МИНИСТЕРСТВО ЦВЕТНОЙ МЕТАЛЛУРГИИ СССР
Управление кадров и учебных заведений
ЦЕНТРАЛЬНЫЙ ИНСТИТУТ ТЕХНИЧЕСКОГО ОБУЧЕНИЯ
И ПОВЫШЕНИЯ КВАЛИФИКАЦИИ ИТР

РАСЧЕТ УСТОЙЧИВОСТИ БОРТОВ КАРЬЕРОВ

МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ

Свердловск
1978

ЦЕНТРАЛЬНЫЙ ИНСТИТУТ ТЕХНИЧЕСКОГО ОБУЧЕНИЯ
И ПОВЫШЕНИЯ КВАЛИФИКАЦИИ ИТР

Кафедра горного дела и обогащения

РАСЧЕТ УСТОЙЧИВОСТИ БОРТОВ КАРЬЕРОВ

Методические рекомендации
по курсу
"Новые методы производства
маркшейдерских работ"

Свердловск
1978

Расчет устойчивости бортов карьеров
Методические рекомендации

Автор и.о.доцента кафедры горного дела и обогащения
Центрального института, канд.техн.наук А.Г.Бахарев

Ответственный за выпуск Г.И.Щетинин

Подписано в печать 15/У 1978 г. Формат бумаги 60x84 1/16
Объем 2 печ.л. Тираж 300 Заказ 254 Бесплатно

Ротапринт Центрального института повышения квалификации ИТР
Свердловск, Гоголя, 25

ВВЕДЕНИЕ

При разработке полезных ископаемых открытым способом большое значение имеет устойчивость откосов уступов и бортов карьеров, так как она определяет безопасность и экономичность отработки месторождения и обеспечивает ритмичность работы горного предприятия в целом.

При проектировании и эксплуатации горного предприятия, разрабатывающего месторождение открытым способом, маркшейдерско-геологическая служба решает широкий круг вопросов, связанных с механикой горных пород, их поведением в обнажениях различной конфигурации. Знание работниками маркшейдерско-геологической службы механизма процессов, происходящих в массиве горных пород при ведении работ по вскрытию и добыче полезного ископаемого и нарушающих природное равновесие, существенным образом влияет на выбор рациональных способов и схем отработки месторождения.

В целях оказания помощи специалистам, изучающим курс "Новые методы производства маркшейдерских работ", кафедрой горного дела и обогащения Центрального института разработаны настоящие методические рекомендации к разделу УП "Устойчивость бортов карьеров" данного курса.

В рекомендациях излагаются основные положения об устойчивости горных пород в уступах и бортах карьеров, методы расчета устойчивости и последовательность изучения раздела.

Раздел УП. УСТОЙЧИВОСТЬ БОРТОВ КАРЬЕРОВ

Содержание раздела

1. Современное представление о механике горных пород, устойчивости бортов карьеров и напряженном состоянии горных работ.
2. Физико-механические свойства горных пород.
3. Деформирование бортов карьеров и наблюдение за ним.
4. Расчет устойчивости бортов карьеров, методы расчета и расчетные характеристики.

Изучение раздела "Устойчивость бортов карьеров" строится на знании основных положений механики горных пород. Особое внимание при изложении материала следует обратить на зависимость свойств среды /горных пород/ от характера нагружения и вида деформирования и разрушения, так как в зависимости от этих факторов горные породы можно рассматривать как среду вязкую, пластичную, упругую, хрупкую, сыпучую или комбинированную. Кроме того, по механическим свойствам горные породы рассматриваются как изотропная, анизотропная и квазиизотропная среда. Многообразие механических свойств пород связано с их составом, структурными и текстурными особенностями, здесь большое значение имеют трещиноватость и слоистость.

Говоря об устойчивости откосов следует отметить, что устойчивость пород рассматривается как слоистая трещиноватая среда, не допускающая растягивающих напряжений, к которой в механическом отношении применимы законы "сыпучей среды". Определение очертаний откосов горных пород /уступов и бортов / представляет собой частный случай теории предельного равновесия "сыпучей среды".

Основными свойствами горных пород, определяющими их устойчивость в откосах, являются прочность, степень трещиноватости и ее ориентировка, наличие поверхностей ослабления большего протяжения, выветриваемость, способность к набуханию и разуплотнению, склонность к пластическим деформациям.

Поведение горных пород вблизи искусственного или естественного обнажения определяется теми напряжениями и деформациями, которые возникают при образовании этих обнажений. Возрастание напряжений может вызвать деформирование или разрушение пород, поэтому, говоря о напряженном состоянии пород , распределении напряжений внутри массива, характере разрушения массива, особо следует остановиться на теории прочности и разрушения [1, 2] .

В любой внутренней точке массива откоса действуют внешние силы: объемные и поверхностные. Объемными силами являются силы тяжести, гидродинамического давления, сейсмические и сейсмовзрывные; поверхностными силами - внешние нагрузки в виде веса оборудования, поверхностных сооружений и т.д.

Действию внешних сил противостоят внутренние силы, определяемые прочностью пород. Условие предельного равновесия /массив находится на пределе устойчивости/ имеет место, когда внешние нагрузки равны внутренним силам.

Далее следует объяснить, что разрушение горной породы происходит по определенным площадкам, на которых под действием внешних сил развиваются касательные напряжения τ , превышающие сопротивление сдвигу по этим площадкам, которое определяется прочностными свойствами материала. Максимальные касательные напряжения возникают на площадках, наклоненных под углом $45^0 - \rho/2$ к направлению действия внешних сил / ρ° - угол внутреннего трения/.

Условие, определяющее предельное равновесие напряженного материала /равенство сдвигающих и удерживающих сил/ на площадке единичной площади, записывается в виде

$$\tau = \sigma_n \cdot tg\rho + K, \qquad /1/$$

где $\tau = \frac{1}{2}\sigma_1 \sin 2\alpha$ - касательное напряжение /сдвигающее/ на любой произвольной площадке;

$\sigma_n = \sigma_1 \cdot \sin^2\alpha$ - нормальное напряжение;

σ_1 - напряжение на площадке, нормальной к направлению действия внешней силы;

α - угол между площадкой и направлением действия силы;

$tg\rho = f$ - коэффициент трения;

ρ - угол внутреннего трения /характеристика прочности/;

K - сцепление /характеристика прочности/.

В зависимости от комбинации сил, действующих в массиве на элементарный объем материала, напряженное состояние может быть линейным /одноосным/, когда действующие силы направлены по одной прямой; плоским /двухосным/, когда действующие силы направлены по взаимно перпендикулярным направлениям; объемным /трехосным/ , когда силы действуют по трем взаимно перпендикулярным направлениям. Горные породы внутри массива всегда находятся в объемном напряженном состоянии.

При одноосном нагружении разрушающие нагрузки минимальные , при трехосном - максимальные.

Как видно из уравнения предельного равновесия /1/, сопротивление материала действию касательных напряжений зависит от ха-

рактеристик прочности K и ρ°, а также от величины нормального напряжения σ_n, которая определяется объемным весом пород γ, поскольку

$$\sigma_1 = \frac{P}{S} = \frac{H \cdot \gamma}{S}, \qquad /2/$$

где γ - объемный вес пород над рассматриваемой площадкой;

H - высота столба пород;

S - площадь поверхности, на которой распределяется вес столба пород.

Таким образом, основными характеристиками, определяющими возможное напряженное состояние пород и их способность противостоять действию внешних сил, являются объемный вес γ / т/м3 ; г/см3/, сцепление K /т/м2; кг/см2/, угол внутреннего трения ρ°, которые объединяются одним понятием - физико-механические свойства /характеристики/ пород. Такие физико-механические свойства, как влажность, пористость, влагоемкость, угол трения ρ', сцепление K' по контактам и другие, учитываются в различных горно-геологических условиях при расчетах устойчивости бортов карьеров.

Для скальных пород определяющими физико-механическими характеристиками являются γ; K; K'; ρ° и ρ'. Определение физико-механических характеристик производится в основном в лабораторных условиях по методике, которая подробно рассматривается в [2, 3, 4]. Необходимо также остановиться на принятой в настоящее время методике отбора образцов для лабораторных испытаний.

