

Б22  
Б-90

И. Ю. Букин

УСТОЙЧИВОСТЬ  
БОРТОВ  
КАРЬЕРОВ



Ленинград

1976

622.240

УДК 622.271.332.026.7

Увеличение глубины разработки, эксплуатация сложных в горно-геологическом отношении месторождений с большой остротой поставило проблему поддержания откосов на карьерах в устойчивом состоянии, что отразилось в подготовке горных инженеров, специализирующихся в области открытой разработки [7].

Предлагаемое учебное пособие представляет собой обобщение современных представлений об основных вопросах данной проблемы. Рассмотрены причины и условия возникновения деформаций, методы расчета устойчивых параметров откосов и обеспечения их устойчивости, использование нарушений устойчивости в технологических целях, вопросы изучения деформаций.

Пособие рассчитано на студентов специальностей 0209 „Технология и комплексная механизация открытой разработки месторождений полезных ископаемых“, 0210 „Физические процессы горного производства“, 0201 „Технология и комплексная механизация подземной разработки месторождений полезных ископаемых“.

Научный редактор проф. А.И.Арсентьев

© Изд. ЛГИ, 1976 г.

100207

## Раздел I. ДЕФОРМАЦИИ БОРТОВ КАРЬЕРОВ И ОТКОСОВ

### § I. Изменение природной обстановки при ведении открытых горных работ

Массивы горных пород в естественном состоянии подвержены воздействию природных факторов: ветра, воды, растительного покрова, изменению температуры воздуха и т.д. Свойства пород изменяются во времени, причем обычно очень медленно.

При выемке горных пород резко нарушается установившийся режим выветривания и изменяется поле напряжений в массиве. Неврешенный горными работами массив пород находится в объемном напряженном состоянии, которое создается силой тяжести. При этом вертикальная составляющая объемного напряжения (рис. I)

$$\sigma_z = \gamma H,$$

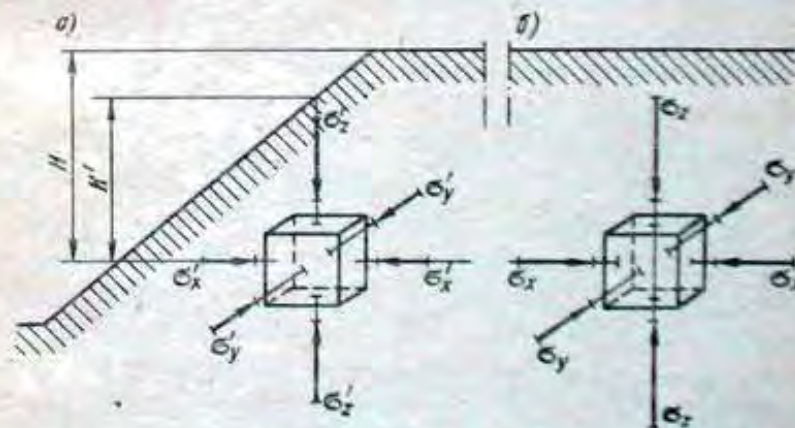


Рис. I. Напряженное состояние пород: а - вблизи откоса; б - в недрах массива

а так как относительные деформации  $\epsilon_x = \epsilon_y = 0$ , то горизонтальные обычно одинаковы:

$$\sigma_x = \sigma_y = \frac{\mu}{1-\mu} \gamma H,$$

где  $\gamma$  — средневзвешенный объемный вес,  $\text{Н/м}^3$ ;  $H$  — глубина залегания, м;  $\mu$  — коэффициент Пуассона.

Выемка горных пород нарушает первоначальное напряженное состояние в некоторой области вокруг карьера и в связи с уменьшением мощности слоя ( $H' < H$ ) и возможностью деформаций в сторону выемки ( $\epsilon_x \neq 0$ ) приводит к возникновению нового поля напряжений.

Состояние пород (в пределах упругих деформаций) при плоском в плане откосе борта характеризуется следующими значениями напряжений (рис. I):

$$\begin{aligned} \sigma_z' &= \gamma H'; \\ \sigma_x' &= \frac{E\epsilon_x}{1-\mu} + \frac{\mu}{1-\mu} \gamma H'; \\ \sigma_y' &= \frac{\mu}{1-\mu} \gamma H', \end{aligned}$$

где  $E$  — модуль Юнга,  $\text{Н/м}^2$ .

При выемке в плане откосе изменяются не только значения  $\sigma_x$ , но и  $\sigma_y$ . При выемке появляются дополнительные горизонтальные напряжения сжатия, а при выпуклой — растягивающие напряжения. По высоте откоса напряжения концентрируются в основании. На устойчивость откоса значительное влияние оказывают термальные напряжения. В зависимости от типа пород и колебаний температуры величина их находится в пределах 35–630  $\text{Н/см}^2$ . Годовые изменения температуры вызывают термальные напряжения на глубине 6–8 м от поверхности откоса, суточные на глубине 1,2–1,5 м.

Перераспределение напряжений в откосах зависит также от геологических нарушений в породах, слагающих борт карьера.

или от пройденных в бортах подземных выработок. Области концентрации напряжений не распространяются более чем на тройную ширину выработки (нарушения). Напряженное состояние меняется также из-за водопонижения.

Под влиянием карьера и дренажных систем увеличивается скорость движения подземных вод, что приводит к росту гидродинамического давления и перераспределению напряжений в приобортовом массиве. При выемке горных пород возникает дополнительные напряжения от ведения взрывных работ, веса оборудования, отвалов на борту карьера и в выработанном пространстве и т.д.

Проведение открытых горных выработок приводит к обнажению горных пород, ранее находившихся внутри массива. В результате начинается выветривание — процесс разрушения и изменения состава горных пород, а также их физических свойств.

Исходя из основных факторов, определяющих развитие процесса, различают следующие виды выветривания: физическое, или механическое; химическое; биологическое и органическое.

Под влиянием процессов физического выветривания в скальных горных породах начинает развиваться (или прогрессировать) трещиноватость. На развитие этого процесса влияют в первую очередь температурные напряжения, а также процессы замерзания и оттаивания воды. Физическое выветривание наиболее характерно для районов с континентальным климатом.

Химическое выветривание происходит под влиянием воды с растворенными в ней солями и газами и газов атмосферы. Химическому выветриванию наиболее сильно подвержены карбонатные породы и породы, содержащие соли. Наиболее интенсивно химическое выветривание протекает в условиях влажного и теплого климата.

Процессы биологического выветривания весьма разнообразны и в карьерах наблюдаются практически только на верхнем горизонте.

Проведение открытых горных выработок вызывает изменение прочностных свойств пород. Например, глинистые породы в ре-

в результате разгрузки после выемки вышележащих пород набухают и снижают прочность. Существенное влияние оказывает также увлажнение пород, ранее находившихся в сухом состоянии. Отвод рек и водоемов из пределов карьерного поля, дренажирование меняет режим питания подземных вод и их химический состав.

Таким образом, при выемке горных пород открытым способом природная обстановка с точки зрения устойчивости откосов изменяется в неблагоприятном направлении.

## § 2. Виды деформаций бортов карьеров и отвалов

Разработка месторождений открытым способом во всех случаях сопровождается развитием деформаций в прибортовой зоне карьеров. Величина, характер, время развития деформаций, объемы деформирующихся пород различны и зависят от полноты учета горно-геологических условий при ведении горных работ. Известны крупные деформации бортов карьеров, измерявшиеся миллионами кубических метров. В то же время на карьерах со скальными породами даже развитие осыпей не проявляется в сколько-нибудь значительном объеме в течение нескольких лет. С другой стороны, небольшие по объему захватываемых пород деформации борта могут привести к тяжелым для карьера последствиям (например, к разрушению транспортных берм за счет развития осыпей).

Таким образом, устойчивость — это отсутствие деформаций, вызывающих нарушения функционального назначения борта, уступа, отвала.

Классификаций и терминологии для деформаций естественных склонов и искусственных откосов до настоящего времени не существует. Наиболее распространенной и обоснованной является классификация проф. Г.Л. Фисенко [14]. Классификационными признаками, положенными в ее основу, являются: условия и причины возникновения деформаций (генезис); морфология и динамика их развития. Это позволяет достаточно полно

и объективно охарактеризовать нарушения устойчивости бортов карьеров и отвалов и наметить практические меры по их предупреждению и ликвидации.

Все деформации делятся на: осыпи; обрушения; оползни; просадки; опливинин; фильтрационные деформации; осадки.

## § 3. Морфология и динамика развития оползней

Оползни — медленное смещение горных пород, слагающих откос (часто и его основание). Деформирующийся массив перемещается относительно неподвижной части по поверхности скольжения, которая имеет угол наклона, в среднем меньший угла внутреннего трения пород в пределах массива, пересекаемого этой поверхностью. Характерной чертой оползней является медленное (от нескольких минут до нескольких лет) развитие. Данный вид деформаций является наиболее крупным по размерам захватываемых участков и чаще всего приводит к нарушениям устойчивости.

По месту развития оползней (уступ, борт, отвал, естественный откос) и строению пород деформирующегося массива (породы естественной или нарушенной структуры — отвальные) выделяются оползни бортов и уступов; отвалов; естественных склонов.

Оползни естественных склонов в практике работы карьеров наблюдаются редко. Оползни уступов и бортов карьеров делятся на контактные, покровные, надвиговые, фильтрационные, оползни изотропных массивов, глубинные оползни пород легкого бока, оползни выпирания.

Несмотря на все различия в строении (морфологии) и развитии (динамике) оползней отдельных подгрупп им присущи некоторые общие черты. Для всех характерно смещение деформирующихся масс по поверхности скольжения (ПС), положение которой определяется прочностью пород в массиве, наличием трещин и ослабленных контактов, объемом весом пород, углом откоса и его высотой.

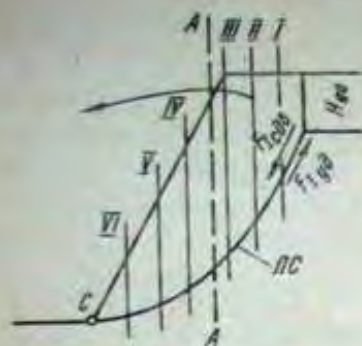


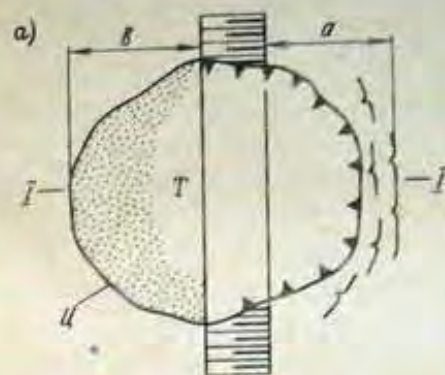
Рис.2. Деление призмы обрушения на призму упора и призму активного давления

Характерным для поверхности скольжения является наличие в верхней ее части вертикального участка - площадки отрыва высотой (рис.2)

$$H_{so} = \frac{2k}{\gamma} \operatorname{ctg}\left(45^\circ - \frac{\rho}{2}\right),$$

где  $k$  - сцепление породы,  $\text{H/м}^2$ ;  $\rho$  - угол внутреннего трения, град.

Участок возникает под действием растягивающих напряжений при стремлении оползающего массива, сохраняющего в начальный период развития оползня внутреннюю связность, повернуться вокруг нижней бровки, точки  $C$ . В результате на верхней площадке деформирующегося откоса появляются заколы (трещины), одна из которых с развитием оползня реализуется в площадку отрыва. Ниже вертикального участка имеется прямолинейный участок  $LM$  (рис.3), наклоненный под углом  $45^\circ - \frac{\rho}{2}$  к вертикали, а затем поверхность скольжения переходит в плавную криволинейную и пересекает откос под углом  $\mu = 45^\circ - \frac{\rho}{2}$  или выходит в подошву откоса (при  $\rho < 13^\circ$ ) под таким же углом.



б) по I-I

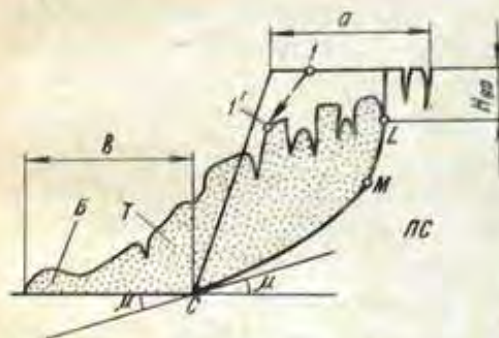


Рис.3. План (а) и разрез (б) оползня

Массив оползающих пород называется телом оползня или призмой обрушения. По поверхности скольжения действует удерживающие  $\Sigma F_{уд}$  и сдвигающие  $\Sigma F_{сдв}$  силы. Если сумма удерживающих сил больше сдвигающих, то откос находится в устойчивом состоянии. При их равенстве наблюдается состояние предельного равновесия. И, наконец, когда сдвигающие силы больше удерживающих, откос начинает деформироваться.

Очевидно, если разделить откос на вертикальные блоки I-VI (см.рис.2) и сравнить сдвигающие и удерживающие силы ( $F_{уд}$  и  $F_{сдв}$ ) в каждом из них вдоль потенциальной поверхности скольжения, то в верхней части откоса будут преобладать сдвигающие силы, а в нижней - наоборот. В некотором сечении A-A удерживающие и сдвигающие силы будут равны, поэтому призму обрушения можно разделить на призму активного давления и призму упора.

Очевидно, в любом откосе можно провести ряд предположительных поверхностей скольжения. По одной из них отношение будет минимальным - эта поверхность и будет являться потенциальной поверхностью скольжения. При условии  $\frac{\Sigma F_{уд}}{\Sigma F_{сдв}} < 1$

потенциальная ПС становится реальной и развивается оползень. В плане оползающий массив представляет оползневый цирк Ц (рис.3). На поверхности тела оползня образуется характерный оползневый рельеф, а в нижней части оползня нередко возникает вал выпирания Б.

В первую фазу развития оползня напряжение по поверхности скольжения не выходит за пределы упругости. Массив деформируется постепенно, по мере накопления пластических деформаций, под влиянием которых снижается прочность пород. В связи с тем, что сдвигающие силы преобладают в верхней части откоса, здесь образуются заколы, происходит оседание. В нижней части откоса видимых деформаций нет.

Абсолютные смещения — перемещения любой точки тела оползня относительно неподвижной части массива, характеризуемые вектором смещения  $l-l'$  — в начальный период развития составляют миллиметры и даже доли миллиметра и направлены преимущественно вертикально вниз. По мере развития оползня абсолютные смещения увеличиваются и достигают наконец такой величины, когда по всей поверхности скольжения преодолены силы сцепления. Эта величина абсолютного смещения получила название критической величины деформаций  $\Delta l_{кр}$  (рис.4).

Абсолютные смещения, отнесенные к единице времени, называются скоростью деформации. В первой фазе развития оползня скорость невелика и имеет тенденцию к увеличению. К моменту



Рис.4. График скорости 1 и величины смещения 2 оползня

преодоления сил сцепления по поверхности скольжения скорость достигает критического значения. После этого начинается активная стадия развития оползня. Скорость и величина смещений резко возрастают, что может явиться причиной аварий оборудования и несчастных случаев. В этот период дви-

жение оползающих масс определяется трением по поверхности скольжения. Смещения и скорость смещений отдельных частей оползающей толщи неодинаковы. В результате этого происходит ее дезинтеграция и образуется оползневой рельеф. Характерным для оползневого рельефа является наличие трещин и неровностей — бугров и впадин.

При развитии оползня в пластичных породах ярко проявляется волнообразный характер движения оползневых масс — поверхностные участки погружаются в глубь тела, а затем при последующем движении вновь появляются на поверхности. Оползневые массы располагаются на нижней площадке уступа под углом, не превышающем  $15-20^\circ$ . При наличии увлажнения они могут растекаться под углом  $12-14^\circ$ , а в некоторых случаях и переходить в оплывины.

Оползневые массы увеличивают значение удерживающих сил в пределах призмы упора и создается новое равновесие — скорости смещений уменьшаются, оползень стабилизируется, идет фаза затухания. Если при этом не создаются неблагоприятные условия для устойчивости пород за пределами глубины развития деформаций (например, затруднения для выхода подземных вод) дальнейшее развитие оползней на уступе прекратится. В противном случае может начаться новый цикл развития оползня.

Приведенное описание дает представление лишь о некоторых общих чертах оползней.

#### § 4. Оползни бортов карьера

Контактные оползни характеризуются поверхностью скольжения, проходящей по ослабленным контактам (трещинам большого протяжения, поверхности древних оползней, контактам слоев и др.). Если контакты падают в сторону выемки под углом, меньшим угла внутреннего трения, естественная прочность пород достаточна для удержания их в равновесии в течение длительного времени (рис.5).

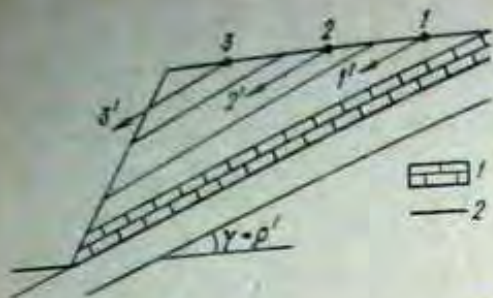


Рис.5. Схема контактного оползня  
1 - водопроницаемый слой известняка; 2 - глинистый прослой.

В большинстве случаев при залегании ослабленных слоев под углом, меньшим  $25-30^\circ$ , и высоте уступов до 15-20 м развития оползней по подрезанным контактам не наблюдается. Однако вследствие обводнения, набухания пород и других факторов, способствующих дальнейшему ослаблению, оползни могут развиваться при углах падения слоев до  $10-12^\circ$ . Характерной чертой динамики развития оползней контактного типа является параллельность векторов смещения и поверхности скольжения.

Характерной чертой покровных оползней является смещение рыхлых, сильно увлажненных пород по полнотолщевой поверхности коренных пород, наклоненных в сторону карьера. На карьерах распространены покровные оползни двух типов.

При разработке месторождений на склоне возвышенностей может быть подсечен контакт коренных пород и слабых пород дельтавиального происхождения (рис.6, а). Такие оползни могут развиваться при углах наклона подсеченного контакта даже меньше  $10-15^\circ$  и захватывать значительные по мощности толщи пород.

Оползни другого типа образуются на нерабочих бортах карьеров, где длительное время скапливаются продукты выветривания (рис.6, б). При увлажнении эти массы могут начать сползать по откосу борта, сглаженному выветриванием. При этом толща коренных пород не нарушается. При увлажнении оползневых масс оползень может перейти в оплывину.

По виду поверхности скольжения и ряду других признаков покровные оползни близки к контактным, но физико-механиче-



Рис.6. Схема покровных оползней:  
а - слабых пород; б - продуктов выветривания  
1 - слабые породы, 2 - коренные породы; 3 - продукты выветривания

ские свойства тела покровного оползня резко отличаются от неподвижного массива. У оползней изотропных массивов отсутствует фиксированная поверхность ослабления, по которой они реализуются, и ее положение определяется физическими свойствами, параметрами откоса пород, в которых развивается оползень. Оползни данного типа возникают, если уступ слоев слабофильтрующими, глинистыми породами.

Причиной образования оползня является обводнение пород за счет наличия на уступе источников во-

ды. Вследствие обводнения пород и их низких фильтрационных свойств увеличивается водонасыщенность массива, происходит набухание и разупрочнение, что в конечном итоге приводит к развитию оползня. Большое влияние на развитие оползня оказывает гидростатическое извешивание, уменьшение силы трения по поверхности скольжения.

Морфология и динамика развития оползней этого типа аналогична описанию, приведенному в § 3. Развитие оползней активируется в периоды продолжительных дождей и интенсивного снеготаяния.

Глубинные оползни захватывают наибольшие объемы пород по сравнению с другими видами. Они делаются на

глубинные оползни слоистых пород лежачего бока, оползни-напвиги и оползни выпирания слоистых пород висячего бока.

Глубинные оползни слоистых пород лежачего бока наблюдаются на карьерах, разрабатывающих пласты с пологим падением, при условии подстилания их слабыми глинистыми породами. Причинами возникновения оползней этого вида являются крутые углы наклона борта и наличие напорных недренированных водоносных горизонтов в породах лежачего бока. Гидростатическое давление уменьшает нормальное давление пород и силы трения по потенциальным ПС, а также способствует их разуплотнению, набуханию и уменьшению прочности. Оползень развивается спустя значительное время после выемки. Если причиной развития являются крутые углы откоса нерабочего (лежащего бока) борта, оползень начинается непосредственно за выемкой.

Поверхность скольжения залегает, как правило, на значительной глубине от дна карьера (до 25-30 м). По падению и простиранию размеры оползневых участков достигают сотен метров. Движение оползня происходит одновременно и практически с одинаковой скоростью на всем своем протяжении. В нижней части векторы смещения направлены вверх. Высота поднятия пород достигает 5-10 м, смещение к забору до 0,5-1,0 м. Скорости смещения составляют 8-12 м/месяц. В зоне поверхности скольжения наблюдается повышенная (до 45-50%) влажность пород.

Условием возникновения оползней выпирания является наличие не вскрытых карьером слабых пластичных глин или слабых контактов между слоями, прочностные характеристики которых значительно меньше, чем у вышележащих пород. Причиной возникновения является обводнение пород или завышенные углы наклона борта. Развитию оползней выпирания могут способствовать напорные водоносные горизонты, расположенные ниже подошвы карьера.

