещины отрыва, м.

Значение φ_p определяется по формуле

$$\varphi_p = \arctg \left(\text{tg } \rho + \frac{K_p}{\sigma_n} \right), \quad (2)$$

где ρ – угол внутреннего трения по наслоению, град; K_p – величина сцепления по наслоению, МПа; σ_n – нормальное напряжение по контакту, МПа.

Со стороны всячего бока залежи при подсечке рудных контактов, т. е. $\alpha_y > \alpha_b$, высота откоса ОПЯ

$$h_{\text{ОПЯ}} = \frac{2K_p \sin \alpha_y \cos \rho}{\gamma \sin(\alpha_y - \beta) \sin(\beta - \rho')},$$

где γ – плотность руд, т/м³; ρ' – угол внутреннего трения по скальным вмещающим породам, град; β – преобладающий угол падения рудных слоев, град; α_b – угол всячего бока залежи, град.

Для условий отработки железистых кварцитов Кривбасса и КМА наиболее достоверной методикой для расчета углов устойчивых откосов ОПЯ является методика, основанная на использовании показателя сдвигаемости R_c (показатель Куликова В. В.). Преимущество данного показателя состоит в том, что он учитывает весь комплекс физико-механических свойств руд и пород непосредственно в промышленных условиях действующих карьеров – влагоемкость, трещиноватость, действие взрывных работ и атмосферных осадков, длительность стояния нерабочих бортов и т. п. На основе многочисленных лабораторных, экспериментальных и промышленных исследований получена корреляционная зависимость между показателем R_c , измеряемом в метрах, и коэффициентом крепости кварцитов f :

$$R_c = 11,28f . \quad (3)$$

Основываясь на данном показателе устойчивости, выведена эмпирическая зависимость для определения в метрах предельной глубины ОПЯ при открыто-подземной разработке железистых кварцитов:

$$h_{\text{ОПЯ}} = \sqrt{0,46R_c \cdot \text{Ш}_3} , \quad (4)$$

где Ш_3 – средняя ширина залежи, м.

На основе приведенных зависимостей выведены эмпирические формулы для определения углов устойчивых откосов ОПЯ при их симметричном расположении и различной крепости обрабатываемых руд:

$$\alpha_y = \text{ctg}(0,00301 h_{\text{ОПЯ}}) \quad (5)$$

при $f = 8 \dots 9$,

$$\alpha_y = \text{ctg}(0,00273 h_{\text{ОПЯ}}) \quad (6)$$

при $f = 10 \dots 12$,

$$\alpha_y = \text{ctg}(0,00258 h_{\text{ОПЯ}}) \quad (7)$$

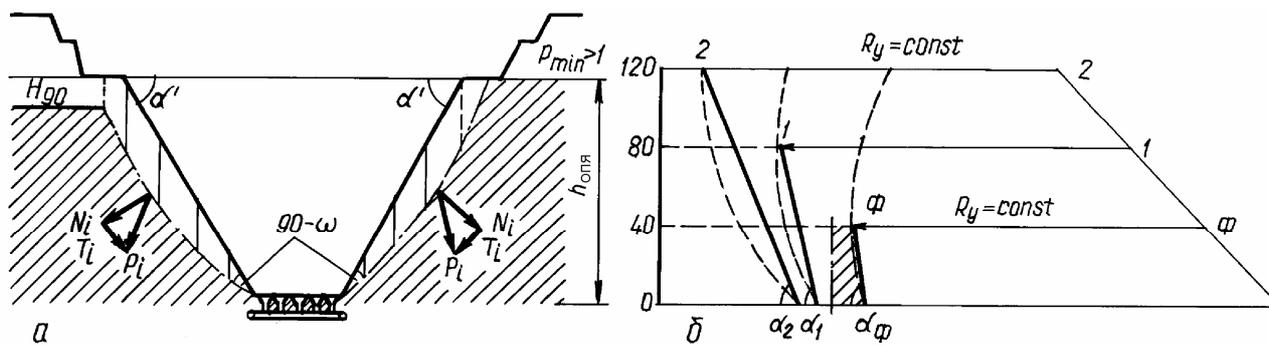
при $f = 13 \dots 14$,

$$\alpha_y = \text{ctg}(0,00246 h_{\text{ОПЯ}}) \quad (8)$$

при $f = 15 \dots 16$,

$$\alpha_y = \text{ctg}(0,00240 h_{\text{ОПЯ}}) \quad (9)$$

при $f = 17 \dots 19$.



