Г. Л. ФИСЕНКО

УСТОЙЧИВОСТЬ БОРТОВ КАРЬЕРОВ И ОТВАЛОВ

2-е издание
переработанное и дополненное

ИЗДАТЕЛЬСТВО „НЕДРА"
Москва 1965

УДК. 622.271.001.5

АННОТАЦИЯ

В книге рассматриваются вопросы устойчивости бортов карьеров и отвалов.

В ней подробно описаны оползни различных видов, условия их образования и меры борьбы с ними, в том числе вопросы дренирования карьерных полей; излагается методика определения физико-механических свойств горных пород, влияющих на устойчивость откосов, и приводятся результаты этих определений; рассмотрены методы расчета углов наклона бортов и откосов отвалов.

Книга предназначается для инженерно-технических работников, ведущих проектирование, строительство и эксплуатацию карьеров; она может быть полезной также при разведке карьерных полей и студентам специальностей открытой разработки полезных ископаемых и инженерной геологии.

ВВЕДЕНИЕ

Устойчивость бортов карьеров и отвалов является одним из основных вопросов при разработке месторождений полезных ископаемых открытым способом.

С устойчивостью бортов карьеров и отвалов связаны безопасность работ в карьерах, вопросы технологии, предельные углы наклона бортов, предельная глубина карьеров и дренирование месторождений.

При большой глубине карьеров изменение предельного угла наклона бортов на 3—4° приводит к изменению объема вскрышных работ на миллионы кубометров; например, при глубине карьера 300 *м* увеличение угла наклона борта с 30 до 34° приводит к сокращению объема вскрышных работ на 10,8 млн. $м^3$ на 1 *км* протяженности борта. Если учесть, что углы наклона бортов в некоторых случаях принимаются на 8—10° меньше допустимых, а протяженность бортов действующих и строящихся карьеров измеряется сотнями километров, то станет очевидным большое народнохозяйственное значение определения максимальных углов наклона устойчивых бортов карьеров.

Завышенные углы откосов приводят к возникновению оползней и обрушений, которые причиняют большой ущерб предприятиям: нарушают нормальный технологический процесс добычных и вскрышных работ, ведут к большим потерям готового к выемке полезного ископаемого и вызывают необходимость многократной перевалки оползающих масс; обрушения бортов с углами более 30—34° представляют опасность для работающих в карьере людей и механизмов.

Установление максимальных углов наклона бортов карьеров, при которых обеспечивается их устойчивость, требует детального изучения в период разведки месторождений всех факторов, оказывающих влияние на величину углов: литологии, физико-механических свойств горных пород, трещиноватости, тектоники и обводненности.

Все эти факторы при разведке месторождений до настоящего времени не изучаются с необходимой полнотой, поэтому во многих случаях углы наклона бортов и откосов уступов устанавливаются без учета этих факторов или для определения углов производятся

дорогостоящие специальные инженерно-геологические изыскания, во многом дублирующие геологоразведочные работы. В первой части излагаются основные требования к изучению инженерно-геологических условий месторождений, которое производится в период разведки месторождений.

Неотъемлемой частью вопроса устойчивости бортов карьеров являются методы расчета углов откосов и углов наклона бортов карьеров. С одной стороны, стремятся применять так называемые «строгие» методы расчета, разработанные пока только для откосов, сложенных однородными изотропными породами; с другой стороны, часто «заманчивыми» оказываются методы более простые в использовании, но имеющие большие математические погрешности.

В работе излагаются условия применимости строгих методов расчета и рекомендуются так называемые инженерные методы расчета устойчивости откосов, достаточно точные и применимые для реальных геологических условий.

Основой инженерных методов расчета устойчивости откосов и требований к инженерно-геологической изученности месторождений, подлежащих открытой разработке, явилось многолетнее изучение оползневых явлений, возникающих на карьерах.

Характер деформаций откосов, возникающих на карьерах, их причины и условия возникновения явились также основой при разработке мероприятий по предотвращению деформаций, в том числе и по дренированию карьерных полей, а также по искусственному укреплению откосов.

В работе в основном обобщены результаты работ лаборатории устойчивости бортов карьеров института ВНИМИ, руководимой автором, которой за период с 1950 по 1964 г. проведены исследования на 12 угольных бассейнах и месторождениях и на 35 рудных месторождениях.

При организации и проведении этих исследований на карьерах, естественно, использовался опыт гидротехнического и промышленного строительства.

При изучении физико-механических свойств пород исходными являлись работы М. Н. Герсеванова, Н. А. Цытовича, Е. М. Сергеева, М. Н. Гольдштейна, Н. Н. Маслова, Н. Я. Денисова, В. Д. Ломтадзе и ряда других советских ученых. При разработке методов расчета углов откосов за основу были приняты работы В. В. Соколовского, С. С. Голушкевича, Г. М. Шахунянца и В. Фелленниуса.

Весь материал книги разделен на четыре части. В первой части изложены общие вопросы устойчивости откосов горных пород, факторы, влияющие на устойчивость бортов карьеров и геологические вопросы.

Во второй части изложена методика и результаты изучения физико-механических свойств горных пород, оказывающих влияние на устойчивость откосов, в том числе и натурных испытаний

сопротивления сдвигу с учетом трещиноватости и слоистости горных пород.

Третья часть посвящена вопросам развития деформаций бортов карьеров, их классификации, причинам возникновения и мерам борьбы с ними. Изучение деформаций осуществляется путем постановки инструментальных наблюдений на бортах карьеров и изучения инженерно-геологических условий деформирующихся участков. Большое значение придается маркшейдерским наблюдениям за устойчивостью бортов.

Во многих случаях хорошо поставленные наблюдения дают возможность установить оптимальные углы наклона бортов с минимальным коэффициентом запаса; при этом используется ползучесть горных пород; даже в скальных породах опасным деформациям предшествуют длительно развивающиеся микродеформации, по величине которых можно установить предельные углы наклона.

При изложении вопросов дренирования карьерных полей рассматриваются принципиальные схемы дренирования, при которых с минимальными затратами на дренаж достигается устойчивость откосов; конструкции дренажных сооружений в этой части не рассматриваются, так как они разрабатываются рядом специализированных организаций.

В четвертой части рассмотрены методы и порядок расчета углов наклона бортов карьеров, откосов уступов и отвалов.

Рекомендуемые для реальных геологических условий методы расчета математически обоснованы, проверены на моделях и на примерах наблюдаемых деформаций бортов.

Рассматриваемая работа, по существу, является переработанным и в значительной степени расширенным вторым изданием книги «Устойчивость бортов угольных карьеров», изданной в 1956 г. Однако и в настоящем издании не все вопросы, связанные с устойчивостью бортов карьеров, рассмотрены с необходимой полнотой, так как многие из этих вопросов еще слабо изучены.

В частности, нет достаточных данных по устойчивости бортов в условиях вечной мерзлоты, нет количественной оценки влияния времени на процесс выветривания горных пород в бортах карьеров, не изучена количественная зависимость набухания глинистых пород от состава обменных катионов и др.

В связи с широким кругом вопросов, связанных с устойчивостью бортов карьеров, в ~~ней~~ книге не анализируются работы других исследователей в этой области. Это, конечно, не означает, что автором игнорировались другие работы; в процессе исследований использовалось все прогрессивное из отечественного и зарубежного опыта.

Все замечания, направленные на улучшение книги, автор примет с благодарностью. Автор выражает искреннюю благодарность проф. С. И. Попову, высказавшему ряд полезных советов при рецензировании рукописи.

ЧАСТЬ ПЕРВАЯ

ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ И ГЕОЛОГИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ

Глава I

ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

§ 1. Горные породы — слоистая трещиноватая среда

При расчетах устойчивости обнажений горных пород ряд авторов рассматривают горные породы в массиве как однородное упругое твердое тело, другие принимают их за пластическую среду, третьи — как среду сыпучую. Акад. А. П. Герман по этому поводу отмечал, что «Практическая ценность должна быть признана за тем методом, который учитывает естественные условия залегания пород и в то же время дает эффективные способы расчета» [25].

Большинство методов оценки устойчивости откосов не учитывают естественной структуры пород (слоистости, отдельности и трещиноватости) и характера их прочности, что приводит к большим ошибкам при расчетах. В зависимости от условий, горные породы могут разрушаться путем отрыва под влиянием нормальных растягивающих напряжений или путем среза под влиянием касательных напряжений.

Особенностью горной породы, даже ее монолитного образца, является значительно меньшая прочность на растяжение, чем на сжатие и на срез.

Горные породы в массиве оказывают совсем незначительное сопротивление отрыву, что объясняется их слоистым сложением и трещиноватостью.

С точки зрения прочности горные породы нельзя рассматривать ни как однородную упругую среду, ни как среду, представленную монолитными слоями. В общем виде горные породы в массиве необходимо рассматривать как слоистую трещиноватую среду, не допускающую, за редкими исключениями, растягивающих напряжений.

В известных методах расчета устойчивости сооружений этими свойствами обладает так называемая «сыпучая среда», которую В. В. Соколовский характеризует как среду, не допускающую больших растягивающих напряжений (которыми при расчетах можно пренебречь) в отличие от однородных упругих твердых тел, оди-

наково сопротивляющихся растягивающим и сжимающим напряжениям. Часто «сыпучая среда» понимается как среда, абсолютно не имеющая связности и характеризующаяся в обнажениях только углом внутреннего трения. В действительности такое состояние является частным случаем «сыпучей среды».

В теории сыпучей среды не учитывается сопротивление отрыву; сопротивление же сжатию и срезу может достигать больших величин. Горные породы в массиве также реагируют на напряжения и в этом отношении их можно принимать как «сыпучую среду». Однако, так как этот термин не отражает физического состояния горных пород и может вызвать некоторые недоразумения, горные породы лучше характеризовать как слоистую трещиноватую среду, к которой в механическом отношении применимы законы «сыпучей среды».

С. С. Голушкевич вместо термина «сыпучая среда» пользуется термином «грунтовая масса» [31], а С. И. Попов рекомендует пользоваться терминами «породная масса» или «связно-сыпучая среда», однако все эти термины создают представление о горных породах как о сплошной однородной среде, не отражая слоистости и трещиноватости, нарушающих непрерывность их деформаций.

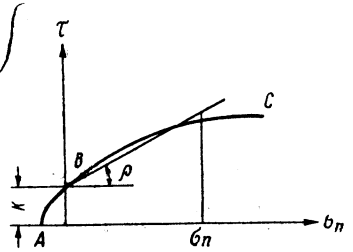


Рис. 1. Общий вид графика сопротивления сдвигу горных пород

Определение углов и предельных очертаний откосов горных пород представляет собой частный случай теории предельного равновесия «сыпучей среды».

Основное условие предельного равновесия по любой площадке в массиве откоса (борта карьера) имеет вид

$$\tau = \varphi(\sigma_n),$$

где τ и σ_n — касательное и нормальное напряжения по заданной площадке.

Эта зависимость для любой горной породы характеризуется монотонной кривой ABC (рис. 1), которая при заданных пределах напряжений может быть заменена прямой

$$\tau = K + f\sigma_n, \qquad (1)$$

где K — сцепление, выражающееся в тех же единицах, что τ и σ_n;
f — средняя величина коэффициента внутреннего трения на заданном интервале напряжений (в расчетах обычно заменяется углом внутреннего трения $f = \operatorname{tg} \rho$).

§ 2. Основные сведения о напряжениях

В теории напряжений все внешние силы, приложенные к телу, разделяют на поверхностные и объемные. При исследовании устойчивости бортов карьеров объемными силами являются сила

тяжести, сила гидродинамического давления фильтрующегося потока грунтовых вод и сейсмические силы. Поверхностными силами являются внешние нагрузки (вес оборудования и сооружений), а также давление горных массивов, прилегающих к рассматриваемой области горных пород.

Действию внешних сил, распределенных по заданной площадке, противостоят внутренние силы, которые называют напряжениями, если они отнесены к единице площади.

Внутренние силы уравновешивают внешние и в статике равны между собой и противоположны по направлению.

В условиях равновесия сил по рассматриваемой площадке к ней могут быть приложены только такие внешние силы, которые полностью уравновешиваются внутренними силами, максимальные величины которых определяются прочностью материала (горной породы). Таким образом, максимальные (предельные) величины напряжений, которые могут возникать в любой точке горной породы, зависят от ее прочности и определяют ее.

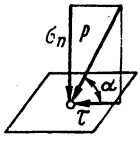


Рис. 2. Напряжения на элементарной площадке

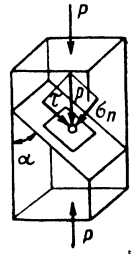


Рис. 3. Напряжения в элементарном блоке

Внешние силы, приложенные к заданным площадкам, и вызываемые ими напряжения могут иметь различное направление относительно заданной площадки.

Напряжения p, направленные под углом α к заданной площадке, могут быть разложены на нормальные σ_n и касательные τ компоненты (рис. 2).

$$\sigma_n = p \sin\alpha; \quad \tau = p \cos\alpha. \tag{2}$$

Если рассматривать напряжения в элементарном блоке сечением S под воздействием двух противоположно направленных сил P, направление которых совпадает с осью блока (рис. 3), то напряжение по поперечному сечению блока будет

$$\sigma_1 = \frac{P}{S}, \tag{3}$$

а напряжение p по любому другому сечению, наклоненному к оси блока под углом α, выразится как

$$p = \sigma_1 \sin\alpha. \tag{4}$$

Касательные и нормальные напряжения по этой площадке можно представить в виде

$$\sigma_n = \sigma_1 \sin^2\alpha; \quad \tau = \sigma_1 \sin\alpha \cdot \cos\alpha = \frac{1}{2}\sigma_1 \sin 2\alpha. \tag{5}$$

По характеру приложенных к рассматриваемому телу усилий различают: линейное напряженное состояние, когда напряже-

ния создаются силами, действующими по одной прямой линии; плоское напряженное состояние, когда силы действуют по двум направлениям, лежащим в одной плоскости, и объемное напряженное состояние, когда силы действуют по трем или более направлениям, не лежащим в одной плоскости; линейное напряженное состояние возможно только в тонких длинных стержнях, а плоское — только в тонких пластинах.

Большое значение в теории напряжений имеет понятие о главных площадках и главных напряжениях. Главными площадками считают такие, по которым касательные напряжения отсутствуют. В каждой точке любого напряженного тела можно провести три взаимно перпендикулярные главные площадки, через которые передаются три главных (нормальных) напряжения.

При линейном напряженном состоянии два напряжения из трех главных равны нулю; при плоском напряженном состоянии одно главное напряжение равно нулю; при объемном напряженном состоянии ни одно из главных напряжений не равно нулю.

В практике горного дела породы обычно находятся в объемном напряженном состоянии — в условиях всестороннего сжатия, поэтому положительными считаются сжимающие напряжения. Наибольшее главное напряжение обозначается σ_1, наименьшее σ_3, среднее по величине σ_2.

Если к элементарному блоку горной породы приложить только осевую нагрузку интенсивностью σ_1, то эта нагрузка вызовет сжатие блока в направлении σ_1 и его боковое расширение в плоскости, перпендикулярной направлению σ_1, но если боковому расширению будут препятствовать смежные блоки породы или обойма прибора, в которую помещен блок при испытании, то по боковой поверхности блока возникнут силы бокового отпора $\sigma_2 = \sigma_3$, величина которых зависит от упругих свойств материала $E\nu$, его прочности при одноосном сжатии σ_0 и от величины σ_1

$$\sigma_2 = \sigma_3 = f(\sigma_0;\ \sigma_1;\ E;\ \nu).$$

В случаях, когда жесткость бокового отпора неодинакова, т. е. когда в какую-либо сторону возможна некоторая деформация блока, $\sigma_2 \neq \sigma_3$.

Таким образом, напряжения могут быть вызваны как активными силами, так и реактивными.

В естественных условиях залегания горных пород и в породах вокруг горных выработок в большинстве случаев внешние силы (объемные) действуют в одном (вертикальном) направлении, а объемное напряженное состояние создается за счет бокового отпора (исключением в этом отношении являются: фильтрационные, тектонические и сейсмические силы).

Для определения устойчивого состояния горных пород необходимо знать напряжения по любым площадкам в массиве. Зависимость между величинами главных напряжений и величинами касательных и нормальных напряжений по площадкам, параллель-

ным направлению одного из главных напряжений, устанавливается из следующих соображений.

Поскольку площадка параллельна одному из главных напряжений, например σ_2, то угол α, составленный этой площадкой с направлением σ_2, равен нулю и согласно выражению (5)

$$\sigma_{n2} = 0 \text{ и } \tau_2 = 0.$$

С двумя другими главными напряжениями эта площадка составляет углы α и $(90° - \alpha)$, а касательные и нормальные напряжения от σ_1 и σ_2 составляют:

$$\sigma_{n1} = \sigma_1 \sin^2 \alpha; \quad \sigma_{n3} = \sigma_3 \sin^2 (90° - \alpha) = \sigma_3 \cos^2 \alpha;$$

$$\tau_1 = \frac{1}{2} \sigma_1 \sin 2\alpha; \quad \tau_3 = \frac{1}{2} \sigma_3 \sin 2 (90° - \alpha) = -\frac{1}{2} \sigma_3 \sin 2\alpha.$$

Суммарные касательные и нормальные напряжения по площадке, параллельной направлению σ_2, будут равны

$$\sigma_n = \sigma_1 \sin^2 \alpha + \sigma_3 \cos^2 \alpha; \quad \tau = \frac{1}{2} (\sigma_1 - \sigma_3) \sin 2\alpha. \tag{6}$$

Аналогично запишутся и выражения для σ_n и τ по площадкам, параллельным другим главным напряжениям.