Большая часть поверхности скольжения оползней выпирания проходит выше подошвы карьера (рис.7) в пределах слабого слоя, в нижней своей части выходит на некотором расстоянии от нижней бровки откоса, где образуется вал выпирания. Для

Рис.7. Схема оползня выпирания  
1 - см. рис.6; 2 - породы, нарушенные оползнем



оползней выпирания характерно вертикальное смещение пород в верхней части оползня. В средней части, наряду с вертикальным смещением, наблюдается перемещение в сторону карьера.

Поверхность скольжения оползней-напвигов (рис.8) проходит по контакту слоев или слабому прослойку, подсеченному бортом, а в средней и верхней части пересекает слой. Для развития оползней этого вида характерно в первый период появление над выступом, расположенным ниже поверхности скольжения, нависающего «козырька», что свидетельствует о монолитности оползавшего массива. Причиной возникновения оползней-напвигов является обводнение слабых контактов. Оползней глубинного типа

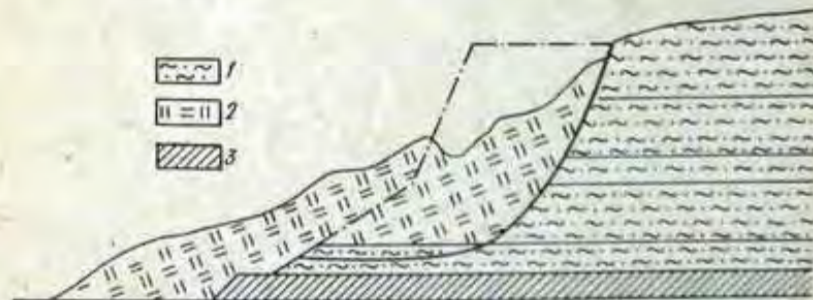


Рис.8. Схема оползня-напвигов  
1 - см. рис.6; 2 - см. рис.7; 3 - подстилаемое ископаемое



порад висячего бока, вследствие подрезки слоев пород карьером и движения рабочего борта (висячего бока), встречаются реже других видов оползней. Они образуются, как правило, на участках, где работы временно прекращены.

Причиной возникновения **фильтрационных оползней** является наличие водоносного недренированного пласта. Оползни тесно связаны с другим видом деформаций - оплывинами. Оплывины могут являться начальной стадией развития фильтрационных оползней и, наоборот, фильтрационные оплывины могут переходить (при насыщении оплывина водой до текучего состояния) в оплывины.

При оплывине весь объем пород насыщается водой до текучего состояния. При фильтрационных оползнях этого нет. Если же породы и насыщаются водой до текучего состояния, то лишь в какой-то части. Общей чертой фильтрационных оползней является оплывание нижней части откоса, сложенного обводненными песчано-глинистыми породами, в результате чего вышележащий слой подрабатывается и впоследствии обрушается.

Фильтрационные оползни характеризуются комбинацией двух видов деформаций: оплывин (выноса) и обрушений, - а также цикличность в развитии.

Оползни фильтрационного типа могут развиваться и в том случае, если водоносный горизонт представлен не оплывающими и не размываемыми породами. Если водоносный горизонт имеет свободный сток, оползень не развивается до тех пор, пока не будет создан подпор за счет осипавшихся глинистых пород. Этому способствует отсутствие заоткоски уступов. Вследствие подпора затрудняется выход подземных вод, их уровень повышается, происходит обводнение вышележащих глин и, как следствие, интенсивно развиваются оползни.

#### § 5. Технологические последствия оползней

Оползни являются одним из наиболее распространенных видов нарушений устойчивости. Развитие оползней на современных

карьерах может быть причиной аварии горнотранспортного оборудования, несчастных случаев, нарушений нормальной эксплуатации карьера или его участков, возникает необходимость отгрузки оползневых масс, дополнительной разности борта.

Скорость развития оползневых деформаций может достигать значительных величин, что в ряде случаев не позволяет вовремя вывести из угрожаемой зоны горное оборудование. Однако быстрое развитие оползней является скорее исключением, чем правилом, поэтому аварии оборудования и несчастные случаи при оползневых деформациях довольно редки.

Оползни образуются в откосах слабых пород с длительным сроком стояния, т.е. приурочиваются к верхним горизонтам карьера, по которым осуществляется грузотранспортная связь. Развитие оползней может нарушить транспортные коммуникации за счет разрушения бермы, на которой они расположены, что приводит к прекращению нормального функционирования карьера. Для восстановления работоспособности транспортных коммуникаций борта, нарушенных оползнем, необходимо удалить оползневую массу. Стоимость этих работ, как правило, значительно превышает затраты на придание борту заранее угла устойчивого откоса.

#### § 6. Оползни отвалов

По мере развития открытого способа разработки progressively возрастает высота отвалов, что во многих случаях сопровождается их деформациями, среди которых наиболее частым и серьезным видом нарушений устойчивости являются оползни. Они отрицательно сказываются на ритмичности и безопасности работ, увеличивают себестоимость отвалообразования, а в некоторых случаях (особенно при внутреннем отвалообразовании) приводят к нарушению хода добычных работ.

По классификации проф. С.И.Попова [12], все оползни отвалов, исходя из формы и положения поверхности скольжения,

а следовательно, и причин их возникновения, делятся на три типа, надподожвенные, подошвенные и подподожвенные.

Надподошвенными называют оползни, при развитии которых поверхность скольжения проходит выше основания отвала, сложенного слабыми глинистыми породами. Эти породы в процессе аккрекации и укладки в отвал теряют сцепление. По истечении определенного срока, олеживаясь, они приобретают вторичное сцепление. Неуплотненная масса пород является трехфазной средой: порода - вода - заземленный в пустотах воздух. По истечении отвалом некоторой высоты начинается отжим воздуха из пустот, после чего отвальные породы переходят в двухфазное состояние. Дальнейшее возрастание давления за счет увлажнения высоты приводит к отжиму воды из области высоких давлений в область низких. Этот процесс сопровождается развитием порового давления, снижающего силу внутреннего трения.

Вода, проникающая с поверхности отвала, и вода, отжимаемая из нижней части, создают область повышенной влажности, которая и является поверхностью скольжения. Причиной возникновения надподожвенных оползней может служить также отсыпка в основании отвала пластичных или передельчатых глин, подвергавшихся в дальнейшем увлажнению. Надподожвенные оползни, если не ликвидировать источники обводнения, могут переходить в оплывины, что особенно характерно для отвалов пылеватых песков.

Подподошвенными называют оползни отвалов, когда поверхность скольжения захватывает основание отвала. По характеру проявления этот вид оползней подобен глубинным оползням слоистых пород ледяного бока или оползням выпирания. Характерной особенностью подподожвенных оползней является их медленное развитие и наличие вала выпирания. Подподожвенные оползни могут захватывать отвалы как слабых, так и скальных пород. Возникновение или отсутствие оползней этого типа целиком определяется физико-механическими характеристиками пород основания, их обводненностью, высотой отвала.

Подошвенными называют оползни отвалов, поверхность скольжения которых проходит по слабым контактам основа-

ния отвалов в непосредственной близости от поверхности основания или прямо по ней. Они чаще всего развиваются при наклонном залегании слоев в основании отвала, хотя имеются случаи развития подошвенных оползней при отсыпке отвалов на горизонтально залегающие слои.

Условием возникновения подошвенных оползней является некое сцепление и малый угол внутреннего трения по контакту между основанием и породами отвала или по контактам слоев основания.

Если поверхность скольжения проходит по подошве отвала (особенно наклонной), подошвенные оползни подобны покровным. Разновидностью этих оползней являются деформации высоких отвалов, которые характеризуются значительными скоростями смещений (до 1,5 м/сутки).

Сами по себе неблагоприятные условия отвалообразования не являются причиной развития деформаций. Оползни отвалов возникают только в тех случаях, когда методы отвалообразования не учитывают эти неблагоприятные условия. Как показывает опыт, в любых, самых неблагоприятных условиях можно изыскать такую технологию размещения вскрышных пород, которая обеспечит ритмичную работу на отвалах без нарушения их устойчивости.

## § 7. Осыпи и обрушения

Осыпи - скатывание к основанию откоса кусков породы, потерявших связь с массивом в процессе выветривания. Они развиваются при углах искусственного откоса, больших угла естественного. При меньших углах осыпи не образуются, так как продукты выветривания остаются на месте образования и потоками воды переносятся лишь мелкие частички. Таким образом, развитие осыпей для современных карьеров является неизбежным и наиболее широко распространенным видом деформаций.

Частички отделяются от массива и осыпаются при критической прочности, которая значительно меньше прочности невывет-

раемых пород. Так, для аргиллитов эта величина меньше первоначальной прочности в 20 раз, для алевролитов и песчаников в 4-6 раз и т.д. Для разных пород сроки снижения прочности до критической различны: для аргиллитов 1-2 месяца, для известняков с развитой трещиноватостью около 1 года, для монолитных известняков 2-3 года.

Развитие осыпей протекает различно в несвязных скальных и в мягких связных породах. Осыпи несвязных пород (песка, гравия, пород отвалов) наблюдаются при превышении откосом угла угла внутреннего трения. Как правило, они протекают весьма интенсивно и занимают промежуточное положение между осыпями и обрушениями. Приобретая в процессе осыпания кинетическую энергию, породы осыпи располагаются под углом, несколько меньшим угла естественного откоса.

Глинистые породы с высокой влажностью осыпаются интенсивно, так как подвергаются усадке, интенсивному растрескиванию. Осыпание начинается через 1,5-2 месяца после отработки очередной заходки. Осыпи в скальных породах отличаются меньшей интенсивностью, она зависит от степени трещиноватости откосов и способа ведения взрывных работ.

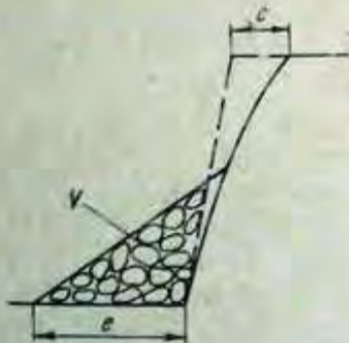


Рис. 9. Характеристики интенсивности развития осыпей

Интенсивность осыпания характеризуется (рис. 9) сработкой верхней площадки за единицу времени  $c$ ; перемещением нижней границы осыпи за единицу времени  $e$ ; объемом осыпи на 1 м откоса, образовавшимся за единицу времени,  $V$ . Характерны следующие показатели интенсивности для мягких связных пород:  $c = 20-90$  см/год,  $e = 35-70$  см/год; для скальных  $c = 10-20$  см/год,  $e = 15-25$  см/год.

При развитии осыпей происходит выполаживание откоса,

срабатывание верхней площадки и засыпка нижней. Вследствие этого уничтожаются площадки и формируется сплошной откос, что может привести к развитию покровных оползней, оплывин или обрушений. Интенсивность развития осыпей должна учитываться при определении ширины берм в зависимости от срока их службы.

Обрушение - быстрое смещение породных масс, слагающих откос. Поверхность отрыва совпадает с трещинами, слоистостью и т.п. и наклонена под углом, большим угла внутреннего трения. После преодоления сил сцепления оторвавшийся массив не может удерживаться на поверхности силами трения и под действием собственного веса перемещается к подошве откоса.

Активная стадия обрушения протекает практически мгновенно. Скрытая стадия, предшествующая активной, характеризуется наличием микроподвижек призм обрушения, которые могут быть зарегистрированы лишь инструментально. В связи с этим обрушения наступают внезапно и являются наиболее опасным видом деформаций, приводящим к авариям оборудования и несчастным случаям. Обрушения чаще бывают в скальных и полускальных породах.

## § 8. Оплывины. Фильтрационные деформации

Оплывинами называют перемещения в виде потока песчано-глинистых пород, насыщенных водой до текучего состояния. Оплывины происходят чрезвычайно быстро и могут захватывать значительные объемы пород. Песчано-глинистые пылеватые породы достигают предела текучести при влажности 20-25%. Это наиболее вероятно в породах нарушенной структуры (отвалах, оползнях, осыпях), имеющих пористость 30-35%. Таким образом, оплывины могут являться завершающей стадией оползней и осыпей пылеватых песчано-глинистых пород при условии их обводнения.

По характеру протекания оплывины делятся на конозонтные и фильтрационные. Конзонтные оплывины характеризуются смещением породных масс, весь объем которых находится в теку-

чем состоянии. Источником обводнения при консистентных опливаниях могут являться атмосферные осадки и грунтовые воды, поступающие в нарушенные массивы.

Фильтрационные опливания связаны с переносом и переотложением грунтовых частиц (преимущественно песка). Процесс происходит с поверхности откоса. Опливание идет равномерно, когда перед откосом имеется площадка для размещения опливаемых масс. При наличии «подрезанного водоупора» опливание сопровождается развитием промоин. Если над опливаемой породой располагаются относительно устойчивые породы (обладающие сцеплением), опливание сопровождается образованием пустот. При достижении пустотами определенного размера происходит обрушение. Фильтрационные опливания являются начальной стадией развития оползней фильтрационного типа. Если в опливаемой и обрушившейся породе продолжает поступать вода, они могут перейти в консистентную опливанку.

Под влиянием подземных вод и атмосферных осадков на откосах развиваются деформации фильтрационного типа. Если подтопленный откос, сложенный песчаными породами, имеет напорные грунтовые воды, то под влиянием гидродинамического давления начинается фильтрационный выпор. Приходит в движение некоторый объем песка, причем все фракции одновременно. На неподтопленном откосе выпора не наблюдается — идет высачивание воды, которое может вызвать опливанку. При достаточно пологом угле затопленного откоса выпор не произойдет:

$$\alpha_p < \arctg (1-J) \operatorname{tg} \rho.$$

где  $\alpha_p$  — угол устойчивого на выпор откоса;  $J$  — гидродинамический градиент (отношение потери напора к длине пути фильтрации).

Предельный угол  $\alpha$  необходимо учитывать при строительстве фильтрующих откосов дренажных траншей.

Механическая суффозия — вынос из массива мелких фракций через промежутки между крупными под влиянием гидродинамического давления фильтрующейся воды. Большой объем выноса может

привести к полной потере прочности породы. Механическая суффозия протекает тем интенсивнее, чем больше величина гидродинамического градиента и чем неоднороднее грунт.

Суффозионные явления — редкий тип деформаций откосов на карьерах. Их следует учитывать при проектировании обвалования на гидроствалах, так как наличие значительных напоров может привести к выносу породы из-под дамбы и провалам [2]. Мерой борьбы с механической суффозией является укладка обратного фильтра, в котором крупность частиц уменьшается по направлению фильтрации.

Фильтрационный вынос по трещинам развивается в слабосцементированных рыхлых песчанниках с естественной трещиноватостью и может привести к глубинному размыву и образованию пустот и провальных воронок. Вынос заполнителя карстовых пустот может способствовать внезапным прорывам воды на рабочие уступы, а при больших объемах выноса нарушать устойчивость борта в целом.

Разжижение — переход рыхлых песков в текучее состояние. Если пески обладают малой плотностью (пористость больше 42–44%) и испытывают большие динамические нагрузки, то они оказываются склонными к уплотнению. Находящаяся в них вода мешает уплотнению, принимая на себя динамические нагрузки. В результате в породе возникает гидродинамическое давление и трение между частицами резко снижается. Разжижение следует учитывать при строительстве гидроствалов.

Поверхностная эрозия развивается на откосах под действием поверхностных потоков, атмосферных, технических и подземных вод. В результате длительного действия поверхностной эрозии на откосах образуются промоины. Выносимый материал скапливается на бермах, заливая их и способствуя водонасыщению пород нижележащих уступов. Особо следует учитывать поверхностную эрозию на гидроствалах, где размыв дамбы может привести к прорывам воды.

В соляных и карбонатных породах растворение и выщелачивание идет интенсивно. В большинстве видов пород выщелачивание

протекает довольно медленно: практически время развития процесса несоизмеримо больше времени существования борта. Однако выщелачивание ведет к снижению прочности пород, в результате чего под тяжелыми механизмами могут образоваться просадки.

### § 9. Просадки, осадки

Просадка — вертикальное опускание небольших по размерам (площадь до десятков квадратных метров) участков породы. Поскольку с наибольшей скоростью подземные воды движутся в прибортовой зоне карьера, развитие фильтрационных деформаций также приурочено к ней. Чаще всего просадки не нарушают общей устойчивости борта, однако в силу скоротечности этого вида деформаций, он является опасным для машин и механизмов. Прогнозировать и предотвращать развитие просадок трудно.

Если в основании откоса имеются слои пластичных глин и просадки происходят за счет их выдавливания, просадки могут являться начальной стадией развития оползня выпирания. На отвалах просадки, возникающие за счет неравномерного уплотнения отвальных масс, также часто являются начальной стадией развития надподопленных оползней отвалов. В связи с этим выделяются просадки пород естественной структуры; просадки с выпиранием основания; просадки пород нарушенной структуры.

Осадки развиваются за счет способности пород уплотняться при возрастании нагрузок. По причинам возникновения (источник дополнительной нагрузки) выделяются осадки под поверхностными зданиями и сооружениями; осадки прибортовых зон; осадки отвалов.

Осадки под поверхностными зданиями и сооружениями наблюдаются при возведении тяжелых сооружений на слабых грунтах. Задачей обеспечения устойчивости является недопущение неравномерных осадок, ведущих к перекосу конструкций [6]. Осадки прибортовых зон возникают в результате водоупонения, что

приводит к росту напряжений в прибортовой зоне карьера. Увеличение давления пород ведет к дополнительной осадке верхней толщи за счет сжатия глинистых пород. При наличии большой мощности глинистых пород осадки могут достигать десятков метров. Зона осадок может распространяться на сотни метров от карьера. Развитие осадок протекает медленно.

Осадки прибортовых зон могут возникать на карьерах глубиной более 70–100 м при наличии глинистых пород. Неравномерные осадки (при сложении борта породами с различными характеристиками) являются причиной развития оползней. В зоне возможных осадок крепление подземных дренажных выработок должно производиться податливой крепью.

Осадка отвала идет наиболее интенсивно в первый период за счет заполнения воздушных пустот. По мере перехода в двухкомпонентную среду порода — вода в нижней части отвала развивается поровое давление и интенсивность осадки снижается. За счет медленного рассеивания порового давления осадка отвалов может продолжаться несколько месяцев после их отсыпки. В результате более интенсивного оттока воды из приоткосной части верхняя кромка отвала имеет большую осадку по сравнению с основной частью.

### § 10. Классификация горных пород и месторождений по условиям устойчивости бортов карьеров

Устойчивость бортов определяется сопротивлением пород сдвигу в образце и массиве, по контактам слоев и трещинам, трещиноватостью, выветриваемостью, склонностью к разуплотнению и набуханию, ползучести. В зависимости от свойств, определяющих устойчивость пород в откосах, все горные породы делятся на пять групп (табл. I) [14].

К группе I отнесены породы с временным сопротивлением сжатию  $\sigma_{сж} > 8000 \text{ Н}$ . В таких породах углы откоса борта, обеспечивающие его устойчивость, значительно больше, чем

Таблица 1

## Классификация горных пород по устойчивости

Номер группы	Название группы	Общая характеристика	Основные типы пород	Характеристики, определяющие устойчивость
I	Скальные (хрепкие)	$\sigma_{ск} \approx 8000H$ , слаботрещиноватые, слабовыветриваемые, не набухают, не подвигаются пластическим деформациям	Магматические и метаморфические породы, выветрелые и слабовыветрелые	Угол внутреннего трения $\rho'$ и сцепление $K'$ по поверхностям ослабления и элементы залегания поверхностей ослабления
II	Полускальные (средней крепости)	$\sigma_{ск} \approx 800-8000H$ , трещиноватые, интенсивно выветриваются, не набухают, не пластичны	Выветрелые разности магматических и метаморфических пород, глинистые и песчано-глинистые сланцы, песчаники, аргиллиты, алевролиты, мергели, известковистые конгломераты, угли	Сцепление $K$ и угол внутреннего трения $\rho$ в образцах $K', \rho'$ и по поверхностям ослабления, элементы залегания поверхностей ослабления, характер трещиноватости
III	Слабые (глинистые) связные	$\sigma_{ск} \approx 800H$ , размокают, интенсивно выветриваются, набухают, пластичны	Все разновидности глин, суглинков, супесей, лессы доломитовые и моренные отложения, сильно выветрелые разности пород групп I и II	$K, \rho, K', \rho'$ , элементы залегания поверхностей ослабления, характер трещиноватости, обводненность, наличие напорных вод
IV	Несвязные (сыпучие)	Сцепление отсутствует ( $K = 0$ ). Угол внутреннего трения и естественного откоса изменяется в пределах 28-38°, не размокают, пластически не деформируется	Полностью деаггегрированные породы групп I и II, пески и галечники	Угол внутреннего трения (угол естественного откоса) $\rho$ , зависящий от коэффициента трения по поверхности частиц
V	Илы и глины	$K \approx 0,2 \text{ кг/см}^2$ , в водонасыщенном состоянии $\rho = 0$	Современные глинистые осадки, рыхлые водонасыщенные пылеватые пески и суглинки, торфы	

технологически необходимы. К группе II отнесены выветрелые и трещиноватые породы магматического и метаморфического происхождения. Границей между породами групп II и III принято  $\sigma_{ск} = 800H$ , так как породы меньшей крепости набухают и разуплотняются при увлажнении и разгрузке и обладают способностью к пластическим деформациям. К группе III отнесены осадочные породы третичного и четвертичного возраста, более слабые литологические разности пород группы II. Основные свойства пород этой группы заключаются в способности их к пластическим деформациям.

