

А. И. Арсентьев,  
И. Ю. Букин,  
В. А. Мироненко

---

# УСТОЙЧИВОСТЬ БОРТОВ И ОСУШЕНИЕ КАРЬЕРОВ

А. И. АРСЕНТЬЕВ, И. Ю. БУКИН,  
В. А. МИРОНЕНКО

# УСТОЙЧИВОСТЬ БОРТОВ И ОСУШЕНИЕ КАРЬЕРОВ

*Допущено Министерством высшего и среднего  
специального образования СССР в качестве учебника  
для студентов вузов, обучающихся по специальности  
0209 «Технология и комплексная механизация  
открытой разработки месторождений полезных  
ископаемых»*



МОСКВА «НЕДРА» 1982

Арсентьев А. И., Букин И. Ю., Мироненко В. А. Устойчивость бортов и осушение карьеров. Учебник для вузов. М., Недра, 1982, 165.

Описаны основные виды нарушений устойчивости бортов карьеров и отвалов. Рассмотрены оползни, осыпи и обрушения, фильтрационные деформации, осадки и просадки. Дана классификация горных пород по возможной устойчивости бортов будущих карьеров. Приведены основные методы расчета откосов, описано использование нарушений их устойчивости в технологических целях. Рассмотрены вопросы осушения карьерных полей.

Для студентов вузов, обучающихся по специальности «Технология и комплексная механизация открытой разработки месторождений полезных ископаемых».

Табл. 11, рис. 83, список лит. — 36 назв.

**Рецензенты:**

кафедра разработки месторождений открытым способом Свердловского горного института  
и проф., д-р техн. наук *М. А. Ревазов* (МГИ).

## ПРЕДИСЛОВИЕ

В свете «Основных направлений экономического и социального развития СССР на 1981—1985 годы и на период до 1990 года» в XI пятилетке предусматривается дальнейшее развитие наиболее эффективного открытого способа добычи полезных ископаемых на основе широкого внедрения прогрессивной технологии и горнотранспортного оборудования большой единичной мощности. Растущие масштабы добычи полезных ископаемых и интенсификация работ на карьерах обуславливают непрерывное увеличение глубины горных работ все возрастающими темпами.

С ростом глубины карьеров увеличивается и высота нерабочих бортов, а следовательно и опасность их деформации. Поэтому обеспечение устойчивости бортов карьера является одним из основных вопросов при открытом способе разработки.

Горные инженеры должны знать методы расчета устойчивости бортов и отвалов и методы обеспечения их устойчивости в процессе эксплуатации карьера, так как изменение угла погашения борта глубокого карьера на  $1^\circ$  ведет к изменению объема вскрышных работ на миллионы кубических метров. В то же время завышение этого угла может привести к катастрофическому оползню борта и серьезному нарушению работы карьера. Из-за вероятностного характера знаний о свойствах массива горных пород при расчетах устойчивости необходимо тщательно оценивать уровень риска принимаемых решений. А так как борта карьера формируются постепенно по мере его углубки, нужно также учитывать фактор времени.

Не менее важное значение имеет осушение карьерных полей, так как водопритоки не только мешают

нормальной эксплуатации оборудования, но и отрицательно сказываются на устойчивости откосов.

Все эти вопросы освещаются в предлагаемой книге, написанной на основе многолетнего опыта чтения курса «Устойчивость бортов и осушение карьеров» в Ленинградском горном институте, отдельных разработок авторов и имеющихся литературных источников.

А. И. Арсентьевым написаны: предисловие, 2, 5.2, 5.6, 5.9, И. Ю. Букиным — 3.2, 3.4, 3.5, 5.1, 5.3, 5.4, 5.5, 5.7, 5.8, 5.10, 6 и 8; А. И. Арсентьевым и И. Ю. Букиным — 1, 3.1, 3.3, 3.6, 4 и 7; В. А. Мироненко — 9, 10 и 11.

ДЕФОРМАЦИИ БОРТОВ КАРЬЕРОВ  
И ОТВАЛОВ1. ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ГОРНЫХ  
ПОРОД

## 1.1. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

При добыче полезных ископаемых имеют дело с горными породами, свойства которых значительно влияют на эффективность, безопасность и способы производства горных работ. При формировании карьерного пространства и проведении открытых и подземных горных выработок появляются обнаженные поверхности горных пород. Возникает необходимость строгого учета закономерностей взаимодействия способов выемки со свойствами пород для обеспечения безопасной и эффективной работы карьера, т. е. появляется необходимость раскрытия в каждом конкретном случае функции

$$Q = f(G M), \quad (1.1)$$

где  $Q$  — параметры горной выработки (площадь сечения, форма, угол откоса и др.);  $G$  — показатель методов укрепления обнажений горных пород;  $M$  — свойства массива горных пород.

Для обеспечения безопасной работы людей и оборудования в карьере необходимо придавать его бортам и уступам углы откоса и форму, обеспечивающие их устойчивость.

При невозможности (или неэффективности) обеспечения естественной устойчивости откосов пород необходимо применять искусственные способы укрепления обнажений.

Естественная устойчивость откосов определяется состоянием и свойствами горного массива, в котором развиваются горные работы, и зависит в основном от его трещиноватости.

Массив горных пород в зависимости от трещиноватости может быть классифицирован на четыре системы [19]:

*а* — система одного тела (рис. 1.1,*а*), когда в массиве имеются только небольшие трещины, не соединяющиеся друг с другом, и его можно рассматривать как сплошную среду;

*б* — система нескольких тел (рис. 1.1,*б*), когда трещины частично соединены друг с другом, но отдельные части не полностью отделены друг от друга и связаны мостиками из цементирующего материала;

*в* — система многих тел в скальных породах (рис. 1.1,*в*), когда массив состоит из отдельных блоков, разделенных трещинами подобно сухой кладке из плотно пригнанных камней;

*г* — система многих тел в рыхлых породах (рис. 1.1,*г*), когда массив состоит из многих зерен и кусков, неплотно пригнанных друг к другу.

Следует иметь в виду, что горная порода обладает совершенно иными свойствами, чем горный массив.

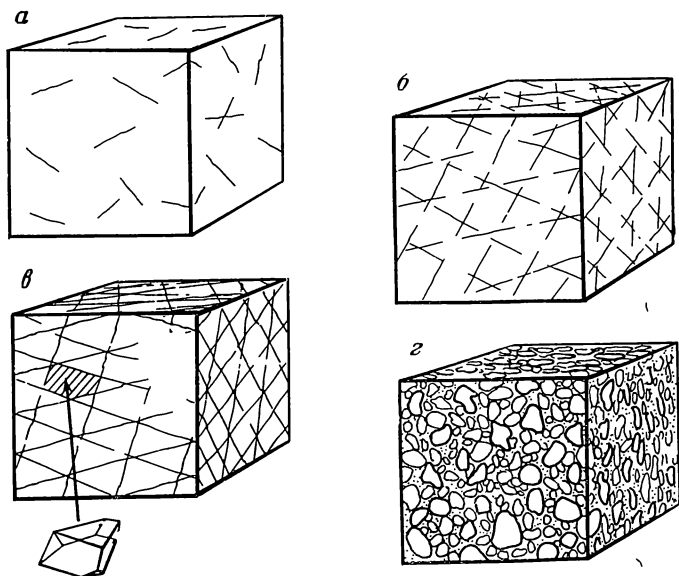


Рис. 1.1. Системы тел в массивах горных пород (по Л. Мюллеру)

В настоящее время накоплено много сведений о свойствах горных пород как сплошной среды, и совсем недостаточно данных о свойствах горного массива.

## 1.2. ПЛОТНОСТНЫЕ СВОЙСТВА ГОРНЫХ ПОРОД

Плотностные свойства обусловлены действием на породы гравитационного поля Земли. Они подразделяются на собственно гравитационные и структурные.

Удельный вес  $\gamma_0$  (в Н/м<sup>3</sup>) — это отношение веса твердой фазы  $P_T$  к объему, занимаемому этой фазой,  $V_T$

$$\gamma_0 = \frac{P_T}{V_T} . \quad (1.2)$$

Поскольку вес  $P_T = mg$ , где  $m$  — масса;  $g$  — ускорение свободного падения,  $\gamma_0$  зависит от ускорения свободного падения в пункте определения и не является, таким образом, параметром вещества в строго физическом смысле. Но в технических расчетах изменением ускорения свободного падения обычно пренебрегают, рассматривая удельный вес как константу горной породы.

Удельная масса — это отношение массы твердой фазы  $m_T$  горной породы к объему, занимаемому этой твердой фазой,  $V_T$

$$\delta_0 = \frac{m_T}{V_T} . \quad (1.3)$$

Плотность характеризует отношение общей массы (жидкой, газообразной и твердой фаз) горных пород  $m$  к занимаемому объему  $V$

$$\delta = \frac{m}{V} . \quad (1.4)$$

В отличие от удельного веса плотность является константой вещества в строго физическом смысле.

Коэффициент пористости (пористость) (в %) характеризует отношение объема пор в горных породах  $V_n$  к общему объему, занимаемому этой породой,  $V$

$$n = \frac{V_n}{V} 100 . \quad (1.5)$$



Так как  $V_{\pi} = V - V_{\tau}$ ,

$$n = \left(1 - \frac{V_{\tau}}{V}\right) 100 \quad (1.6)$$

или

$$n = \left(1 - \frac{P_{\tau} \gamma}{P \gamma_0}\right) 100, \quad (1.7)$$

$$n = \left(1 - \frac{\gamma}{\gamma_0}\right) 100 = \left(1 - \frac{\delta}{\delta_0}\right) 100. \quad (1.8)$$

Наиболее распространена характеристика пород, называемая влажностью по массе:

$$w = \frac{P - P_{\tau}}{P_{\tau}}, \quad (1.9)$$

где  $P$  — масса влажного образца (естественная влажность или влажность, приобретенная в результате выдерживания образца в определенных условиях), кг;  $P_{\tau}$  — масса воздушно-сухого образца (так называемая постоянная масса), кг.

Постоянной массой считается масса после высушивания при температуре  $105^{\circ}\text{C}$ . При этом расхождение между двумя последующими взвешиваниями не должно превышать трехкратной ошибки взвешивания. Таким образом, масса воздушно-сухого образца отождествляется с массой скелета грунта. Критерием степени заполнения пор водой является коэффициент водонасыщения, или степень влажности  $q$ , который представляет собой отношение данной (например, естественной) влажности  $w$  к предельно возможной (или полной) при данной пористости  $w_0$ :

$$q = \frac{w}{w_0}. \quad (1.10)$$

Т а б л и ц а 1.1

Породы	$\delta$ , т/м <sup>3</sup>	$n$ , %
Гранит	2,5—2,7	1,2
Известняк	2,4—2,7	0,5—13,4
Мрамор	2,4—2,7	0,5—13,0
Песчаник	2,6—2,7	4,8—28,0
Глинистый сланец	2,4—2,7	3,0—4,0
Глина, суглинки	2,5—2,9	35—50
Пески	2,5—2,6	25—30
Гравий	2,5—2,6	27—38

По степени влажности различают сухие породы ( $q \leq 0,5$ ), влажные ( $0,5 < q \leq 0,8$ ), водонасыщенные ( $q > 0,8$ ). Породы, залегающие ниже уровня подземных вод, являются полностью водонасыщенными ( $q = 1$ ).

Плотность наиболее распространенных горных пород изменяется от 2,5 до 4,5 т/м<sup>3</sup>, пористость — от 0 до 20% и более (табл. 1.1).

### 1.3. ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ГОРНЫХ ПОРОД

Сведения о физико-механических свойствах пород наиболее полно отражены в литературе, так как эта группа свойств имеет большое значение при расчетах устойчивости, нормирования и т. п.

Физико-механические свойства пород подразделяются на прочностные, упругие, горно-технические и физические (акустические, электромагнитные, тепловые, радиоактивные).

Прочностные свойства характеризуют способность горных пород сопротивляться разрушению под действием приложенных механических нагрузок. На прочность горных пород влияют первоначальное состояние, вид и величина деформирующих сил, скорость деформации и температура. При лабораторных испытаниях образцов на их прочность существенно влияют форма и размер образца. Вследствие анизотропии горные породы имеют неодинаковую прочность по различным направлениям. Поэтому различают прочность пород по наслоению, под углом к нему и по поверхностям ослабления (по трещинам, слоистости, сланцеватости). При любых видах нагружений разрушение пород происходит или за счет среза, или за счет отрыва.

Для оценки прочностных свойств пород служит понятие напряжения (давления), которое характеризуется силой, действующей на единицу поверхности. Напряжение в системе СИ измеряется в паскалях.

Под прочностными свойствами горных пород понимается их временное (предельное) сопротивление сжатию, растяжению, сдвигу, изгибу.

Прочностные свойства характеризуются пределом прочности на сжатие, растяжение и углом внутреннего трения.

Пределом прочности (наиболее часто употребляемая характеристика горных пород) называется напряжение, при котором образец породы разрушается. Он определяется, как правило, на образцах правильной (цилиндрической или призматической) формы. Однако имеются методы оценки предела прочности пород при одноосном сжатии образцов неправильной формы соосными пуансонами, толчением и др. [8, 9, 31]. Предел прочности на сжатие (в Па)

$$\sigma_{\text{сж}} = \frac{P}{F}, \quad (1.11)$$

где  $P$  — разрушающая нагрузка, Н;  $F$  — площадь поперечного сечения образца, м<sup>2</sup>.

Предел прочности на растяжение определяется значительно сложнее. Существует несколько методов его определения: метод прямого сжатия фигурного образца, метод диаметрального сжатия, метод центрифуги, метод соосных пуансонов (для образцов правильной формы), метод гидростатона (для образцов произвольной формы) [8, 31].

Испытания на сдвиг служат для определения двух наиболее важных при расчете устойчивости характеристик породы — сцепления и угла внутреннего трения. Сцепление характеризует сопротивляемость горных пород тангенциальным нагрузкам. Испытания производятся обычно на сдвиг со сжатием в специальных матрицах (рис. 1.2). Эти испытания имеют существенные преимущества перед простым срезом, так как помимо сцепления они позволяют получить величину угла внутреннего трения. По результатам таких испытаний можно построить характеристики породы.

Для испытаний применяются стандартные цилиндрические образцы диаметром  $42 \pm 3$  мм. Испытания проводят для оценки сопротивляемости пород срезающим нагрузкам при одновременном воздействии нормальных нагрузок. Равномерное распределение усилий по расчетному сечению образца обеспечивается применением роликовой опорной постели и шариковой давящей плиты (оси роликов должны располагаться перпендикулярно к оси образца).

Полное разрушающее напряжение на сдвиг (в Па)

$$\sigma_{\text{сдв}} = \frac{P}{hd}, \quad (1.12)$$

где  $h$ ,  $d$  — высота и диаметр образца, м.

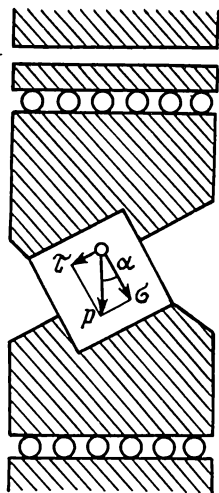


Рис. 1.2. Схема испытания породы на сдвиг со сжатием

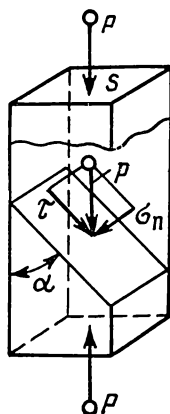


Рис. 1.3. Напряжения в элементарном блоке

Как показывает опыт, величина разрушающей нагрузки существенно зависит от угла сдвига  $\psi$ , и поэтому испытания производят на сдвиг под углами  $45^\circ$  и  $60^\circ$ .

Равнодействующая всех сил, приложенных к поверхности элементарной площадки, т. е. вектор, направленный под углом к этой площадке, характеризуется величиной, называемой **напряжением**.

Компоненты напряжения, перпендикулярные к площадкам, называются **нормальными**  $\sigma_n$ , а компоненты напряжения, лежащие в плоскости площадок, — **касательными**  $\tau$ .

Напряжения  $p$ , направленные под углом  $\alpha$  к заданной площадке, могут быть разложены на нормальные и касательные (рис. 1.3):

$$\sigma_n = p \sin \alpha; \quad \tau = p \cos \alpha.$$

Напряжения в поперечном сечении  $S$  элементарного блока  $\sigma_1 = \frac{P}{S}$ , а в любом другом сечении, наклоненном к оси блока под углом  $\alpha$ , за счет увеличения площади, на которую распространяется давление, снизятся до  $p = \sigma_1 \sin \alpha$ .

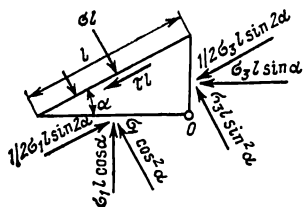


Рис. 1.4. Расчетная схема к определению напряжений в точке O

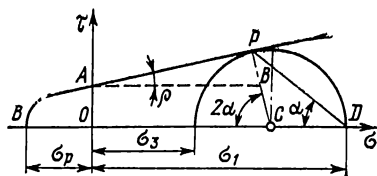


Рис. 1.5. Круг напряжений Мора

Тогда напряжения на заданной площадке (в Па)

$$\sigma_n = \sigma_1 \sin^2 \alpha; \quad \tau = \sigma_1 \sin \alpha \cos \alpha = \frac{1}{2} \sigma_1 \sin 2\alpha. \quad (1.13)$$

Выше было рассмотрено линейное (плоскостное) напряженное состояние пород. В действительности же существует еще и объемное напряженное состояние в горных породах в условиях вестороннего сжатия. Под воздействием системы сил, приложенных к образцу, в каждой его точке возникают напряжения и величины  $\sigma$  и  $\tau$ , зависящие от ориентировки заданной площадки по отношению к направлению силы. Если через одну и ту же точку проводить различно ориентированные площадки, то на одних площадках  $\tau=0$ , а на других  $\sigma$  и  $\tau$  будут находиться в самых различных соотношениях.

Установлено, что в каждой точке можно провести три взаимно перпендикулярных главных площадки (в них  $\tau=0$ ), через которые передаются три главных (нормальных) напряжения. Наибольшее главное напряжение обозначается  $\sigma_1$ , наименьшее —  $\sigma_3$ , среднее по величине —  $\sigma_2$ .

Если рассматривать плоскость (рис. 1.4), параллельную  $\sigma_2$ , то получим:

$$\sigma = \sigma_1 \cos^2 \alpha + \sigma_3 \sin^2 \alpha; \quad (1.14)$$

$$\tau = \frac{1}{2} (\sigma_1 - \sigma_3) \sin 2\alpha. \quad (1.15)$$

Эти напряжения могут быть также определены графически при помощи круга напряжений Мора (рис. 1.5). По оси абсцисс откладываются нормальные напряжения, а по оси ординат — касательные. По оси абсцисс откладываются отрезки, равные (в масштабе)

главным напряжениям, и через их концы с центром в точке  $C$  проводится окружность. Абсцисса любой точки  $P$  на окружности выражает нормальное, а ордината — касательное напряжения на площадке, наклоненной к направлению главного напряжения под углом  $\alpha$ .

Согласно теории прочности Мора, разрушение образца произойдет только в том случае, если есть такая площадка, на которой  $\sigma$  и  $\tau$  находятся в определенных соотношениях для данного материала:

$$\tau = f(\sigma), \quad (1.16)$$

где  $f(\sigma)$  — функция, определяющаяся экспериментально.

Разрушение произойдет по этим площадкам (в каждой точке таких площадок две). Следовательно, критерием разрушения могут быть не только нормальное или касательное напряжение, но и их определенная комбинация.

По результатам испытаний при двухосном напряженном состоянии можно построить множество кругов напряжений Мора, а следовательно, как угодно близко подойти к истинному виду функции (см. формулу 1.16), характеризующей прочностные свойства материала. Предложен ряд форм огибающей главных кругов напряжений: прямолинейная, циклоидальная, параболическая, гиперболическая. Каждая из этих форм подчеркивает какую-либо одну сторону поведения материала при том или ином виде напряженного состояния. Точный характер огибающей предельных кругов напряжений Мора до сих пор неизвестен. Для скальных и полускальных пород наиболее просто для решения практических задач огибающая Мора может быть представлена в виде прямой (рис. 1.5), уравнение которой приведено ниже:

$$\tau = k + \sigma \operatorname{tg} \rho, \quad (1.17)$$

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

В области растягивающих напряжений данное уравнение неприемлемо (см. линию  $AB$  на рис. 1.5), поэтому характеристика прочности пород при возможности возникновения растягивающих напряжений должна быть заменена более сложной, чем прямая, формой с учетом определения прочности при растяжении.

Теория прочности Мора позволяет найти направление разрушения породы (см. рис. 1.5). Линия  $PD$  со-

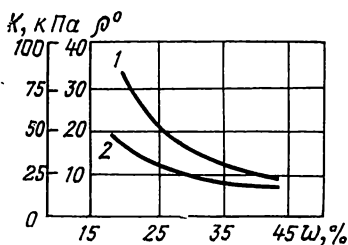


Рис. 1.6. Зависимость угла внутреннего трения  $\rho_w(t)$  и сцепления  $k_w + k_c(2)$  от влажности пород  $\omega$

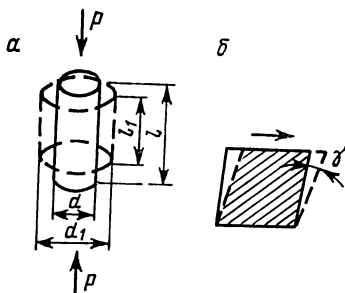


Рис. 1.7. Схема упругих деформаций:  
а — при одноосном сжатии, б — при сдвиге

ставляет с осью  $\sigma$  угол  $\alpha$ , равный углу между направлением главного напряжения  $\sigma_1$  ( $CO$ ) и направлением нормального напряжения  $\sigma$  ( $CP$ ) по площадке разрушения. Тогда

$$\angle PCO = \angle PBA = 2\alpha = 90^\circ - \rho,$$

$$\alpha = 45^\circ - \frac{\rho}{2}. \quad (1.18)$$

Слабые связные породы в зависимости от granulometric состава подразделяются на глины (содержание глинистых частиц более 30%), суглинки (содержание глинистых частиц 10—30%) и супеси (содержание глинистых частиц 3—10%). В породах этой группы имеются особые молекулярные и водно-коллоидные связи, которые действуют при сближении частиц до 0,004 мм. Под их влиянием к частице прижимается слой молекулярно связанной воды толщиной в несколько десятков молекул. Затем идет слой рыхло связанной воды, окружающий каждую частицу, и лишь затем — свободная поровая вода.

Поэтому сопротивление глинистых пород сдвигу

$$\tau = \sigma_n \operatorname{tg} \rho_w + k_w + k_c, \quad (1.19)$$

где  $\rho_w$  — угол внутреннего трения, зависящий от пористости и влажности породы, градус;  $k_w$  — сцепление водно-коллоидного характера, зависящее от влажности;  $k_c$  — жесткое структурное сцепление, Н/м<sup>2</sup>.

Зависимость сцепления угла внутреннего трения глинистых пород от их влажности показана на рис. 1.6.

#### 1.4. ДЕФОРМАЦИОННЫЕ СВОЙСТВА ГОРНЫХ ПОРОД

Различают упругость и пластичность горных пород. Под упругостью горной породы понимают ее способность изменять форму или объем под действием внешних воздействий и возвращаться к своей первоначальной форме и объему после их снятия.

В области упругих деформаций твердого тела действует закон Гука, по которому деформация тела пропорциональна действующей силе:

$$\Delta l = \frac{Pl}{EF}, \quad (1.20)$$

где  $\Delta l = l - l_1$  — абсолютная деформация (рис. 1.7);  $l$  — длина образца до деформации, м;  $l_1$  — длина образца после деформации, м;  $P$  — действующая сила, Н;  $F$  — площадь образца, м<sup>2</sup>;  $E$  — коэффициент пропорциональности.

Отношение абсолютной величины линейной деформации к длине образца называется относительной продольной деформацией  $\varepsilon = \frac{\Delta l}{l}$ . Коэффициент пропорциональности в законе Гука называется модулем упругости первого рода или модулем Юнга (в Н/м<sup>2</sup>)

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon}, \quad (1.21)$$

так как при  $\varepsilon = 1$   $E = \sigma$ , модуль Юнга характеризует величину напряжения, которое необходимо приложить к деформируемому телу, чтобы его абсолютная деформация оказалась равной первоначальной длине.

Деформация тела в направлении действия нагрузки при одноосном напряженном состоянии сопровождается изменением его поперечных размеров. Отношение относительной поперечной деформации к относительной продольной в упругой области называется коэффициентом Пуассона.

$$\mu = \frac{\varepsilon_1}{\varepsilon}, \quad (1.22)$$

где  $\varepsilon_1 = \frac{d_1 - d}{d}$  — относительная поперечная деформация;  $\varepsilon$  — относительная продольная деформация;  $d_1$  — диаметр образца после деформации, м.



Кроме модуля Юнга и коэффициента Пуассона поведение горных пород в упругой области характеризуется модулем сдвига (в Па/радиан) — отношением приложенного к породе касательного напряжения  $\tau$  к углу  $\gamma$ , на который смещаются частицы:

$$G = \frac{\tau}{\gamma}. \quad (1.23)$$

Таким образом, модуль сдвига характеризует величину касательного напряжения, необходимого для того, чтобы достичь деформации сдвига, равной 1 радиану ( $57^{\circ}17'45''$ ).

Модуль всестороннего сжатия — коэффициент пропорциональности между напряжением всестороннего (гидростатистического) сжатия и относительным уменьшением объема образца породы.

$$\sigma' = K \frac{\Delta V}{V}, \quad (1.24)$$

где  $\sigma'$  — напряжение всестороннего сжатия, Па;  $K$  — модуль всестороннего сжатия, Па;  $\Delta V$  — абсолютное уменьшение объема образца,  $\text{м}^3$ ;  $V$  — объем образца породы,  $\text{м}^3$ .

Физически модуль всестороннего сжатия характеризует напряжение, при котором относительное уменьшение объема равно единице.

Характеристики упругости горных пород связаны между собой соотношениями

$$G = \frac{E}{2(1 + \mu)}, \quad (1.25)$$

$$K = \frac{E}{3(1 - 2\mu)}. \quad (1.26)$$

Поэтому, для получения этих характеристик достаточно определить два показателя — модуль Юнга и коэффициент Пуассона.

Диаграмма деформаций при одиночном нагружении до разрушения горных пород показана на рис. 1.8,а. При чередующихся нагрузках и разгрузках диаграмма имеет вид, приведенный на рис. 1.8,б.

Как следует из этих зависимостей, участок  $Oa'$  можно считать лишь условно областью упругих деформаций. Зависимость между  $\sigma$  и  $\epsilon$  не следует в точности линейному закону и модуль упругости является величиной

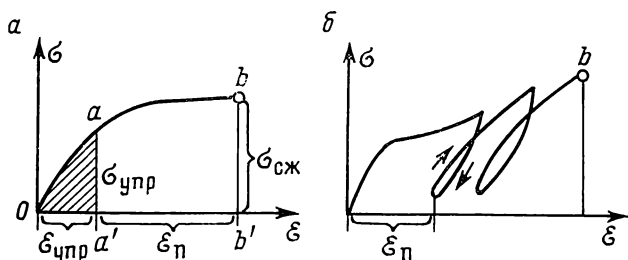


Рис. 1.8. График зависимости напряжений от деформаций:  
 $\sigma_{\text{упр}}$  — предел упругости;  $\sigma_{\text{сж}}$  — временное сопротивление сжатию

переменной. Кроме того, различные виды нагрузок (сжатие, растяжение и т. п.) также приводят к различным значениям упругих характеристик. Они уменьшаются при приложении больших растягивающих нагрузок и увеличиваются при приложении сжимающих нагрузок.

Для реальных горных пород после снятия нагрузки имеют место остаточные пластические деформации  $\epsilon_{\text{п}}$  (см. рис. 1, 8, б). При повторной нагрузке образца образуются петли гистерезиса, характеризующие величину потери энергии при деформации (см. 1, 8, б). Горные породы являются упруго-пластичными телами. При увеличении температуры пластичность пород возрастает. При быстром (ударном) приложении нагрузок происходит хрупкое разрушение пород, а при медленном — развиваются пластические деформации. Таким образом, величина деформаций в горных породах зависит от времени. При действии постоянного во времени напряжения деформация породы не остается постоянной, а возрастает. Это явление называется ползучестью. Признаки ползучести для пластичных пород наблюдаются при напряжениях, составляющих 10—15% разрушающих, в условиях быстрого нагружения. Деформация горных пород (угол сдвига  $\gamma$ ) при медленном их нагружении с постоянной скоростью показана на рис. 1.9. На участке 0—1 наблюдается практически прямая зависимость между напряжениями и деформациями (упругие деформации), а на участке 1—2 — пластическая деформация образца при медленном возрастании нагрузок. Участок 2—3 характеризует установившуюся ползучесть — возрастание деформаций при неизменной

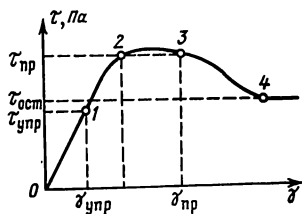


Рис. 1.9. Деформации сдвига при медленном нагружении

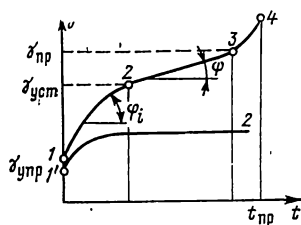


Рис. 1.10. Развитие пластических деформаций во времени

нагрузке. Достижение предельной величины деформаций  $\gamma_{пр}$  приводит к разрушению породы и снижению величины напряжений до некоторого остаточного значения  $\tau_{ост}$ . Развитие пластических деформаций во времени показано на рис. 1.10. При приложении нагрузки, достаточной для достижения напряжениями предела упругости  $\tau_{упр}$ , величина деформаций достигает значения  $\gamma_{упр}$  практически мгновенно (точка 1), после чего начинается пластическая деформация. Пластические деформации характеризуются стадией затухающей ползучести (1—2), на которой скорость пластических деформаций постепенно уменьшается; стадией установившейся ползучести (2—3) при постоянной скорости деформации и стадией прогрессирующей ползучести (пластического течения 3—4). На этой последней стадии (после достижения величины предельного значения деформаций  $\gamma_{пр}$ ) скорость деформации резко возрастает и наблюдается разрушение материала.

Уменьшив величину сдвигающих напряжений, можно достичь такого положения, когда процесс деформирования породы остановится на стадии затухающей ползучести (кривая 1'—2'). Максимальная величина напряжений, которой соответствует такая деформация, называется пределом ползучести  $\tau_{пол}$ , т. е. это напряжение, при котором скорость деформации стремится к нулю, а величина деформации — к некоторому конечному значению при неограниченном возрастании времени приложения нагрузки. Незатухающие пластические деформации, т. е. переход к стадии установившейся ползучести и пластического течения, возможны только в случае, если  $\tau > \tau_{пол}$ .

### 1.5. ГОРНОТЕХНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ГОРНЫХ ПОРОД

Существует целый ряд свойств горных пород, которые отражают некоторые их существенные особенности при технологических процессах добычи. К ним относятся разрыхляемость, усадка, абразивность, трещиноватость, гранулометрический состав, крепость и др. Все эти свойства зависят от физических свойств данной горной породы. Однако установление зависимости между горнотехническими и физическими свойствами в большинстве случаев затруднено и в практических целях удобнее пользоваться горнотехническими свойствами. Для определения проблем устойчивости необходимо учитывать разрыхляемость и усадку горных пород, гранулометрический состав, насыпную массу и коэффициент трения, угол естественного откоса и крепость горной породы.

Под разрыхляемостью плотной породы понимают увеличение ее объема в результате рыхления (дробления, отбойки, экскавации) по сравнению с объемом, занимаемым породой в массиве (до рыхления). Разрыхляемость оценивается коэффициентом разрыхления:

$$K_p = \frac{V_p}{V} = \frac{\gamma}{\gamma_p}, \quad (1.27)$$

где  $V_p$  — объем породы после разрыхления,  $\text{м}^3$ ;  $V$  — объем породы в массиве,  $\text{м}^3$ ;  $\gamma$  — плотность породы в массиве,  $\text{г/м}^3$ ;  $\gamma_p$  — плотность разрыхленной породы,  $\text{г/м}^3$ .

Коэффициент разрыхления зависит от качества и степени дробления породы, емкости и формы сосуда, влажности и времени нахождения породы в разрыхленном состоянии.

Разрыхленная порода с течением времени уплотняется до какой-то более или менее постоянной величины, которая характеризуется остаточным коэффициентом разрыхления  $K_{p.o}$ .

Усадку (уплотнение) породы с течением времени можно оценивать коэффициентом уплотнения

$$i = \frac{V_p - V'_p}{V_p} = 1 - \frac{K_{p.o}}{K_p}, \quad (1.28)$$

где  $V'_p$  — объем разрыхленных пород после уплотнения.

Под насыпной массой понимают массу сыпучей

чей горной породы в единице объема. Это понятие равнозначно плотности разрыхленной породы. Величина насыпной массы зависит от плотности породы в массиве гранулометрического состава, степени уплотнения, влажности и т. п.

Гранулометрический состав пород — относительное содержание (по массе) частиц различной крупности в горной породе. От этой характеристики зависят плотность пород и углы их трения, величина сопротивления сдвигу и другие физико-механические свойства (пористость, сжимаемость, влагоемкость и т. д.).

При перемещении тел относительно друг друга (или одной его части относительно другой) возникают силы трения, препятствующие перемещению или возникновению этого перемещения при недостаточной величине приложенных сил. Сила, необходимая для начала перемещения,  $F$  должна быть тем больше, чем больше сила нормального давления (прижимающая перемещаемое тело к поверхности перемещения)  $P$ . Если перемещение происходит под действием силы  $T$  по горизонтальной поверхности, а в качестве силы нормального давления принимается вес тела  $N$ , то коэффициент трения

$$f_{\tau} = \frac{T}{N}. \quad (1.29)$$

Если поверхность перемещения имеет угол наклона  $\alpha$  и если этот угол постепенно увеличивать, то наступит момент (при значении угла наклона  $\alpha = \rho'$ ), когда тело начнет двигаться под действием собственного веса. В этом случае в качестве силы  $F$  принимается касательная составляющая веса  $T = P \sin \rho'$ , а в качестве силы нормального давления — часть веса  $N = P \cos \rho'$ .

Коэффициент трения

$$f_{\tau} = \frac{\sin \rho'}{\cos \rho'} = \operatorname{tg} \rho'. \quad (1.30)$$

Угол  $\rho'$  называют углом трения. Его величина зависит от типа породы и состояния соприкасающихся поверхностей. При разрушении горных пород внутренние силы, препятствующие этому разрушению, условно разделяют на силы сцепления между частицами и силы внутреннего трения, зависящие от величины нормального давления и от коэффициента внутреннего трения  $f$ , который по своему характеру аналогичен коэффи-

енту трения, но в ненарушенной поверхностью раздела породе, а по величине может быть представлен как тангенс угла внутреннего трения  $\rho$ . Коэффициент внутреннего трения представляет собой отношение величины сдвигающих сил (за вычетом сил сцепления, зависящих от величины сцепления  $k$  по данной площадке размером  $s$ ) к величине силы нормального давления  $N$

$$f = \frac{T - ks}{N} = \operatorname{tg} \rho. \quad (1.31)$$

Углом естественного откоса сыпучей породы называется угол наклона поверхности этой породы  $\alpha_0$  к горизонту, образовавшийся при ее свободной отсыпке. Поскольку сыпучие породы не имеют сцепления, то

$$\alpha_0 = \rho = \rho'.$$

Величина угла естественного откоса зависит от формы частиц, их размера, влажности, плотности и т. п. Она определяется по результатам маркшейдерской съемки отвалов и развалов пород. Необходимо иметь в виду, что при отсыпке пород в отвалы результирующий угол откоса будет несколько меньше угла естественного откоса за счет разлета кусков. Углы естественного откоса для скальных и полускальных пород нарушенной структуры составляют  $32\text{—}37^\circ$ , для глинистых сухих пород —  $27\text{—}35^\circ$ , влажных —  $15\text{—}25^\circ$ . Пески имеют угол естественного откоса от  $25$  до  $35^\circ$ .

Крепость горной породы характеризует ее сопротивляемость механическим воздействиям (бурению, взрыванию, выемке). В практике наиболее распространен коэффициент крепости  $f$ , предложенный проф. М. М. Протодяконовым, — сотая часть предела прочности породы на сжатие  $\sigma_{сж}$

$$f = \frac{\sigma_{сж}}{9,81 \cdot 10^6}. \quad (1.32)$$

## 2. ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА МАССИВА ГОРНЫХ ПОРОД

### 2.1. ТРЕЩИНОВАТОСТЬ МАССИВА ГОРНЫХ ПОРОД

Массив пород характеризуется прерывностью механических свойств (трещиноватостью). Это свойство также нужно рассматривать в зависимости от масштаба. Так, большой массив с мелкими трещинами можно рассматривать как квазинепрерывный.

Одним из важнейших свойств горного массива, во многом определяющим устойчивость откосов, качество взрывных работ, приток воды в карьер и другие, является трещиноватость, т. е. наличие в горных породах трещин. Ряд трещин одного и того же происхождения и, следовательно, одинаково ориентированных в пространстве, называется системой трещин. Каждая трещина может быть характеризована направлением падения и простирания, длиной по падению и простиранию. Поскольку эти элементы залегания трещин значительно влияют на устойчивость, они характеризуются не только азимутами, но и относительными направлениями простирания и падения откосов уступов и борта карьера. По числу трещин, приходящихся на 1 м в направлении, перпендикулярном к простиранию системы, оценивается интенсивность трещиноватости или коэффициент трещиноватости:

$$\omega = \frac{1}{l} . \quad (2.1)$$

При наличии нескольких взаимно пересекающихся систем трещин интенсивность трещиноватости будет определяться расстоянием между трещинами каждой системы

$$\omega = \frac{1}{n} \left( \frac{1}{l_1} + \frac{1}{l_2} + \dots + \frac{1}{l_n} \right) = \frac{1}{l_{\text{ср}}} . \quad (2.2)$$

где  $l_1, l_2, \dots, l_n$  — расстояния между соседними трещинами каждой системы, м;  $l_{\text{ср}}$  — среднее расстояние между трещинами всех систем, м;  $n$  — число систем трещин.

Интенсивность трещиноватости может характеризоваться и числом трещин, приходящихся на 1 м<sup>2</sup> массива. Тогда показатель интенсивности трещиноватости

$$\omega_r = \frac{n_r}{S} , \quad (2.3)$$

где  $n_T$  — число трещин, зафиксированное на площади размером  $S$ ,  $m^2$ . Тогда ориентировочное среднее расстояние (в  $m$ ) между системами трещин

$$l_{cp} = \frac{1}{\sqrt{\omega_T}}. \quad (2.4)$$

Трещиноватость — явление, генетически присущее горным породам, так как в процессе образования породы, находящиеся в вязком или пластичном состоянии и подвергающиеся действию тангенциальных напряжений, приобретают скрытые поверхности скольжения, способствующие образованию трещин. Тектонические процессы также способствуют образованию собственно трещин и других поверхностей ослабления массива — поверхностей скольжения по контактам слоев.

Процессы выветривания (в основном температурные напряжения) приводят к образованию трещин выветривания. Все эти три типа трещин образуют так называемую естественную или первичную трещиноватость. Выемка горных пород (особенно взрывные работы) приводят к образованию искусственной (или вторичной) трещиноватости.

В природе, как правило, существуют три системы трещин, а иногда и четыре [19].

Для оценки трещиноватости важны следующие основные признаки трещин: местонахождение, положение трещин в пространстве, густота сети трещин, пространственное расположение трещин, степень расчленения трещинами горного массива, ширина, заполнение, поверхность стенок трещин.

Наиболее наглядно трещиноватость горного массива может быть изображена с помощью сферических диаграмм (рис. 2.1), на которых точками наносят характеристики трещины — про-

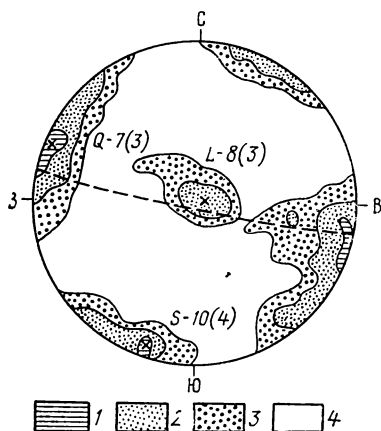


Рис. 2.1. Круговая диаграмма трещиноватости:

1 — плотность трещиноватости составляет 4–6%; 2 — то же, 2–4%; 3 — то же, 1–2%; 4 — менее 1%



стирание и угол падения. Иногда вместо точек наносят изолинии плотности трещиноватости.

Помимо трещиноватости на свойства массива большое влияние оказывают слоистость и сланцеватость.