При изучении физико-механических свойств пород особо следует уделить внимание правильному пониманию вопросов долговременной и динамической прочности горных пород [5, 6], что значительно облегчит в дальнейшем понимание основных принципов расчета устойчивости горных пород в уступах и бортах карьеров.

Изучение вопросов деформирования пород в прибортовой зоне имеет важное значение, так как знание характера и величин деформаций в различных горно-геологических и горнотехнических условиях отработки позволяет определить причины возникновения деформаций и предусмотреть мероприятия по предупреждению опасных нарушений устойчивости элементов борта. Изучение деформирования уступов и бортов карьеров проводится с помощью высокоточных марк-

шейдерских наблюдений на наблюдательных станциях. Закладка станций и наблюдения проводятся до начала отработки карьера. Наблюдательные станции располагаются, как правило, на тех участках, где по предварительному изучению горно-геологических условий зафиксированы ослабления массива /зоны выветривания, выщелачивания, метаморфизма, дробления, тектонических нарушений, интенсивной трещиноватости и т.д./. Следует отметить, что наиболее положительные результаты дают наблюдения, которые проводятся по определенной программе. Поэтому при организации наблюдательных станций необходимо определить цели и задачи наблюдений и отразить их в проекте станций. Постановке задач наблюдений предшествует изучение видов деформаций бортов карьеров /осыпи, обрушения, оползни, оплывины, просадки/, причин их возникновения и факторов, определяющих устойчивость горных пород в откосах.

Основными факторами, определяющими устойчивость уступов и бортов карьеров являются :

г е о л о г и ч е с к и е: физико-механические свойства пород, тектоническое строение, структура, характер и степень трещиноватости, выветриваемость, способность к набуханию и разуплотнению;

г и д р о г е о л о г и ч е с к и е: обводненность, подток атмосферных и грунтовых вод, сезонные изменения обводненности, наличие напорных вод и т.д.;

к л и м а т и ч е с к и е: количество атмосферных осадков и их распределение по сезонам, температурный режим и т.д.;

г о р н о т е х н и ч е с к и е: взрывные работы, влияние тяжелого горнотранспортного оборудования, подработка откосов подземными горными работами при совместной отработке месторождений и т.д.

При изучении методов построения наблюдательных станций следует рассмотреть факторы, которые влияют на выбор типов реперов, схем расположения станций и позволяют получать величины деформаций бортов с минимальными затратами времени при требуемой точности. Далее следует уделить внимание необходимой и достаточной точности наблюдений и выбору инструментов и приборов, особо рассмотреть такие вопросы, как составление проектов наблюдательных станций [7], методы съемки и оценки нарушений уступов и бортов

карьеров, обработка результатов наблюдений с целью получения вертикальных и горизонтальных сдвижений и деформаций, построение графиков сдвижений, деформаций и векторов смещения на наблюдательных станциях.

Основными задачами изучения деформирования откосов бортов карьеров являются: определение величин деформаций откосов и установление оптимальных параметров откосов, обеспечивающих их устойчивость в течение необходимого срока; предупреждение оползневых явлений и обрушений, разработка противодеформационных мероприятий.

Чтобы противодеформационные мероприятия были наиболее эффективны, следует: систематически проводить визуальное обследование состояния элементов откосов бортов, изучение геологических и гидрогеологических условий месторождения; выявлять участки с неблагоприятной ориентировкой трещиноватости и пониженной прочностью пород, где могут развиваться опасные деформации; тщательно документировать все видимые деформации на откосе, изучать причины их возникновения, степень опасности и возможность развития на других участках; проводить инструментальные наблюдения за деформированием уступов, бортов и отвалов; контролировать соблюдение проектных параметров уступов, бортов и отвалов, корректировать углы откосов с учетом изменения геологических и гидрогеологических условий.

Объем работ определяется на предприятии, согласуется с Госгортехнадзором и вышестоящей организацией, общее руководство комплексом работ осуществляется главным инженером предприятия. Инструментальные наблюдения за деформированием откосов проводятся маркшейдерско-геологической службой предприятия или специализированными организациями /институт "Унипромедь", ВНИМИ и др./ с целью установления границ распространения и видов деформаций пород откосов [8]; определения скорости деформирования и критических величин деформаций, предшествующих началу активной фазы деформирования, и предварительного расчета развития деформаций в условиях понижения горных работ.

Для инструментальных наблюдений за деформированием откосов закладываются специальные наблюдательные станции, состоящие из двух или более профильных линий реперов /рабочих и опорных/, на-

правление которых определяется, исходя из задачи наблюдения. Закладка наблюдательных станций производится по заранее разработанному проекту в местах, где возникновение деформаций наиболее вероятно. Проект состоит из плана наблюдательной станции /М 1 : 1000, 1 : 2000/, геологических разрезов вдоль проектируемых наблюдательных линий и пояснительной записки с обоснованием целей наблюдений.

На плане станций наносятся: состояние горных работ и проект их развития; сооружения на бортах карьера; расположение наблюдательных линий; рельеф местности.

На геологических разрезах наносятся: границы литологических разностей пород; степень и характер трещиноватости каждой литологической разности; дизъюнктивные нарушения и тектонические трещины с указанием элементов залегания; результаты определения физико-механических свойств пород литологических разностей /γ, $W\%$, $K_м$, K', $\rho_м$ и ρ'/.

В пояснительной записке указываются краткая горно-геологическая и горнотехническая характеристики, цель наблюдений и методика закладки наблюдательной станции, объем работ по закладке, методика наблюдений, необходимая точность получения результатов, приборы и инструменты, последовательность и периодичность наблюдений.

Опорные пункты профильных линий должны быть удалены за зону влияния горных работ на расстояние не менее 1,5H от верхней границы отработки. Опорных реперов на конце профильной линии должно быть не менее трех, а расстояния между ними не менее 20 м. Расстояние между рабочими реперами определяется условиями закладки /профилем борта, шириной площадок и т.д./ и может изменяться от 5 до 30 м. В зоне возможных деформаций сгущение реперов должно быть максимальным.

Глубина заложения реперов h определяется исходя из глубины промерзания /h_{max}/, высоты якоря репера /a = 0,4÷0,5 м/ и ошибки определения глубины промерзания /в/

$$h = h_{max} + a + b, \qquad /3/$$

но не менее 1,5 м для слабых пород и 0,5 ÷ 0,7 м для скальных крепких пород. В качестве рабочих реперов на срок до 5 лет можно использовать забивные металлические реперы /рис.1а/ ,

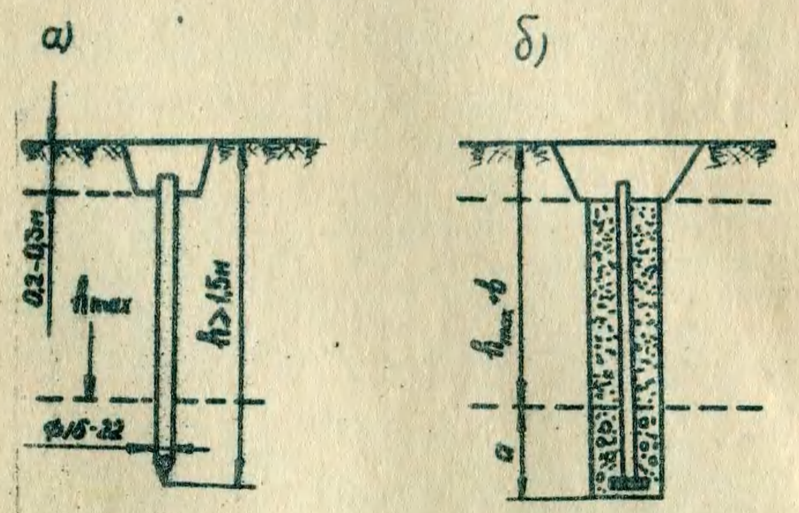


Рис.1. Типы реперов: а) - забивной, б) - бетонированный в скважине

опорные реперы следует закладывать по схеме рис. 1б.

На наблюдательных станциях производят определение отметок реперов путем геометрического или тригонометрического нивелирования, расстояний между реперами /вдоль профильной линии/ путем рулеточных замеров или с использованием высокоточных дальномеров, а также замер нарушений сплошности поверхности вдоль линий и в непосредственной близости от них.