a – по методу алгебраического сложения сил на участке призм активного давления и упора;
α – угол откоса борта открыто-подземного яруса, град.; *ρ* – угол внутреннего трения, град.;
ω – угол наклона поверхности скольжения в верхней части борта, град.;
б – по методу А. Д. Черных

Рис. 1 – Схемы к расчету устойчивости нерабочих бортов открыто-подземного яруса:

Для сравнения углов откосов открыто-подземного яруса, полученных по различным методикам, приведем пример их расчета по методике ВНИМИ применительно к Анновскому месторождению кварцитов. Расчет устойчивых углов откосов производился с учетом коэффициента запаса устойчивости, равного 1,3.

Сила сцепления коренных пород в массиве, согласно ВНИМИ, определялась по формуле

$$C_m = C_k \lambda + C'_1 (1 - \lambda), \quad (10)$$

где $\lambda = \text{const}$ – коэффициент структурного ослабления; C_k – сила сцепления пород по контактам, МПа; C'_1 – сила сцепления пород в образце, МПа.

Расчет устойчивости бортов производился по графику плоских откосов и расчетной схеме ВНИМИ при следующих характеристиках железистых кварцитов Анновского месторождения: $C_k = 10$ МПа, угол внутреннего трения $\rho = 26^\circ$, $\gamma = 3$ т/м³ (рис. 1 *a*). При заданном угле $\alpha' = 65^\circ$ и высоте борта карьера $H = 450$ м по графику зависимости между высотой откоса и его углом определим параметры борта. Для этого найдем высоту вертикальной трещины отрыва

$$H_{90} = \frac{20 \cdot C_k}{\gamma} \text{ctg}(45 - 0,5\rho) \quad (11)$$

и, подставив численные значения, получим:

$$H_{90} = \frac{20 \cdot 10}{3} \text{ctg}(45 - 13) = 106 \text{ м.}$$

Вычислим условную высоту борта карьера:

$$H' = \frac{H}{H_{90}} = \frac{450}{106} = 4,2 \text{ м.} \quad (12)$$

Расчеты, полученные для уступов по породам и железистым кварцитам лежачего бока залежи высотой 100 м, показали, что при угле $67-69^\circ$ борт сохраняет устойчивое состояние. Это видно из следующего расчета:

$$H_{90} = \frac{20 \cdot 21}{3,4} \operatorname{ctg}(45 - 13) = 197 \text{ м},$$

$$H' = \frac{450}{197} = 2,3 \text{ м},$$

а угол устойчивого откоса открыто-подземного яруса составил 68° ; при этом верхняя часть поверхности скольжения лежачего бока совпадала с напластованием, а ниже имела круглоцилиндрическую поверхность. Угол перелома поверхности на пересечении контактов составил 110° . Расчет производился методом многоугольника сил по каждому блоку. Установлено, что при угле падения кварцитных слоев $\beta = 70...75^\circ$ угол устойчивого откоса борта карьера глубиной 450 м, включая глубину ОПЯ, составляет 41° . При $\beta > 75^\circ$ угол устойчивости по скальным породам возрастает до 52° .

Для построения устойчивых откосов высоких уступов разработан *графоаналитический метод*, основанный на фактическом состоянии рудных уступов на карьерах. Данный метод предполагает переход от фактического состояния карьерных уступов или сплошных участков бортов карьера без берм к прогнозируемому состоянию уступов значительной высоты с использованием кривой скольжения с постоянным значением радиуса r_y (рис. 1 б).

Преимущество данного метода заключается в том, что прогнозная оценка построенных устойчивых откосов высоких уступов основана на учете таких факторов, как влияние буровзрывных работ, трещиноватость, крепость, влагоемкость, т. е. практически всех факторов, влияющих на устойчивость рудного массива в производственных условиях.