В группу III целесообразно выделять твердые и мягкие горные породы. Твердые породы нарушенной структуры в отвалах не слеживаются и характеризуются только углом внутреннего трения. Мягкие глинистые породы в отвалах слеживаются и при достаточно большой высоте отвала переходят в двухфазное состояние.

К группе IV относятся несвязные сыпучие горные породы: пески, галечники, продукты выветривания. Они практически не имеют сцепления, кроме сцепления уплотнения, достигающего 10-20H.

К породам группы V относятся уплотненные современные осадки, торфы и т.п. Сцепление не превышает 2H, угол внутреннего трения в обводненном состоянии равен нулю. К этой же группе относятся пылеватые глины и пески, так как в водонасыщенном состоянии они имеют такое же сопротивление сдвигу. Вследствие изменчивости горных пород во времени границы между группами являются условными.

В зависимости от того, какими породами сложены борты, все месторождения могут быть разделены на следующие группы.

I. Месторождения, сложенные скальными породами группы I. Поскольку породы не склонны к набуханию и разуплотнению, а сдвиговые характеристики позволяют выдерживать углы откоса больше технически необходимых (больше 55-65°), то основное влияние на устойчивость оказывают структурные ослабления, что заставляет уменьшать углы откоса борты. Основные виды деформаций - обрушения и осипи. Поскольку при разведке место-

рождения выявить все нарушения невозможно, большое значение имеет разведка при строительстве и в первый период эксплуатации.

2. Месторождения, сложенные полускальными (выветрелыми, а также глинистыми, не склонными к набуханию) породами. За перемиками глинистых пород могут сохраняться высокие напоры. Устойчивость откосов определяется сопротивлением сдвигу пород и поверхностями ослабления, а при наличии карбонатных пород - и гидрогеологическими факторами. Характерные деформации: осыпи, обрушения по подсеченным поверхностям ослабления, оползни. Для глубоких карьеров устойчивые углы откосов борта 30-40°.

3. Месторождения, сложенные породами группы III, отчасти породами групп IV и V. Породы склонны к набуханию и разупрочнению. Обычно к группе III относятся осадочные месторождения. Устойчивость определяется сопротивлением сдвигу, значительную роль играют структурные ослабления и гидрогеологические факторы. На месторождениях этой группы наблюдаются все виды деформаций, но основное место занимают оползни.

## Раздел II. МЕТОДЫ РАСЧЕТА УСТОЙЧИВОСТИ ОТКОСОВ

### § II. Исходные данные, необходимые для расчета

Метод расчета устойчивости откоса выбирает исходя из конкретных природных и горнотехнических условий и при расчете учитывает их влияние.

В пределах карьерного поля выделяются участки однородного геологического строения и для каждого строят поперечный разрез, на котором наносят положение слоев, потенциальных поверхностей скольжения, контур карьера и особенно поверхности ослабления. В зависимости от наличия поверхностей ослабления

выбирают метод расчета устойчивости и в расчет вводят в качестве исходных характеристики показатели прочности по данному структурному ослаблению.

В большинстве методов расчета в качестве исходных данных используют физические свойства горных пород: объемный вес  $\gamma$  и прочностные характеристики - сцепление  $k$ , угол внутреннего трения  $\rho$  или сопротивление сдвигу  $\tau$ . В некоторых методах привлекают и другие физические свойства: величину временного сопротивления на растяжение, характеристики длительной прочности и др. Они определяются лабораторными или натурными испытаниями для каждой из пород, сложенных борт карьера. Методы испытаний пород рассматривались в предшествующих курсах и нашли широкое отражение в научно-технической литературе [9].

В большинстве методов расчета требуются усредненные данные о физических свойствах всего комплекса пород, пересекаемых поверхностью скольжения, поэтому используются их усредненные значения:

$$\gamma_{\text{ср}} = \frac{\sum \gamma_i m_i}{\sum m_i};$$

$$k_{\text{ср}} = \frac{\sum k_i l_i}{\sum l_i};$$

$$\text{tg } \rho_{\text{ср}} = \frac{\sum \text{tg } \rho_i \sigma_i l_i}{\sum \sigma_i l_i},$$

где  $\gamma_i$  - объемный вес пород  $i$ -го слоя;  $\text{H}/\text{м}^3$ ;  $m_i$  - мощность  $i$ -го слоя в пределах призмы возможного обрушения, м;  $k_i$  - сцепление  $i$ -го слоя,  $\text{H}/\text{м}^2$ ;  $l_i$  - длина участка поверхности скольжения в пределах  $i$ -го слоя, м;  $\rho_i$  - угол внутреннего трения  $i$ -го слоя, град;  $\sigma_i$  - нормальное напряжение в пределах участка поверхности скольжения, проходящей по  $i$ -му слою,  $\text{H}/\text{м}^2$ .

Величина сцепления в массиве пород при наличии развитой трещиноватости

$$k_{Ti} = \frac{k_i - k'_i}{1 + c \ln m_i W_i} + k'_i,$$

где  $k'_i$  - сцепление по трещинам в породах  $i$ -го слоя, Н/м<sup>2</sup>;  $c$  - коэффициент, зависящий от степени трещиноватости и сцепления в образце, изменяется в пределах 0,5-10;  $m_i$  - средняя интенсивность трещиноватости (среднее количество трещин, приходящееся на 1 м) в пределах  $i$ -го слоя, 1/м.

Угол внутреннего трения пород в массиве рекомендуется принимать равным углу внутреннего трения по данным лабораторных испытаний образцов на сдвиг, если поверхность скольжения не совпадает с трещинами, или равным углу трения по лабораторным испытаниям на трение по поверхностям ослабления, если поверхность скольжения совпадает с ними.

На поперечный разрез должны быть нанесены гидрогеологические условия: уровни подземных вод, ожидаемые при работе карьера, определены коэффициенты фильтрации, притоки и т.п. Особое внимание следует уделять наличию напорных горизонтов в подошве карьера. Гидростатическое и гидродинамическое давление в расчетах устойчивости обводненных откосов выступает как дополнительная сила, снижающая величину нормальной составляющей веса.

Климатические условия, количество атмосферных осадков в прямой форме ни в одном методе расчета не учитывается. Для обеспечения устойчивости стремятся свести действие этого фактора к минимуму перехватом стока, планировкой отвалов и т.п.

При расчете устойчивости уступов должны учитываться геотехнические условия: вес оборудования и динамические нагрузки при его работе, влияние взрывов, а при расчете устойчивости борта - подработка борта при совместной отработке открытым и подземным способами, форма карьера в плане, система разработки, пригрузка борта отвалами и т.п.

## 12. Выбор расчетного метода

Механико-математическую модель массива и метод расчета выбирают по конкретным горно-геологическим условиям. Точность полученных решений зависит от соответствия принятых методов реальному массиву горных пород. Общепринятых критериев выбора метода пока нет. Большинство расчетных методов основывается на представлении о горных породах как об идеально сыпучей среде, базирующейся на условии предельного равновесия Кулона:

$$|\tau_n| = \sigma_n \operatorname{tg} \rho + k,$$

где  $|\tau_n|$  и  $\sigma_n$  - напряжение по заданной площадке соответственно касательное и нормальное, Н/м<sup>2</sup>;  $\operatorname{tg} \rho$  - коэффициент внутреннего трения.

Решение задач осуществляется методами предельного напряженного состояния, когда условие предельного равновесия удовлетворяется лишь по некоторой внутренней границе массива (поверхности скольжения) или методами предельного равновесия.

Первая группа методов теоретически наиболее обоснована, однако для реального массива условие предельного напряженного состояния не выполняется. Введение в расчет характеристик прочности, уменьшенных в  $\eta$  раз, где  $\eta$  - коэффициент запаса устойчивости, приводит к тому, что откос, находящийся в допредельном состоянии, рассчитывается методами предельного напряженного состояния.

Решения неприменимы также для массива, у которого поверхности ослабления не совпадают с поверхностями скольжения. Получаемая вогнутая поверхность откоса с вертикальной стенкой в верхней части экономически нецелесообразна и практически неосуществима. Это приводит к необходимости выполаживания откоса, в результате чего теряется основное достоинство методов - их точность. Использовать методы в большинстве случаев затруднительно вследствие большой трудоемкости решений (за исключением некоторых случаев, когда решения доведены до состояния номограмм и таблиц).



Другим видом идеальной среды является идеально связная, характеризующаяся только сцеплением. По своим свойствам к наиболее близки пластичные глины.

Горные породы при нагружении во многом подобны сыпучей среде, обладающей внутренней связностью. Кроме того, они имеют внутренние поверхности ослабления и способны воспринимать растягивающие нагрузки. В связи с этим наиболее рационально рассматривать их как сложную трещиноватую среду, к которой в механическом отношении применимы законы сыпучей среды. Разработанные по этой модели методы предельного равновесия получили наибольшее распространение и рекомендованы к применению Госгортехнадзором СССР [8].

Другие методы представляют лишь теоретический или исторический интерес. В ряде методов делается попытка совместно решить задачи определения конечной глубины открытых работ с учетом предельного коэффициента вскрыши и устойчивого угла погашения борта, а также учесть влияние временного фактора в расчете устойчивости откоса не через коэффициент запаса, а в явной форме.

### § 13. Коэффициент запаса устойчивости

Степень устойчивости откоса оценивается отношением суммы удерживающих сил к сумме сдвигающих — коэффициентом запаса устойчивости

$$\eta = \frac{\lg \rho \sum_{i=1}^n N_i + kL}{\sum_{i=1}^n T_i},$$

где  $\sum_{i=1}^n N_i$  — сумма нормальных составляющих веса породы по поверхности сдвига, Н;  $L$  — длина поверхности скольжения, м;  $\sum_{i=1}^n T_i$  — сумма касательных составляющих веса породы по поверхности скольжения, Н.

Если откос находится в состоянии предельного равновесия, то сумма удерживающих сил в точности равна сумме сдвигающих

и  $\eta = 1$ . Для обеспечения нормального функционирования откоса борта как инженерного сооружения коэффициент запаса устойчивости  $\eta = 1$ , очевидно, неприемлемо, однако необходимое значение  $\eta$  определить практически невозможно. Это связано с тем, что такой подход предполагает точное (во всяком случае с определенной степенью надежности) определение сдвигающих и удерживающих сил. Однако в силу несовершенства расчетных методов, неточности определения свойств пород и ряда других факторов не удается математически строго определить данные силы. Поэтому коэффициентом запаса устойчивости совокупно учитывается необходимый запас устойчивости для обеспечения работы откоса как инженерного сооружения и погрешности определения сдвигающих и удерживающих сил. Расчетные значения коэффициента запаса в зависимости от общей характеристики откоса (борта) и срока его службы следующие:

	До 5 лет	Более 5 лет
Нерабочий борт		
сложенный глинами и трещиноватыми породами	1,20	1,30
с преобладанием песчаных и гравелистых пород	1,15	1,20
Рабочий борт	1,20	-
Откосы рабочих уступов и отвалов	1,20	-
Откосы уступов нерабочего борта, сложенные		
глинистыми и трещиноватыми породами	1,50	2,00
песчаными и гравелистыми породами	1,15	1,20

### § 14. Теоретические основы метода предельного напряженного состояния

Методы предельного напряженного состояния основаны на теории статики сыпучей среды и предполагают, что в откосе,

находящемся в предельном напряженном состоянии, выполняются предельное условие равновесия Кулона и два уравнения плоского равновесия Кулона

$$\frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} = 0;$$

$$\frac{\partial \sigma_y}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} = \gamma.$$

В связи с этим в условиях объемного напряженного состояния откоса максимальные касательные напряжения создаются на площадках, параллельных направлению среднего по величине главного напряжения, а сечение, перпендикулярное этим площадкам, оказывается в плоскости, перпендикулярной направлению простирания откоса. Площадки скольжения наклонены к направлению главного напряжения  $\sigma_1$  под углом  $45^\circ - \frac{\rho}{2}$ , и в каждой точке предельно напряженного откоса имеется две взаимно перпендикулярные площадки скольжения, поэтому при расчете устойчивости откоса, имеющего в плане прямолинейную форму, можно решать плоскую задачу объемного напряженного состояния. Совместное решение вышеприведенных уравнений, как показано В.В.Соколовским [13], позволяет вычислить значение и направление наибольшего главного напряжения для любой точки откоса с координатами  $x$  и  $y$ , если известны эти же значения в точках откоса с координатами  $x_1, y_1$  и  $x_2, y_2$ .

### § 15. Расчет откосов вогнутого и выпуклого профиля

На основе метода В.В.Соколовского рассчитаны откосы вогнутого и выпуклого профиля для различных углов внутреннего трения  $\rho = 5-40^\circ$  через  $5^\circ$  при разных значениях безразмерных координат  $\bar{x}$ ,  $\bar{y}$  предельного контура откоса (рис.10). Таким образом, расчет выполняют в следующем порядке:

1. Определяют коэффициент запаса  $\eta$ .
2. Находят расчетные характеристики

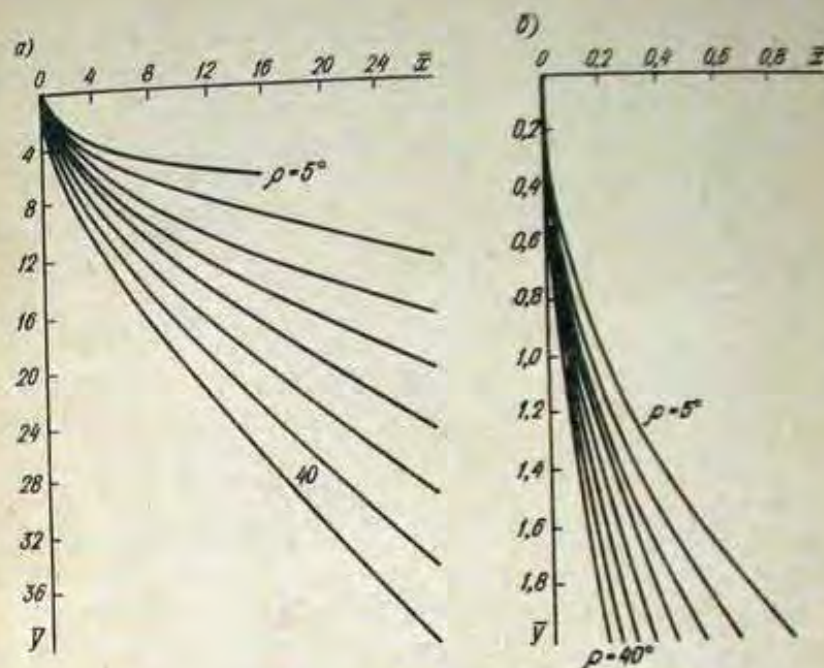


Рис.10. График предельных очертаний равноустойчивого откоса вогнутого профиля по И.С.Мухину и А.И.Срагович [13] (а) и его фрагмент в большем масштабе (б)

$$k_p = \frac{k}{\eta}; \quad \rho_p = \alpha \text{ctg} \frac{\text{tg} \rho}{\eta}; \quad \gamma_p = \frac{\sum \gamma_i h_i}{\sum h_i}.$$

3. Вычисляют глубину вертикальной стенки отрыва

$$H_{90} = \frac{2k_p}{\gamma_p} \text{ctg} \left( \frac{\pi}{4} - \frac{\rho_p}{2} \right).$$

На графике предельного контура откоса (рис.11) откладывают  $y = H$ ;  $y_1 = H - H_{90}$  и  $y_i$ , соответствующие промежуточной глубине карьера.

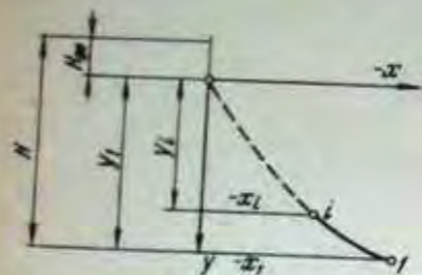


Рис.11. Построение конечного контура откоса по методу В.В.Соколовского на основе решений И.С.Мухина и А.И.Срагович [13]

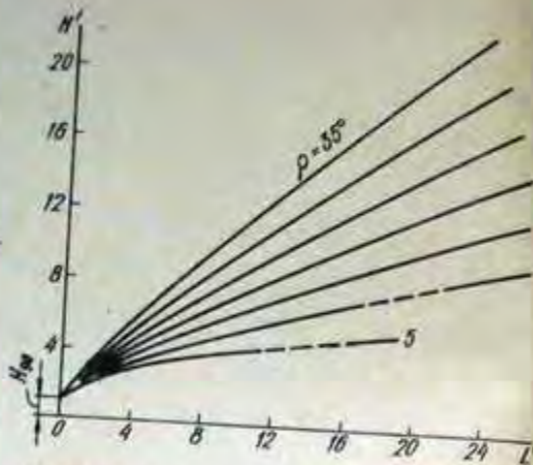


Рис.12. График предельных очертаний откосов выпуклого профиля

4. Определяют безразмерную координату

$$\bar{y} = \frac{\gamma_p}{k} H; \quad \bar{y}_1 = \frac{\gamma_p}{k_p} (H - H_{30}); \quad \bar{y}_2 = \frac{\gamma_p}{k_p} H_i.$$

5. По графику (см. рис.10) находят соответствующее значение безразмерной координаты  $(-\bar{x}, \bar{x}_1, \bar{x}_2)$ , по которой вычисляют истинную координату

$$-x = \frac{k_p}{\gamma} (-\bar{x})$$

и строят профиль откоса.

6. Полученный откос выпуклого профиля будет иметь коэффициент запаса, равный расчетному значению  $\eta$ . Очевидно, что вследствие наличия в верхней части откоса вертикального участка высотой  $H_{30}$ , профиль откоса здесь должен быть выполнен. Использовать наложенный метод можно в откосах, сложенных однородными породами.

На основе метода В.В.Соколовского В.Т.Сапожниковым и Г.Д.Фисенко [14] получено численное решение задачи устойчи-

вости откоса выпуклого профиля (рис.12). Выпуклая форма откоса с горнотехнической точки зрения наиболее предпочтительна, так как при этом сокращаются объемы верхних работ и, кроме того, более полно учитываются прочностные характеристики, значения которых имеют тенденцию к возрастанию с глубиной.

Откос выпуклого профиля строят также как и вогнутого.

## § 16. Инженерные методы расчета

Основные условия состояния предельного равновесия сыпучей среды могут быть преобразованы к виду

$$\Sigma M_x = \Sigma M_y; \quad \Sigma P_x = 0; \quad \Sigma P_y = 0,$$

т.е. по любой поверхности скольжения должны соблюдаться три условия статики сыпуче-вязкой среды: равенство моментов сил относительно центра дуги скольжения; равенство проекции вертикальных составляющих удерживающих и сдвигающих сил; равенство проекций горизонтальных составляющих удерживающих и сдвигающих сил.

Инженерные методы расчета базируются на условиях предельного равновесия по принятой поверхности скольжения. Однако эти условия в инженерных методах расчета не соблюдаются полностью.

В инженерных расчетах используют ряд частных выводов теории предельного напряженного состояния (например, ориентировка площадок скольжения относительно главного нормального напряжения). Кроме того, учитывают особенности структуры массива, обводненность и другие горно-геологические факторы. Разхождение результатов оценки устойчивости методами предельного напряженного состояния и инженерными методами не превышает 5-6%, что вполне допустимо.

§ 17. Инженерный метод расчета устойчивости по круглоцилиндрической поверхности скольжения

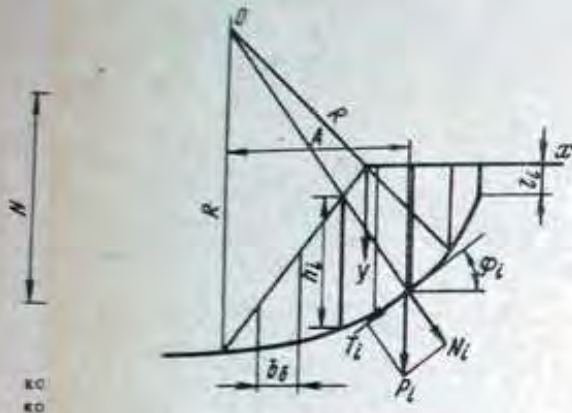


Рис.13. Оценка устойчивости откоса по прямой круглоцилиндрической поверхности скольжения

массив повернуть массив сдвигающихся пород вокруг точки O, определяется весом этого клина P и горизонтальным расстоянием A между центром тяжести клина (точкой приложения веса клина P) и центром вращения (точкой O), т.е.

$$M_B = PA.$$

Для определения момента  $M_B$  используют метод алгебраического сложения сил. Для этого призму возможного обрушения разбивают на ряд вертикальных блоков одинаковой ширины, тогда вес блока

$$P_i = h_i b_i \gamma.$$

Горизонтальное расстояние от центра приложения веса элементарного блока до оси вращения (точки O)  $R \sin \varphi_i$ , тогда момент вращения, создаваемый элементарным блоком,

$$M_{B_i} = P_i R \sin \varphi_i,$$

следовательно,

$$M_B = \sum_{i=1}^n M_{B_i} = \sum_{i=1}^n P_i R \sin \varphi_i.$$

Так как величина  $P_i \sin \varphi_i = T_i$  представляет собой касательную составляющую веса отдельного блока, действующую по поверхности скольжения, то

$$M_B = R \sum_{i=1}^n T_i,$$

где n - число элементарных блоков.