Наблюдательные станции должны быть привязаны к рудничной опорной сети. Относительная ошибка привязок в плане может быть не более 1 : 8000, а средняя ошибка измерения углов ± 8" [7] Высотная привязка производится нивелированием II класса, при этом ошибка прямого и обратного хода не должна превышать

$$\Delta h \leq \pm 5\sqrt{L}, \qquad /4/$$

где L - длина хода в км.

При геометрическом нивелировании линий невязка замкнутых или прямого и обратного ходов не должна превышать $\pm 2\sqrt{n}$ или $\pm 6\sqrt{L}$, где n - число штативов. Для определения отметок реперов используются нивелиры с увеличением трубы не менее 25^{x} и ценой деления уровня при трубе не более 20" на 2 мм. При тригонометрическом нивелировании следует использовать теодолиты с ценой деления вертикального круга 10" и менее. Высотные отметки реперов должны быть получены дважды в каждой серии наблюдений - из прямого и обратного ходов или при двух горизонтах инструмента.

Расстояния между реперами измеряются стальными компарированными рулетками на весу, с постоянным натяжением, равным натяжению при компарировании /10 кг/. При измерении длин определяется температура рулетки с точностью ± 1°. Расхождение прямого и обратного ходов не должно быть ниже 1:10000.

После обработки результатов измерения длин интервалов по профильным линиям и нивелирования реперов составляются ведомости горизонтальных сдвижений, оседаний, горизонтальных и вертикальных деформаций [7] . При обработке результатов измерения расстояний между реперами в измеренные длины вводятся поправки за приведение к горизонту, температуру, провес и компарирование, затем строятся графики горизонтальных и вертикальных сдвижений и деформаций, а на разрезах по профильным линиям - векторы смещений в вертикальной плоскости XZ.

Вектор смещения $B = \sqrt{\Delta h^2 + \Delta L^2}$, /5/

где Δh - величина оседания;

ΔL - величина горизонтального сдвижения репера.

Вектор сдвижения, определяющий величину и направление смещения репера, строится графически путем откладывания в удобном масштабе величин горизонтального и вертикального смещения и их геометрического суммирования. При возникновении на карьере обрушений или оползней производят тахеометрическую съемку по периметру участков, охваченных смещением в стороны выработанного пространства, и по профилям вкрест простирания борта или уступа. Результаты съемок обрушившихся или оползших участков учитываются при определении механических свойств пород по поверхностям обру-

шения путем обратного расчета.

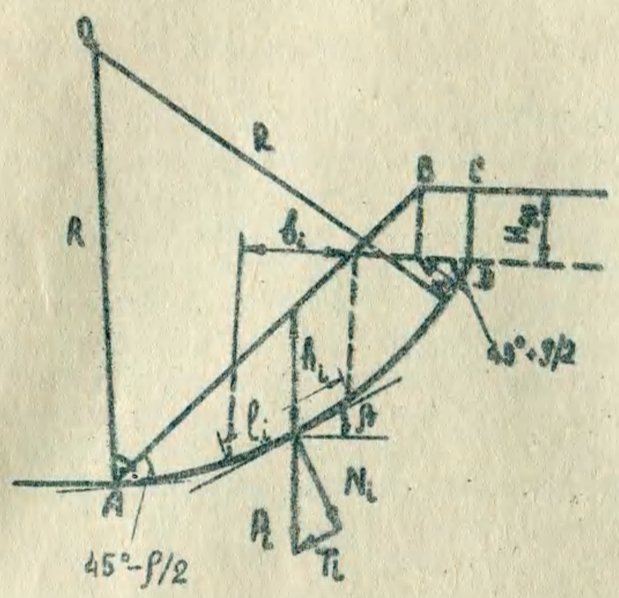
Математической основой расчета устойчивости откосов является теория предельного равновесия грунтовых масс или так называемой "сыпучей среды", которая рассматривает две группы задач, отличающихся методами решения [1] :

задачи, в которых условие предельного равновесия удовлетворяется в каждой точке какой-то области среды;
задачи, в которых условие предельного равновесия удовлетворяется только по внутренней границе области, находящейся в предельном равновесии.

Метод решения первой группы задач называется методом предельного напряженного состояния сыпучей среды, а метод решения второй группы - методом предельного равновесия сыпучей среды. Метод предельного напряженного состояния используется при расчете параметров вогнутых и выпуклых откосов; следует отметить, что этот метод непригоден при расчете откосов в слоистой анизотропной среде и аппарат формул, используемых при расчетах, очень сложен. В то же время однако метод является наиболее обоснованным и широко применяется при разработке упрощенных инженерных методов расчета.

Вторая группа задач используется при решении вопросов устойчивости откосов наиболее часто, так как они дают удовлетворительное решение и при неоднородной среде. Решают вторую группу задач методами: алгебраического сложения сил по круглоцилиндрической или монотонной криволинейной поверхности; многоугольника сил; комбинацией данных методов и метода предельного напряженного состояния.

Метод алгебраического сложения сил по круглоцилиндрической поверхности основан на допущении, что поверхность возможного скольжения неустойчивой части массива откоса является круглоцилиндрической, а ограниченный ею и дневной поверхностью массив является "жестким клином". Смещение массива рассматривается как вращение "жесткого клина" вокруг центра, являющегося центром кругового цилиндра, поверхность которого является поверхностью скольжения /рис.2/. Если тело "жесткого клина" разделить на вертикальные столбики, равной ширины b_i, и определить вес каждого столбика, то величина P_i будет представлять собой вертикальную нагрузку на основание этого столбика.



$$\Sigma T_i \leqslant \Sigma N_i \cdot tg\rho + K \cdot \Sigma l_i$$

Рис.2. Схема определения удерживающих и сдвигающих сил по криволинейной поверхности скольжения

$$P_i = b_i \cdot h_i \cdot \gamma , \qquad /6/$$

где h_i - средняя высота столбика, м;
b_i - ширина столбика, м;
γ - объемный вес пород, т/м^3.

Основанием каждого столбика в данном случае является часть круглоцилиндрической поверхности скольжения. Вертикальную силу веса P_i на основании каждого столбика можно разложить на две составляющие - нормальную N_i и касательную T_i , в этом случае

$$N_i = P_i \cdot \cos\beta_i \quad \text{и} \quad T_i = P_i \cdot \sin\beta_i ,$$

где β_i - угол наклона основания столбика.

Исходя из уравнения /1/, можно сказать, что откос будет находиться в предельном состоянии в том случае, когда сумма сдвигающих касательных сил на основаниях столбиков ΣT_i, направленных в подошву откоса, будет равна сумме сил трения $\Sigma N_i tg\rho$ и

сцеплению пород вдоль всей вероятной поверхности скольжения KL

$$\Sigma T_i = \Sigma N_i \operatorname{tg}\rho + KL. \qquad /7/$$

Аналогично записывается условие предельного равновесия для любой монотонной криволинейной поверхности скольжения.