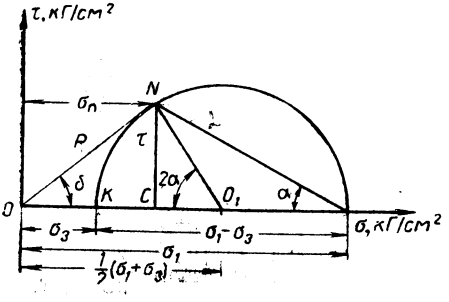


Рис. 4. Определение напряжений графическим путем

Напряжения по площадкам, параллельным одному из главных напряжений, легко определяются графически при помощи кругов напряжений (так называемых «кругов Мора»).

В прямоугольной системе координат (рис. 4), где по оси абсцисс откладываются нормальные напряжения σ_n, а по оси ординат — касательные напряжения τ, от начала координат в соответствующем масштабе откладываются отрезки, равные главным напряжениям, и на их концах, как на диаметре, проводится окружность с центром на оси абсцисс, тогда абсцисса любой точки N, взятой на окружности, будет выражать нормальное напряжение, а ордината — касательное напряжение, действующие по площадке, наклоненной к направлению главного напряжения под углом α (на графике этот угол образуется осью абсцисс и отрезком, соединяющим данную точку с концом диаметра круга, соответствующим бо́льшему главному напряжению); отрезок p, соединяющий начало координат с точкой N, равен полному напряжению по этой площадке, направленному под углом δ к нормали к этой площадке.

Из рис. 4 следует, что

$$\tau = \frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_3)\sin 2\alpha; \quad \sigma_n = \sigma_3 + \frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_3) - \frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_3)\cos 2\alpha,$$

или, вынося за скобки $\frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_3)$, получим

$$\sigma_n = \sigma_3 + \frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_3)(1 - \cos 2\alpha);$$

заменяя $\cos 2\alpha$ равным значением $(1 - 2\sin^2\alpha)$, получим

$$\sigma_n = \sigma_3 + (\sigma_1 - \sigma_3)\sin^2\alpha$$

или

$$\sigma_n = \sigma_1 \sin^2\alpha + \sigma_3 \cos^2\alpha.$$

Точки на круге, построенном на концах напряжений σ_1 и σ_3, будут соответствовать напряжениям на площадках, параллельных направлению σ_2; точки на круге, построенном на концах напряжений σ_1 и σ_2, будут соответствовать напряжениям на площадках, параллельных направлению σ_3, а точки на круге, построенном на концах напряжений σ_2 и σ_3, будут соответствовать напряжениям на площадках, параллельных направлению σ_1. Напряжения на площадках, пересекающих направления всех трех главных напряжений, будут определяться точками, располагающимися на графике между кругами напряжений, построенными на главных напряжениях (точка N на рис. 5).

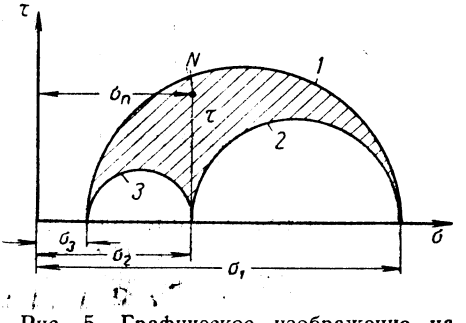


Рис. 5. Графическое изображение напряжений по площадкам, параллельным направлениям главных напряжений:

1, 2, 3 — круги напряжений

В общем случае напряженного состояния материала, когда все три главных напряжения в рассматриваемой точке не равны нулю, имеем

$$\sigma_{n\,\max} = \sigma_1; \quad \sigma_{n\,\min} = \sigma_3; \quad \tau_{\max} = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2}.$$

Как видно из рис. 5, в условиях объемного напряженного состояния наибольшие касательные напряжения создаются на площадках, параллельных направлению среднего по величине главного напряжения, а сечение, перпендикулярное к этим площадкам, оказывается в плоскости наибольшего и наименьших главных напряжений (т. е. в плоскости σ_1 и σ_3) и величина σ_2 не участвует в определении $\tau_{\max}$; в связи с этим при расчетах напряжений вокруг вытянутых горных выработок можно решать плоскую задачу, используя в расчетах только σ_1 и σ_3, располагающиеся в плоскости,

перпендикулярной оси выработки. При этом необходимо отличать плоскую задачу объемного напряженного состояния от плоского напряженного состояния.

Часто при лабораторных испытаниях и в породах вокруг горных выработок два из главных напряжений оказываются равными между собой, при этом $\sigma_1 = \sigma_2 > \sigma_3$ или $\sigma_1 > \sigma_2 = \sigma_3$.

В этих случаях второй или третий круги напряжения, обозначенные на рис. 5, сливаются с наибольшим кругом, а наименьший круг превращается в точку.

§ 3. Условия предельного равновесия горных пород

Основным условием предельного равновесия горных пород по любой площадке является равенство сдвигающего усилия T сумме сил трения и сцепления

$$T = fN + KS; \tag{7}$$

если действующие по этой площадке силы разделить на ее площадь, то условие предельного равновесия выражается

$$\tau = f\sigma_n + K.$$

В теории предельного равновесия сыпучей среды рассматриваются два случая, методы решения задач которых принципиально отличаются:

1) когда условие предельного напряженного состояния удовлетворяется в каждой точке некоторой области;

2) когда условие предельного напряженного состояния удовлетворяется не во всех точках некоторой области массива, а лишь по ее внутренней границе.

Проф. С. С. Голушкевич отмечал [30], что «Случай, когда сыпучая среда находится в предельном напряженном состоянии во всех точках, следует рассматривать как иногда возможный, частный и притом крайний случай состояния предельного равновесия.

Поэтому состояние предельного равновесия массива сыпучей среды лучше определять как состояние, при котором его внутренняя граница является поверхностью скольжения».

Соответственно этому существует два напряжения в решении задач о предельном равновесии сыпучей среды — одно из них связано с именами В. Феллениуса, К. Терцаги, Н. М. Герсеванова, Н. А. Цытовича, Л. Н. Бернацкого и других, исследовавших условия предельного равновесия по поверхности скольжения устанавливаемым в массиве методом последовательного приближения, а другое связано с именами В. Ренкина, Л. Прандтля, Ф. Кеттера, В. В. Соколовского, В. И. Новоторцева, С. С. Голушкевича, В. Г. Березанцева и других, исследовавших условия предельного напряженного состояния среды, когда по заданным граничным условиям устанавливается область, заполненная сеткой поверхностей скольжения, в каждой точке которой удовлетворяется условие (1)

предельного напряженного состояния. Бо́льшая часть всех исследователей рассматривала среду однородной и изотропной. Только Л. Н. Бернацкий и В. В. Соколовский учитывали в расчетах наличие в массиве поверхностей ослабления, по которым характеристики прочности ρ' и K' значительно меньше, чем по другим направлениям.

В. В. Соколовский предложил называть **условием специального предельного равновесия** случай, когда в рассматриваемой точке

$$\left.\begin{aligned} \tau &= K' + \operatorname{tg} \rho' \sigma_{n'} \\ \tau &< K + \operatorname{tg} \rho \sigma_n \end{aligned}\right\} \qquad (8)$$

в отличие от обыкновенного предельного равновесия, характеризующегося условием (1).

Формулы (5) и (6) характеризуют распределение напряжений σ_n и τ по площадкам, ориентированным под различными углами к направлению главных напряжений. Если значения σ_n и τ подставить в условие предельного равновесия (1), можно убедиться, что при изменении направляющих углов (наклона площадок) изменяются величины главных напряжений, при которых удовлетворяется условие предельного равновесия. Если оставить без изменения σ_3, то при изменении углов наклона площадок величина σ_1 то возрастает, то убывает; естественно, что в массиве предельное состояние прежде всего наступает по наиболее слабой площадке, когда величина σ_1 минимальна.

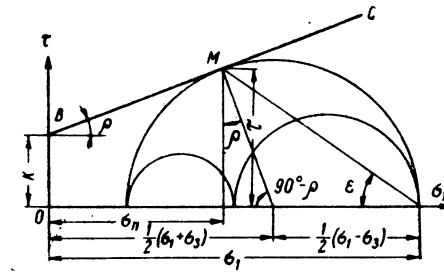


Рис. 6. Предельный круг напряжений

Легче всего это показать графически при изображении напряжений кругами Мора.

На рис. 6 линией BC и осью абсцисс ограничена область возможных напряжений для данной горной породы, верхняя граница которой характеризует предельные напряжения, определяемые величинами характеристик сопротивления горных пород сдвигу K и ρ.

Если постепенно увеличивать напряжение σ_1 или уменьшать σ_3, то наибольший круг напряжений коснется линии BC в некоторой точке M, которая в данном случае будет характеризовать предельное состояние по площадке, параллельной направлению σ_2 и наклоненной к направлению σ_1 под углом ε, равным $45° - \frac{\rho}{2}$ $\left(\text{или } \frac{\pi}{4} - \frac{\rho}{2}\right)$.

Если изменять величину σ_2 в пределах от σ_3 до σ_1, то положение точки касания не изменяется, что указывает на то, что пока

обеспечиваются условия $\sigma_3 \leqslant \sigma_2 < \sigma_1$ или $\sigma_3 < \sigma_2 \leqslant \sigma_1$, величина σ_2 не влияет на предельное равновесие.

Из обозначений, принятых на рис. 6, можно составить аналитические выражения зависимости между главными напряжениями и характеристиками прочности при условии предельного напряженного состояния по площадке M

$$\frac{1}{\cos\rho} \cdot \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} - \operatorname{tg}\rho\,\frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} = K \tag{9}$$

или

$$\sigma_1 = 2K \operatorname{ctg}\left(45^\circ - \frac{\rho}{2}\right) + \sigma_3 \operatorname{ctg}^2\left(45^\circ - \frac{\rho}{2}\right). \tag{10}$$

Если $\sigma_3 = 0$, то

$$\sigma_1 = \sigma_0 = 2K \operatorname{ctg}\left(45^\circ - \frac{\rho}{2}\right), \tag{11}$$

что выражает сопротивление одноосному сжатию при разрушении образцов горных пород путем сдвига по площадкам, наклоненным к оси образца под углом ε.

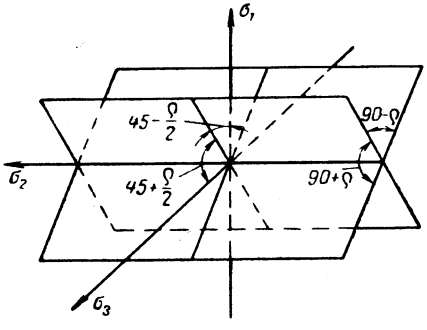


Рис. 7. Ориентировка площадок скольжения относительно главных напряжений

Расположение площадок скольжения относительно главных напряжений (рис. 7) и зависимость между главными напряжениями и характеристиками прочности при предельном состоянии, в которой не участвует σ_2, дают возможность исследования предельного равновесия сыпучей среды производить в плоскости σ_1 и σ_3, перпендикулярной оси горных выработок вытянутой формы.

Если в блоке горного массива, находящемся в объемном напряженном состоянии, имеются ослабленные плоскости (площадки с характеристиками K' и ρ'), то в зависимости от ориентировки этих плоскостей относительно направления главных напряжений могут иметь место следующие три случая предельного равновесия.

1. Одновременно удовлетворяются условия обыкновенного и специального предельного равновесия

$$\left.\begin{aligned} \tau &= K + \operatorname{tg}\rho\sigma_n \\ \tau_t &= K' + \operatorname{tg}\rho'\sigma_{n't} \end{aligned}\right\}. \tag{12}$$

Как видно из рис. 8, в этом случае при заданном тензоре напряжений предельно напряженными будут площадки N, M и L; при этом площадка M, находящаяся в обыкновенном предельном равновесии, наклонена к направлению σ_1 под углом

$$\alpha = \varepsilon = \frac{\pi}{4} - \frac{\rho}{2}, \tag{13}$$

а площадки N и L наклонены соответственно под углами

$$\alpha_1 = \frac{1}{2}\left\{\arcsin\left[\frac{\sin\rho'}{\sin\rho}\left(1 - \frac{K\operatorname{ctg}\rho - K'\operatorname{ctg}\rho'}{K\operatorname{ctg}\rho + \frac{1}{2}(\sigma_1 + \sigma_3)}\right]\right. - \rho'\right\}; \qquad (14)$$

$$\alpha_2 = \frac{\pi}{2} - \frac{1}{2}\left\{\arcsin\left[\frac{\sin\rho'}{\sin\rho}\left(1 - \frac{K\operatorname{ctg}\rho - K'\operatorname{tg}\rho'}{K\operatorname{ctg}\rho + \frac{1}{2}(\sigma_1 + \sigma_3)}\right)\right] + \rho'\right\}. \qquad (15)$$

2. Удовлетворяется только условие специального предельного равновесия

$$\left.\begin{aligned} \tau &< K + \operatorname{tg}\rho\sigma_n \\ \tau_t &= K' + \operatorname{tg}\rho'\sigma_{tn} \end{aligned}\right\}, \qquad (16)$$

когда площадка ослабления составляет с направлением σ_1 угол $\alpha_1 < \alpha < \alpha_2$ (рис. 8), наибольший круг напряжений не касается

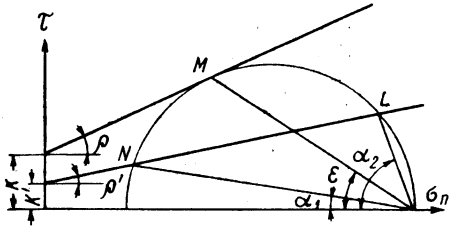


Рис. 8. Предельный круг напряжений и ориентировка площадок, находящихся в условиях обыкновенного и специального предельного равновесия

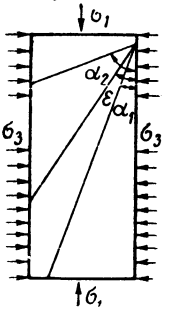


Рис. 9. Блок горной породы и ориентировка в нем предельных площадок

линии с характеристиками K и ρ и зависимость между главными напряжениями и характеристиками сопротивления сдвигу записывается в следующем виде:

$$\sigma_1 = \frac{\sigma_3\left(\operatorname{tg}\rho'\cos^2\alpha + \frac{1}{2}\sin 2\alpha\right) + K'}{\operatorname{tg}\rho'\sin^2\alpha + \frac{1}{2}\sin 2\alpha}. \qquad (17)$$

Эта зависимость получается при подстановке (6) в условие предельного равновесия (1).

3. Удовлетворяется только условие обыкновенного предельного равновесия

$$\left.\begin{aligned} \tau &= K + \operatorname{tg}\rho\sigma_n \\ \tau_t &< K' + \operatorname{tg}\rho'\sigma_{tn} \end{aligned}\right\}, \qquad (18)$$

если при заданном тензоре напряжений ослабленные поверхности составляют с направлением σ_1 углы $\alpha > \alpha_2$ или $\alpha < \alpha_1$ (рис. 8, 9).

При выводе формул (14) и (15) (см. главу XVII) принята зависимость

$$H = K \operatorname{ctg} \rho, \tag{19}$$

которая широко используется при решении задач методом предельного напряженного состояния; при этом линию BC продолжают до пересечения с осью абсцисс и точку O' рассматривают как начало **условных** (приведенных) величин напряжений. Как видно из рис. 10, перенесение начала координат в точку O' не изменяет величин касательных напряжений, а нормальные напряжения увеличиваются на отрезок H. Решение задач в значительной степени

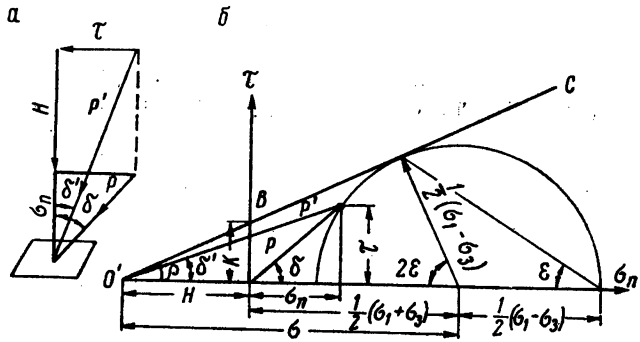


Рис. 10. Соотношение между действительными и условными (приведенными) напряжениями:

а — приведенные напряжения на площадке; *б* — приведенные напряжения на графике напряжений

упрощается, если пользоваться средней величиной приведенных напряжений:

$$\sigma = H + \frac{1}{2}(\sigma_1 + \sigma_3); \tag{20}$$

в этом случае условие предельного состояния приобретает крайне простой вид

$$\frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_3) = \sigma \sin \rho \tag{21}$$

или

$$\tau = \frac{1}{2} \sigma \sin 2\rho. \tag{22}$$

В. В. Соколовский и ряд других авторов называют отрезок H временным сопротивлением всестороннему равномерному растяжению. В действительности экспериментальные данные и теоретические соображения показывают, что таких величин сопротивления отрыву у горных пород, являющихся хрупкими материалами, быть не может.

Временное сопротивление отрыву при одноосном растяжении у горных пород не отличается от временного сопротивления при

равномерном всестороннем растяжении. В этом проявляется основное отличие хрупких материалов от пластичных: у пластичных материалов сопротивление отрыву больше, чем сопротивление сдвигу, у хрупких материалов, наоборот, сопротивление сдвигу и сжатию больше, чем сопротивление отрыву.