В качестве сил, удерживающих призму возможного обрушения от смещения, выступают сила трения по поверхности скольжения и сила сцепления. В пределах элементарного блока

$$F_{уд_i} = N_i \operatorname{tg} \rho + k l_i.$$

Поскольку нормальная составляющая  $N_i = P_i \cos \varphi_i$ , то

$$F_{уд_i} = \operatorname{tg} \rho P_i \cos \varphi_i + k l_i,$$

а момент вращения сил, удерживающих массив от смещения,

$$M_y = R \operatorname{tg} \rho \sum_{i=1}^n P_i \cos \varphi_i + R k \sum_{i=1}^n l_i.$$

При состоянии предельного равновесия, очевидно, должно выполняться равенство моментов удерживающих и сдвигающих сил, т.е.

$$M_B = M_y;$$

$$R \sum_{i=1}^n P_i \cos \varphi_i = R \operatorname{tg} \rho \sum_{i=1}^n P_i \cos \varphi_i + R k \sum_{i=1}^n l_i$$

или

$$\frac{\operatorname{tg} \rho \sum_{i=1}^n P_i \cos \varphi_i + k \sum_{i=1}^n l_i}{\sum_{i=1}^n \sin \varphi_i} = 1,$$

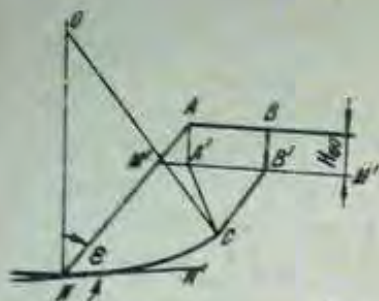


Рис. 14. Построение круглоцилиндрической поверхности скольжения по методу Г.Л. Фисенко [8, 14]

$\eta_0$  будет различной. Наиболее опасную кривую скольжения  $\eta_{\phi} = \min$  выделяют следующим образом (рис. 14).

1. Вычисляют высоту  $H = \frac{2k}{\gamma} \operatorname{ctg} \left( 45^\circ - \frac{\rho}{2} \right)$ , при которой возможно появление площадок скольжения.

2. Проводят линию  $MM'$ , параллельную верхней площадке на глубине  $H_{30}$ .

3. Из верхней бровки откоса (точки  $A$ ) опускают перпендикуляр  $AA'$  до пересечения линии  $MM'$  и проводят линию  $A'C$  под углом  $45^\circ + \frac{\rho}{2}$  к горизонтали (линия  $MM'$ ).

4. Вычисляют ширину призмы возможного обрушения на верхней площадке

$$AB = \frac{2H \left[ 1 - \operatorname{ctg} \alpha \operatorname{tg} \left( \frac{\alpha + \rho}{2} \right) \right] - 2H_{30}}{\operatorname{ctg} \left( 45^\circ - \frac{\rho}{2} \right) + \operatorname{tg} \frac{\alpha + \rho}{2}}$$

где  $\alpha$  — угол откоса уступа.

5. Из точки  $B$  опускают перпендикуляр  $BB'$  до пересечения с линией  $MM'$  и из точки  $B'$  под углом  $45^\circ - \frac{\rho}{2}$  к вертикали проводят линию  $B'C$ .

6. Из точки пересечения  $A'C$  и  $B'C$  восстанавливают перпендикуляр  $CO$ .

что является выражением первого уравнения статики массива в предельном равновесии по данной поверхности. Если массив находится в предельном состоянии, то удерживающие силы будут превосходить сдвигающие, т.е.

$$\frac{\operatorname{tg} \rho \sum_{i=1}^n P_i \cos \varphi_i + k \sum_{i=1}^n l_i}{\sum_{i=1}^n P_i \sin \varphi_i} = \eta_{\phi} > 1$$

Очевидно, что по разным поверхностям скольжения величина фактического коэффициента запаса устойчивости

7. В нижней бровке откоса проводят линию  $NN'$  под углом  $\epsilon = 45^\circ - \frac{\rho}{2}$  к поверхности откоса и к ней из нижней бровки откоса восстанавливают перпендикуляр  $NO$  до пересечения с перпендикуляром  $CO$ .

8. Точка пересечения  $O$  является центром кривой поверхности скольжения, а  $R = ON = OC$  — радиус круглоцилиндрической части поверхности скольжения.

При проектировании устойчивого профиля откоса с заданным коэффициентом запаса находят средневзвешенные характеристики  $k_{\text{ср}}$ ,  $\varphi_{\text{ср}}$ ,  $\gamma_{\text{ср}}$ . По их значениям с учетом расчетного коэффициента запаса  $\eta_p$  вычисляют расчетные характеристики

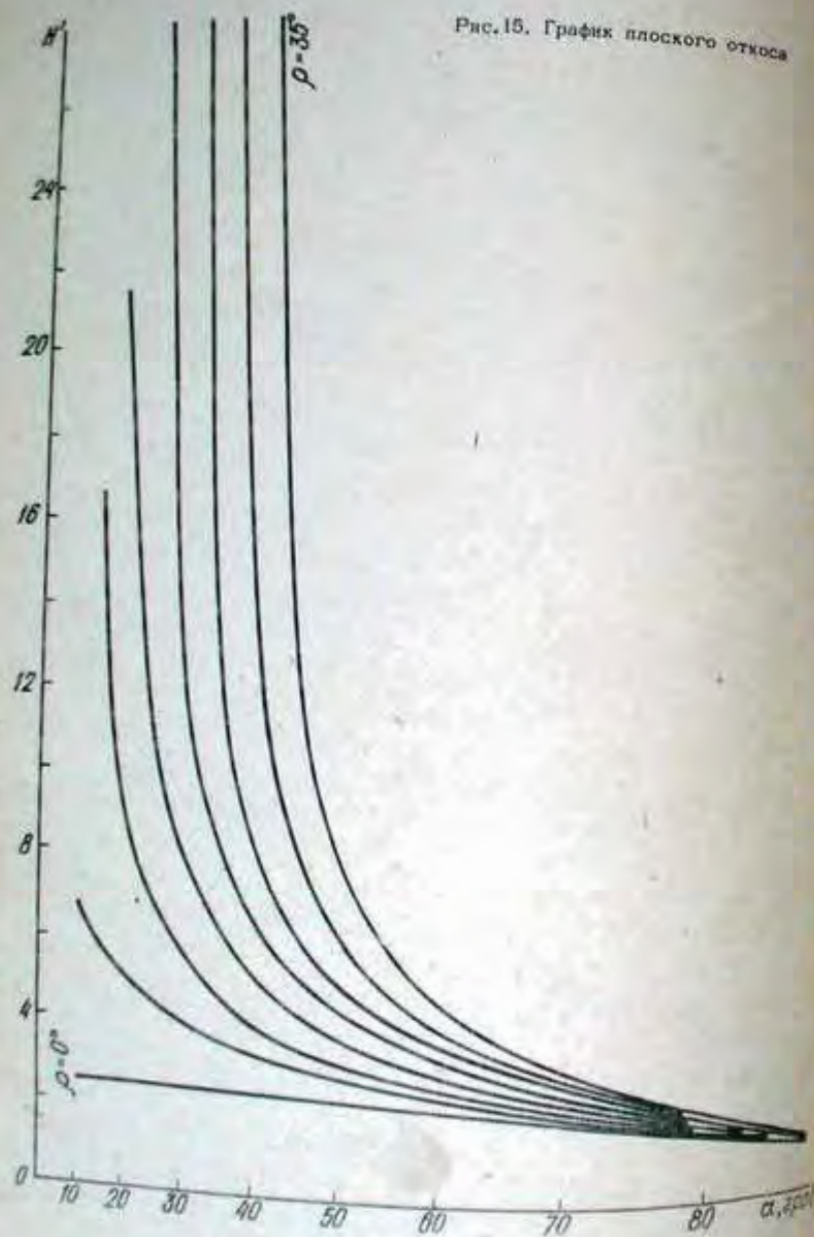
$$k_p = \frac{k_{\text{ср}}}{\eta_p}; \quad \operatorname{tg} \rho_p = \frac{\alpha \operatorname{ctg} \rho_{\text{ср}}}{\eta_p}; \quad \gamma_p = \gamma_{\text{ср}}$$

Ориентировочно определяют угол откоса  $\alpha_1$  (при заданной высоте откоса  $H$ ). Затем строят наиболее напряженную поверхность скольжения и оценивают значение  $\eta_{\phi}$ .

При  $\eta_{\phi} \neq 1$  расчет повторяют при другом значении угла  $\alpha$ , т.е. при  $\alpha_2$ . Причем, если  $\eta_{\phi} > 1$ , угол откоса  $\alpha_2 > \alpha_1$ , и наоборот. В результате получается два значения (при необходимости три и более) коэффициента запаса  $\eta_{\phi_1}$  и  $\eta_{\phi_2}$ , соответствующие определенным углам откоса  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$ .

Угол откоса с заданным коэффициентом запаса может быть определен графически. Аналогично рассчитывают высоту борта при заданном угле откоса.

По результатам большого числа определений параметров откоса с расчетным коэффициентом запаса устойчивости при круглоцилиндрической ПС в безразмерных координатах  $H' = \frac{H}{H_{30}}$  построен график зависимости между высотой откоса и его углом для пород с любыми физико-механическими свойствами (рис. 15). Порядок пользования графиком следующий: 1) определяют расчетные характеристики массива; 2) вычисляют высоту  $H_{30}$ ; 3) если задан угол откоса  $\alpha$ , по его значению на графике определяют величину  $H'$  и вычисляют истинное значение высоты  $H = H' H_{30}$ , с расчетным коэффициентом запаса устойчивости; 4) если задана



высота откоса  $H$  и требуется определить угол откоса  $\alpha$ , обеспечивающий расчетный коэффициент запаса устойчивости, то вычисляют приведенное значение высоты  $H = \frac{H'}{H_{до}}$ . Затем по значению  $H'$  на графике находят значение соответствующего угла  $\alpha$ .

### § 18. Определение параметров борта, сложенного горизонтальными или пологопадающими слоистыми породами

При слоистом строении массива, слагающего борт, контакты могут выступать как поверхности ослабления. При этом поверхность скольжения в нижней своей части может проходить по контактам, а в верхней части является круглоцилиндрической. Нарушение устойчивости по таким поверхностям возможно при горизонтальном залегании слоев (рис. 16, а) и при пологом падении в сторону массива (рис. 16, б). Падение считается пологим, если угол между откосом и наслоением

$$\gamma < 90^\circ - \varphi'$$

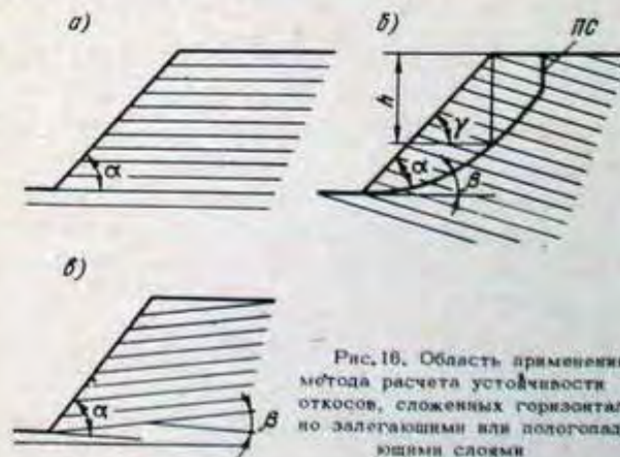


Рис. 16. Область применения метода расчета устойчивости откосов, сложенных горизонтально залегающими или пологопадающими слоями

где  $\varphi'$  - угол сдвига по контактам слоев,  $\varphi' = \alpha \text{ctg} (\text{tg} \rho_p + \frac{h_p}{\sigma})$ ,  $\sigma_{n, \text{cp}}$  - среднее значение нормального напряжения по рассматриваемому контакту,  $\sigma_{n, \text{cp}} = \frac{1}{2} h \gamma \cos^2 \beta$ ;  $\beta$  - угол наклона контактов.

Кроме того, нарушение устойчивости возможно при пологом падении в сторону карьера, если  $\alpha > \rho'$ , а  $\beta < 15-20^\circ$  (рис. 16, в). В массиве без

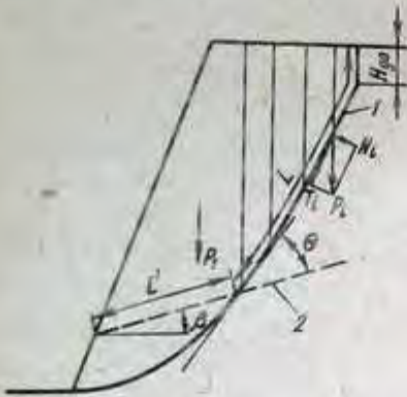


Рис. 17. Расчет устойчивости при горизонтальном или пологосклонном строении борта

1 - наиболее напряженная поверхность, проведенная без учета поверхностей ослабления по контактам; 2 - наиболее слабый контакт

учета поверхностей ослабления определяют высоту борта по графику плоского откоса (см. рис. 15) при заданном угле откоса или наоборот. В полученном откосе строят наиболее напряженную поверхность так, чтобы ее часть проходила по плоскости контакта. Условие предельного равновесия приобретает весьма простой вид, что позволяет непосредственно определять один из параметров откоса (опирающаяся на ослабленный  $H$  или  $\alpha$ ) при известном другом. При падении слоев в сторону карьера под углом  $\beta > 15-20^\circ$  высота устойчивого откоса

$$\eta_{\text{ф}} = \frac{P_1 \cos \beta \text{tg} \rho_p + k_p L (k_p L \text{tg} \rho_p \sum N_i) \sin \theta (\text{ctg} \theta - \text{tg} \rho_p)}{\sum T_i \sin \theta (\text{ctg} \theta - \text{tg} \rho_p) + P_1 \sin \beta}$$

где  $P_1$  - вес блока приходящийся на часть наиболее напряжен-

ной поверхности, совпадающей с напластованием (рис. 17);  $L$  - часть длины наиболее напряженной поверхности, проходящей соответственно по напластованию и в массиве.

Изменяя один из параметров откоса ( $H$  или  $\alpha$ ), находят соответствующее значение  $\eta_{\text{ф}}$ . По результатам двух-трех расчетов (аналогично изложенному в § 17) определяют положение откоса с коэффициентом запаса, равным расчетному значению.

### 19. Расчет устойчивости при наличии поверхностей ослабления, падающих в сторону карьера и подосеченных косом, или при заоткоске по наслоению

В этом случае поверхность скольжения плоская, так как наиболее напряженную поверхность так, чтобы ее часть проходила по плоскости контакта. Условие предельного равновесия приобретает весьма простой вид, что позволяет непосредственно определять один из параметров откоса (опирающаяся на ослабленный  $H$  или  $\alpha$ ) при известном другом. При падении слоев в сторону карьера под углом  $\beta > 15-20^\circ$  высота устойчивого откоса

$$H = H_{\text{до}} \left( \frac{1}{1 - \text{ctg} \alpha \text{tg} \varphi_p'} \right).$$

При заданной высоте откоса может быть определено значение угла падения, при котором допустима заоткоска по наслоению.

$$\beta < \alpha \text{ctg} \left[ \text{ctg} \varphi_p' \left( 1 - \frac{H_{\text{до}}}{H} \right) \right].$$

Высота устойчивого откоса при тех же условиях, но при подосечке контактов

$$H = \frac{2k_p \sin \alpha \cos \rho_p}{\gamma \sin(\alpha - \beta) \sin(\beta - \rho')}$$

## § 20. Расчет устойчивости отвалов

При отомшке отвалов скальных, полускальных пород и песчаных пород устойчивость отвала определяется условием равновесия блока породы весом  $P$  на откосе с углом  $\alpha$ . При этом сила трения, равная  $Ptg\rho\cos\alpha$ , должна уравновесить касательную составляющую веса. Условие равновесия откоса несвязанных пород  $\alpha < \rho$ .

В связи с этим отвалы твердых пород на устойчивом основании практически любой высоты сохраняют устойчивость при углах откоса не более  $34-36^\circ$ .

Параметры отвалов слабых пород или отвалов, расположенных на основании, имеющем слабые контакты или слабые слои, рассчитывают. Для определения сопротивления сдвигу  $\tau_{сдв} = f(\sigma_n)$  слабых пород отвалов необходимо их уплотнять под различными нагрузками  $\sigma_n$  при обязательном исключении отжима воды. По усредненной линии сопротивления сдвигу  $AB$  (рис. 18) определяют характеристики прочности с учетом расчетного коэффициента запаса  $\eta_p$  и вычисляют величину  $H_{30}$ . Контур отвала находят по графику выпуклого откоса (см. рис. 12).



Рис. 18. График сопротивления сдвигу пород отвала

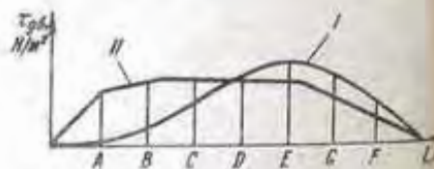


Рис. 19. Удерживающие и сдвигающие напряжения по потенциальной поверхности скольжения

Угол наклона выпуклой кривой в нижней части (1/3 высоты отвала) принимают равным углу естественного откоса, а затем постепенно выполаживают верхнюю часть. Проверочный расчет полученного профиля производят в следующей последовательности:

1. Через нижнюю бровку проводят ряд поверхностей скольжения с углом наклона  $\xi = 45^\circ + \frac{\rho}{2}$  к поверхности откоса.

2. На каждой потенциальной ПС отмечают несколько точек  $A, B, C \dots$

3. В отмеченных точках определяют касательные и нормальные напряжения

$$\sigma_n = h\gamma\cos^2\varphi_i; \tau_{сдв} = \frac{1}{2}h\gamma\sin 2\varphi_i.$$

4. Каждую потенциальную ПС с отмеченными точками развертывают в горизонтальную прямую, и в каждой точке по оси ординат откладывают отрезки, соответствующие  $\tau_{сдв}$  (рис. 19). Концы соединяют плавной кривой I, которая представляет собой эпюру касательных сдвигающих напряжений. Площадь, ограниченная этой кривой, выражает сумму сдвигающих сил по потенциальной ПС.

5. По графику сопротивления сдвигу (рис. 18) при соответствующих нормальных напряжениях определяют сопротивление сдвигу  $\tau_y$ , величины которого откладывают в соответствующие точки оси ординат, и полученные точки соединяются плавной кривой II. Площадь, ограниченная этой кривой, является суммой удерживающих сил.

6. Отношение суммы удерживающих сил к сумме сдвигающих является фактическим значением коэффициента запаса:

$$\frac{\sum \tau_y}{\sum \tau_{сдв}} = \eta_f.$$

7. Если  $\eta_{f_{min}} < \eta_p$ , то высоту откоса уменьшают, и наоборот. Расчет повторяют до тех пор, пока по наиболее напряженной поверхности не будет выполнено соотношение  $\eta_{f_{min}} = \eta_p$ .

При расчете отвалов на слоистом наклонном основании поверхность скольжения может быть принята плавной криволинейной или круглоцилиндрической. Слабые контакты в основании выступают как поверхность ослабления, и поверхность скольжения проходит по наиболее слабому контакту.

По результатам ряда расчетов для отвалов на слоистом основании (при одноярусном отвале с углом наклона  $\alpha$ , равным углу естественного откоса  $\rho$  пород отвала) получена зави-



$$H = \frac{2k_p \sin P_p [\sin(\rho - \beta) + \cos \beta]}{\gamma \sin(\rho_p - \beta) \left[ \frac{\sin(90^\circ - \omega_p) \sin(\rho_p - \beta)}{\cos(90^\circ - \omega_p - \beta)} \frac{\sin(\rho_p - \beta) \cos \beta}{\cos \rho_p'} \right]}$$

где  $\beta$  — угол падения слоев основания, град;  $\omega_p = 45^\circ + \frac{\rho}{2}$  — угол выхода поверхности скольжения в основание отвала, град.

При отсутствии детального изучения свойств пород устойчивые параметры могут быть определены ориентировочно. Достаточность несущей способности основания отвалов проверяется по соотношению

$$\tau_{сдв_0} \geq 0,4 H,$$

где  $\tau_{сдв_0}$  — средняя величина сопротивления сдвигу пород основания,  $H/m^2$ .

Многоярусные отвалы на наклонном слоевом основании сохраняют устойчивость при результирующем угле откоса  $\alpha = 25-30^\circ$ . Высота нижнего яруса не должна превышать 25 м, а при наличии увлажненных глинистых пород 15 м.

Отвалы слабых глинистых пород на устойчивом основании должны размещаться с результирующим углом откоса  $\alpha = 18-25^\circ$ .

Высоту каждого яруса с углом естественного откоса выбирают в зависимости от влажности и состава песчано-глинистых пород в пределах 10-30 м.