Необходимо иметь в виду, что наибольшая точность расчета методом алгебраического сложения сил по круглоцилиндрической поверхности достигается тогда, когда расчет ведется в изотропном массиве, не имеющем поверхностей ослабления с падением в сторону подошвы откоса. Положение наиболее слабой круглоцилиндрической поверхности скольжения можно построить, использовав теорию сыпучей среды [8], по которой площадки скольжения в однородной среде, где может произойти разрушение, возникают в случае, если напряжение в этой среде

$$\sigma_0 \geq 2K \cdot \operatorname{ctg}(45^\circ - \rho/2). \qquad /8/$$

Площадки скольжения к направлению наибольшего главного напряжения располагаются под углом $/45^\circ - \rho/2/$. Вдали от поверхности откоса направление главного напряжения совпадает с вертикалью, а на поверхности плоского или вогнутого откоса совпадает с ней. Значит, площадки скольжения, по которым произойдет разрушение массива при достижении им неустойчивого состояния, вдали от откоса наклонены к вертикали под углом $/45^\circ - \rho/2/$, а в основании откоса - под углом $/45^\circ - \rho/2/$ к поверхности откоса /рис.3/. Принимая, что в выражении /8/

$$\sigma_0 = H_{90} \cdot \gamma,$$

где H_{90} - вертикальная высота слоя пород, под которым напряжение равно σ_0, можно сказать, что площадки скольжения возникнут только с глубины

$$H_{90} = \frac{2K}{\gamma} \cdot \operatorname{ctg}(45^\circ - \rho/2). \qquad /9/$$

Величина H_{90} определяет допустимую высоту вертикального откоса в изотропном массиве. Из сказанного видно, что ниже глубины H_{90} угол наклона поверхности скольжения должен изменяться от угла $/45^\circ - \rho/2/$ к вертикали до угла $/45^\circ - \rho/2/$ к поверхности откоса в его основании. В [9] рекомендуется способ построения круглоцилиндрической поверхности скольжения для изотропного массива. Пусть имеется откос с контуром OAB, углом наклона α и высотой H. С учетом физико-механических свойств пород γ, K_M и ρ_M по формуле /9/ определяется величина H_{90} и от-

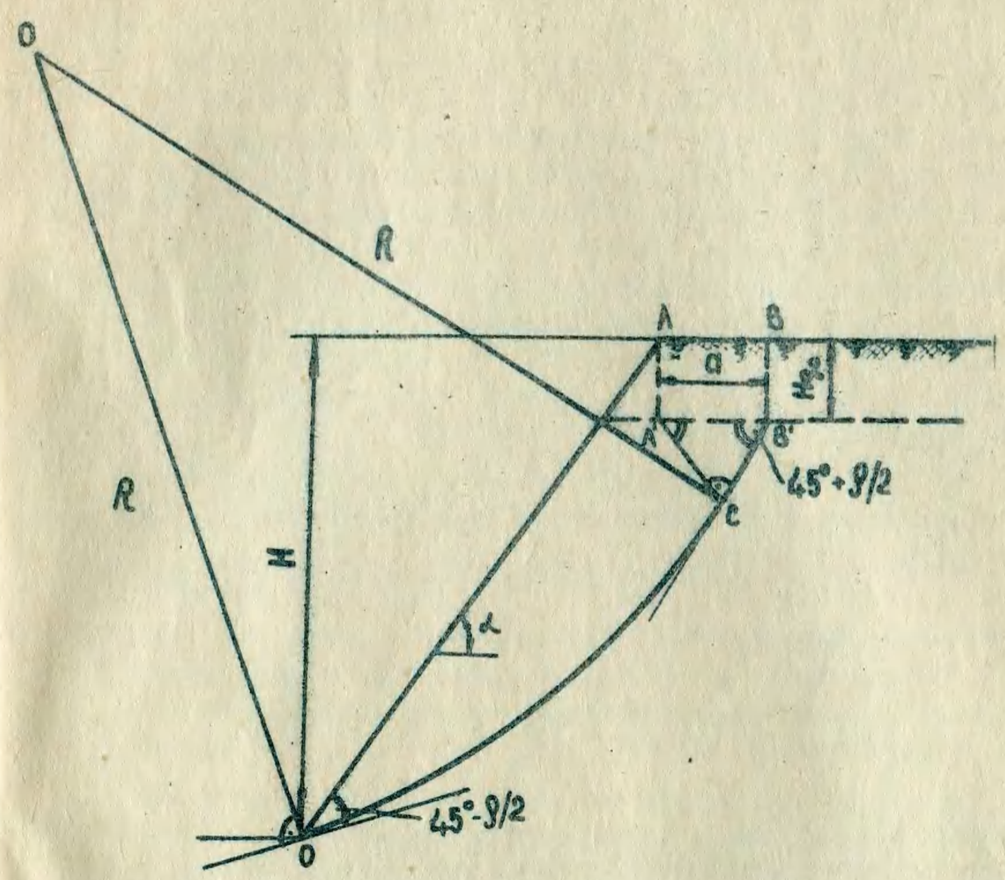


Рис.3. Схема построения круглоцилиндрической поверхности скольжения в изотропном массиве

кладывается от верхней площадки откоса вниз /рис.3/.

По формуле

$$a = \frac{2H\left[1 - \operatorname{ctg}\alpha \cdot \operatorname{tg}\frac{\alpha+\rho}{2}\right] - 2H_{90}}{\operatorname{ctg}(45^\circ - \rho/2) + \operatorname{tg}\left(\frac{\alpha+\rho}{2}\right)} \qquad /10/$$

определяется ширина призмы возможного обрушения на верхней площадке откоса /дневной поверхности/; величина a откладывается от верхней бровки откоса / точки A/. Из точек A и B проводятся вертикали до пересечения с линией глубины H_{90} /точки A' и B'/, от точек A' и B' под углом $/45 + \rho/2/$ к горизонту- линии, определяющие направление площадок скольжения второго и первого семейств,

пересекающихся в точке С.

Из точки О под углом /45° - ρ/2/ к поверхности откоса проводится линия, показывающая направление площадки скольжения первого семейства в точке О. В точках О и С восстанавливаются перпендикуляры к линиям, определяющим направление площадок скольжения. Точка пересечения перпендикуляров О является центром круглоцилиндрической поверхности скольжения. Отрезки ОО' и О'С - радиусы окружности, имеющей в точках О и С углы наклона, соответствующие углам наклона площадок скольжения в этих точках.

Аналогично определяется положение поверхности скольжения и в анизотропном откосе, при условии, что поверхности ослабления залегают таким образом, что поверхность скольжения не может с ними совпасть.

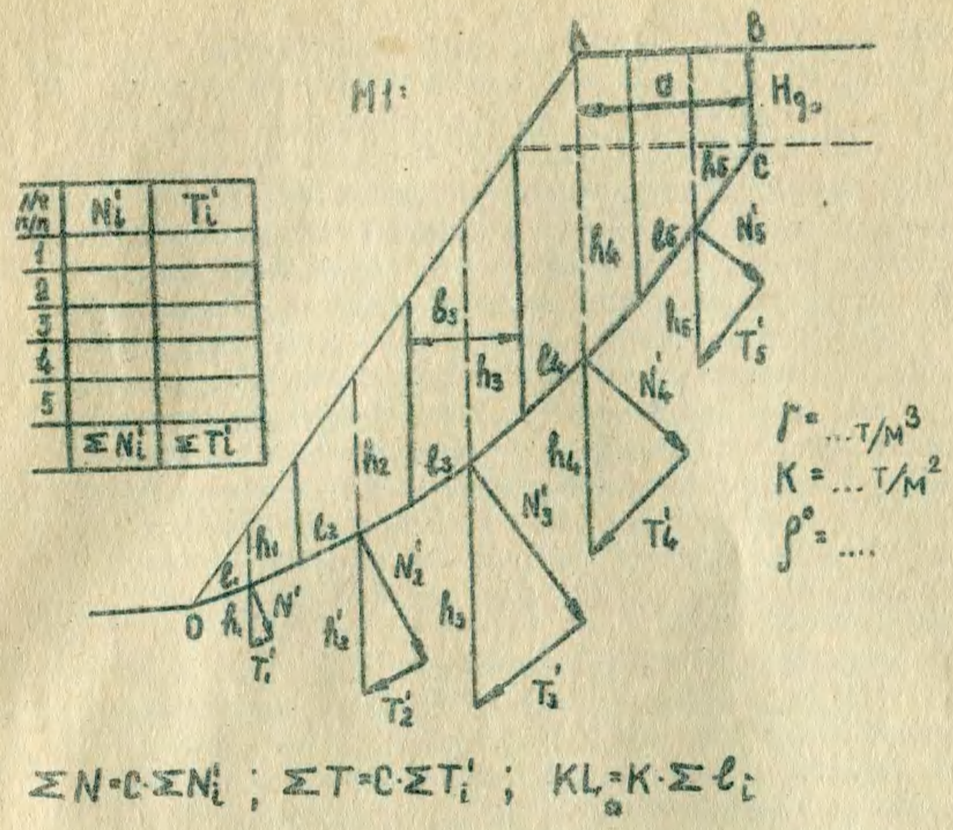
По построенной поверхности скольжения методом алгебраического сложения находятся сдвигающие и удерживающие силы, затем по формуле

$$n = \frac{\Sigma N_i \, tg\rho + KL}{\Sigma T_i} \qquad /11/$$

определяется коэффициент запаса устойчивости откоса /n/. При $n > 1$ откос устойчив, при $n = 1$ откос находится в предельном состоянии, при $n < 1$ откос неустойчив, так как сдвигающие силы больше удерживающих.