## 2.2. ПРОЧНОСТЬ МАССИВА ГОРНЫХ ПОРОД

Так как массив скальных пород обычно разбит трещинами и ослаблен в определенных направлениях, его прочность на сжатие всегда будет ниже прочности горной породы.

Для массива, состоящего из крепких и хрупких пород, прочность на сжатие в 10 раз меньше, прочности самих пород, хотя для таких пород, как плотные известняки, каменная и калийная соли, плотный уголь, прочность на сжатие в массиве равна 80—90% прочности пород [19].

Прочность массива на растяжение обусловлена в значительной степени трением и сцеплением в условиях объемного напряженного состояния.

Для большинства горных пород прочность на растяжение составляет 5—10% прочности на сжатие. Для массивов характерно подобное же соотношение.

Прочность массива пород на срез может быть предельно низкой в направлении плоскостей напластования, сланцеватости, крупных трещин и быть значительной в перпендикулярных направлениях. Прочность на срез складывается из сопротивления срезу и частично из сил трения и сцепления на поверхностях трещин.

Для сыпучих сред предел прочности на срез (в Па) определяется на основе закона Кулона

$$\tau_{\text{ср}} = k + \sigma_{\text{сж}} \operatorname{tg} \rho, \quad (2.5)$$

где  $k$  — сцепление породы;  $\rho$  — угол внутреннего трения.

Если скальный массив раздроблен мелкими трещинами или имеет сплошную трещину скольжения, то его также можно рассматривать как сыпучую среду и пользоваться уравнением (2.5).

Прочность на срез возрастает с увеличением скорости приложения нагрузки. Следует помнить, что в сильно трещиноватом горном массиве механические свойства обусловлены трещиноватостью, а не материалом горной породы.

Величина сцепления пород в массиве также меньше величины сцепления в горной породе. Г. Л. Фисенко предложил эмпирическую формулу для определения сцепления в массиве [10]:

$$k_m = \frac{k}{1 - a \ln \frac{H}{l_{cp}}}, \quad (2.6)$$

где  $k$  — сцепление в образце;  $a$  — коэффициент ( $a = 0,5 \div 10$ ) [32];  $H$  — высота борта карьера, м;  $l_{cp}$  — средний размер элементарных блоков, м.

### 2.3. ДЕФОРМИРУЕМОСТЬ МАССИВА ГОРНЫХ ПОРОД

В результате воздействия на массив нагрузок в нем возникают деформации, т. е. движение во времени. Это движение обусловлено напряжениями, которые пока не удастся измерять и получать при экспериментах.

Следует иметь в виду, что массив пород в зависимости от природы, величины и времени действия нагрузки может быть упругим, пластичным, вязким и хрупким. Он может одновременно быть упругим и пластичным.

Обычно массив пород менее упруг, чем образец горной породы. Поэтому модуль упругости массива  $E_m$  составляет только  $1/5$ — $1/15$  часть модуля упругости породы [19]. Причем величина  $E_m$  зависит от напряжений в массиве и скорости нагружения. Медленно прикладываемая и длительно действующая нагрузка уменьшает, а быстрая и кратковременная увеличивает модуль упругости.

Очень мало имеется сведений о поперечной деформации массива пород. Известно, что коэффициент Пуассона в массиве значительно зависит от скорости приложения нагрузки. При быстрой нагрузке он приближается к  $0,18$ — $0,25$ , а при медленной — к  $0,4$ — $0,5$ , т. е. массив начинает вести себя как пластичное тело.

Массив горных пород тем пластичнее, чем пластичнее горные породы, чем больше он ослаблен химически, чем интенсивнее он ослаблен трещиноватостью, чем более открыты и «смазаны» трещины, чем медленнее и дольше прикладывается нагрузка.

Очень важным обстоятельством, которое необходимо учитывать при расчетах, является вероятностный характер наших знаний о свойствах как горных пород, так и массива. Поэтому гистограммы и кривые распределения измеряемых параметров необходимо строить по материалам испытаний и использовать методы теории вероятностей.

### 3. ОСНОВНЫЕ ВИДЫ НАРУШЕНИЙ УСТОЙЧИВОСТИ БОРТОВ КАРЬЕРОВ И ОТВАЛОВ

#### 3.1. ИЗМЕНЕНИЕ НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ МАССИВА ПОРОД ПРИ ВЕДЕНИИ ОТКРЫТЫХ ГОРНЫХ РАБОТ

Массивы горных пород в естественном состоянии подвержены постоянному и очень сложному воздействию природных факторов. В течение суток изменение температуры воздуха приводит к деформации массива. В течение года замерзание и оттаивание, солнечные лучи, вода, просачивающаяся по трещинам, деревья и травы, а также ветер воздействуют на породу. Этот процесс протекает очень медленно и только мощные явления, такие как землетрясение и извержение вулканов, резко ускоряют изменение свойств массива пород.

Выемка горных пород резко нарушает установившийся природный режим горного массива, изменяет поле напряжений. Создаются полости в земной коре, дополнительные плоскости обнажения пород, интенсифицируется процесс выветривания.

Массив пород, ненарушенный горными работами, находится в объемном напряженном состоянии.

При этом вертикальная составляющая (рис. 3.1) объемного напряженного состояния (в Па)

$$\sigma_z = \gamma H, \quad (3.1)$$

а горизонтальные составляющие имеют обычно одинаковые значения, т. е.:

$$\sigma_x = \sigma_y = \frac{\mu}{1 - \mu} \gamma H, \quad (3.2)$$

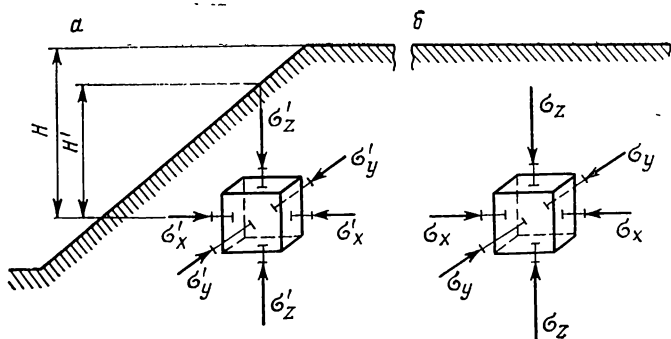


Рис. 3.1. Напряженное состояние пород:  
а — вблизи откоса; б — в недрах массива

где  $\mu$  — коэффициент Пуассона;  $\gamma$  — средневзвешенная плотность пород,  $\text{Н/м}^3$ ;  $H$  — глубина залегания слоя, м.

Таким образом, в обычных условиях (поскольку  $0 < \mu < 0,5$ )

$$\sigma_z > \sigma_x = \sigma_y. \quad (3.3)$$

Для пластичных глинистых пород, имеющих  $\mu \approx 0,5$ , характерно распределение напряжений по гидростатическому закону

$$\sigma_z = \sigma_x = \sigma_y. \quad (3.4)$$

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

Состояние пород (в пределах упругих деформаций) при плоском в плане откосе характеризуется следующими значениями напряжений (рис. 3.1, а):

$$\sigma'_z = \gamma H'; \quad (3.5)$$

$$\sigma'_x = \frac{E \epsilon_x}{1 - \mu} + \frac{\mu}{1 - \mu} \gamma H'; \quad (3.6)$$

$$\sigma'_y = \frac{\mu}{1 - \mu} \gamma H', \quad (3.7)$$

где  $E$  — модуль Юнга, Па;  $\epsilon_x$  — относительная деформация в сторону откоса.

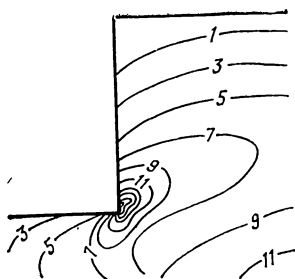


Рис. 3.2. Траектории максимальных касательных напряжений в модели уступа (по А. М. Демину)

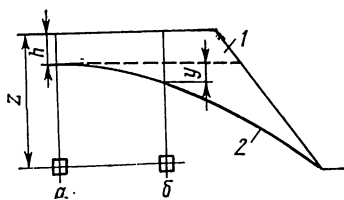


Рис. 3.3. Схема к определению напряженного состояния обводненного откоса:

1 — первоначальный уровень подземных вод; 2 — то же, после проведения горной выработки

Следует отметить, что при изогнутом в плане откосе изменяются не только значения  $\sigma_x$ , но и  $\sigma_y$ . При вогнутой форме появляются дополнительные горизонтальные напряжения сжатия, а при выпуклом — растягивающие напряжения. По высоте откоса наблюдается концентрация напряжений в основании откоса (рис. 3.2).

Как правило, вертикальные и горизонтальные напряжения возрастают от верхней площадки уступа к нижней. Вблизи верхней площадки есть области, где преобладают горизонтальные растягивающие напряжения. Здесь могут развиваться трещины отрыва [5].

Поле напряжений зависит и от других факторов, связанных с изменением природной обстановки, например, температурных напряжений, величина которых изменяется от 343 до 6200 кПа в зависимости от типа пород и колебаний температуры. Годовые изменения температуры вызывают напряжения на глубине до 6—8 м от поверхности откоса, суточные — на глубине до 1,2—1,5 м. Перераспределение напряжений в откосах зависит также от наличия каких-либо геологических нарушений в породах, слагающих борт карьера, или от пройденных в бортах подземных выработок.

На поле напряжений влияют грунтовые воды. В естественных условиях при наличии подземных вод (рис. 3.3, а) вертикальная составляющая напряжения (в Па)

$$\sigma_z = \gamma_c h + \gamma_v (z - h). \quad (3.8)$$

Создание карьера (траншеи) приводит к понижению первоначального уровня грунтовых вод и изменению

значения вертикальной составляющей напряжения (рис. 3.3,б):

$$\sigma'_z = \gamma_c(h + y) + \gamma_b(z - y - h), \quad (3.9)$$

где  $\gamma_c$  — плотность пород в сухом состоянии, кг/см<sup>3</sup>;  $h$  — глубина первоначального уровня грунтовых вод, м;  $y$  — снижение уровня грунтовых вод над расчетной точкой, м;  $\gamma_b$  — плотность пород с учетом гидростатического взвешивания, кг/см<sup>3</sup>;  $z$  — заглубление расчетной точки ниже поверхности земли, м.

Причем

$$\gamma_b = (\Delta - \Delta_0)(1 - n) \approx \frac{1}{2} \gamma_c, \quad (3.10)$$

где  $\Delta$  — плотность горных пород, кг/см<sup>3</sup>;  $\Delta_0$  — плотность воды, кг/см<sup>3</sup>;  $n$  — пористость горных пород, %.

Выемка горных пород сопровождается возникновением дополнительных напряжений от ведения взрывных работ, массы оборудования, массы отвалов на борту карьера и в выработанном пространстве и т. д.

Под влиянием карьера и дренажных систем увеличивается скорость движения подземных вод, что приводит к росту гидродинамического давления и перераспределению напряжений в приборотовом массиве.

Проведение открытых горных выработок приводит к обнажению горных пород, ранее находившихся внутри массива, в результате чего начинается их физическое и химическое выветривание.

Проведение открытых горных выработок вызывает изменение прочностных свойств пород. Глинистые породы после выемки вышележащих пород набухают и снижают свою прочность. Существенно влияет на прочность увлажнение пород, ранее находившихся в сухом состоянии.

В глинистых увлажненных породах при приложении к ним нагрузок может возникать поровое давление, снижающее значение нормальной составляющей давления от веса пород, что ухудшает условия устойчивости. Аналогичное значение имеет проникновение воды в трещины и пустоты.

Отвод рек и водоемов за пределы карьерного поля, дренирование подземных вод карьером или специальными дренажными системами, появление технических вод меняют режим питания подземных вод. Изменяется химический состав воды. Изменение режима и химиче-

ского состава подземных вод может привести к развитию карста, суффозионного выноса и т. п., что также неблагоприятно сказывается на способности пород бортового массива сохранять напряжения в откосе.

Таким образом, изменение природной обстановки при выемке горных пород открытым способом с точки зрения устойчивости откосов приводит к неблагоприятным последствиям.

### 3.2. ОПОЛЗНИ БОРТОВ КАРЬЕРОВ

Оползни — медленное смещение масс горных пород, слагающих откос (часто и его основание), происходящее по неподвижному массиву. Деформирующийся (смещающийся) массив перемещается относительно неподвижной части по поверхности скольжения (*CML* на рис. 3.4). Характерной чертой оползней является медленное (от нескольких минут до нескольких лет) развитие деформаций с последующим быстрым обрушением массива. Данный вид деформаций является наиболее крупным по размерам захватываемых участков.

Исходя из места развития оползней и строения пород деформирующегося массива, выделяются 3 группы оползней: оползни бортов и уступов, оползни отвалов, оползни естественных склонов.

По виду поверхности скольжения, ее пространственному положению, причинам и условиям возникновения, особенностям протекания различают следующие подгруппы оползней: контактные, изотропных массивов, глубинные и надвиговые оползни выпирания, фильтрационные оползни.

Характерным для всех

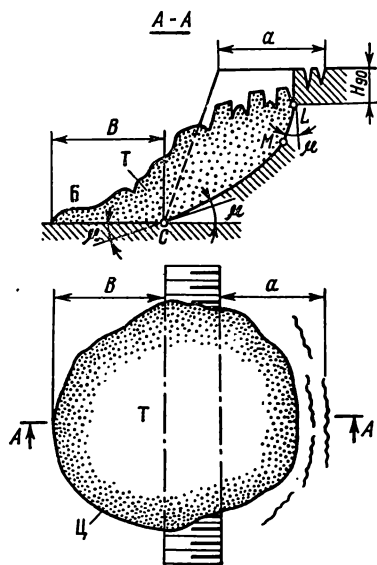


Рис. 3.4. Морфология оползня:  
 $T$  — массив оползающих пород;  $B$  — вал выпирания;  $Ц$  — оползневый цирк

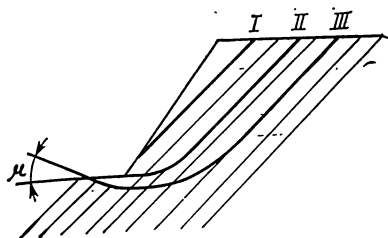


Рис. 3.5. Возможные положения поверхности скольжения (I, II, III) при наличии слоев, падающих в сторону карьера

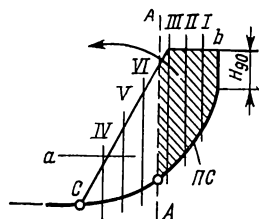


Рис. 3.6. Деление призмы обрушения:

*a* — на призму упора; *b* — на призму активного давления; *ПС* — поверхность скольжения

видов оползней является смещение деформирующихся масс по поверхности скольжения, положение которой определяется прочностью пород в массиве, наличием трещин и ослабленных контактов, плотностью пород, наличием воды, углом откоса и его высотой.

Поверхность скольжения может быть плоской, если она совпадает с контактом слоев, падающих в сторону карьера (рис. 3.5). При наличии слоистости, трещин большой протяженности и других структурных ослаблений массива поверхность скольжения может иметь сложную форму (рис. 3.5, II, III), частично совпадающую со структурным ослаблением массива, а в другой части секущую его. В однородных породах поверхность скольжения близка к круглоцилиндрической. В наиболее общем виде поверхность скольжения представляет собой комбинацию круглоцилиндрической и плоских поверхностей, совпадающих со структурными ослаблениями.

Характерным для поверхности скольжения в однородном массиве обычно является наличие в верхней ее части вертикального участка (рис. 3.6) — площадки отрыва высотой

$$H_{90} = \frac{2k}{\gamma} \operatorname{ctg}\left(45^\circ - \frac{\rho}{2}\right), \quad (3.11)$$

где  $k$  — сцепление;  $\rho$  — угол внутреннего трения пород;  $\gamma$  — удельный вес, Н/см<sup>2</sup>.

Этот участок образуется под действием растягивающих напряжений при стремлении оползающего массива (сохраняющего в начальный период развития оползня внутреннюю вязкость) повернуться вокруг нижней бров-



ки (точка  $C$  на рис. 3.6). В результате на верхней площадке деформирующегося откоса появляются заколы (трещины), один из которых с развитием оползня превращается в трещину отрыва. Ниже вертикального участка  $H_{90}$  имеется прямолинейный участок  $LM$  (см. рис. 3.4), наклоненный под углом  $\left(45^\circ - \frac{\rho}{2}\right)$  к вертикали. Затем поверхность скольжения переходит в криволинейную, пересекая откос под углом  $\mu = 45^\circ - \frac{\rho}{2}$  или выходя в подошву откоса (при  $\rho < 13^\circ$ ) под таким же углом. Заколы характеризуют глубину развития деформаций (см. рис. 3.4, а).

Массив оползающих пород ( $T$  на рис. 3.4) называется телом оползня или призмой обрушения. По поверхности скольжения (и вообще в массиве) действуют удерживающие  $\Sigma F_{уд}$  (за счет трения и сцепления) и сдвигающие  $\Sigma F_{сдв}$  силы (масса пород и оборудования). В том случае, если сумма сил удерживающих больше суммы сил сдвигающих, откос находится в устойчивом состоянии. При их равенстве наступает состояние предельного равновесия. И наконец, когда сдвигающие силы больше удерживающих, происходит нарушение устойчивости и откос начинает оползать (вообще деформироваться).

Очевидно, если разделить откос на вертикальные блоки ( $I, II, III$  и т. д.) (см. рис. 3.6) и сравнить сдвигающие и удерживающие силы в каждом блоке вдоль потенциальной поверхности скольжения, то в верхней части откоса будет наблюдаться преобладание сдвигающих сил, а в нижней удерживающих. В некотором сечении  $A-A$  удерживающие силы будут равны сдвигающим. Это сечение делит призму обрушения на призму активного давления ( $b$  на рис. 3.6), где  $\Sigma F_{сдв} > \Sigma F_{уд}$ , и призму упора ( $a$  на рис. 3.6), где  $\Sigma F_{сдв} < \Sigma F_{уд}$ .

В плане оползающий массив образует оползневый цирк ( $Ц$  на рис. 3.4). На поверхности тела оползня образуется характерный оползневый рельеф, а в нижней части оползня нередко возникает вал выпирания  $B$ .

В первой фазе развития оползня напряжения по поверхности скольжения выходят за пределы упругих и начинается пластическое деформирование массива. При этом прочность пород снижается сначала в средней части поверхности скольжения, в результате чего боль-

ная нагрузка ложится на соседние зоны. В связи с тем, что сдвигающие силы преобладают в верхней части, т. е. в призме активного давления, зона пластических деформаций распространяется преимущественно вверх. На поверхности образуются трещины отрыва и происходит оседание породы. В нижней части откоса видимых деформаций еще нет, а в средней части могут наблюдаться смещения (выпучивание откоса).

По мере развития оползня деформация по поверхности скольжения увеличивается и достигает наконец такой величины, когда по всей (или почти всей) поверхности скольжения преодолены силы сцепления. Эта величина абсолютного смещения получила название критической величины деформации  $\Delta l_{кр}$  (рис. 3.7). Абсолютные смещения, отнесенные к единице времени, т. е. скорость деформации в первой фазе развития оползня (I на рис. 3.7), невелики и постепенно увеличиваются. В момент преодоления сил сцепления по поверхности скольжения скорость деформации достигает критического значения  $v_k$ . Начинается вторая активная стадия развития оползня и происходит обрушение части массива пород.

К началу второй, активной фазы развития оползня, если поверхность скольжения (см. рис. 3.5, III) захватывает основание откоса, на нем будет зафиксировано пучение пород, которое затем может перейти в вал выпирания. В этот период движения оползающих масс определяется трением по поверхности скольжения. Ввиду того, что смещения и скорости смещений отдельных частей оползающей толщи неодинаковы, происходит ее дезинтеграция, образуются трещины (чаще всего ориентированные параллельно основной трещине отрыва), бугры и

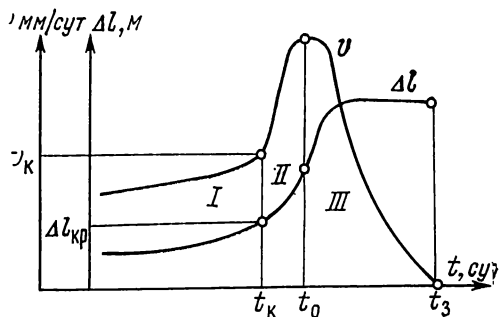


рис. 3.7. Изменение скорости ( $v$ ) и величины смещения ( $\Delta l$ ) в процессе развития оползней

впадины. При развитии оползня в пластичных породах ярко проявляется волнообразный характер движения оползневых масс — поверхностные участки погружаются в глубь тела, а затем при последующем движении вниз вновь появляются на поверхности. Потенциальная энергия массива переходит в кинетическую и за счет накопленной энергии движения оползшая масса далеко продвигается вперед, располагаясь под углом, обычно не превышающим  $15\text{--}20^\circ$ . При увлажнении сползающих масс они могут растекаться под углом  $12\text{--}14^\circ$ , а в некоторых случаях и переходить в оплывины.

При достижении определенной величины языка оползня (*Б* на рис. 3.4) увеличивается значение удерживающих сил и создается равновесие — скорости смещений уменьшаются, оползень стабилизируется, идет третья фаза его развития, фаза затухания (*III* на рис. 3.7).

При контактных оползнях (рис. 3.8) поверхность скольжения на большей части проходит по ослабленным контактам, представленным трещинами большого протяжения, поверхностями древних оползней, контактами слоев или слоями, имеющими меньшие значения сцепления и угла внутреннего трения, чем породы, слагающие откос. Если падение этих ослабленных контактов наблюдается в сторону выемки под углом, меньшим угла внутреннего трения, естественная прочность пород достаточна для удержания их в равновесии в течение длительного времени. В большинстве случаев при залегании ослабленных сухих слоев под углом, меньшим  $25\text{--}30^\circ$ , и высоте уступов до  $15\text{--}20$  м развития оползней по подрезанным контактам не наблюдается. Если же породы обводнены, набухают или контакты ослабляются какими-либо другими факторами, то по ним могут происходить

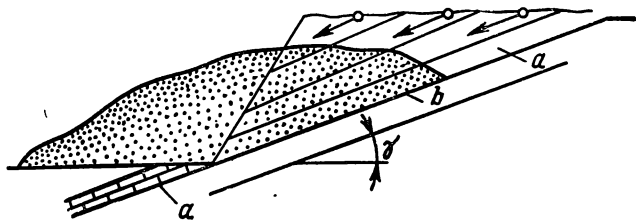


Рис. 3.8. Контактный оползень:

*a* — водопроводящий известняк; *b* — глинистый прослойк (поверхность скольжения)

оползни. В этом случае развитие контактных оползней наблюдалось при углах падения слоев  $10-12^\circ$ . Наиболее частой причиной развития контактных оползней является обводнение ослабленного контакта, представленного породами, склонными к набуханию.

Характерной чертой развития оползней контактного типа является параллельность векторов смещения по всей поверхности тела оползня и поверхности скольжения.

Оползни контактного типа наблюдались на целом ряде угольных карьеров — Коркинском, Богословском, Волчанском, Экибастузском, Кумертауском (Ермолаевском) и др.

По к р о в н ы е оползни — это частный случай контактных оползней. Их характерной особенностью является смещение рыхлых, как правило, сильно увлажненных пород по кровле подстилающих коренных пород, имеющих наклон в сторону карьера (рис. 3.9).

Различают покровные оползни двух типов:

1. При разработке месторождений на склоне возвышенностей карьером может быть подсечен контакт коренных пород и слабых рыхлых пород (рис. 3.9,а). Оползни этого типа могут происходить при углах наклона даже меньше  $10-15^\circ$  и захватывать значительные по мощности толщи пород. Оползень такого типа наблюдался на Зыряновском карьере, где мощность пород делювиального происхождения, захваченных оползнем, составляла от 10 до 40 м.

2. На нерабочих бортах карьеров, где длительное время скапливаются продукты выветривания откосов песчано-глинистых пород, образуется вторичный покров (рис. 3.9,б). При увлажнении этой массы, она может стать неустойчивой и начать движение вниз по откосу борта, сглаженному выветриванием. Оползни этого типа имели место на Коркинском угольном карьере.

При увлажнении оползающих масс оползень может перейти в оплывину.

Оползни изотропных массивов отличаются от рассмотренных ранее покровных и контактных оползней отсутствием фиксированных поверхностей ослабления (рис. 3.10). Положение поверхности скольжения определяется физическими свойствами пород, формой и размером откоса и другими факторами. Наиболее часто подобные оползни возникают при завышении угла отко-

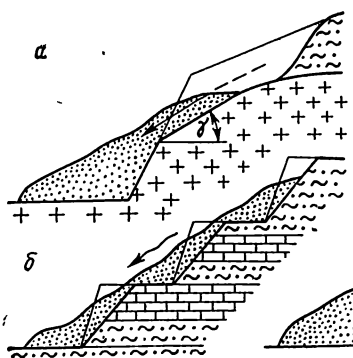
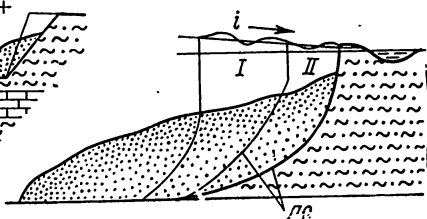


Рис. 3.9. Покровные оползни

Рис. 3.10. Оползень изотропного массива:

*I, II* — стадии развития оползня;  
*i* — уклон поверхности



са и высоты борта, а также при сложении борта слабо-фильтрующими глинистыми породами (суглинки, глины, слабые алевролиты) и их обводнении. Из-за обводнения пород и их низких фильтрационных свойств увеличивается водонасыщенность массива, происходит набухание и разупрочнение глин, что в конечном итоге приводит к развитию оползня. В затопленных откосах на развитие оползня значительно влияет гидростатическое взвешивание, снижающее эффективную величину веса пород и уменьшающее силы трения по поверхности скольжения. Морфология и динамика развития оползней этого типа наиболее полно отвечает схематическому описанию, приведенному в § 1 настоящей главы.

Для развития оползней изотропных массивов характерно циклическое развитие (см. рис. 3.10). Ширина развития деформации при каждом цикле составляет 6—8 м и зависит от пластичных свойств, а также высоты откоса. Оползни массы в пределах оползневого цирка располагаются под углом 12—14° и при дальнейшем увлажнении могут переходить в текучее состояние, т. е. оплывину.

Глубинные оползни происходят в слоистых породах висячего и лежачего боков и захватывают, как правило, наибольшие объемы пород по сравнению с другими видами оползней. Они делятся на: глубинные оползни слоистых пород лежачего бока, оползни-надвиги, оползни выпирания. Два последних типа оползней характерны для слоистых пород висячего бока.

Глубинные оползни слоистых пород лежачего бока (рис. 3.11) бывают на карьерах, разрабатывающих плас-

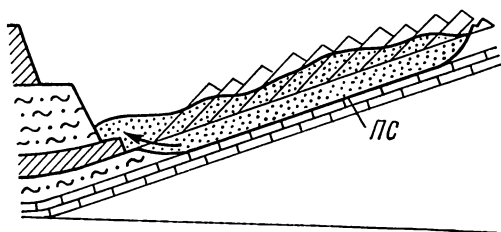


Рис. 3.11. Глубинный оползень слоистых пород лежачего бока

ты с пологим падением в сторону выработанного пространства при условии подстилания их слабыми глинистыми породами.

Основной причиной возникновения и развития оползня является наличие напорных вод в слоистых породах лежачего бока [32]. Развитие оползня по этой причине происходит спустя значительное время после выемки. Если причиной развития являются крутые углы откоса нерабочего (лежачего бока) борта, оползни начинаются непосредственно за выемкой.

Поверхность скольжения (см. рис. 3.11) в основном проходит по напластованию пород с углом падения от  $6^\circ$  до  $15\text{--}30^\circ$ . В верхней части она имеет криволинейную форму с углами наклона, достигающими  $65\text{--}70^\circ$ . В нижней части поверхность скольжения проходит также по криволинейной поверхности, пересекая слой.

Поверхность скольжения может залегать на значительной глубине от дна карьера (до  $25\text{--}30$  м). По падению и простираюнию размеры оползневых участков достигают сотен метров, а по объему смещающихся пород являются самыми крупными из всех видов оползней. Так, оползень на Волчанском карьере № 4 захватил более 5 млн. м<sup>3</sup> породы без учета объема внутренних отвалов, пришедших в движение вместе с основанием (породами лежачего бока). В нижней части смещения пород направлены вверх и происходит выдавливание пород. Высота поднятия достигает  $5\text{--}10$  м, смещение к забою — до  $0,5\text{--}1,0$  м. Скорости смещения в средней части достигают  $8\text{--}12$  м/мес. Во всех случаях развития глубинных оползней лежачего бока в зоне поверхности скольжения наблюдается повышенная (до  $45\text{--}50\%$ ) влажность пород.

Оползни выпирания являются глубинными опол-

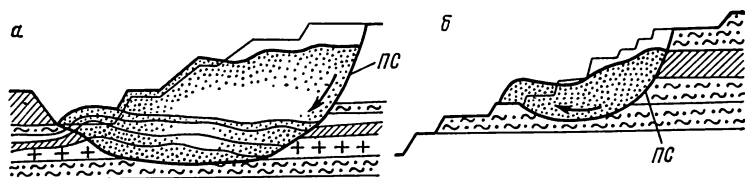


Рис. 3.12. Глубинный оползень выпирания:  
а — на дне; б — на борту карьера

знями пород всячего бока (рис. 3.12). Условием возникновения оползня является наличие на вскрытых карьером породах всячего бока слабых пластичных глин или слабых контактов между слоями, прочностные характеристики которых значительно меньше прочностных характеристик вышележащих пород. Причиной возникновения оползня является обводнение пород за счет водоемов вблизи карьера или атмосферных осадков, а также завышенные углы наклона борта карьера. Развитию оползней выпирания могут способствовать напорные водоносные горизонты, расположенные ниже подошвы карьера. Поверхность скольжения оползней выпирания на большей своей части обычно проходит ниже подошвы карьера (см. рис. 3.12) в пределах слабого слоя или контакта. В нижней части *ПС* выходит на некотором расстоянии от нижней бровки откоса борта, где образуется вал выпирания. В верхней части *ПС* проходит по криволинейной поверхности, пересекая слой. Характерным для оползней выпирания является вертикальное смещение пород в верхней части оползня. В средней части, наряду с вертикальным смещением, наблюдается перемещение в сторону карьера, а в нижней части — поднятие пород. Оползни этого вида наблюдались на ряде карьеров. Так, на карьере «Устье-Брынкино» в 1963 г. произошел оползень объемом до 1 млн. м<sup>3</sup>. Поверхность скольжения проходила по контактам слоев жирных глин, которые обводнялись за счет ниже расположенного напорного горизонта.

### 3.3. ДЕФОРМАЦИЯ БОРТОВ КАРЬЕРОВ ПОД ВЛИЯНИЕМ ВОДЫ

Скальные и полускальные породы, обнаженные горными выработками, меняют свою прочность лишь под влиянием выветривания, причем на этот процесс зна-

чительно влияют не подземные воды, а дождевые и талые, а кроме того — климатические условия и пространственное положение откосов.

Прочность водонасыщенных глинистых пород меняется в основном в процессе набухания. В результате выемки вышележащих пород давление на глинистые слои уменьшается и они стремятся принять в себя некоторое дополнительное количество воды из соседних водоносных слоев. Заметное набухание начинается чаще всего лишь при разгрузке глин до достаточно малого напряжения, которое называют «силой эффективного набухания».

Наиболее интенсивное набухание происходит обычно на поверхности откоса (под действием атмосферных и вытекающих на откос подземных вод), а также на контактах глинистого пласта с водоносными породами, так как глина часто оказывается в мягкопластичном состоянии, что является одной из причин так называемых «контактных оползней». При этом на контактах с высоконапорными водоносными горизонтами, из-за резкого уменьшения напрузок, интенсивному набуханию подвергаются даже плотные глинистые породы — аргиллиты и алевролиты. Процесс набухания песчано-глинистых пород на поверхности откосов часто завершается полной потерей ими связности и переходом в текучее состояние, что приводит к оплыванию набухших пород слоями 15—20 см даже при пологих углах откосов ( $18^{\circ}$ — $20^{\circ}$  и менее).

Для оценки степени снижения прочности глин при набухании предварительно проводятся испытания глинистых образцов на сдвиг, выдержанных под водой при различных нормальных напряжениях. По результатам испытаний строится график сопротивления пород сдвигу, который в дальнейшем используется при расчете устойчивости откоса.

Особенно важно учитывать дополнительное увлажнение глинистых пород, залегающих выше уровня подземных вод или слагающих отвалы, так как оно всегда приводит к снижению прочности пород.

Несвязные породы (чистые песчано-гравелистые отложения) практически не меняют своих характеристик сопротивления сдвигу под воздействием воды. Поэтому появление «пробки» разжиженных пород в скважинах или же прорыв водоносных песков в подземные выработки не могут служить основанием для выводов о «плы-



вунной природе» песка, из-за которых часто принимается заниженный угол наклона борта карьера, либо же проектируются мощные дренажные системы, приводящие к неоправданным затратам. Один и тот же песок может проявлять плавунные свойства вблизи скважин или подземных выработок, оставаясь в то же время вполне устойчивым в откосах карьера.

Мало сказывается на прочности песков в откосах карьеров и вынос мелких фракций фильтрующимся потоком (механическая суффозия). Суффозия развивается в заметных масштабах лишь в небольших зонах (обычно 1—2 м) вблизи участка высачивания подземных вод; ограниченный вынос мелких частиц (до 1—2%) отмечается и на больших удалениях от фильтрующего откоса, однако он не приводит к сколько-нибудь ощутимому снижению сопротивления сдвигу песков.

Одной из главных причин оползневых деформаций обводненных откосов является изменение напряженного состояния пород под воздействием гидростатических и гидродинамических сил.

В условиях частично подтопленного откоса гидростатическое давление приводит к уменьшению эффективно-го давления, т. е. трения в пределах «призмы упора», и к снижению степени устойчивости откоса. Так, для песчаных откосов разница в допустимых углах при наличии подтопления и без него может достигать 6—8°. Наихудшие условия отмечаются при подтоплении откоса, составляющем 0,2—0,3 его высоты.

Гидростатические силы существенно влияют, на устойчивость бортов карьеров, в основании которых находятся недренируемые напорные водоносные горизонты, особенно при наклонном залегании слоев. Если под дном карьера, например, находится напорный пласт известняков и он отделен от карьера мощным водоупорным глинистым пластом, то напоры в известняках и нейтральное давление воды по их кровле остаются практически неизменными. Но выемка пород приводит к значительному уменьшению полного давления на глинистый пласт, и эффективное давление в минеральном скелете по подошве глинистого слоя резко уменьшается. Силы трения перестают «работать» и к тому же глинистые породы разбухают до мягкопластичного состояния. В результате возникают крупные оползни борта карьера и внутренних отвалов, неоднократно описанные в литературе.

Поэтому в период разведки необходимо детальное изу-

чение водоносных горизонтов, залегающих ниже пласта полезного ископаемого, которым изыскатели часто не уделяют достаточного внимания.

В прибортовой части массива, за различными экранящими зонами (например, дайки водонепроницаемых пород) также могут сохраняться высокие напоры, способные привести к обрушению бортов, что особенно важно учитывать для откосов большей высоты. Ввиду того что пористость скальных пород обычно невелика, поступление в них дождевых и талых вод приводит к значительному повышению уровней подземных вод и соответственно к росту гидростатического давления на стенки трещин. Именно поэтому многие оползни естественных склонов выветрелых зон скальных пород совпадают с периодами интенсивного выпадения осадков.

Гидростатическое давление является и одной из причин оползней отвалов, возникающих в период интенсивных дождей: в этом случае атмосферные осадки могут существенно увеличить мощность зоны полного водонасыщения в нижней части отвала. Аналогично на устойчивость отвалов, прилегающих к нерабочему борту, влияют подземные воды, поступающие в карьер. Наконец, гидростатические силы должны обязательно приниматься во внимание при оценке устойчивости дамб гидроотвалов.

Движущаяся вода наряду с гидростатическим создает гидродинамическое давление, отражающее сопротивление породы фильтрации воды; оно направлено вдоль линии тока жидкости и является основной причиной фильтрационных деформаций, связанных с механическим выносом частиц. Иногда оно является заметным силовым фактором и при оценке общей устойчивости откоса.

Отметим, что при более высоком сопротивлении пород фильтрации воды, гидродинамическое давление достигает наибольших значений не в водоносных породах, а в относительно слабопроницаемых толщах.

Своеобразным проявлением гидростатических и гидродинамических сил является избыточное поровое давление, возникающее при дополнительном уплотнении водонасыщенных пород глинистого состава, а также и неводонасыщенных — при переходе породы из трехфазного состояния (вода+свободный газ+минеральный скелет) в двухфазное (вода+минеральный скелет). Для уплотнения породы, находящейся в двухфазном состоянии, не-

обходим отжим воды, который из-за низкой проницаемости глин протекает очень медленно. Поэтому поровая вода воспринимает на себя некоторую долю приложенной нагрузки и в ней возникает дополнительное гидростатическое давление (избыточное по сравнению с первоначальным). Отжим воды от срединных зон глинистого слоя приводит к постепенному уменьшению избыточного порового давления и общее сопротивление породы возрастает, как за счет роста эффективных напряжений (т. е. сил трения), так и за счет уплотнения. Поэтому отрицательное влияние на устойчивость откоса будет максимальным в первые моменты после приложения дополнительной нагрузки. Это влияние является одной из главных причин оползневых деформаций отвалов глинистых пород, когда по мере роста высоты отвала порода в нижней его части сжимается до состояния полного водонасыщения.

Под влиянием грунтовых вод и атмосферных осадков (поверхностных потоков) на откосах бортов карьеров и отвалов могут развиваться различные деформации фильтрационного типа.

Если откос, сложенный песчаными породами, находится под водой и в породах текут напорные грунтовые воды, то под влиянием сил тяжести и гидродинамического давления может начаться деформация — фильтрационный выпор. Приходит в движение некоторый объем песка (все фракции одновременно). При малом угле затопленного откоса выпор может и не происходить. На неподтопленном откосе выпора также не наблюдается — здесь происходит высачивание воды, которое может вызвать оплывину.

Механическая суффозия — вынос мелких фракций из массива через промежутки между частицами крупных фракций под влиянием гидродинамического давления фильтрующейся воды. При большом объеме выноса может произойти полная потеря прочности породы. Механическая суффозия протекает тем интенсивнее, чем больше величина гидродинамического градиента и чем неоднороднее грунт.

Фильтрационный вынос по трещинам развивается также в слабосцементированных рыхлых песчаниках с естественной трещиноватостью. В откосах, имеющих угол наклона более  $20^\circ$ , это может привести к глубинному размыву и образованию пустот и правильных воронок. На Лебединском карьере под влиянием

филтрационного выноса имело место образование пустот диаметром до 7—10 м на расстоянии 100 м от откоса. В скальных породах вынос практически не влияет на устойчивость борта карьера. Однако вынос заполнителя карстовых пустот может приводить к внезапным прорывам воды (со взвешенным в ней песком) на рабочие уступы, а при больших объемах выноса нарушать устойчивость борта карьера в целом.

Если пески обладают малой плотностью (пористость больше 42—44%) и испытывают большие динамические нагрузки (например, взрывные), то они бывают 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. Происходит разжижение, которое следует учитывать при ведении гидроотвалов.

Под действием поверхностных потоков, атмосферных, технических и подземных вод, на откосах развивается поверхностная эрозия. На откосах образуются промоины. Выносимый материал скапливается на берегах, заиливая их и способствуя водонасыщению пород нижележащих уступов. Особо следует учитывать поверхностную эрозию на гидроотвалах, где размыв дамб может привести к прорывам воды.

В соляных породах под влиянием воды происходит интенсивное их растворение и выщелачивание. Появляются соляные карсты, которые могут явиться причиной возникновения обрушений и провальных воронок.

В карбонатных породах процессы выщелачивания протекают довольно медленно. Время их развития обычно неизмеримо больше времени существования борта карьера. Однако выщелачивание ведет к снижению прочности пород, в результате чего могут иметь место просадки. Эти процессы наиболее важно учитывать при наличии карстовых пород.

Оплывинами называют перемещение песчано-глинистых пород, насыщенных водой до текучего состояния. Развитие оплывин происходит чрезвычайно быстро. В течение нескольких секунд объем сместившихся пород может достичь сотен метров кубических. Так, в 1958 году на карьере Янтарного комбината произошла оплывина объемом 290 тыс. м<sup>3</sup>. Смещение пород происходило в течение нескольких минут, в результате чего породой была заполнена рабочая зона карьера и добыч-

ные работы были прекращены. Поверхность оплывших пород имела уклон  $4-6^\circ$ . Их насыщенность водой была такова, что из тела оплывины вытекали отдельные ручьи.