### § 21. Учет дополнительных нагрузок при расчетах устойчивости

На устойчивость откоса кроме веса пород могут оказывать влияние и другие силы. В общем случае дополнительные нагрузки в основном уравнении равновесия учитывают с помощью уравнения

$$\eta_\Phi = \frac{\operatorname{tg} \rho \sum_{i=1}^n (P_i + F_i) \cos \varphi_i + \sum_{i=1}^n k l_i}{\sum_{i=1}^n (P_i + F_i) \sin \varphi_i},$$

где  $F_i$  — дополнительная нагрузка.

В большинстве случаев наличие дополнительных нагрузок уменьшает нормальную и увеличивает касательную составляющие веса и тем самым ухудшает условия устойчивости откоса отдельного уступа, но не борта в целом, так как вес призмы обрушения борта на 1-2 порядка больше величин дополнительных нагрузок.

Дополнительные нагрузки от веса оборудования учитывают при расчете устойчивости уступов глинистых пород. Расчет устойчивости ведется методом предельного равновесия по принятой кругоцилиндрической поверхности скольжения.

При определении  $\eta_\Phi$  по нескольким потенциальным ПС сдвигающие и удерживающие силы суммируют методом алгебраического сложения сил. Вес оборудования приходится на элементарный блок, ограниченный частью поверхности скольжения, имеющей наклон  $\omega = 45^\circ + \frac{\rho}{2}$ , поэтому нормальная составляющая веса оборудования будет равна  $P' \cos \omega$ , а касательная  $P' \sin \omega$ , где  $P'$  — часть веса горного оборудования приходится на 1 м фронта уступа.

$$\eta_\Phi = \frac{\operatorname{tg} \rho \sum_{i=1}^n N_i - P' \cos \omega \operatorname{tg} \rho + \sum_{i=1}^n k l_i}{P' \sin \omega + \sum_{i=1}^n T_i}$$

Если по нескольким потенциальным поверхностям скольжения  $\eta_\Phi < \eta_p$ , изменяют параметры откоса  $\alpha$  или  $H$  и повторяют расчет.

Несмотря на кратковременность взрывные нагрузки влияют на устойчивость значительно более существенно, чем вес оборудования. Учет взрывных нагрузок на устойчивость ведется с большим запасом. Максимальная сейсмическая сила, воздействующая на массив при взрыве,

$$P_c = 0,36 \frac{Q^h}{R^{\frac{h}{n}}} \sqrt{\frac{u E^{\frac{h}{n}}}{\gamma}}$$

где  $Q$  - масса одновременно взрывающегося заряда, кг;  $R$  - расстояние от центра взрыва до рассматриваемой точки массива, м;  $u$  - удельная энергия взрыва, Дж/кг.

Дополнительная сила взрыва воздействует по поверхности скольжения на призму возможного обрушения по касательной к ней:

$$F_i = \Sigma P_c l_i,$$

тогда условие равновесия

$$\eta_{\Phi} = \frac{\lg \rho_p \sum_{i=1}^n P_i \cos \varphi_i + k \sum_{i=1}^n l_i}{\sum_{i=1}^n P_i \sin \varphi_i + F_i}$$

При расчете устойчивости обводненных откосов учитывают гидростатическое давление, распределенное по поверхности скольжения и нормальное к ней,

$$D_i = \Delta_0 (H_i - h_i) \frac{b_i}{\cos \varphi_i},$$

где  $\Delta_0$  - удельный вес воды, Н/м<sup>3</sup>;  $H_i - h_i$  - превышение уровня депрессионной кривой в пределах элементарного блока над поверхностью скольжения, м.

Тогда коэффициент запаса устойчивости

$$\eta_{\Phi} = \frac{\sum_{i=1}^n (P_i \cos \varphi_i - D_i) \lg \rho_i + \sum_{i=1}^n k_i l_i}{\sum_{i=1}^n P_i \sin \varphi_i}$$

При подсчете  $P_i$  объемный вес пород ниже уровня грунтовых вод должен приниматься с учетом водонасыщения

$$\gamma_{\text{нас}} = \Delta (1 - n) + \Delta_0 n,$$

где  $\Delta$  - удельный вес породы, Н/м<sup>3</sup>;  $n$  - пористость.

## 22. Учет криволинейности карьера

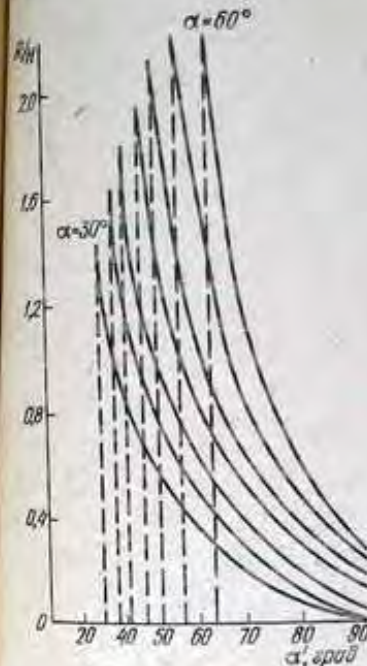
Определение параметров устойчивости откоса основано на решении плоской задачи объемного напряженного состояния, что допустимо, когда борт в направлении простирания является прямолинейным. При криволинейной форме борта по боковым граням элементарных призм обрушения действуют напряжения, возникающие за счет распора (при сдвиге) со стороны соседних участков. При вогнутой форме борта это будут сжимающие напряжения, удерживающие массив от сдвига, при выпуклой - растягивающие, ослабляющие устойчивость массива.

Очевидно, чем меньше радиус кривизны борта  $R$ , тем больше влияние зажима на степень устойчивости массива. Кроме того, изменение состояния равновесия в этом случае зависит от высоты борта и угла его наклона.

Рис. 20. График зависимости устойчивости угла наклона борта (через 5°) от ее кривизны в плане

Для бортов вогнутой формы величина устойчивого угла откоса, очевидно, будет больше, чем для прямолинейного.

После определения угла устойчивого откоса плоского борта  $\alpha$  (по вышеизложенным методикам) вычисляют отношение радиуса кривизны (по верхней бровке карьера) к глубине карьера. Затем по графику (рис. 20) вычисляют угол устойчивого откоса  $\alpha'$  с учетом поправки на зажим призмы возможного обрушения со стороны боковых пород. Заметное влияние кривизны на устойчивый угол откоса начинает проявляться при  $R < 2H$ .



Раздел III. МЕТОДЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ УСТОЙЧИВОСТИ  
БОРТОВ КАРЬЕРОВ И ОТВАЛОВ

§ 23. Обеспечение устойчивости откосов  
при бурозарных работах

На современных карьерах взрывные работы по силе воздействия превосходят все другие горнотехнические факторы и больше всего влияют на устойчивость откосов скальных пород [5]. Взрыв приводит к дроблению пород в зоне, непосредственно примыкающей к заряду взрывчатого вещества. Далее в глубь массива нарушается естественная структура, сомкнутые трещины раскрываются, образуются новые, происходит взаимное смещение блоков пород, на верхней площадке появляются закалы. Порода практически полностью утрачивает сцепление и удерживается в равновесии за счет трения.

Далее нарушения массива проявляются в форме раскрытия трещин и увеличения трещиноватости. Ширина этой зоны достигает 40-50 м. Поскольку подвижки массива при взрыве направлены назад-вверх, они наиболее неблагоприятны при наличии систем трещин, падающих в сторону выработанного пространства. При углах падения свыше 32-36° сразу же после взрыва происходит обрушение подрезанных блоков. В результате подвижек и увеличения трещиноватости прочность массива резко уменьшается.

Еще далее в глубь массива колебания имеют упругий характер (зона „У“) и выступают как дополнительная нагрузка. На уступах, находящихся в равновесном состоянии, близком к предельному, они могут приводить к развитию и активизации опасней даже на больших расстояниях от места ведения взрывных работ.

Уменьшить воздействие взрыва на массив можно ограничением веса одновременно взрываемого заряда, применением контурного взрывания, наклонных скважин, диагональных схем короткозамедленного взрывания, заоткосной уступа по трещинам, падающим в сторону карьера.

Колебания породы при взрыве характеризуются скоростью смещений. Чем больше скорость, тем больше вероятность проявления деформаций. Допустимая скорость смещений  $V_{доп}$ , не вызывающая деформаций, зависит от типа пород и кратности приложения нагрузки, см/с:

	Многократные взрывы	Однократный взрыв
Водонасыщенные песчаные откосы	6	12
Откосы малосвязных пород	24	48
Откосы прочных пород	48	96

В то же время скорость колебаний зависит от веса одновременно взрываемого заряда, расстояния от места взрыва до данного уступа  $r$  и типа пород. Допустимый вес одновременно взрываемого заряда

$$Q_{доп} = \frac{V_{доп}^2 r^3}{K}$$

где  $K$  — коэффициент влияния породы.

Коэффициент  $K$  также зависит от типа пород, степени откоса, и кратности взрывов:

	Среднее при однократных взрывах	Максимальное при многократных взрывах
Водонасыщенные песчаные породы	450	600
Откосы малосвязных несвязанных пород, откосы с неблагоприятно ориентированной трещиноватостью	300	450
Откосы прочных пород	200	300

При взрывании короткозамедленным способом действие каждой серии не накладывается на последующую при интервале замедления

$$T > 2 \sqrt{\frac{SY}{g}},$$

где  $S$  - площадь поверхности уступа, приходящаяся на одну скважину, м<sup>2</sup>;  $g$  - удельный расход ВВ, кг/м<sup>3</sup>.

Контурное взрывание применяют при постановке уступа в конечное положение для снижения вредного влияния взрыва на состояние откосов, что достигается уменьшением зарядов в последнем ряду. Для этого по проектному контуру откоса пробуривают ряд наклонных скважин уменьшенного диаметра. Скважины заряжают ослабленными зарядами ВВ; между стенкой скважины и зарядом должен быть воздушный зазор. Заряды для контурного взрывания изготавливаются в виде гирлянды из патронов ВВ на detonирующем шнуре. Масса заряда на 1 м скважины зависит от крепости пород, расстояния между скважинами, диаметра скважин и составляет 4-20 кг/м, т.е. от 2 до 10 патронов на 1 м скважины.

В результате наличия воздушного радиального зазора и уменьшения веса заряда вокруг контурных скважин не образуется зоны интенсивного трещинообразования и развивается одна трещина в плоскости, проходящей через оси скважин. Вдоль ряда контурных скважин образуется ровная стенка с видимыми следами скважин.

Если контурные заряды взрывают до основных, то образуется узкая щель, которая отражает взрывную волну основных зарядов и тем самым практически полностью устраняет деформации массива за щелью. При одновременном взрывании зарядов отрезной щели и основных для обеспечения нужного эффекта опережение взрыва контурных зарядов должно составлять не менее 35-70 мс. Этот вариант контурного взрывания получил название предварительного щелеобразования.

Если контурный ряд взрывает после основных зарядов - заоткоска уступа гладким взрыванием, - то скважины контурного ряда располагают за пределами наиболее нарушенного слоя. Расстояния между скважинами могут быть увеличены до 2-3 м, а заряды в них до 2,5-4 кг/м. Сближением скважин невозможно до-

биться более высокой чистоты поверхности из-за уже имеющихся за контурным рядом деформаций.

Применение контурного взрывания позволяет увеличить угол откоса уступов на 5-15° по сравнению со значениями их при обычной технологии взрывных работ и экономически оправдано при глубине карьера свыше 20-30 м. Заоткоска уступов в конечном положении по трещинам и другим структурным ослаблениям, падающим в сторону карьера, необходима при углах падения свыше 40°. Заоткоску производят бурением наклонных скважин, не имеющих перебура, под углами, соответствующими углу падения трещин.

#### § 24. Укрепление откосов с помощью взрывных работ

Воздействие взрыва на мягкие породы не всегда снижает их прочность, как это наблюдалось в скальных породах. Если уплотнение пород в результате взрыва не превышает 1-3%, то сцепление снижается до 20-25% от первоначального значения. Более значительное уплотнение увеличивает сцепление (на расстоянии 12-15 радиусов заряда). Общее сопротивление сдвигу в зоне, подвергшейся уплотнению, увеличивается. Наилучшее уплотнение имеет место при взрыве зарядов полного камуфлета (заряды весом до 2-16 кг в скважинах глубиной не менее 10-12 м). Однако абсолютные значения возрастания сопротивления сдвигу (5-9 Н/м<sup>2</sup> в радиусе 1,6-1,9 м) не позволяют применить этот метод для укрепления откосов в чистом виде и образовавшиеся при взрыве полости заливает бетоном. В результате создается своеобразный ряд бетонных свай и зон уплотненных пород. Из условия исключения обтекания породами расстояние между бетонными шпонами

$$L_{ш} = \frac{2n_{ш}D\tau_0}{(\eta_p - \eta_\phi)\Sigma T_{сдв}} \left( \frac{m'}{\sin 2\alpha} - 0,393D \right).$$

где  $n_{ш}$  - число рядов шпон;  $D$  - диаметр упроченной зоны, м;  $m'$  - мощность укрепляемого слоя, м;  $\tau_0$  - предел

плавучести породы, подвергающейся упрочнению взрывом;  
 $(\eta_p - \eta_f) \Sigma T_{сдв}$  - необходимая величина дополнительного  
 удерживающего усилия;  $\alpha'$  - угол между направлением сдвига-  
 ного усилия и боковой гранью «клина» укрепленных пород, град.

Этот способ укрепления откосов повышает устойчивость бор-  
 тов, ослабленных в нижней части слоем пластичных пород, на  
 15-20%. Одновременно снижаются коэффициенты фильтрации в зо-  
 не укрепления и осадка пород.

### § 25. Опыт искусственного укрепления откосов

На карьере шахты «Коксовая-1» в 1956 г. были проведены  
 впервые опыты по укреплению участка борта (длина 150 м, высо-  
 та 20 м) штанговой крепью на глубину 1,6-2,5 м. Участок борта  
 сохранял устойчивость в течение всего времени отработки, не-  
 закрепленные участки были нарушены трещинами и отслоениями  
 пород. Это позволило сократить объем вскрыши на 40000 м<sup>3</sup> и  
 получить экономический эффект в 24000 руб. В 60-е годы за-  
 крепление подвергались участки бортов карьеров, сложенные  
 различными литологическими разностями пород. Как правило, ме-  
 ры по искусственному укреплению приводили к положительным  
 результатам [10].

В настоящее время искусственное укрепление проводится на  
 отдельных участках борта, ослабленных трещинами, слоистостью  
 и т.п. Задача укрепления всего борта является пока трудно  
 осуществимой технически и экономически нецелесообразной.

Искусственное укрепление позволяет выдерживать углы от-  
 косов значительно большие, чем это допустимо на ослабленных  
 участках без укрепления. В результате сокращаются объемы  
 вскрышных работ по разноске борта. Значение этого фактора  
 резко возрастает с увеличением глубины участка укрепления.  
 При искусственном укреплении сохраняется непрерывность транс-  
 портных берм, что является важным для нормальной работы  
 карьеров, особенно глубоких. Основными критериями целесооб-

разности искусственного укрепления является безопасность и  
 экономичность. На участках борта, где возможно обеспечить  
 равную степень безопасности как выполнением угла откоса, так  
 и искусственным укреплением, оценивается их стоимость. Стой-  
 мость укрепления:

$$S_{ук} = b_{ук} V_{ук}$$

где  $b_{ук}$  - себестоимость укрепления 1 м<sup>3</sup> породы, руб/м<sup>3</sup>;  
 $V_{ук}$  - объем укрепленной породы, м<sup>3</sup>.

Затраты на разноску борта

$$S_p = b_{вскр} V_p g' + S_0$$

где  $b_{вскр}$  - себестоимость 1 м<sup>3</sup> вскрыши, руб/м<sup>3</sup>;  $V_p$  - объем  
 породы, подлежащей выемке при разноске борта, м<sup>3</sup>;  $g' =$   
 $= 1,5-2,0$  - коэффициент удорожания вскрыши при разноске борта  
 после оползня или обрушения;  $S_0$  - затраты при полной или  
 частичной остановке карьера, руб.

Экономическая эффективность укрепления

$$\Delta S = S_p - S_{ук}$$

Искусственное укрепление (при современной себестоимости  
 укрепления до 2 руб/м<sup>3</sup>) целесообразно применять в карьерах с  
 глубины 30-50 м.

### § 26. Виды искусственного укрепления

Способ укрепления выбирает исходя из конкретных геологи-  
 ческих условий, технологического назначения участка, предпо-  
 лагаемого вида нарушений устойчивости и окончательно обосно-  
 вывает технико-экономическим расчетом (табл.2).

Свайное укрепление является одним из наиболее надежных и  
 простых способов укрепления откосов. Наилучшие результаты по-  
 лучают на участках, ослабленных слоистостью, трещинами текто-  
 нического происхождения и т.д. Укрепление овами участков с

Таблица 2

Искусственное укрепление откосов

Вид укрепления	Условия применения	Ориентировочная себестоимость ук- репления 1 м, руб/м
1	2	3
Железобетонные сваи, железобетонные шпалы (иногда с цементацией массива)	I. Механическое укрепление Массивы скальных и полускальных пород со слабозащитой трещиноватостью, поверхности ослабления падают в выработанное пространство под углом 25-45°. Комбинация с цементацией позволяет расширить область применения до сильно трещиноватых пород Массивы скальных и полускальных пород со слабозащитой трещиноватостью, песчано-глинистые породы. Поверхности ослабления представлены перемычками породами, что вызывает изгиб свай Крупноблочные маломагистральные или сильно расщепленные породы с падением в сторону карьера под углом 25-55° на глубине до 6 м (для штагов) и 30 м (для тавров) - монолитная масса Сильно нарушенные массивы скальных пород, песчано-глинистые породы, подверженные фильтрационным деформациям Породы, склонные к осыпанию. Падение поверхностей ослабления в сторону карьера под углом 35-45°	0,2-0,4
Сваи-оболочки		0,6-0,8
Штаги и гибкие троевые тавры		0,4-2,0
Защитные подпорные стенки, контрбанкеты, контрфорсы		-
Искусственные бермы		40,0

Продолжение табл. 2

1	2	3
Цементация (иногда с железобетонными сваями)	II. Упрочнение массива пород Трещиноватые скальные и песчано-глинистые породы. Прочность повышается в 2-3 раза Хорошо фильтрующие песчано-глинистые породы. Применяется для повышения прочности и создания водонепроницаемых экранов Хорошо фильтрующие песчано-глинистые породы. Достигается увеличение прочности в 6-20 раз и водонепроницаемости Глинистые водонасыщенные породы с малыми значениями коэффициента фильтрации (менее 0,1-0,05 м/сутки). Прочность повышается в 2-3 раза Глинистые и лесовые породы с коэффициентом водухопроницаемости свыше 0,2-0,4 см/с. Может быть достигнуто повышение прочности в 10-60 раз	0,4-0,6
Упрочнение полимерными материалами (смолизация)		15,0-20,0
Силкатизация		6,0-15,0
Электрохимическое укрепление и электрофизическое упрочнение		40,0-50,0
Термическое упрочнение (обжиг)		4,0-8,0
Покрывать откосы торкрет-бетоном или шпатель-бетоном	III. Упрочнение поверхностного слоя Породы, склонные к интенсивному выветриванию или выщелачиванию, песчаные откосы	1,0-3,0
Покрывать откосы бетоном		
Покрывать откосы полимерными смолами		
Биологические методы укрепления		

крутопадающими поверхностями скольжения (55-60° и выше) практически невозможно, так как сваи дают хорошие результаты при заглублении их ниже поверхности скольжения в зоне призмы упора. Основные достоинства этого способа: возможность надежного укрепления участков с глубоким залеганием поверхности ослабления (до 20-30 м), высокая несущая способность свай (100-150 т); простота возведения; возможность полной механизации работ; низкая стоимость. Свайное укрепление рассчитывается по величине давления призмы обрушения:

$$F = (\eta_p - \eta_\phi) \Sigma T_{сдв}$$

где  $\Sigma T_{сдв}$  - сумма сдвигающих усилий призмы обрушения.

Величина дополнительного удерживающего усилия, которое должны принять на себя сваи,

$$\Delta T_{уд} = F \cos \phi,$$

где  $\phi$  - угол наклона равнодействующей давления призмы обрушения (при плоской поверхности скольжения угол ее падения).

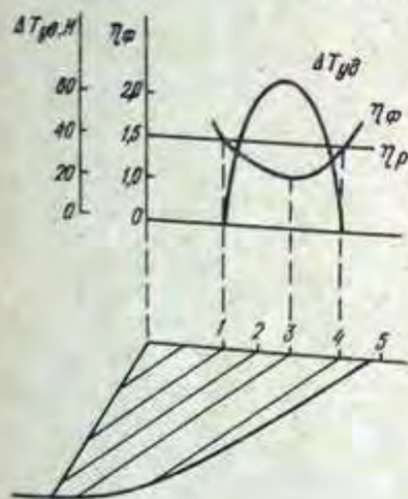


Рис. 21. Определение дополнительного удерживающего усилия

Когда трудно установить направление действия давления призмы возможного обрушения, следует принимать  $\phi$  горизонтальным и

$$\Delta T_{уд} = F.$$

По ряду предполагаемых поверхностей скольжения вычисляют значения  $\eta_\phi$  (1, 2, 3, 4, 5, рис. 21) и строят график его изменения в зависимости от расстояния поверхности скольжения до откоса. Поверхность скольжения, где  $\eta_\phi = \eta_p$ , определяет границу области пород, подлежащих укреплению.