Если в массиве имеются плавные криволинейные поверхности ослабления с падением в сторону откоса, механические характеристики которых существенно меньше этих же характеристик в массиве, то поверхность скольжения частично или полностью может совпадать с одной из этих поверхностей ослабления. Устойчивость откоса по этим поверхностям определяется также методом алгебраического сложения /11/. Если таких поверхностей несколько, то проверка устойчивости откоса производится по каждой из них.

В неоднородных по прочности породах круглоцилиндрическая поверхность скольжения не является наиболее слабой и ее следует избегать. При определении сдвигающих и удерживающих сил вдоль вероятной поверхности скольжения весь откос от основания до границы призмы возможного обрушения на поверхность разбивается на вертикальные столбики равной ширины b_i /рис.4/. Вес одного такого столбика высотой 1 см на разрезе, шириной по простиранию борта 1 м составит /с учетом масштаба разреза/



№ п/п	N_i'	T_i'
1		
2		
3		
4		
5		
	$\Sigma N_i'$	$\Sigma T_i'$

Рис.4. Схема графического и численного определения сил по любой криволинейной поверхности скольжения

$$C = \frac{b_i \cdot \gamma \cdot M}{100}, \qquad /12/$$

где b_i - ширина столбика, м;

γ - объемный вес пород, т/м³;

M - знаменатель масштаба графика, на котором ведется построение.

На середине основания каждого столбика вертикально опускается отрезок, равный высоте столбика h_i, представляющей собой условный вес этого столбика. Величина h_i графически раскладывается на нормальную N_i' и касательную T_i' составляющие относительно основания столбика. Величины N_i' и T_i' заносят в специальную таблицу /рис.4/, измеряя их прямо на чертеже в сантиметрах.

Значения N_i' и T_i' суммируют и умножают на значение С, переходя от условных значений нормальных и касательных составляющих сил веса к истинным

$$\Sigma N = c \cdot \Sigma N_i' , \quad \Sigma T = c \cdot \Sigma T_i' .$$

Затем измеряется длина поверхности скольжения / от основания откоса до глубины H_{90}/ $L = \Sigma \ell_i$ и по формуле /11/ оценивается устойчивость откоса по принятой поверхности скольжения.

В практике разработки месторождений встречаются случаи, когда в массиве пород имеются одна или более прямолинейных поверхностей ослабления /трещин большого протяжения/, с которыми частично или полностью совпадает вероятная поверхность скольжения. Эта поверхность в данном случае представляет собой ломаную линию, по которой смещение массива в виде "жесткого клина" невозможно, в связи с чем возникает необходимость в учете сопротивления призмы обрушения излому по направлениям, отличным от направления смещения массива вдоль вероятной поверхности скольжения.

Излом призмы обрушения происходит по поверхностям, совпадающим с площадками скольжения второго семейства, направленным в сторону массива. Если сопротивление разрушению по площадкам второго семейства и силы взаимодействия отдельных блоков, на которые массив разрушится по этим площадкам, невозможно учесть методом алгебраического сложения сдвигающих и удерживающих сил, то расчет устойчивости откосов производится методом многоугольника сил 1 с учетом физико-механических свойств массива и поверхностей ослабления, с которыми совпадает поверхность скольжения.

Напряжения, распределенные по площадкам скольжения двух семейств, при использовании этого метода заменяются сосредоточенными силами, действующими по разделяющим смежные блоки граням: P_i - вес рассматриваемых блоков; $K_i' \ell_i$ - силы сцепления по граням блоков; R_i - реакции основания блоков, равные равнодействующей сил трения и нормальной составляющей веса блока; E_i - реакции смежных блоков на рассматриваемый блок, являющиеся равнодействующими сил трения и сцепления на боковых гранях.

Многоугольник сил строится для каждого блока.

При расчете методом многоугольника сил точность зависит от

правильности определения положения боковых границ между смежными блоками и направления реакций между ними. В условиях предельного равновесия направление реакции смежного блока или основания отклонено от нормали к границе раздела на величину угла ρ, а боковые грани смежных блоков наклонены в направлении, совпадающем с направлением второго семейства поверхностей скольжения /рис.5/.

Для определения устойчивости откоса методом многоугольника сил вначале находится площадь и вес каждого блока, его толщина принимается равной 1 м, затем исходя из сцепления в массиве $K_м$ и сцепления по поверхности ослабления K' - суммарное сцепление по каждой грани блока

$$K'\ell_1 ; K\ell_2 \cdots K\ell_n .$$

На гранях блоков строятся направления реакций, для чего проводится нормаль к грани и от нее в сторону падения грани под углом ρ или ρ' линия, определяющая направление реакции.

Рядом с профилем откоса, проверяемым на устойчивость, в удобном масштабе вертикально вниз откладывается вес верхнего блока P_3 /рис.5в/, из нижнего конца вектора P_3 параллельно направлению граней, вдоль которых они действуют, последовательно - векторы $K\ell_5$ и $K\ell_4$. Из начала вектора P_3 проводится направление реакции основания блока R_5, а из конца вектора $K\ell_4$ - направление реакции R_4. Вектор E_3, соединяющий точку пересечения R_4 и R_5 с концом вектора $K\ell_4$, есть равнодействующая сил R_4 и $K\ell_4$, по величине и направлению представляющая собой силу действия третьего /верхнего/ блока на второй /средний/.

Из точки пересечения $K\ell_4$ и E_3 вертикально вниз откладывается вес второго блока P_2, из конца вектора P_2 по соответствующим направлениям последовательно - векторы $K\ell_3$, $K\ell_2$ и направление R_2. Из точки пересечения ℓ_4 и R_5 откладывается направление R_3 и находится точка пересечения его с R_2. После нахождения E_2 производится построение для нижнего блока.

В нижнем блоке действуют четыре силы - P_1, $K'\ell_1$, R_1 и E_2. Откос находится в предельном равновесии /$n = 1$/, если сумма векторов этих сил равна 0, то есть многоугольник замкнут - конец вектора $K'\ell_1$ точно попадает на направление реакции R_1. Если вектор $K'\ell_1$ не доходит до R_1, то откос неустойчив /$n < 1$/, если пересекает R_1, то откос имеет какой-то коэффициент запаса ус