При оплывине весь объем пород насыщается водой до текучего состояния. При фильтрационных оползнях этого нет. Если же имеется насыщение пород водой до текучего состояния, то оно наблюдается только лишь в какой-то части оползающих пород.

Рассмотрим некоторые характерные примеры развития фильтрационных оползней.

Оползни, связанные с оплыванием песков или вымыванием пылеватых частиц. Имеется откос, сложенный переслаивающейся толщей песчано-глинистых пород (рис. 3.13,а). Неосушенный водоносный горизонт приурочен к песчаным отложениям. Карьер служит дренаем и на откосе уступа происходит свободное высачивание воды. В результате из пласта выносятся определенный объем песка (1 на рис. 3.13,а), который оседает под углом  $10-18^\circ$  на подошве уступа (объем 2). Верхние слои уступа теряют устойчивость (объем 3) и обрушаются, насыщаясь водой (объем 4). Создается подпор и уровень грунтовых вод повышается (от линии 5 до линии 6). Обычно это приводит к ослаблению массива и развитию следующего цикла оползня (объем 7).

Разрушенный материал, скапливающийся на подошве уступа, может с течением времени, насыщаясь водой, начать оплывать вторично.

Могут развиваться оползни, связанные с оплыванием на откосе набухших или насыщенных до текучего состояния глинистых пород (рис. 3.13,б). Происходят циклические

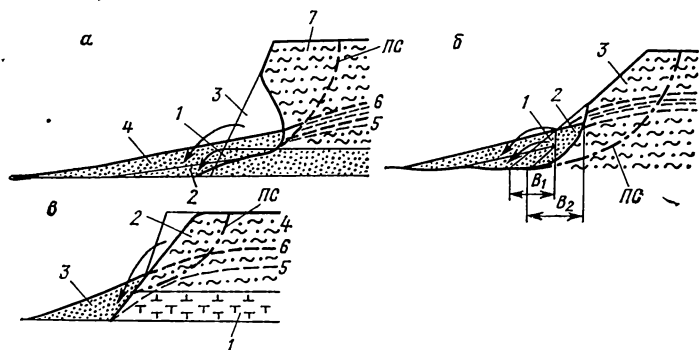


Рис. 3.13. Схема развития фильтрационного оползня

ные оплывы пород (циклы 1,2 на рис. 3.13,б). Размеры оплыва ( $B_1$  и  $B_2$  вкрест простирания уступа) невелики и, как правило, не превосходят 0,5—0,7 м и за счет оплывания нижней части откоса его угол увеличивается, нарушается устойчивость и начинает развиваться оползень (зона 3).

Оползни фильтрационного типа могут развиваться и в том случае, если водоносный горизонт представлен неоплывающими и неразмываемыми породами. Если горизонт 1 (рис. 3.13,в) имеет свободный сток, развития оползней не происходит до тех пор, пока не будет создан подпор за счет осыпающихся глинистых пород 3. Вследствие подпора затрудняется выход грунтовых вод, их уровень повышается (от линии 5 до линии 6), происходит обводнение вышележащих глин 4 и, как следствие, интенсивное развитие оползней (объем 2). Оползни этого вида наблюдались на Коркинском и Батурином угольных карьерах.

#### 3.4. ОСЫПИ, ПРОСАДКИ, ОСАДКИ

Развитие осыпей подобно накоплению делювиальных отложений является неизбежным и наиболее широко распространенным видом деформации.

Развитие осыпей протекает различно в несвязных скальных и в мягких связных породах.

Осыпи несвязных пород (песка, гравия, пород отвалов) развиваются при превышении откосом уступа угла внутреннего трения. Породы приобретая в процессе осыпания кинетическую энергию, располагаются под углом  $\phi$ , несколько меньшим угла естественного откоса  $\rho$ .

Осыпи мягких связных пород (рис. 3.14,а), как правило, характеризующихся высокой естественной влажностью, протекают интенсивно, так как эти породы на откосах подвергаются усыханию, усадке, интенсивному растрескиванию. Осыпание начинается через 1,5—2,0 мес после отработки очередной заходки. Развитие осыпи прекратится после достижения ею верхней бровки уступа.

Осыпи скальных пород (рис. 3.14,б) отличаются от осыпей мягких пород меньшей интенсивностью. Скорость развития осыпей в скальных породах зависит от степени трещиноватости откосов, которая, в свою очередь, определяется способом ведения взрывных работ. Интенсивность

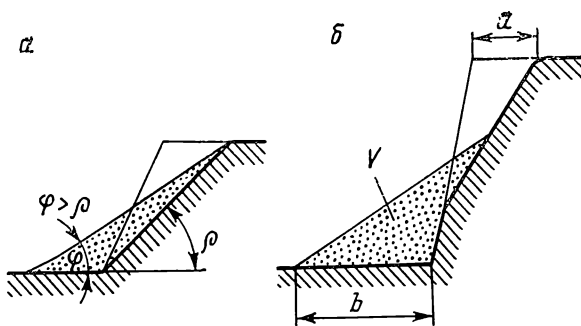


Рис. 3.14. Развитие осыпи

осыпания характеризуется срабатыванием верхней площадки уступа в единицу времени; перемещением нижней границы осыпи в единицу времени; объемом осыпи на 1 м откоса  $V$ , образовавшимся в единицу времени.

Для мягких связных пород характерны следующие показатели: интенсивность осыпания  $a=20\div90$  см/год; интенсивность перемещения  $b=36\div70$  см/год, для скальных пород  $a=10\div20$  см/год,  $b=15\div25$  см/год.

При развитии осыпей происходит выколаживание откоса, срабатывание верхней площадки (бермы) и засыпание нижней, что может привести к развитию покровных оползней, оплывин или обрушений материала осыпей. Интенсивность развития осыпей должна учитываться при определении ширины берм в зависимости от срока службы.

В результате фильтрационных деформаций, в основном растворения, выщелачивания, а также выноса по трещинам, механической суффозии, могут развиваться про с а д к и, т. е. вертикальное опускание небольших по размерам участков породы. Чаще всего просадки не нарушают общей устойчивости борта. Однако, в силу скорости, этот вид деформаций опасен для машин и механизмов. Если в основании откоса имеются слои пластичных глин и просадки происходят за счет их выдавливания, процесс просадок может явиться начальной стадией развития оползня выпирания.

За счет способности пород уплотняться при возрастании нагрузок развиваются о с а д к и.

Осадки под поверхностными зданиями и сооружениями наблюдаются в практике строительства при возведе-

нии тяжелых сооружений на слабых прунтах. Основной задачей обеспечения устойчивости является недопущение неравномерных осадок, ведущих к перекосу конструкций. Этот вид осадок является предметом изучения механики грунтов и является одним из наиболее полно изученных явлений [11].

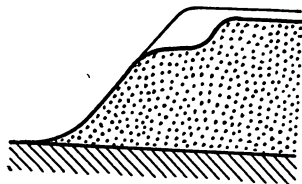


Рис. 3.15. Осадка отвала

Осадки прибортовых зон возникают в результате водопонижения за счет работы собственно дренажных систем и карьера, как дрены. Уровень подземных вод вокруг карьера снижается, что приводит к росту напряжений в его прибортовой зоне. Увеличение давления пород за счет водопонижения ведет к дополнительной осадке вскрышной толщи за счет сжатия глинистых пород. Развитие осадок протекает годами, так как глинистые породы сжимаются медленно.

Осадки прибортовых зон следует учитывать при отработке карьеров глубиной более 70—100 м при наличии глинистых пород. Особое внимание следует уделять возможным осадкам при сложении отдельных участков борта различными по своим характеристикам породами, так как неравномерные осадки могут являться причиной развития оползней.

После отсыпки отвал сжимается постепенно под действием собственного веса. Уплотнение 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. Интенсивность осадки снижается. За счет медленного рассеивания порового давления осадка отвалов может продолжаться в течение нескольких месяцев после их отсыпки. В результате более интенсивного оттока воды из приоткосной части верхняя кромка отвала имеет большую осадку по сравнению с основной частью отвала и приобретает характерный вид (рис. 3.15).

### 3.5. ОПОЛЗНИ ОТВАЛОВ

Увеличение объемов вскрышных работ по мере развития открытого способа разработки, стремление сократить площади, отводимые под отвалы, ведет к возра-



станию их высоты. А это во многих случаях сопровождается их деформациями, среди которых оползни являются наиболее частым и наиболее серьезным видом нарушений устойчивости. Сохранение устойчивости отвалов зависит от ряда горно-геологических и других факторов. Так, отвалы скальных и полускальных пород, а также песчаные отвалы сохраняют устойчивость практически при любой высоте, если они размещены под углом естественного откоса на устойчивом основании и не имеют в своем составе слабых глинистых пород или включений льда. В то же время нарушение хотя бы одного из этих условий может привести к развитию оползней. Отвалы твердых пород, как правило, имеют угол откоса, равный углу естественного откоса. В нижней части за счет разлета кусков при падении отвалы выполаживаются, цементируются продуктами выветривания, приобретая значительное сцепление. Все оползни отвалов, исходя из формы и положения поверхности скольжения, а следовательно, и причин их возникновения, можно разделить на три типа: надподошвенные, подподошвенные и подошвенные.

Надподошвенные оползни отвалов — это оползни, при развитии которых поверхность скольжения проходит выше основания отвала, т. е. располагается в отвальных породах. Они возникают в отвалах, сложенных слабыми породами, которые в процессе экскавации и укладки в отвал теряют сцепление. Неуплотненная масса пород отвала является трехфазной средой: порода — вода — защемленный в пустотах воздух. При достижении отвалом некоторой высоты начинается отжим воздуха из пустот, после чего отвальные породы переходят в двухфазное состояние. Дальнейшее возрастание давления за счет увеличения высоты отвала приводит к отжиму воды из области высоких давлений в область низких. Этот процесс сопровождается развитием порогового давления, снижающего силы внутреннего трения.

Развитие оползня надподошвенного типа (рис. 3.16) всегда связан с избыточным увлажнением пород и начинается при достижении массивом двухфазного состояния и отжима воды из нижней части отвала в верхнюю. Вода, проникающая с поверхности отвала, и вода, отжимаемая из нижней части, создают зону повышенной влажности, по которой обычно развивается поверхность скольжения.

Надподошвенные оползни могут возникать также при

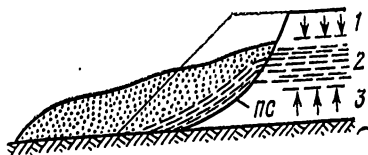


Рис. 3.16. Развитие надподшвенных оползней отвалов:

1 — увлажнение поверхностными водами; 2 — зона повышенной влажности; 3 — отжим воды из зоны двухфазного состояния

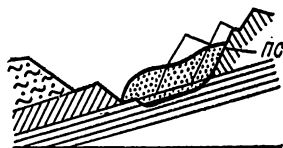


Рис. 3.17. Подшвенный оползень отвалов

отсыпке в основание отвала пластичных глин, подвергающихся в дальнейшем увлажнению. Если не ликвидировать источники обводнения, надподшвенные оползни могут переходить в оплывины, что особенно характерно для отвалов пылеватых песков.

Подподшвенные оползни — это оползни, при которых поверхность скольжения захватывает основание отвалов. По характеру проявления этот вид оползней подобен глубинным оползням сложных пород лежащего бока или оползням выпирания.

Подподшвенные оползни распространены в карьерах, на которых отвалы отсыпаются на породы с низкой несущей способностью, т. е. на торфяные или пластичные песчано-глинистые породы. В первом случае (за счет наличия торфов) развитие оползней характерно только для внешних отвалов, во втором — как для внешних, так и для внутренних.

Подподшвенные оползни отвалов наблюдались на многих карьерах Советского Союза.

Подшвенные оползни — это оползни, при которых поверхность скольжения проходит по слабым контактам основания отвалов в непосредственной близости от поверхности основания или непосредственно по ней (рис. 3.17). Чаще всего они развиваются при наклонном залегании слоев в основании отвала, хотя имеются и случаи развития подшвенных оползней при отсыпке отвалов на горизонтально залегающие слои.

В случае, если поверхность скольжения проходит непосредственно по подошве отвала (особенно наклонной), подшвенные оползни подобны покровным оползням. Разновидностью этих оползней являются деформации высоких отвалов, отсыпаемых на склоне горы.

Сами по себе неблагоприятные условия отвалообразования не являются причиной развития деформаций. Оползни отвалов возникают только в тех случаях, когда методы отвалообразования не учитывают этих условий.

Если в основании отвала залегают слабые породы (с пониженным сопротивлением сдвигу), породы глинистого состава, склонные к набуханию, слоистые породы с резко пониженными характеристиками сопротивления сдвигу по контактам или породы основания отвала имеют падение в сторону откоса, то в этих условиях могут развиваться подошвенные или подподошвенные оползни.

При расположении отвала на водонасыщенных песчаных грунтах может происходить увлажнение нижней части отвалов, что приводит к развитию надподошвенных оползней. Отсыпка пород на торфяниках вызывает развитие в них порового давления. Время, в течение которого происходят отжим воды из торфяника и его уплотнение, часто оказывается значительно большим, чем время нагружения (время отсыпки отвала), что приводит к развитию подподошвенных оползней.

Наклон основания отвала, если сопротивление сдвигу пород основания или сопротивление сдвигу между отвальной породой и основанием меньше сопротивления сдвигу пород отвала, приводит к развитию подошвенных оползней.

Расположение отвалов на участках, ранее затронутых оползневыми процессами, может активизировать прекратившийся оползень.

Атмосферные осадки и поверхностные воды могут явиться важным источником увлажнения отвалов, что приводит к снижению сопротивления сдвигу пород отвала и основания. Промерзание и оттаивание могут приводить к образованию ослабленных зон в теле отвала. Колебания температур создают дополнительные напряжения, часто сказывающиеся неблагоприятно на устойчивости. Поверхностный сток, ветры приводят к появлению на откосах промоин, осыпания, причем эти виды деформаций часто являются начальной стадией развития оползней.

Породы отвала могут увлажняться за счет водонесных горизонтов вскрышной толщи, к которым при-

легают внутренние отвалы, а также за счет рудного (угольного) пласта при временном размещении пород (при завалке пласта) и при системах с кратной перевалкой пород в выработанное пространство.

Применение мощного оборудования: транспортно-отвальных мостов, ленточных отвалообразователей, драглайнов сопровождается падением породы с большой высоты, что приводит к ее переизмельчению и полной потере механической прочности, особенно в нижней части отвала. В этих же условиях крупные куски пластичных глинистых пород, плохо поддающиеся разрыхлению, скатываются к подошве отвала, создавая ослабленный слой в его основании.

Отсыпка пород на бульдозерных и автомобильных отвалах при неравномерной отгрузке из различных забоев приводит к косослоистому строению отвалов. В этих случаях возможно развитие оползней по наиболее слабому слою.

На устойчивость отвалов существенно влияет масса оборудования (достигающая во многих случаях десятков и сотен тонн) и особенно динамические нагрузки при его работе, которые в 10—12 раз превосходят паспортные характеристики удельного давления. При динамических нагрузках от работающего оборудования, падения пород с большой высоты, взрывных работах может происходить тиксотропное разжижение грунтов, способствующее развитию оползней.

Параметры системы разработки при перевалках пород в выработанное пространство (высота уступа, ширина заходки, скорости подвигания забоев и фронта работ) должны обеспечивать устойчивость внутренних отвалов. Так, ширина заходки (отвальной), а следовательно, и вскрышной при отсыпке пород на увлажненный откос или ранее оползший участок должна выбираться достаточно большой, чтобы размер призмы упора обеспечивал устойчивость отвала. Высота вскрышного уступа должна быть не больше той, при которой обеспечивается допустимая высота отвала.

Скорость отсыпки отвалов должна обеспечивать рассеивание порового давления в основании отвала или, наоборот, должна быть достаточно большой, чтобы в предыдущей отвальной заходке не успели развиваться оползневые деформации. Правильный учет условий возникновения оползней позволит определить парамет-

ры отвальных работ, обеспечивающие устойчивость отвалов и ритмичное функционирование отвального хозяйства.

### 3.6. ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПОСЛЕДСТВИЯ ОПОЛЗНЕВЫХ ДЕФОРМАЦИЙ

Развитие оползней и других деформаций на современных карьерах может привести к поломке горно-транспортного оборудования и несчастным случаям; нарушению нормальной эксплуатации карьера или его участков, необходимости отгрузки оползневых масс, дополнительной разноске борта и т. п. Рассмотрим некоторые из этих последствий.

Скорость развития оползневых деформаций может достигать значительных величин, что в ряде случаев не позволяет вовремя вывести горное оборудование из опасной зоны.

Оползни, как правило, развиваются в откосах слабых пород с длительным сроком стояния, т. е. приурочиваются к верхним горизонтам карьера, по которым осуществляется грузотранспортная связь. Развитие оползня может нарушить транспортные коммуникации за счет разрушения бермы, на которой они расположены, или завалки их оползшими массами. Нарушение грузотранспортной связи приводит к прекращению нормального функционирования карьера, а также к экономическим потерям.

Восстановление работоспособности транспортных коммуникаций борта, нарушенных оползнем, потребует удаления оползших масс и дополнительного разноса борта. Величина затрат на выполнение этих работ, как правило, значительно превышает затраты (иногда на десятки миллионов рублей), которые понадобились бы сразу на придание борту устойчивого угла откоса.

## РАСЧЕТ УСТОЙЧИВОСТИ ОТКОСОВ

### 4. РАСЧЕТ УСТОЙЧИВОСТИ МЕТОДОМ ПРЕДЕЛЬНОГО НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ

#### 4.1. ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ, НЕОБХОДИМЫЕ ДЛЯ РАСЧЕТА

Исходные данные для определения устойчивости борта — это комплекс сведений о природных и горно-технических условиях, характеризующих рассматриваемый объект.

**Геологическое строение.** В пределах карьерного поля выделяются однородные участки и для каждого строится поперечный разрез, на котором наносится положение слоев, положение потенциальных поверхностей скольжения и контур карьера. Особое внимание следует обратить на выделение слабых контактов, слабых слоев и крупных тектонических нарушений.

**Физико-механические свойства массива горных пород.** Основными расчетными характеристиками прочности являются кривые предельного сопротивления сдвигу и кривая длительной прочности (для постоянных бортов), которые характеризуются сцеплением и углом внутреннего трения. Они определяются по результатам лабораторных или натурных испытаний для каждой литологической разности пород, слагающих борт карьера.

Для получения надежного графика прочности для данной породы нужно иметь от 15 до 30 испытаний на сдвиг.

В большинстве методов определения параметров устойчивого откоса необходимо иметь по поверхности скольжения усредненные данные о физических свойствах. В этом случае используют средневзвешенные значения свойств породы (рис. 4.1), определяемые как

$$\gamma_{\text{ср}} = \frac{\gamma_1 m_1 + \gamma_2 m_2 + \dots + \gamma_l m_l}{m_1 + m_2 + \dots + m_l}, \quad (4.1)$$

$$k_{cp} = \frac{k_1 l_1 + k_2 l_2 + \dots + k_i l_i}{l_1 + l_2 + \dots + l_i}, \quad (4.2)$$

$$\operatorname{tg} \varphi_{cp} = \frac{\operatorname{tg} \rho_1 \sigma_1 l_1 + \operatorname{tg} \rho_2 \sigma_2 l_2 + \dots + \operatorname{tg} \rho_i \sigma_i l_i}{\sigma_1 l_1 + \sigma_2 l_2 + \dots + \sigma_i l_i}, \quad (4.3)$$

где  $\gamma_i$  — плотность пород  $i$ -го слоя;  $m_i$  — мощность пород  $i$ -го слоя в пределах призмы возможного обрушения;  $l_i$  — длина участка поверхности скольжения в пределах  $i$ -го слоя;  $\rho_i$  и  $k_i$  — угол внутреннего трения и сцепление  $i$ -го слоя;  $\sigma_i$  — ориентировочное значение величины нормального напряжения в пределах участка поверхности скольжения, проходящей по  $i$ -му слою.

$$\sigma_i = \gamma_{cp} \sum h'_i \cos^2 \varphi_i, \quad (4.4)$$

где  $h'_i$  — мощность слоя в пределах элементарного блока, опирающегося на участок поверхности скольжения в пределах  $i$ -го слоя;  $\varphi_i$  — угол наклона участка поверхности скольжения в пределах  $i$ -го слоя.

Величина сцепления массива пород при наличии развитой трещиноватости существенно отличается от данных, полученных при испытании образцов ограниченных размеров. В этом случае вместо величин  $k_1, k_2, \dots, k_n$  принимается сцепление, определяемое для каждого слоя [32]:

$$k_{ri} = \frac{k_i - k'_i}{1 + a \ln m_i w}, \quad (4.5)$$

где  $k_i$  — сцепление пород в образце, Па;  $k'_i$  — сцепление по трещинам в породах  $i$ -го слоя, Па;  $w$  — средняя интенсивность трещиноватости (среднее количество трещин, приходящееся на 1 м) в пределах  $i$ -го слоя, 1/м;  $a$  — коэффициент, зависящий от степени трещиноватости и сцепления в образце (табл. 4.1).

Для слабых песчано-глинистых пород ( $k < 0,39 \cdot 10^6$  Па) с развитой трещиноватостью сцепление в массиве (с учетом трещиноватости)

$$k_{ri} = \lambda k_i, \quad (4.6)$$

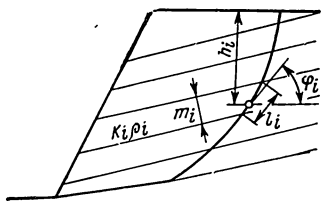


Рис. 4.1. Определение средневзвешенных значений свойств породы для расчета устойчивости

Таблица 4.1

Породы	Сцепление в монолите, $10^6$ , Па	Коэффициент $\alpha$
Песчано-глинистые слабоуплотненные и слаботрещиноватые отложения; сильно выветрелые, полностью каолинизированные	0,39—0,88	0,5
Уплотненные песчано-глинистые отложения, в основном нормальносекущей трещиноватости; сильно каолинизированные изверженные	4,9—7,85	2
Уплотненные песчано-глинистые отложения с развитой кососекущей трещиноватостью, каолинизированные изверженные	4,9—7,85	3
Крепкие слоистые, преимущественно нормальносекущей трещиноватостью	9,81—14,71	3
	14,71—19,61	4
Крепкие, преимущественно с нормальносекущей трещиноватостью	19,61—29,42	6
	Более 29,42	7
Крепкие изверженные с развитой кососекущей трещиноватостью	Более 19,61	10

где  $\lambda$  — коэффициент структурного ослабления массива ( $\lambda = 0,3 \div 0,8$ ).

Величины сцепления и внутреннего трения по поверхностям ослабления определяются по результатам натурных испытаний.

Гидрогеологические факторы. На поперечный разрез должны быть нанесены уровни подземных вод, ожидаемые при работе карьера, определены коэффициенты фильтрации, величины притоков и т. п. Особое внимание следует уделять наличию напорных горизонтов в подошве карьера.

Обводненность контактов слоев или структурных нарушений при наличии в них пород, склонных к набуханию и разуплотнению, должна учитываться путем уменьшения расчетных характеристик угла внутреннего трения по контактам.

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 — путем перехвата поверхностного стока, планировки отвалов, заоткоски уступов и т. п.



Мерзлотный режим карьерного поля в расчетах устойчивости учитывается в неявной форме путем введения в характеристики прочности пород значений, соответствующих мерзлому и талому состоянию пород откосов.

Горнотехнические факторы. При расчете уступов должны учитываться масса оборудования и динамические нагрузки при его работе, влияние взрывных нагрузок и другие факторы.

Сейсмический фактор. В расчетах учитывается сейсмическое ускорение (плотность пород при расчетах увеличивается пропорционально ожидаемому сейсмическому ускорению).

#### 4.2. КОЭФФИЦИЕНТ ЗАПАСА УСТОЙЧИВОСТИ

Степень устойчивости откоса обычно оценивается отношением суммы удерживающих сил к сумме сдвигающих, получившим название коэффициента запаса устойчивости:

$$\eta = \frac{\operatorname{tg} \rho \sum_{i=1}^n N_i + k L}{\sum_{i=1}^n T_i}, \quad (4.7)$$

где  $\operatorname{tg} \rho$  — коэффициент внутреннего трения;  $N_i$  — нормальная сила на  $i$ -й площадке;  $T_i$  — касательная сила на  $i$ -й площадке;  $k$  — сцепление;  $L$  — длина поверхности скольжения;  $n$  — число рассматриваемых площадок по длине поверхности скольжения.

В настоящее время нет еще надежных методов расчета величины коэффициента запаса устойчивости откоса. Это связано с несовершенством этих методов, вероятностным характером исходных данных по свойствам пород и рядом других факторов. Поэтому коэффициентом запаса устойчивости совокупно учитывается необходимый запас устойчивости для обеспечения работы откоса как инженерного сооружения и возможные погрешности определения сдвигающих и удерживающих сил [2].

Рассмотрим влияние конкретных причин на выбор необходимого коэффициента запаса устойчивости.

1. Исходные характеристики прочности образцов горных пород [8] определяются с погрешностью не более  $\pm 7\%$ .

2. Изменяемость свойств пород во времени (выветривание, разуплотнение, набухание, ползучесть) приводит к снижению сопротивления сдвигу на 20—30%, а вероятность реализации оползней возрастает с течением времени.

3. Неточность учета трещиноватости пород в массиве (особенно для скальных и полускальных пород) приводят к существенной погрешности определения величины сопротивления сдвигу.

4. Неточность определения динамических нагрузок от взрыва ВВ, массы оборудования и т. п. достигает  $\pm 15\text{--}20\%$ .

5. Ошибка методов расчета не превышает  $\pm 5\text{--}6\%$ .

На коэффициент запаса может влиять и ряд других факторов (например, сейсмичность района и др.), которые должны быть учтены при расчете. Окончательное значение расчетного (принимаемого) коэффициента запаса устойчивости для данного откоса принимается исходя из фактического наличия тех или иных факторов, т. е.

$$\eta_p = \eta_1 \eta_2 \dots \eta_n. \quad (4.8)$$

До настоящего времени выбор величины расчетного коэффициента запаса устойчивости остается эмпирическим, а изменение его на 0,1 приводит на крупных карьерах к изменению объемов вскрышных пород на десятки миллионов кубических метров. В связи с этим при выборе коэффициента  $\eta_p$  необходимо учитывать и экономические факторы. Однако попытки решения этого вопроса [10] пока что не дали удовлетворительных результатов.

В большинство расчетных методов для определения параметров откоса, обеспечивающих заданную степень устойчивости, вводят расчетный коэффициент запаса  $\eta_p$  в прочностные характеристики пород. Эти характеристики получили название расчетных

$$\rho_p = \arctg \frac{\operatorname{tg} \rho}{\eta_p}; \quad (4.9)$$

$$\operatorname{tg} \rho_p = \frac{\operatorname{tg} \rho}{\eta_p}; \quad (4.10)$$

$$k_p = \frac{k}{\eta_p} \quad (4.11)$$

и по ним определяются параметры откоса методами предельного равновесия.

В последнее время вместо коэффициента запаса устойчивости предлагается применять оценку уровня риска нарушения устойчивости откосов [2]. Это позволяет учесть вероятностный характер исходных данных о массиве пород.

#### 4.3. РАСЧЕТ ОТКОСА ВОГНУТОГО ПРОФИЛЯ (МЕТОД В. В. СОКОЛОВСКОГО)

Для откосов, нагруженных вертикальным слоем породы высотой  $H_{90} = \frac{2k}{\gamma} \operatorname{ctg} \left( 45^\circ - \frac{\rho}{2} \right)$ , т. е. для откосов, на которых по верхней площадке (вдоль положительной полуоси  $X$ ) приложено напряжение  $\sigma_y = 2k \operatorname{ctg} \times \left( 45^\circ - \frac{\rho}{2} \right)$ , на основе метода В. В. Соколовского [29] были определены для различных углов внутреннего трения  $\rho$  через  $5^\circ$ . Значения безразмерных координат  $X$ ,  $Y$  предельного контура откоса представлены на рис. 4.2. Таким образом, расчет откоса сводится к следующему: выбирается коэффициент запаса устойчиво-

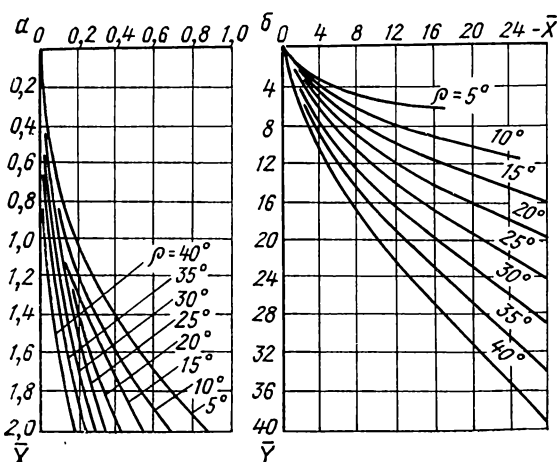


Рис. 4.2. График предельных очертаний равноустойчивого откоса вогнутого профиля (по Н. С. Мухину и А. Н. Срагович)

сти; определяются расчетные характеристики по формулам (4.1), (4.7) и (4.9); определяется предельная глубина карьера  $H - H_{90}$  (проектная) и откладывается на графике предельного контура откоса  $y = H$  (рис. 4.3); вычисляется безразмерная координата

$$\bar{y}_1 = \frac{\gamma_p}{k_p} H; \quad (4.12)$$

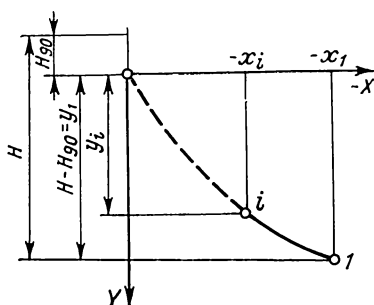


Рис. 4.3. Определение конечного контура откоса по методу В. В. Соколовского

по графику рис. 4.2 определяется сопутствующее ей значение безразмерной координаты  $\bar{x}$  [для  $\gamma_p$  (в случае если  $\gamma_p$  не отвечает приведенным значениям при определении  $\bar{x}$ ) производится интерполяция]. По значению безразмерной координаты  $-\bar{X}_1$  вычисляется истинная координата  $-x_1$

$$-x_1 = \frac{k_p}{\gamma} (-\bar{X}) \quad (4.13)$$

и строится на графике нижняя точка откоса (точка 1 на рис. 4.3).

Затем вычисляются значения координат  $y_i$  и  $x_i$  для любых промежуточных значений глубины карьера аналогичным способом (до глубины не меньше  $H_{90}$ ).

Очевидно, что из-за наличия в верхней части откоса вертикального участка высотой  $H_{90}$  профиль откоса должен быть выположен. Пользоваться изложенным методом можно только при расчете откосов, сложенных однородными породами.

#### 4.4. РАСЧЕТ ОТКОСОВ ВЫПУКЛОГО ПРОФИЛЯ

На основе метода В. В. Соколовского В. Т. Сапожниковым [27, 28] получено численное решение задачи о предельном контуре откоса выпуклого профиля. Выпуклая форма откоса является наиболее предпочтительной, так как при этом сокращаются объемы вскрышных работ, а кроме того, более полно учитыва-

ются прочностные характеристики, обычно возрастающие с глубиной.

Построение откоса выпуклого профиля производится в следующем порядке; определяются расчетные характеристики  $\eta_p$ ,  $\gamma_p$ ,  $\rho_p$ ,  $k_p$ ; по ним вычисляется высота  $H_{90}$ .

Приведенная глубина карьера (в м)

$$H'_1 = \frac{H_1}{H_{90}}, \quad (4.14)$$

где  $H'_1$  — соответствует конечной глубине карьера  $H_K = H_1$ .

По значению  $H'_1$  на основе табл. 4.2 определяется приведенное заложение борта  $L'_1$  [32]. Истинное значение заложения борта

$$L_1 = L'_1 H_{90}. \quad (4.15)$$

Таблица 4.2

Условная высота откоса $H'_1$ , м	Заложение откоса $L'_1$ выпуклого борта при $H_{90}=1$ м и углах внутреннего трения $\rho$ , градус						
	5	10	15	20	25	30	35
1	0	0	0	0	0	0	0
1,5	0,57	0,50	0,46	0,40	0,35	0,33	0,27
2,0	1,37	1,20	1,05	0,93	0,85	0,75	0,64
2,5	2,37	2,03	1,80	1,55	1,35	1,22	1,05
3,0	3,83	3,02	2,60	2,25	1,95	1,72	1,45
3,5	6,00	4,17	3,50	2,95	2,55	2,25	1,92
4,0	8,70	5,50	4,50	3,75	3,20	2,77	2,40
4,5	11,75	7,10	5,57	4,50	3,90	3,35	2,90
5,0	15,00	8,75	6,70	5,40	4,60	3,95	3,40
6,0	—	12,30	9,15	7,30	6,05	5,20	4,45
7,0	—	15,90	11,75	9,20	7,60	6,45	5,50
8,0	—	19,50	14,45	11,25	9,15	7,75	6,60
9,0	—	23,00	17,20	13,30	10,80	9,15	7,70
10	—	—	20,05	15,40	12,45	10,55	8,90
11	—	—	23,00	17,55	14,20	11,90	10,05
12	—	—	25,90	19,80	15,95	13,25	11,25
13	—	—	—	22,10	17,70	14,65	12,45
14	—	—	—	24,30	19,50	16,10	13,65
15	—	—	—	26,60	21,35	17,50	14,65
16	—	—	—	—	23,20	18,95	16,05
17	—	—	—	—	25,00	20,40	17,25
18	—	—	—	—	—	21,85	18,45
19	—	—	—	—	—	23,35	19,65
20	—	—	—	—	—	24,80	20,85

В начале координат  $H_1L$  (рис. 4.4) откладывается высота  $H_{90}$  и строится положение точки  $I (H_1, L_1)$ , соответствующее верхней бровке откоса.

Берутся промежуточные значения глубин карьера  $H_i < H_1$  и для этих глубин ( $i$  — точки откоса) находится аналогичным образом значение  $L_i$  и строятся точки, определяющие контур борта карьера.

Так как наличие вертикальных откосов недопустимо, нижняя часть откоса (на высоту  $1/3 H_K$ ) принимается плоской с максимально возможным углом  $\alpha_1$ , который принимается равным максимальному технически допустимому углу с учетом берм и съездов.

Профиль устойчивого выпуклого борта по изложенной методике может быть рассчитан в однородных породах, не имеющих поверхностей ослабления, падающих в сторону выемки или горизонтальных.

Сравнение профилей откоса в предельно напряженном состоянии показано на рис. 4.5.

При конструктивном оформлении выпуклого борта его профиль корректируют (рис. 4.6). Следует иметь

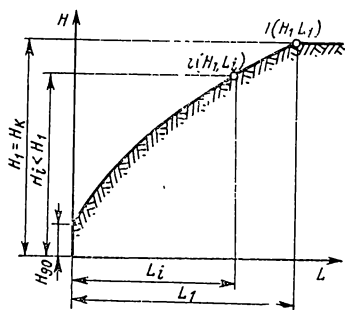


Рис. 4.4. Схема построения откоса борта карьера выпуклого профиля по методу В. В. Соколовского

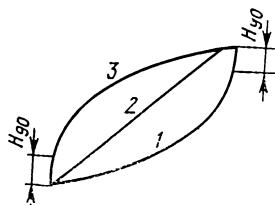


Рис. 4.5. Сравнение профилей откоса борта карьера в предельном напряженном состоянии:

1 — вогнутого; 2 — плоского;  
3 — выпуклого

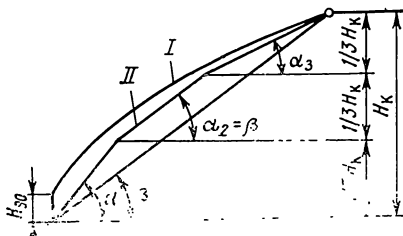


Рис. 4.6. Схема корректировки выпуклого профиля откоса:

I — расчетного; II — скорректированного

в виду, что откос любого плавного профиля в зоне выпуклого и вогнутого расчетных откосов имеет одинаковый коэффициент запаса устойчивости [27].

#### 4.5. РАСЧЕТ ОТКОСОВ ПЛОСКОГО ПРОФИЛЯ

На основе метода В. В. Соколовского и Г. Л. Фисенко [32] получено численное решение задачи о контуре плоского борта.

Порядок построения заключается в следующем: определяют величину  $H_{90}$ ; по заданной высоте борта определяют условную высоту откоса  $H' = \frac{H}{H_{90}}$ ; по значению угла внутреннего трения  $\rho$  по табл. 4.3 определяют угол откоса борта карьера.

Таблица 4.3

Условная высота откоса $H'$ , м	Угол наклона плоского борта (в градусах) при угле внутреннего трения $\rho$							
	0	5	10	15	20	25	30	35
1,0	90	90	90	90	90	90	90	90
1,5	80,7	81,4	82,3	83,0	83,0	84,0	84,5	85,0
2,0	69,2	71,3	73,0	74,6	75,8	77,3	78,1	79,6
2,5	53,0	60,0	63,5	65,5	68,2	71,0	72,5	74,4
3,0	—	47,3	53,7	58,0	61,8	65,2	68,0	70,2
3,5	—	37,0	46,1	51,0	56,3	60,2	64,0	66,5
4,0	—	28,0	39,5	45,8	51,3	56,0	60,1	63,6
4,5	—	22,3	34,6	41,6	47,2	52,5	56,9	60,9
5,0	—	18,0	30,8	38,0	44,0	49,6	53,6	58,5
5,5	—	14,7	27,8	35,0	41,4	47,0	51,7	56,6
6,0	—	12,0	26,8	32,7	39,1	45,0	50,0	54,8
6,5	—	10,0	24,0	30,9	37,3	43,4	48,5	53,4
7,0	—	8,0	22,5	29,4	36,8	41,9	47,1	52,2
8,0	—	—	20,1	27,2	33,6	39,6	45,2	50,2
9,0	—	—	18,4	25,6	31,7	38,0	43,9	48,6
10	—	—	17,1	24,2	30,3	36,7	42,6	47,4
11	—	—	16,4	23,4	29,7	36,7	41,6	46,4
12	—	—	15,8	22,7	29,0	36,0	40,7	45,6
14	—	—	14,6	21,4	27,9	34,0	39,2	44,3
16	—	—	14,2	20,8	—	—	—	—
18	—	—	—	19,8	26,8	33,0	38,3	43,0
20	—	—	—	19,2	26,2	32,3	37,7	42,7
24	—	—	—	—	25,5	31,7	37,1	42,1
28	—	—	—	—	24,7	30,3	36,5	40,9
30	—	—	—	—	—	29,7	35,7	40,3

## 5. ИНЖЕНЕРНЫЕ МЕТОДЫ РАСЧЕТА

### 5.1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Как было показано в предыдущей главе, основными условиями состояния предельного равновесия сыпуче-связной среды являются три уравнения Кулона. Или, переходя к площади конечного размера  $S$  и заменяя напряжения усилиями, действующими по площадке, получим

$$\Sigma M_c = \Sigma M_y; \Sigma P_x = 0; \Sigma P_y = 0. \quad (5.1)$$

Таким образом, при состоянии предельного равновесия по любой поверхности скольжения должны соблюдаться три условия статики сыпуче-связной среды:

равенство моментов сдвигающих и удерживающих сил относительно центра дуги скольжения;

равенство проекции вертикальных составляющих удерживающих и сдвигающих сил;

равенство проекций горизонтальных составляющих удерживающих и сдвигающих сил.

Однако в инженерных методах расчета эти условия частично не выполняются.

В инженерных методах расчета используется ряд частных выводов теории предельного напряженного состояния (ориентировка площадок скольжения относительно главного нормального напряжения  $\sigma_1$  и др.). Кроме того, они в значительной степени учитывают особенности структуры массива, обводненность и другие горно-геологические факторы. Эти методы более просты и менее трудоемки, что предопределило их широкое распространение.

### 5.2. ОЦЕНКА УСТОЙЧИВОСТИ ОТКОСА ПРИ ПЛОСКОЙ ПОВЕРХНОСТИ СКОЛЬЖЕНИЯ (МЕТОД П. М. ЦИМБАРЕВИЧА)

Для ориентировочных расчетов откосов, сложенных однородными породами, П. М. Цимбаревич предложил считать поверхность скольжения плоской и наклонной к горизонту под углом  $\Theta$  (рис. 5.1).