По этой причине пластичные материалы при одноосном растяжении разрушаются не путем отрыва, а путем сдвига, так как предельное состояние на сдвиг по площадкам, наклоненным под углом 45° к оси стержня, наступает при значительно меньших нагрузках, чем необходимо для разрушения этих материалов путем отрыва; если эти материалы подвергать равномерному всестороннему растяжению, то при сложении касательных напряжений с различными знаками они погашаются и разрушение происходит путем отрыва при бо́льших нормальных напряжениях, чем те, при которых разрушался образец при одноосном растяжении. Приложение всестороннего растяжения не изменяет величины наибольшего (растягивающего) главного напряжения, а уменьшает лишь величины касательных напряжений, способствуя разрушению пластичных материалов путем отрыва.

Хрупкие материалы и при одноосном растяжении (и даже при сдвиге при небольших нормальных напряжениях) разрушаются путем отрыва по площадкам, нормальным к направлению растяжения (более подробно этот вопрос рассмотрен в главе VIII). Приложение дополнительных боковых растяжений не изменяет напряжений по этим площадкам и поэтому не изменяет величины σ_p.

Глава II

ГОРНЫЕ ПОРОДЫ И ИХ ИЗМЕНЯЕМОСТЬ В ПРИРОДЕ

§ 1. Классификация горных пород по их устойчивости в бортах карьеров

Свойствами горных пород, являющимися наиболее существенными с точки зрения устойчивости бортов карьеров большой высоты, являются: прочность пород в образце, характер и степень трещиноватости, выветриваемость (стойкость) и растворяемость, склонность к разуплотнению и набуханию, склонность к пластическим деформациям (ползучести).

В зависимости от этих свойств все горные породы разделены на пять групп, общая характеристика которых дана в табл. 1.

При изучении устойчивости бортов карьеров границей между крепкими и средней крепости породами принято временное сопротивление сжатию в образце, равное 800 *кГ/см*². Эта граница выбрана из тех соображений, что при прочности пород более

Классификация горных пород по их устойчивости в бортах карьеров

Таблица 1

Группа пород	Общая характеристика группы	Основные представители горных пород этой группы	Основные показатели устойчивости откосов
I. Крепкие (скальные)	$\sigma_{сж} > 800$ *кГ/см²*, слабо трещиноватые, слабо выветриваемые, не набухают, в бортах карьеров не подвергаются пластическим деформациям	Невыветрелые и слабо выветрелые изверженные и метаморфические породы, кварцевые песчаники, известняки и кремнистые конгломераты	Характеристики сопротивления сдвигу по поверхностям ослабления ρ' и K' и элементы залегания этих поверхностей
II. Средней крепости (полускальные)	$\sigma_{сж} = 80$—800 *кГ/см²*, трещиноватые, интенсивно выветриваются, не набухают, не размокают, не пластичны	Выветрелые разности изверженных и метаморфических пород, глинистые и песчано-глинистые сланцы, глинистые и известковистые песчаники, аргиллиты, алевролиты, мергели, известковистые конгломераты и брекчии, известняк-ракушник, угли	Характеристики прочности пород в образце ρ и K и по поверхностям ослабления ρ' и K', элементы залегания поверхностей ослабления, характер и интенсивность трещиноватости
III. Слабые (глинистые)	$\sigma_{сж} < 80$ *кГ/см²*; набухают, размокают, пластичны, интенсивно выветриваются и осыпаются, оползают	Сильно выветрелые или полностью дезинтегрированные изверженные и метаморфические, а также выветрелые разности осадочных пород второй группы, все разновидности глин, супесей и суглинков, глинистые пески и галечники, мел, лёсс, делювиальные и моренные отложения	Характеристики ρ, K, ρ' и K'; интенсивность трещиноватости, залегание поверхностей ослабления; водонасыщенность и напорные воды
IV. Несвязные (сыпучие)	Сцепление отсутствует; угол внутреннего трения и угол естественного откоса изменяются в пределах 28—38°; пластически не деформируются, не размокают и не оползают	Каменистые и щебеночные накопления у основания откосов пород первой и второй групп, чистые галечники и пески	Угол внутреннего трения (или угол естественного откоса), зависящий от коэффициента трения по поверхности частиц (обломков) и от их формы
V. Илы и плывуны	Сцепление менее 0,2 *кГ/см²*, в водонасыщенном состоянии внутреннее трение отсутствует	Современные илисто-глинистые озерные, болотные и лагунные осадки, рыхлые водонасыщенные пылеватые пески и глины, водонасыщенные почвы, заторфованные осадки, водонасыщенные легкие и пылеватые суглинки	В откосах высотой более 3—5 *м* неустойчивы; не могут служить устойчивым основанием отвалов, оборудования и дорог

800 *кГ/см²* углы наклона бортов карьеров наиболее распространенной средней глубины (в пределах 200—300 *м*) зависят только от залегания элементов ослабления в них и от технологических факторов и не зависят от прочности пород в образце (так как уже при временном сопротивлении сжатию 800 *кГ/см²* и средней интенсивности трещиноватости углы наклона бортов достигают предельной технически допустимой величины 55—60° и при большей прочности пород дальнейшее увеличение углов наклона бортов оказывается технически невозможным).

Породы первой группы в массиве большей частью имеют слабую трещиноватость, высокую стойкость, не набухают и не подвергаются пластическим деформациям при любой практически достижимой высоте бортов.

Углы наклона бортов карьеров, сложенных крепкими породами, зависят только от ориентировки крупных тектонических трещин и нарушений и от горнотехнических факторов.

В массивах изверженных и метаморфических горных пород на глубинах производства открытых горных разработок наблюдается определенная зависимость между степенью трещиноватости и степенью выветрелости — более трещиноватые оказываются более выветрелыми и входят уже в группу пород средней крепости. Исключением в этом отношении являются только кварциты, кристаллические сланцы, мрамор и известняки, которые обладают высокой стойкостью и сохраняют большую прочность в образце даже при высокой степени трещиноватости.

В горных районах крепкими породами сложены возвышающиеся части рельефа и их можно назвать также скальными. Отнесение к скальным пород с временным сопротивлением сжатию до 50 *кГ/см²* [100], по-видимому, нельзя признать удачным, так как в таком случае в группу скальных включаются даже слабые аргиллиты, выветрелые алевролиты и другие слабые породы, никогда не составляющие скал. Ограничение скальных пород сопротивлением сжатию в 50 *кГ/см²* введено в грунтоведении для характеристики, безусловно, устойчивых оснований сооружений в отличие от оснований, представленных несвязными и мягкими породами, сжимаемыми под фундаментом сооружений с большим давлением на грунт.

Группа пород средней крепости является более широкой, чем первая.

Петрографический состав выветрелых изверженных и метаморфических пород несколько отличается от состава крепких пород: полевые шпаты полностью или частично превращены в каолин, темноцветные минералы подверглись окислению, наблюдаются и другие процессы химического выветривания.

Границей между породами средней прочности и слабыми принято временное сопротивление сжатию 80 *кГ/см²* из тех соображений, что породы меньшей прочности, во-первых, имеют заметную склонность к набуханию (разуплотнению) при снижении в них

напряжений и при наличии подтока воды и, во-вторых, в бортах карьеров средней глубины они подвергаются пластическим деформациям (ползучести).

Группа слабых (глинистых) пород является наиболее разнообразной. В нее входят бо́льшая часть более слабых пород того же литологического наименования, которыми представлена вторая группа, и, кроме того, бо́льшая часть осадочных пород третичного и четвертичного возраста, все разновидности глин, супесей, суглинков, глинистых песков и галечников, мел, лёсс, делювиальные и моренные отложения, а также бо́льшая часть аллювиальных отложений (кроме чистых песков и галечников, не имеющих сцепления).

Основными свойствами пород этой группы являются склонность к пластическим деформациям в бортах глубоких карьеров, чем они качественно отличаются от пород второй и четвертой групп, являющихся жесткими.

При изучении механических свойств горных пород и особенно пород нарушенной структуры (отвалов) связные горные породы целесообразно разделять на твердые и мягкие.

К твердым относятся породы крепкие, средней крепости и часть глинистых пород сцеплением более 8—10 *кГ/см*^{2}.

Твердые породы в основном характеризуются тем, что в отвалах практически любой высоты они не подвергаются слеживанию, сохраняют трехфазное состояние и в механическом отношении характеризуются только коэффициентом внутреннего трения.

Мягкие глинистые породы (сцепление менее 8—10 *кГ/см*^{2}) в водонасыщенном состоянии имеют влажность более 10%, в отвалах слеживаются и приобретают сцепление; при некоторой высоте отвала при уплотнении переходят в двухфазное состояние и могут оползать.

Породы четвертой группы хотя и не имеют сцепления, но в бортах карьеров являются более устойчивыми и надежными благодаря большому коэффициенту внутреннего трения и его неизменяемости.

В пятую группу входят в основном неуплотненные современные осадки водоемов, которые еще не превратились в горную породу [153], они имеют очень низкое сопротивление сдвигу (сцепление менее 0,2 *кГ/см*^{2} и внутреннее трение в них почти полностью отсутствует). Такие же свойства имеют и некоторые пылеватые глины и пески в водонасыщенном состоянии; например, в период дождей пылеватые глины и суглинки размокают до текучего состояния и полностью теряют несущую способность.

Так как в течение геологических периодов любая горная порода в зависимости от окружающих ее условий может переходить из одного крайнего состояния в другое, естественно, границы между выделенными группами пород являются условными.

Изменяемость горных пород с течением времени является одним из наиболее существенных факторов, оказывающих влияние

на деформации откосов. Естественные откосы, сложенные любыми горными породами, подвергаются деформациям с большей или меньшей интенсивностью. В большинстве случаев эти деформации связаны с уменьшением прочности горных пород, являющимся следствием изменения их физических свойств.

Искусственные откосы различного рода выемок в горных породах, в том числе и откосы открытых горных выработок, также подвергаются воздействию внешних условий. Отличительной особенностью откосов открытых горных выработок от естественных откосов является относительно непродолжительный срок их службы и более резкое изменение напряженного состояния. Первая из этих особенностей способствует тому, что откосы открытых горных выработок могут быть значительно круче естественных откосов тех же пород. Более резкое изменение напряженного состояния способствует более интенсивному изменению физико-механических свойств горных пород в искусственных откосах, чем в естественных.

Чтобы достаточно отчетливо представлять характер изменения пород в бортах карьеров, необходимо знать процессы формирования и изменения пород в естественных условиях.

§ 2. Зависимость свойств пород от их состояния и условий образования

Прочность изверженных пород прежде всего зависит от условий кристаллизации: глубины, температуры, характера напряженного состояния и наличия перемещений. При кристаллизации на больших глубинах образуются породы с полнокристаллической структурой крупно-, средне- или мелкозернистой.

Эффузивные породы характеризуются порфировой, скрытокристаллической или стекловатой структурой — в зависимости от степени кристаллизации основной массы пород.

Структура пород влияет на величину прочности неизмененных пород, а также на интенсивность выветривания и прочность выветрелых пород; с увеличением степени кристаллизации и крупности кристаллов прочность уменьшается, а выветриваемость возрастает.

Если магматические породы в процессе кристаллизации или в период их залегания на большой глубине, где они находятся в вязком или пластичном состоянии, подвергаются тангенциальным напряжениям, то под влиянием этих напряжений в них возникают скрытые поверхности скольжения. Наличие этих поверхностей ослабления характеризует так называемую **делимость** горных пород — способность пород раскалываться по ориентированным определенным образом поверхностям.

Осадочные породы по условиям накопления осадков разделяются на морские, лагунные и континентальные; континентальные осадки разделяют на пресноводные (речные, озерные и болотные)

и наземные (ледниковые, пустынные, подножий, осыпей и др.); таким образом, бо́льшая часть осадков, являющихся материалом для образования осадочных горных пород, отлагается на дне водоемов и в зависимости от места отложения характеризуется большей или меньшей изменчивостью.

В зависимости от гранулометрического состава отлагающиеся в водной среде осадки сильно различаются по плотности. Крупнообломочные и песчаные породы даже в период их отложения приобретают плотное сложение, которое увеличивается в дальнейшем, в основном, лишь за счет цементации.

Глинистые и алевритовые породы в период их отложения в водной среде имеют вид ила или студнеобразной массы.

Глинистые частицы в водной среде находятся в коллоидном состоянии и оседают на дно водоемов в виде студнеобразной массы при свертывании коллоидных растворов. При этом каждая частица окружена мощной гидратной оболочкой, удерживаемой электрическими силами на поверхности раздела с водой, а пористость отложений на их поверхности достигает 90%.

По мере накопления осадков слои пород, свободно залегающие на земной поверхности, покрываются более молодыми осадками, что приводит к увеличению всестороннего сжатия пород под влиянием веса вышележащих отложений. Уплотняющая нагрузка в водной среде определяется выражением

$$\sigma_1 = H(d-1)(n-1), \qquad (23)$$

где H — глубина от земной поверхности;

d — средняя величина удельного веса пород;

n — средняя величина пористости.

Под влиянием нагрузки σ_1 глинистые горные породы подвергаются уплотнению с уменьшением их пористости и влажности.

В геосинклинальных бассейнах, где мощность осадочных пород достигает 10—15 *км* и более, давление, испытываемое горной породой, достигает 1,5—2,2 тыс. *кГ/см*^{2}, а плотность горных пород с упругим скелетом достигает 95%.

В процессе преобразования иловатые и студнеобразные отложения превращаются в каменные породы, временное сопротивление сжатию которых достигает 150 *кГ/см*^{2} и более; Л. Б. Рухин называет этот процесс окаменением [146].

Песчаные горные породы почти не изменяют своей плотности даже при нагрузках, вызывающих разрушение частиц, но плотность их с течением времени увеличивается за счет цементации глинистым материалом, приносимым водой при ее отжиме из слоев глинистых пород, и другими цементирующими материалами — кремнистыми, карбонатными и др.

При уплотнении глинистых горных пород существенное значение имеет их слоистость.

Чередуемость водоносных и водоупорных слоев, мощность и выдержанность их распространения по площади являются факто-

рами, влияющими на уплотнение пород с погружением от земной поверхности и на разуплотнение в период поднятия и размыва осадочных отложений (чередуемость слоев играет большую роль в образовании оползней и влияет на дренаж месторождений).

Уплотнение глинистых пород с погружением сопровождается их обезвоживанием, которое происходит в следующем порядке. В первый период уплотнения, когда все породы имеют большую пористость и значительную водопроницаемость, под влиянием вышележащих отложений уплотняется грунтовой скелет и избыточная вода движется снизу вверх. Это движение обусловливается разностью порового давления в сжимаемом пласте породы и высотой водяного столба над ним.

Во второй период уплотнения, когда глинистые отложения приобретают значительную плотность и коэффициент фильтрации становится столь малым, что движение воды снизу вверх сквозь всю толщу пород затруднительно или совсем невозможно, обезвоживание глинистых слоев происходит путем отжима воды в слои песчаных и крупнообломочных пород, по которым вода движется до обнажения этих слоев или до пересечения их тектоническими нарушениями.

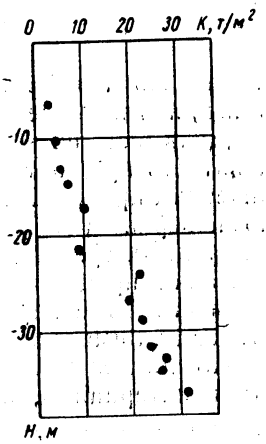


Рис. 11. Изменение величины сцепления бурых глин с увеличением глубины по одной скважине Ермолаевского буроугольного месторождения

Таким же путем происходит уплотнение слоев глинистых пород при организации дренажа до начала открытых горных разработок, если среди этих пород имеются породы высокой влажности. С увеличением плотности глинистых слоев возрастает и их прочность. На рис. 11 представлен график изменения величины сцепления образцов глин, отобранных на различной глубине одной из скважин Ермолаевского буроугольного месторождения.

§ 3. Влияние тектоники и метаморфизма на прочность массива пород

Вторым естественно-историческим фактором, влияющим на изменение прочности массива горных пород, являются тектонические процессы, во время которых происходит образование складок, возникают пликативные и дизъюнктивные нарушения, делимость и трещиноватость.

Наблюдения за характером складок горных пород, образовавшихся под влиянием тангенциальных тектонических напряжений, показывают, что слоистый массив при образовании складок расслаивается на отдельные однородные слои или на группы разно-

родных слоев небольшой мощности, самостоятельно изгибающихся в складки. При этом происходят межслоевые подвижки [11].

Вследствие межслоевых подвижек в период образования складок образуются поверхности скольжения, сцепление по которым имеет ничтожную величину, а коэффициент внутреннего трения значительно снижается. Эти поверхности способствуют образованию оползней при падении слоев в сторону выемки.

Кроме поверхностей скольжения по контактам слоев, в период складкообразования под влиянием тангенциальных напряжений образуются системы поверхностей, по которым породы легко раскалываются и срезаются, — так называемая кливажная делимость. По плоскостям делимости развиваются и открытые трещины, называемые кливажными.

Делимость по контактам слоев, кливажная делимость и трещиноватость придают массиву горных пород, подвергающихся тектоническим процессам, блоковое строение и уменьшают их прочность по поверхностям развития делимости и трещиноватости. Кроме кливажных трещин, в массиве горных пород под влиянием тектонических процессов образуются сплошные трещины разломов и дизъюнктивные нарушения, по которым сцепление массива отсутствует или имеет небольшую величину.