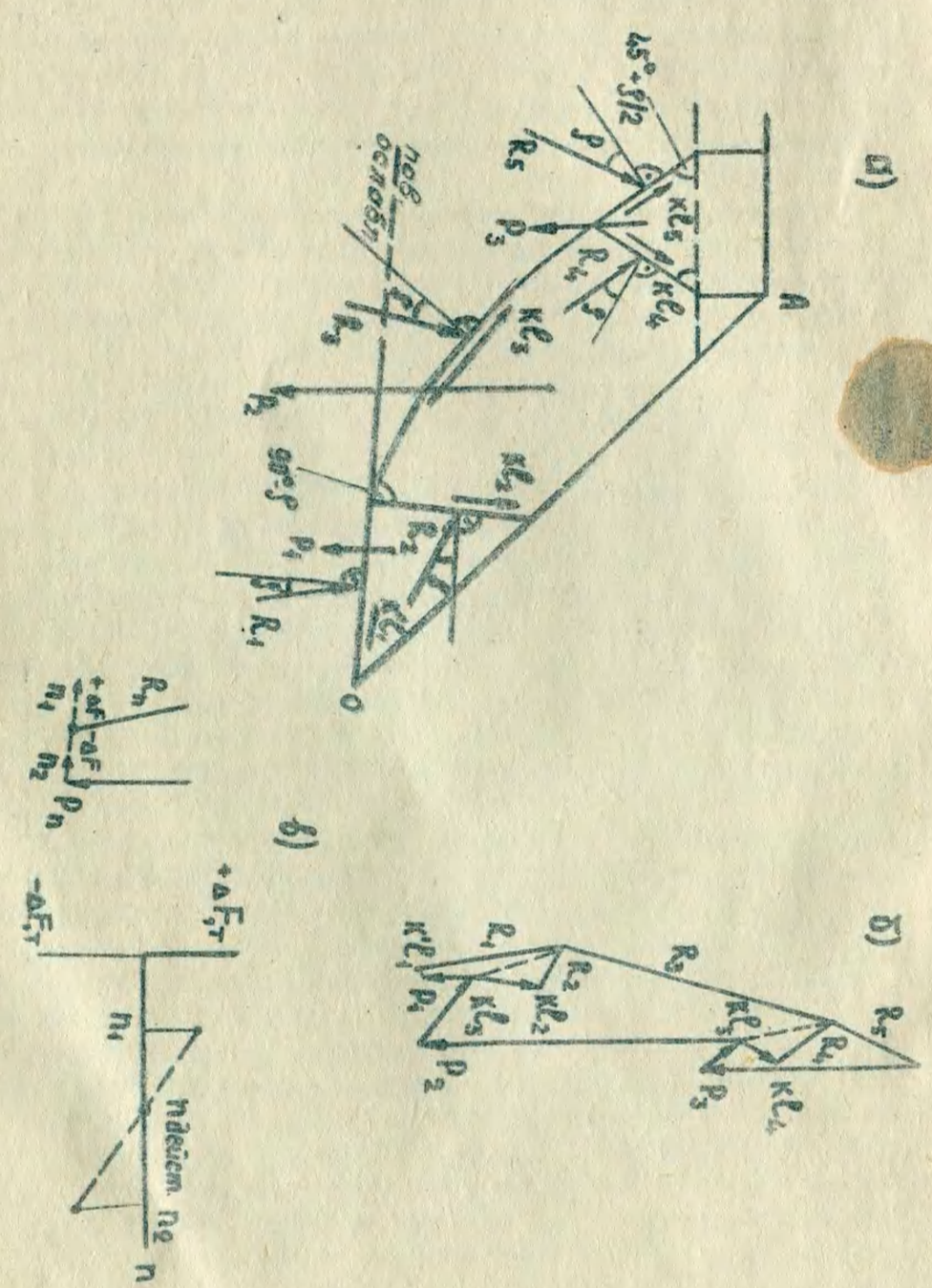


Рис.5. Схема расчета устойчивости откоса методом многоугольника сил

чивости /$n>1$/. Чтобы определить коэффициент запаса устойчивости откоса методом многоугольника сил необходимо произвести 2-3 расчета, вводя в принимаемые характеристики прочности K, K', ρ и ρ' коэффициент запаса n_1, n_2 и n_3. Затем строится график /рис.5в/ зависимости невязки в многоугольнике сил от коэффициента запаса $[\Delta F = f(n)]$, по которому определяется действительный коэффициент запаса устойчивости откоса.

Если призма возможного обрушения пересекается поверхностями ослабления, имеющими падение в борт карьера, то эти поверхности в большинстве случаев следует принимать за границы смежных блоков.

В реальных геологических условиях при расчете устойчивости откосов бывают случаи, когда расчет одним из методов не дает достаточной точности. Тогда используются комбинированные методы расчета, так например, метод алгебраического сложения объединяется с методом многоугольника сил и др.

Основными прочностными характеристиками, определяющими устойчивость откосов в скальных и полускальных породах являются сцепление в массиве $K_м$, сцепление по поверхности ослабления K', угол внутреннего трения в массиве $\rho_м$ и угол трения пород по поверхностям ослабления ρ'. Существенное влияние оказывает объемный вес пород.

Прочностные характеристики пород в массиве значительно отличаются от прочностных характеристик пород в образце. Снижение прочности пород в массиве по сравнению с прочностью пород в куске объясняется наличием в массиве большого числа поверхностей с резко пониженными прочностными характеристиками - сцеплением и трением. К числу таких поверхностей, что следует учитывать при расчетах, относятся все структурные и тектонические трещины, поверхности наслоения и сланцеватости, тектонические трещины большого протяжения и зоны разломов. Снижение прочности пород в массиве по сравнению с прочностью пород в куске определяется интенсивностью нарушения сплошности пород поверхностями ослабления и их ориентировкой относительно откоса, разницей механических свойств в куске и по контактам поверхностей ослабления, степенью обводненности различных участков и др.

Расчет устойчивости откосов начинается с разделения их на участки, на протяжении которых горно-геологические условия можно

считать постоянными. Для каждого такого участка необходимо построить геологический разрез, нормальный простиранию откоса и отображающий основные геологические факторы, влияющие на устойчивость откосов: состав и строение пород, тектонические нарушения и трещины, структурные особенности массива, уровень грунтовых вод и направление их движения.

Затем на разрезе выделяются слои или группы пород, характеризующиеся определенными показателями прочности /$K_м$ и $\rho_м$/ и трещиноватостью. По известным характеристикам прочности $K_м$ и $\rho_м$/ для наиболее напряженной поверхности скольжения определяются средние значения $K_{ср.м}$ и $\rho_{ср.м}$

$$K_{ср.м} = \frac{K_{1м} \cdot l_1 + K_{2м} \cdot l_2 + \cdots K_{iм} \cdot l_i}{l_1 + l_2 + \cdots l_i}$$

$$\rho_{ср.м} = \frac{tg\rho_1 \cdot \sigma_1 l_1 + tg\rho_2 \cdot \sigma_2 l_2 + \cdots tg\rho_i \sigma_i l_i}{\sigma_1 l_1 + \sigma_2 l_2 + \cdots \sigma_n \cdot l_i}, \quad /13/$$

где $K_{iм}$ - сцепление пород отдельного слоя в массиве, т/м^2;

ρ_i - угол внутреннего трения в массиве отдельного слоя, град;

l_i - длина участка вероятной поверхности скольжения в пределах разновидности пород, м;

σ_i - приближенная величина нормального напряжения в середине каждого участка пород, т/м^2.

Величина сцепления в массиве $K_м$ для каждого вида пород находится приближенно по формуле

$$K_м \frac{K_к - K'}{1 + a \cdot ln\left(\frac{H}{l_{тр}}\right)}, \quad /14/$$

где $K_к$ и K' - сцепление в образце и по контактам пород, т/м^2;

$1/l_{тр}$ - средняя интенсивность трещиноватости, 1/м;

$l_{тр}$ - средний размер структурного блока каждой разновидности пород, м;

H - мощность слоя пород, м;

a - коэффициент, зависящий от прочности пород /табл.1/ [1] .

Величина сцепления по контактам K' в области вероятной поверхности скольжения принимается 2 т/м^2. Углы трения по контактам

Таблица 1

Величина a для различных пород /по данным ВНИИИ/

	Сцепление в куске, кг/см^2	a
Песчано-глинистые, слабоуплотненные; сильно выветрелые, полностью каолинизированные; слаботрещиноватые	4-9	0,5
Уплотненные песчано-глинистые, с нормальносекущими трещинами, сильно каолинизированные изверженные породы	10-40	2
Уплотненные песчано-глинистые с кососекущей трещиноватостью; каолинизированные изверженные породы	50-80	3
Крепкие слоистые породы, с преимущественно нормальносекущей трещиноватостью	100-150 150-200	3 4
Крепкие породы с преимущественно нормальносекущей трещиноватостью	200-300 300	6 7
Крепкие изверженные породы с развитой кососекущей трещиноватостью	200	10

по данным Г.Л.Фисенко изменяются в значительных пределах - от 9 до 30^0, поэтому определение их проводится непосредственно для каждого вида контактов пород. Для более точного определения прочностных характеристик пород в массиве по известным характеристикам в куске /образце/ необходимо знать коэффициент структурного ослабления λ , показывающий отношение прочности пород в массиве к прочности пород в куске

$$\lambda = \frac{K_м}{K_к}; \qquad K_м = \lambda \cdot K_к \quad /15/$$

В зависимости от горно-геологических условий величина λ может изменяться от 1 до 0. В работе [10] предложена методика определения прочностных характеристик пород в массиве с учетом ряда горно-геологических факторов. Авторы исходили из следующего : если сцепление между блоками $K' = 0$, то $K_м = \lambda \cdot K_к$, если $K' \neq 0$,

то $K_м = K_к \cdot \lambda + K'(1-\lambda)$. /16/

Поскольку угол трения по контактам всегда меньше угла внутреннего трения в куске, то угол внутреннего трения в массиве меньше, чем в куске и

$$tg\rho_м = tg\rho_к \cdot \lambda + (1-\lambda) \cdot tg\rho' \qquad /17/$$

если угол трения по всем контактам одинаков, а

$$tg\rho_м = tg\rho_к \lambda + \frac{1-\lambda}{2} tg\rho' + \frac{1-\lambda}{2} \cdot tg\rho'' \qquad /18/$$

если угол трения по поверхности ослабления большого протяжения ρ' отличается от угла трения по межблоковым трещинам ρ''.
По этим формулам, зная $K_к$, K', $\rho_к$, ρ', ρ'' и λ, можно определить прочностные характеристики в массиве.