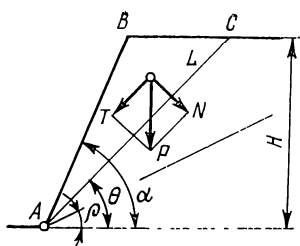


Рис. 5.1. Схема для расчета откоса при плоской поверхности скольжения (по П. М. Цимбаревичу)

Для момента предельного равновесия тангенциальная составляющая  $T$  веса  $P$  призмы  $ABC$  будет равна силе сцепления по плоскости  $AC$  плюс сила трения

$$P \sin \theta = k \overline{AC} + P \cos \theta \operatorname{tg} \rho, \quad (5.2)$$

где  $P$  — масса призмы  $ABC$ ;  $\rho$  — угол внутреннего трения, градус. Масса призмы  $ABC$

$$P = \gamma \frac{\overline{AB} \cdot \overline{AC}}{2} \sin(\alpha - \theta); \quad \overline{AB} = \frac{H}{\sin \alpha}. \quad (5.3)$$

Подставим значение  $\overline{AC}$  из формулы (5.2) в формулу (5.3) и решим уравнение относительно  $\frac{k}{\gamma} = k$  — коэффициента сцепления:

$$\frac{k}{\gamma} = H \frac{\sin(\alpha - \theta) \sin(\theta - \rho)}{2 \cos \rho \sin \alpha}. \quad (5.4)$$

Обозначим  $(\alpha - \theta)$  — через  $\alpha_1$ , откуда  $\theta = \alpha - \alpha_1$ . Тогда

$$\frac{k}{\gamma} = H \frac{\sin \alpha_1 \sin(\alpha - \alpha_1 - \rho)}{2 \sin \alpha \cos \rho}. \quad (5.5)$$

По плоскости обрушения  $\overline{AC}$  сила сцепления максимальна, т. е.  $\frac{k}{\gamma} = \max$ . Из условия максимума

$$\alpha_1 = \frac{\alpha - \rho}{2}, \quad \text{отсюда}$$

$$H = \frac{2 k \sin \alpha \cos \rho}{\gamma \sin^2 \frac{\alpha - \rho}{2}}. \quad (5.6)$$

Методом подбора для заданной высоты откоса можно получить значение угла  $\alpha$  при  $\eta = 1$ . Для повышения устойчивости в исходные величины  $k$ ,  $\rho$  нужно ввести коэффициент запаса устойчивости.

Если принять  $\alpha=90^\circ$ , то

$$H_{90} = \frac{2 k \cos \rho}{\gamma \sin^2 \left( 45^\circ - \frac{\rho}{2} \right)}. \quad (5.7)$$

### 5.3. ОЦЕНКА УСТОЙЧИВОСТИ ОТКОСА ПРИ КРУГЛОЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ИЛИ ПЛАВНОЙ КРИВОЛИНЕЙНОЙ ПОВЕРХНОСТИ СКОЛЬЖЕНИЯ

Круглоцилиндрическая или плавная криволинейная поверхности скольжения обычно образуются в однородных породах (рис. 5.2,б), при горизонтальном залегании слоев с близкими по значению прочностными характеристиками (рис. 5.2,в), а также при обратном падении слоев в сторону массива (рис. 5.2,а).

Оценка устойчивости откоса ведется на основе допущения, что поверхность возможного скольжения является круглоцилиндрической (или плавной криволинейной), а сдвигающийся массив является «жестким клином». При этом смещение массива рассматривается как вращение «жесткого клина» вокруг оси, параллельной простиранию откоса и выступающей как ось кругового цилиндра (как ось тела вращения), поверхность которого является поверхностью скольжения (ПС).

При решении плоской задачи ПС превращается в дугу окружности, а ось вращения в точку  $O$  (рис. 5.3). Момент вращения сил  $M_c$ , стремящихся повернуть массив смещающихся пород вокруг точки  $O$ , определяется массой этого клина  $P$  и горизонтальным расстоянием  $A$  между центром тяжести клина (точкой

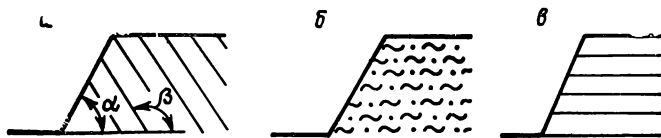


Рис. 5.2. Образование круглоцилиндрической или плавной криволинейной поверхности скольжения



И следовательно,

$$M_c = \sum_{i=1}^n M_{ci} = \sum_{i=1}^n P_i R \sin \varphi_i . \quad (5.12)$$

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

$$M_c = R \sum_{i=1}^n T_i , \quad (5.13)$$

где  $n$  — число элементарных блоков.

Силами, удерживающими призму возможного обрушения от смещения, являются силы трения по поверхности скольжения (равные произведению нормальной составляющей массы блока на коэффициент внутреннего трения  $N_i \operatorname{tg} \rho$ ) и силы сцепления (равные величине сцепления  $k$ , умноженной на длину поверхности скольжения  $l_i$  в пределах элементарного блока). В пределах элементарного блока удерживающие силы

$$F_{yi} = N_i \operatorname{tg} \rho + k l_i . \quad (5.14)$$

Поскольку нормальная составляющая  $N_i = P_i \cos \varphi_i$ , то удерживающие силы в пределах элементарного блока

$$F_{yi} = P_i \operatorname{tg} \rho \cos \varphi_i + k l_i , \quad (5.15)$$

а момент вращения сил, удерживающих массив от смещения,

$$M_y = R \operatorname{tg} \rho \sum_{i=1}^n P_i \cos \varphi_i + R k \sum_{i=1}^n l_i , \quad (5.16)$$

где  $R$  — радиус наиболее опасной поверхности скольжения, м.

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

$$M_c = M_y \quad (5.17)$$

или

$$\frac{\operatorname{tg} \rho \sum_{i=1}^n P_i \cos \varphi_i + k \sum_{i=1}^n l_i}{\sum_{i=1}^n P_i \sin \varphi_i} = 1 = \eta , \quad (5.18)$$

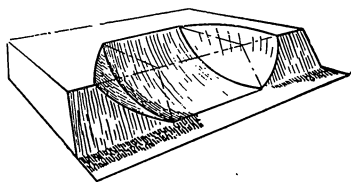


Рис. 5.4. Форма поверхности скольжения при оползне

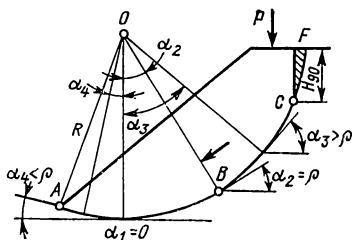


Рис. 5.5. Расчетная схема по круглоцилиндрической поверхности скольжения (по Н. Н. Маслову)

что является выражением первого уравнения (5.1) статики массива в предельном равновесии по данной поверхности (поверхности скольжения). В то же время два других равенства статики  $\Sigma P_x = 0$  и  $\Sigma P_y = 0$  (равенство проекций удерживающих и сдвигающих сил на осях  $X$  и  $Y$ ) не выполняются.

Если массив находится в допредельном равновесном состоянии, то, очевидно, удерживающие силы будут превосходить сдвигающие, т. е. коэффициент запаса устойчивости  $\eta > 1$ . В этом случае не выполняются все три уравнения статики.

Наиболее широко распространено положение о том, что смещение части однородного горного массива наиболее вероятно по круглоцилиндрической поверхности скольжения. Следует сразу иметь в виду, что фактически эта поверхность более сложна за счет обязательно имеющегося разброса свойств пород в пространстве массива. Обрушение обычно охватывает не всю длину откоса, а только наиболее ослабленную часть его. Поверхность обрушения в общем случае состоит из цилиндрического участка в активной части и криволинейных поверхностей по краям участка (рис. 5.4).

В расчетах допускают, что наиболее опасной поверхностью скольжения является дуга круга, описываемая радиусом  $R$  из центра  $O$  (рис. 5.5). Всегда полезно помнить, что всякая нагрузка  $P$  на участке кривой скольжения, где угол наклона касательной больше угла внутреннего трения ( $\alpha > \rho$ ), ведет к снижению устойчивости откоса (участок дуги  $BCF$ ); при  $\alpha = \rho$  обеспечивается нейтральное состояние (точка  $B$ ), при  $\alpha < \rho$  повышается устойчивость откоса [13].

Следовательно, наиболее невыгодная поверхность скольжения должна захватывать на участке  $BCF$  наибольшие объемы пород, а на участке  $AB$  — наименьшие.

С уменьшением в массиве сцепления  $k$  радиус кривизны возрастает и при  $k=0$  стремится к бесконечности, а поверхность скольжения стремится к плоскости, наклоненной под углом внутреннего трения. Вместе с тем при возрастании сцепления до бесконечности откос стремится принять вертикальное положение при любой высоте.

Для выделения наиболее опасной поверхности скольжения предложено несколько методов В. Фелениуса, Г. Л. Фисенко, ВНИМИ и др. Рассмотрим наиболее надежные из них.

Исходя из положений теории сыпучей среды, элементарные площадки скольжения в однородном массиве горных пород возникают лишь при напряжениях, составляющих величину не меньшую

$$\sigma_0 = 2k \operatorname{ctg} \left[ 45^\circ - \frac{\rho}{2} \right],$$

и располагаются под углом  $\left( 45^\circ - \frac{\rho}{2} \right)$  к направлению наибольшего главного напряжения. В то же время в массиве горных пород направление наибольших главных напряжений вертикально, а по мере приближения к откосам выполаживается в их сторону. На поверхности вогнутых и плоских откосов наибольшее главное напряжение совпадает с их поверхностью по направлению. В связи с этим происходит изменение положения площадок скольжения. В массиве горных пород (на достаточно большом удалении от откоса) они направлены под углом  $\left( 45^\circ - \frac{\rho}{2} \right)$  к вертикали, а у поверхности откоса под тем же углом к нему.

Очевидно, что на ненагруженном откосе площадки скольжения возникают лишь на определенной глубине:

$$\sigma = \gamma H_{90}. \quad (5.19)$$

Если из верхней бровки откоса опустить вертикальную прямую  $AA'$  до уровня  $H_{90}$  (рис. 5.6) и под углом  $\varepsilon = 45^\circ - \frac{\rho}{2}$  к вертикали провести линию  $B'C$ , то в области правее  $A'C$  площадки будут наклонены под углом  $\varepsilon$  к вертикали ( $\sigma_1$  совпадает с вертикалью), а

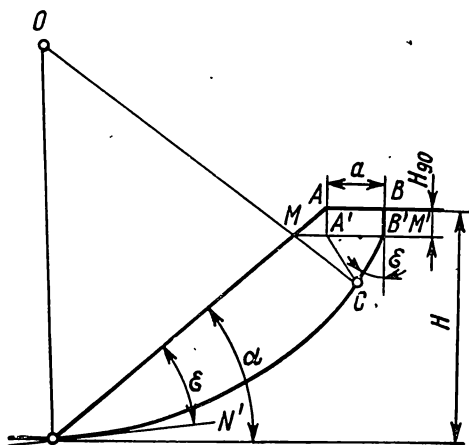


Рис. 5.6. Схема построения круглоцилиндрической поверхности скольжения (по Г. Л. Фисенко)

в области левее и ниже  $A'C$  (между откосом и линией  $A'C$ ), исходя из метода В. В. Соколовского, поверхность скольжения может быть принята круглоцилиндрической (площадки скольжения являются касательными к  $ПС$ , т. е. постепенно выполаживаются в сторону откоса).

Исходя из изложенных положений и принимая  $ПС$  круглоцилиндрической [14, 32],  $ПС$  строится следующим образом (рис. 5.6): определяется высота  $H_{90}$ ; проводится линия  $M'M'$ , параллельная верхней площадке на глубине  $H_{90}$ ; из верхней бровки откоса (точка  $A$ ) опускается перпендикуляр  $AA'$  до пересечения с линией  $MM'$  и проводится линия  $A'C$  под углом  $\epsilon$  к вертикали.

Ширина призмы возможного обрушения  $a = AB$  (в м) на верхней площадке

$$a = \frac{2H \left[ 1 - \operatorname{ctg} \alpha \operatorname{tg} \left( \frac{\alpha + \rho}{2} \right) \right] - 2H_{90}}{\operatorname{ctg} \left( 45^\circ - \frac{\rho}{2} \right) + \operatorname{tg} \left( \frac{\alpha + \rho}{2} \right)}, \quad (5.20)$$

где  $H$  — высота откоса, м;  $\alpha$  — угол откоса уступа, градус;  $\rho$  — угол внутреннего трения.

Полученная величина  $a$  откладывается от верхней бровки откоса. Из точки  $B$  опускается перпендикуляр

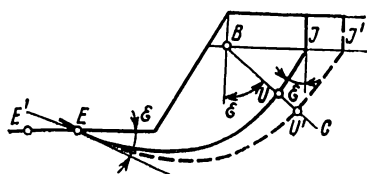


Рис. 5.7. Построение ПС в откосе однородных пород при  $\varphi < 13^\circ$

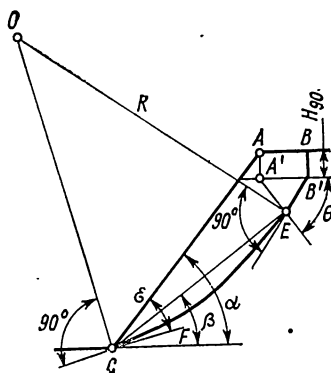


Рис. 5.8. Схема упрощенного способа построения круглоцилиндрической поверхности скольжения (по Г. Л. Фисенко, М. А. Ревазову, Э. Л. Галустьяну)

$BB'$  до пересечения с линией  $MM'$  и из точки  $B'$  под углом  $\varepsilon$  к вертикали проводится линия  $B'C$  и определяется точка  $C$ . Из точки  $C$  восставляется перпендикуляр к  $CB'$  (линия  $OC$ ).

В нижней бровке откоса проводится линия  $NN'$  под углом  $\varepsilon$  к поверхности откоса и к ней из точки  $N$  восставляется перпендикуляр  $NO$  до пересечения с перпендикуляром  $CO$ . Полученная точка  $O$  является центром искомой цилиндрической поверхности скольжения.

При значениях угла внутреннего трения меньше  $13^\circ$  ПС захватывает основание откоса. В верхней части поверхность скольжения начинается на глубине  $H_{90}$  и имеет прямолинейный участок с углом наклона  $\varepsilon$  (рис. 5.7). Поскольку в этом случае положение точек  $E$  и  $V$  неопределенно, истинное положение поверхности скольжения определяется методом последовательного приближения, т. е. выбирается положение точки  $E$  в подошве откоса и строится несколько поверхностей  $EV$ ,  $EV'$  и т. д. Затем выбирается следующее положение точки  $E$ , т. е.  $E'$ , и построение выполняется в том же порядке. Поверхность скольжения, по которой величина коэффициента запаса окажется наименьшей, будет являться наиболее слабой искомой поверхностью.

Упрощенный способ построения круглоцилиндрической поверхности скольжения [35] дает хорошие результаты. Порядок построения (рис. 5.8) описан ниже.



По формуле определяется величина  $H_{90}$  и от верхней бровки откоса  $A$  проводится вертикаль  $AA'$ . Из точки  $A'$  под углом  $\gamma = 45^\circ + \frac{\rho}{2}$  проводится прямая.

Из нижней бровки откоса под углом  $\beta = \frac{\alpha + \rho}{2}$  к горизонту проводится линия  $CE$  до пересечения с линией  $A'E$  в точке  $E$  и проводится кривая  $BB'E$  симметрично  $AA'E$ . В основании откоса строится угол  $\varepsilon = 45^\circ - \frac{\rho}{2}$  и в точках  $C$  и  $E$  восставляются перпендикуляры к отрезкам  $CF$  и  $B'E$  и определяется точка  $O$ . Из точки  $O$  радиусом  $R$  проводится дуга  $CE$ . Таким образом, получается поверхность скольжения  $BB'EC$ .

#### 5.4. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ БОРТА КАРЬЕРА, СЛОЖЕННОГО ГОРИЗОНТАЛЬНЫМИ ИЛИ ПОЛОГОПАДАЮЩИМИ СЛОИСТЫМИ ПОРОДАМИ

При проектировании устойчивого профиля откоса с заданным коэффициентом запаса сначала определяются средневзвешенные характеристики  $k_{ср}$ ,  $\rho_{ср}$ ,  $\gamma_{ср}$ . По их значениям с учетом расчетного коэффициента запаса устойчивости  $\eta_p$  определяются расчетные характеристики

$$H_{90}; k_p = \frac{k_{ср}}{\eta_p}; \operatorname{tg} \rho_p = \frac{\operatorname{arc} \operatorname{tg} \rho_{ср}}{\eta_p}; \gamma_p = \gamma_{ср}.$$

Возможны два варианта расчета. В первом, наиболее распространенном случае, известна глубина карьера  $H$  и нужно определить профиль борта. Во втором — известен или задан угол откоса и нужно определить возможную устойчивую высоту откоса.

Сначала определяется приведенная высота откоса  $H_1 = \frac{H}{H_{90}}$ , затем принимается решение о профиле борта — плоском или выпуклом. На основе данных табл. 4.5 или 4.6 отстраивается профиль борта карьера.

Затем по одному из рассмотренных методов строится положение наиболее опасной поверхности скольжения, на которой  $\eta_{\phi} \rightarrow \min$ . Необходимо найти профиль откоса, при котором фактически коэффициент

устойчивости борта  $\eta_\Phi = 1$ . Если в результате расчета получилось, что  $\eta_{\Phi 1} < 1$ , то следует выложить откос и снова построить ПС и рассчитать коэффициент запаса устойчивости. Если во втором случае получилось, что  $\eta_{\Phi 2} > 1$ , то решение находят методом графической интерполяции. По оси ординат откладывают величину ( $\eta_\Phi = 1$ ), а по оси абсцисс — угол откоса  $\alpha$  (рис. 5.9). Построив две точки 1 и 2 и соединив их прямой, получим на оси абсцисс точку 3, соответствующую искомому значению  $\alpha$ .

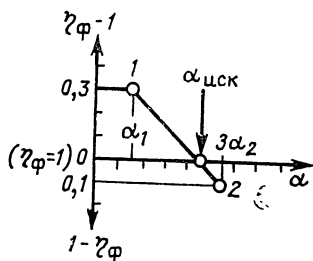


Рис. 5.9. Определение искомого угла откоса  $\alpha_{иск}$  с учетом расчетного коэффициента запаса устойчивости при  $\alpha_1(\eta_{\Phi 1})$  и  $\alpha_2(\eta_{\Phi 2})$

## 5.5. РАСЧЕТ УСТОЙЧИВОСТИ ОТКОСОВ ПРИ НАЛИЧИИ ПОВЕРХНОСТЕЙ ОСЛАБЛЕНИЯ

При слоистом строении массива, слагающего борт, контакты слоев могут выступать как поверхности ослабления в случае, если на контактах угол внутреннего трения  $\rho'$  и сцепление  $k'$  существенно меньше, чем в слоях пород.

Если слой — горизонтального или пологого падения, то поверхность скольжения можно считать круглоцилиндрической и расчет вести следующим образом (рис. 5.10):

при горизонтальном падении слоев (рис. 5.10,а) — по средневзвешенным значениям  $\rho$ ,  $k$  с учетом коэффициента запаса устойчивости;

при пологом падении слоев в сторону массива (рис. 5.10,б), когда угол между линией откоса и наслоением  $\gamma < 90^\circ - \varphi'$ , где  $\varphi'$  — угол сдвига по контактам

$$\varphi' = \arctg \left( \operatorname{tg} \rho_p' + \frac{k_p'}{\sigma_{п.ср}} \right), \quad (5.21)$$

где  $\rho_p'$  — расчетное значение угла внутреннего трения по наслоению

$$\rho_p' = \frac{\arctg \rho'}{\eta_p}, \quad (5.22)$$

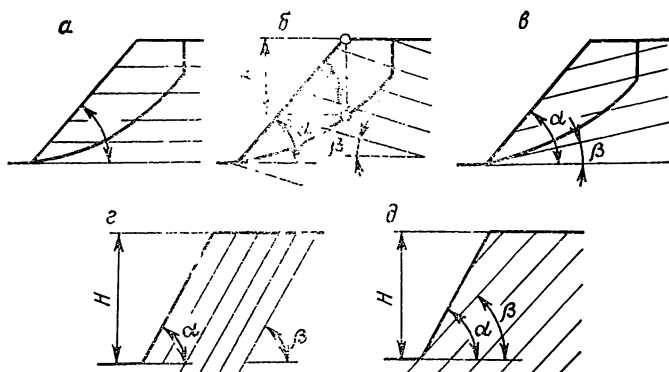


Рис. 5.10. Схемы откосов с горизонтальным и пологим залеганием слоев и при падении слоев в сторону карьера

$k'_p$  — расчетное значение сцепления по наслоению.  
 $\sigma_{п.ср}$  — среднее значение нормального напряжения по рассматриваемому контакту

$$\sigma_{п.ср} = \frac{1}{2} h \gamma \cos^2 \beta, \quad (5.23)$$

где  $\beta$  — угол наклона контактов к горизонту;  $h$  — глубина залегания наиболее напряженной точки поверхности скольжения (см. рис. 5.10,б);

при пологом падении в сторону карьера (рис. 5.10,в), когда  $\alpha > \beta$ , а  $\beta < 15-20^\circ$ . Расчет ведется по параметрам  $\rho'_p$  и  $k'_p$  на контактах слоев.

Если слои падают в сторону карьера под углом  $\beta > 15-20^\circ$  и  $\beta > \rho$ , то часто заоткоску борта производят по наслоению (рис. 5.10,г), т. е.  $\alpha = \beta$ .

Высота устойчивого откоса (в м)

$$H = H_{90} \left( \frac{1}{1 - \operatorname{ctg} \alpha \operatorname{tg} \varphi'_p} \right), \quad (5.24)$$

где  $\varphi'_p$  — угол сдвига по контакту слоев (в градусах), определяемый по формуле (5.21).

При заданной высоте откоса может быть определено значение угла падения слоев  $\beta$ , при котором допустима заоткоска по наслоению:

$$\beta < \arccos \left[ \operatorname{ctg} \varphi'_p \left( 1 - \frac{H_{90}}{H} \right) \right]. \quad (5.25)$$

Высота устойчивого откоса (в м) при тех же условиях, но при подсечке контактов ( $\alpha > \beta$ , рис. 5.10,б) может быть определена по следующей формуле:

$$H = \frac{2 k'_p \sin \alpha \cos \rho'_p}{\gamma \sin (\alpha - \beta) \sin (\beta - \rho'_p)}, \quad (5.26)$$

где  $\gamma$  — удельный вес пород, Н/м<sup>3</sup>.

При наличии нескольких пересекающихся поверхностей ослабления наиболее напряженная поверхность совпадает с поверхностями ослабления (частично или полностью) и на поперечном разрезе имеет вид ломаной линии. Устойчивость в этом случае целесообразно рассчитывать графическим методом, называемым методом многоугольника сил [14].

## 5.6. УЧЕТ ФАКТОРА ВРЕМЕНИ И ВЕРОЯТНОСТНОГО ХАРАКТЕРА ИСХОДНЫХ ДАННЫХ

Имеющиеся к настоящему времени методы расчета устойчивости откосов не учитывают в явной форме фактор времени. Это объясняется в основном двумя причинами.

Во-первых, исторически методы расчета создавались применительно к инженерным земляным сооружениям и откосам горных возвышенностей. Эти откосы работали сразу по всей высоте, а их поверхность, как правило, была защищена от воздействия процессов выветривания. Затем эти методы были без особых изменений применены для расчета устойчивости откосов бортов карьеров.

Во-вторых, учет фактора времени представляет огромные трудности и по этому вопросу накоплено еще недостаточно материала.

В то же время продолжительность обнажения поверхности горного массива значительно влияет на устойчивость этого откоса, так как на него воздействуют атмосферные факторы (температура, осадки, ветер), постоянно повторяющиеся взрывные работы, тяжелое транспортное оборудование, движущееся по транспортным бермам. Кроме того, горный массив ведет себя как упругопластичное тело, деформации которого развиваются во времени.

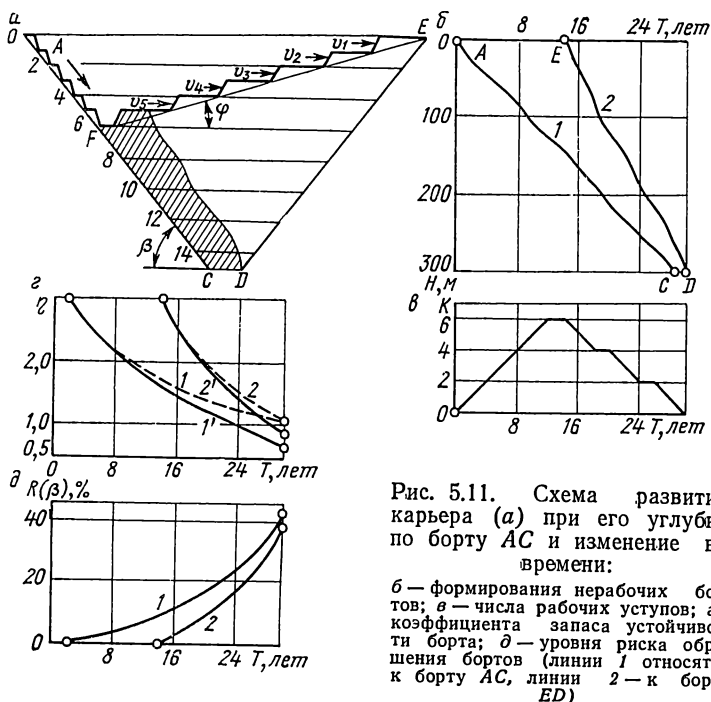


Рис. 5.11. Схема развития карьера (а) при его углубке по борту  $AC$  и изменение во времени:

$b$  — формирования нерабочих бортов;  $a$  — числа рабочих уступов;  $z$  — коэффициента запаса устойчивости борта;  $d$  — уровня риска обрушения бортов (линии 1 относятся к борту  $AC$ , линии 2 — к борту  $ED$ )

Есть еще очень важная особенность нерабочего борта карьера. Высота этого борта увеличивается во времени по мере углубки карьера и достигает конечной высоты к моменту окончания горных работ, т. е. когда проблема устойчивости борта нас уже не волнует. Разные участки борта служат различное время (рис. 5.11). Так, верхняя часть борта  $AC$  стоит 30 лет, а у дна карьера в точке  $C$  — только один-два года, пока не будет отработан самый нижний горизонт. Верхняя часть противоположного борта  $ED$  стоит 15 лет, так как он начинает формироваться, когда дно карьера опустится в точку  $F$  и рабочий борт займет положение  $AE$ , а нижняя часть в точке  $D$  служит всего 2—3 мес.

Ясно, что коэффициент запаса устойчивости борта должен изменяться по высоте и для борта  $AC$  (см. рис. 5.11) он может быть меньше, чем для борта  $ED$ .

В процессе определения основных исходных характеристик горного массива, слагающего борт карьера, получается набор показателей, характеризующихся оп-

ределенным законом распределения. В качестве рекомендуемого значения предлагается либо математическое ожидание, либо меньшая величина [13]. Естественно, что в строгом смысле результаты расчета устойчивости борта карьера должны представлять также массив цифр с определенным законом распределения [2].

**Рассмотрим пример.** Пусть в процессе определения величины сцепления массива известняков получены значения от 20 до 40 т/м<sup>2</sup> и определено математическое ожидание  $k_M = 28$  т/м<sup>2</sup>. Величина угла внутреннего трения изменялась от 25 до 35°, составляя в среднем  $\rho_M = 31^\circ$  (рис. 5.12). Плотность принята равной 2,8 т/м<sup>3</sup>.

Если воспользоваться методом расчета плоского откоса, изложенным в книге Г. Л. Фисенко [32], то для борта высотой 300 м получим набор значений углов откоса от 35° до 56,6° при математическом ожидании  $\alpha_M = 45,5^\circ$ . Очевидно, что если принять угол равным 45,5°, то риск необеспечения устойчивости борта  $R$  составит 50%. Чтобы снизить риск, введем коэффициенты запаса устойчивости борта. Данные для расчета приведены в табл. 5.1.

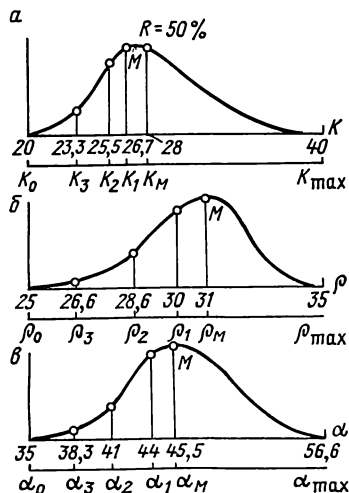


Рис. 5.12. Кривые распределения исходных величин:

$a$  — сцепления;  $b$  — угла внутреннего трения;  $v$  — расчетного угла откоса плоского борта

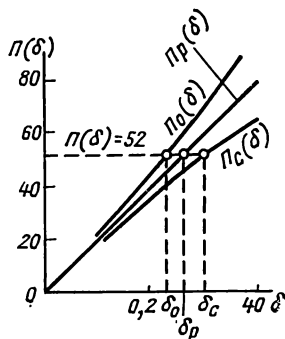


Рис. 5.13. Функция опасения последствий увеличения угла откоса борта карьера

Таблица 5.1

Коэффициент запаса устойчи- вости $\eta$	$k$ , т/м <sup>2</sup>	$\rho$ , градус	$H_{90}$ , м	$H'_m$ , м	Угол от- коса борта карьера $\alpha$ , градус	Уровень риска, %
1,00	28,0	31,0	35,3	8,5	45,5	50
1,05	26,7	29,8	32,8	9,0	44,0	35
1,10	25,5	28,6	30,7	10,0	41,0	10
1,20	23,3	26,6	27,0	11,0	38,3	2

Рациональный уровень риска должен устанавливаться исходя из взаимодействия оценки экономических и психологических (конъюнктурных) последствий риска.

Интересный подход к решению предложили американские ученые Дж. Кемень и Дж. Л. Томпсон. Основываясь на исследованиях биологов и психологов, они вводят понятие функции полезности выигрыша — проигрыша и насчитывают восемь вариантов решений.

Применительно к проблеме проектирования карьеров целесообразнее рассматривать обратную функцию — функцию опасения последствий увеличения риска [21]. Тогда можно анализировать четыре отношения к риску (рис. 5.13):

смелое отношение, функция опасения

$$P_c(\delta) = a(1 - e^{-\delta}); \quad (5.27)$$

ровное отношение

$$P_p(\delta) = a\delta; \quad (5.28)$$

осторожное отношение

$$P_o(\delta) = a(e^{\delta} - 1); \quad (5.29)$$

никакого риска

$$\delta = 0; P_{a.p}(\delta) = 0. \quad (5.30)$$

В этих формулах:  $a$  — коэффициент;  $\delta$  — относительное увеличение показателя  $\alpha_i$  по сравнению с его минимальным значением  $\alpha_0$

$$\alpha_i = \alpha_0(1 + \delta_i). \quad (5.31)$$

Т а б л и ц а 5.2

Отношение к риску	$\alpha_i$	$\delta_i$	Уровень риска, %	Коэффициент запаса устойчивости $\eta$
Смелое	45,5	0,3	50	1,00
Ровное	44,1	0,26	35	1,05
Осторожное	43,1	0,23	25	1,07
Никакого риска	35	0	0	1,30

На основании данных табл. 5.1 и рис. 5.12 находим, что  $\alpha_0 = 35^\circ$ , а при смелом отношении к риску  $\alpha_c = 45,5^\circ$  и  $\delta_c = 0,3$ . По графику рис. 5.13 на находим  $\delta_p = 0,26$ ;  $\delta_0 = 0,23$ . Данные расчета приводим в табл. 5.2.

В данном случае разумно ориентировать максимум на осторожное отношение к риску.

В процессе формирования бортов условия их устойчивости будут изменяться. Так, коэффициент запаса устойчивости будет снижаться с 2,5 до 1,05 (см. линий 1 и 2 на рис. 5.11,з), а риск обрушения будет расти с 0 до 40% (см. рис. 5.11,д).

Если учитывать влияние времени на устойчивость борта карьера, то окажется, что коэффициенты запаса устойчивости бортов к концу отработки будут разными для борта  $AC$  и  $ED$  (см. кривые 1' и 2' на рис. 5.11,з).

Для оценки влияния времени на устойчивость бортов В. А. Падуков [23] предложил использовать законы термодинамики и рассматривать борт как термодинамически изолированную систему, в которой по мере стояния происходит приращение удельной энтропии борта. Когда энтропия достигнет критического уровня, борт обрушится.

## 5.7. УЧЕТ ДОПОЛНИТЕЛЬНЫХ НАГРУЗОК

На устойчивость откоса кроме веса пород могут оказывать влияние (во многих случаях весьма существенное) и целый ряд других сил, которые необходимо учитывать при расчетах. В общем случае учет



дополнительных нагрузок  $F_i$  в основном уравнении равновесия может быть представлен в виде

$$\eta_{\Phi} = \frac{\operatorname{tg} \rho \sum_1^n (P_i \pm F_i) \cos \varphi_i + \sum_1^n k l_i}{\sum_1^n (P_i \pm F_i) \sin \varphi_i} . \quad (5.32)$$

В большинстве случаев наличие дополнительных нагрузок приводит к уменьшению нормальной и увеличению касательной составляющих веса и тем самым ухудшает условия устойчивости. Как правило, величина дополнительных нагрузок невелика, и имеет существенное значение лишь для устойчивости откосов отдельного уступа, но не для борта в целом (так как вес призмы обрушения борта на 1—2 порядка больше величин дополнительных нагрузок). При построении поверхности скольжения необходимо помнить, что глубина появления площадок скольжения уменьшается до

$$H'_{90} = \frac{\sigma_0 - \frac{p'}{b}}{\gamma} , \quad (5.33)$$

где  $p'$  — часть массы горного оборудования, приходящаяся на 1 м фронта работ уступа, т;  $p' = \frac{P}{a}$ ;  $P$  — полная масса;  $a$  — длина базы оборудования;  $b$  — ширина базы оборудования в пределах призмы возможного обрушения, м.

Очевидно, что при определенном значении массы  $p'$  площадки скольжения могут возникать непосредственно на поверхности верхней площадки, т. е.  $H'_{90} = 0$ .

При учете массы оборудования необходимо помнить, что нагрузки при работе могут в 10—12 раз превосходить паспортное значение удельного давления на грунт.

Учет взрывных нагрузок. Их влияние на устойчивость, несмотря на кратковременность действия, значительно более существенно влияния массы оборудования. Поскольку нет полной ясности в вопросе, каким образом действует в массиве волна напряжений, каким образом сказывается периодичность взрыв-

ных нагрузок и т. п., учет взрывных нагрузок на устойчивость ведется с большим запасом. Максимальное давление  $p_c$ , воздействующее на массив, может быть оценено по формуле динамики взрыва (по методу акад. М. А. Садовского).

$$p_c = 0,36 \frac{Q^{1/2}}{R^{3/2}} \sqrt[6]{\frac{U_1 E_1^5}{\gamma}}, \quad (5.34)$$

где  $Q$  — масса одновременно взрывающегося заряда ВВ, кг;  $R$  — расстояние от центра взрыва до рассматриваемой точки массива, м;  $U_1$  — удельная энергия взрыва, Дж/кг;  $E_1$  — модуль Юнга, Па;  $\gamma$  — плотность породы, т/м<sup>3</sup>.

Тогда дополнительная сила в пределах элементарного блока

$$F_i = p_c l_i. \quad (5.35)$$

Дополнительная сила взрыва, воздействующая на призму возможного обрушения

$$F_{\text{доп}} = \sum_1^n F_i = p_c \sum_1^n l_i. \quad (5.36)$$

Дополнительная сила может быть определена и другим образом

$$F_{\text{доп}} = m a, \quad (5.37)$$

где  $m$  — масса призмы возможного обрушения, т;  $a$  — ускорение, определяемое по формулам динамики взрыва.

Дополнительная сила считается действующей по поверхности скольжения и по касательной к ней, и, следовательно, условие равновесия

$$\eta_{\phi} = \frac{\operatorname{tg} \rho \sum_1^n P_i \cos \varphi_i + k \sum_1^n l_i}{\sum_1^n P_i \sin \varphi_i + \sum_1^n F_i}. \quad (5.38)$$

При расчете устойчивости обводненных отколов учитываются две дополнительные силы: гидростатическое взвешивание; гидродинамическое давление.

Суммарное влияние этих двух сил на призму воз-

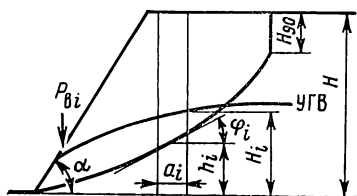


Рис. 5.14. Учет обводненности откоса:

УГВ — уровень грунтовых вод

можного обрушения проявляется как гидростатическое давление ( $D_i$ ), распределенное по поверхности скольжения и нормальное к ней.

Гидростатическое давление (в Па)

$$D_i = \Delta_0 (H_i - h_i) \frac{a_i}{\cos \varphi_i}, \quad (5.39)$$

где  $\Delta_0$  — удельный вес воды;  $H_i - h_i$  — превышение уровня депрессионной кривой в пределах элементарного блока над поверхностью скольжения, м (рис. 5.14);  $a_i$  — ширина блока, м;  $\varphi_i$  — угол наклона касательной к поверхности скольжения.

Тогда коэффициент запаса устойчивости

$$\eta_{\Phi} = \frac{\sum_1^n (P_i \cos \varphi_i - D_i) \operatorname{tg} \rho_i + \sum_1^n k_i l_i}{\sum_1^n P_i \sin \varphi_i}. \quad (5.40)$$

Необходимо отметить, что при подсчете  $P_i$  плотность пород ниже уровня грунтовых вод должна приниматься с учетом их полного водонасыщения, т. е.

$$\gamma_{\text{нас}} = \Delta (1 - n) + \Delta_0 n, \quad (5.41)$$

где  $\Delta_0$  — удельный вес воды;  $\Delta$  — удельный вес породы;  $n$  — пористость.

В случае подтопленного откоса вода, находящаяся выше его подошвы, выполняет роль «пригрузки» и формула предельного равновесия принимает вид  $P_{\text{в}i}$

$$\eta_{\Phi} = \frac{\sum_1^n \left[ P_i \cos \varphi_i + P_{\text{в}i} \frac{\cos (\alpha - \varphi_i)}{\cos \alpha} - D_i \right] \operatorname{tg} \rho_i + \sum_1^n k_i l_i}{\sum_1^n \left[ P_i \sin \varphi_i - P_{\text{в}i} \frac{\sin (\alpha - \varphi_i)}{\cos \alpha} \right]}, \quad (5.42)$$

где  $P_{\text{в}i}$  — масса воды, находящейся выше откоса в пределах элементарного блока;  $\alpha$  — угол откоса, градус.

Исходя из анализа этой формулы, можно сделать вывод, что наименее благоприятны условия устойчивости при подтоплении откоса на  $\frac{1}{3}$  его высоты ( $\eta_f$  снижается на 10—25% по сравнению с незатопленным откосом). При полном подтоплении откоса  $\eta_f$  повышается на 25—40% по сравнению с незатопленным.

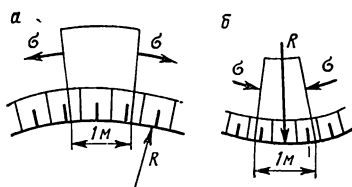


Рис. 5.15. Напряжения по боковым граням элементарных призм возможного обрушения при криволинейном борте

## 5.8. УЧЕТ КРИВОЛИНЕЙНОСТИ БОРТА КАРЬЕРА

При криволинейной форме борта (в плане) по боковым граням элементарных призм обрушения (ширина по простираанию которых принимается в расчетах равной 1 м) действуют напряжения, возникающие за счет распора (при сдвигении) со стороны соседних участков (рис. 5.15). При вогнутой форме борта карьера это будут сжимающие напряжения, удерживающие массив от сдвигения, при выпуклой — растягивающие и ослабляющие массив.

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.

По результатам моделирования вогнутых в плане откосов и поверочных расчетов устойчивости реальных откосов предложена следующая методика учета влияния кривизны [6, 7, 14, 27]. После определения угла устойчивого откоса плоского борта  $\alpha$  (по методикам, изложенным выше) вычисляется отношение радиуса кривизны (по верхней бровке карьера) к глубине карьера

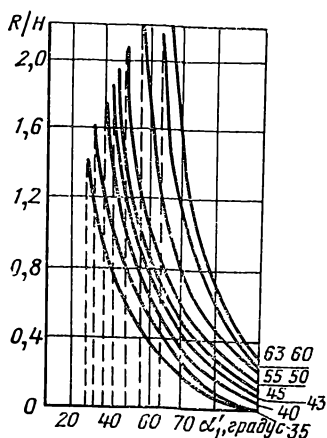


Рис. 5.16. График зависимости угла наклона борта от его кривизны в плане

$\frac{R}{H}$ . Затем по графику зависимости угла откоса борта от его кривизны в плане (рис. 5.16) вычисляется 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  $R \leq 2H$  и при  $R = H$ .

## 5.9. ПРИНЯТИЕ РЕШЕНИЯ О КОНСТРУКЦИИ БОРТА КАРЬЕРА

При принятии окончательного решения особенно необходимо учитывать два основных фактора: расчетное значение угла откоса борта карьера и принятый способ вскрытия.