Если поверхность ослабления представлена трещиной большого протяжения,  $\eta_\phi$  определяют только по одной поверхности скольжения:

$$\eta_\phi = \frac{\Sigma T_{уд}}{\Sigma T_{сдв}} = \frac{P \cos \phi \operatorname{tg} \rho' + k' S_{сж}}{P \sin \phi},$$

где  $S_{сж}$  - площадь поверхности скольжения, м<sup>2</sup>;  $\phi$  - угол падения трещины, град.

На уступе с ясно выраженными признаками сдвига (трещины, заколы, микроподвижки) принимают  $\eta_\phi = 1$ . В этом случае величина дополнительного удерживающего усилия

$$\Delta T_{уд} = (\eta_p - 1) P \sin \phi.$$

Сваи могут быть разрушены срезом по трещине (когда спадаящий массив достаточно монолитен) или изгибом.

Число свай, необходимых для укрепления участка борта длиной  $l$ , рассчитывают по несущей способности свай соответственно на срез  $Q_{ср}$  и на изгиб  $M_{изг}$ :

$$N = \frac{\Delta T_{уд} l}{Q_{ср}} \quad \text{и} \quad N = \frac{M l}{M_{изг}}$$

Величины  $Q_{ср}$  и  $M_{изг}$  вычисляют по строительным нормам и правилам. Величина изгибающего момента  $M$  зависит от геологического строения укрепляемого участка и определяется согласно Руководству [16].

Глубина заделки свай ниже поверхности скольжения зависит от прочности пород, величины дополнительного удерживающего усилия и надежности закрепления арматуры. Ориентировочно глубина заделки может быть принята для скальных и рыхлых связанных пород соответственно 1,5-2 м и 3-4 м.

Для укрепления железобетонных свай (шпун) бурят скважины, устанавливая в них арматуру и бетонируют. В качестве жесткой арматуры используют рельсы, а в качестве гибкой - стальные стержни периодического профиля. Бетонирование желательно вести с применением электроинвентаров для лучшего заполнения скважин бетоном.

Штанги и гибкие тросовые тязи «сшивают» слоистый массив. Их целесообразно применять, когда на небольшой глубине от поверхности закрепляемого откоса (5-6 м) имеется монолитная порода для надежного закрепления замка штанг. При отсутствии монолитных пород возможна предварительная цементация в зоне закрепления замка. В предварительно пробуренную скважину заводят металлическую штангу, ее конец закрепляют в скважине бетоном и придают натяжение, прижимающее оползающий блок к монолиту. Ограничение длины штанг и тязей связано с возможностью их возведения.

Предварительно напряженные штанги и тязи целесообразно возводить, когда нагрузки растягивающие, ненапряженные — при сдвигающих нагрузках. Ненапряженные штанги изготавливают из железобетона, напряженные — металлическими с железобетонным замком. Закрепление головки штанги на поверхности откоса может сопровождаться затяжкой из металлической сетки, бетонных плит торкретирования и т.п., что предохраняет откос от выпадения отдельных кусков породы, препятствует ослаблению натяжения, способствует более равномерной передаче усилия.

Положение предварительно напряженных штанг должно отвечать условиям их работы, как поддерживающей конструкции. Для этого штанги располагают в вертикальной плоскости параллельно усилению, сдвигающему блок. Нарушение правильной ориентации штанг в вертикальной плоскости может привести к появлению дополнительных сдвигающих усилий.

Количество предварительно напряженных штанг, необходимое для поддержания закрепляемого блока,

$$N = \frac{\Delta T_{уд}}{Q(\sin \phi \operatorname{tg} \rho + \cos \phi)}$$

где  $Q$  — несущая способность одной предварительно напряженной штанги, Н.

Для ненапряженных штанг

$$m = \frac{\Delta T_{уд} \cos \phi}{Q}$$

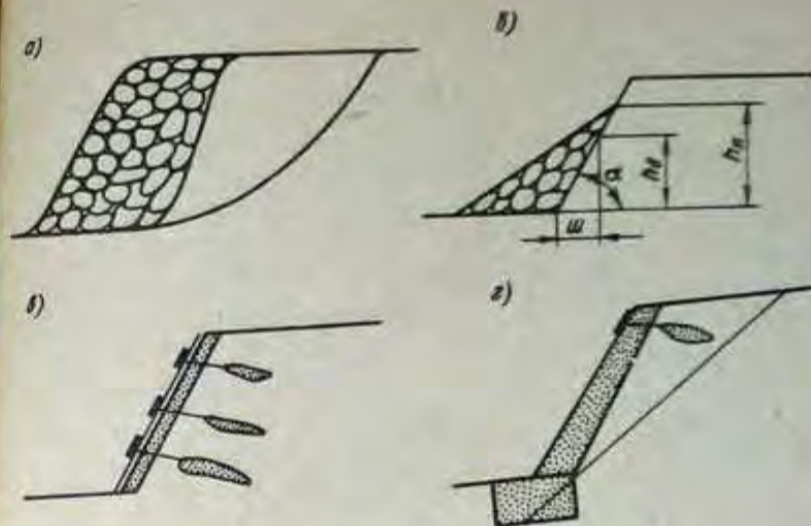


Рис.22. Типы поддерживающих сооружений: а — контрфорсы; б — контрбанкет; в — защитная железобетонная стенка; г — подпорная железобетонная стенка

Контрфорсы (рис.22, а) из скальных пород выполняют роль пригрузки и тем самым предотвращают развитие оползней. Размеры контрфорса должны обеспечить дополнительное удерживающее усилие. Общее сопротивление контрфорса сдвигу должно равняться оползневому давлению. Тогда вес контрфорса

$$P_k = \frac{F}{\operatorname{tg} \rho_k}$$

где  $\operatorname{tg} \rho_k$  — коэффициент трения пород контрфорса по основанию.

Наряду с поддерживающей функцией, контрфорсы препятствуют развитию осыпей и фильтрационных деформаций.

Контрбанкеты применяют для укрепления оплывающих песчаных откосов. Их параметры (рис.22, б) зависят от коэффициента фильтрации водоносного горизонта  $K_f$ , удельного расхода  $q'$  и заложения откоса в пределах промежутка высачивания  $ш$ . Высота пригрузки



$$h_a = (m + 0,5) \frac{q'}{k_{\phi}} + 0,5.$$

Отсыпку пригрузки ведут непосредственно волею за выемкой пород уступа, а количество глинистых примесей не должно превышать 20%, так как их наличие приводит к резкому ухудшению условий фильтрации и оплыванию.

Подпорные железобетонные и защитные стенки (рис. 22, в, г) не нашли применения на карьерах из-за их малой несущей способности и большой стоимости возведения.

В результате развития осыпей образуются сплошные откосы недопустимо большой высоты. В этом случае обеспечить безопасность работ можно путем создания искусственных улавливающих берм (рис. 23, а). Для сокращения объема вскрыши допустимо устраивать укрепленные предохранительные бермы на подрезанных контактах, падающих в сторону карьера под углом свыше 30-35° (рис. 23, б).

Параметры искусственных берм определяют аналогично расчету свай. При строительстве искусственных берм бурят скважины диаметром 200-250 мм на расстоянии 2,5-4,0 м (устанавливаются

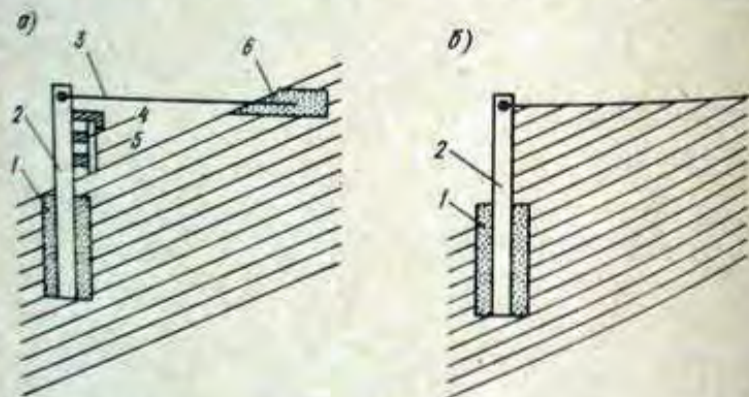


Рис. 23. Искусственные бермы: а - улавливающая; б - на подрезанных контактах  
1 - скважина; 2 - шпунт из рельсов; 3 - анкер (канат); 4 - пояс из швеллера; 5 - отсыпка (железобетонные плиты); 6 - железобетонный замок тросового анкера

расчетом), шпурь для анкерных замков, устанавливаются и бетонируют арматуру.

Цель упрочнения горных пород улучшить прочностные свойства массива. Это достигается введением в массив веществ, которые после схватывания имеют значительно более высокие характеристики сопротивления сдвигу, чем упрочняемые породы. В качестве упрочняющих веществ можно использовать цементные растворы, полимерные смолы и силикаты. Высокая стоимость упрочнения полимерных смол и силикатов ограничивает их применение. Цементацию целесообразно проводить в сильно нарушенных, смальных или невязанных, т.е. хорошо проницаемых породах. При достаточно близком расположении скважин цементные монолиты могут сливаться друг с другом, что приводит к созданию гидроизоляционной завесы, увеличивая гидростатический напор за линией скважин и вместо повышения устойчивости откоса может привести к интенсификации деформаций.

Изоляцией откосов устраняется выветривание. Она целесообразна для глубоких карьеров с длительным сроком существования. В качестве изолирующих покрытий применяют бетон, полимерные материалы, битум и др. Смесь цемента, заполнителей и сжатого воздуха, нанесенная на откос, под давлением 2,5-3,0 атм, схватывается с поверхностью и затвердевает. Для повышения прочности бетонные покрытия наносят на металлическую сетку и чаще всего сочетают со штанговой крепью. Изоляция откосов с помощью битумных пленок недорога, но малодолговечна.

При закреплении песчано-глинистых откосов биологическим способом породы выступают в качестве почвы и поэтому должны удовлетворять требованиям, обеспечивающим развитие растений: быть проницаемыми для корневой системы, содержать минимум минеральных веществ и др. Для каждого типа горных пород подбирают соответствующие растения. Основные требования при выборе посадочного материала: способность к быстрому укоренению (более быстрому, чем развитие процесса эрозии на глубину посадки); образование глубокой корневой системы; способность к вегетативному размножению. В качестве таких растений могут вы-

ступать многолетние травы, дикорастущие злаки, кустарники и деревья. Укрепление откоса биологическими методами результативно спустя значительное время (через 2-3 года). Кроме того, оно способствует улучшению санитарного состояния в пределах горного отвала и на прилегающих территориях.

#### § 27. Обеспечение устойчивости с помощью технологических мероприятий

Технологические факторы в отличие от природных поддаются целенаправленному воздействию и с этой точки зрения являются более перспективными для обеспечения устойчивости. В основе выбора технологии лежит учет возможных деформаций [3].

Важнейшей мерой, обеспечивающей отработку месторождения в устойчивых контурах, является соблюдение проектных углов откосов уступов и борта в целом путем своевременной их заоткоски с помощью контурного взрывания. Окончательную заоткоску («оборку») от нависей, заколов, козырьков выполняют экскаваторами, оборудованными лопатами-скребками. Своевременное выполнение заоткоски снижает интенсивность развития осыпей. При наличии поверхностей ослабления, падающих в сторону карьера под углом, большим  $30^\circ$ , заоткоску производят по этим поверхностям.

Ширину берм всех назначений определяют с учетом их технологического назначения, интенсивности развития осыпей и времени стояния.

Последовательность отработки карьерного поля выбирают с учетом выявленных зон возможных нарушений устойчивости. Внешние капитальные траншеи должны располагаться в устойчивых породах и не подсекать поверхностей ослабления, чтобы обеспечить нормальную эксплуатацию в течение всего срока существования карьера. Вскрытие стационарными внутренними съездами желательнее осуществлять по висячему борту карьера, так как здесь ориентировка напластований обеспечивает лучшие условия

устойчивости. Постоянным бортом не должны подсекается слои, падающие в сторону карьера под углом, большим угла внутреннего трения по контакту. Если подсека не избежать, то следует прибегать к искусственному укреплению. При возможности отработки карьерного поля очередями разработка участков, сложенных слабыми породами, должна проектироваться в последнюю очередь, чтобы срок стояния борта был минимальным.

Разработка мульдообразных залежей по восстановлению пласта часто приводит к развитию глубинных оползней, поэтому предпочтительней развивать работы двумя встречными карьерами, сохраняя замок мульды возможно дольше невынутым, что увеличивает призму упора. Поскольку глубинные оползни реализуются годами, этот метод обеспечивает устойчивость бортов и одновременно наилучшие технико-экономические показатели: быстрый ввод мощности, минимальные значения эксплуатационного коэффициента вскрыши первого периода.

Если полезное ископаемое залегает над потенциальной или проявившейся поверхностью скольжения и образует упор для оползневого тела целесообразно обрабатывать его узкими (25-30 м) поперечными заходками с последующей подвалкой оползня породами вскрыши. При этом силы оползневого давления обеспечивают рыхление пласта. Разработка поперечными заходками целесообразна и при подходе к постоянному борту, так как обеспечивает необходимое опережение вземки по вышележащему уступу для применения контурного взрывания.

Развитие многих типов деформаций связано с обводнением. Важной профилактической мерой является обор, отвод и обор поверхностных вод. Для этого бермы должны иметь поперечный уклон в сторону водостводной канавы, обеспечивающей отсутствие инфильтрации в массив. Для поддержания канав в рабочем состоянии в течение длительного времени их целесообразно выполнять закрытыми или заполнять щебнем.

При оползнях, в труднопрогнозируемых по скорости развития подвижек условиях, вземку и погрузку осуществляют с помощью достаточно мобильного оборудования. Рабочие площадки должны

быть приспособлены для возможной аварийной его эвакуации, т.е. очищены от навалов породы, иметь достаточно большую ширину и т.п. Цель работ на оползневом участке — предотвратить дальнейшее развитие оползня, поэтому, как правило, они должны начинаться с устранения причины его возникновения. Для этого ликвидируют источник обводнения откоса, планируют поверхность оползня для обеспечения стока поверхностных вод. Отгрузку оползневых масс начинают с отгрузки пород из призмы активного давления. Выемочными механизмами являются драглайны, находящиеся за пределами призмы возможного обрушения. Работа должна производиться при постоянном контроле состояния основания.

#### § 28. Обеспечение устойчивости отвалов

Подготовка поверхности основания отвала является наиболее распространенным методом, позволяющим эффективно предотвращать развитие оползней. Если в основании отвалов залегает маломощный слой слабых пород, наиболее рационально его удалить. Если же в основании отвала залегают слабые слои, имеющие значительную мощность (3-5 м и больше), удаление их экономически неоправдано. В этом случае необходимо регулировать интенсивность отсыпки, чтобы высота отвала обеспечивала консолидацию пород основания, не вызывая деформаций. Практически для этой цели достаточно иметь предотвал высотой 3-5 м до момента полного уплотнения. Последующее увеличение высоты отвала не приводит к развитию деформаций. Время консолидации, высоту предотвала и основного яруса определяют экспериментально.

Если в основании залегают обводненные, хорошо фильтрующие породы, отсыпка отвала сопровождается увлажнением нижней части и развитием в ней деформаций. В этих случаях целесообразно проводить дренажные траншеи, заполненные щебнем и имеющие уклон для стока, что снижает уровень ниже основания. При

расположении отвала на неровной поверхности продолжение дренажных канав необходимо и для обеспечения стока из пониженных участков.

Если сопротивление сдвигу слоистого основания по контактам слоев меньше сопротивления сдвигу отвальных пород, могут развиваться оползни подошвенного типа. В этом случае эффективной мерой является взрывание основания. Условие эффективности метода

$$f' - f'' > f''' - f''',$$

где  $f'$  — коэффициент трения взорванных пород основания;  $f''$  — коэффициент трения по контактам слоев (или по контакту основания с отвальными породами);  $f'''$  — коэффициент трения, обеспечивающий устойчивость отвала. При этом в основании отвала создается еще и слой хорошо дренирующих пород, способствующих осушению пород отвала.

Если в основании отвала залегает слабый водоупор, под которым находится водоносный горизонт (особенно напорный), подготовка основания включает дренаж этого горизонта с тем, чтобы депрессионная воронка была ниже подошвы водоупора.

Если внутренние отвалы расположены на лежащем боку, оставленном слоистой толщей, которая имеет в своем составе напорные горизонты, отделенные от выработанного пространства водоупором, обязательной мерой является вскрытие этих горизонтов карьером с эффективным перехватом воды (не допуская увлажнения отвалов).

Увлажнение отвальных пород приводит к снижению сопротивления сдвигу, вплоть до перехода в текучее состояние, что может вызвать различные деформации. Одним из наиболее существенных источников обводнения отвальных пород являются атмосферные осадки. Для их отвода необходимо так планировать отвалы, чтобы обеспечить сброс воды. Осушение отвалов может быть достигнуто за счет укладки в их основание слоя хорошо фильтрующих пород (взорванные скальные породы, галечник, крупнозернистые пески и т.п.).

Устойчивость отвалов в значительной степени определяется технологией, скоростью по высоте и фронту, порядком отсыпки пород, различных по своим физическим свойствам, размерами отвальной заходки, призабойной зоны и т.п. [4]. Изменение параметров отсыпки технически легко разрешимо и является эффективным методом обеспечения устойчивости.

Последовательность отсыпки, обеспечивающая наилучшие условия устойчивости, является такой, при которой сопротивление сдвигу пород отвала возрастает сверху вниз. Это может быть достигнуто применением внеочного и отвального оборудования, позволяющего вести селективное размещение пород в отвале (транспортно-отвальные мосты с промежуточными станциями отсыпки, ленточные отвалообразователи и драглайны с рабочими параметрами, обеспечивающими возможность послойного формирования отвала).

В бульдозерных, плужных, экскаваторных отвалах породы в большинстве случаев распределены более равномерно. Однако и в этом случае отвалы могут приобретать косошлостое строение, что снижает их устойчивость. Мерой обеспечения устойчивости является регулирование режима вскрышных и отвальных работ для достижения максимального усреднения состава пород.

После отсыпки очередной отвальной заходки для реализации потенциальной поверхности скольжения в оползень требуется определенное время  $t_p$ . Следующая отвальная заходка по отношению к первой является призмой упора, увеличивающей силы, удерживающей откос в равновесии. Время между отсыпками очередных отвальных заходок  $t_{отс}$  определяется скоростью продвижения отвального фронта. Очевидно, что при  $t_{отс} < t_p$  развитие оползней исключается. Если  $t_{отс} > t_p$ , то процесс развития деформации к моменту отсыпки второй заходки закончится и механизмы будут работать вне зоны деформации. Наиболее опасно условие  $t_p \approx t_{отс}$ . Планирование скорости отсыпки возможно после предварительного установления скорости развития деформаций.

## § 29. Устойчивость бортов карьеров и безопасность работ в зоне влияния подземных выработок

Открытые и подземные работы могут вестись совместно (рис. 24):

I. Полезное ископаемое извлекают в нижней части подземным; в верхней – открытым способами.

II. Полезное ископаемое добывают подземным способом, а затем в верхней части ведут открытую добычу потерянных запасов.

III. Залежь *a* разрабатывают подземным способом, а залежь *б* открытым. Карьер полностью или частично находится в зоне подработки.

IV. Карьер разрабатывает залежь *a*, которая расположена в породах лежащего бока залежи *б*, разрабатываемой подземным способом. Влияние подработки отсутствует или минимально.

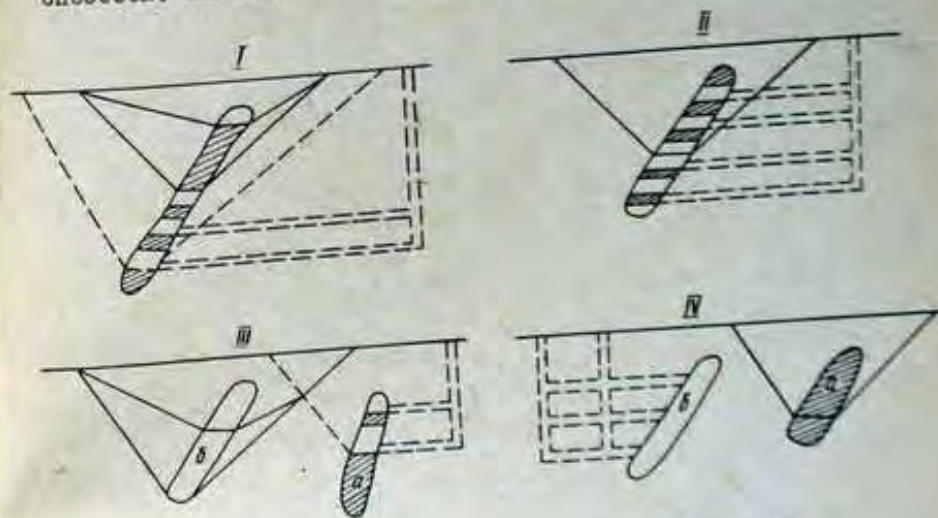


Рис. 24. Варианты совмещения открытых и подземных работ

Подземная разработка сопровождается сдвижением окружающих пород, характер которого зависит от свойств пород, размеров

выработок, способа поддержания выработанного пространства [1]. По влиянию на устойчивость бортов карьеров характер движения пород может быть разделен на три типа: 1) жесткое поддержание вмещающих пород (с помощью паликов, закладки, крепи), когда масса не имеет значительных смещений; 2) плавное опускание пород без нарушения их сплошности (с помощью податливых крепей, паликов и т.п.), прогиб может достигать или не доходить до земной поверхности; 3) обрушение вмещающих пород с нарушением их сплошности.