По тектоническим нарушениям, заполненным истертым глинистым материалом, насыщенным водой, коэффициент внутреннего трения значительно снижается по сравнению с трением по другим направлениям.

Большие изменения прочности горных пород возникают под влиянием процессов метаморфизма. При погружении на большие глубины породы испытывают большое давление и под воздействием повышенной температуры и циркулирующих горячих водных и газовых растворов подвергаются существенному преобразованию, в процессе которого возникают новые — метаморфические — породы.

Виды метаморфизма довольно разнообразны. Ниже рассматриваются лишь те изменения пород, которые связаны с их прочностью и стойкостью.

Толща осадочных пород в процессе метаморфизма подвергается уплотнению, обезвоживанию и перекристаллизации; глинистые и песчано-глинистые сланцы превращаются в роговики, филлиты, кристаллические и слюдистые сланцы; песчаники — в кварциты и железистые кварциты; все эти породы при метаморфизме переходят в группу крепких. Текстурные и структурные изменения осадочных толщ при метаморфизме существенно не изменяют их прочности, так как осадочные породы и до метаморфизма характеризуются слабыми связями по слоистости.

Возникающие текстурные изменения в метаморфизованных магматических породах (ортопородах) — сланцеватость и полосчатость — оказывают существенное влияние на их прочность и выветриваемость. Среди метаморфических пород наименее устойчи-

выми в бортах карьеров являются серицитовые, хлоритовые и тальковые сланцы. При метаморфизме магматических пород заметно уменьшается их прочность под влиянием серицитизации, хлоритизации, оталькования и окварцевания (при окварцевании возрастает хрупкость и интенсивность трещиноватости).

§ 4. Выветривание и разуплотнение пород

Выветривание крепких и средней крепости пород и разуплотнение глинистых пород представляют единый процесс уменьшения прочности в толще, прилегающей к земной поверхности, но протекает он в крепких и в глинистых породах качественно различно.

Процесс выветривания крепких и средней крепости пород распространяется с поверхности массива на все большую глубину по мере развития трещиноватости и проникновения воды, обогащенной углекислотой.

Первой фазой выветривания изверженных (а также других крепких) пород является физическое выветривание.

Физическое выветривание характеризуется нарушением структурных связей между кристаллами различных минералов и между отдельными блоками с образованием трещиноватости пород. Нарушению связей между кристаллами способствует различие величин коэффициента линейного расширения и модуля упругости, а появление трещин в массиве горных пород связано с различной степенью нагревания и охлаждения отдельных участков массива. Развитию трещин способствует наличие скрытых поверхностей скольжения (делимости).

Под влиянием физического выветривания прочность на сжатие таких пород, как граниты, кварцевые порфиры, базальты уменьшается от 3000—4500 до 1000—1500 *кГ/см*^{2}.

После того как в процессе физического выветривания в достаточной степени разовьются микротрещины, по которым проникает вода и воздух, начинается процесс химического выветривания — растворение, гидролиз, окисление, карбонатизация и др. Для горных массивов изверженных пород наиболее распространенным является гидролиз, которому подвергаются полевые шпаты, превращаясь в каолинит при воздействии воды и углекислого газа; темноцветные минералы подвергаются окислению и превращаются в аморфную массу.

Склонность горных пород к выветриванию в значительной степени зависит от их структуры и минералогического состава. Наиболее стойкими являются кварцсодержащие горные породы неполнокристаллической или микрокристаллической структуры.

Увеличение степени трещиноватости пород также ведет к увеличению интенсивности их выветривания. В зонах тектонических разломов изверженных пород выветривание может проникать на большую глубину.

Примером различной степени выветрелости пород является изображенная на рис. 12 зарисовка одного участка борта Черемшанского карьера, разрабатывающего Уфалейское никелевое месторождение. Борт сложен серпентинитами, степень трещиноватости и выветрелости которых постепенно возрастает при приближении к зоне тектонического разлома. В наиболее удаленной от разлома части залегают слабо выветрелые крепкие крупноблоковые серпентиниты, затем идут интенсивно-трещиноватые серпентиниты — крупностью блоков 10—15 *см*, которые постепенно переходят в щебенку, далее идет щебенка с глиной, потом — глина со щебнем и, наконец, охристые глины, являющиеся продуктом полностью дез-

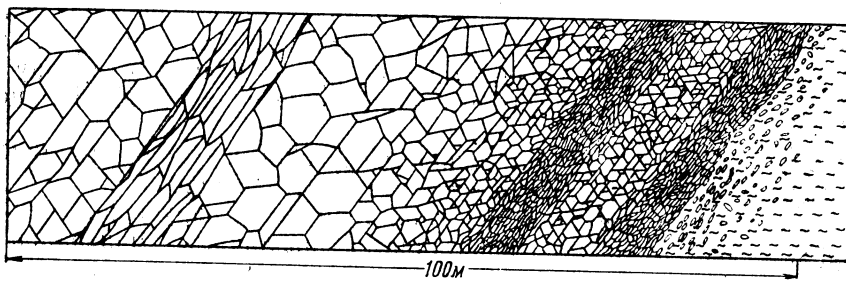


Рис. 12. Зарисовка участка борта Черемшанского карьера с различной степенью выветрелости серпентинитов

интегрированных серпентинитов; вся зона от глин до крупноблоковых серпентинитов имеет мощность около 100 *м*.

Разуплотнение глинистых пород происходит при подъеме и размыве верхней части складок, когда погруженные на большую глубину породы постепенно разгружаются от веса вышележащих пород и напряжения всестороннего сжатия в них уменьшаются.

В связи с этим верхние горизонты пород глинистого состава до глубины 100—150 *м* получают возможность расширяться и втягивать в себя воду; при этом уменьшается плотность и прочность пород.

Разуплотнение глинистых пород изучалось нами на ряде угольных месторождений.

На Коркинском месторождении Челябинского буроугольного бассейна комплекс слоев горных пород, залегающих в почве мощного пласта бурого угля, в период накопления осадков был погружен до глубины более 2000 *м*. После тектонических процессов и размыва эти слои оказались обнаженными в южной части Коркинского карьера. При изучении физико-механических свойств горных пород было установлено увеличение плотности и прочности аргиллитов, алевролитов и песчаников на глинистом цементе до глубины 70—100 *м*. Если у аргиллитов и алевролитов на глубине

15—20 *м* плотность находится в пределах 60—70%, а сцепление 0,2—2,0 *кГ/см²*, то на глубине 70—100 *м* они достигают соответственно 80—85% и 20—30 *кГ/см²*. У песчаника сцепление возрастает от 1,8—2,0 до 40—45 *кГ/см²*. На глубинах, превышающих 100 *м*, изменения плотности глинистых пород не наблюдается. Очевидно, что для данного месторождения глубина разуплотнения ограничивается указанным пределом.

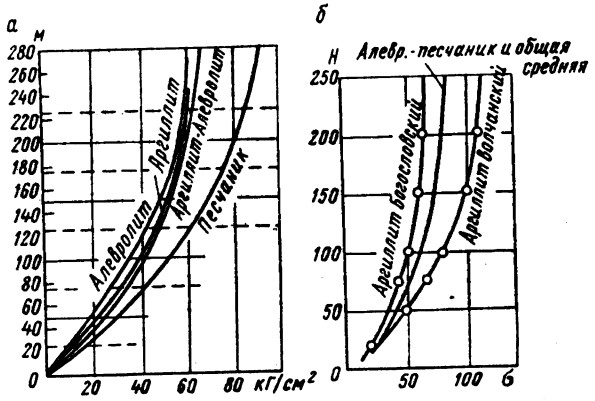


Рис. 13. Изменение сцепления угленосных пород с изменением глубины:

а — по Экибастузскому; *б* — по Богословскому месторождениям

На рис. 13 представлены графики изменения сцепления пород в зависимости от глубины их залегания на Экибастузском и Богословском угольных месторождениях.

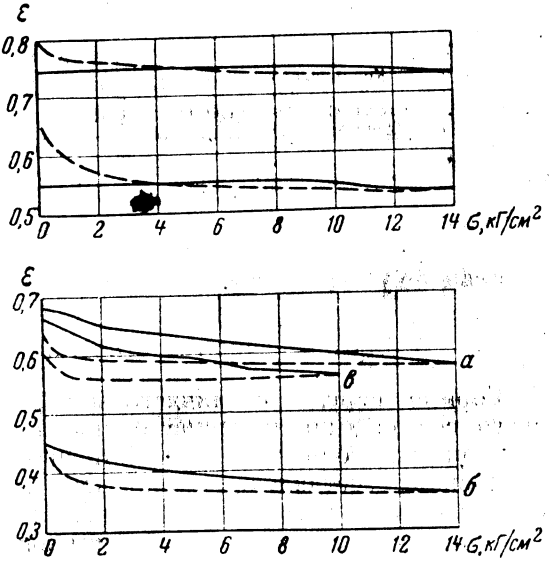


Рис. 14. Графики компрессионных испытаний некоторых глинистых пород

Степень набухания пород зависит от минералогического и гранулометрического состава горных пород, состава обменных катионов, величины давления в данной точке, а также от наличия достаточного подтока воды.

Уменьшение плотности глинистых пород при разгрузке устанавливается по обратной ветви графика компрессионных испытаний. Этими испытаниями установлено, что разуплотнение (набухание) наиболее жирных гидрослюдистых глин начинается при удельных нагрузках 8—9 *кГ/см*², каолиновых глин при нагрузках 3—4 *кГ/см*², а песчаных гидрослюдистых глин при нагрузках 1—2 *кГ/см*².

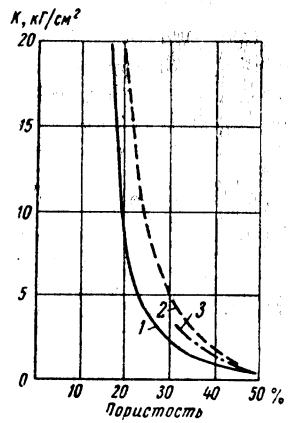


Рис. 15. Изменение сцепления водонасыщенных глинистых пород с изменением их пористости:

1 — породы Коркинского месторождения; *2* — аргиллиты и алевролиты Северо-Уральского буроугольного бассейна; *3* — каолиновые глины Южно-Уральского буроугольного месторождения

Представленные на рис. 14 графики компрессионных испытаний характеризуют изменение плотности некоторых глин.

Изменение плотности глин сопровождается изменением их сцепления, которое характеризуется графиками, изображенными на рис. 15.

Уменьшение прочности мергельных глин, лёссовидных суглинков и других пород, имеющих сцепление упрочнения (цементационное), происходит при выщелачивании цементационного материала. Выщелачивание горных пород объясняется тем, что после проведения горных выработок возрастает движение грунтовых вод, связанное с ростом градиентов потока в сторону откосов или дренажных сооружений.

Уменьшение прочности глинистых пород происходит также под влиянием поверхностного выветривания вследствие обезвоживания пород, их растрескивания и полного исчезновения связей (сцепления) между отдельными частицами. Интенсивность поверхностного выветривания зависит от состава пород, экспозиции откосов относительно солнечных лучей, величины угла откоса и др. Количественные зависимости интенсивности поверхностного выветривания еще не установлены.

§ 5. Инженерно-геологические комплексы пород

Горные породы различного минералогического и литологического состава, но имеющие одинаковые условия образования и претерпевшие одинаковые естественно-исторические процессы их изменения, составляют комплексы пород, характеризующиеся определенными инженерно-геологическими свойствами.

При разведке месторождений выделяют: комплексы неизмененных или слабо выветрелых изверженных и метаморфических пород, комплексы уплотненных осадочных отложений (области древних геосинклиналей, приподнятых и в верхней части размытых или погребенных под более молодыми осадками), комплексы неуплотненных осадочных отложений платформенных областей и совре-

менных межгорных депрессий, комплексы интенсивно выветрелых или полностью дезынтегрированных изверженных или метаморфических пород, комплексы аллювиально-пролювиальных отложений; кроме того, выделяют современные болотные, озерные ледниковые (моренные) и делювиальные отложения, имеющие ограниченную мощность и линзовидное распространение по площади. Подробная характеристика массивов горных пород и их ярусности изложена в работе П. Н. Панюкова [100]. Комплекс горных пород, вмещающих полезное ископаемое, им назван основным ярусом, а верхний ярус — покровным, кроме того, выделяются промежуточные ярусы («этажи»).

Нами принимается далее объединение различных литологических разностей пород в инженерно-геологические комплексы, характеризующиеся преобладанием в их сложении крепких, средней крепости или слабых пород.

Глава III

ОСНОВНЫЕ УСЛОВИЯ УСТОЙЧИВОСТИ ОТКОСОВ ГОРНЫХ ПОРОД

§ 1. Условия равновесия в откосах несвязных горных пород

Несвязные горные породы в механическом отношении характеризуются только коэффициентом внутреннего трения, величина которого изменяется в пределах 0,53—0,78 (угол внутреннего трения соответственно изменяется в пределах 28—38°). К этой группе пород, кроме песков и гравия, относятся неслеживаемые породы отвалов: разрушенные скальные и полускальные, а также твердые глинистые породы.

Условие равновесия в откосах несвязных горных пород требует, чтобы угол откоса не превышал угла внутреннего трения.

Это условие вытекает из следующих соображений. Частица несвязной породы удерживается на свободной поверхности естественного откоса (рис. 16, *а*) под действием силы трения S, уравновешивающей касательную составляющую веса частицы T

$$T = S; \tag{24}$$

$$S = fP\cos\alpha; \tag{25}$$

$$T = P\sin\alpha \tag{26}$$

или

$$P\sin\alpha = fP\cos\alpha,$$

откуда

$$\operatorname{tg}\alpha = f,$$

т. е. тангенс угла естественного откоса равен коэффициенту внутреннего трения сыпучей среды, который, в свою очередь, равен углу внутреннего трения среды; отсюда получаем

$$\operatorname{tg}\alpha = \operatorname{tg}\rho \text{ или } \alpha = \rho. \tag{27}$$

Равенство (27) выражает предельное равновесие сыпучей среды и показывает, что угол откоса не должен превышать угла внутреннего трения этой среды. Нарушение этого условия создает возможность образования осыпи или обрушения, что наблюдается при экскавации (или переэкскавации) слабо слежавшихся или смерзшихся отвальных пород, гравия, отвалов угля и других несвязных пород.

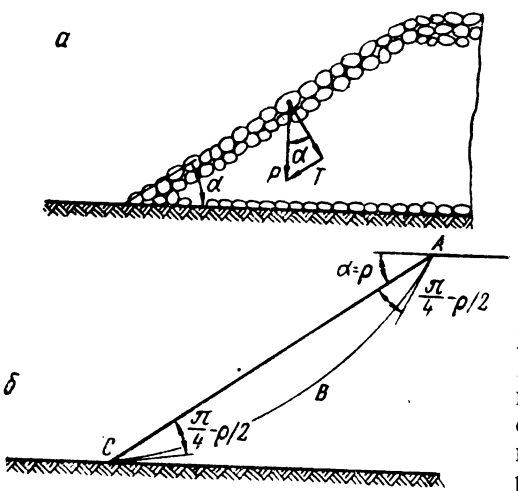


Рис. 16. Равновесие в откосах несвязных пород:

а — на поверхности свободного откоса; *б* — на криволинейной поверхности скольжения

Следует отметить, что коэффициент внутреннего трения сыпучей среды больше коэффициента трения плоских поверхностей отдельных частиц, так как элементарная частица удерживается в равновесии не на плоской наклонной поверхности, а на поверхности, представленной совокупностью выступов и впадин и каждый обломок породы располагается во впадине между нижележащими обломками. Поэтому угол внутреннего трения сыпучей среды зависит не только от коэффициента трения по поверхности элементарных обломков, но также и от их формы и размеров, о чем более подробно говорится во второй части.

Поверхность откоса является не единственной предельной поверхностью в откосе сыпучей среды.

Предельной является также плавная криволинейная поверхность, пересекающая откос в его нижней и верхней точках под углом $\frac{\pi}{4} - \frac{\rho}{2}$, а также целое семейство криволинейных поверхностей, лежащих между поверхностью *ABC* (рис. 16, *б*) и поверхностью откоса. Этим и объясняется возможность обрушения крупных массивов при подкапывании снизу откоса сыпучих пород. Предельное равновесие сыпучих пород по криволинейной поверхности *ABC* подобно предельному равновесию связных пород, изложенному ниже.

§ 2. Условия равновесия в откосах горных пород средней крепости и слабых

Глинистые и трещиноватые горные породы средней крепости обладают сцеплением и внутренним трением и допускают возможность создавать вертикальные откосы определенной высоты $H_в$, которая называется предельной высотой вертикального откоса. При увеличении высоты откоса для сохранения устойчивости его необходимо выполаживать, при этом, естественно, чем положе откос одной и той же породы при тех же прочих условиях, тем выше его устойчивость.

Для определения степени устойчивости откосов связных пород в их массиве отыскивают наиболее слабую поверхность и сравнивают силы, удерживающие $\sum S_i$ и силы, сдвигающие $\sum T_i$. Объем породы в откосе, ограниченный поверхностью откоса и наиболее слабой поверхностью, называется призмой возможного обрушения.

Наиболее слабой является та поверхность, по которой действуют силы с наименьшим отношением $\frac{\sum S_i}{\sum T_i}$.

Если это отношение равно единице, то поверхность, по которой действуют такие силы, называется предельно-напряженной, или **поверхностью скольжения,** и угол откоса в этом случае также является предельным. Таким образом, предельный угол откоса связных пород устанавливается по равновесию на наиболее слабой поверхности, отыскиваемой внутри массива откоса, в отличие от сыпучих пород, у которых предельное равновесие существует и на поверхности откоса.