Борт карьера состоит из откосов уступов и площадок. На нерабочем борту имеются предохранительные и транспортные бермы, наклонные съезды, тупиковые или петлевые заезды, площадки примыкания путей (рис. 5.17).

Угол откоса нерабочего борта карьера (в градусах)

$$\operatorname{tg} \gamma = \frac{BC}{AC} = \frac{\sum_1^n h_i}{\sum_1^n h_i \operatorname{ctg} \alpha_i + \sum_1^{n_1} a_i + \sum_1^{n_2} b_i + \sum_1^{n_3} c_i}, \quad (5.43)$$

где  $n$  — число уступов;  $h_i$  — высота уступов, м;  $\alpha_i$  — угол откоса нерабочих уступов, градус;  $n_1$  — число предохранительных берм в данном сечении борта;  $a_i$  — ширина предохранительной бермы, м;  $n_2$  — число транспортных берм;  $b_i$  — ширина транспортной бермы, м;  $n_3$  — число съездов в данном сечении;  $c_i$  — ширина съезда, м.

Все элементы этой формулы зависят от проектного решения по способу вскрытия карьерного поля.

В большинстве случаев углы погашения борта карьера из условия размещения берм составляют 30—40°. Эти значения во многих случаях оказываются меньше, чем необходимые по условиям устойчивости.

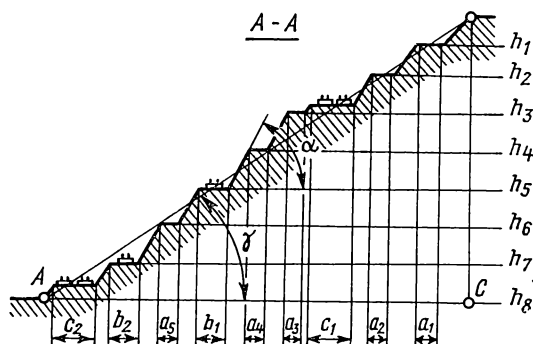
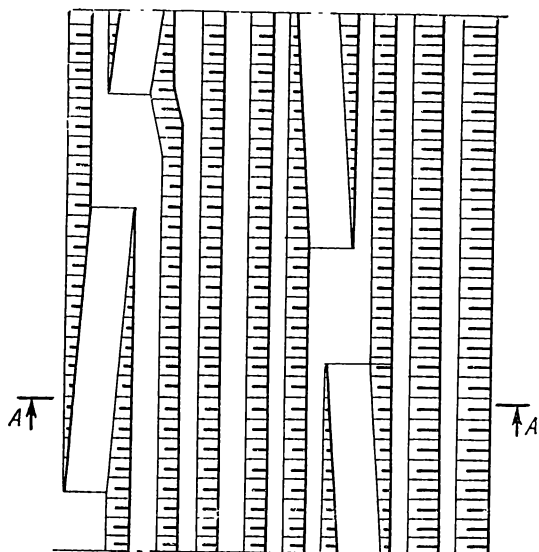


Рис. 5.17. Элементы нерабочего борта карьера

## 5.10. РАСЧЕТ УСТОЙЧИВОСТИ ОТВАЛОВ

При отсыпке отвалов скальных, полускальных пород и песков устойчивость отвала определяется условием равновесия блока породы массой  $P$  на откосе с углом наклона  $\alpha$ . При этом сила трения, равная  $P \operatorname{tg} \rho \cos \alpha$ , должна уравновесить касательную составляющую массы  $P \sin \alpha$ . Отсюда условие равновесия откоса несвязных

пород ( $k=0$ ) может быть записано следующим образом:

$$\alpha \leq \rho. \quad (5.44)$$

В связи с этим (даже без учета сцепления-зацепления) отвалы твердых пород на устойчивом основании сохраняют устойчивость при практически любой их высоте при углах откоса  $34-36^\circ$ .

Параметры отвалов слабых пород, или отвалов, расположенных на основании, имеющем слабые контакты или слабые слои, подлежат расчету по одной из приводимых ниже схем.

Слабые (глинистые) породы на устойчивом основании. В этом случае у нижней бровки откоса пересекается ряд поверхностей скольжения. В верхней части они наклонены под углом  $45^\circ + \frac{\rho_{отв}}{2}$ . Поверхности скольжения являются плавными криволинейными.

Слабые горные породы при перемещении в отвалы теряют свое естественное сцепление. Под влиянием уплотнения они затем приобретают некоторую величину сцепления, которая зависит от свойств пород и высоты отвала (величины нормальных напряжений). Расчет отвалов ведут исходя из придания ему выпуклой формы.

Для этого по усредненной линии сопротивления сдвигу ( $ABCD$  на рис. 5.18) определяют характеристики прочности  $k$  и  $\rho$ . С учетом расчетного коэффициента запаса устойчивости  $\eta_p$  вычисляются расчетные значения  $k_p$ ,  $\rho_p$ ,  $H_{90}$  и определяется контур выпуклого отвала.

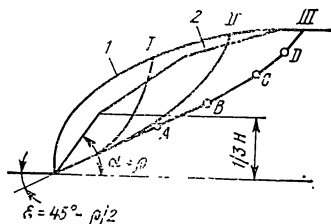


Рис. 5.18. Схема отстройки выпуклого откоса отвала глинистых пород на устойчивом основании:

1 — расчетный профиль; 2 — конструктивный профиль; I, II, III — возможные поверхности скольжения

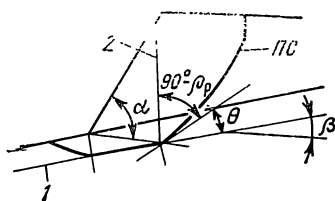


Рис. 5.19. Схема к расчету устойчивости отвала на слоистом основании:

1 — слабый контакт ( $\rho'$ ,  $k'$ ); 2 — граница призмы упора и активного давления

Угол наклона выпуклой кривой в нижней части ( $1/3 H$ ) принимается равным углу естественного откоса, а затем производится постепенное выполаживание к верхней части (см. рис. 5.18). На высоте  $H=5,14 \frac{\tau_{\max}}{\gamma}$  от-

кос переходит в горизонтальную площадку. Затем производится поверочный расчет полученного профиля по методу, изложенному выше.

Если отвалы расположены на слоистом наклонном основании, то поверхность скольжения по отвальным породам может быть принята как плавная криволинейная или круглоцилиндрическая (рис. 5.19). Слабые контакты в основании выступают как поверхность ослабления, и поверхность скольжения проходит по наиболее слабому контакту (с характеристиками  $k'$  и  $\rho'$ ). Высота устойчивого откоса отвала рассчитывается (при  $\alpha=\rho$  или  $\alpha<\rho$  для многоярусного отвала) по нескольким поверхностям скольжения методом многоугольника сил. Граница между призмой активного давления и призмой упора проходит под углом  $90^\circ-\rho_p$  к  $ПС$  в пределах призмы активного давления. Реакция между блоками направлена под углом  $\rho'_p$  к нормали, где

$$\rho'_p = \arctg \frac{\rho'}{\eta_p}.$$

Если отвалы имеют в основании горизонтально залегающий слабый слой, то может произойти подподошвенный оползень [25]. При этом поверхность скольжения может быть выделена исходя из следующих соображений: по породам отвала потенциальная поверхность скольжения имеет круглоцилиндрическую форму (рис. 5.20). На границе со слабым слоем происходит излом  $ПС$  под углом  $\theta$ . Поверхность скольжения в пределах слабого слоя имеет обратный уклон только за пределами нагруженной части основания и выходит в основание под углом  $\varepsilon=45^\circ - \frac{\rho_{осн}}{2}$  (где  $\rho_{осн}$ — угол внутреннего трения пород основания отвала, градус).

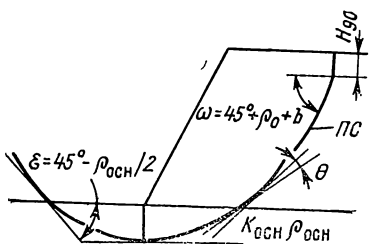


Рис. 5.20. Отвал, имеющий в основании горизонтально залегающий слабый слой



Параметры отвала могут быть определены по данным табл. 4.5 или табл. 4.6. Поверочные расчеты выполняются по ряду поверхностей скольжения методом алгебраического сложения сил.

При отсутствии детального изучения свойств пород основания отвала его устойчивые параметры могут быть определены ориентировочно.

Многоярусные отвалы на наклонном слоистом основании сохраняют устойчивость при результирующем угле откоса  $\alpha = 25\text{—}30^\circ$ . 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  $\alpha = 18\text{—}25^\circ$ . Высота каждого яруса с естественным углом откоса выбирается в зависимости от влажности и состава песчано-глинистых пород и колеблется от 10 до 30 м.

## ОБЕСПЕЧЕНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ БОРТОВ КАРЬЕРОВ И ОТВАЛОВ

### 6. ОБЕСПЕЧЕНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ ОТКОСОВ ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ ГОРНЫХ РАБОТ

#### 6.1. ОБЕСПЕЧЕНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ БОРТОВ ПРИ ВЕДЕНИИ БУРОВЗРЫВНЫХ РАБОТ

На современных карьерах взрывные работы по силе воздействия обычно превосходят все другие и в значительной степени влияют на устойчивость откосов скальных и полускальных пород.

Взрыв приводит к дроблению пород в зоне, непосредственно примыкающей к заряду ВВ (зона  $D$ , рис. 6.1). В зоне интенсивного трещинообразования (зона  $З$ ) сомкнутые трещины раскрываются и образуются новые. Блоки породы смещаются относительно друг друга, на верхней площадке образуются заколы. Блоки породы в этой зоне практически полностью утрачивают сцепление и удерживаются в равновесии за счет трения, и зацепления неровностями блоков. Далее в зоне  $T$  нарушения массива проявляются в форме раскрытия трещин и уве-

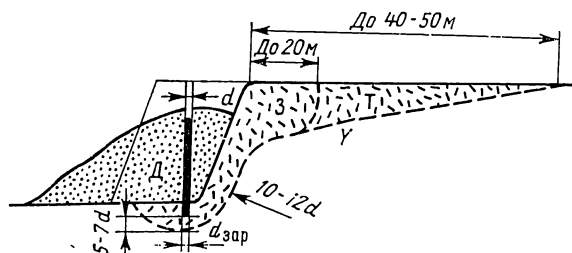


Рис. 6.1. Влияние взрыва заряда на породный массив

личения 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 массива. Наличие таких трещин с падением свыше 32—36° может привести к обрушению подрезанных блоков сразу же после взрыва. Далее в глубь массива порода не получает остаточных деформаций, колебания имеют упругий характер (зона У). Размеры этой зоны существенно зависят от массы одновременно взрываемого заряда и свойств пород. Однако по своему характеру колебания являются дополнительной нагрузкой и поэтому уступы, находящиеся в равновесном состоянии, близком к предельному, могут подвергаться нарушениям даже на больших расстояниях от места ведения взрывных работ. Увеличение нарушенности массива интенсифицирует процессы выветривания и ускоряет развитие осыпей.

Снижение неблагоприятного воздействия взрыва на массив может достигаться: ограничением массы одновременно взрываемого заряда; применением контурного взрывания наклонных скважин, диагональных схем короткозамедленного взрывания, заоткоски уступа по трещинам, падающим в сторону карьера.

Колебания породы при взрыве характеризуются скоростью смещения. Скорость смещения, не вызывающая деформаций, будет являться допустимой ( $v_{\text{доп}}$ ) в данных условиях. Она зависит от типа пород, слагающих откосы, и кратности приложения нагрузки (табл. 6.1).

Допустимые скорости колебаний для зданий и сооружений (при отсутствии в них деформаций) не должны превышать 3—6 см/с.

В то же время скорость колебаний зависит от массы одновременно взрываемого заряда  $Q$ , расстояния от

Таблица 6.1

Характеристика пород, слагающих откос	Допустимые скорости смещения, см/с при взрывании	
	многократном	однократном
Водонасыщенные песчаные	6	12
Малосвязные и с неблагоприятно ориентированной трещиноватостью	24	48
Прочные	48	96

Таблица 6.2

Характеристика пород, слагающих откос	Значения $K$	
	средние при однократных взрывах	максимальные при многократных взрывах
Водонасыщенные песчаные (глубина уровня грунтовых вод менее 5 м)	450	600
Малосвязные необводненные породы с неблагоприятно ориентированной трещиноватостью	300	450
Откосы прочных пород	200	300

места взрыва до данного уступа  $r$  и характера пород, слагающих уступ. Предельно допустимая величина одновременно взрываемого заряда (в кг)

$$Q_{\text{доп}} = \frac{v_{\text{доп}} r^3}{K^2}, \quad (6.1)$$

где  $v_{\text{доп}}$  — допустимая скорость колебаний (табл. 6.1), см/с;  $r$  — расстояние до места взрыва, м;  $K$  — коэффициент влияния породы (табл. 6.2).

При короткозамедленном взрывании действие каждой серии не накладывается на последующую при обеспечении интервала замедления (в мс)

$$T_{\text{зам}} \geq 2 \sqrt{\frac{S \gamma}{q}}, \quad (6.2)$$

где  $S$  — площадь поверхности уступа, приходящаяся на одну скважину, м<sup>2</sup>;  $\gamma$  — плотность пород, т/м<sup>3</sup>;  $q$  — удельный расход ВВ, кг/м<sup>3</sup>.

Контурное взрывание (рис. 6.2) применяется при постановке уступа в конечное положение с минимальным вредным влиянием взрыва на состояние откосов. Этот эффект достигается путем уменьшения величины заряда в последнем ряду скважин. По проектному контуру откоса с интервалом 0,8—2 м пробуривается ряд наклонных скважин, желательного уменьшенного диаметра и ориентированных соответственно проектному углу откоса. Скважины заряжаются ослабленными зарядами ВВ. Между стенкой скважины и зарядом должен быть воздушный зазор. Заряды для контурного взрывания изготавливаются в виде гирлянды из патронов ВВ на детони-

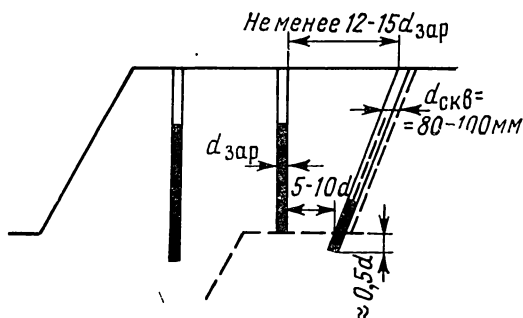


Рис. 6.2. Схема контурного взрывания

рующем шнуре. Нижняя часть заряда увеличивается на 1 м.

Заоткоска уступов в конечном положении по трещинам и другим структурным ослаблениям, падающим в сторону карьера, необходима при углах падения  $40^\circ$  и больше. Заоткоска производится взрыванием либо наклонных скважин под углом падения трещин, либо вертикальных скважин разной высоты. Отбойка породы у конечного контура карьера должна осуществляться скважинами, не имеющими перебура.

## 6.2. УСТРОЙСТВО УСТОЙЧИВОГО ПРОФИЛЯ БОРТА

Устойчивый профиль борта определяется расчетом с учетом необходимых коэффициентов запаса. В полученный профиль борта вписываются технологически необходимые бермы и уступы. При этом угол откоса каждого уступа и его высота не должны превышать предельного значения, определяемого для каждого уступа. Ориентировочные значения предельных углов наклона борта карьера приводятся в табл. 6.3.

Ширина берм (в м) должна определяться с учетом их назначения, интенсивности развития осыпей и времени их стояния, т. е.

$$B = B_T + (a + b)t, \quad (6.3)$$

где  $B_T$  — ширина бермы по технологическому назначению (например, ширина транспортной полосы с учетом

Таблица 6.3

Общая характеристика пород	Характеристика основных факторов	Ориентировочные углы падения, градус
Крепкие скальные	Нет неблагоприятно ориентированных поверхностей ослабления, умеренная трещиноватость. То же, но интенсивная трещиноватость	50—60 40—45
Наряду с крепкими есть сланцы и плотные песчано-глинистые	Слои лежачего бока борта карьера имеют угол падения более 40° Нет поверхностей ослабления, падающих в сторону карьера Есть поверхности ослабления Мульдообразное залегание пласта	30—40 38—45 30—40 25—30
Рыхлые и мягкие осадочные или полностью разложённые крепкие	Нет пластичных глин и поверхностей ослабления в нижней части борта В нижней части борта имеются поверхности ослабления	25—30 20—25

полосы безопасности),  $m$ ;  $a$ ,  $b$  — характеристики интенсивности развития осыпи, м/год;  $t$  — время существования бермы, лет.

### 6.3. ВЫБОР ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ ОТРАБОТКИ КАРЬЕРНОГО ПОЛЯ С УЧЕТОМ УСТОЙЧИВОСТИ ОТКОСОВ

В период проектирования в контуре карьерного поля по данным геологической разведки выявляются зоны возможных нарушений устойчивости (породы с низкими значениями сопротивлений сдвигу, зоны поверхностей ослабления, тектонические нарушения и т. д.). Последовательность отработки должна выбираться с учетом этих зон.

Внешние вскрывающие выработки должны располагаться в породах наиболее устойчивых, чтобы обеспечить их нормальную эксплуатацию в течение всего срока существования карьера.

Вскрытие стационарными внутренними съездами желательнее осуществлять по борту карьера в породах висячего бока, так как в этом случае ориентировка напластований (падение в сторону от карьера) обеспечивает лучшие условия устойчивости.

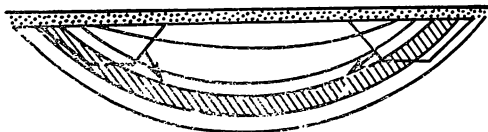


Рис. 6.3. Порядок отработки мульдобразной залежи

При возможности отработки карьерного поля очередями разработка участков (сложенных слабыми литологическими разностями), имеющих структурные ослабления, должна проектироваться в последнюю очередь, с тем чтобы срок стояния борта был минимальным.

Отработка мульдобразных залежей по восстанию пласта часто приводит к развитию глубинных оползней. Поэтому в этих условиях предпочтительней развивать работы двумя встречными карьерами (рис. 6.3), сохраняя в замке мульды возможно дольше невынутые пустые породы, что увеличивает призму упора. Такой порядок отработки обеспечивает и наилучшие технико-экономические показатели: быстрое освоение производственной 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 не продольными, а узкими поперечными заходками с последующей подвалкой оползня породами вскрыши.

Если в пределах карьерного поля имеется складчатость второго порядка, то откосы уступов, траншей не следует располагать на крыльях складок, так как это приводит к развитию деформаций откосов.

Порядок отработки следует выбирать таким, чтобы постоянным бортом не подсекались слои, падающие в сторону карьера под углом, большим угла внутреннего трения по контакту. Если подсечка на некоторых участках неизбежна, то следует прибегать к искусственному укреплению их.

Отработка неустойчивых участков карьерного поля должна проектироваться с такой интенсивностью (скорость подвигания фронта работ, понижение горных работ), чтобы обеспечивалось окончание отработки до начала активной фазы развития деформаций.

При подходе работ к предельному контуру карьера целесообразно, если это возможно, переходить к разработке поперечными заходками. При этом обеспечивается возможность заоткоски уступов с помощью предварительного щелеобразования.

#### 6.4. ГОРНЫЕ РАБОТЫ НА ОПОЛЗНЕВЫХ УЧАСТКАХ

Во многих случаях развитие оползневых деформаций откосов предотвратить с помощью существующих методов не удается. При этом выемка и погрузка должны осуществляться с помощью достаточно мобильного оборудования. Рабочие площадки должны быть приспособлены для возможной аварийной эвакуации оборудования, т. е. быть очищены от навалов породы, иметь достаточно большую ширину и т. п. Работы на оползневом участке производят для предотвращения дальнейшего развития оползня, поэтому, как правило, они должны начинаться с устранения причины его возникновения. Для этого ликвидируется источник обводнения откоса и планируется оползень для обеспечения стока поверхностных вод. Эти меры оказываются эффективными, когда причиной возникновения оползней является скопление вод в прибортовой зоне. Тело оползня профилируется с помощью ковша драглайна, в отдельных случаях могут применяться бульдозеры при обязательной анкеровке.

Отгрузка оползневых масс (рис. 6.4) должна начинаться с отгрузки пород из призмы активного давления. В качестве выемочного оборудования применяются драглайны. Работа должна производиться при постоянном контроле состояния основания оползня и в случае появления опасных деформаций машина должна немедленно выводиться из опасной зоны.

Предотвращение дальнейшего развития оползня возможно за счет отсыпки контрфорса из скальных, хорошо фильтрующих пород.

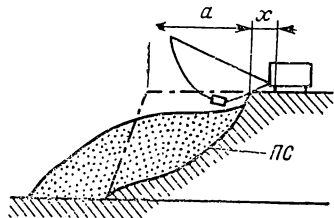


Рис. 6.4. Отгрузка оползневых масс:

$a$  — ширина оползневой части уступа;  $x$  — расстояние от верхней бровки уступа до гусениц драглайна



## 7. ИСКУССТВЕННОЕ УКРЕПЛЕНИЕ ОТКОСОВ

### 7.1. МЕХАНИЧЕСКИЕ СПОСОБЫ УКРЕПЛЕНИЯ ОТКОСОВ

В СССР искусственное укрепление впервые осуществлено в 1956 г. на угольных карьерах Кузбасса. При этом удалось сократить объем вскрышных работ на 40 тыс./м<sup>3</sup> и сэкономить около 22 тыс. руб.

Затем опыты были продолжены на Киселевском и других угольных карьерах и приводили к тем же результатам. Искусственное укрепление проводилось в 60-х годах на Коунрадском, Златоуст-Беловском, Высокогорском, Сибайском, Коркинском, Гороблагодатском, Тюленевском, Лебединском карьерах и др.

Результаты этих опытов показали, что предупреждение деформаций откосов, поставленных в предельный контур, может быть достигнуто за счет искусственного укрепления пород.

Наиболее надежным и простым укреплением откосов является свайное. Наилучшие результаты оно позволяет получить на участках, ослабленных слоистостью, трещинами тектонического происхождения и т. д.

Различные виды свайного укрепления откосов показаны на рис. 7.1. Эффективная работа свай достигается при достаточном ее заглублении ниже поверхности скольжения в зоне призмы упора. При укреплении сваями сильно трещиноватых участков желательно проводить

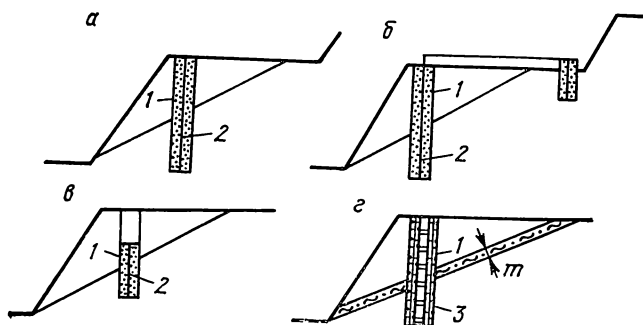


Рис. 7.1. Разновидности свайного укрепления откосов:  
а — железобетонная свая; б — железобетонная анкерная; в — железобетонная шпона; г — свая-оболочка с гибкой арматурой;  
1 — бетон; 2 — жесткая арматура; 3 — гибкая арматура

цементацию пород вокруг свай, что существенно повышает эффект укрепления. Все виды свайного укрепления рассчитываются по величине необходимого удерживающего усилия [35]

$$\Delta T_{уд} = (\eta_p - \eta_\phi) \Sigma T_{сдв} \quad (7.1)$$

или

$$\Delta T_{уд} = \left( \frac{\eta_p}{\eta_\phi} - 1 \right) \Sigma T_{уд}, \quad (7.2)$$

где  $\eta_p$  — расчетный коэффициент запаса устойчивости (для рабочих бортов  $\eta_p = 1,3$ , для нерабочих —  $\eta_p = 1,5 \div 2,0$ );  $\eta_\phi$  — фактический коэффициент запаса устойчивости, равный отношению суммы удерживающих сил к сдвигающим по предполагаемой поверхности скольжения.

Для ряда предполагаемых поверхностей скольжения определяется сумма удерживающих  $T_{уд}$  и сдвигающих сил (1, 2, 3, 4, 5 на рис. 7.2), вычисляется значение  $\eta_\phi$  и выбирается величина  $\eta_p$ . Затем строится график изменения  $\eta_\phi$  в зависимости от удаления поверхности скольжения от верхней бровки откоса и определяется граница области пород, подлежащих укреплению (см. рис. 7.2).

В тех случаях, когда поверхности ослабления определены (трещины большого протяжения с  $k' \ll k$  и  $\rho' \ll \rho$ ), расчет производится только по одной поверхности скольжения. В частности, величина  $\eta_\phi$  при подсечке борта трещиной большого протяжения может быть определена по следующей формуле:

$$\begin{aligned} \eta_\phi &= \frac{\Sigma T_{уд}}{\Sigma T_{сдв}} = \\ &= \frac{P \cos \beta \operatorname{tg} \rho' + k' S}{P \sin \beta}, \quad (7.3) \end{aligned}$$

где  $P$  — масса призмы обрушения, ограниченной двумя соседними сечениями, т;  $\beta$  — угол падения трещины, градус;  $\rho'$  — угол внутреннего трения по поверхности ослабления;

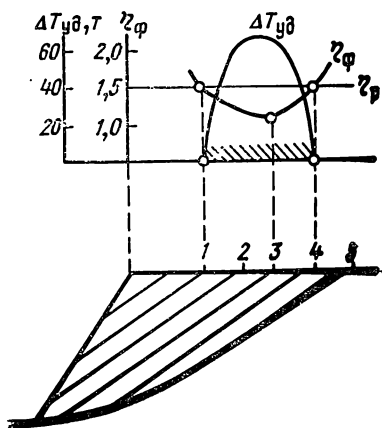


Рис. 7.2. Схема определения дополнительного удерживающего усилия  $T_{уд}$

$k'$  — сцепление по поверхности ослабления;  $S$  — площадь поверхности скольжения, ограниченная двумя соседними сечениями.

Сваи могут быть срезаны по трещине, когда сползающий массив достаточно монолитен, или изогнуты, когда нарушение представлено перемятыми породами, склонными к пластическим деформациям, или породы призмы обрушения достаточно дезинтегрированы.

В первом случае расчет выполняется по допускаемым напряжениям и площадь приведенного сечения свай

$$S_{\text{пр}} = S_6 + \frac{E_a}{E_6} S_a, \quad (7.4)$$

где  $S_6$  — площадь бетона в сечении свай, мм<sup>2</sup>;  $S_a$  — площадь арматуры в сечении свай, мм;  $E_a$ ,  $E_6$  — модули упругости арматуры и бетона.

Несущая способность свай при расчетном сопротивлении бетона на срез  $R_{\text{ср}}$ :

$$Q_{\text{ср}} = R_{\text{ср}} S_{\text{пр}}. \quad (7.5)$$

Тогда число свай, необходимых для укрепления участка борта длиной  $l$ :

$$N = \frac{\Delta T_{\text{уд}} l}{Q_{\text{ср}}}. \quad (7.6)$$

При работе свай на изгиб расчет производится согласно строительным нормам и правилам (СНиП) по первому предельному состоянию [16, 35]. Несущая способность типовых железобетонных свай, сечение которых показано на рис. 7.3, обычно указана в паспорте, выдаваемом заводом-изготовителем. Расчет состоит в определении изгибающего момента, действующего на сваю и расстояния между сваями.

Заглубление замка свай в ненарушенный массив обеспечивает ее устойчивость и сваю можно представить как балку с заделанным концом с равномерно распределенной нагрузкой. При этом изгибающий момент, передаваемый на сваю [35]:

при сдвиге монолитного массива по слабому прослою

$$M = m \Delta T_{\text{уд}}, \quad (7.7)$$

где  $m$  — мощность прослоя, м;

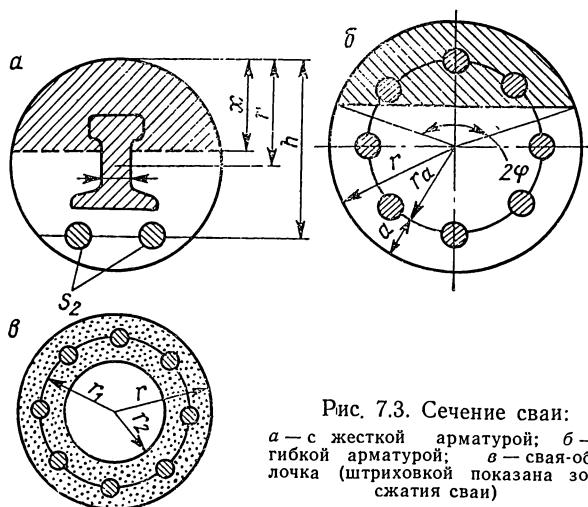


Рис. 7.3. Сечение свай:

*a* — с жесткой арматурой; *б* — с гибкой арматурой; *в* — свая-оболочка (штриховкой показана зона сжатия свай)

при сдвиге пород со взаимным перемещением блоков (слоистый, трещиноватый массив в пределах призмы возможного обрушения)

$$M = \frac{1}{3} h \Delta T_{уд}, \quad (7.8)$$

где  $h$  — высота призмы возможного обрушения, м;

в откосе однородных пород при расчетной (не определенной) поверхности скольжения, заканчивающейся вертикальной трещиной отрыва:

$$M = \frac{1}{3} (h - H_{90}) \Delta T_{уд}. \quad (7.9)$$

При заанкеренных сваях (они подобны балкам на двух опорах) величина изгибающего момента, передаваемого на сваю, может быть определена по следующим формулам:

$$M = \frac{2}{15} m \Delta T_{уд}, \quad (7.10)$$

$$M = \frac{2}{15} h \Delta T_{уд}, \quad (7.11)$$

$$M = \frac{2}{15} (h_1 - H_{90}) \Delta T_{уд}. \quad (7.12)$$

Общее число свай  $N$ , необходимое для надежного укрепления участка, определяется из сравнения изгибающего момента, создаваемого призмой возможного обрушения  $M$  и несущей способности сваи при изгибе  $M_{изг}$ :

$$N \geq \frac{M l}{M_{изг}}. \quad (7.13)$$

Расстояния между сваями принимаются обычно одинаковыми. Если укрепляемый сваями массив сложен рыхлыми слабосвязными породами, то они способны «обтекать» сваи. Тогда необходимо сближать сваи.

Глубина заделки сваи ниже поверхности скольжения определяется прочностью пород, величиной дополнительного удерживающего усилия и надежностью закрепления арматуры. Ориентировочно глубина заделки  $l_{зад}$  может быть принята равной 1,5—2,0 м в скальных, 2—3 м в полускальных и 3—4 м в рыхлых связных породах.

Для укрепления откоса железобетонными сваями (шпонами) бурятся скважины, устанавливают в них готовые сваи или арматуру (для шпон только на определенном интервале, для свай — по всей длине скважины) и затем бетонируют. При свайном укреплении сильно трещиноватых пород после установки арматуры скважины набивают щебнем и цементируют массив.

Штанги и гибкие тросовые тяжи представляют собой конструкцию, как бы сшивающую слоистый массив. Их применение целесообразно в породах крупноблочной слоистой структуры, причем на небольшой глубине от поверхности закрепляемого откоса (5—6 м для штанг и до 30 м для тяжей) должна быть монолитная порода для надежного закрепления штанг и тяжей. При отсутствии монолитных пород и необходимости возведе-

ния штанговой крепи возможно предварительное укрепление пород цементацией в зоне закрепления замка.

В предварительно пробуренную скважину 1 (рис. 7.4) вводится металлическая штанга 3. Ее конец закрепляется в скважине с помощью бетона 2. Затем с помощью вин-

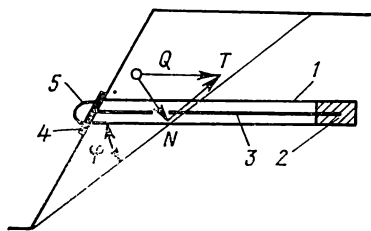


Рис. 7.4. Схема передачи усилия натяжения штанги  $Q$  на укрепляемый откос

тового домкрата (гайка 5 с подкладкой 4 на головке штанги) ей придается натяжение. Усилие натяжения  $Q$  прижимает стремящийся сползти блок к монолиту с силой  $N$ , действующей по нормали, и создает касательную силу  $T$ , которая и обеспечивает устойчивость откоса. Кроме закрепления головки штанги, на поверхности откоса может применяться затяжка из металлической сетки бетонных плит, металлических или деревянных подхватов индивидуальных или групповых, объединяющих несколько штанг. Это предохраняет от выпадения отдельных кусков породы и способствует более равномерной передаче усилия на откос. Целесообразно также изолировать откос торкрет-бетоном по металлической сетке. Штанги должны быть расположены в вертикальной плоскости параллельно направлению усилия, сдвигающего блок. Штанга должна подходить к поверхности трещины под углом  $\varphi' = 45^\circ + \frac{\rho'}{2}$ , но не более  $90^\circ$ .

Контрфорсы (рис. 7.5, а) из скальных пород выполняют роль пригрузки и тем самым предотвращают развитие оползней. Размеры контрфорса должны обеспечить им дополнительное удерживающее усилие. Общее сопротивление контрфорса сдвигу должно равняться оползневому давлению. Тогда масса контрфорса (в кг)

$$P_k = \frac{F}{\operatorname{tg} \rho_k}, \quad (7.14)$$

где  $F$  — давление пород призмы возможного обрушения;  $\operatorname{tg} \rho_k$  — коэффициент трения контрфорса по основанию.

Контрбанкеты (рис. 7.5, б) применяются для укрепления оплывающих песчаных откосов. Их параметры зависят от коэффициента фильтрации водоносного горизонта  $K_f$ , удельного расхода воды  $q$  и заложения откоса в пределах промежутка высачивания  $\omega$ . Высота пригрузки  $h_n$  должна быть больше (на 0,5—1,0 м) высоты промежутка высачивания  $h_b$ .

Отсыпка пригрузки из скальных пород должна вестись непосредственно вслед за выемкой пород уступа,

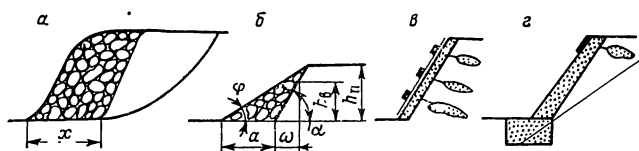


Рис. 7.5. Типы поддерживающих сооружений

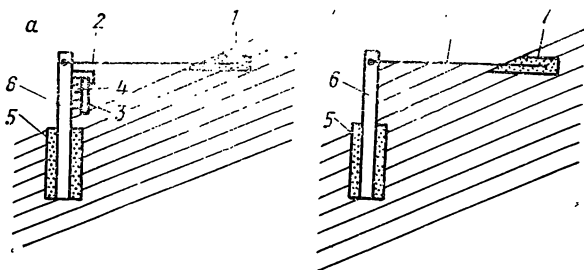


Рис. 7.6. Схема искусственных бERM:

1 — железобетонный замок тросового анкера; 2 — анкер (канат); 3 — затяжка (железобетонные плиты); 4 — пояса из швеллера; 5 — скважина; 6 — шпунт из рельсов

так как значительное отставание пригрузки приводит к развитию оползней и оплыванию откосов.

Подпорные железобетонные и защитные стенки (рис. 7.5, в, г) не нашли применения в практике укрепления откосов на карьерах из-за малой несущей способности, больших затрат на возведение и невозможности укрепления откосов большой высоты.

Во многих случаях не удастся предотвратить развитие осыпей и могут образоваться сплошные откосы недопустимо большой высоты. В этом случае обеспечить безопасность работ можно путем создания искусственных улавливающих бERM (рис. 7.6, а), представляющих собой анкерованную шпунтовую стенку. Допустимо также укреплять предохранительные бERMы на подрезанных контактах, падающих в сторону карьера под углами свыше 30—35° (рис. 7.6, б).

## 7.2. УПРОЧНЕНИЕ МАССИВА ГОРНЫХ ПОРОД И ИЗОЛЯЦИЯ ПОРОД ОТКОСОВ

Упрочнение горных пород необходимо для улучшения прочностных свойств массива на ослабленных участках. Оно достигается введением в трещины массива веществ, которые после схватывания с породой имеют значительно более высокие характеристики сопротивления сдвигу, чем укрепляемые породы. Эффект повышения прочности породы достигается за счет проникновения материала

упрочнителя по трещинам и схватывания его с породой. Введение упрочнителя в массив осуществляется под давлением. В качестве упрочняющих веществ применяются цементные растворы, полимерные смолы и силикаты.

Цементные растворы нагнетаются в массив через скважины и должны иметь сроки схватывания, обеспечивающие его проникновение по трещинам на проектное расстояние. Быстросхватывающиеся цементы следует применять в сильно трещиноватых породах с большим раскрытием трещин, а при тонких трещинах — цементные растворы с длительным сроком схватывания. Срок схватывания можно

регулировать, добавляя в раствор соду, хлористый кальций и другие вещества, сокращающие время схватывания. Цементация сильно трещиноватых пород может вестись песчано-цементными растворами. В устье скважины бетонируется трубка — кондуктор с фланцем, к которому присоединяется измерительная аппаратура и трубопровод (рис. 7.7), по которому подается цементный раствор.

Электрохимические методы укрепления представляют собой разновидность силикатизации (введение в укрепляемый массив силиката натрия, хлористого кальция). Однако внедрение этих растворов производится не за счет нагнетания их в скважину под давлением, а за счет создания разности электрических потенциалов между соседними скважинами, так как проницаемость пород слишком мала.

Электрофизические методы (электроосмос) представляют собой воздействие постоянного тока (анод и катод вводятся в рядом расположенные скважины) на воду, содержащуюся в слабых глинистых породах с малой проницаемостью. Вода движется к скважинам и происходит осушение массива, что повышает его прочностные характеристики. Укрепление этими двумя способами эффективно лишь на небольшом расстоянии от скважин (до 1—1,5 м) и затраты на укрепление велики (свыше 40—50 руб/м<sup>3</sup>), что позволяет пока применять

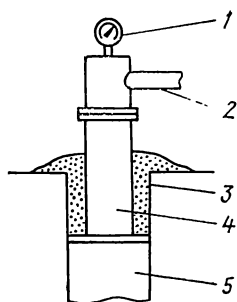


Рис. 7.7. Схема оборудования устья скважины при цементации:

1 — манометр; 2 — трубопровод; 3 — бетон; 4 — трубка-кондуктор; 5 — скважина



эти способы в промышленно-экспериментальных работах.

Изоляция откосов применяется для предохранения их от выветривания. Поскольку процессы выветривания на более сильно зависят от времени стояния откосов, изоляция целесообразна для глубоких карьеров с длительным сроком существования. В качестве изолирующих покрытий могут применяться полимерные материалы, бетон, битум и др. Полимерные покрытия не нашли широкого применения в связи с большой стоимостью (до 40 руб/м<sup>2</sup>) изоляции.

Для укрепления пород откосов применяют биологические методы.

Многолетний опыт дорожного и гражданского строительства позволил установить, что эрозия в значительно меньшей степени проявляется на откосах, поверхность которых закреплена растительным покровом. В настоящее время на карьерах ведутся работы по закреплению откосов песчано-глинистых пород как в естественном состоянии, так и нарушенной структуры.

Породы откоса, закрепляемого биологическим способом, являются почвой и поэтому должны удовлетворять минимальным требованиям, обеспечивающим развитие растений, — быть проницаемыми для корневой системы, содержать минимум минеральных веществ, пригодных для усвоения растением, и др. Наиболее полно этому отвечают суглинки, супеси, глины и пески.

## **8. МЕТОДЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ УСТОЙЧИВОСТИ ОТВАЛОВ**

### **8.1. ПОДГОТОВКА ПОВЕРХНОСТИ ОСНОВАНИЯ ОТВАЛА**

В зависимости от конкретных условий поверхность основания отвалов подготавливается по-разному.

Если в основании отвалов залегает маломощный слой слабых пород (торфа, пластичных глин и т. п.), а ниже расположенные слои являются прочными, обеспечивающими устойчивость отвала, то в этом случае наибо-

лее рациональным является удаление слабого слоя перед началом отсыпки.

Если в основании отвала залегают слабые слои, имеющие значительную мощность (3—5 м и более), вследствие чего удаление их перед отсыпкой отвала является экономически неоправданным, то целесообразно сохранять этот слой. В этом случае меры по обеспечению устойчивости должны более полно учитывать физические свойства пород основания. Если слабый слой представлен торфом, то необходимо регулирование интенсивности отсыпки (по площади и по высоте) отвала, с тем чтобы в период уплотнения торфа и рассеивания в нем порового давления высота отвала была минимальной, т. е. такой, при которой происходит консолидация торфа, а нагрузка не вызывает развития деформаций. Практически для этой цели достаточно иметь предотвал высотой 3—5 м до момента полного уплотнения слоя торфа. Последующее увеличение высоты отвала не приводит к развитию деформаций. Время консолидации торфа, высота предотвала и высота основного яруса в зависимости от сдвиговых характеристик уплотненного слоя определяются экспериментально в конкретных условиях месторождения. В предотвал желательно размещать хорошо фильтрующий материал. Если слабый слой состоит из пластичных глин, то в этом случае необходимо варьирование порядком отсыпки.