При комбинированной разработке первые два типа движения не оказывают существенного влияния на устойчивость бортов карьеров. Обрушение же вмещающих пород может приводить к серьезным нарушениям устойчивости борта, так как непосредственно над выработанным пространством образуется область беспорядочного обрушения.

Обрушенные породы создают за счет разрыхления подпор вышележащих слоев и процесс сдвига выше этой зоны развивается менее интенсивно, в форме сдвигов по трещинам. Здесь образуется область разломов. Далее следует зона плавных сдвигов или прогиба.

При определенном соотношении мощности залежи и глубины разработки любая из зон может достичь земной поверхности с образованием на ней мульды сдвига. При выходе на земную поверхность зоны прогибов неравномерность оседания пород в отдельных частях мульды сдвига или большие углы наклона по ее краям могут представлять опасность для зданий и сооружений. Борт карьера, находящийся в зоне прогиба, не имеет нарушений устойчивости, и наблюдаются лишь деформации железнодорожных путей.

При выходе на земную поверхность зоны разломов и обрушения образуется характерный рельеф, состоящий из отдельных террас и воронок. При выходе на борт карьера деформации представляют значительную опасность для обслуживающего персонала и машин вследствие своей внезапности. Кроме того, они представляют угрозу и для общей устойчивости борта, так как раз-

меры воронок значительны по глубине и в плане (диаметр до 100 м и более).

Минимальная глубина залегания верхнего контура выработанного пространства (от контакта коренных пород с наносными), при которой на поверхности не образуется воронок,

$$H_3 \geq \frac{(20-f)l_{пр}}{33(1+0,1f)} \text{ или } H_3 \geq 10m_3,$$

где  $f$  — коэффициент крепости пород по М.М.Протодакинову;  $l_{пр}$  — пролет выработанного пространства;  $m_3$  — вертикальная мощность залежи.

Предельный контур зоны опасных движений может быть установлен по углу воронкообразования, минимальное значение которого  $85^\circ$ . На основе имеющихся представлений о процессах сдвига состояние пород в зоне подработки в настоящее время может быть предсказано исчерпывающе. В то же время обеспечение безопасности и экономичности ведения открытых горных работ в зоне подработки требует детальных знаний о состоянии массива в каждой точке, т.е. значительно более полной осведомленности по сравнению с ведением работ на ненарушенном массиве. Для этого необходимо как на стадии проектирования, так и в процессе эксплуатации изучить и учесть общие закономерности сдвига пород в данном геологическом районе; имеющиеся материалы по сдвигу пород под влиянием подземных выработок на данном месторождении; местоположение подземных выработок и свойства пород по имеющейся геолого-маркшейдерской документации.

Капитальные вскрывающие траншеи и постоянный борт с транспортными коммуникациями располагают на ненарушенных сдвигением породах. Кроме того, они могут находиться в той части зоны подработки, где закончилась фаза активного сдвига и процессы сдвига в меньшей степени нарушили естественное состояние массива, т.е. в районе выхода висящего бока зоны сдвига на поверхность или в ее торцах. Выявленные трещины, плоскости скольжения, пустоты необходимо учитывать

при проектировании развития работ в карьере как места повышенной опасности.

Расстояние между бортом карьера и верхней границей выработанного пространства по вертикали должно быть больше, чем глубина образования воронок. При невозможности выполнения этого требования ведение работ в зоне воронок допустимо лишь после окончания процессов сдвижения над подземными выработками.

При одновременной работе карьера и подрабатываемого его подземного рудника безопасность работ обеспечивают выбором соответствующих скоростей понижения открытых и подземных работ при учете динамики формирования зоны воронок обрушения. При подходе горного оборудования к зоне предполагаемых локальных пустот (возможного обрушения) они предварительно должны погашаться с помощью буровзрывных работ (БВР) по специальным проектам. До погашения пустот они должны отмечаться на рабочих и транспортных площадках. Допускается работа карьерного оборудования над непогашенными пустотами при условии оставления потолочин необходимой мощности, обеспечивающей безопасность. Процессы сдвижения активизируются при проведении массовых взрывов, их влияние сказывается на расстоянии до нескольких километров. Поэтому во время массовых взрывов на руднике, подрабатывающем карьер, на самом карьере и горных предприятиях, расположенных в радиусе 5-6 км, из зон возможного обрушения должны выводиться люди и механизмы.

#### § 30. Дренаж карьерных полей как метод обеспечения устойчивости

Дренаж — комплекс мер по захвату и отводу подземных и поверхностных вод с целью улучшения условий открытой разработки.

Дренаж снижает гидростатическое и гидродинамическое давления, поэтому он наиболее эффективен при наличии не вскрытых

карьером напорных водоносных горизонтов в подошве, в прибортовой зоне за непроницаемыми перемычками напорных вод; при наличии на борту карьера или на площадке уступа скопления воды, а также в откосах гидроотвалов.

С точки зрения обеспечения устойчивости необходимо отметить дренажирование месторождения (тип и количество технических средств осушения) выбирают на основе типизации месторождений применительно к условиям осушения. На этой основе выделяют следующие группы:

А. Месторождения, где заметную роль играют песок и глина, т.е. породы, неустойчивые по отношению к воде. Б. Месторождения с твердыми, водоустойчивыми породами. В. Месторождения смешанного типа.

Внутри каждой группы особо рассматривается рабочий и рабочий борты, период строительства и эксплуатации применительно к разным системам разработки.

Цели дренажа для каждой группы различны. С точки зрения обеспечения устойчивости дренаж наиболее эффективен в месторождениях групп А и В. Однако решение вопроса о необходимой степени дренажирования должно рассматриваться как технико-экономическая задача.

### Раздел IV. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ НАРУШЕНИЙ УСТОЙЧИВОСТИ В ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ЦЕЛЯХ

#### § 31. Общие сведения. Классификация методов использования нарушений устойчивости

Деформации откосов, особенно при оползнях и обрушениях, сопровождаются значительной дезинтеграцией сдвигающегося массива и его перемещением на нижележащие горизонты. Таким образом, породы отделяются от массива и рыхлятся, что в обычных

условиях выполняется с помощью специальных технологических процессов.

Использование горного давления для отделения руды от массива и ее дробления применяется давно и успешно при разработке рудных месторождений системами с обрушением руды и вмещающих пород. При этом снижается себестоимость добычи, повышается производительность труда по сравнению с другими классами систем.

На карьерах обрушение откосов для отделения пород от массива и их рыхления до настоящего времени не получило широкого распространения, однако в отдельных случаях, например при разработке слабостойчивых пород средствами гидромеханизации, оно применялось уже в 30-х гг. XX в. Поскольку процесс подработки и обрушения не поддается эффективному контролю, использование принципа обрушения для рыхления массива ограничено.

На основе характера процесса, зависящего от высоты уступа и типа пород, проф. Г.А.Нурок [11] выделил шесть способов обрушения уступов. Однако причины, влияющие на процесс обрушения, размеры обрушающихся блоков, развал пород изучены все-таки недостаточно полно, что приводит к необходимости поддерживать большие расстояния (10-30 м) между гидромонитором и забоем и, следовательно, снижает эффективность подрезки.

Имеются примеры использования оползневых процессов для интенсификации выемки пород на ряде карьеров (Коркинском, Ермолаевском, Волчанских, Раздольском и др.). При рыхлении пород на высоких уступах с помощью взрывных работ также используется эффект обрушения, однако выделить его и оценить количественно в этом случае невозможно.

Наиболее полно обрушение может быть применено в технологических целях в слабых породах, но поскольку в 40-60-х гг. получили широкое распространение такие средства механизации, как роторные комплексы, мощные драглайны и др., обеспечивавшие быстрый рост производительности труда и снижение себестоимости горной массы, использование принципа обрушения не

являлось на большинстве карьеров актуальным. В настоящее время способ увеличения высот уступов и соответственно параметров выемочных машин практически исчерпал свои возможности, поэтому возродился интерес к отысканию принципиально новых способов разработки, обеспечивающих независимость параметров выемочного оборудования от высоты уступа. Наиболее достаточно большой опыт использования искусственно вызываемых нарушений устойчивости в технологических целях и А.Г.Валарев [15] предложена их классификация (табл.3).

Одним из наиболее перспективных является управляемое обрушение уступов. Процесс деформации происходит по заранее локализованной поверхности и развивается практически мгновенно по достижении состояния предельного равновесия. Это позволяет путем рассчитанного ослабления откосов управлять обрушением, т.е. заранее определять его объем и форму поверхности отрыва.

### § 32. Обрушение уступов на всю высоту

Горные породы, обладающие внутренней связностью, могут сохранять устойчивость при приложении им вертикального откоса небольшой высоты.

Предельная высота вертикального откоса, сохраняющая кратковременную устойчивость,

$$H_0 = \frac{2k}{\gamma} \operatorname{ctg} \left( 45^\circ - \frac{\varphi}{2} \right) \left[ 1 - \sqrt{\frac{\sigma_p}{k} \operatorname{ctg} \left( 45^\circ - \frac{\varphi}{2} \right)} \right],$$

где  $\sigma_p$  — временное сопротивление пород на растяжение. Поскольку для горных пород с определенной долей приближения можно считать

$$\sigma_p = 2k \operatorname{tg} \left( 45^\circ - \frac{\varphi}{2} \right),$$

то можно принять

$$H_0 = 3H_{\text{ст}}$$

Классификация технологии горных работ с применением управляемого обрушения

Таблица 3

1	2	3	4
Вид нарушения устойчивости	Характерные признаки обрушения уступа	Технологические особенности обрушения уступа	Конструктивные особенности обрушающих-погрузочных машин
Частичное обрушение уступов	Слоевое обрушение уступов Мощность слоя мала и силы собственного веса пород для отдаления от массива используются незначительно	Обрушение происходит в виде тонкой стружки, подрезаемой по откосу уступа. Под действием сил собственного веса порода скатывается к подошве уступа, где ее грузят на транспортные средства	Обрушающая машина выдает рабочий орган (шнеки, фрезы, зубья, алмазиды и т.д.), смонтированный на специальной раме или передвижной платформе на колесах. Погрузочная машина или имеет самостоятельный ход и передвигается по подошве уступа
Обрушение уступов крутыми слоями	Угол откоса уступа больше угла естественного откоса; мощность слоя определяется физико-механическими свойствами пород, силы собственного веса используются больше, чем при частичном обрушении уступов	По всей длине откоса уступа выделяются слои и обрушаются за счет подрезки. Обрушенная порода скатывается к подошве уступа, где ее погружают	Обрушающая машина передвигается по откосу собственным ходом или с помощью тяговых канатов; рабочий орган выполнен в виде фрезы, бара, шнека и т.д. Погрузочная машина имеет самостоятельный ход и передвигается по подошве уступа

Продолжение табл. 3

1	2	3	4
Обрушение уступов наклонными слоями	Угол откоса уступа меньше угла естественного откоса и зависит от конструктивных особенностей обрушающе-погрузочных машин; мощность слоя определяется физико-механическими свойствами пород и параметрами обрушающих машин	По всей длине откоса уступа нарезаются слои и обрушаются его подрезкой в основании и при необходимости в кровле. Порода обрушается на приемные устройства обрушающе-погрузочной машины либо на подошву слоя, откуда промежуточными средствами транспорта передается к основанию уступа	Обрушающие и обрушающе-погрузочные машины должны иметь ходовое устройство, обеспечивающее их передвижение по наклонной поверхности. Обрушающе-погрузочные машины имеют специальные приемные устройства. При обрушении на подошву слоя для погрузки должна использоваться самостоятельная машина. Рабочий орган обрушающих машин может быть выполнен в виде ротора, фрез, шнеков и т.п.
Обрушение наклонных уступов	Максимальная высота уступа определяется физико-механическими свойствами сложенных пород. Область применения ограничена значительной мощностью вскрытых пород. Испытываемые силы собственного веса пород значительно больше, чем при слоевом обрушении	Обрушение уступов достигается созданием в почве ослабляющей выработки. Обрушение производится на подошву уступа или на приемное устройство обрушающей машины	Рабочие органы обрушающих и погрузочных машин могут быть выполнены в виде ротора, фрез, ковшей и т.д. К ходовым устройствам машин специальных требований не предъявляют



1	2	3	4
Обрушение вы- соких уступов	Высота уступа определяется устойчивым углом откоса, при котором обеспечивается сложное сползание обру- шенной массы по мере ее подработки. Максимально ис- пользуют силы собственного веса пород	Для обрушения уступа ос- лабляют его основание вер- тикальной подработкой или вырылом на выброс, в кровле уступа создается ос- лабляющая выработка. Обру- шенную породу погружают специальными или существу- ющими экскавационными ма- шинами с значительными ра- бочими параметрами	Для создания ослабляющих вы- боток можно использовать много- и одноковшовые экскава- торы, трамвайные каналоукладе- ли, гидромеханизмы, БВР и машины со специальными рабо- чими органами (фрезы, шнеки, бары и т.п.). Погрузочная маш- на может быть оборудована ро- торным, шнековым или вибропо- грузочным органом с предохра- нительным устройством, позво- ляющим работать под завалом. Могут быть использованы ротор- ные экскаваторы
Нормативные методы расчета уступов	Высота уступа определяет- ся условиями критической устойчивости	Искусственный оползень развивается при подборке оползней массы	В качестве погрузочных машин могут быть использованы обыч- ные одно- и многоковшовые экскаваторы с высотой черпания, меньшей высоты уступа

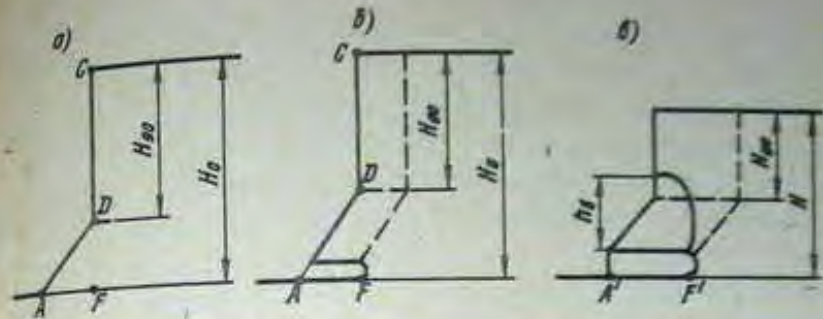


Рис.25. Параметры подработки при обрушении вертикальных откосов

Нарушение устойчивости вертикального откоса высотой  $H_2$  по характеру протекания процесса наиболее близко к обрушению. При этом обрушение происходит по линии  $CDA$  (рис.25, а). Для развития следующего цикла обрушения, очевидно, необходимо удалить породу из призмы упора  $ADF$  на высоту

$$DF = H_0 - H_{90} = \sqrt{\frac{\sigma_p \operatorname{ctg}(45^\circ - \frac{\rho}{2})}{k}}$$

или подрезать их на глубину (рис.25, б)

$$AF = (H_0 - H_{90}) \operatorname{tg}(45^\circ - \frac{\rho}{2}) = 2\sqrt{\frac{\sigma_p H_{90}}{\gamma}}$$

При обрушении вертикального откоса высотой  $H < H_2$  ве-  
личина подработки (рис.25, в)

$$AF' = \frac{2\sigma_p H_{90} \operatorname{ctg}(45^\circ - \frac{\rho}{2})}{H\gamma} - \frac{1}{2} \frac{(H - H_{90})^2}{H} \operatorname{tg}(45^\circ - \frac{\rho}{2})$$

Обрушение подработанных откосов может происходить в форме отдельных выколов высотой  $h_0$  или сразу на всю высоту.

Поскольку степень дробления определяется высотой, обрушение вертикальных уступов небольшой высоты не может обеспе-  
чить нужного рыхления пород и его целесообразно вести на

наклонную поверхность, угол наклона которой обеспечит скатывание обрушенных пород и их переизмельчение.

Подрабатывать (подрезать) вертикальные откосы можно различными механизмами или взрывным способом. Так, для подрезки предложено использовать специальные обвало-погрузочные машины с фрезерными, шнеко-роторными устройствами и др. Принципиальным недостатком указанных типов машин является непосредственный прием на рабочий орган обрушающихся пород, который может достигать нескольких десятков кубометров.

Обрушение высокого уступа  $H \gg H_0$ , находящегося в состоянии предельного равновесия, при отсутствии внутренних по-

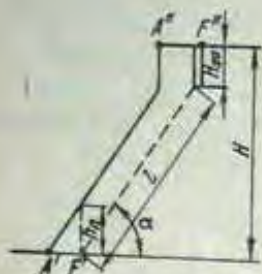


Рис.26. Схема обрушения высоких уступов

верхностей ослабления по характеру приближается к оползневому процессу. вновь образовавшийся откос будет более пологим, что в следующем цикле может уменьшить объем сдвигающихся пород или вообще привести к прекращению процесса сдвига. В связи с этим для обрушения высоких уступов необходимо создавать вертикальную щель (рис.26). Чтобы ликвидировать сопротивление пород отрыву и тем самым заранее наметить линию откола

обрушаемого массива, глубина щели должна быть равна или больше  $H_{90}$ .

Из условия предельного равновесия блока, околнуренного ослабляющими выработками определяют ширину подработки

$$A^* P^* = \frac{H \sqrt{H^2 - 2 \frac{(H - H_{90})k}{\gamma \cos^2 \alpha (tg \alpha - tg \rho)}}}{tg \alpha}$$

Необходимая высота подработки

$$h_n = H - \sqrt{H^2 - 2 \frac{(H - H_{90})k}{\gamma \cos^2 \alpha (tg \alpha - tg \rho)}}$$

Параметры откоса уступа  $\alpha$  и  $H$  рассчитывают так, чтобы откос, не ослабленный выработками, находился в состоянии устойчивого равновесия с необходимым коэффициентом запаса.

Для создания безопасных условий работы основание уступа следует подрабатывать драглайнами, взрыванием породы на виброо или средствами гидромеханизации. В настоящее время предложены конструкции обвало-погрузочных машин, однако, они пока еще не прошли широкой экспериментальной проверки.

### § 33. Слоевое обрушение уступов

Метод слоевого обрушения является перспективным и уже получил определенное распространение. При обрушении крутыми слоями на откосе уступа выделяют слой пород (рис.27) высотой  $H_n \leq H_0$ . Подрезку осуществляют специальной обрушающей машиной, которая передвигается по откосу с помощью тяговых канатов, или перемещается только ее рабочий орган. В качестве рабочего органа могут выступать фреза, цепь с режущими зубьями, шнек и т.п.



Рис.27. Схема обрушения крутыми слоями

Общий угол откоса уступа  $\alpha$ , угол подработки  $\beta_n$  и высоту подработки  $h_n$  выбирают такими, чтобы обеспечивалась кратковременная устойчивость. Угол откоса в подрезаемом слое  $\alpha$  должен быть больше угла естественного откоса пород, чтобы порода скатывалась по откосу. При достижении определенной площади подработки часть слоя обрушается на длину  $l$ . Далее цикл обрушения повторяется. По окончании подрезки и обрушения слоя по всему фронту для создания необходимых условий работы необходимо выбрать некоторый объем породы в пелле (заштрихован на рис.28).

При данной схеме обрушения высота уступа не зависит от параметров погрузочной машины, а тем самым сокращается число погрузочных и транспортных горизонтов. За счет хорошего рыхления пород производительность погрузки будет выше, чем при выемке из пелла. Как показывают расчеты, при  $\alpha = 37-40^\circ$  таким образом можно обрабатывать уступы высотой 60-80 м и более.

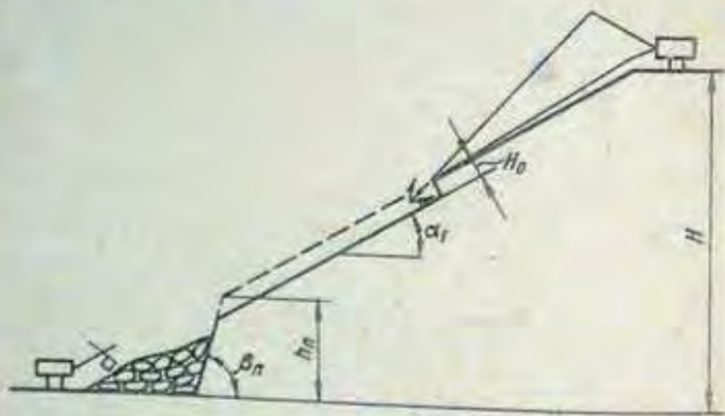


Рис.28. Схема частичного обрушения уступов крутыми слоями

На карьерах широко применяется частичное обрушение уступов крутыми слоями (рис.28). Физическая сущность процесса обрушения практически полностью повторяет предыдущую схему.

Слой мощностью  $H_0$  отделяют от массива специальными машинами или устройствами, при падении по откосу он рыхлится. При разработке глины используют глинофрезерные машины, для песков применимы драглайна или рабочий орган в виде трехлопастного якоря.