Суть метода состоит в следующем. Вначале строят в масштабе карьерный уступ с фактическими параметрами, который длительное время в карьере находится в устойчивом состоянии. Целесообразно выбор уступа осуществлять с максимально возможными параметрами – высотой 15–40 м и максимальным значением угла ($85-90^\circ$). Затем из точки c_1 , находящейся на уровне верхней бровки уступа, строят циркулем возможную линию скольжения ФФ, проходящую через верхнюю и нижнюю бровки уступа. После установления значения радиуса кривой r_y приступают к построению устойчивых откосов уступов с искомой высотой. Радиус кривой для одного типа руд будет величиной постоянной, независимо от высоты уступа. Например, для железистых кварцитов $r_y = 18,5$ см при масштабе 1:1000.

На последующих этапах для установления устойчивого состояния уступа высотой, например, 100 м под этим же радиусом проводят кривую скольжения через верхнюю и нижнюю бровки и соединяют их прямой. Угол, образованный

прямой и горизонталью, и есть угол устойчивого откоса.

Данный метод очень прост, но обладает исключительной достоверностью, потому что учитывает фактическое состояние уступов на карьерах.

Для оценки устойчивости бортов других карьеров необходимо учитывать напряженно-деформированное состояние обнаженного горного массива. С этой целью были проведены исследования по определению напряженного состояния горных пород в бортах *звукометрическим методом* с помощью геофонов (пьезоэлектрических датчиков), который нашел широкое применение на рудниках Кривбасса. С помощью геофонов нельзя определить абсолютную величину напряжений в горных породах, но можно судить, возникают ли в горных породах напряжения, близкие к разрушающим.

Принцип действия звукометрического метода заключается в том, что с помощью геофонов улавливаются возникающие в горных породах мельчайшие разрушения. В горных породах при нагрузке, равной 30–50 % разрушающей, появляются звуки с частотой 20–30 раз в минуту. Разрушение образцов начинается при частоте звуков более 80 раз в минуту. Следовательно, по количеству звуков в минуту можно судить о напряженности горных пород.

Звукометрические замеры производили на Анновском карьере Северного ГОКа соответственно в 25 пунктах наблюдений. Установлено, что частота звуков находилась в диапазоне 1–9 раз в минуту. При указанной частоте коэффициент запаса устойчивости равен 2,4–3,6. Обнажения, коэффициент запаса устойчивости которых $n_y > 1$, считаются устойчивыми. Следовательно, нерабочие борта Анновского карьера находятся в устойчивом состоянии со значительным резервом устойчивости.

Чрезмерная длина ряда карьеров до некоторой степени снижает устойчивость их бортов. Это объясняется тем, что у бортов карьера значительной протяженности возникают растягивающие напряжения, которые уменьшают сопротивляемость пород общему процессу их сдвижения и поперечному срезу, так как горная порода на растяжение работает в 8–10 раз хуже, чем на сжатие.

Практика показывает, что одной из главных причин сползания бортов карьеров даже с пологими углами (10–16°) является слабая осушенность пород и особенно наличие напорных вод: слоистые породы смачиваются водой по контактными поверхностями и мало сопротивляются срезу. Такие оползни на карьерах происходят весной после снеготаяния или обильных осенних дождей. Поэтому необходим тщательный дренаж горных пород и своевременное принятие мер по предупреждению попадания талых вод и осенних дождей в карьер и горный отвод.

Снижают устойчивость бортов карьеров и мощные взрывы, которые сильно сотрясают породы лежачего и висячего боков. Следовательно, если строго учитывать отрицательные факторы, ослабляющие борта карьера, и принимать меры по недопущению их появления, углы откосов бортов карьеров КМА и Кривбасса можно уверенно принимать более крутыми.

Практикой установлено, что при благоприятных природных условиях устойчивые углы откосов бортов могут быть очень крутыми без оползневых явлений и при большой глубине карьеров. Это наблюдается при разработке стол-

бообразных крутопадающих рудных залежей, когда борт в плане имеет конусо- или эллипсообразную форму. В этом случае по контурам замкнутого пространства действуют только сжимающие напряжения, которые позволяют сохранять длительное устойчивое состояние бортов при крутых углах ($55-85^\circ$). Практическими примерами формирования открытых выработанных пространств с крутыми бортами являются кимберлитовые рудники ЮАР – Балтфонтейн, Ягерсфонтейн, Премьер, а также рудники им. Ленина (Украина), Хаммаслахти (Финляндия), Страсса (Швеция). Все это подтверждает, что если нет специфических отрицательно влияющих факторов, углы откосов открытых выработанных пространств могут быть очень крутыми.