Если в основании залегают обводненные породы, то отсыпка отвала сопровождается увлажнением нижней части и развитием в ней деформаций. В этих случаях для понижения уровня грунтовых вод наиболее целесообразно проведение передовой дренажной траншеи по периметру отвала, заполненной дренирующим материалом и имеющей уклон для стока не менее 2%. По мере развития фронта отвальных работ проводятся дренажные канавы (также с уклоном не менее 2%) и заполняются легко фильтрующими материалами.

При расположении отвалов на всхолмленной поверхности необходимо обеспечить сток воды из пониженных участков путем проведения дренажных канав.

Если отвал располагается на наклонном основании и сопротивление сдвигу отвальных пород в основании меньше их сопротивления сдвигу в массиве отвала (или сопротивление сдвигу слоистого основания по контактам слоев меньше сопротивления сдвигу отвальных пород), то могут развиваться оползни подошвенного типа.

В этом случае эффективной мерой является взрывание основания. Взрывание основания во многих случаях является эффективной мерой и при горизонтальном залегании основания отвала, так как кроме возрастания суммы удерживающих сил за счет роста коэффициента внутреннего трения, при взрывании в основании отвала создается слой хорошо дренирующих пород, способствующих осушению пород отвала.

Если в основании отвала залегает слабый водоупор, под которым находится водоносный горизонт (особенно напорный), подготовка основания должна включать дренаж этого горизонта. При отсутствии дренажа на устойчивость отвала существенно влияет гидростатическое давление, снижающее эффективную составляющую давления пород отвала, набухание пород водоупора, увлажнение пород отвала в случае прорыва водоупора. Дренаж наиболее целесообразно осуществлять с помощью трубчатых водопонижающих колодцев, которые бурятся вслед за подвиганием фронта добычных работ.

При расположении внутренних отвалов на лежащем боку, представленном слоистой толщей, имеющей напорные горизонты, отделенные от выработанного пространства водоупором, нужно обязательно вскрывать горизонты с эффективным перехватом воды. Если водоносные горизонты дают большие водопритоки в карьер, вскрытие их не рекомендуется. В этом случае целесообразно оставлять толщу водоупора ненарушенной и пригружать ее внутренними отвалами.

Одним из наиболее существенных источников обводнения отвальных пород являются атмосферные осадки. Для отвода атмосферных вод с поверхности отвала и недопущения их инфильтрации необходимо проводить планировку отвалов, придавая им уклон, равный 3—5‰ в сторону водосборных канав. Водосборные канавы должны проводиться по поверхности отвалов через 400—500 м с уклоном не менее 2‰ и обеспечивать сброс атмосферных вод за пределы отвалов.

## **8.2. ВЛИЯНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ОТСЫПКИ ОТВАЛОВ НА ИХ УСТОЙЧИВОСТЬ**

Развитие открытого способа разработки сопровождается закономерным увеличением объема удаляемых вскрышных пород, что, в свою очередь, вызывает необхо-

димось сокращения площадей, отводимых под отвалы, а следовательно, увеличения их высоты и применения более мощного оборудования при отвалообразовании. Обеспечение устойчивости отвалов в этих условиях в значительной степени начинает определяться технологией отсыпки отвальных пород. К важнейшим технологическим параметрам, определяющим устойчивость отвалов, относятся скорость отсыпки отвальной заходки (по высоте, по фронту), порядок отсыпки пород, различных по физическим свойствам, размеры отвальной заходки, призабойной зоны и т. п. Необходимо отметить, что во многих случаях изменение этих параметров весьма несложно, в связи с чем изменение технологии отсыпки является эффективным методом обеспечения устойчивости.

Общим принципом, обеспечивающим наилучшие условия устойчивости отвала, является такая последовательность отсыпки, при которой сопротивление сдвигу пород возрастает сверху вниз.

Применение для отвалообразования мощных вскрышных комплексов (транспортно-отвальных мостов, ленточных отвалообразователей, крупных моделей драглайнов) приводит при разработке песчано-глинистых пород различного состава к ряду специфических особенностей формирования отвала. За счет падения глинистых пород с большой высоты происходит полное разрушение их структуры и порода превращается в трунтовую пасту. Это приводит к образованию в основании отвала ослабленного слоя, по которому в дальнейшем может формироваться поверхность скольжения. Процесс выемки сопровождается большим рыхлением пород с повышенным содержанием песчаных фракций, а глинистые породы имеют, как правило, повышенную крупность. В результате отсыпки по откосу вниз скатываются глинистые породы, что приводит к дополнительному ослаблению нижней части отвала. Устойчивость может быть достигнута за счет применения оборудования, позволяющего вести селективную выемку и раздельное размещение пород в отвале: транспортно-отвальные мосты с промежуточными станциями отсыпки (рис. 8.1), ленточные отвалообразователи и драглайны с рабочими параметрами, обеспечивающими возможность послойного формирования отвала с размещением в его нижней части наиболее устойчивых пород (рис. 8.2), роторные экскаваторы, допускающие возможность селективной выемки.

Бульдозерные, плужные, экскаваторные отвалы в

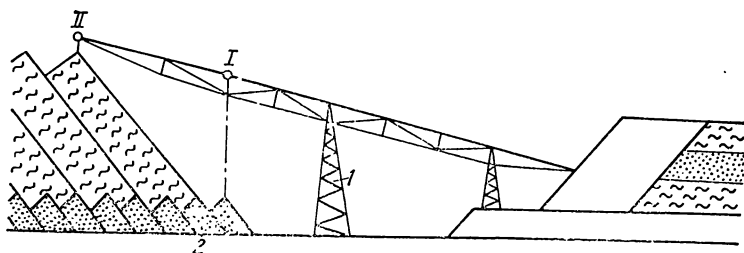


Рис. 8.1. Схема изменения последовательности отсыпки пород для обеспечения устойчивости отвала:

1 — транспортно-отвальный мост; 2 — слой устойчивых пород; станции промежуточной I и основной II отсыпки

большинстве случаев имеют более равномерное распределение отвальных пород. Однако, из-за неравномерности ведения вскрышных работ на отдельных участках с различными по характеристикам сопротивления сдвигу породам, отвалы могут приобретать косослоистое строение, что в общем случае снижает их устойчивость. Для обеспечения устойчивости не-

обходимо стремиться к максимальному усреднению состава пород. При наличии во вскрышной толще весьма слабых пород рекомендуется отсыпать их послойно сверху основного отвала.

При опасности возникновения подпошвенных оползней (при слабом основании отвалов) изменение параметров отвальных заходов во многих случаях позволяет избежать развития оползневых явлений. В этих случаях эффективными мерами являются увеличение высоты предотвала с целью увеличения размеров призмы упора и сокращения призабойной зоны. Целесообразно также увеличение ширины отвальной за-

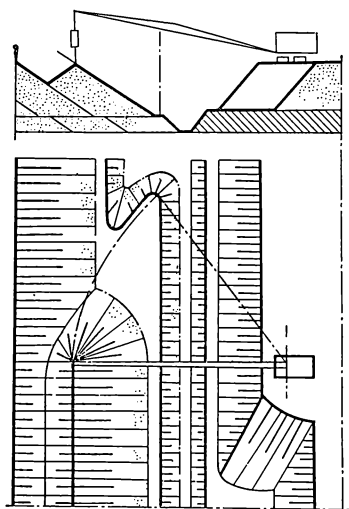


Рис. 8.2. Отсыпка нижней части отвала наиболее устойчивыми породами

ходовки.

Если скорость увеличения высоты отвала и скорость нарастания нормальных напряжений превосходят скорость оттока воды из пор (скорость рассеивания порового давления), устойчивость отвала ухудшается и могут развиваться оползни надподошвенного и подподошвенного типов. При снижении скорости отсыпки отвала происходит рассеивание порового давления и обеспечивается устойчивость отвала. Это может быть достигнуто за счет снижения производительности вскрышного комплекса (при определенной площади отвала), увеличения площади отвальных заходов (при внешних отвалах) и за счет отсыпки породы в предотвал небольшой высоты 4—6 м, где будет происходить рассеивание порового давления без нарушения устойчивости (малая высота отвала). При этом желательно формировать предотвал из хорошо фильтрующих пород.

## ОСУШЕНИЕ КАРЬЕРНЫХ ПОЛЕЙ\*

## 9. ГОРНЫЕ ПОРОДЫ И ВОДА

9.1. РОЛЬ ВОДЫ В ХАРАКТЕРЕ СТРУКТУРНЫХ СВЯЗЕЙ  
ГОРНЫХ ПОРОД

Подземные воды служат источником механического, химического и электрохимического влияния на горную породу; наиболее ярко это влияние проявляется в глинистых грунтах, где между частицами возникают связи особого — водно-коллоидного типа [9].

Частицы глинистых минералов имеют размер 0,25—2 мк и менее. Они несут обычно отрицательный электрический заряд, под влиянием которого на их поверхности группируются свободные катионы (положительно заряженные ионы поровых растворов) и дипольно ориентированные молекулы воды. Силы, обуславливающие притяжение такой водной (гидратной) оболочки, являются по своей сути молекулярными; они прочно удерживают адсорбированную воду на поверхности частиц грунта, причем равновесное количество этой воды зависит от минералогического состава и размера частиц, от химического состава внутрипорового раствора и от внешней нагрузки на скелет породы. Поэтому при увеличении внешних нагрузок на горную породу гидратные оболочки становятся тоньше, порода уплотняется и увеличивает свою прочность. Наоборот, при снижении нагрузок в условиях возможного подтока воды глинистые породы способны интенсивно поглощать ее за счет роста толщины гидратных оболочек; при этом породы увеличивают свой объем — набухают, что ведет к уменьшению их прочности.

Наличием гидратных оболочек объясняются также особые тиксотропные свойства водонасыщенных пылеватых пород, размер частиц которых на порядок выше глинистых (супеси, легкие суглинки). Здесь гидратные

---

\* При написании раздела был использован материал работы [34].

оболочки связаны с частицами менее прочно, чем в глинах, и могут быть сравнительно легко разрушены, — в первую очередь под влиянием динамических нагрузок (например, при вибрации бурового снаряда). При этом ионы и молекулы гидратных оболочек перейдут во внутриспоровый раствор, т. е. из связанного состояния в свободное. Частицы грунта временно потеряют связь между собой и прочность породы будет понижаться. После устранения динамической нагрузки прочность породы постепенно восстанавливается. Такие обратимые изменения свойств пород называются тиксотропными.

При отсутствии глинистых и пылеватых частиц роль воды в структурных связях горной породы обычно мала. Поэтому пески, например, сжимаются гораздо меньше, чем глины. Это, однако, не исключает влияния воды на прочность подобных пород — она может проявлять себя как чисто механический фактор ослабляющей силы взаимодействия между частицами.

## 9.2. ВИДЫ ВОДЫ В ГОРНЫХ ПОРОДАХ

Вода в горных породах может находиться в связанном и свободном состояниях [9]. Связанная вода наиболее распространена в глинистых грунтах и непосредственно влияет на структуру горных пород. Влажность горной породы, определяемая максимальным количеством связанной воды, называется максимальной молекулярной влагоемкостью. В глинистых грунтах этот показатель может измеряться десятками процентов (от общей массы породы), а в песчаных грунтах он обычно невелик — порядка нескольких процентов.

Свободная вода заполняет поры горной породы, не занятые связанной водой; она разделяется на гравитационную и капиллярную.

Гравитационная вода обладает всеми свойствами капельно-жидкой воды. В частности, она движется под влиянием силы тяжести и создает гидростатическое давление, величина которого на любой глубине измеряется пьезометрической высотой, т. е. превышением поверхности уровня воды над данной точкой; при этом поверхность уровня, где гидростатическое давление отвечает атмосферному, определяется по отметке, на которой устанавливается вода в воображаемой скважине,



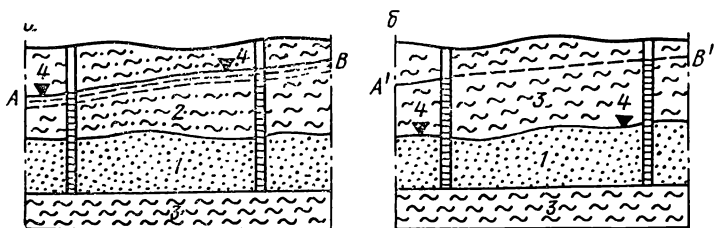


Рис. 9.1. Схемы расположения пластов:

*а* — безнапорного; *б* — напорного; 1 — водоносный песок; 2 — водоносная супесь; 3 — водоупорная глина; 4 — отметка, на которой появляется вода при проходке скважины

АВ — уровень грунтовых вод; А'В' — уровень воды в скважинах

пройденной в данную точку (скважина обсажена глухими трубами и принимает воду только своим дном). Напомним, что если поверхность уровня лежит выше кровли водоносного пласта, ограниченного сверху водоупорным слоем, то она называется пьезометрической поверхностью (напорный пласт). Если же уровень в скважине, вскрывшей воду, остается на отметке вскрытия, то поверхность уровня называется депрессионной (безнапорный пласт). На рис. 9.1 схематически представлены: безнапорный пласт характерного двухслойного строения (снизу — слой песков, сверху — слой менее проницаемых супесей) и напорный пласт песков, ограниченный сверху и снизу водоупорными глинами.

Максимальное количество связанной и гравитационной воды, которое может вместить горная порода, выраженное в процентах от веса породы, называют полной влагоемкостью породы; в объемном выражении эта величина близка к пористости.

Ниже уровня грунтовых вод (т. е. уровня первого от дневной поверхности водоносного горизонта) горные породы находятся в состоянии полной влагоемкости и гидростатическое давление здесь больше атмосферного. Выше этого уровня гравитационная вода отсутствует и свободная вода находится в капиллярном состоянии. Непосредственно над уровнем грунтовых вод располагается «капиллярная кайма», где вода в поровых каналах ведет себя аналогично воде в тонких капиллярах, связанных с водным резервуаром; здесь влажность породы близка к полной влагоемкости. Выше, в зоне аэрации, в породе появляется третья фаза (воздух) и капиллярная

вода занимает только краевые участки пор; влажность здесь уже заметно меньше полной влагоемкости.

Капиллярная вода, поднимающаяся над уровнем грунтовых вод (на десятки сантиметров в песках и до нескольких метров в глинах), характеризуется гидростатическим давлением, меньшим атмосферного, и способствует некоторому увеличению связности пород. Однако связность эта весьма неустойчива: при скоплении на земной поверхности воды, проникающей в горную породу и соединяющейся с капиллярной водой, последняя может легко переходить в гравитационное состояние.

Для общего представления о соотношении количества воды различных видов в горных породах заметим, что песок содержит в основном гравитационную воду, а в глине и суглинках ее очень мало или совсем нет. Между тем вид воды, содержащейся в горной породе, определяет возможность и целесообразность ее дренирования, а также и способ дренирования. Так, путем естественного стока к дренажным выработкам может быть частично сдренирована только свободная вода. При этом важно заметить, что в глинистых породах, а отчасти — и в породах некоторых твердых пород (например, известняков) большая доля имеющейся свободной воды находится в так называемом «иммобилизованном» состоянии\* и может быть частично отжата из породы лишь под дополнительной нагрузкой; последняя может вызываться, например, дополнительным давлением вышележащей толщи, возникающим при снижении уровня водоносного горизонта в слоях водоносных пород, перемежающихся с глинистыми слоями.

Объемы воды, отдаваемые горной породой при снижении депрессионной или пьезометрической поверхности, характеризуют ее емкостные свойства. При этом вода может или свободно стекать (проявляется гравитационная емкость), или быть отжатой при приложении к породе дополнительной нагрузки (проявляется упругая емкость).

Коэффициент гравитационной водоотдачи пласта ( $\mu$ ) численно равен отношению объема воды, освобождающейся из зоны понижения уровня безнапорного водонос-

---

\* Свободный гравитационный сток воды затруднен из-за того, что часть наиболее мелких пор полностью «перекрыта» связанной водой.

Таблица 9.1

Породы	Коэффициент водоотдачи	
	гравитационной	упругой (на 1 м мощности пласта)
Крупнозернистые пески	0,30—0,35	10 <sup>-4</sup>
Среднезернистые пески	0,25—0,30	
Мелкозернистые пески	0,15—0,20	
Супеси	0,10—0,15	10 <sup>-3</sup>
Суглинки	0,01—0,05	
Закарстованные известняки	0,01—0,03	10 <sup>-4</sup> —10 <sup>-5</sup>
Осадочные пористо-трещиноватые	0,01—0,03	
Сильно выветрелые, дезинтегрированные изверженные и метаморфические	0,01	10 <sup>-5</sup>
Плотные изверженные и метаморфические	< 0,005	10 <sup>-5</sup> —10 <sup>-6</sup>

ного горизонта (депресссионной кривой), к объему осушенной породы. Ориентировочные значения коэффициентов гравитационной водоотдачи некоторых пород приведены в табл. 9.1.

Упругая емкость обусловлена тем, что при снижении гидростатического давления (поверхности уровней подземных вод) порода дополнительно уплотняется, а вода, наоборот, расширяется. В результате равновесие между объемами пор и жидкости в породе нарушается и «лишняя» вода отжимается (порода при этом остается водонасыщенной). Количество воды, поступающее, таким образом, с единицы площади пласта при снижении напора в нем на 1 м, называется коэффициентом упругой водоотдачи пласта ( $\mu$ ); ориентировочные его значения приведены в табл. 9.1. Упругая емкость проявляется как в напорных, так и в безнапорных пластах, однако в последних она имеет подчиненное значение по сравнению с гравитационной. Поэтому на практике ее учитывают лишь при дренировании напорных пластов.

### 9.3. ОСНОВНЫЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ О ДВИЖЕНИИ ПОДЗЕМНЫХ ВОД

Главными действующими силами, определяющими фильтрацию (движение подземных вод) по порам и трещинам водонасыщенных горных пород, являются силы

тяжести и гидростатического давления. В соответствии с этим, показателем энергии подземного потока является напор подземных вод, измеряемый в метрах:

$$H = z + h_{\text{п}} = z + \frac{p}{\gamma_0} . \quad (9.1)$$

Здесь  $z$  — ордината точки, в которой определяется давление  $p$ , относительно произвольной плоскости сравнения (рис. 9.2), т. е.  $z$  определяет энергию, обусловленную силой тяжести;  $h_{\text{п}}$  — пьезометрическая высота ( $h = \frac{p}{\gamma_0}$ ),

где  $\gamma_0$  — удельный вес воды, т. е.  $h_{\text{п}}$  определяет долю энергии, обусловленную гидростатическим давлением  $p$  в данной точке.

Энергия потока затрачивается на преодоление сил сопротивления  $f$ , обусловленных вязкостью воды и трением о стенки пор или трещин. Многочисленные эксперименты доказывают [17], что движение воды в порах носит ламинарный характер. Потери энергии на отрезке пути  $l$ , отраженные в изменении напора  $\Delta H$  и равные работе сил сопротивления  $fl$ , должны поэтому оказаться пропорциональными величине  $vl$ , где  $v$  — скорость фильтрации, равная расходу воды через единичное поперечное сечение фильтрующего пласта (обычно измеряется в м/сут или в см/с).

Сказанное подтверждается законом Дарси:

$$v = KI , \quad (9.2)$$

где  $I$  — безразмерный градиент напора, являющийся отношением снижения напора к длине пути фильтрации

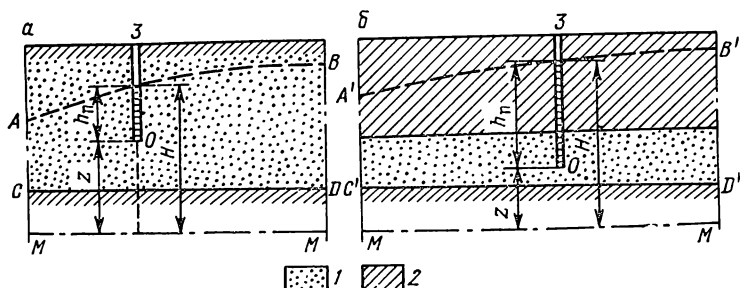


Рис. 9.2. Схема для определения напора воды в пластах:

$a$  — безнапорном;  $b$  — напорном;  $MM$  — плоскость отсчета (произвольная);  $CD$  и  $C'D'$  — водоупорные границы водоносного пласта;  $O$  — точка замера;  $AB$  — депрессионная кривая;  $A'B'$  — пьезометрическая кривая; 1 — песок; 2 — водоупорная глина; 3 — скважины

$(I = \frac{\Delta H}{l})$ , на котором отмечено это снижение;  $K$  — коэффициент фильтрации, м/сут (постоянный для данной пары «горная порода — вода»).

Коэффициент фильтрации, как это видно из изложенного, характеризует силы сопротивления, возникающие при движении воды через горную породу (он обратно пропорционален этим силам).

Коэффициент фильтрации является основной характеристикой при расчете дренажа, определяющей водопроницаемость горных пород, скорость водоотдачи и радиус влияния дренажных устройств. Ориентировочные его значения для различных горных пород приведены ниже.

Породы	Коэффициент фильтрации, м/сут
Очень чистые галечники, гравий с крупным песком, сильно закарстованные известняки . . . . .	100—1000 и более
Галечники и гравий с песчаным заполнителем, крупнозернистый песок, интенсивно трещиноватые карбонатные породы . . . . .	20—100
Мелкозернистые и среднезернистые пески, галечники с песчаным и суглинистым заполнителем, трещиноватые карбонатные породы, интенсивно трещиноватые изверженные и метаморфические породы . . . . .	5—20
Тонкозернистые пески, песчаники с глинистым цементом: трещиноватые изверженные и метаморфические породы . . . . .	0,5—5
Супеси . . . . .	0,1—1
Суглинки . . . . .	0,01—0,1
Песчаные и глины . . . . .	0,01—0,001
Мягкие пластичные глины . . . . .	< 0,001

Те несвязные и слабосвязные горные породы, в которых  $K < 1$ , считаются слабопроницаемыми и плохо поддаются дренированию. Трещиноватые твердые породы в отношении их дренируемости недостаточно характеризовать только величиной  $K$ . Так, например, при редкой сетке достаточно крупных трещин коэффициент фильтрации может быть небольшим, а дренируемость пород — хорошей.

Наряду с коэффициентом фильтрации для характеристики проводящих свойств пласта мощностью  $m$  используется коэффициент водопроводимости  $T = Km$ , обычно измеряемый в м<sup>2</sup>/сут.

Общая картина движения подземных вод к горным выработкам или дренажным сооружениям может

быть представлена следующим образом. Вскрытие водоносного горизонта горной выработкой или каким-либо другим дренирующим сооружением (например, скважиной, из которой откачивается вода) создает в пласте область пониженного напора (гидростатического давления). Это вызывает, согласно закону Дарси, движение воды в сторону вскрывающей выработки. В первое время в выработки поступает вода из ближайших к ним зон водоносного пласта за счет его гравитационной (безнапорные пласты) или упругой (напорные пласты) емкости. При этом происходит снижение уровней (давления), которое постепенно распространяется все дальше от области дренажа, или, как говорят, образуется депрессионная (пьезометрическая) воронка — зона влияния дренирующей выработки. Скорость распространения этого влияния зависит от коэффициента уровнепроводности  $a = \frac{T}{\mu}$  или от коэффициента пьезопроводности  $a^* = \frac{T}{\mu^*}$ , измеряемых в м<sup>2</sup>/сут.

Размеры зоны влияния дренирующей выработки пропорциональны величине  $\sqrt{at}$  или  $\sqrt{a^*t}$ , где  $t$  — время от начала процесса. Так как  $\mu \gg \mu^*$  (см. табл. 9.1), в напорных пластах влияние дренажа распространяется, при прочих равных условиях, намного быстрее и дальше, чем в безнапорных.

После того, как зона влияния достигает какой-нибудь области питания водоносного пласта (например, река или водоем), начинается дополнительный подток вод из этой области. По мере продолжающегося (хотя и в замедленном темпе) понижения давления в зоне влияния, этот подток все более возрастает, так что может наступить момент, когда суммарное дополнительное поступление воды в пласт будет равно расходу воды, поступающей в горную или дренажную выработку. С этого момента снижение давления в пласте практически прекращается, наступает стационарный (не зависящий от времени) режим фильтрации в отличие от нестационарного режима на предыдущих этапах.

Конечно, в данном случае была описана некоторая идеализированная схема движения подземных вод, которая отражает лишь общие тенденции в развитии процесса и не учитывает многие, подчас весьма важ-

ные, его детали (например, усиление инфильтрационного питания водоносных горизонтов или их взаимодействие друг с другом).

#### 9.4. ПРОСТЕЙШИЕ РАСЧЕТЫ ВОДОПРИТОКОВ К КАРЬЕРАМ И ДРЕНАЖНЫМ СИСТЕМАМ

Притоки подземных вод в карьер определяются динамическими притоками, проходящими через водоносный пласт «транзитом» из каких-то внешних областей питания (река, озеро и т. п.), и притоками, формирующимися за счет статических запасов самого пласта, т. е. за счет его гравитационной или упругой емкости\*.

При расположении карьера поблизости от области питания подземных вод основное значение имеют динамические притоки, статические запасы могут не учитываться и все расчетные оценки водопритоков могут вестись по формулам установившегося движения, не учитывающим скоростей изменения напоров подземных вод (время в эти зависимости явно не входит). В этих условиях фильтрационные свойства пласта учитываются в расчетных формулах одним главным параметром — водопроводимостью  $T$ . Заметим, что водопроводимость слоистого пласта равна сумме водопроводимостей слоев.

При большом удалении границ питания необходимо учитывать и водопритоки, обусловленные сработкой статических запасов пласта, значение которых обычно максимально в период строительства карьера. Так как проявление емкости пласта зависит от скорости изменения напоров, то расчетные формулы соответствуют неуставившемуся движению вод (в них входит время). Для типичных напорных пластов  $a^* = 10^4 \div 10^5 \text{ м}^2/\text{сут}$ , так что уже через несколько месяцев после начала водопонижения зона влияния карьера достигает границ водоносного пласта, удаленных от карьера на несколько километров. В типичных безнапорных пластах величина  $a = 10^3 \text{ м}^2/\text{сут}$ . Поэтому в безнапорных пластах неуставившийся режим движения может

---

\* Отдельно оцениваются возможные притоки в карьер за счет поверхностного стока дождевых и талых вод.

протекать более продолжительное время ( $t_n$ ), чем в напорных.

Время  $t_n$  (в сут) можно ориентировочно определить по следующей формуле:

$$t_n = \left( \frac{1}{2} \div \frac{1}{3} \right) \frac{(R_* - r_k)^2}{a}, \quad (9.3)$$

где  $R_*$  — расстояние от центра карьера до ближайшей области питания водоносного пласта, м;  $r_k$  — расчетный радиус карьера по горизонту вскрытия пласта, м ( $r_k = \frac{P}{2\pi}$ , где  $P$  — периметр карьера).

При  $t < t_n$ , т. е. в начальный период работы карьера, общий приток воды (в м<sup>3</sup>/сут) к карьере  $Q$  [3]:

$$Q = \frac{2,73 T S_k}{\lg \frac{r_k + \sqrt{\pi a t}}{r_k}}, \quad (9.4)$$

где  $S_k$  — разность отметок исходной поверхности уровня и горизонта высачивания воды в карьер, м (рис. 9.3). В дальнейшем (при  $t > t_n$ ) приток воды в карьер (в м<sup>3</sup>/сут), зона влияния которого распространяется до прямолинейной границы питания водоносного пласта (например, до реки), определяется по следующей формуле:

$$Q = \frac{2,73 T (H_p - H_k)}{\lg \frac{r_k + 2 R_*}{r_k}}, \quad (9.5)$$

где  $H_p$  и  $H_k$  — напоры на контурах реки и карьера.

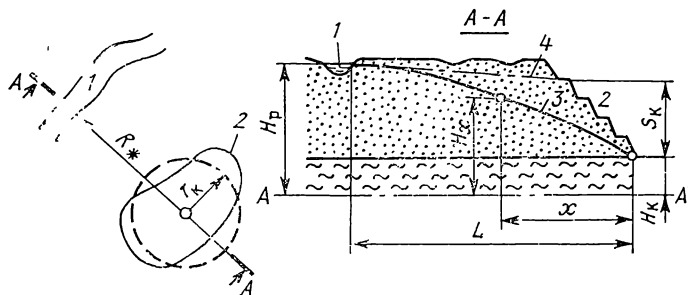


Рис. 9.3. Схема к расчету притока воды в карьер:  
1 — река; 2 — карьер; 3 — депрессионная (пьезометрическая) кривая; 4 — исходное положение уровня подземных вод;  $AA'$  — плоскость отсчета



Распределение удельных (на 1 м) притоков  $q$  по периметру карьера остается более или менее равномерным, пока не сказывается влияние границ пласта, т. е.  $q = \frac{Q}{P}$ . При близком расположении границы, когда  $\frac{R_*}{r_k} < 2$ , можно использовать формулу

$$q = \frac{T(H_p - H_k)}{L} \quad (9.6)$$

для оценки удельных притоков (в м<sup>3</sup>/сут на 1 м) на участке карьера, примыкающем к реке. Здесь  $L$  — расстояние от реки до контура дренажа в карьере (см. рис. 9.3).

Формулы (9.4) — (9.6) могут использоваться и для оценки притоков к дренажным траншеям и линейным штрекам (при условии, что штрек пройден по проницаемым породам); при этом вместо  $r_k$  подставляется треть длины выработки.

Уровни (напоры) в водоносном пласте в непосредственной близости от карьера (траншеи, штрека) можно определять по формуле

$$H(x) = H_k + \frac{q}{T} x, \quad (9.7)$$

где  $H(x)$  — напор на расстоянии  $x$  от участка выхода воды на откос.

Формула (9.7) справедлива при  $x < (0,2 \div 0,3) r_k$ . Для пластов большой мощности, когда вблизи карьера установлен безнапорный режим, лучше использовать формулу

$$h(x) = \sqrt{h_k + \frac{2q}{K} x}, \quad (9.8)$$

где напоры  $h$  и  $h_k$  отсчитываются от водоупорной почвы пласта (для неподтопленного откоса  $h_k = 0$ ).

Приведем в заключение простейшие формулы для расчета дренажных скважин.

1. При использовании группы из « $n$ » водопонижающих скважин, оборудованных насосами с номинальной производительностью  $Q_c$ , справедлива формула

$$S = \frac{0,183 Q_c}{T} \sum_1^n \lg \frac{2,25 a^* t}{r_i^2}, \quad (9.9)$$

где  $S$  — понижение напора (в м) в расчетной точке, удаленной на расстояние  $r_i$  от  $i$ -й скважины,  $t$  — время от момента включения скважин, сут ( $t < t_n$ ). Формула (9.9) предполагает, что пласт дренируется только скважинами и напор поддерживается ниже дна разрезной траншеи (рис. 9.4). Для скважин вблизи реки или водоема, когда  $t > t_n$ , вместо формулы (9.9) используется формула

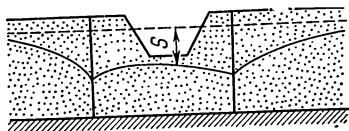


Рис. 9.4. Схема дренажного контура вблизи разрезной траншеи

$$S = \frac{0,183 Q_c}{T} \sum_1^n \lg \frac{\rho_i}{r_i}, \quad (9.10)$$

где  $\rho_i$  — расстояние от расчетной точки до зеркального отражения  $i$ -й скважины относительно реки.

2. Контурный ряд скважин или фильтров, параллельный откосу рабочего борта (рис. 9.5,а) может рассчитываться с помощью графика, приведенного на рис. 9.5,б [34]; при этом  $\delta$  — безразмерный «коэффициент заслона», определяющий ту долю удельного притока к борту, которая перехватывается дренажным рядом:

$$\delta = 1 - \frac{q_0}{q}, \quad (9.11)$$

где  $q_0$  и  $q$  — удельные притоки на 1 м борта карьера при работе дренажного ряда и без него. Величина  $q$  определяется по расчетному притоку в карьер, а допустимый удельный приток воды к откосу рабочего борта ( $q_0$ ) определяется либо горнотехническими соображениями, либо же требованиями устойчивости фильтрующего откоса. Параметр  $\bar{l}_2$  при близком расположении контура питания ( $\frac{R_*}{r_k} < 2$ ) определяется по формуле

$$\bar{l}_2 = \frac{l_1 l_2}{l_1 + l_2}, \quad (9.12)$$

а при  $R_* \gg r_k$  можно считать  $\bar{l}_2 = l_2$  (см. рис. 9.5,а).

3. При наклонном залегании водоносных слоев с обратным (в сторону от карьера) их падением, максимальное расстояние  $\sigma_{\max}$  между скважинами дренажного ряда (при котором попадание воды в карьер будет

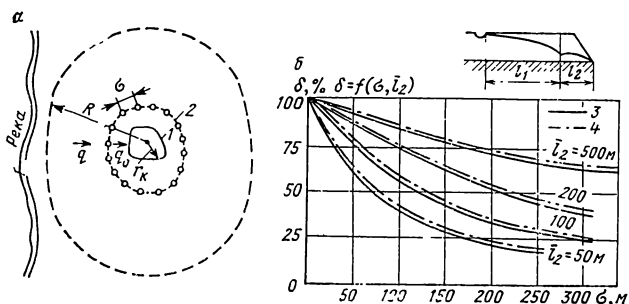


Рис. 9.5. Схема и график к расчету контура водопонижающих скважин вблизи карьера:

1 — карьер, 2 — ряд водопонижающих скважин; 3 —  $r_c = 0,1$  м; 4 —  $r_c = 0,2$  м

$r_c$  — радиус скважины;  $\sigma$  — расстояние между скважинами

$l_1$  — расстояние от скважин дренажного ряда до контура питания, м;  $l_2$  — то же до карьера, м.

полностью ликвидировано) определяется по формуле [3]:

$$2,73 l_1 \frac{l_2 \sin \alpha - H_c}{\Delta H_k} = \sigma_{\max} \lg \frac{\sigma_{\max}}{\pi d_c}, \quad (9.13)$$

где  $H_c$  — глубина воды в скважине, м.

Схема фильтрации при наклонном залегании водоносных слоев показана на рис. 9.6.

Приведенные зависимости значительно упрощают реальную природную обстановку и дают поэтому весьма ориентировочные результаты. Для более надежных рас-

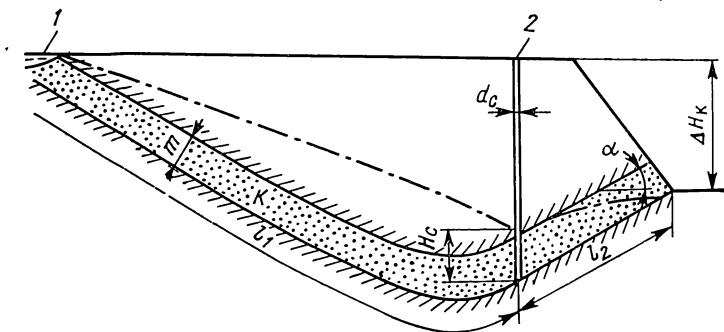


Рис. 9.6. Схема фильтрации при наклонном залегании водоносных слоев:

1 — река, 2 — ряд скважин

четных оценок гидрогеологами применяются электрические модели (использующие формальную аналогию между фильтрацией подземных вод и движениями электрического тока) или ЭВМ, позволяющие добиться практически любой точности расчета. При этом погрешность прогноза целиком зависит от погрешностей исходных данных, в первую очередь от основных гидрогеологических (фильтрационных) параметров, таких как коэффициент фильтрации, водопроницаемости, водоотдачи и пьезопроводности.

Основой для определения фильтрационных параметров при разведке месторождений полезных ископаемых являются специальные опытно-фильтрационные работы: откачка из опытных скважин, реже — нагнетание или налив воды в скважины. По ряду трудноустраняемых причин точность получаемых параметров (т. е. основных исходных данных для проектирования систем осушения) оказывается обычно не очень высокой. В среднем полученные параметры считаются вполне удовлетворительными, если их погрешность измеряется первыми десятками процентов. Подобная точность обычно достижима лишь при проведении длительных (10—15 сут и более) жустовых откачек\*, число которых при разведке месторождений, как правило, весьма ограничено. При наиболее же массовом виде работ (сравнительно кратковременных откачках или нагнетаниях в одиночных скважинах) всегда получаются гораздо более высокие погрешности.

Поэтому в настоящее время повышение достоверности проектирования систем осушения карьеров зависит не столько от усовершенствования применяемых методов расчетов, сколько от перспектив коренного улучшения методов гидрогеологической разведки.

---

\* Откачка производится из центральной скважины, в зоне влияния которой располагаются несколько наблюдательных скважин.

## 10. ОБЩИЕ ВОПРОСЫ ДРЕНАЖА КАРЬЕРНЫХ ПОЛЕЙ

### 10.1. ЗАДАЧИ ДРЕНАЖА И ЕГО ЗНАЧЕНИЕ ДЛЯ ГОРНЫХ РАБОТ

Дренаж карьеров осуществляется для обеспечения нормальных условий работы людей и горного оборудования, уменьшения влажности полезного ископаемого, обеспечения устойчивости бортов, откосов уступов и отвалов.

Хорошо известно, что дренажные мероприятия на многих карьерах существенно улучшают условия работы горнотранспортного оборудования. Так, дренаж устраняет или ограничивает обводненность экскаваторных забоев и фильтрационные деформации отрабатываемых уступов, помогает бороться с образованием наледей на откосах, с обводнением взрывных скважин. В то же время глубокий дренаж не может рассматриваться как эффективное средство борьбы с такими явлениями, как промерзание песчано-глинистых пород уступов, налипание и примерзание экскавируемых и транспортируемых пород, разжижение глинистых пород под действием динамических нагрузок от оборудования. В этом отношении некоторый эффект может быть достигнут лишь путем организации внутрикарьерного стока.

Естественно, что требования к дренажу и его возможности существенно зависят от принятой схемы отработки месторождения. Так, при отсутствии внутренних отвалов можно наиболее широко использовать открытый дренаж пород в карьере, а также применять различные дренажные устройства, проводимые из карьера. Наоборот, внутреннее отвалообразование значительно ограничивает использование дренажа, особенно при работе многоковшовых экскаваторов с транспортно-отвальными мостами и с консольными отвалообразователями, а также при работе с подвалкой обводненных добычных или вскрышных уступов. Более того, при одной и той же схеме горных работ требования к дренажу зависят от применяемого горного оборудования, так как деформации водоносных пород в откосах уступов неидентично влияют на работу экскаваторов различных типов. Например, при отработке водоносных песков мех-

лопатами потребуется гораздо более интенсивный дренаж, чем при отработке драглайнами.

При работе средств гидромеханизации подземные воды являются благоприятствующим фактором. Основная задача дренажа в этих условиях сводится к ограничению деформаций откосов в таких пределах, чтобы ими не были захвачены вышележащие уступы, — нерабочие или отработываемые экскаваторами. Кроме того, система отвода технических вод должна быть организована таким образом, чтобы не допустить дополнительного увлажнения тех пород, которые предназначаются для экскаваторной отработки. В связи с этим, требования к дренажу пород, отработываемых средствами гидромеханизации, менее жесткие, чем при работе экскаваторов. Применение гидромеханизации позволяет резко уменьшить объемы дренажных работ и широко использовать открытый дренаж пород непосредственно карьером.

Роль дренажа и водоотвода в повышении качества полезного ископаемого сводится к частичному удалению влаги из полезного ископаемого или к предотвращению дополнительного его увлажнения. Например, на ряде угольных карьеров снижение влажности угля с помощью дренажа на несколько процентов позволило сократить затраты на брикетирование углей на 20—30%. Однако в случаях, когда гравитационная вода в полезном ископаемом вообще отсутствует, обычные способы дренажа оказываются с этой точки зрения совершенно неэффективными. Так, на Лебединском карьере КМА, несмотря на наличие мощной системы дренажа, влажность рыхлых глиноподобных разностей железной руды остается практически неизменной. Точно так же для предотвращения дополнительного увлажнения, связанного с набуханием полезного ископаемого, основной эффект дает правильная организация внутри-карьерного стока, а не собственно дренажные мероприятия.

Наряду со снижением влажности полезного ископаемого, дренаж вмещающих пород может способствовать устранению разубоживания полезного ископаемого и снижению его потерь — если по условиям отработки добычные забои могут заливаться в результате оплывания покрывающих пород.

Остановимся теперь на положении дренажа в общем горнотехнологическом цикле. В некоторых проектах вы-

бор способа вскрытия и систем разработки месторождения осуществляется без достаточного учета гидрогеологической обстановки: дренаж привязывается к некоторым заранее выбранным схемам горных работ. В результате системы дренажа месторождений со сложными гидрогеологическими условиями нередко оказываются неоправданно громоздкими, а подчас дренаж вообще не может обеспечить нормальные условия работы карьера при выбранном способе ведения горных работ.