#### § 34. Искусственное оползнеобразование

Искусственное оползнеобразование может быть вызвано приданием откосу параметров, обеспечивающих состояние предельного равновесия. При достаточно высокой пластичности пород оползнеобразование будет развиваться циклично по мере подбора оползших масс. Однако, как показывают теоретические предположения и практические наблюдения, по мере отгрузки оползня его длина по фронту сокращается. В связи с этим для эффективного управления оползнеобразованием необходимо производить осыпание оползня ослабляющими выработками. Для этой же цели может быть использовано нагнетание воды через скважины или сотрясательное взрывание. Искусственное оползнеобразование наиболее эффективно при сложении уступа слабыми пластичными глинами или при наличии таких пород в его основании.

### Раздел У. ИЗУЧЕНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ

#### § 35. Задачи экспериментально-производственных методов изучения устойчивости

Исследование нарушений устойчивости бортов карьеров особенно экспериментальными методами практически невозможно, так как постановка такого эксперимента неизбежно связана с большими материальными затратами и нарушением работы карьера.

В то же время любое возникшее на карьере нарушение устойчивости является вынужденным экспериментом. Экспериментально-производственные методы делятся на следующие группы:

А. Изучение сдвижения откосов горных пород.

А-I. Методы маркшейдерских наблюдений за смещением пород по профильным линиям: геометрическое и тригонометрическое нивелирование, наземная стереофотограмметрия, параллактическая полигонометрия.

А-II. Упрощенные методы маркшейдерских наблюдений: метод парных реперов и упрощенных наблюдений.

Б. Исследования напряженно-деформированного состояния массива горных пород.

Б-I. Методы непосредственного измерения деформаций в глубине массива с помощью глубинных реперов и разгрузки.

Б-II. Методы, основанные на зависимости акустических свойств массива и его напряженного состояния: сейсмический и акустический.

Б-III. Методы, основанные на взаимосвязях поля напряжений и других физических полей (электрического, магнитного и т.д.).

Б-IV. Методы замера относительных деформаций и напряжений скважинами, поперечными и продольными деформометрами и накладными и встроенными тензометрами.

В. Исследование физических свойств (плотности, трещиноватости, прочностных свойств) массива на образцах и натурные испытания.

### § 36. Изучение сдвижения откосов горных пород

Маркшейдерские наблюдения за развитием деформаций бортов карьеров и отвалов получили наибольшее распространение. С их помощью устанавливаются границы распространения деформаций, их вид, скорость, величину смещений и их критические значения. На основе этих данных можно уточнить углы откосов, методы

расчета устойчивости, предрассчитать развитие деформаций во времени.

Порядок проведения инструментальных маркшейдерских наблюдений и их точность регламентируются инструкцией, утвержденной Госгортехнадзором СССР. Для проведения наблюдений устанавливаются специальные станки, состоящие из нескольких профильных линий реперов. Реперы делятся на опорные, расположенные вне зоны сдвижения пород на расстоянии от верхней бровки карьера не менее  $1,5H$  (рис.29), и рабочие, находящиеся в пределах деформирующегося массива.



Рис.29. Профильная линия опорных 1 и рабочих 2 реперов для инструментальных наблюдений

Конструкция репера должна обеспечивать прочную связь его с породой для обеспечения точного соответствия сдвижения репера и породы, удобства пользования, безопасности наблюдателя, необходимой долговечности. Наблюдения заключаются в привязке опорных и рабочих реперов к карьерной опорной сети, определении исходного положения рабочих реперов и систематических наблюдениях за их смещениями. Кроме нивелировки и измерения расстояний между реперами одновременно производят съемку трещин, заколов и т.п. в пределах данной профильной линии. Периодичность наблюдений определяется характером и скоростью деформаций и колеблется от одно-двух раз в год до нескольких раз в сутки.

По результатам определения положения рабочих реперов вычисляют вертикальные  $\Delta h$  и горизонтальные  $\Delta l$  смещения вдоль профильных линий по сравнению с предыдущим и первоначальным, векторы смещений, величину смещений, скорость смещения реперов по направлению смещения. Результаты вычислений

представляют графиками вертикальных и горизонтальных смещений по каждой профильной линии и графиками скорости смещений по направлению векторов.

По этим материалам устанавливают тип оползня (или другого нарушения устойчивости) и определяют влияние на скорость смещения различных климатических, горных, геологических факторов. При реализации оползня устанавливаются критические скорости и критические смещения. На основе анализа всего комплекса условий развития нарушения устойчивости разрабатывают мероприятия по предотвращению развития опасных деформаций. Все нарушения устойчивости на карьерах обязательно паспортизируются. Паспорт нарушения устойчивости составляют для накопления и систематизации сведений о характере и причинах нарушений устойчивости.

Упрощенные методы маркшейдерских наблюдений включают визуальное изучение состояния откосов на участках, где отсутствуют деформации, и собственно упрощенные маркшейдерские наблюдения, применяющиеся при интенсивно развивающихся деформациях. Частота визуальных обследований зависит от степени устойчивости откосов и проводится, как правило, не реже одного раза в месяц. Результаты обследования (проявления деформаций откосов, факторы, влияющие на их развитие, и т.п.) фиксируют в специальном журнале.

### § 37. Исследования напряженно-деформированного состояния прибортового массива

В настоящее время практически не производят натурных измерений распределения напряжений и деформаций внутри прибортового массива. Это объясняется техническими трудностями осуществления подобных экспериментов, так как зона влияния карьера захватывает массив на десятки и сотни метров в глубину, а кроме того, до недавнего времени считалось вполне достаточным при оценке устойчивости пользоваться теорией одну-

щей среды. В результате этих исследований при подземных горных работах существенно расширились представления о горном давлении, получены принципиально новые методы расчетов, а тем самым упрощено управление горным давлением. Очевидно, что внедрение этих методов в исследования устойчивости откосов на карьерах принесет не менее важные результаты.

Сейсмический метод основан на взаимосвязи скорости упругих колебаний и напряжения в горных породах. При сжатии скорость продольных волн  $v_p$  вдоль образца практически не отличается от их скорости в массиве  $v_m$  и зависит от величины напряжений  $\sigma$ , что позволяет получить тарировочную зависимость  $v_p = f(\sigma)$  для данного типа породы. Упругие колебания породы в массиве вызываются взрывом и улавливаются различного рода сейсмоприемниками. Затем вычисляют скорость распространения продольной волны. Пользуясь тарировочным графиком, можно оценить напряженное состояние массива.

Радиометрический метод основан на изменении степени поглощения гамма-излучения или нейтронной эмиссии в зависимости от уплотнения слабых связных пород и их влажности, которые в свою очередь определяются величиной напряжений. Для измерений могут быть использованы гамма-плотномер, нейтронный индикатор влажности и другие приборы, которые опускают на необходимую глубину в скважины. Влажность, уплотнение пород и напряжения в зоне между прибором и детектором зонда определяют по калибровочным кривым, которые получают предварительно на образцах горных пород.

Метод разгрузки основан на плотной связи с породой датчика деформаций, наклеиваемого на забой скважины, или магнитострикционного датчика, плотно расклиниваемого в скважине. Затем породу вокруг датчика выбуривают по кольцу и оставшийся керн с датчиком теряет связь с массивом. Деформации породы при разгрузке регистрируют по изменению электрического сопротивления датчика. Зная упругие характеристики породы и деформация, можно определить напряжение в массиве.

Метод разгрузки применим только на небольших глубинах (до 10-15 м) и не нашел широкого применения на карьерах.

Метод глубинных реперов позволяет определить величину, направление и скорость смещения на забое скважины. Для этого можно использовать измерительные стержни и проволоку. Применение в качестве репера источника радиоактивных излучений позволяет резко увеличить глубину заложения реперов (до 200-300 м).

### § 38. Лабораторные методы изучения устойчивости

Принципиальной основой любого лабораторного метода изучения устойчивости является замена изучаемого объекта, например откоса горных пород, некоторым другим объектом - моделью, в той или иной степени отражающей комплекс свойств, присущий изучаемому объекту.

Моделирование основано на теории подобия: если два явления подобны, то по известным характеристикам одного из них (модели), характеристики другого (натуры) могут быть получены простым пересчетом, аналогичным переходу от одной системы единиц измерения к другой. Условием обеспечения подобия при моделировании является одинаковость численных значений для всех безразмерных комбинаций из размерных величин модели и природы. Полное обеспечение условий подобия практически недостижимо, поэтому приходится соблюдать условия подобия лишь для некоторых, наиболее существенных безразмерных комбинаций - критериев подобия.

При методе эквивалентных материалов процессы сдвигения изучают на моделях, выполненных из смеси песка, слюды, металлической дроби при обязательной добавке в качестве связующего материала технического вазелина, парафина и т.п. Для крепких пород эквивалентные материалы изготавливают на известковой или цементной основе. Моделирование плоскостей ослабления достигается введением слоя слюды, синтетических пленок и др.

Для выполнения динамического подобия между действующими силами в модели и натуре необходимо обеспечить следующие соотношения прочностных характеристик:

$$\frac{[\sigma_p]_m}{\gamma_m L_m} = \frac{[\sigma_p]_n}{\gamma_n L_n}; \quad \frac{k_m}{\gamma_m L_m} = \frac{k_n}{\gamma_n L_n}; \quad \rho_m = \rho_n,$$

где  $[\sigma_p]_m$  и  $[\sigma_p]_n$  - пределы прочности на растяжение материала соответственно модели и природы, Н/м<sup>2</sup>;  $\gamma_m$  и  $\gamma_n$  - объемный вес модели и природы, Н/м<sup>3</sup>;  $k_m$  и  $k_n$  - сцепление материала и природы, Н/м<sup>2</sup>;  $L_m$  и  $L_n$  - линейные размеры соответственно модели и природы, м;  $\rho_m$  и  $\rho_n$  - угол внутреннего трения материала и природы, град.

Соблюдение подобия деформаций (в области упругих их значений) обеспечивается при

$$\frac{E_m}{\gamma_m L_m} = \frac{E_n}{\gamma_n L_n} \quad \text{и} \quad \mu_m = \mu_n,$$

где  $E_m$  и  $E_n$  - модуль Юнга соответственно модели и природы, Н/м<sup>2</sup>;  $\mu_m$  и  $\mu_n$  - коэффициент Пуассона материала и природы.

При моделировании нарушений устойчивости во времени должен соблюдаться временной масштаб моделирования

$$\frac{t_m}{t_n} = \sqrt{\frac{L_m}{L_n}},$$

где  $t_m$  и  $t_n$  - время протекания деформации соответственно в модели и натуре.

Моделирование на эквивалентных материалах может выполняться на объемных и плоских моделях. Плоские модели позволяют достаточно просто и с малыми затратами получить качественную картину изучаемого явления. Получение количественных характеристик, как правило, требует объемного моделирования. Основным недостатком этого вида моделирования является трудность подбора материала модели, особенно для многослойных откосов.

При центробежном моделировании модель изготавливается из того же материала, что и натура. Поэтому исходя из равенства напряжений в модели и в натуре условие подобия

$$L_n g = L_n a',$$

где  $g$  — ускорение силы тяжести,  $m/s^2$ ;  $a'$  — ускорение, придаваемое модели вращением в центрифуге.

Увеличение объемных сил, действующих в модели, достигается вращением ее в центрифуге.

При центробежном моделировании особое значение имеет обеспечение подобия обводненности. Чтобы избежать влияния увеличения объемного веса воды на силы сцепления, необходимо линейный масштаб моделирования выбирать в соответствии с гранулометрическим составом пород:

$$\frac{L_n}{L_n} = \frac{47}{\gamma},$$

где  $\gamma$  — радиус частиц, см.

Оптикополяризационный метод основан на допущении, что массив пород, слагающих уступ, является линейно-деформируемой средой. Существует целый ряд прозрачных изотропных тел, которые под действием нагрузок превращаются в оптически активные двупреломляющие с плоскостями поляризации, совпадающими с направлениями главных нормальных напряжений. К ним относятся материалы на желатиновой основе, студни агар-агара, ацетицеллюлозы, полиэфир, стирол и др. Оптический эффект заключается в появлении изохром-линий одинаковой окраски, соединяющих точки с равными максимальными касательными напряжениями, что позволяет определять положение поверхностей скольжения.

### § 38. Некоторые проблемы изучения устойчивости

Характерной особенностью современного состояния открытых горных работ и ближайших перспектив их развития является

увеличение глубины и срока службы карьеров, а также расширение в эксплуатацию месторождений со сложными горно-геологическими условиями. Эти особенности выдвигают на первый план вопросы обеспечения устойчивости. Многие карьеры подвержены крупным нарушениям устойчивости, ущерб от которых исчисляется миллионами рублей. Так, на 65% карьеров Министерства черной металлургии зафиксированы крупные нарушения устойчивости, причем 1/3 приходится на нарушения устойчивости отвалов и 2/3 — бортов. Оценить ущерб от излишнего выпалаживания бортов в настоящее время невозможно, поскольку современные методы расчета не позволяют с достаточной степенью точности определять параметры устойчивого борта.

Существующие методы расчета устойчивости в большинстве случаев исходят из предположения о соответствии напряженного состояния приобортового массива модели случаю ореда, обладающей некоторой связностью. Чисто теоретические решения обладают ограниченной ценностью, так как до сих пор не установлены фактические значения напряжений в горных породах. В связи с этим остается неизвестным, достигается ли предельное напряженное состояние в массиве или оно имеет место лишь по поверхности смещения пород. Возможно, что предельное напряженное состояние в такой интерпретации для горных пород вообще лишено смысла.

Особое значение приобретает изучение и паспортизация нарушений устойчивости, позволяющая оценить напряжения по поверхности скольжения, уточнить значения угла внутреннего трения и сцепления по данным маркшейдерских съемок и выявить фактические значения коэффициентов запаса. В то же время проектные организации часто привлекают несовершенные методы исследования, в процессе отработки не производят ревизии состояния бортов и не вносят корректив в проектные решения.

Нарушения устойчивости на карьерах изучает целый ряд научно-исследовательских и учебных институтов. Выполненные за последние годы работы (в первую очередь такими организациями, как ВНИИМ, ВМОГЕМ, ВСЕГИНЦЕО и др.) позволили усовер-

шенствовать расчетные методы, разработать методы лабораторных исследований устойчивости, систематизировать и усовершенствовать методы экспериментально-производственных наблюдений и т.п. Однако сейчас отсутствует единый центр, где бы накапливался и систематизировался материал по нарушениям устойчивости, весьма слабо налажен обмен опытом по методам и результатам исследований, что приводит к параллелизму и несопоставимости результатов. В практике исследовательских работ в недостаточной степени используют современные методы маркшейдерской съемки нарушений устойчивости.

В связи с этим основные задачи изучения устойчивости следующие:

1. Повышение уровня подготовки инженерно-технических работников проектных, эксплуатационных и исследовательских организаций в вопросах устойчивости, усиление внимания к проблеме устойчивости на всех стадиях изыскания, проектирования и эксплуатации месторождений открытым способом.

2. Обязательное проведение комплекса наблюдений за всеми видами нарушений, их обязательная паспортизация и сосредоточение паспортов в едином центре.

3. Совершенствование и более широкое применение современных производственно-экспериментальных методов исследования.

4. Разработка теории нарушения устойчивости и методов расчета на базе полученных результатов по натурным наблюдениям и лабораторным экспериментам.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Арсентьев А.И., Поляшук Л.К., Захваткин В.Н. Открытые разработки руд, потерянных при подземной добыче. Л., "Наука", 1970.
2. Гальперин А.М., Крячко О.Ю., Дергилев И.А. Геотехническое обслуживание гидроотвальных работ на разрезах. М., изд. ЦНИИУглем. 1971.
3. Дамян А.М. Устойчивость открытых горных разработок в откосах. М., "Недра", 1973.
4. Загоруйко Л.П. Повышение устойчивости отвалов с помощью технологии открытых горных работ. Киев, "Наукова думка", 1969.
5. Инструкция по наблюдениям за деформациями бортов, откосов уступов и отвалов на карьерах в разработке мероприятий по обеспечению их устойчивости. Л., изд. ВНИМИ, 1971.
6. Маслов Н.Н. Основы механики грунтов и инженерной геологии. М., "Высшая школа", 1968.
7. Мельников Н.В. Задачи научно-технического совещания по проблеме разработки глубоких горизонтов карьеров. В кн.: Глубокие карьеры. Киев, "Наукова думка", 1970.
8. Методические указания по определению углов наклона бортов, откосов уступов и отвалов строящихся и эксплуатируемых карьеров. Л., изд. ВНИМИ, 1972.
9. Методическое пособие по изучению инженерно-геологических условий месторождения полезных ископаемых, подлежащих разработке открытым способом. Л., изд. ВНИМИ, 1965.
10. Методическое руководство по искусственному укреплению откосов скальных и полускальных пород на карьерах. Л., изд. ВНИМИ, 1967.
11. Нурок Г.А. Гидромеханизация горных работ. М., Госгортехиздат, 1965.
12. Попов С.И. Деформации отвалов на открытых горных работах. Горный журнал, 1945, № 7-8.
13. Соколовский В.В. Статика смучей среды. М., Физматгиз, 1960.
14. Фисенко Г.Л. Устойчивость бортов карьеров и отвалов. М., "Недра", 1965.
15. Шапарь А.Г. Механика горных пород и устойчивость бортов карьеров. Киев, "Высшая школа", 1973.



## ОГЛАВЛЕНИЕ

Раздел I. ДЕФОРМАЦИИ БОРТОВ КАРЬЕРОВ И ОТВАЛОВ . . . . .	8
§ 1. Изменение природной обстановки при ведении открытых горных работ . . . . .	8
§ 2. Виды деформаций бортов карьеров и отвалов . . . . .	6
§ 3. Морфология и динамика развития оползней . . . . .	7
§ 4. Оползни бортов карьера . . . . .	11
§ 5. Технологические последствия оползней . . . . .	16
§ 6. Оползни отвалов . . . . .	17
§ 7. Осыпи и обрушения . . . . .	19
§ 8. Оплывы. Фильтрационные деформации . . . . .	21
§ 9. Просадки, осадки . . . . .	24
§ 10. Классификация горных пород и месторождений по условиям устойчивости бортов карьеров . . . . .	25
Раздел II. МЕТОДЫ РАСЧЕТА УСТОЙЧИВОСТИ ОТКОСОВ . . . . .	28
§ 11. Исходные данные, необходимые для расчета . . . . .	28
§ 12. Выбор расчетного метода . . . . .	31
§ 13. Коэффициент запаса устойчивости . . . . .	32
§ 14. Теоретические основы метода предельного напряженного состояния . . . . .	33
§ 15. Расчет откосов вогнутого и выпуклого профиля . . . . .	34
§ 16. Инженерные методы расчета . . . . .	37
§ 17. Инженерный метод расчета устойчивости по круглоцилиндрической поверхности скольжения . . . . .	38
§ 18. Определение параметров борта, сложенного горизонтальными или пологопадающими слоями породами . . . . .	43
§ 19. Расчет устойчивости при наличии поверхностей ослабления, падающих в сторону карьера и подсеченных откосом, или при эрозии по слоению . . . . .	45
§ 20. Расчет устойчивости отвалов . . . . .	48
§ 21. Учет дополнительных нагрузок при расчетах устойчивости . . . . .	48
§ 22. Учет криволинейности карьера . . . . .	51

Раздел III. МЕТОДЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ УСТОЙЧИВОСТИ БОРТОВ КАРЬЕРОВ И ОТВАЛОВ . . . . .	52
§ 23. Обеспечение устойчивости откосов при буровзрывных работах . . . . .	52
§ 24. Укрепление откосов с помощью взрывных работ . . . . .	55
§ 25. Опыт искусственного укрепления откосов . . . . .	56
§ 26. Виды искусственного укрепления . . . . .	57
§ 27. Обеспечение устойчивости с помощью технологических мероприятий . . . . .	66
§ 28. Обеспечение устойчивости отвалов . . . . .	66
§ 29. Устойчивость бортов карьеров и безопасность работ в зоне влияния подземных выработок . . . . .	71
§ 30. Дренаж карьерных полей как метод обеспечения устойчивости . . . . .	74
Раздел IV. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ НАРУШЕНИЙ УСТОЙЧИВОСТИ В ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ЦЕЛЯХ . . . . .	75
§ 31. Общие сведения. Классификация методов использования нарушений устойчивости . . . . .	75
§ 32. Обрушение уступов на всю высоту . . . . .	77
§ 33. Слоевое обрушение уступов . . . . .	83
§ 34. Искусственное оползнеобразование . . . . .	85
Раздел V. ИЗУЧЕНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ . . . . .	85
§ 35. Задачи экспериментально-производственных методов изучения устойчивости . . . . .	85
§ 36. Изучение сдвига откосов горных пород . . . . .	86
§ 37. Исследования напряженно-деформированного состояния прибортового массива . . . . .	88
§ 38. Лабораторные методы изучения устойчивости . . . . .	90
§ 39. Некоторые проблемы изучения устойчивости . . . . .	92
Литература . . . . .	95

Игорь Юрьевич Бухин  
УСТОЙЧИВОСТЬ БОРТОВ КАРЬЕРОВ  
Учебное пособие

Редактор И.В.Неверова  
Технический редактор С.И.Раснюк  
Корректор Т.В.Виногор

Сдано в набор 19.07.76. Подписано в печать 25.10.76. М-30614  
Формат 80x84/16. Бумага типографская № 2.  
Усл.печ.л. 5,6. Уч.-изд.л. 6,3. Тираж 500 экз. Изд. № 164.  
Заказ № 979. Цена 35 коп.