Величина λ зависит от многих факторов, сочетание которых характеризуется состоянием и строением массива. По строению массив горных пород можно разделить на два типа: распорно-безраспорный /рис.6а/ и распорный /рис.6б/.

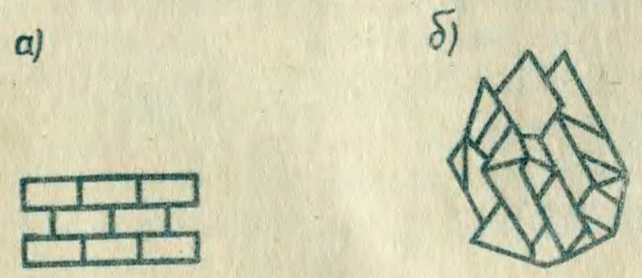


Рис.6. Типы структуры пород: а - распорно-безраспорный, б - распорный

Конечная величина коэффициентов структурного ослабления по типам пород $\lambda_а$ и $\lambda_б$ определяется частными значениями коэффициентов структурного ослабления, зависящими от горно-геологических условий

$$\lambda_а = \lambda_w \lambda_{рп} \cdot \lambda_{\beta_c} \cdot \lambda_н \cdot \lambda_{\alpha\alpha} \cdot \lambda_\beta \cdot \lambda_m \cdot \lambda_{отк.}$$

$$\lambda_б = \lambda_w \cdot \lambda_{рп} \cdot \lambda_m \cdot \lambda_\beta \cdot \lambda_{отк}, \qquad /19/$$

где λ_w - учитывает интенсивность трещиноватости /определяется по графику [10]/;

$\lambda_{рп}$ - учитывает разнопрочность структурных блоков одной разновидности пород;
λ_{β_c} - учитывает влияние угла скошенности блоков;
$\lambda_н$ - учитывает влияние неизометричности блоков /величину /а/;
$\lambda_{\alpha\alpha}$ - учитывает взаимное расположение блоков;
λ_β - учитывает влияние угла наклона и направление падения поверхностей ослабления большего протяжения;
λ_m - учитывает влияние трещиноватости с падением в сторону выемки;
$\lambda_{отк.}$ - учитывает влияние изменения направления действия главного напряжения σ_1 по поверхности скольжения.

Методика нахождения частных коэффициентов структурного ослабления λ_i подробно изложена в работе [10]. Следует отметить, что для скальных пород определяется только величина $\lambda_б$. Суммарное значение коэффициента структурного ослабления в породах слабых и средней крепости определяется путем проведения натурных испытаний [1], в породах любой прочности - путем обратного расчета обрушившихся или оползших участков уступов и бортов, который дает более точные результаты, так как рассматриваются условия устойчивости больших породных масс.

Обратный расчет проводится по результатам маркшейдерской съемки обрушившихся участков - по профилям, снимаемым вкрест простирания оползшего участка. Сущность обратного расчета заключается в следующем. Исходя из условия, что в массиве в момент обрушения

$$\Sigma T = \Sigma N \cdot tg\rho_м + K_м \cdot L$$

можно считать, что после обрушения величина сцепления по поверхности скольжения $K_м L = 0$ и оползневое тело держится только на силе трения

$$\Sigma T = \Sigma N \cdot tg\rho_м \qquad /20/$$

По результатам съемки строится профиль оползневого тела в главном сечении. На профиле оползневое тело, как и призма возможного обрушения /рис.7/, делится на вертикальные столбики, для которых определяются ΣT, ΣN и угол трения в массиве

$$\rho_м = arctg \frac{\Sigma T}{\Sigma N}. \qquad /21/$$

По результатам съемки откоса до обрушения восстанавливается его

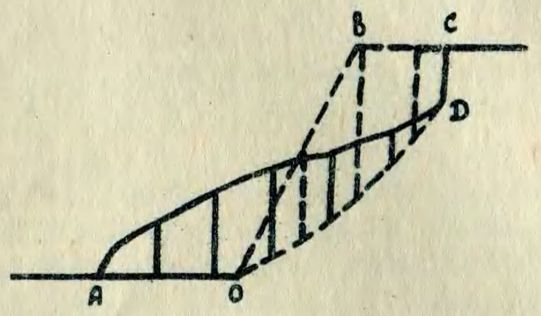


Рис.7. Схема определения прочностных характеристик $K_м$ и $_м$ обратным расчетом

профиль, а по результатам съемки после обрушения - положение поверхности скольжения . Восстановленный профиль откоса разбивается на вертикальные столбики, для которых находятся ΣT и ΣN. Зная $\Sigma N, \Sigma T, \rho_м$ и L, можно определить сцепление в массиве

$$K_м = \frac{\Sigma T - \Sigma N \cdot tg\rho_м}{L} . \qquad /22/$$

По формуле /15/, если известны $K_к$ /по лабораторным испытаниям образцов, отобранных из тела оползня/ и $K_м$, определяется коэффициент структурного ослабления λ.

Основой расчета устойчивости откосов является уравнение предельного равновесия. Любой откос, рассчитанный по фактическим прочностным характеристикам, будет удовлетворять условию равенства сдвигающих и удерживающих сил по поверхности скольжения и находиться в предельном равновесии. В этом случае достаточно незначительной ошибки в определении физико-механических свойств пород или в выборе расчетной схемы, чтобы условие предельного равновесия было нарушено и произошло нарушение устойчивости откоса. Чтобы учесть ошибки в параметрах, принимаемых для расчетов устойчивости откосов, следует использовать коэффициент запаса устойчивости, характеризующий превышение удерживающих сил над сдвигающими.

Величина коэффициента запаса учитывает все наиболее неблагоприятные для расчета ошибки расчетных характеристик. Необходимый

и достаточный коэффициент запаса, гарантирующий сохранность откоса на все время его службы, зависит:

от погрешности определения физико-механических свойств пород. Точность определения механических свойств согласно [11] не должна быть менее 7%, то есть эта погрешность соответствует коэффициенту запаса $n_1 = 1,07$ /$m_1 = 7\%$/;

от погрешности определения влияния трещиноватости $n_2 = 1,20 - 1,30$ /$m_2 = 20-30\%$/;

от погрешности расчетной схемы, погрешности определения объемного веса; динамические силы от массовых взрывов учитываются совместным коэффициентом запаса $n_3 = 1,15-1,20$ / $m_3 = 15-20\%$/.

Общая величина коэффициента запаса составит

$$n = n_1 \cdot n_2 \cdot n_3 . \qquad /23/$$

Исходя из средних частных значений n_i среднее значение коэффициента запаса принимается равным 1,5. Однако общая погрешность определения действующих в откосе сил будет равна

$$m_o = \pm\sqrt{\Sigma m_i^2} . \qquad /24/$$

Поскольку это средняя ошибка, то чтобы избежать нежелательных случайностей, следует, задавшись каким-то уровнем надежности $t_в$, определить общий коэффициент запаса, обеспечивающий долговременную устойчивость откоса [12]*

$$n = 1 + t_в \cdot m_o . \qquad /25/$$

Н.К.Звонарев [12] в зависимости от условий эксплуатации борта рекомендует следующие уровни надежности /табл.2/.