Поэтому при проектировании карьеров в сложных гидрогеологических условиях необходимо тщательно увязывать горную и дренажные части проекта, ибо только при таком подходе можно максимально учесть гидрогеологические условия месторождения и наметить тем самым оптимальную генеральную проектную схему. Этот вывод касается буквально всех основных моментов горной части проекта, таких как выбор участка первоочередного вскрытия, выбор принципиальной схемы вскрытия и системы разработки, выбор типа оборудования и т. д. Поэтому технико-экономическое рассмотрение вариантов систем отработки для месторождений со сложными гидрогеологическими условиями должно обязательно включать и возможные варианты систем дренирования месторождения.

В качестве примера рассмотрим некоторые моменты, связанные со вскрытием месторождения. Прежде всего, участок первоочередного вскрытия должен выбираться на основе предварительного гидрогеологического и инженерно-геологического районирования.

Можно привести много примеров неудачного расположения разрезных траншей, которое приводило к заметным осложнениям в процессе вскрышных работ — вследствие высокой обводненности, интенсивных фильтрационных деформаций или оползневых явлений. Между тем во многих случаях лишь за счет правильного выбора участка первоочередного вскрытия можно добиться значительного облегчения в решении проблемы осушения месторождения.

Например, на Михайловском месторождении КМА разрезная траншея располагалась на участке выклинивания наиболее водообильного горизонта, приуроченного к пескам. После вскрытия рудной толщи напоры в этом горизонте оказались заметно сниженными только за счет его прямой гидравлической связи с рудным

комплексом. В результате были созданы более благоприятные условия для непосредственного вскрытия пещер карьером.

Таким образом, в данном случае оптимальное по горнотехническим условиям расположение разрезной траншеи создало условия, наиболее благоприятные и для решения задач осушения.

Однако в некоторых случаях целесообразно пойти на заведомое ухудшение условий вскрытия месторождения, чтобы в дальнейшем можно было обеспечить более благоприятные условия эксплуатации.

Например, если вблизи контура карьера имеется река, то следует рассмотреть вариант вскрытия месторождения на его граничном участке, прилежащем к реке (возможно с привлечением средств гидромеханизации), с последующим быстрым оформлением нерабочего борта и средств прибортового дренажа. В таком случае на рабочем борту будут созданы наиболее благоприятные условия для работы горнотранспортного оборудования на весь период эксплуатации карьера.

При неглубоком (до 30—40 м) залегании водоносного горизонта нередко целесообразно первую вскрышную заходку проходить как оконтуривающую дренажную траншею в пределах объема строительной вскрыши, что значительно улучшает условия производства работ при последующих заходках и позволяет организовать стационарный водоотлив на весь период строительства.

Проходка пионерных траншей в зависимости от климатических условий может быть приурочена или к летнему периоду года (в районах с суровыми климатическими условиями) или к зимне-весеннему периоду (в районах с резко выраженными ливневыми притоками, превышающими нормальный приток в десятки раз). В последнем случае пионерные траншеи рассматриваются как временный водосборник, объем которого позволяет разместить максимальный приток.

В заключение отметим, что при проектировании дренажных мероприятий в районах с напряженным водохозяйственным балансом необходима их всесторонняя увязка с водоснабжением горного предприятия, а также и прилегающей к карьере территории.



## 10.2. ЗНАЧЕНИЕ ДРЕНАЖА ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ УСТОЙЧИВОСТИ ОТКОСОВ

С точки зрения улучшения устойчивости бортов в целом, основное значение дренажа сводится к уменьшению гидростатических и гидродинамических сил: дренаж будет достаточно эффективным, если он вызывает заметное снижение напоров в пределах «призмы возможного оползания».

Прежде всего, здесь следует упомянуть карьеры, в бортах или в подошве которых залегают напорные водоносные комплексы, отделенные от выработки водоупорным экраном. В других случаях влияние гидростатических и гидродинамических сил на общую устойчивость борта невелико, так как уменьшение этих сил с помощью дренажных работ лишено смысла с технико-экономической точки зрения.

Рассмотрим значение дренажа для обеспечения устойчивости уступов.

Для нерабочих уступов, сложенных песчано-глинистыми породами, первостепенное значение имеет организация внутрикарьерного стока воды.

Устранение скоплений воды на площадках уступов уменьшает гидродинамические и гидростатические силы, ограничивает размокание и поверхностный размыв откосов, а также набухание пород. Сами же набухающие породы обычно настолько слабо отдают воду, что практически их можно считать недренируемыми. Правда, с набуханием можно было бы бороться, дренируя контактирующие с глинами водоносные породы, однако чаще всего их полное осушение недостижимо и оставшееся в водоносном слое количество воды, даже ничтожное с точки зрения водопритокков, оказывается достаточным для того, чтобы набухание нижележащих глин проявилось в полной мере.

Отметим, что набухание песчаных глин, в которых напряжение эффективного набухания не превосходит 50—100 КПа, можно ограничить путем пригрузки откоса слоем крупнозернистого материала, мощность которого обеспечила бы большие напряжения в глинах.

Для обеспечения устойчивости уступов в песчаных породах, наряду с дренажем водоносных горизонтов, приуроченных к этим породам, и организацией внутрикарьерного стока (эти мероприятия способствуют ограничению или устранению фильтрационных деформаций).

ций и эрозионного размыва поверхности откосов уступов), можно с успехом использовать пригрузку фильтрующей части откоса крупнозернистым материалом (дренажная призма).

Особые требования предъявляются к уступам соляных пород. В этом случае необходим полный перехват подземных вод на удалении от откоса и эффективный отвод атмосферных вод с площадок уступов.

Для обеспечения устойчивости отвалов уровень воды в породах основания (вблизи откоса) должен быть ниже подошвы отвала на величину, превышающую высоту капиллярного поднятия для этих пород (0,5—1 м).

Необходимо, по возможности, проводить также мероприятия по ограничению поступления атмосферных вод в породы отвала, что особенно важно для отвалов из пылеватых пород, склонных к внезапным оползням-оплывинам. На высоких отвалах, сложенных глинистыми породами, в которых развивается избыточное поровое давление, может возникнуть необходимость в проведении специальных мероприятий, направленных на увеличение скорости его рассеивания (например, периодическая отсыпка слоев песка).

На гидроотвалах необходимо проводить дренаж откоса дамбы для ограничения его фильтрационных деформаций. В заключение отметим, что в практике открытых горных работ нередки случаи, когда деформации откосов необоснованно приписываются действию подземных вод, что приводит к откачке больших объемов воды без какого-либо ощутимого эффекта. В этом смысле необходимо различать природные и горнотехнические условия, при которых может быть достигнут эффективный дренаж.

Следует особо подчеркнуть целесообразность для многих месторождений рассмотрения открытого дренажа пород (самим карьером) в качестве одного из возможных рациональных вариантов осушения. Кроме того, нередко для решения поставленных задач оказывается целесообразной замена глубинного дренажа другими мероприятиями: изменение порядка отработки уступов, уменьшение угла наклона борта карьера, пригрузка откоса фильтрующим материалом и т. д.

### 10.3. ТЕХНИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА ОСУШЕНИЯ

Для дренажа карьеров в настоящее время наиболее широко применяются: водопонижающие скважины, оборудованные глубинными насосами; подземные системы — дренажные штреки с фильтрами и колодцами; дренажные зумпфы, траншеи, канавы и другие средства открытого дренажа.

Достоинствами систем водопонижающих скважин является то, что они не требуют больших капитальных затрат; сооружение отличается технической простотой, скважины вводятся в действие за короткий срок, система позволяет гибко учитывать изменение условий дренирования месторождения.

К недостаткам водопонижающих скважин следует отнести: малую их эффективность при использовании в сравнительно слабопроницаемых грунтах (при  $K < < 3-5$  м/сут); необходимость содержания большого числа работающих насосов, часто выходящих из строя вследствие аварий, что требует занятости значительного рабочего персонала и затрудняет централизацию водоотлива; сравнительно высокие расходы на эксплуатацию.

В то же время системы водопонижающих скважин обладают большими резервами с точки зрения снижения затрат на их эксплуатацию при внедрении более надежных насосов и их автоматическом регулировании, улучшении конструкций фильтров, использовании скважин большого диаметра и многозабойных скважин (для трещиноватых пород).

Подземные системы осушения (рис. 10.1) состоят из дренажных штреков и пройденных из них восстающих или нисходящих самоизливающих скважин (забивных фильтров), колодцев в почве штреков, скважин, пройденных на штрек с поверхности (сквозные фильтры).

Достоинствами подземных систем дренажа являются: высокая степень централизации водоотлива (откачка воды ведется единой насосной станцией из общего дренажного ствола), возможность использования как в хорошо проницаемых, так и в сравнительно слабопроницаемых породах, относительно низкие затраты на эксплуатацию.

Однако подземные системы дренажа обладают рядом существенных недостатков, резко снижающих их

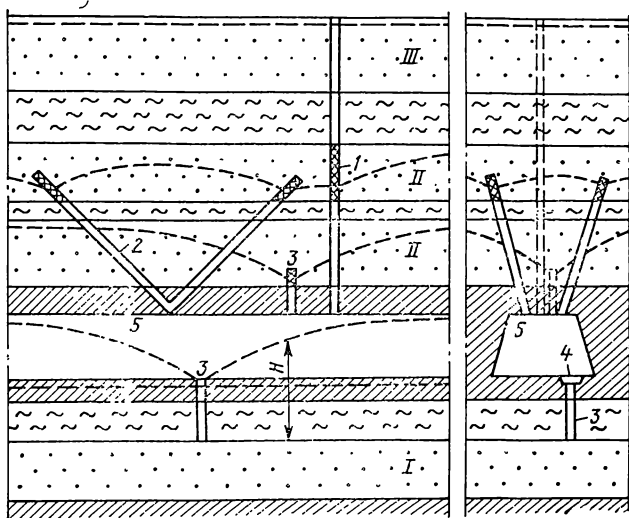


Рис. 10.1. Подземная система осушения:

*I, II, III* — водоносные пласты; *1* — сквозной фильтр; *2* — восстающая скважина; *3* — забивной фильтр; *4* — отводная канава; *5* — штрек

эффективность: устройство подземной системы дренажа требует больших капитальных затрат; система недостаточно гибка и мобильна; проходка дренажных штреков в сложных гидрогеологических условиях сопряжена с большими техническими трудностями и требует предварительного снижения напоров, для чего проводится большое число специальных водопонижающих скважин; прорыв воды нередко приводит к выходу из строя системы дренажа на длительные сроки; время создания дренажа измеряется несколькими годами, так что он редко вступает в строй вовремя.

Наряду с водопонижающими скважинами и подземными системами, в благоприятных условиях для глубинного дренажа применяют: самоизливающие скважины, пройденные из карьера для снятия высоких напоров в подошве карьера и в прибортовой зоне; поглощающие скважины, перепускающие воду из верхних горизонтов на нижние, — при водообильности дренируемого горизонта заметно меньшей, чем у поглощающего пласта; иглофильтровые установки, которые представляют собой комплект коротких фильтров (обычно по 20—40 штук), подключенных через 2—4 м к общему вакуум-

ному насосу и ведущих откачку воды с глубин не более 5—6 м. На карьерах они используются обычно в качестве временного локального средства дренажа; преимущества легких иглофильтров заключаются в их высокой мобильности, простоте и скорости установки, однако они дороги в эксплуатации и трудно увязываются с работой вскрышного оборудования.

Все упомянутые средства относятся к средствам глубинного дренажа. В отличие от них средства открытого дренажа принимают воду непосредственно своими откосами и дном.

Открытый дренаж (водоотлив) из зумпфов и траншей в карьере является широко используемым методом дренажа. Эти дренажные устройства применяются при таких водопритоках, которые не вызывают их заметных деформаций, требующих многократной зачистки. Для предотвращения фильтрационных деформаций, на нерабочих откосах вместо открытого дренажа используют прибортовой — фильтрующую призму из крупнозернистого материала, приуроченную к дренажной канаве.

Наряду с перечисленными средствами дренажа, в последнее время успешно используются их новые типы, среди которых можно отметить горизонтальные скважины и водонепроницаемые завесы (барражи).

Горизонтальные самотечные скважины, пройденные из карьера по водоносным породам, являются исключительно перспективным средством дренажа карьеров. Немногочисленный опыт их эксплуатации свидетельствует о весьма высокой технико-экономической эффективности этого вида дренажных устройств как в рыхлых песчаных, так и в трещиноватых породах.

Водонепроницаемые завесы (глинистые и цементационные), используемые для уменьшения водопритоков к открытым выработкам или для полной изоляции карьерного поля, в настоящее время используются редко, для небольших (до 15—20 м) глубин. Водонепроницаемые завесы эффективно используются в тех случаях, когда обычные методы осушения приводят к региональному истощению водоносных пластов и к нарушению нормальных условий водоснабжения прилегающего района.

В заключение отметим, что при проектировании дренажей карьеров часто копируются, без достаточных

на то оснований, методы, используемые при осушении подземных горных выработок. Между тем карьеры имеют в этом плане свои особенности:

гидродинамические силы вблизи откосов, как правило, во много раз меньше, чем вблизи фильтрующих участков подземных выработок, поэтому пływунные явления в песках на карьерах обычно не имеют широкого распространения;

открытая разработка месторождений часто позволяет широко использовать в качестве водоприемника саму выработку (карьер, разрезную траншею) без существенных осложнений для производства работ;

при подземном способе разработки имеется разветвленная сеть подготовительных выработок, которые могут одновременно использоваться для осушения; при открытой же разработке затраты на подземные дренажные выработки накладываются в виде дополнительных затрат на себестоимость полезного ископаемого, иногда повышая ее на 10—15% и более.

#### **10.4. ВОПРОСЫ ОХРАНЫ И РАЦИОНАЛЬНОГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ПОДЗЕМНЫХ ВОД В ГОРНОДОБЫВАЮЩИХ РАЙОНАХ**

Открытые горные работы часто ведутся в районах с напряженным воднохозяйственным балансом, когда подземная вода рассматривается как важнейшее полезное ископаемое. В связи с этим при проектировании горных работ необходимо учитывать следующие важнейшие моменты:

дренаж месторождения и водоотлив из карьера могут приводить к постепенному истощению водоносных горизонтов, используемых для водоснабжения прилегающих к карьере территорий; размеры этих территорий могут измеряться сотнями квадратных километров;

сопутствующие открытым горным работам крупные гидротехнические сооружения (гидроотвалы, хвостохранилища, водохранилища и пруды-аккумуляторы) являются важнейшими факторами в формировании режима подземных вод: эти сооружения могут способствовать интенсивному пополнению их запасов и в то же время служить источником загрязнения подземных вод;

дренажные воды могут сами по себе содержать

вредные компоненты и тогда их сброс превращается в сложную технологическую проблему.

Отсюда, с учетом новых законодательных положений по охране среды, вытекают некоторые важнейшие требования, которые необходимо учитывать при проектировании открытых работ и сопутствующих им технологических процессов в районах с напряженным водно-хозяйственным балансом:

при прочих равных условиях, предпочтение должно отдаваться тем вариантам горных и дренажных работ, которые сопряжены с меньшим водопотреблением и с меньшими объемами откачки;

проект дренажа должен рассматривать возможность широкого использования откачиваемых вод для водоснабжения района, в том числе хозяйственного и питьевого;

наоборот, при откачке высокоминерализованных вод в проекте должна решаться проблема их сброса и очистки (в соответствии с нормами санитарной охраны) или повторной закачки;

проект горных работ должен содержать прогноз распространения фронта загрязнения от упомянутых бассейнов промышленных стоков (если технологический цикл предполагает появление в них вредных компонентов в недопустимых концентрациях); на основе этого прогноза в проекте должны быть намечены необходимые контрольные и защитные мероприятия, направленные на охрану подземных вод от загрязнения [18].

#### **10.5. КЛАССИФИКАЦИЯ МЕСТОРОЖДЕНИЙ ПО УСЛОВИЯМ ОСУШЕНИЯ**

Ввиду того, что схемы дренажа, выбираемые для технико-экономического сравнения при проектировании, весьма разнообразны, целесообразно рассмотреть их более подробно, наметив границы их применения в зависимости от гидрогеологических и горнотехнических условий. При этом должны учитываться: свойства вмещающих пород и полезного ископаемого; условия залегания водоносных пород, их водообильность и водопроницаемость; способ вскрытия и система разработки месторождения; задачи дренирования и его технико-экономическая эффективность.

Таблица 10.1

Группа пород	Общая характеристика группы пород	Основные представители горных пород группы	Основные показатели дренируемости и устойчивости в обводненных откосах
Скальные и полускальные	Прочные и средней прочности, трещиноватые	Изверженные и метаморфические (песчаники, известняки, сланцы и т. п.) породы	Наибольшая обводненность в зонах закарстованности, тектонических нарушений и коры выветривания; хорошо дренируются скважинами, если они попадают в зону наибольшего развития трещин; не размокают и не набухают
Глинистые	Плотные	Полностью дезинтегрированные изверженные и метаморфические породы коры выветривания, алевролиты, аргиллиты, плотные трещиноватые глины, глинистые и каолинизированные песчаники, органогенные осадочные породы — мел, бурые угли (условно)	Трещиноватость и обводненность равномерная; дренируются удовлетворительно; размокают на фильтрующих участках уступов, а также при скоплении воды на площадках уступов
	Мягкие	Жирные или слабобеспесчаные пластичные глины, слабые аргиллиты	Водоупорны; на поверхности откосов и на контакте с водоносными слоями набухают; сильно сжимаемы
Слабые песчано-глинистые	С малым сцеплением	Песчаные глины, суглинки, супеси, глинистые пески, слабые алевролиты	Существенно дренируются лишь открытыми горными и дренажными выработками, а также при снижении уровней в подстилающих слоях фильтрующих несвязных или трещиноватых пород; в откосах набухают, размокают, а затем оплывают



Группа пород	Общая характеристика группы пород	Основные представители горных пород группы	Основные показатели дренируемости и устойчивости в обводненных откосах
Несвязные	Сцепление отсутствует	Гравий, пески, щебень, скальные и полускальные породы	Хорошо дренируются скважинами (кроме пылеватых песков) и траншеями, не набухают, не размокают; пески оплывают в откосах под углами $10-16^\circ$ .
Современные илы	Неуплотненные современные отложения водных бассейнов	Современные илисто-глинистые озерные, болотные и лагунные осадки, водонасыщенные почвы, заторфованные осадки	Дренируются лишь сетью канав и траншей; сопротивление сдвигу не более $10^4$ Н/м <sup>2</sup> , в откосах весьма неустойчивы; весьма сжимаемы

Прежде всего, материал, изложенный ранее, позволяет классифицировать горные породы по устойчивости их в откосах и по дренируемости (табл. 10.1). С учетом этой классификации, месторождения полезных ископаемых, разрабатываемые открытым способом, подразделяются на ряд характерных типов [34].

На месторождениях типа А преобладают горно-геологические комплексы мягких глинистых, слабых песчано-глинистых и несвязных пород при преимущественно горизонтальном залегании слоев (например, месторождения КМА и Днепровского угольного бассейна). На месторождениях типа Б преобладают водоносные комплексы метаморфических пород осадочного генезиса со средней прочностью и комплексы плотных глинистых пород при преимущественно наклонном залегании слоев (например, Канско-Ачинский и Северо-Уральский угольные бассейны). На месторождениях типа В преобладают горно-геологические комплексы прочных (достаточно водоустойчивых) трещиноватых пород (например, рудные месторождения Средней Азии и Казахстана).

При классификации месторождений применительно к решению вопросов дренирования часто следует учитывать и водообильность дренируемых комплексов. Так, на слабо обводненных месторождениях типа А можно

ограничиться открытым дренажем на всех стадиях освоения месторождения. При средней степени водообильности глубинный дренаж необходим лишь в первый период вскрытия водоносных горизонтов (в течение 2—4 лет), а водообильные месторождения требуют глубинного дренажа на весь период эксплуатации. На месторождениях этого типа влияние водообильности определяется не столько общим количеством воды, поступающей в карьер, сколько удельными притоками (на 1 м протяженности откоса). На месторождениях типа Б затраты на дренаж во многом определяются не собственно водопритоками, а требованиями заметного понижения напоров в прибортовой зоне. Наконец, на месторождениях типа В методы и средства дренажа устанавливаются чаще всего путем его технико-экономической оценки в зависимости от общего водопритока к карьере.

## **11. СХЕМЫ ОСУШЕНИЯ КАРЬЕРНЫХ ПОЛЕЙ**

### **11.1. О ЦЕЛЕСООБРАЗНОСТИ ДРЕНАЖА ГОРНЫХ ПОРОД НА МЕСТОРОЖДЕНИЯХ ТИПА А**

При горизонтальном залегании перемежающихся водоносных и водоупорных слоев горных пород полный дренаж гравитационной воды практически недостижим, поэтому при проектной проработке необходимо прежде всего установить пределы допустимого высачивания вод на поверхность откосов по основным водоносным горизонтам и определить необходимый коэффициент перехвата (заслона) подземного потока дренажной системой.

В общем случае может быть намечена такая последовательность выбора целесообразных пределов дренажа:

а) определяются притоки к откосам и понижения уровней подземных вод в условиях открытого дренажа, а также оценивается их изменение с течением времени;

б) оценивается влияние подземных и поверхностных вод на устойчивость бортов, откосов уступов и отвалов, на работу горного оборудования и на влажность полезного ископаемого;

в) намечаются и рассматриваются возможные системы дренажа, для каждой из которых подсчитываются величины понижения уровней, а также объемы воды, вытекающей в карьер и перехватываемой средствами глубинного дренажа;

г) для каждой системы дренажа проводятся оценки, аналогичные п. б;

д) если после проведенных оценок вопрос о целесообразности глубинного дренажа не будет решен, то определяются затраты на дренажные работы по вариантам и производится их экономическое сравнение. Для этого ожидаемые затраты на дренаж сопоставляются с тем снижением затрат на вскрышные и добычные работы, которое достигается при данном варианте глубинного дренажа (по сравнению с открытым); кроме того, учитывается возможность более эффективного понижения влажности полезного ископаемого в условиях глубинного дренажа.

Проведение такого рода количественных оценок позволило [3, 34] выявить оптимальные схемы дренажа для различных участков карьерного поля в тех или иных «типовых» горно-геологических условиях. Подобного рода схемы, рассматриваемые в последующих параграфах, базируются на следующих основных положениях:

на месторождениях рассматриваемого типа водоносные породы склонны к фильтрационным деформациям (исключением являются лишь гравийно-галечные отложения); этими деформациями в основном определяются требуемые пределы дренажа песчаных пород (если эти деформации не могут быть предотвращены другими мероприятиями при меньших затратах);

горизонтальное залегание предопределяет наличие проскока подземных вод в карьер между дренажными устройствами — для водоносных горизонтов, вскрытых карьеров на полную мощность; исключениями могут являться отдельные участки, приуроченные к повышенной кровле водоупорного ложа, однако и на этих участках в нижней части песчаной толщи всегда остается водонасыщенная зона (за счет капиллярной или гравитационной воды); отсюда следует невозможность устранения набухания глинистых пород, подстилающих водоносный горизонт;

в большинстве случаев желательно снижение влажности полезного ископаемого или предотвращение дополнительного его увлажнения;

на месторождениях рассматриваемого типа залегают водоносные породы, практически не поддающиеся осушению обычными средствами (песчаные глины, глинистые пески, многие разновидности бурого угля и т. п. с коэффициентами фильтрации менее 0,5—1 м/сут); в этих породах ощутимый эффект можно получить лишь при использовании горизонтальных дренай или непосредственно открытыми горными выработками.

## 11.2. ДРЕНАЖ НЕРАБОЧЕГО БОРТА

Основной задачей дренажа нерабочего борта при горизонтальном залегании пластов является устранение фильтрационных деформаций в пределах промежутков высачивания подземных вод и обеспечение стока с предохранительных и транспортных берм. Универсальным способом сохранения устойчивости нерабочих уступов является горизонтальный прибортовой дренаж (рис. 11.1, а, б, в) — гравийно-щебеночная призма в сочетании с водоприемной канавой, проходимый с уклоном к местному внутрикарьерному водосборнику. В канаве укладываются дренажные трубы. В районах с низкими зимними

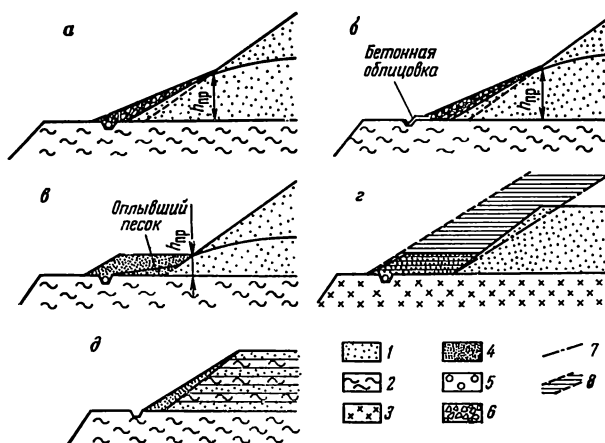


Рис. 11.1. Схемы горизонтального прибортового дренажа:

1 — пригружаемый грунт; 2 — водоупор; 3 — полезное ископаемое; 4 — песок пригрузочной призмы; 5 — гравийно-щебеночный материал; 6 — грубообломочный материал; 7 — генеральная линия борта; 8 — увеличение объема земляных работ за счет пригрузки

температурами дренаж дополнительно утепляется слоем песка.

Дренажный материал должен укладываться на предварительно защищенный откос. Зачистка может производиться под защитой легких иглофильтровых установок или водопонижающих скважин, работающих в период строительства.

Если среди вскрышных пород имеются среднезернистые или крупнозернистые пески, то их также можно использовать в качестве пригрузочного материала. В этом случае пригрузка устраивается несколько иначе (рис. 11.1, в, г); такая форма пригрузки может быть целесообразной:

когда трудно зачищать откос (пригрузочный материал может отсыпаться непосредственно на оплывший откос);

когда откос в пределах промежутка высачивания пригружается отвалами;

когда необходимо увеличивать проезжую часть бермы.

При породах с низкой водопроницаемостью типа супесей и легких суглинков схема прибортового дренажа упрощается: уступ пригружается слоем песка или щебня толщиной 1—2 м, предохраняющим породы от оплывания и оползания (рис. 11.2, б). При малой мощности слабопроницаемых пород, пригрузка может осуществляться за счет вышележащих песков (рис. 11.2, а).

При отсутствии на месте материала для устройства дренажной призмы, а также при больших колебаниях отметок кровли водоупора, затрудняющих самотечный водоотвод, прибортовой дренаж может быть заменен горизонтальными скважинами. Скважины длиной 30—40 м и более могут буриться как перпендикулярно к линии простираения борта, так и под углом к ней; расстоя-

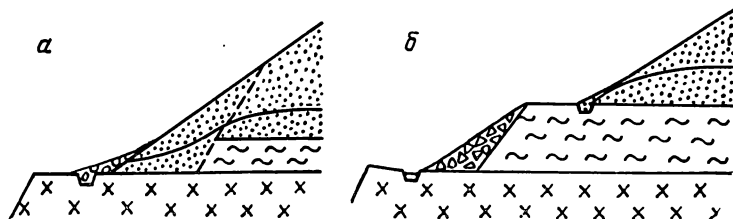


Рис. 11.2. Схемы пригрузки нерабочих уступов, сложенных породами с низкой проницаемостью

ние между скважинами примерно равно их длине. Для водообильных водоносных горизонтов, когда ввиду больших притоков к откосу его трудно зачищать, наиболее рациональным является сочетание прибортового дренажа с горизонтальными скважинами.

Подчеркнем еще два важных момента, связанных с проектированием горных работ:

1) ввиду того, что на нерабочем борту надежный дренаж осуществляется обычно проще и дешевле, чем на рабочем, следует, по возможности, располагать нерабочий борт со стороны основного потока вод;

2) организация дренажа и водоотвода на нерабочем борту существенно упрощается, когда отметка подошвы водоносного горизонта совпадает с отметкой нерабочей бермы.

### 11.3. ДРЕНАЖ РАБОЧЕГО БОРТА КАРЬЕРА

Со стороны рабочего борта дренаж, наряду с устойчивостью откосов, должен обеспечить нормальные условия для работы горнотранспортного оборудования. Кроме того, нередко возникает необходимость в снижении влажности полезного ископаемого.

Основой выбора системы дренажа рабочего борта являются расчетные притоки на 1 м его протяженности  $q$ ; их величину можно ориентировочно определить по формулам (9.4)—(9.6).

Если величина удельного притока не превышает величины критического  $q_0$  для данного типа оборудования, то наиболее эффективен открытый дренаж: вода может поступать в каналы непосредственно на рабочих площадках. Под критической понимается такая величина притока на 1 м протяженности фронта работ, при которой масштабы фильтрационных деформаций (длины языков оплывания) оказываются предельно допустимыми для данного типа горного оборудования и выбранной схемы отработки уступов. Так, если почва водоносного горизонта совпадает с рабочей площадкой, то критический приток определяется расчетным путем [34], исходя из допустимой длины языка оплывания  $l_d$ . Для мехлопаты

$$l_d = R - H \operatorname{ctg} \alpha - \frac{B}{2}, \quad (11.1)$$

где  $R$  — радиус черпания, м;  $H$  — высота уступа, м;  $\alpha$  — угол откоса уступа, градус;  $B$  — ширина ходовой части экскаватора, м.

Ориентировочно величину  $l_d$  для мехлопат можно принять равной 5—8 м.

Для многоковшовых экскаваторов нижнего черпания величину  $l_d$  можно принять равной длине планирующего звена ковшовой рамы, а для экскаваторов верхнего черпания — расстоянию между путями и основанием уступа. Для роторных экскаваторов величина  $l_d$  равна расстоянию от основания уступа до ближайшей опорной точки при минимальном радиусе резания. Для драглайнов (при работе без подвалки) допустимая длина языка оплывания

$$l_d = R_p - H_0 \operatorname{ctg} \alpha_0 - b - \frac{B}{2} - H \operatorname{ctg} \alpha, \quad (11.2)$$

где  $R_p$  — радиус разгрузки, м;  $H_0$  — высота отвала, м;  $\alpha_0$  — угол откоса отвала, градус;  $b$  — ширина бермы безопасности, м ( $b=3\div 5$  м);  $B$  — расстояние между внешними краями лыж, м.

При работе с верхним подступом величина  $l_d$  должна быть меньше расстояния от нижней бровки подступа до ближайшей опорной точки экскаватора.

В качестве первого ориентира для мехлопат и многоковшовых экскаваторов рекомендуются [34] следующие величины предельных притоков  $q_0$  (м<sup>3</sup>/сут на 100 м откоса): пылеватые пески — 20; тонкозернистые — 40; мелкозернистые — 100; среднезернистые — 150—200; крупнозернистые — 300—400. Для драглайнов и роторных экскаваторов допустимые притоки воды существенно выше и зависят от параметров машин.

Если почва водоносного горизонта «подрезана» уступом, то приведенные значения критических расходов воды должны быть уменьшены в 1,5—2 раза. Наоборот, если в фильтрующих породах подземные воды принимаются не непосредственно забоем, а дренажной траншеей (канавой), то приведенные «критические» расходы могут быть увеличены в 2—3 раза, исходя из требований устойчивости откосов траншей. Схема осушения дренажной траншеи, пройденной по площадке рабочего уступа, приведена на рис. 11.3. По мере подвигания забоя проходятся новые траншеи; расстояние между ними определяется шириной заходки экскаватора, а также расчетным положением депрессионной кривой, оценивае-

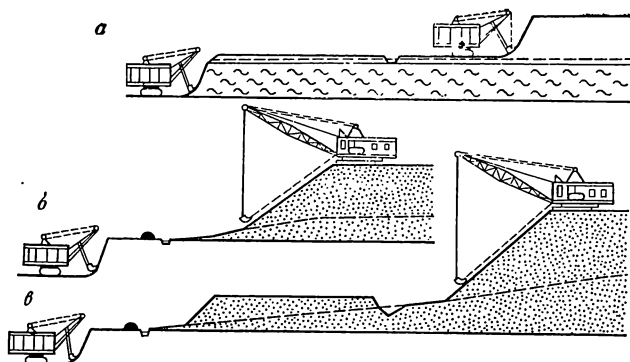


Рис. 11.3. Схема осушения нижнего уступа с помощью дренажных траншей при работе:  
 а — мехлопаты; б — драглайна; в — драглайна с оставлением подступа для отработки его мехлопатою

мым по формуле (9.8). Мощность недобора, как показывает опыт Лебединского и Сарбайского карьеров, целесообразно принимать не более 3—4 м.

Особенно полезна эта схема дренажа при отработке слабопроницаемых ( $K < 0,5 \div 1$  м/сут) пород.

В тех случаях, когда открытый дренаж слабопроницаемых пород не обеспечивает нормальных условий работы экскаваторов (роторных, цепных, механических и т. п.), следует рассмотреть возможность применения для отработки гидромониторов или драглайнов (рис. 11.4). При работе гидромониторов «критические» расходы определяются главным образом требованиями организации водотока; для ориентира рекомендуется, чтобы водоприток не превышали следующих вели-

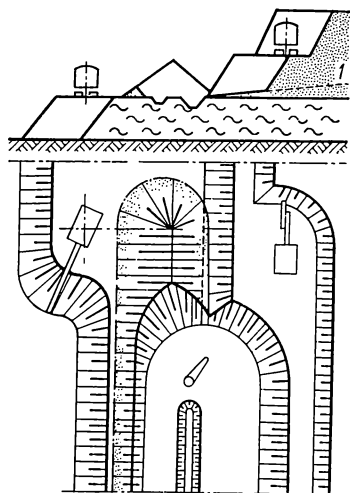


Рис. 11.4. Схема отработки слабопроницаемых пород гидромониторами:

1 — депрессионная кривая



чин ( $\text{м}^3/\text{сут}$  на 100 м борта карьера): тонкозернистые пески — 200; мелкозернистые — 400; среднезернистые — 1000; крупнозернистые — 2000.

Перечисленные случаи возможного применения открытого дренажа относятся к месторождениям, расположенным в районах с умеренными зимними температурами. Если средняя температура трех наиболее холодных месяцев оказывается ниже  $-25$ — $-30^\circ$ , то круг условий, в которых возможен открытый водоотлив, несколько сокращается. Это объясняется тем, что при низких температурах свободное высачивание воды на откос приводит к дополнительным осложнениям в ведении горных работ (образование наледей) и в организации внутри-карьерного водоотвода.

Нужно заметить, что в практике проектирования открытых горных работ нередко полностью отказываются от использования открытого дренажа на карьерах, вскрывающих обводненные толщи песчано-глинистых пород. Между тем из всего сказанного следует, что такого рода тенденции являются совершенно необоснованными: требование недопущения выхода подземных вод на откосы приводит к излишним экономическим затратам, не говоря уже о том, что в большинстве случаев оно практически недостижимо. В настоящее время открытый дренаж неустойчивых рыхлых пород весьма широко применяется в практике открытых горных работ. В качестве примера можно привести такие карьеры, как Лебединский, Сарбайский, Александровский (Никопольский бассейн) и др. На буроугольных карьерах ГДР и ФРГ открытый водоотлив практикуется очень широко и достигает иногда 1—2 тыс.  $\text{м}^3/\text{ч}$  (карьер Профен, Шлеенхайн и др.). При правильной организации открытый дренаж обходится в несколько раз дешевле, чем глубинный.

Если прогнозные притоки в карьер превышают критические, то для их уменьшения необходим глубинный дренаж. Наиболее часто конкурирующими при технико-экономическом сопоставлении вариантов глубинного дренажа пород рабочего борта являются системы водопонижающих скважин и подземные системы осушения. Учитывая изложенные выше достоинства и недостатки этих систем, для предварительной их оценки можно дать следующие общие рекомендации:

водопонижающие скважины целесообразно использовать для длительного эксплуатационного откачивания вод из песчаных пород при глубине откачивания, не

превышающей 150—200 м, и при коэффициентах фильтрации более 3—5 м/сут;

в остальных случаях экономически более выгодна подземная система осушения (в том числе и при малых коэффициентах фильтрации порядка 1—5 м/сут).

Дренажные выработки должны обычно располагаться в виде контурных систем, параллельных фронту работ. Первоначальное расстояние от дренажного контура до борта определяется с учетом скорости подвигания фронта работ, с тем чтобы обеспечить нормальные условия для работы оборудования в течение нескольких лет. Для водопонижающих скважин это расстояние равно четырех-пятикратной величине годового подвигания фронта работ (исходя из среднего срока службы водопонижающих скважин), а для подземной системы осушения указанное расстояние может быть увеличено в 1,2—1,5 раза.

Водопонижающие системы необходимо закладывать после тщательного изучения гидрогеологической обстановки. Это позволит располагать дренажные выработки на участках, где водоносный пласт достигает максимальной проводимости или на участках, где понижена кровля подстилающего водоупора.

При благоприятных для поглощения условиях, когда горизонт с максимальной проводимостью находится в нижней части осушаемой толщи, для осушения верхних горизонтов предпочтительнее использовать поглощающие скважины. Такие условия характерны, например, для Кимовского разреза Подмосковского угольного бассейна, где слабопроницаемые мелкозернистые пески залегают над толщей хорошо проницаемых известняков.

Расстояние между скважинами (фильтрами) определяется по расчетному графику (см. рис. 9.5). При этом исходят из расчетного удельного притока  $q$  [оцениваемого по формулам (9.4) — (9.6)] и допустимого (критического) удельного притока к откосу  $q_0$ . Так как с развитием фронта работ периметр карьера постепенно увеличивается, а удельный приток уменьшается (иногда в несколько раз), то количество воды, попадающее в карьер извне, увеличивается, а требуемое число скважин внешнего контура — соответственно уменьшается.

Вода, профильтровывавшаяся к откосу между скважинами дренажного контура, может приниматься открытыми дренами, а временно — и иглофильтровыми установками, которые являются удобным средством при дренаже

наиболее обводненных участков, расположенных в зоне с пониженным водоупором, с повышенной проводимостью и т. п.

#### 11.4. ДРЕНАЖ ПЛАСТА ПОЛЕЗНОГО ИСКОПАЕМОГО

Своеобразие подхода к этому вопросу может быть обусловлено дополнительным требованием снижения влажности полезного ископаемого.

Если продуктивный пласт перекрыт водоупором или обладает проницаемостью, большей, чем перекрывающий водоносный слой, то полезное ископаемое может быть существенно сдренировано (рис. 11,5,а).

При достаточно проницаемых породах почвы для этого можно использовать открытые дренажные траншеи в основании добычного уступа или водопонижающие скважины, пройденные в подошве карьера. Наоборот, при наличии водоупорных пород в почве продуктивного пласта для его дренажа используются контурные системы, пройденные на рабочем борту для осушения вскрышных пород. И хотя в этом случае осушить полностью добычные забои не удастся, следует все же стремиться к сокращению удельных притоков к откосу по сравнению с приведенными ранее критическими величинами. При ведении работ с временной подвалкой обводненного пласта полезного ископаемого (рис. 11.6) необходимы обеспечение устойчивости отвалов и организация водоотвода в подошве карьера.

При транспортной схеме работ целесообразно оставлять «недобор» в основании продуктивного пласта, что позволит применять открытый дренаж, аналогично тому, как это описано в 11.3. Для районов с низкими зимними температурами такая схема позволит отрабатывать нижнюю обводненную часть продуктивного пласта в летний период.

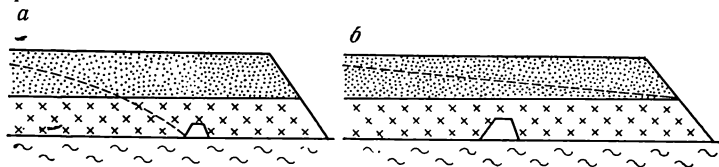


Рис. 11.5. Схема фильтрации в двухслойном пласте

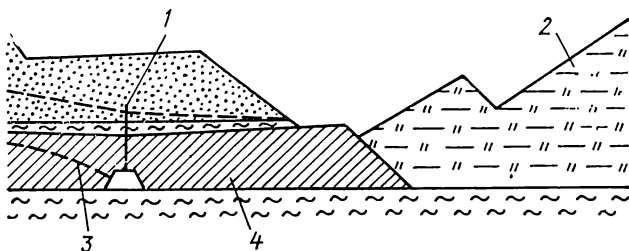


Рис. 11.6. Схема дренажа при работах с временной подвалкой:  
1 — забивной фильтр; 2 — отвал; 3 — депрессионная кривая; 4 — полезное ископаемое

Если проницаемость полезного ископаемого ниже проницаемости перекрывающих его водоносных пород (см. рис. 11.5,б), то осушительные устройства следует использовать лишь для дренажа контактирующих с полезным ископаемым водоносных слоев, сочетая глубинный дренаж с открытым. При резко выраженной волнистости кровли пласта полезного ископаемого иногда полезно сократить объем открытого водоотлива, проходя по пониженным участкам дополнительные ряды скважин, сквозных или забивных фильтров; в частности, дренажные выработки по пониженным участкам могут проходиться непосредственно из карьера. Не следует однако излишне увлекаться подобными схемами, так как во многих случаях, несмотря на проходку большого объема дополнительных дренажных выработок, над полезным ископаемым повсеместно остается зона водонасыщенных пород.