Сдвигающие силы, действующие по наиболее слабой поверхности, обусловливаются весом массива пород и оборудования, располагающихся над этой поверхностью. В связи с большой высотой откосов при открытых разработках дополнительная нагрузка на них в виде сооружений, землеройных машин и средств транспорта влияет лишь на устойчивость отдельных уступов, а на устойчивость бортов в целом их влияние несущественно.

Формы поверхностей скольжения и их расположение в массиве зависят от слоистости, трещиноватости, дизъюнктивных нарушений и их залегания в откосе, механических характеристик горных пород, объемного веса, величины угла откоса и его высоты.

В простейшем случае, когда массив сложен однородными неводонасыщенными породами (или когда их можно принять таковыми), поверхность скольжения может быть принята круглоцилиндрической (подробнее см. четвертую часть) и оценку устойчивости откоса в этом случае можно произвести в следующем порядке:

1) призма возможного обрушения, ограниченная поверхностью откоса и поверхностью скольжения (или наиболее слабой поверхностью, порядок построения которой изложен в главе XIX), разби-

вается вертикальными линиями на ряд полос *1*, *2*, *3* равной ширины (*a* метров, рис. 17);

2) высота полос условно принимается за их вес и раскладывается на касательные T_i и нормальные N_i относительно поверхности скольжения составляющие;

3) все отрезки касательных и нормальных составляющих, измеренные в миллиметрах, суммируют отдельно, а суммы умножают на масштаб векторов T_i и N_i, который определяется по формуле

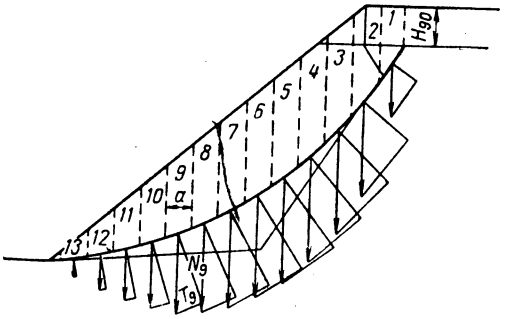


Рис. 17. Равновесие по наиболее слабой поверхности в откосе связных пород

$$c = \frac{a\gamma M}{1000}, \qquad (28)$$

где γ — объемный вес пород;

M — знаменатель масштаба, в котором построен чертеж (ширина полосы вдоль бровки откоса рассматриваемой части призмы возможного обрушения принимается равной 1 *м*);

4) измеряют длину L расчетной поверхности скольжения AC и составляют отношение

$$\frac{fc\sum N_i + KL}{c\sum T_i} \geqslant 1, \qquad (29)$$

где f — коэффициент внутреннего трения пород по расчетной поверхности;

K — сила сцепления, приходящаяся на единицу площади расчетной поверхности.

Знаменатель уравнения (29) представляет сумму сил сдвигающих, а числитель — сумму сил удерживающих массив по этой поверхности. При этом первый член числителя является суммой сил трения, а второй член суммой сил сцепления.

Если суммы сдвигающих и удерживающих сил равны, откос находится в предельном состоянии, при котором начинается оползание или обрушение откоса.

Рассматривая отдельные участки призмы обрушения, изображенной на рис. 17, легко заметить, что в верхней ее части, где поверхность скольжения наиболее крутая, сдвигающие силы преобладают над силами трения и сцепления и поэтому эта часть призмы удерживается в равновесии только при наличии упора со стороны нижней части призмы обрушения, располагающейся на пологой части поверхности скольжения. Поэтому при криволинейной форме поверхности скольжения верхняя часть призмы возмож-

ного обрушения называется **призмой активного давления**, а нижняя часть — **призмой упора**.

При уменьшении веса призмы активного давления устойчивость откоса возрастает, а при уменьшении веса призмы упора устойчивость откоса уменьшается. Этим широко пользуются для борьбы с оползнями и обрушениями бортов.

Водонасыщенные слабые горные породы глинистого и песчано-глинистого состава в условиях всестороннего сжатия при определенных величинах напряжений в механическом отношении не могут характеризоваться постоянными величинами ρ и K, так как у этих пород сопротивление сдвигу перестает возрастать при росте нормальных напряжений.

В этом состоянии горные породы подобны другим пластичным материалам, сопротивление сдвигу которых не зависит от величины нормальных напряжений. В связи с тем, что в геологическом разрезе наряду с пластичными слоями встречаются и такие, у которых сопротивление сдвигу зависит от нормальных напряжений, при оценке устойчивости откосов таких пород нельзя принимать среду как идеально связную (т. е. при $\rho=0$); поэтому оценку устойчивости откосов по наиболее слабой поверхности производят, пользуясь общим сопротивлением сдвигу горных пород в каждой точке без разделения на силы трения и сцепления. Общее сопротивление сдвигу определяется путем испытаний пород на срез при различных нормальных напряжениях и построения графика сопротивления сдвигу для каждого слоя породы.

Оценка устойчивости откоса в этом случае производится по формуле

$$\frac{\sum \tau_{доп}}{\sum \tau_{сдв}} \geqslant 1, \qquad (30)$$

где $\sum \tau_{доп}$ — сумма допустимых касательных напряжений, взятых с графиков сопротивления сдвигу при соответствующих нормальных напряжениях;

$\sum \tau_{сдв}$ — сумма сдвигающих напряжений, возникающих по наиболее слабой поверхности.

Устойчивость откосов уменьшается, если в породах имеются горизонтальные или падающие в сторону выемки поверхности ослабления: поверхности древних оползней, тектонические нарушения и трещины, контакты между слоями, по которым сопротивление значительно меньше, чем по другим направлениям.

§ 3. Условия устойчивости фильтрующих откосов

При фильтрации воды через откос сыпучих пород условие устойчивости на его поверхности в значительной степени усложняется: в этом случае, кроме коэффициента внутреннего трения пород, на величину предельного угла откоса влияют

гидродинамический градиент J фильтрующегося потока и объемный вес взвешенной в воде породы.

Гидродинамический градиент имеет значение объемной силы, приходящейся на единицу объема горной породы, и численно равен уклону грунтового потока (в данном случае при его выклинивании на поверхности откоса).

На участке высачивания уклон потока совпадает с наклоном поверхности фильтрующего откоса (рис. 18).

Равнодействующая двух объемных сил — веса песчаного «скелета», облегченного весом вытесненной им воды, и гидродинами-

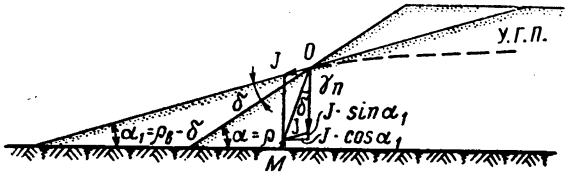


Рис. 18. Схема сил в свободном откосе несвязных пород при фильтрации водного потока. У. Г. П. — уровень грунтового потока

ческого градиента — отклоняется от вертикали на угол δ, величина которого определяется формулой

$$\operatorname{tg}\delta = \frac{J\cos\alpha_1}{\gamma_n + J\sin\alpha_1}. \qquad (31)$$

Из рис. 18 видно, что если бы угол δ был равен 0, т. е. если бы равнодействующая OM была вертикальна, то угол откоса был бы равен углу внутреннего трения среды под водой; отклонение равнодействующей от вертикали на угол δ уменьшает угол откоса на такой же угол, т. е.

$$\alpha_1 = \rho_в - \delta \text{ или } \delta = \rho_в - \alpha_1. \qquad (32)$$

Принимая во внимание равенство $J = \operatorname{tg}\alpha_1$, можно записать равенство

$$\operatorname{tg}(\rho_в - \alpha_1) = \frac{\operatorname{tg}\alpha_1 \cdot \cos\alpha_1}{\gamma_n + \operatorname{tg}\alpha_1 \cdot \sin\alpha_1}. \qquad (33)$$

После преобразования условие предельного равновесия фильтрующего откоса несвязных пород приобретает вид

$$\operatorname{tg}\alpha_1 = \frac{\gamma_n}{\gamma_n + 1}\operatorname{tg}\rho_в. \qquad (34)$$

При наблюдениях за оплыванием фильтрующих песчаных откосов было установлено [198], что после достижения некоторой высоты участка высачивания поток собирается в отдельные ручейки, и в этом случае происходит оплывание и еще бо́льшее выполаживание песчаных откосов; углы оплывших откосов составляют

(*град*): у мелкозернистых песков 8—10, у среднезернистых 10—12, у крупнозернистых 12—16, у гравелистых 18—20.

Условие устойчивости откосов фильтрующих связных пород записывается аналогично условию устойчивости связных неводонасыщенных пород, только в этом случае сумма нормальных напряжений, действующих по наиболее слабой поверхности, уменьшается на величину суммарного гидростатического давления, распределенного по этой поверхности:

$$\sum T_i \leqslant \sum \operatorname{tg} \rho_i (N_i - l_i D_i) + \sum K_i l_i, \qquad (35)$$

где D_i — интенсивность гидростатического давления по площадке l_i (рис. 19).

В фильтрующих откосах на каждый элементарный объем горного массива, расположенного ниже уровня грунтовых вод, кроме силы веса, оказывают влияние и обычное Архимедово взвешивание и боковое гидродинамическое давление, возникающее вследствие разности напоров по боковым граням этого объема.

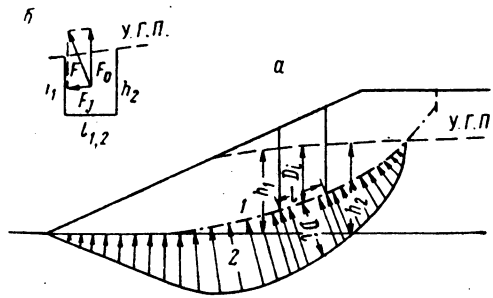


Рис. 19. Схема сил гидростатического и гидродинамического давления:
а — в откосе связных пород; *б* — в элементарном блоке; *1* — поверхность скольжения; *2* — эпюра давления воды на призму обрушения

Гидростатическое взвешивание, уменьшая вес элементарных блоков, тем самым уменьшает нормальную и касательную составляющие. Суммарное влияние гидростатического взвешивания и гидродинамического давления на призму возможного обрушения проявляется как гидростатическое давление, распределенное по поверхности скольжения, нормальное к ней и изменяющее только нормальную составляющую; на касательную составляющую водное давление существенного влияния не оказывает.

В силовом отношении грунтовой поток рассматривается как объемная сила, по направлению совпадающая с линиями тока, а по величине равная градиенту.

Градиент определяется как разность пьезометрических уровней (или напоров) в двух точках линии тока, разделенная на расстояние между этими точками $J = \frac{h_2 - h_1}{l_{1,2}}$.

Объемная сила равна произведению объема на удельную силу

$$F_J = JV = \frac{h_2 - h_1}{l_{1,2}} \cdot \frac{1}{2}(h_2 + h_1) a l_{1,2} = \frac{1}{2} S_2 h_2 - \frac{1}{2} S_1 h_1, \qquad (36)$$

где S_1 и S_2 — площади передней и задней граней элементарного блока;

a — ширина полосы.

Таким образом, мы перешли от объемных сил к силам по контуру.

Одновременно снизу действует гидростатическая сила, направленная снизу вверх (рис. 19, *б*).

Если у элементарного блока можно объемные силы заменить силами, приложенными по контуру, то таким же образом можно перейти к контурным силам для всей призмы возможного обрушения, т. е. в расчет принимать только гидростатическое давление, распределенное по поверхности скольжения.

Глава IV

ФАКТОРЫ, ВЛИЯЮЩИЕ НА УСТОЙЧИВОСТЬ УСТУПОВ И БОРТОВ КАРЬЕРОВ

§ 1. Общая характеристика факторов

Устойчивость откосов уменьшается при уменьшении характеристик сопротивления горных пород срезу, при повышении уровня грунтовых вод в откосе, при увеличении высоты откоса или его угла (что приводит к увеличению сдвигающих сил T), а также при увеличении дополнительных нагрузок на откос.

Характеристики сопротивления сдвигу (K и f) горных пород в массиве зависят от прочности пород в образце, степени и характера трещиноватости, наличия трещин большого протяжения и степени шероховатости поверхностей ослабления.

Прочность горных пород в образце, в свою очередь, зависит от минералогического состава пород, характера и степени их метаморфизма (а у осадочных пород от плотности), а также от степени выветрелости.

Оказывая влияние на величины характеристик сопротивления сдвигу горных пород в массиве, перечисленные факторы влияют тем самым и на устойчивость откосов.

Положение в массиве поверхностей скольжения в значительной степени зависит от ориентировки крупных поверхностей ослабления (дизъюнктивных нарушений, слоистости, сланцеватости и тектонических трещин большого протяжения); этот фактор является одним из решающих при оценке устойчивости откосов, сложенных скальными породами.

Водоносные горизонты, водоемы, открытые и подземные водотоки вблизи карьера также могут существенно влиять на устойчивость откосов в тех случаях, когда вокруг карьера создается крутая депрессионная воронка; гидростатическое давление, действующее на поверхность скольжения, уменьшает нормальную составляющую веса пород, что ведет к уменьшению сил трения и в конечном счете к снижению степени устойчивости откосов.

При решении вопроса устойчивости откосов, сложенных слабо-

связными осадочными, выветрелыми или каолинизированными породами, необходимо учитывать уменьшение их прочности с течением времени под воздействием дождевых, талых и грунтовых вод.

На выветривание пород и на их устойчивость в откосах большое влияние оказывают климатические условия района месторождения.

На устойчивость уступов и бортов в целом оказывают также влияние и горнотехнические условия: способ производства буровзрывных работ, высота бортов и уступов, ширина площадок и их частота (вертикальное расстояние между ними), общая конфигурация борта в плане и в разрезе, время, в течение которого откосы находятся без обновления, подземные горные выработки и пр.

Ниже рассматривается характер влияния всех перечисленных факторов.

§ 2. Геологические факторы

Прочность горных пород в образце является основным фактором, определяющим величину допустимых углов откосов, а при заданных углах — их высоту.

При некоторой величине прочности (называемой далее критической) дальнейшее ее увеличение перестает влиять на величину углов откосов, так как в этом случае решающими оказываются характер и степень трещиноватости горных пород.

Наблюдения показывают, что вследствие естественной трещиноватости горных пород и влияния буровзрывных работ углы откосов отдельных уступов при их длительном сроке службы не следует принимать более 65°; учитывая необходимость оставления берм безопасности, берм очистки, а также транспортных площадок, общий угол наклона борта даже в наиболее крепких породах не будет превышать 55—60°, поэтому критической будет являться такая величина прочности горных пород, которая при заданной высоте борта и необходимом коэффициенте запаса устойчивости (далее принимается равным 1,3) позволяет придать борту общий угол 60°. Если принять среднеминимальный угол трения комплекса скальных и полускальных пород равным 34°, среднюю величину объемного веса равной 2,6 $T/м^3$, а величину структурного ослабления[1] в пределах 2—5% (в зависимости от высоты борта при средней интенсивности трещиноватости пород), то критическая величина сцепления в образце будет характеризоваться данными табл. 2.

Таким образом, если известно, что при данной глубине карьера прочность пород, безусловно, выше критической, нет необходимости детально изучать прочность пород в образце.

При изучении прочности осадочных горных пород необходимо отчетливо представлять условия накопления осадков и процессы последующего их изменения.

---

[1] См. стр. 123—125.

Трещиноватость и тектоника горных пород в неменьшей степени влияют на устойчивость бортов карьеров, чем прочность в образце.

Таблица 2

Критическая величина сцепления в образце

Высота борта, *м*	100	200	300	400	500
Критическая величина сцепления:					
в образце, *кГ/см²*	40	100	200	330	500
в массиве, *Т/м²*	21	42	63	84	105

Решающее влияние на устойчивость бортов карьеров оказывают трещины большого протяжения (более 10 *м*), падающие в направлении наклона борта, развитые главным образом по слоистости, сланцеватости, параллельно зонам разломов и тектоническим нарушениям, а также встречающиеся отдельные трещины протяженностью до 10—20 *м*, ориентированные под острым углом к перечисленным направлениям наибольшего ослабления прочности массива. По трещинам большого протяжения величины сцепления незначительны и изменяются в пределах от 2 до 18 *Т/м²*, а углы внутреннего трения также меньше, чем по другим направлениям, и зависят от степени шероховатости и ровности поверхностей ослабления; полученные при лабораторных испытаниях на трение величины углов трения по трещинам представлены в табл. 12.

Приведенные величины сцепления по поверхностям ослабления получены путем натурных испытаний на срез больших призм на участках бортов, подверженных влянию взрывных работ; связность пород по трещинам оказывается полностью нарушенной, и наблюдаемое сцепление является лишь проявлением зацепления вследствие неровности контактирующих поверхностей блоков пород.

Вследствие незначительности сцепления по трещинам, по контактам слоев и дизъюнктивным нарушениям, а также в связи с пониженными (в сравнении с другими направлениями) величинами углов трения устойчивость борта в целом по этим поверхностям ослабления при их подрезке горными выработками обеспечивается лишь в тех случаях, когда углы их падения в сторону выемки не превышают углов трения по этим поверхностям; отдельные уступы могут сохранять устойчивое состояние при углах падения подрезанных поверхностей ослабления, превышающих на 4—6° углы трения по этим поверхностям.