Таблица 2

Характеристика бортов карьера	Надежность P, %	$t_в$	n
Рабочий борт	87	1,12	1,3
Борт погашения	91	1,32	1,40
Нерабочий борт с автотранспортом	95	1,60	1,50
Нерабочий борт при железнодорожном транспорте	98	1,80	1,60

Коэффициент запаса учитывается путем введения его в расчетные характеристики $K_м$, K', $\rho_м$ и ρ'. Расчет параметров устойчивого борта с заданным коэффициентом запаса производится по характеристикам прочности, уменьшенным в n раз

$$K_{мп} = \frac{K_м}{n} \; ; \; tg\rho_{мп} = \frac{tg\rho_м}{n} \quad . \qquad /26/$$

Если массив по своим физико-механическим свойствам более или менее равномерен и в нем нет поверхностей ослабления с падением в сторону внемки или горизонтальных, то можно, считая поверхность скольжения круглоцилиндрической, определить параметры устойчивых бортов по специальному графику плоских откосов /рис.8/, отражающему зависимость между высотой откоса, его углом и физико-механическими свойствами пород [1].

Исходя из назначения рассчитываемого борта по таблице 2 определяется достаточный коэффициент запаса устойчивости n. По физико-механическим характеристикам массива $K_м$ и $\rho_м$ и величине n находятся расчетные характеристики $K_{мп}$ и $\rho_{мп}$, по формуле /9/ - величина H_{90}. Если известна глубина карьера H, но не известен угол неклона борта, то вначале определяют условную высоту откоса

$$H' = H : H_{90} \; ,$$

по которой затем по заданному значению $\rho_{мп}$ на оси α графика находят угол наклона борта.

Если угол наклона борта α задан, а допустимая высота при заданном коэффициенте запаса не известна, то на оси α откладывают угол наклона борта, проводят вертикальную линию до пересечения с кривой, соответствующей принятому значению $\rho_{мп}$, и от точки пересечения - горизонтальную линию до оси H', определяя условную высоту откоса, и далее находят допустимую высоту откоса

$$H = H' \cdot H_{90} \, .$$

Определение параметров бортов по графику плоских откосов производится при вертикальном падении поверхностей ослабления, крутом падении слоев в сторону внемки /не положе 80°/, при падении поверхностей ослабления в сторону массива, если поверхности ослабления наклонены к поверхности откоса борта под углом не менее 15°.

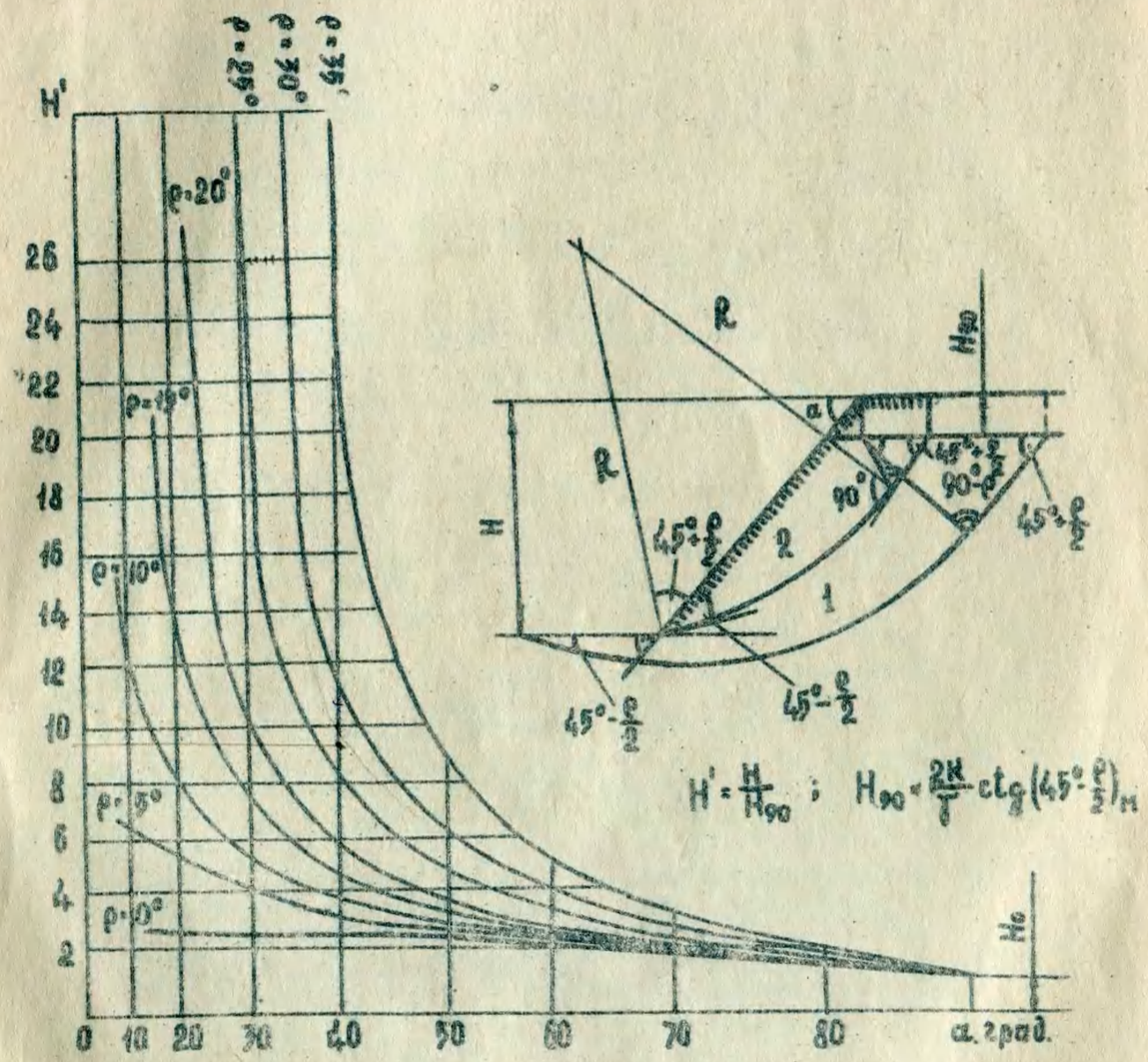


Рис.8. График зависимости высоты плоского откоса и его угла для различных значений расчетных характеристик

Литература

1. Фисенко Г.Л. Устойчивость бортов карьеров и отвалов. М., "Недра", 1965.
2. Беляев Н. Сопротивление материалов. Гостехиздат, 1949.
3. Ломтадзе В.Д. Методы лабораторных исследований физико-механических свойств песчаных и глинистых грунтов. Госгеолиздат, 1952.
4. Ильницкая Е.И. и др. Свойства горных пород и методы их определения. М., "Недра", 1969.
5. Бахарев А.Г., Праздников Н.В. Некоторые особенности динамического разрушения горных пород. Тр. ВНИМИ, сб. № 77, 1970.
6. Афанасьев Б.Г., Пушкарев В.И. Долговременная прочность. "Горный журнал", 1973, № 12.
7. Инструкция по наблюдениям за деформациями бортов, откосов уступов и отвалов на карьерах и разработка мероприятий по обеспечению их устойчивости. Изд. ВНИМИ, Ленинград, 1971.
8. Соколовский В.В. Статика сыпучей среды. Физматгиз, 1960.
9. Методические указания по определению углов наклона бортов, откосов уступов и отвалов строящихся и эксплуатируемых карьеров. Изд. ВНИМИ, Ленинград, 1972.
10. Ким Д.Н., Пушкарев В.И. Методика определения основных характеристик прочности трещиноватых массивов для расчета устойчивости бортов карьеров. Тр. ВНИМИ, сб. № 86, 1972.
11. Методическое пособие по изучению инженерно-геологических условий месторождений полезных ископаемых, подлежащих разработке открытым способом. Изд. ВНИМИ, Ленинград, 1965.
12. Звонарев Н.К. Методика обоснования величины коэффициента запаса устойчивости бортов карьеров. Тр. ВНИМИ, сб. № 52, 1964.

Ujjayee. Ujjayee
Jeanbaum
Jaipore, Jeanbaum
Gou-Thousofs yr.

Сканирование - *Беспалов*
DjVu-кодирование - *Беспалов*