Отметим в связи с этим, что очень часто сам карьер оказывает на пласт, перекрывающий полезное ископаемое, гораздо больший дренирующий эффект, чем системы глубинного дренажа. Роль дренажа водоносных пород, контактирующих с полезным ископаемым, сводится в этих условиях к тому, что во многих случаях он позволяет предотвратить дополнительное увлажнение пласта полезного ископаемого, обусловленное уменьшением нагрузки на него в связи с выемкой перекрывающих пород и последующим набуханием. В этом случае максимальный эффект достигается путем снижения напоров в водоносном горизонте, подстилающем пласт полезного ископаемого, а также путем полного осушения кровли пласта полезного ископаемого на ее повышенных участ-

ках. Что же касается заметного уменьшения влажности по сравнению с природной, то такая возможность обычно может быть реализована лишь бурением часто расположенных (через 0,5—2 м) скважин и фильтров. Например, на буроугольных карьерах ГДР в этих целях используются горизонтальные скважины, пробуренные на расстоянии 0,5—1 м друг от друга. Однако на отечественных карьерах подобные схемы дренажа нерентабельны.

В заключение можно сказать, что все дренажные мероприятия могут быть эффективными лишь при условии правильно организованного внутрикарьерного стока.

### 11.5. ДРЕНАЖ РАЗРЕЗНОЙ ТРАНШЕИ

При проходке разрезной траншеи подземные воды значительно влияют на устойчивость откосов и на условия работы горнотранспортного оборудования из-за высоких удельных (на 1 м откоса) притоков и, соответственно, заметного развития фильтрационных деформаций. Поэтому дренажные работы в период строительства карьера должны проводиться с максимальной интенсивностью.

Так как системы дренажа разрезной траншеи определяются схемой вскрышных работ, рассмотрим два основных случая: дренаж при вскрытии экскаваторами и дренаж при вскрытии средствами гидромеханизации.

Вскрытие с помощью экскаваторов. Если расчет притоков воды в разрезную траншею показывает, что удельные притоки превышают критические, по крайней мере, в течение 1,5—2 лет (считая от момента вскрытия водоносного горизонта карьером), то в этих условиях целесообразнее всего проводить предварительное осушение с помощью контурных систем водопонижающих скважин. Для откачки поступающих к откосу вод могут использоваться средства открытого водотлива, если удельные притоки не превышают критических. В противном случае целесообразно дополнительно использовать иглофильтровые установки.

Отметим, что для водоносных горизонтов большой мощности (более 30—40 м) на первых этапах вскрытия можно ориентировочно поддерживать уровень воды ниже дна разрезной траншеи. В тех случаях, когда породы

висячего и лежащего боков образуют единый водоносный горизонт, это условие может выполняться в течение всего строительного периода. Параметры системы скважин определяются по формулам (9.9) — (9.10).

После вскрытия водоносного горизонта осуществляется постепенный переход к дренажным системам, предусмотренным на период эксплуатации. При этом следует учитывать, что в первые годы эксплуатации (особенно со стороны рабочего борта) можно использовать те же дренажные системы, что и в период строительства.

Опыт работы многих карьеров показывает, что при экскаваторной выемке пород часто возможна их отработка и без предварительного дренажа, с использованием только открытого водоотлива. Это относится к тем случаям, когда породы, подлежащие дренированию, характеризуются малыми коэффициентами фильтрации (менее 3—5 м/сут) или образуют единый водоносный горизонт без разделяющих водоупорных слоев.

Вскрытие обводненных толщ экскаваторами без предварительного дренирования может осуществляться с помощью передовых дренажных траншей, проводимых драглайнами в подошве (углубляющегося) карьера. При этом минимальные размеры траншей выбираются с таким расчетом, чтобы на каждом этапе строительного периода развитие фильтрационных деформаций было в допустимых (по условиям горных работ) пределах.

Таким образом дренируется значительная часть статических запасов подземных вод, тяготеющих к карьеру, что дает большую экономию в электроэнергии, оборудовании и стоимости [34].

При использовании средств гидромеханизации единственная цель дренажа состоит в ограничении деформаций бортов и откосов в допустимых пределах. Применение способов гидромеханизации особенно целесообразно при вскрытии обводненных рыхлых пород, образующих один мощный водоносный горизонт. Так, опыт вскрытия Лебединского карьера КМА показывает, что средства гидромеханизации позволяют в этих условиях или вообще отказаться от глубинного дренажа, или существенно его сократить [24].

В заключение рассмотрим особенности вскрытия высоконапорных водоносных горизонтов. Для карьера, вскрывающего мощный и водообильный напорный горизонт, напоры должны быть предварительно снижены до величин, исключающих прорыв. Если же мощность гори-

зонта сравнительно невелика, то можно отказаться от длительного предварительного дренажа. Для водоносных горизонтов, приуроченных к сравнительно слабопроницаемым ( $K < 1-2$  м/сут) породам, в которых водопонижение с помощью обычных технических средств малоэффективно, предварительное водопонижение нецелесообразно при любой их мощности.

При этом в первый момент после вскрытия притоки в карьер могут быть довольно значительными; их величину можно определить по формуле (9.4). Однако пьезометрическая воронка быстро развивается на большие расстояния, в результате чего расходы резко убывают в течение короткого промежутка времени. Если объем водоприемного зумпфа в подошве разрезной траншеи соответствует величине ожидаемого суммарного притока и насосное оборудование подобрано правильно, то вскрытие напорного горизонта карьером в данном случае не вызывает опасений.

Наряду с осушением карьеров, в последние годы все большее значение приобретает водоснабжение предприятий и населения района. В этих условиях проблема рационального использования дренажных вод стоит особенно остро. Надо учитывать, конечно, и качество дренажных вод, которое определяется приуроченностью дренажа к конкретному участку карьерного поля (например, различаются воды рабочего и нерабочего бортов), типом дренажных устройств и последовательностью дренирования отдельных водоносных комплексов.

Для конкретного района возможны следующие варианты водозаборов — дренажей: использование для питьевого водоснабжения внешних дренажных контуров из водопонижающих скважин; использование воды дренажных штреков для технических целей, а при подключении сквозных фильтров к закрытому коллектору — и для хозяйственно-питьевых целей; постепенная замена на нерабочем борту сквозных фильтров горизонтальными скважинами с непосредственным подключением последних к сети водоснабжения.

В настоящее время на дренажных водах в районе КМА уже работают два хозяйственно-питьевых водозабора. Один из них сооружен на третьей очереди дренажного контура Южно-Лебединского карьера и состоит из 10 водопонижающих скважин, пройденных с поверхности; вокруг скважин создана санитарная зона строгого режима. Производительность водозабора составляет до

400 м<sup>3</sup>/ч. На соседнем Стойленском карьере из основного дренажного штрека пройдены восстающие скважины, воды которых стекают в закрытый коллектор и затем подаются на поверхность. Производительность водозабора около 300 м<sup>3</sup>/ч. Прогнозные оценки [3] показывают, что за счет карьерных и шахтных вод и существующих водозаборов потребности района КМА могут быть удовлетворены почти полностью.

## 11.6. ОСОБЕННОСТИ ОСУШЕНИЯ МЕСТОРОЖДЕНИЙ ТИПА Б

Основной особенностью осушения месторождений с наклонным залеганием слоев является возможность полного стока к дренажам подземных вод по наклонному водоупору и, как следствие этого, возможность полного устранения высачивания воды в откосах рабочих уступов (рис. 11.7). При прочих равных условиях, скорость дренирования тем выше, чем больше угол падения слоев.

С другой стороны, под влиянием напорных вод в лежащем боку происходят крупные глубинные оползни пород нерабочих бортов и внутренних отвалов. При этом решающее влияние на возникновение оползней такого рода оказывает не водообильность горизонта, а величина напора в нем. Допустимое значение остаточного напора определяется расчетным путем по условию устойчивости пород лежащего бока.

Исходя из сказанного, в породах висячего бока и пласте полезного ископаемого обычно эффективен опережающий дренаж. Для этого чаще всего целесообразна

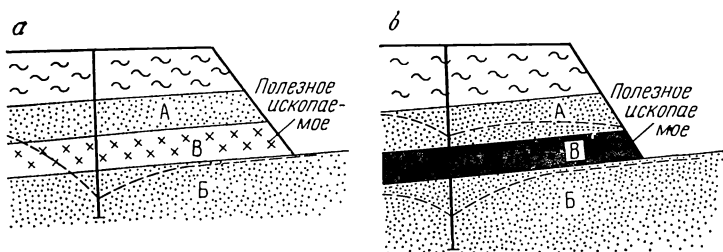


Рис. 11.7. Схемы водопонижения на рабочем борту:  
 а — при проницаемом полезном ископаемом; б — при водоупорном  
 А — налегающие водоносные породы; Б — подстилающие водоносные породы;  
 В — пласт полезного ископаемого



линейная система водопонижающих скважин. Первоначальное расстояние от ряда скважин до карьера следует принимать равным 5—7-летнему продвижению фронта работ. При синклинальном залегании пород и сравнительно малых размерах угленосной мульды (до 1—2 км в поперечнике) скважины следует располагать по оси мульды. Число скважин, необходимое для полного устраниения выхода воды в карьер, обратно пропорционально углу падения слоев [см. формулу (9.13)].

При малых углах падения ( $3\text{--}5^\circ$  и менее), а также при работах по восстанию пласта полезного ископаемого более целесообразной может оказаться подземная система осушения — линейный штрек, пройденный по продуктивной толще, который, при наличии в ней водоупорных прослоев, сочетается со сквозными фильтрами или восстающими и горизонтальными скважинами. Первоначальное удаление дренажного штрека от борта может приниматься равным 8—10-летнему продвижению фронта работ.

Для дополнительного осушения продуктивного пласта могут использоваться дренажные штреки и горизонтальные скважины, пройденные из карьера.

Открытый дренаж пород висячего бока рекомендуется в широких масштабах лишь при работах по восстанию пласта или при крутом падении водоносных слоев. Он осуществляется, как правило, непосредственно откосами открытых горных выработок.

В породах лежачего бока целесообразно предварительное снижение напора уже на первых этапах строительства карьера, исходя из упомянутых критериев, связанных с обеспечением устойчивости борта и внутренних отвалов [снижение уровня рассчитывается по формулам (9.9) или (9.10)]. Для снижения напоров в породах висячего бока можно использовать те же скважины, что и для снижения напора в породах висячего бока, а также обособленные системы самоизливающих или водопонижающих скважин, пробуренных параллельно фронту работ с подошвы карьера. Для дренажа водоносных пород, залегающих непосредственно в почве отработываемого пласта, можно использовать открытые траншеи.

В целом при наклонном и крутом падении слоев, по мере углубления и расширения карьера, можно успешно использовать водопонижающие и наклонные самоизливающие скважины, проходимые с площадок уступов и с подошвы карьера. В сочетании с открытыми водосборни-

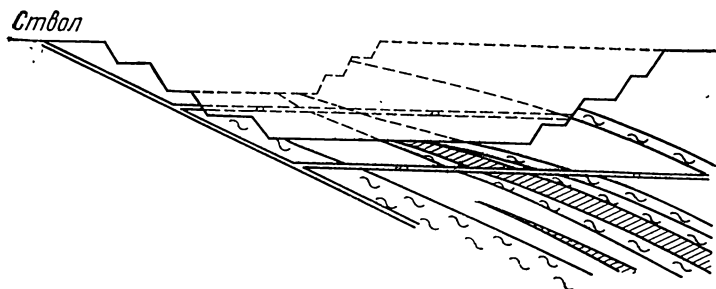


Рис. 11.8. Осушение карьера дренажными выработками

ками в карьере они позволяют наиболее четко увязать систему осушения с локальными гидрогеологическими структурами и отказаться от проходки подземных дренажных выработок. Нужно, однако, оговорить, что в условиях крутого падения вертикальные скважины оказываются достаточно эффективными лишь в мощных водоносных слоях, не имеющих промежуточных водонепроницаемых пропластков. В противном же случае основной упор в породах лежащего бока следует делать на самоизливающие наклонные скважины из карьера, а в породах висячего бока — на открытый дренаж\* или на системы подземных дренажных выработок, так как при проходке их вкрест простирания может быть пересечено большое число водоносных слоев (рис. 11.8). В тех же целях целесообразно из дренажных выработок, ориентированных по простиранию слоев, проходить горизонтальные и наклонные скважины.

## 11.7. ОСОБЕННОСТИ ДРЕНАЖА МЕСТОРОЖДЕНИЙ ТИПА В

Основной особенностью дренажа крепких и средней прочности трещиноватых пород является их слабая изменяемость в откосах под влиянием воды и в связи с этим свободное высачивание воды в открытые горные выработки. Другой важной особенностью является большая неоднородность трещиноватости пород.

Имеется множество примеров, характеризующих сильную неоднородность водообильности и проницаемо-

\* Если он допустим по условиям выемки полезного ископаемого.

сти трещиноватых пород различного литологического состава. Иногда на протяжении сотен метров подземные горные выработки проводят по породам, почти не содержащим гравитационной воды, и лишь при встрече закарстованных известняков и участков с интенсивной трещиноватостью, приуроченных чаще всего к зонам тектонических нарушений и к контактам различных литологических разностей пород, наблюдается значительная обводненность. Характерны случаи обводненности отдельных взрывных скважин при наличии рядом расположенных совершенно сухих.

Изложенные особенности комплексов твердых трещиноватых пород значительно ограничивают эффективность глубинного дренажа на месторождениях этого типа и чаще всего определяют их открытый дренаж как технически и экономически наиболее целесообразный.

Практика открытых разработок показывает, что применение открытого дренажа, как правило, не вызывает в этих условиях каких-либо существенных осложнений. Во-первых, водоносные породы в большинстве случаев вскрываются карьером при отсутствии высоких напоров в породах висячего бока, а во-вторых, возможный прорыв, при правильной организации работ, редко может привести к катастрофическим последствиям, так как в карьере имеется большое водоприемное пространство. Влияние воды на ведение буровзрывных работ также не может считаться определяющим для отказа от открытого дренажа: оно может быть устранено некоторым изменением технологии этих работ.

Нужно сказать, что на многих месторождениях рассматриваемого типа величины притоков подземных вод, в зависимости от количества атмосферных осадков, резко изменяются во времени; основное значение в этом случае имеют мероприятия по организации поверхностного стока, а глубинный дренаж, как правило, экономически нецелесообразен. Подобные условия характерны, например, для многих рудных карьеров Средней Азии и Казахстана.

Неизбежным является применение открытого дренажа (часто вместе с локальным глубинным дренажем) в породах, содержащих большое число водоносных зон, гидравлически слабо связанных друг с другом, когда невозможно заранее достаточно детально определить расположение обводненных участков. Если в этом случае имеются весьма водообильные зоны, то открытый

дренаж должен быть организован достаточно надежно. Объем водоприемников (зумпфов) следует выбирать со значительным запасом. Для более эффективного прогноза притоков необходимо бурить опережающие скважины непосредственно из забоя.

При встрече участков повышенной обводненности следует проводить локальное глубинное водопонижение скважинами, проходимыми с подошвы карьера. Такой локальный дренаж целесообразен в следующих случаях:

а) при наличии выявленных предварительными изысканиями зон с резко повышенной обводненностью или проницаемостью (зоны тектонического дробления, зоны закарстованных пород и т. д.);

б) когда в прибортовой зоне консервируются высокие напоры, обусловленные вертикальными или наклонными относительно водоупорными завесами; для снижения напоров проходятся самоизливающие скважины непосредственно из карьера;

в) при возможности полного осушения вскрышной толщи и полезного ископаемого малым числом водопонижающих скважин, пробуренных в подошву карьера.

В качестве примера можно привести Высокогорский железорудный карьер, который полностью осушался одной-двумя водопонижающими скважинами. Высокая эффективность водопонижения на этом карьере объясняется особенностями геологического строения месторождения. Карьер приурочен к полосе хорошо проницаемых известняков, ограниченной с обеих сторон комплексом слабопроницаемых пород; поэтому откачка воды из скважин, пройденных на известняки, позволила просто и эффективно решить проблему осушения месторождения.

Специфичными являются условия дренажа разрезной траншеи. Ввиду того, что притоки в карьеры, вскрывающие комплексы трещиноватых пород, в первые годы обусловлены главным образом статическими запасами подземных вод, величины водопритокков являются максимальными в период строительства карьера. Учитывая, кроме того, что трещиноватые породы чаще всего характеризуются небольшими статическими запасами вод и обычно хорошо дренируются сравнительно малыми средствами, во многих случаях целесообразно ориентироваться на глубинный дренаж разрезной траншеи, осуществляемый параллельно с ее проходкой. Для этого могут

использоваться водопонижающие скважины, пройденные на участке разрезной траншеи (с поверхности или с борма), причем можно ограничиться небольшим числом скважин — порядка трех—пяти, а иногда и меньше. Необходимое число скважин можно определить расчетным путем по формулам (9.9) или (9.10), задавая при этом положение уровней ниже дна разрезной траншеи.

Особое место среди твердых водоносных пород занимают карбонатные породы, которые во многих случаях характеризуются повышенной трещиноватостью и закарстованностью, большими статическими и динамическими ресурсами подземных вод. Поэтому комплексы карбонатных пород нередко целесообразно дренировать системами водопонижающих скважин и в эксплуатационный период.

Наоборот, в породах, обладающих сравнительно слабой трещиноватостью (ориентировочно с водоотдачей менее 0,5%), разрезная траншея может проводиться без глубинного дренажа. В этом случае откачка воды ведется из открытых водоприемников, расположенных в подошве разрезной траншеи.

#### **11.8. ДРЕНАЖ ВНУТРЕННИХ ОТВАЛОВ И ПОДОШВЫ КАРЬЕРА**

Основными мероприятиями по обеспечению устойчивости внутренних отвалов песчано-глинистых пород являются организация водоотвода в подошве карьера и дренаж основания отвалов для предупреждения дополнительного увлажнения отсыпаемых пород или снижения напоров в подошве карьера.

При залегании водоносного слоя непосредственно в подошве карьера наиболее целесообразен систематический дренаж: в выработанном пространстве проводятся канавы-осушители (рис. 11.9) вдоль фронта работ на отвале с уклоном к канавам-собираателям, которые располагаются перпендикулярно к фронту работ на наиболее низких участках выработанного пространства и обеспечивают сток воды к водосборникам.

Глубина канав-осушителей зависит от требуемого снижения уровней и принятого расстояния между ними; обычно она не превышает 2—3 м. Расстояние между ка-

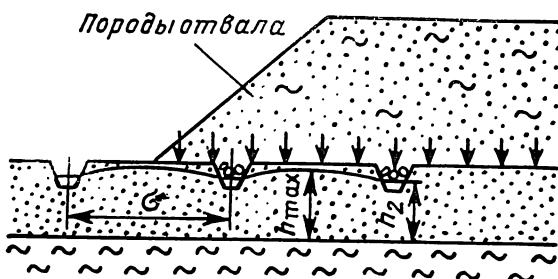


Рис. 11.9. Схема систематического дренажа отвалов:  
 $h_2$  — уровень воды в канавах;  $h_{\max}$  — максимальный уровень грунтовых вод после проведения дренажных работ

навами-осушителями с чаще всего принимается равным ширине заходки.

Для сохранности канавы заполняются фильтрующим материалом или в них укладываются трубы. Во избежание заиливания, сверху укладывается слой песка мощностью 0,5—1,0 м.

Организация систематического дренажа заметно осложняется при бестранспортной системе разработки с частичной подвалкой нижней, наиболее обводненной части разрабатываемого пласта полезного ископаемого. В этом случае дренажные каналы должны проводиться сразу вслед за добычным экскаватором и засыпаться дренажным материалом. Если под отвалами остаются небольшие целики угля, не позволяющие осуществлять непрерывную проходку канав-собирателей, то целики должны прорезаться короткими штольнями, в почве которых также укладывается дренажный слой.

При отсыпке отвалов на водоупорное основание дренажные мероприятия в подошве карьера необходимы лишь при наличии под водоупором напорного горизонта, заметно влияющего на устойчивость отвалов. Дренаж осуществляется трубчатыми водопонижающими колодцами — самоизливающими или оборудованными насосами, которые располагаются в выработанном пространстве параллельно линии отвалов и добуриваются по мере подвигания фронта работ.

Если же в снижении напоров нет необходимости, то ограничиваются организацией водоотвода в подошве карьера с помощью неглубоких канав, которые перед засыпкой отвалами заполняются дренажным материалом.

Однако необходимо иметь в виду, что для ускорения консолидации основания и глинистых пород отвалов нередко необходимы специальные мероприятия, снижающие избыточное поровое давление: селективная отсыпка вскрышных пород для создания в отвале отдельных фильтрующих (песчаных) прослоев, устройство дренажных насыпей из гравия (щебня) или сплошных песчаных подушек в основании отвалов (мощность песчаного слоя может приниматься относительно небольшой — 50—80 см). При отсыпке отвалов на основание из скальных или полускальных пород дренирующий слой в их подошве может быть создан также путем рыхления основания буровзрывным способом.

Для уменьшения величины инфильтрации атмосферных осадков целесообразно, по возможности, планировать поверхность отвалов на участках, прилегающих к откосу.

#### **11.9. ОРГАНИЗАЦИЯ ПОВЕРХНОСТНОГО И ВНУТРИКАРЬЕРНОГО СТОКОВ**

Регулирование поверхностного стока дождевых, талых и технических вод должно производиться в пределах самого карьера и в пределах прилегающей полосы вокруг него на расстоянии не менее 150—200 м при наличии слабopоницаемых покровных отложений и 400—300 м — при отсутствии таковых.

При наклонном залегании слоев мероприятия по регулированию поверхностного стока должны проводиться с максимальной интенсивностью на прилежащих к карьеру участках выходов водоносных слоев на поверхность. На месторождениях типа В, при малой мощности покровных отложений глинистого состава, регулировка поверхностного стока приобретает особое значение, так как поступление атмосферных или талых вод может привести к быстрому подъему уровней в трещиноватых породах.

Мероприятия по регулированию поверхностного стока включают: устройство нагорных и водоспускных канав, планировку территории вокруг карьера (с приданием поверхности уклона в сторону нагорных канав), а также планировку площадок уступов. Уклоны, придаваемые канавам, должны гарантировать отсутствие эрози-

онного размыва [30]. На откосах уступов через 200—300 м необходимо предусматривать ливнестоки.

Система отвода дождевых, талых и технических вод должна увязываться со всей системой дренажа и внутрикарьерного водоотвода. При этом в ряде случаев целесообразно применение единых водоотливных средств путем использования общих водосборников и насосов, устройство водосбросных скважин из карьера (на подземные дренажные выработки) и т. д.

Мероприятия по организации внутрикарьерного стока должны в первую очередь предотвращать свободное стекание высачивающихся вод по откосам бортов карьера. Несоблюдение этого требования приводит к развитию различного рода деформаций, начиная от размыва откосов и кончая оползнями уступов набухающих глинистых пород. Кроме того, стекающая вода, скапливаясь на площадках добычных уступов и в их основании, приводит к дополнительному увлажнению полезного ископаемого.

Вытекающие на откос воды должны поступать в водосборники по специальным водоотводным устройствам (закрытым и открытым канавам, трубопроводам и т. п.).

Для централизации водоотлива иногда целесообразно проведение специальных водоотводных выработок под подошвой карьера, на которые из отдельных открытых водосборников бурятся водосбросные скважины. Особенно часто необходимость в этом возникает при наличии внутренних отвалов (в частности, при работах с подвалкой обводненных пород), если из-за сложной гипсометрии водоупорных пород в подошве карьера самотечный водоотвод невозможен.

Схемы водоотвода должны увязываться с проектными схемами ведения горных работ. Так, при пологом залегании пласта полезного ископаемого, когда в ряде случаев технически невозможно организовать водоотвод в карьере с помощью профилированных канав (при большой длине фронта горных работ, невыдержанной гипсометрии почвы пласта полезного ископаемого и т. д.), самотечный внутрикарьерный водоотвод может быть обеспечен за счет размещения вскрывающих выработок под углом по отношению к изогипсам почвы пласта полезного ископаемого.

Важное значение имеет учет гипсометрии почвы пласта полезного ископаемого для организации водоотвода на карьерах с веерным перемещением фронта гор-



ных работ. В этом случае при выборе варианта вскрытия и общей схемы развития работ должна учитываться целесообразность расположения поворотного пункта карьера в наинизшей части почвы карьерного поля на весь срок его эксплуатации.

Применение бестранспортных систем разработки с подвалкой откоса добычного уступа при отработке месторождений по восстанию гипсометрии почвы пласта обводненного полезного ископаемого крайне нежелательно. В этом случае создание приемлемой схемы водоотвода весьма затруднительно.

Откачиваемые на поверхность подземные воды, не используемые для водоснабжения, должны сбрасываться в реки или водоемы, если это доступно по санитарным условиям. В прочих случаях (при отсутствии близкорасположенных рек и водоемов или при опасности их загрязнения) следует устраивать пруды-аккумуляторы, приуроченные к естественным впадинам или оконтуренные ограждающими дамбами. Для снижения до минимума вторичного поглощения воды пруды-аккумуляторы необходимо располагать на слабопроницаемых покровных отложениях.

Аналогично при отводе и осушении рек и водных коллекторов (озер, прудов, болот) следует тщательно изолировать русла отводных каналов, которые являются дополнительным источником питания подземных вод и нередко вызывают в связи с этим оползневые деформации.

В целом следует особое внимание уделять мероприятиям по отводу поверхностных вод и по организации внутрикарьерного стока: пренебрежение этими мероприятиями часто сводит на нет работу мощных и дорогих дренажных устройств, предназначенных для борьбы с подземными водами.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Арсентьев А. И.* Об устойчивости потолочин при камерных системах разработки. — В кн.: Вопросы разрушения и давления горных пород. М., Углетехиздат, 1955, с. 243—251.
2. *Арсентьев А. И.* Учет уровня риска и фактора времени при расчете устойчивости борта карьера. — В кн.: Физические процессы горного производства, вып. 6, М., изд. ЛГИ, 1979, с. 29—33.
3. *Гидрогеологические исследования в горном деле.* М., Недра, 1976.
4. *Голицын В. В.* Нахождение параметров открытой разработки с обрушением пород моделированием. Изв. вузов, Горный журнал, № 6, 1964, с. 12—15.
5. *Демин А. М.* Устойчивость открытых горных выработок и отвалов. М., Недра, 1973.
6. *Ермаков И. И.* О влиянии кривизны борта на его устойчивость. Труды ВНИМИ, сб. ЛII, Л., 1964, с. 242—249.
7. *Звонарев Н. К.* Методика обоснования величины коэффициента запаса устойчивости бортов карьеров. Труды ВНИМИ, сб. ЛII, Л., 1972, с. 38—43.
8. *Кобранова В. Н., Лепарская Н. Д.* Определение физических свойств горных пород. М., Гостоптехиздат, 1957.
9. *Ломтадзе В. Д.* Инженерная геология. М., Недра, 1970.
10. *Маляров Ю. А.* Техничко-экономические аспекты управления состоянием бортов карьеров в скальных и полускальных породах. Автореф. дисс. на соиск. уч. степ. канд. техн. наук, М., изд. МГИ, 1973.
11. *Маслов Н. Н.* Условия устойчивости склонов и откосов в гидроэнергетическом строительстве. М., Госэнергоиздат, 1955.
12. *Маслов Н. Н.* Основы механики грунтов и инженерной геологии. М., Стройиздат, 1968.
13. *Маслов Н. Н.* Механика грунтов в практике строительства. М., Стройиздат, 1977.
14. *Методические указания по определению углов наклона бортов, откосов, уступов и отвалов строящихся и эксплуатируемых карьеров.* Л., изд. ВНИМИ, 1972.
15. *Методическое пособие по изучению инженерно-геологических условий месторождений полезных ископаемых, подлежащих разработке открытым способом.* Л., изд. ВНИМИ, 1965.
16. *Методическое руководство по искусственному укреплению откосов скальных и полускальных пород на карьерах.* Л., изд. ВНИМИ, 1967.
17. *Мироненко В. А., Шестаков Б. М.* Основы гидрогеомеханики. М., Недра, 1974.
18. *Мироненко В. А., Румынин В. Г., Учаев В. К.* Охрана подземных вод в горнодобывающих районах. Л., Недра, 1980.
19. *Мюллер Л.* Инженерная геология, М., Мир, 1971.
20. *Нурок Г. А.* Гидромеханизация горных работ. М., Недра, 1965.

21. *Определение* главных параметров карьера / А. И. Арсентьев, О. В. Шпанский, Г. П. Константинов и др. М., Недра, 1976.

22. *Основы управляемого обрушения уступов на открытых разработках* / М. Г. Новожилов, Б. Н. Тартаковский, В. Д. Кирилюк и др. Киев, Наукова думка, 1967.

23. *Падуков Б. А.* Методы прогноза устойчивости бортов карьеров. — В кн.: Физические процессы горного производства, вып. 7. Л., изд. ЛГИ, 1979, с. 49—53.

24. *Писанец Е. П., Мироненко В. А.* Водопонижение на карьерах КМА. М., Недра, 1968.

25. *Пустовойтова Т. К., Пашкевич А. В.* К расчету предельной высоты отвалов на неустойчивом основании. Труды ВНИМИ, сб. XLV, Л., 1962, с. 123—132.

26. *Руководство по определению оптимальных углов наклона бортов карьеров и откосов отвалов*, Л., изд. ВНИМИ, 1962.

27. *Сапожников В. Т.* Исследование и разработка методов расчета устойчивости бортов карьеров и отвалов в сложных горно-геологических условиях. Дисс. на соиск. уч. степ. д-ра техн. наук. Свердловск, изд. ВНИМИ, Уральский филиал, 1973.

28. *Сапожников В. Т.* Расчет бортов погашения выпуклого профиля для открытых разработок полезных ископаемых. — Изв. вузов, Горный журнал № 8, 1960, с. 15—23.

29. *Соколовский В. В.* Статика сыпучей среды. М., Физматгиз, 1960.

30. *Справочное руководство гидрогеолога*. Л., Недра, 1967.

31. *Турчанинов И. А., Медведев В. В., Панин В. Н.* Современные методы комплексного определения физических свойств горных пород. Л., Недра, 1967.

32. *Фисенко Г. Л.* Устойчивость бортов карьеров и отвалов. М., Недра, 1965.

33. *Фисенко Г. Л., Голицын В. В., Бряков С. П.* Использование оползней при отработке вскрыши. Материалы совещания по вопросам изучения устойчивости откосов на карьерах. Белгород, изд. ВИОГЕМ, 1967.

34. *Фисенко Г. Л., Мироненко В. А.* Дренаж карьерных полей, М., Недра, 1972.

35. *Фисенко Г. Л., Ревазов М. А., Галустьян Э. Л.* Укрепление откосов в карьерах. М., Недра, 1974.

36. *Цытович Н. А.* Механика грунтов. М., Высшая школа, 1968.

# ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие . . . . .	3
-----------------------	---

## РАЗДЕЛ I

### Деформации бортов карьеров и отвалов

1. Физико-механические свойства горных пород . . . . .	5
1.1. Общие положения . . . . .	5
1.2. Плотностные свойства горных пород . . . . .	7
1.3. Физико-механические свойства горных пород . . . . .	9
1.4. Деформационные свойства горных пород . . . . .	15
1.5. Горнотехнические свойства горных пород . . . . .	19
2. Физико-механические свойства массива горных пород . . . . .	22
2.1. Трещиноватость массива горных пород . . . . .	22
2.2. Прочность массива горных пород . . . . .	24
2.3. Деформируемость массива горных пород . . . . .	25
3. Основные виды нарушений устойчивости бортов карьеров и отвалов . . . . .	26
3.1. Изменение напряженного состояния массива пород при ведении открытых горных работ . . . . .	26
3.2. Оползни бортов карьеров . . . . .	30
3.3. Деформация бортов карьеров под влиянием воды . . . . .	38
3.4. Осыпи, просадки, осадки . . . . .	45
3.5. Оползни отвалов . . . . .	47
3.6. Технологические последствия оползневых деформаций . . . . .	52

## РАЗДЕЛ II

### Расчет устойчивости откосов

4. Расчет устойчивости методом предельного напряженного состояния . . . . .	53
4.1. Исходные данные, необходимые для расчета . . . . .	53
4.2. Коэффициент запаса устойчивости . . . . .	56
4.3. Расчет откоса вогнутого профиля (метод В. В. Соколовского) . . . . .	58
4.4. Расчет откосов выпуклого профиля . . . . .	59
4.5. Расчет откосов плоского профиля . . . . .	62

<b>5. Инженерные методы расчета . . . . .</b>	<b>63</b>
5.1. Общие сведения . . . . .	63
5.2. Оценка устойчивости откоса при плоской поверхности скольжения (метод П. М. Цимбаревича) . .	63
5.3. Оценка устойчивости откоса при круглоцилиндрической или плавной криволинейной поверхности скольжения . . . . .	65
5.4. Определение параметров борта карьера, сложенного горизонтальными или пологопадающими слонстыми породами . . . . .	72
5.5. Расчет устойчивости откосов при наличии поверхностей ослабления . . . . .	73
5.6. Учет фактора времени и вероятностного характера исходных данных . . . . .	75
5.7. Учет дополнительных нагрузок . . . . .	79
5.8. Учет криволинейности борта карьера . . . . .	83
5.9. Принятие решения о конструкции борта карьера .	84
5.10. Расчет устойчивости отвалов . . . . .	85

### РАЗДЕЛ III

#### Обеспечение устойчивости бортов карьеров и отвалов

<b>6. Обеспечение устойчивости откосов при производстве горных работ . . . . .</b>	<b>89</b>
6.1. Обеспечение устойчивости бортов при ведении буровзрывных работ . . . . .	89
6.2. Устройство устойчивого профиля борта . . . . .	92
6.3. Выбор последовательности отработки карьерного поля с учетом устойчивости откосов . . . . .	93
6.4. Горные работы на оползневых участках . . . . .	95
<b>7. Искусственное укрепление откосов . . . . .</b>	<b>96</b>
7.1. Механические способы укрепления откосов . . .	96
7.2. Упрочнение массива горных пород и изоляция пород откосов . . . . .	102
<b>8. Методы обеспечения устойчивости отвалов . . . . .</b>	<b>104</b>
8.1. Подготовка поверхности основания отвала . . .	104
8.2. Влияние технологии отсыпки отвалов на их устойчивость . . . . .	106

## РАЗДЕЛ IV

### Осушение карьерных полей

<i>9. Горные породы и вода</i> . . . . .	110
9.1. Роль воды в характере структурных связей горных пород . . . . .	110
9.2. Виды воды в горных породах . . . . .	111
9.3. Основные представления о движении подземных вод . . . . .	114
9.4. Простейшие расчеты водопритоков к карьерам и дренажным системам . . . . .	118
<i>10. Общие вопросы дренажа карьерных полей</i> . . . . .	124
10.1. Задачи дренажа и его значение для горных работ	124
10.2. Значение дренажа для обеспечения устойчивости откосов . . . . .	128
10.3. Технические средства осушения . . . . .	130
10.4. Вопросы охраны и рационального использования подземных вод в горнодобывающих районах . . . .	133
10.5. Классификация месторождений по условиям осушения . . . . .	134
<i>11. Схемы осушения карьерных полей</i> . . . . .	137
11.1. О целесообразности дренажа горных пород на месторождениях типа А . . . . .	137
11.2. Дренаж нерабочего борта . . . . .	139
11.3. Дренаж рабочего борта карьера . . . . .	141
11.4. Дренаж пласта полезного ископаемого . . . . .	146
11.5. Дренаж разрезной траншеи . . . . .	148
11.6. Особенности осушения месторождений типа Б . . . .	151
11.7. Особенности дренажа месторождений типа В . . . .	153
11.8. Дренаж внутренних отвалов и подошвы карьера . . .	156
11.9. Организация поверхностного и внутрикарьерного стоков . . . . .	158
Список литературы . . . . .	161

АЛЕКСАНДР ИВАНОВИЧ АРСЕНТЬЕВ  
ИГОРЬ ЮРЬЕВИЧ БУКИН  
ВАЛЕРИЙ АЛЕКСАНДРОВИЧ  
МИРОНЕНКО

**УСТОЙЧИВОСТЬ БОРТОВ И ОСУШЕНИЕ  
КАРЬЕРОВ**

Редактор издательства А. П. Крылова  
Обложка художника В. П. Христинина  
Художественный редактор О. Н. Зайцева  
Технический редактор М. И. Сырова  
Корректор И. Ю. Каменская

ИБ № 2809

---

Сдано в набор 28.02.82.  
Подписано в печать 19.05.82. Т-08093  
Формат 84×108<sup>1</sup>/<sub>32</sub> Бумага тип. № 2.  
Гарнитура «Литературная» Печать высокая  
Усл. печ. л. 8,82 Усл. кр.-отт. 9,03 Уч.-изд. л. 8,55  
Тираж 5700 экз. Заказ 104/7264—10 Цена 30 коп.

---

Ордена «Знак Почета»  
издательство «Недра», 103633,  
Москва, К-12, Третьяковский проезд, 1/19

Подольский филиал ПО «Периодика»  
Союзполиграфпрома  
при Государственном комитете СССР  
по делам издательств, полиграфии и книжной  
торговли  
г. Подольск, ул. Кирова, д. 25

**Уважаемый товарищ!**

**ИЗДАТЕЛЬСТВО «НЕДРА»  
ГОТОВИТ К ПЕЧАТИ НОВЫЕ КНИГИ**

**ГРАЧЕВ Ф. Г.**

**Теория и практика усреднения качества минерального сырья.  
19 л. 3 р.**

Рассмотрены вопросы теории и практики усреднения качества сырья на открытых разработках. Проанализированы требования к качеству сырья. Сформулированы структура, цель и критерий системы комплексного управления качеством сырья в увязке с природными, техническими, технологическими и экономическими факторами. Предложены расчетные методы технологии и организации внутрикарьерного усреднения. Даны основы проектирования централизованных рудоподготовительных комплексов.

Для работников научно-исследовательских и проектных институтов и инженерно-технических работников предприятий горнодобывающей промышленности.

**ПАРУНАКЯН В. Э.**

**Комплексная механизация путевых работ на карьерах,  
20 л. 1 р. 40 к.**

Дана оценка состояния технической оснащенности, технологии и организации путевых работ на карьерах. Изложены методы оптимизации путепереукладочных работ, определения их показателей и оптимальных параметров путепереукладочных машин. Рассмотрены технологические схемы путевых работ и вопросы совершенствования организации текущего содержания пути, принципы планирования и управления путевыми работами, технико-экономической оценки эффективности мероприятий по комплексной механизации путевых работ на карьерах.

Для инженерно-технических работников карьеров, научно-исследовательских и проектно-конструкторских организаций горнодобывающих отраслей промышленности.



**ПЕРЕТОЛЧИН В. А.**

**Вращательное и шарошечное бурение скважин на карьерах.**  
10 л. 50 к.

Рассмотрены вопросы выбора параметров и расчета показателей работы систем транспортирования буровой мелочи воздухом и шнеками при бурении скважин на карьерах. Приведены конструкции бурового инструмента для бурения скважин с продувкой и шнековой очисткой, определены область их рационального применения и пути повышения стойкости. Освещен опыт эксплуатации станков и отработки бурового инструмента в различных горно-геологических условиях.

Для инженерно-технических работников карьеров, проектных и конструкторских организаций.

**ШАДРИН Н. М.**

**Справочник мастера и бригадира тяговой сети карьеров.**  
12 л., 60 к.

Изложены общие сведения об электровозном транспорте на карьерах; приведены материалы по опорно-поддерживающим конструкциям, проводам, тросам и деталям контактной сети карьеров, а также технические нормы их содержания. Описан монтаж тяговой сети, даны машины и механизмы для монтажа стационарной тяговой сети и передвижной боковой контактной сети. Приведены приемы и правила обслуживания и ремонта тяговой сети, требования техники безопасности при работах на контактной сети. Кратко изложены требования, предъявляемые при приеме работ по тяговым сетям.

Для мастеров, бригадиров и монтажно-эксплуатационного персонала тяговой сети карьеров.

*Интересующие Вас книги Вы можете приобрести в местных книжных магазинах, распространяющих научно-техническую литературу, или заказать через отдел «Книга-почтой» магазинов:*

*№ 17 — 199178, Ленинград, В. О., Средний проспект  
61;*

*№ 59 — 127412, Москва, Коровинское шоссе, 20.*

Издательство «Недра»

30 коп.

НЕДРА