Это обстоятельство вызывает необходимость производить заоткоску отдельных уступов по слоистости, сланцеватости, дизъюнктивным нарушениям и трещинам большого протяжения в тех случаях, когда углы их падения в сторону выемки более чем на 6° превышают углы трения, приведенные в табл. ~~16~~ 12, и если искусственное укрепление уступов нецелесообразно.

Общий угол наклона борта при наличии подрезки контактов уступами не должен превышать углов трения.

Влияние трещин большого протяжения на общую устойчивость высоких бортов сказывается во всех случаях, независимо от того, имеет ли место подрезка их горными выработками или нет.

Таким образом, необходимо детальное изучение залегания пород лежачего бока в области призмы возможного обрушения и определение величин коэффициентов (углов) трения по контактам слоев и другим поверхностям ослабления.

Ориентировка в пространстве ступенчато расположенных трещин отдельности не влияет на устойчивость бортов в целом, так как при этом предельное состояние возникает не по двухмерной поверхности скольжения, а занимает целую зону, в которой отдельные блоки пород, ограниченные трещинами, приобретают вращательное перемещение [178]. Условия, необходимые для такого перемещения, зависят от формы блоков, их размеров, прочности (в образце) и от ширины зоны, охваченной предельным напряжением. В свою очередь, ширина этой зоны зависит от высоты откоса (борта). Поэтому при изучении трещиноватости массива нет необходимости во всех случаях замерять элементы залегания трещин отдельности, а достаточно устанавливать форму и размеры блоков, ограниченных этими трещинами; при этом форма блоков определяется относительным расположением трещин, а их размеры — частотой трещин, т. е. количеством трещин одной системы, приходящихся на один линейный метр в направлении, перпендикулярном к трещинам.

В любом участке массива обычно обнаруживается от 3 до 5, а иногда и более систем трещин; интенсивность трещиноватости определяется как средняя из интенсивности трех систем, близких к взаимно-перпендикулярным и наиболее интенсивных.

Выветривание горных пород. Влияние выветривания проявляется в уменьшении прочности пород и в форме накопления осыпей на площадках уступов, что приводит к образованию сплошного откоса недопустимо большой высоты и необходимости очистки и уширения площадок. Склонность горных пород к выветриванию характеризуется так называемым коэффициентом стойкости [99] и в значительной степени зависит от структуры и минералогического состава пород. Наиболее стойкими являются породы неполнокристаллической или микрокристаллической структуры, содержащие кварц. Более других поддаются выветриванию в откосах уступов алевролиты и полевошпатовые изверженные породы. Увеличение степени трещиноватости пород также способствует повышению интенсивности их выветривания.

Способность к набуханию. Способность рыхлых глинистых отложений набухать является существенным фактором, влияющим на устойчивость откосов. Уменьшение плотности этих отложений после их разгрузки при проведении горных работ ведет к уменьшению сопротивления сдвигу. Степень набухания зависит

от минералогического и гранулометрического состава горных пород, состава обменных катионов, величины давления (обжимающего) в данной точке, а также от наличия достаточного подтока гравитационной воды. О величине набухания пород в различных точках массива откоса можно судить по обратной ветви компрессионной кривой. Суглинки и песчаные глины интенсивно набухают при напряжениях σ_1 менее 0,5—1,0 *кГ/см*^{2}; эффективное набухание жирных гидрослюдистых глин наблюдается при напряжениях 3—4 *кГ/см*^{2}.

Из перечисленных геологических факторов, оказывающих влияние на устойчивость бортов карьеров, следует особое внимание обратить на ряд факторов, которые при разведке месторождений наиболее часто оказываются не выявленными; к ним относятся:

а) трещиноватость глинистых отложений — элювиальных и делювиальных глин, а также жирных глин морской и лагунной фаций;

б) поверхности древних оползней на склонах долин, возвышенностей и сопок;

в) ослабленные контакты между слоями глин;

г) слои пластичных глин в основании толщи вскрышных пород;

д) диапировые складки и другие осложненные формы залегания слоев;

е) тектонические нарушения и тектонические трещины большого протяжения.

§ 3. Гидрогеологические факторы

Гидрогеологические факторы оказывают большое влияние на устойчивость откосов несвязных и слабосвязных осадочных и сильно выветрелых скальных пород. Это влияние проявляется в следующем.

Подток грунтовых вод, а также дождевых и талых к породам, склонным к набуханию при их разгрузке от давления вышележащих слоев, приводит к уменьшению прочности пород и вызывает большое количество местных деформаций отдельных уступов. Особенно большое влияние на набухание песчаных глин и слабо уплотненных алевролитов оказывают напорные воды в лежачем боку залежей или угольных пластов. На угольных месторождениях в таких случаях всегда возникают крупные оползни, если отсутствует дренаж напорных водоносных горизонтов.

Гидростатическое давление, действующее по наиболее слабой поверхности, уменьшает нормальную составляющую веса элементарных блоков, что ведет к уменьшению сил трения, удерживающих откос в равновесии. Так как сила трения является произведением нормальной составляющей веса на коэффициент внутреннего трения пород, проявление гидростатического давления тем сильнее, чем больше коэффициент трения. На устой-

чивость пластичных глин, коэффициент внутреннего трения которых слишком мал, гидростатическое давление не оказывает существенного влияния (т. е. не уменьшает силы трения по поверхности скольжения, а влияет лишь на набухание глин).

Гидродинамическое давление проявляется как объемная сила, направление которой совпадает с направлением линий тока, а величина равна градиенту потока. На общую устойчивость фильтрующих откосов гидродинамическое давление влияет совместно с обычным гидростатическим взвешиванием, направленным вверх и равным объему грунта в той части призмы возможного обрушения, которая расположена ниже уровня грунтовых вод. Совместное влияние гидростатического взвешивания и гидродинамического давления можно рассматривать как гидростатическое давление, распределенное по вероятной поверхности скольжения и направленное по нормали к ней.

Гидродинамическое давление особенно большое влияние оказывает на устойчивость песчаных откосов на участке высачивания; оно приводит к выпиранию откоса и вызывает необходимость выполаживать его на величину $\Delta\alpha$, приближенно вычисляемую по формуле

$$\operatorname{tg} \Delta\alpha = \frac{1}{\gamma} \operatorname{tg} \rho_в,$$

где γ — объемный вес водонасыщенного песка;
$\rho_в$ — угол внутреннего трения песка (угол естественного откоса под водой).

Оплывание. В силу неравномерности потока на поверхности откоса и его размывающего действия с течением времени на участках высачивания происходит выполаживание откоса, рассчитанного на выпор; величины углов оплывших песчаных откосов приведены в главе III.

Оплывание наиболее опасно при сосредоточенных грунтовых потоках из крутых песчаных откосов (более 20—25°). На Лебединском карьере КМА на участках сосредоточенной фильтрации с дебитом до 30—40 $м^3/ч$ при их протяженности 1—1,5 *м* наблюдался вынос песка и образование подземных каналов (пригрузка очагов сосредоточенной фильтрации слоем щебня или гравия полностью прекращала вынос песка).

Суффозия в виде выноса из откосов движущимся грунтовым потоком более мелких частиц грунтового скелета при открытых разработках наблюдается лишь при весьма большой неоднородности пород ($\eta > 15$—20), так как вокруг открытых горных выработок обычно формируется пологая депрессионная поверхность с уклоном (градиентом) на участке высачивания не более 0,2; при таких градиентах грунтового потока, как показывают исследования [58], грунты с коэффициентом неоднородности менее 15 суффозии не подвергаются.

Выщелачивание. В откосах загипсованных, карбонатизированных и засоленных слабоуплотненных пород, фильтрующих грунтовые воды, происходит выщелачивание солей, повышающих связность пород, что приводит с течением времени к снижению их прочности и оползанию подобно тому, как это происходит при набухании пород в откосах выемок.

Тиксотропное разжижение. Тиксотропное разжижение характеризуется внезапным разрушением структуры водонасыщенных пылеватых песков. Физическая сторона тиксотропного разжижения изложена в главе VII. Тиксотропное разжижение пылеватых песков в откосах наблюдается при их пористости выше 0,40—0,45. Пески с такой пористостью встречаются в отвалах. С тиксотропным разжижением иногда смешивается разжижение вследствие механического разрушения структуры слабосвязных пород, обладающих сцеплением упрочнения: лёссовидных суглинков, мергельных глин, мела и др.

Внезапные прорывы вод при открытых разработках происходят в тех случаях, когда горные выработки впервые подходят к водообильным водоносным горизонтам на значительной глубине ниже пьезометрического уровня. Поэтому при вскрытии напорных вод открытыми горными выработками необходим расчет ожидаемого притока воды, должен быть подготовлен водоотлив и освобождено от оборудования пространство возможного затопления и пр. В необходимых случаях должно быть произведено снижение уровня водопонижающими скважинами, если это оправдывается экономически и технически.

На устойчивость в откосах крепких трещиноватых пород в обычных условиях гидрогеологические факторы не оказывают существенного влияния, так как пологая депрессионная воронка лишь в незначительной степени захватывает призму возможного обрушения, а устойчивость пород в отношении набухания и размокания способствует сохранению характеристик прочности пород в течение длительного времени.

При наличии водоемов и водотоков вблизи откосов крепких пород возможны два основных случая.

1. Дно водоемов заилено, а фильтрационные свойства пород достаточны для свободного стока фильтрующихся из водоема вод и образования пологой депрессионной воронки, в этом случае водоемы существенно не влияют на устойчивость бортов.

2. Дно водоемов размыто, а фильтрационные свойства пород с глубиной уменьшаются в такой степени, что образуется крутая депрессионная воронка; в этом случае водное давление, распределенное по возможной поверхности обрушений, существенно влияет на устойчивость борта.

Второй случай встречается наиболее часто; аналогичны с ним и те случаи, когда на земной поверхности нет постоянных открытых водоемов, но имеется водоносный горизонт, гидравлически связан-

ный с трещинными водами скальных пород и имеющий интенсивное питание.

Отсутствие планировки поверхности и вследствие этого отсутствие стока дождевых и талых вод способствует непрерывному питанию водоносного горизонта и постоянному обводнению пород, слагающих борта карьеров.

Гидрогеологические факторы зависят от гидрогеологических условий месторождений, которые в свою очередь зависят от геологических факторов, а также от климата, современного рельефа местности и наличия поверхностных водоемов.

Литологический состав пород, их тектоника и трещиноватость определяют статические запасы вод и влияют на динамические притоки и условия дренирования.

Подвергавшиеся тектоническим процессам трещиноватые слои угля и песчаников имеют значительные статические запасы вод и одновременно с этим являются хорошими коллекторами и проводниками воды при дренировании. На месторождениях, не подвергавшихся процессам смятия в складки (Ангренском, Кушмурунском и др.), песчаники и угли содержат незначительное количество гравитационной воды и при организации дренажных работ не могут служить коллекторами, являясь плохими проводниками последней.

Выдержанность литологического состава и чередование водоносных и водонепроницаемых слоев также оказывают большое влияние на дренируемость пород. Слои водоносных (водопроводящих) пород, выдержанные на большом протяжении, упрощают организацию дренажных работ; при частом выклинивании и залегании их в виде линз дренаж осложняется. Частое чередование водоносных и водопроницаемых или слабопроницаемых обводненных глинистых и песчано-глинистых слоев способствует лучшему обезвоживанию; глинистые слои большой мощности практически не дренируются.

Покровные слабо водопроницаемые породы, залегающие над трещиноватыми или закарстованными, уменьшают фильтрацию поверхностных вод в горные породы.

При открытых разработках большую опасность часто представляет незначительный подток воды по дизъюнктивным нарушениям, трещинам или тонким линзам водоносных пород, подводящим воду к борту карьера, что приводит к подпитыванию контактов слоев или рыхлых глинистых пород, склонных к набуханию. Нередко источники такого рода трудно обнаружить, и они, подпитывая породы в течение длительного времени, приводят к образованию оползней там, где их не ожидают.

Отсутствие регулирования стока вытекающих на площадки уступов вод приводит к обводнению всех нижерасположенных уступов, что затрудняет работу даже в случаях, когда уступы сложены неразмокающими и неоползающими породами (на рудных

карьерах при весьма слабой обводненности коренных пород довольно часто взрывные скважины оказываются заполненными водой).

§ 4. Климатические условия

Количество атмосферных осадков, характер дождей, мощность снегового покрова и продолжительность периода таяния — все эти факторы оказывают заметное влияние на обводнение пород и их устойчивость в откосах. Большое влияние атмосферные осадки оказывают на состояние транспортных площадок и на устойчивость отвалов.

Длительные дожди являются причиной катастрофических деформаций внутренних и внешних отвалов, сложенных пылеватыми и глинистыми песками; эти деформации проявляются в форме оплывин, охватывающих большие объемы пород и образующихся практически мгновенно. Примером такого рода оплывин являются деформации отвалов на карьере Янтарского комбината [154].

Отвалы слабосвязных глинистых пород часто деформируются после увлажнения дождевыми водами поверхности откоса ранее отсыпанных пород. Нередки случаи возникновения оползней отвалов вследствие того, что в период снеготаяния под отвалами оказываются погребенными снежные сугробы.

Температурный режим района, глубина сезонного промерзания и оттаивания пород наряду с экспозицией откосов являются факторами выветривания слабостойких пород, приводящими к их разрушению на поверхности откосов, образованию осыпей и разрушению транспортных площадок и берм очистки. Интенсивность выветривания алевролитов в наиболее неблагоприятных условиях достигает 6—8 *см* в год.

На устойчивость песчаных откосов в условиях сухого климата влияют также ветры, их сила, продолжительность и направление. В этом отношении значение имеет расположение постоянных откосов относительно преобладающего направления ветров.

Рельеф района и его залесенность и испаряемость также являются существенными факторами, влияющими на обводнение пород в окрестности карьера и на их устойчивость в откосах.

Резко выраженный рельеф, не содержащий бессточных впадин, способствует хорошему стоку вод атмосферных осадков и ведет к уменьшению обводненности пород, слагающих месторождение; бугристо-котлованный микрорельеф, исключая сток поверхностных вод, способствует заболачиванию поверхности и увеличению обводненности пород. Месторождения, расположенные выше местного базиса эрозии, менее обводнены, и зеркало грунтовых вод расположено глубоко, тогда как на месторождениях, расположенных в ровной местности, уровень грунтовых вод располагается выше и часто совпадает с земной поверхностью.

Рельеф местности способствует образованию поверхностных водоемов, а последние, если они расположены в районе карьера, служат источниками обводнения горных выработок.

Заболоченная поверхность, на которую отсыпаются внешние отвалы, способствует их оползанию.

§ 5. Горнотехнические факторы

Из этой группы факторов на устойчивость откосов скальных и полускальных горных пород и на величину углов наклона бортов наибольшее влияние оказывает способ производства буровзрывных работ.

При массовых взрывах в вертикальных колонковых скважинах и в штольнях частичное дробление пород распространяется на расстояние до 60—70 *м* от места взрыва. После выемки экскаватором полностью раздробленной (разрыхленной) породы в уступах остаются породы, сохранившие не более 20—25% естественной прочности массива. При таком способе взрывания откосы уступов не имеют постоянного угла, а бермы не имеют постоянной ширины. С течением времени бермы покрываются осыпью вышележащих уступов и частично обрушаются, вследствие чего борта приобретают сплошной откос при недопустимо большой высоте, что делает работу на нижележащих уступах опасной. При массовых взрывах под действием взрывной волны изменяется напряженное состояние массива, что уменьшает силы трения по наиболее слабой поверхности и при небольшом запасе устойчивости может привести к внезапным обрушениям бортов. Дробление пород и сейсмический эффект могут быть уменьшены путем применения короткозамедленного взрывания при подходе уступов к предельному контуру, начиная с расстояния в 30—50 *м*; могут быть эффективными и другие мероприятия, изложенные в главе XV.

При применении в последней заходке наклонных заоткашивающих скважин, располагающихся на расстоянии 2,5—3 *м* одна от другой, создается возможность придать откосам уступов заданный угол и получать бермы заданной ширины. Такой способ заоткоски уступов скальных пород с успехом применяется в течение ряда лет на Блявинском меднорудном карьере, на котором уступы приближаются к предельному контуру ранее, чем на других карьерах. В последние годы заоткоску уступов наклонными скважинами начали производить и на других карьерах.

На величины углов наклона высоких бортов, сложенных скальными породами, и на безопасность работы в карьере существенное влияние оказывают ширина берм очистки и транспортных берм, частота их расположения, а также тип съезда.

На устойчивость рыхлых или выветрелых, склонных к набуханию или размоканию пород влияет профиль площадок уступов, обеспечивающий сток дождевых и талых вод с площадок, а также планировка площадок, устройство водосточных

канавок и своевременная непрерывная откачка вод, скапливающихся в разрезных траншеях.

Своевременная заоткоска уступов рыхлых пород способствует предотвращению их обрушений и накапливания оползневых масс на бортах карьеров.

Отработка полезного ископаемого, залегающего в рыхлых пучащих породах широким фронтом, иногда вызывает необходимость значительного выполаживания бортов. В таких условиях разработка отдельными неширокими участками с заваливанием выработанного пространства вскрышной породой оказывается весьма рациональной, т. е. планирование очередности разработки с учетом условий устойчивости пород также является существенным фактором, влияющим на устойчивость пород в бортах карьеров.

Применение бортов выпуклого профиля в условиях рыхлых и крепких пород способствует обеспечению устойчивости бортов при меньших объемах вскрыши, чем при плоском или вогнутом профиле; выпуклый профиль бортам нецелесообразно придавать только в случае, если в основании уступа залегают значительно более слабые породы, чем в его средней и верхней частях.

Подработка бортов подземными горными выработками приводит к ослаблению прочности массива и должна учитываться при определении общих углов наклона бортов, а при разработке с обрушением — и при определении углов откосов уступов.

Это влияние зависит от системы разработок, свойств горных пород и характера их деформации при подработке.

Глава V

КЛАССИФИКАЦИЯ ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ ГОРНЫХ ПОРОД ПО УСЛОВИЯМ УСТОЙЧИВОСТИ БОРТОВ КАРЬЕРОВ[1]

§ 1. Основные положения классификации

При изучении инженерно-геологических условий месторождений, подлежащих разработке открытым способом, а также при определении углов наклона бортов и при разработке мероприятий, предотвращающих развитие деформаций, оказывается необходимым классифицировать инженерно-геологические комплексы горных пород по условиям устойчивости бортов карьеров.

[1] Описание инженерно-геологических комплексов в этой главе сделано инж. С. В. Кагермазовой.

Таблица 3

Классификация инженерно-геологических комплексов горных пород по условиям устойчивости бортов карьеров

Характеристика комплексов	Характеристика комплексов по условиям сложности залегания пород		
	1-я подгруппа Простые	2-я подгруппа Средней сложности	3-я подгруппа Сложные
I группа Комплексы крепких скальных пород; прочность в образце: $\sigma_{сж} > 800$ *кГ/см²*	Горизонтальное, пологое и наклонное залегание; выдержанность пород по мощности и простиранию, разрывные нарушения и дополнительная складчатость совершенно отсутствуют или весьма немногочисленны Печенгские месторождения, некоторые месторождения Кривого Рога	Наклонное и крутое залегание, серия зон дробления и разрывные нарушения иногда со значительным перемещением пород Гороблагодатское и Лебяжинское железорудные месторождения	Наклонное и крутое залегание, интенсивная складчатость, развитие дизъюнктивных нарушений, значительное количество незакономерно расположенных тектонических трещин большого протяжения крутого и пологого падения; секущие формы интрузий Алтын-Топканское свинцово-цинковое, Абаканское железорудное месторождения; некоторые месторождения Кривого Рога
II группа Комплексы измененных скальных и полускальных пород со средней прочностью в образце: $\sigma_{сж} = 80 - 800$ *кГ/см²*	Спокойное горизонтальное или пологое залегание, слабая фациальная изменчивость пород и их малая нарушенность; преобладает нормальносекущая трещиноватость	Горизонтальное, пологое наклонное и крутое залегание, осложненное рядом пликативных и дизъюнктивных нарушений; более сложный характер трещиноватости	Наклонное и крутое залегание, частое чередование пород, не выдержанных по мощности и простиранию, широкое развитие зон рассланцевания и перемятия пород; наличие серии надвигов и сбросов; незакономерное залегание сплошных трещин. Комплексы вмещающих пород месторождений: Зыряновского, Баженовского, Джетыгаринского, Николаевского, Кузбасса (Бачатского, Краснобродского, Киселевского), Уфалейских никелевых

Продолжение табл. 3

Характеристика комплексов	Характеристика комплексов по условиям сложности залегания пород		
	1-я подгруппа Простые	2-я подгруппа Средней сложности	3-я подгруппа Сложные
	Томь-Усинское и Грамотеинское месторождения Кузбасса	Месторождения: Коунрадское, Кальмакырское, Сибайское и Блявинское, Кедровское (Кузбасс), Экибастузское угольное	
III группа Комплексы слабых пород, прочность в образце: $\sigma_{сж} < 80$ *кГ/см²*	Горизонтальное и пологое залегание, слабая фациальная изменчивость пород, относительно простые гидрогеологические условия (по вмещающим породам и по характеру залегания водоносных горизонтов)	Горизонтальное и пологое залегание, значительная фациальная изменчивость, довольно сложные гидрогеологические условия	Горизонтальное, пологое и крутое залегание, сильная фациальная изменчивость, развитие дизъюнктивных нарушений, сложные гидрогеологические условия
	Никопольский марганцевый бассейн, комплекс покровных отложений Соколовского, Сарбайского и Лебединского (КМА) железорудных месторождений	Подмосковный буроугольный бассейн, Керченское железорудное месторождение, комплекс рыхлых отложений Зыряновского месторождения, Кушмурунское и Ирша-Бородинское буроугольные месторождения	Североуральские буроугольные месторождения; Южно-Уральский буро-угольный бассейн Боровичское месторождение огнеупорных глин

Исследования устойчивости бортов карьеров, проведенные на большом числе рудных и угольных месторождений с разнообразными геологическими и гидрогеологическими условиями, показывают, что в основу классификации инженерно-геологических комплексов горных пород должны быть положены физико-механические свойства пород и литолого-структурные особенности комплексов.

На устойчивость бортов карьеров, естественно, не влияет вид полезного ископаемого, поэтому к одной группе могут быть отнесены горные массивы угольных, рудных и нерудных месторождений полезных ископаемых, если породы, их слагающие, сходны по физико-механическим свойствам.

В связи с тем, что на многих месторождениях комплексы вмещающих и покрывающих пород существенно отличаются по их устойчивости в бортах карьеров и не могут быть отнесены к одной группе, целесообразно группировать по условиям устойчивости бортов не месторождения в целом, а инженерно-геологические комплексы пород, покровные и вмещающие полезные ископаемые.

По степени прочности пород инженерно-геологические комплексы разделены на три группы.

По структурным особенностям и гидрогеологическим условиям, определяющим сложность решения вопроса устойчивости бортов карьеров и объем инженерно-геологических изысканий, каждая группа инженерно-геологических комплексов разделена на три подгруппы.

Общая характеристика инженерно-геологических комплексов по группам и подгруппам дана в табл. 3.

§ 2. Комплексы первой группы

Инженерно-геологические комплексы первой группы слагаются невыветрелыми и слабовыветрелыми крепкими породами, характеризующимися высокой прочностью на срез или сжатие $K > 200$ *кГ/см*^{2}, $\sigma_{сж} > 800$ *кГ/см*^{2}.

В этих породах углы наклона бортов высотой до 300 *м* могут быть максимальными технически допустимыми, если в них нет неблагоприятно ориентированных поверхностей ослабления.

Комплексы этой группы могут быть представлены изверженными породами всех групп, от кислых до ультраосновных. Осадочные породы представлены плотными массивными известняками, кварцевыми песчаниками и кремнистыми конгломератами; метаморфические породы — филлитами, мраморами, кварцитами, сланцами, серпентинитами, роговиками и скарнами. В виде небольших линз и тонких прослоев могут встречаться и более слабые, например хлорито-тальковые породы, которые имеют распространение обычно вдоль контакта вмещающих пород с рудным телом, а в бортах карьеров отсутствуют.

Породы характеризуются невысокой степенью трещиноватости — чаще всего развиты 3—4 основные системы трещин, разбивающих массив на крупные блоки (размером более 50 *см*) большей частью кубической или параллелепипедной формы; интенсивность трещиноватости повышается в районе рудного тела и крупных разрывных нарушений, где число систем трещин увеличивается до 5—6, а размеры блоков уменьшаются до 10—15 *см*.

Основными факторами, определяющими углы откосов уступов и наклона бортов, сложенных крепкими (скальными) породами, являются структура массива, а именно, наличие и ориентировка крупных поверхностей ослабления (слоистости, сланцеватости, дизъюнктивных нарушений и тектонических трещин большого протяжения), а также горнотехнические факторы; гидрогеологические факторы на устойчивость бортов влияния не оказывают.

Комплексы первой группы обычно бывают рудовмещающими и характеризуются простыми гидрогеологическими условиями, что определяется слабой трещиноватостью, слабой обводненностью пород и их стойкостью. В пределах горноскладчатых областей они бывают покрыты чехлом выветрелых пород, а в пределах платформенных областей покрыты мощной толщей более молодых отложений.

По структурным особенностям комплексы первой группы разделяются на следующие три подгруппы.

К первой подгруппе относятся комплексы, характеризующиеся в пределах карьерного поля выдержанным горизонтальным, наклонным и реже крутым залеганием слоев пород, представленных только осадочно-метаморфическими породами, либо в сочетании с изверженными: форма залегания последних — согласная с основным комплексом пород. Массив вмещающих пород характеризуется наличием дизъюнктивных нарушений, не меняющих существенно залегания пород.

Рудные залежи, обычно приуроченные к межпластовым тектоническим нарушениям, имеют пластообразную или линзообразную форму и залегают согласно с вмещающими породами.

Примером инженерно-геологических комплексов этой подгруппы являются вмещающие породы медно-никелевых месторождений Печенгского района.

Медно-никелевые месторождения Печенги находятся в пределах Печенгской свиты, представленной чередованием эффузивных и туфогенно-осадочных пород, по возрасту относимых к палеозою.

Оруденение генетически связано с интрузиями основных и ультраосновных пород. Все интрузии имеют пластовую или линзовидную форму и залегают согласно с вмещающими породами, погружаясь к юго — юго-западу под углом 30—60°.

В пределах карьерного поля имеются разломы, к которым приурочено оруденение; в филлитовой толще установлена главная широтная зона разлома, с которой связаны все медно-никелевые месторождения Печенги.

По морфологии, условиям залегания и структуре все месторождения рудного поля сходны между собой. Они представлены одним рудным телом (Каула, Котсельваара) или группой рудных тел (Каммикиви, Ждановское и др.). Рудные тела вытянуты по простиранию межпластовых тектонических зон и падают в южном направлении под углом 35—60°.

Лежачий бок рудного тела сложен в основном филлитами, висячий (на ряде месторождений: Каула, Каммикиви и др.) — серпентинитами или перидотитами и габбро.

Пластовая форма рудных тел, совпадение разломов с напластованием пород, выдержанность залегания пород на большом протяжении и простые гидрогеологические условия определяют отнесение комплекса этих пород к первой подгруппе.

Комплексы пород второй подгруппы характеризуются более сложным строением, наличием крутопадающих и реже пологопадающих зон дробления, простирающихся параллельно или диагонально рудному телу; иногда имеют место разрывные нарушения со значительным перемещением пород.

Примером комплексов этой подгруппы являются вмещающие породы Гороблагодатского железорудного месторождения (рис. 20).

Вмещающие породы со стороны лежачего бока рудного тела представлены: кислыми эффузивами, их туфами, туфобрекчиями, туфопесчаниками с прослоями мраморов, пироксен-плагиоклазовых и диабазовых порфиритов — это осадочно-эффузивная толща; со стороны висячего бока — пироксен-плагиоклазовыми и диабазовыми порфиритами, сиенитами и сиенит-порфирами.

Простирание пород осадочно-эффузивной толщи северное — северо-восточное; падение под углом 30—35°.

Структура рудного поля сложная. Комплекс пород нарушен пострудными дислокациями, в результате чего отдельные блоки месторождения претерпели вертикальные перемещения; так, северо-западная часть месторождения приподнята относительно юго-восточной в среднем на 140 *м* (меридиональный сброс).

Дизъюнктивные нарушения небольшой амплитуды, а также трещины большого протяжения, падающие в сторону выемки под углом 32—45°, довольно часто встречаются по западному борту. Эти нарушения, с точки зрения устойчивости бортов, неблагоприятны, так как по ним происходит обрушение откосов уступов.

Вблизи крупных смещений наблюдается интенсивная трещиноватость пород, которая постепенно затухает при удалении от зоны нарушения.

Для пород Гороблагодатского месторождения характерно наличие 3—4 систем трещин (на отдельных участках — 5 систем), разбивающих массив на прямоугольные блоки размером 0,4—0,5 *м*, т. е. породы обладают крупноблоковой структурой и, по данным испытаний на срез, характеризуются большой прочностью в куске.

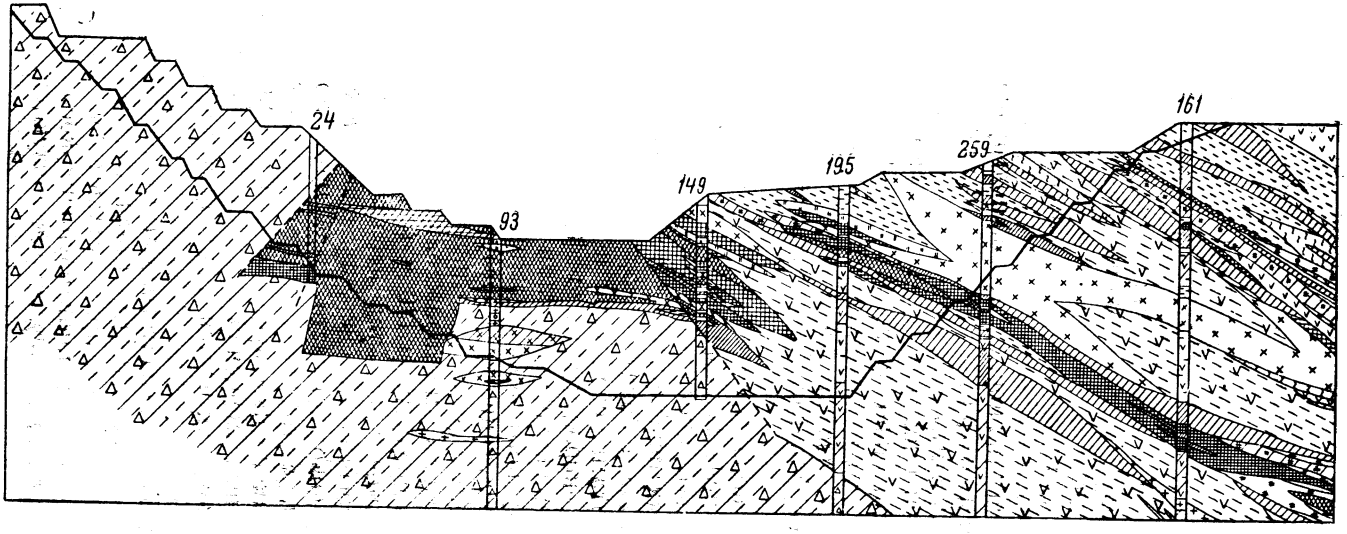


Рис. 20. Геологический разрез Гороблагодатского железорудного месторождения (группа 1—1).

Комплексы третьей подгруппы характеризуются сложной тектоникой; породы интенсивно смяты в складки и обычно имеют крутое падение. Характерно развитие многочисленных дорудных и послерудных тектонических нарушений разнообразной ориентировки. Эти нарушения могут быть нормальными сбросами, взбросами крутого и пологого падения. Результатом разрывных нарушений является смещение блоков массива друг относительно друга. Интрузивные породы имеют секущую форму залегания.

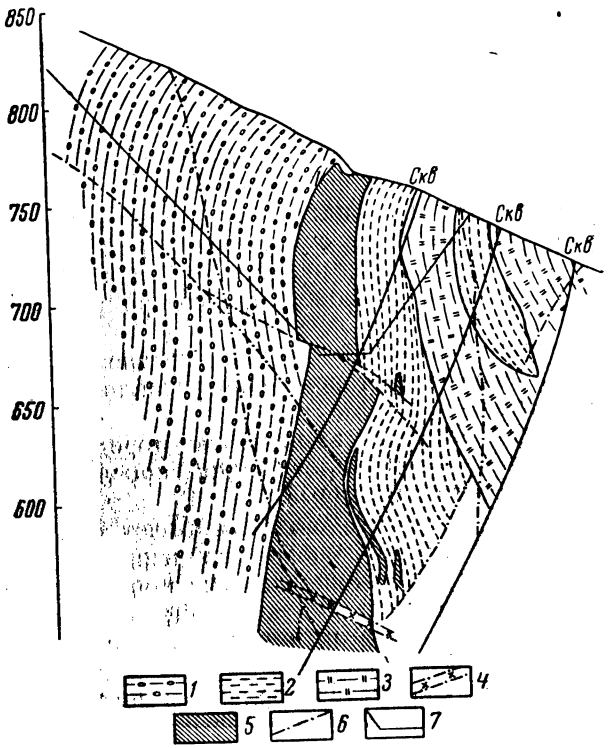


Рис. 21. Геологический разрез Абаканского железорудного месторождения (группа 1—3):

1 — агломераты; *2* — песчано-глинистые сланцы; *3* — аркозовые песчаники; *4* — альбитит-порфиры; *5* — руда; *6* — тектонические нарушения; *7* — контур карьера

Примером комплексов этой подгруппы являются вмещающие породы Абаканского железорудного месторождения (рис. 21).

Район Абаканского железорудного месторождения сложен кембрийскими и девонскими осадочно-туфогенными и эффузивными породами, прорванными альбитовой интрузией, с которой генетически связано магнетитовое оруденение.

Общее простирание пород северо-восточное, падение крутое и невыдержанное, меняющееся от северо-западного до юго-восточного.

Кембрийские образования представлены кварцевыми кератофирами и их туфами, имеющими развитие в северо-западной части месторождения, а также осадочно-туфогенными эффузивными породами — известняками, песчаниками, граувакками, агломератами, аргиллитами, с линзами порфиритов и кератофиров; эти отложения являются рудовмещающими.

Девонские образования — лабрадоровые порфириты — развиты в северо-западной части месторождения.

Главная рудная залежь имеет неправильную пластообразную форму и залегает согласно с вмещающими породами с простиранием в северо-восточном направлении.

Наиболее крупным дизъюнктивным нарушением из дорудных проявлений является разлом, отделяющий кембрийские отложения от девонских эффузивов; разлом простирается в северо-западном направлении с падением на северо-восток под углом 75—80°.

С послерудной тектоникой связана интенсивная трещиноватость пород; в пределах месторождения устанавливается 6 основных систем трещин.

Значительное развитие во вмещающих породах имеют тектонические трещины большого протяжения, прослеживающиеся по тем же системам, что и несплошные.

Широкое развитие на месторождении имеют тектонические нарушения, сопровождающиеся зонами дробления. Зоны дробления выполнены либо сильно рассланцованными породами, либо каолинизированным и выветрелым материалом; мощность их изменяется от 20—60 *см* до 1—2 *м*, в отдельных случаях достигает 8—10 *м*.

В пределах рудного поля установлено свыше десяти крупных нарушений — тектонических зон, которые прослеживаются в уступах карьера и в подземных горных выработках.

Гидрогеологические условия месторождения простые. Месторождение находится в высокогорном районе с интенсивно расчлененным рельефом и расположено на водоразделе рек Рудная и Средняя Кеня; подземные воды месторождения дренируются этими водотоками.

Рыхлые отложения, покрывающие коренные породы, имеют незначительную мощность и характеризуются в основном щебенистым составом.

Детальная разведка Абаканского месторождения, проведенная в 1946—1949 гг., уточнила контуры рудных тел. Основными геологоразведочными выработками были скважины колонкового бурения (43 скважины), глубокие шурфы, квершлаги и штольни.

Расстояние между разведочными линиями на стадии детальной разведки было сокращено до 50—60 *м*, а расстояние между

разведочными выработками — до 50—80 *м*. Дальнейшее сгущение сетки с целью изучения более глубоких горизонтов производилось в 1950—1951 гг. Дополнительно было пробурено 42 скважины колонкового бурения (средняя глубина бурения 350 *м*) и были углублены скважины, пробуренные ранее.

Дополнительными скважинами были подсечены пострудные тектонические нарушения, по которым произошло смещение частей главной рудной залежи и вмещающих пород.

В процессе эксплуатации карьера и увеличения фронта подземных горных работ геолого-маркшейдерской службой рудника проводилось тщательное картирование забоев и стенок выработок, что позволило выявить многочисленные тектонические нарушения, не подсеченные скважинами, и изменило представление о тектонике некоторых участков, распространении отдельных нарушений на глубину и взаимном расположении их.

Это показывает, что на тех месторождениях, на которых развиты комплексы этой подгруппы, большое значение имеет доразведка в период строительства карьера и в первый период эксплуатации.

§ 3. Комплексы второй группы

Породы, слагающие инженерно-геологические комплексы второй группы, характеризуются недостаточной прочностью для обеспечения устойчивости высоких бортов карьеров при крутых углах наклона (более 40—45°); с другой стороны, даже наиболее слабые породы комплексов этой группы не склонны к набуханию при разгрузке и к переходу в пластичное состояние в бортах глубоких карьеров. В основном это сильно трещиноватые интенсивно выветрелые изверженные и метаморфические породы, а также осадочные породы, обладающие средней прочностью, а именно $K=20—200$ *кГ/см*^{2}, $\sigma_{сж}=80—800$ *кГ/см*^{2}.

К этой группе комплексов пород относятся вмещающие породы большей части гидротермальных месторождений, на которых первичные породы под влиянием гидротермальных растворов претерпели значительные изменения не только вдоль контакта с рудным телом, но и на периферийных участках, где широко проявились процессы автометаморфизма и гидротермального метаморфизма — серпентинизация, хлоритизация, оталькование, карбонатизация, доломитизация, серицитизация, окварцевание, каолинизация и др. В одних случаях эти процессы приводят к образованию более прочных пород массивной текстуры (чаще всего это метаморфические породы, образованные из осадочных), в других случаях возникают менее прочные породы, например тальковые и серицитовые сланцы.

Изменение пород происходит также в приповерхностных условиях под влиянием физического и химического выветривания. В пределах зоны выветривания, которая распространяется на

глубину до 50—60 *м*, сильно развиты трещины выветривания породы в значительной степени каолинизированы.

В эту же группу входят комплексы пород ряда угольных бассейнов геосинклинального типа, характеризующихся высокой степенью углефикации и литификации пород (плотные сцементированные породы), большой мощностью угленосных отложений и их сложной дислоцированностью.

Комплексы пород этой группы характеризуются высокой степенью трещиноватости: обычно имеется 4—6 основных систем трещин, разбивающих массив на блоки размером от 10 до 50 *см* параллелепипедальной, плитчатой и остроугольной формы.

Большая часть инженерно-геологических комплексов второй группы имеет простые гидрогеологические условия. При наличии толщи закарстованных карбонатных пород — известняков и доломитов — с крупными карстовыми полостями, заполненными песчано-глинистым материалом, гидрогеологические условия месторождений осложняются.

Устойчивость бортов карьеров и величина углов их наклона в этих условиях зависят от прочностных характеристик пород, структурных особенностей массива — характера и степени трещиноватости, наличия и ориентировки крупных поверхностей ослабления, а также напорных вод, сохраняющихся в бортах после вскрытия месторождения (при водонепроницаемых завесах в борту).

По сложности тектоники и характеру трещиноватости выделены следующие три подгруппы комплексов пород.

К первой подгруппе относятся комплексы, сложенные метаморфическими и уплотненными осадочными породами, вмещающими угольные пласты, а также пластовые и пластообразные рудные тела. Размеры промышленных залежей велики, залегание их выдержанное, горизонтальное или пологое. Слои вмещающих пород характеризуются слабой фациальной изменчивостью, залегание пород в основном спокойное, но возможны одиночные нарушения пликативного и дизъюнктивного характера, преимущественное развитие имеет нормальносекущая, относительно наслоения вмещающих пород, трещиноватость.

Примером комплексов первой подгруппы являются породы Киизакского участка Томь-Усинского района Кузбасса (рис. 22). Участок характеризуется пологим выдержанным залеганием слоев; вмещающие породы представлены в основном алевролитами, кварцевыми и глинистыми песчаниками и имеют слабую обводненность.

Комплексы второй подгруппы характеризуются значительной сложностью тектоники, наличием зон метаморфизма и выветривания, а также изменчивостью характера и степени трещиноватости. Залегание вмещающих пород осложнено рядом пликативных и дизъюнктивных нарушений; характерно развитие зон рассланцевания пород. Рудные тела имеют форму штоков, пластов, линз

и жил, залегающих наклонно или круто и большей частью согласно с вмещающими породами.

Эта подгруппа иллюстрируется вмещающими породами Кальмакырского медно-молибденового и Кедровского (Кузбасс) месторождений.

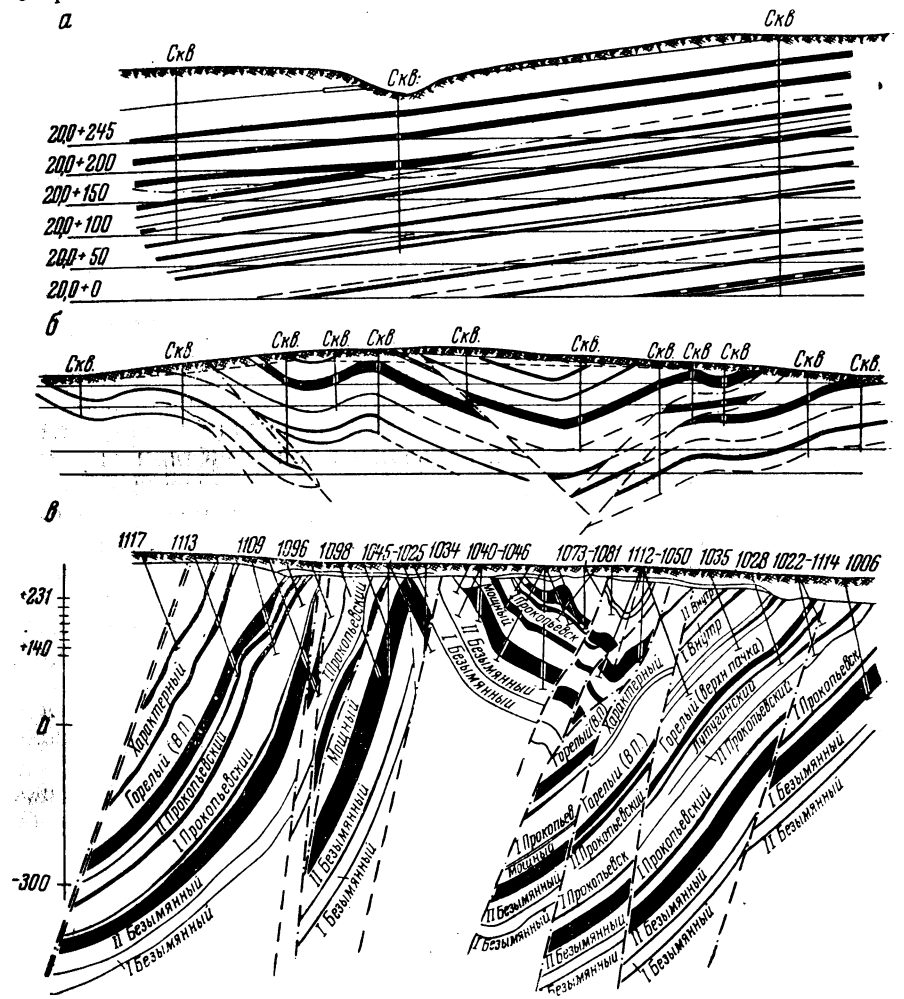


Рис. 22. Геологические разрезы угольных месторождений Кузбасса:
а — Томь-Усинского; *б* — Кедровского; *в* — Бочатского

Кальмакырское медно-молибденовое месторождение по генезису относится к среднетемпературному гидротермальному типу.

Месторождение залегает внутри крупного многофазного интрузива в экзоконтактах наиболее молодых и кислых фаз грано-

диоритового состава; вмещающими оруденение являются породы ранних фаз — породы сиенитовой группы.

В сложении бортов карьера участвуют: изверженные породы — сиенито-диориты, сиениты, диориты, имеющие наибольшее распространение на площади карьерного поля, гранодиорит-порфиры, слагающие центральную, восточную и юго-восточную части карьера, кварцевые порфиры, развитые в юго-восточной части, осадочные породы — известняки и доломиты, распространенные только в юго-восточной части карьерного поля и залегающие моноклинально с падением на север под углом 10—30°; мощность известняков 20—30 *м*.

Все породы Кальмакырского месторождения изменены: осадочные — под действием контактового метаморфизма серпентинизированы и хлоритизированы, изверженные — в результате гидротермального метаморфизма серицитизированы, окварцованы (окварцованные породы, содержащие более 70% кварца, условно названы «вторичными кварцитами»), хлоритизированы, карбонатизированы, каолинизированы, обогащены биотитом и пиритом.

Рудные тела, залегающие горизонтально в форме линз и залежей, характеризуются зональным распределением руд.

Залегание пород осложнено рядом разрывных нарушений. Главное нарушение в пределах карьерного поля — Кальмакырский взбросо-сдвиг — простирается в широтном направлении с падением на юг под углом 80°. Северо-западная часть месторождения сдвинута по этому нарушению на 500 *м* к западу и опущена на 50—60 *м* по вертикали. Более мелкие нарушения того же простирания имеют углы падения от 30 до 80° и представлены зонами смятия пород шириной от 0,2 до 15 *м*. Трещины большого протяжения, падающие в карьер под углом 35—50°, имеют широкое развитие на юго-восточном борту.

Основные породы, слагающие борта карьера в его предельном положении, — сиенито-диориты и сиениты — имеют 4—5 основных систем трещин и многогранную форму блоков, гранодиорит-порфиры и известняки имеют 4 основные системы трещин. Средний размер блоков по всему карьеру 20×40×60 *см*; для юго-восточного борта характерна мелкая трещиноватость, средний размер блоков 5×10×15 *см*.

Гидрогеологические условия простые; атмосферные воды, поступающие в карьер, отводятся самотеком за его пределы благодаря геоморфологическому положению карьерного поля; при отработке нижних горизонтов необходим механический отвод трещинных вод.

Комплексы пород третьей подгруппы характеризуются наиболее сложными структурными условиями: наклонным и крутым залеганием вмещающих пород, частым чередованием невыдержанных по простиранию и мощности литологических разностей, широким развитием зон рассланцованных и перемятых пород, серией надвигов и сбросов. Рудные тела имеют форму

инз, гнезд, жил и часто залегают несогласно с вмещающими породами.

Наряду с полускальными трещиноватыми породами широкое развитие могут иметь включения рыхлых пород.

Примерами комплексов третьей подгруппы служат породы Бачатского месторождения Кузбасса и Черноозерского никелевого месторождения (В. Уфалей).

Бачатский каменноугольный район представляет обособленную от основной площади Кузбасса полосу продуктивных отложений, расположенную в пределах складчатого пояса Салаирского кряжа. Угленосная толща сложена переслаивающимися пачками песчаников, алевролитов, аргиллитов и пластами каменных углей.

Продуктивные отложения собраны в узкие складки с крутым падением крыльев, осложненные многочисленными разрывными нарушениями преимущественно взбросового характера.

Черноозерское месторождение силикатных никелевых руд Уфалейского района генетически связано с древней корой выветривания ультраосновных пород и приурочено к тектоническому контакту серпентинитов и мраморов.

В геологическом строении Черноозерского месторождения участвуют палеозойские породы — кварцево-хлоритовые, кварцево-слюдистые сланцы, мраморы, серпентиниты, диориты и рыхлые продукты древней коры выветривания палеозойских пород.

Общее простирание пород палеозойского комплекса северо-западное с северо-восточным падением под углом от 45—50 до 75°. Сланцевая толща слагает лежачий бок рудной зоны, серпентиниты — висячий. Мраморы на поверхность выходят лишь на северном участке, на всей остальной площади они залегают на глубине 50—120 *м* под дезынтегрированными серпентинитами и карстовыми алевритами.

Оруденение представлено обогащенными никелем дезынтегрированными серпентинитами, карстовыми образованиями, разложенными сланцами, охрами по серпентинитам. Рудные тела представляют собой неправильные пластообразные залежи с раздувами и пережимами, чередующимися с безрудными породами.

Подземные воды рыхлых отложений и палеозойских пород гидравлически связаны между собой и образуют единый водоносный горизонт со свободной поверхностью, питающийся атмосферными осадками. Уровень подземных вод залегает на глубине 1—10 *м* от земной поверхности. Водопроницаемость и водообильность пород различны, что зависит от литологического состава и степени трещиноватости пород. Самыми водообильными и водопроницаемыми породами являются мраморы (величина водоотдачи 4—5%, величина коэффициента фильтрации 8—11 *м/сутки*), водообильность мраморов неравномерна, что объясняется различной степенью их закарстованности и трещиноватости.

§ 4. Комплексы третьей группы

К этой группе относятся комплексы, характеризующиеся преобладанием слабых глинистых и несвязных пород.

Склонность глинистых пород к пластическим деформациям и к набуханию (разуплотнению) при разгрузке от давления вышележащих пород определяет пологие углы наклона бортов, сложенных этими комплексами пород.

Комплексы этой группы бывают сложены полностью дезинтегрированными изверженными и метаморфическими породами, осадочными морскими, лагунными и континентальными отложениями, не претерпевшими уплотнения, а также всеми разновидностями четвертичных отложений: делювиальных, аллювиально-пролювиальных, болотных, ледниковых, эоловых и др.

Комплексы третьей группы бывают покровными или вмещающими полезные ископаемые.

С неуплотненными осадочными породами связаны многие месторождения бурого угля, марганцевых, железных и бокситовых руд, огнеупорных глин и других нерудных полезных ископаемых.

Характер отложений определяется геологической позицией района на фоне крупных тектонических структур. В эту группу входят угленосные формации в пределах молодых и подвижных платформенных областей и в пределах древних и устойчивых платформенных областей [68], для которых характерны: низкая степень углефикации и литификации — породы рыхлые, слабоуплотненные, реже сцементированные; наличие кристаллического фундамента, залегающего на небольшой глубине; относительно малая мощность угленосных отложений.

Залегание пород обычно горизонтальное или пологое и реже наклонное.

Для комплексов этой группы гидрогеологический фактор является одним из основных при оценке устойчивости бортов.

По сложности гидрогеологических условий, по фациальной изменчивости слоев и по степени проявления тектонических процессов комплексы подразделяются на следующие три подгруппы.

Комплексы первой подгруппы (с простыми условиями залегания) сложены слоистой толщей морских и лагунных осадков, характеризующихся слабой фациальной изменчивостью слоев по площади распространения, слабой дислоцированностью, горизонтальным, пологим или слабоволнистым залеганием (волнистое залегание имеют нижележащие слои, что объясняется неровностью рельефа подстилающих пород кристаллического фундамента и уплотнением осадочных толщ).

Гидрогеологические условия относительно просты: в одних случаях в разрезе пород преобладает толща с хорошими фильтрационными свойствами, поэтому ожидаемые притоки (иногда и значительной величины) не осложняют дренирования пород;

в других случаях толща вскрышных пород и полезного ископаемого залегает выше местного базиса эрозии, вследствие чего водоносные горизонты имеют ограниченное питание, естественную разгрузку и содержат небольшие статические запасы подземных вод.

Примером таких комплексов пород являются покровные отложения железорудных месторождений КМА в Белгородском районе (Лебединское, Чернянское, Погромецкое, рис. 23) и Северного Казахстана (Соколовское и Сарбайское), а также марганцеворудные месторождения Никопольского бассейна.

Комплекс покровных отложений железорудных месторождений КМА сложен толщей слабых глинистых и несвязных пород палеозойского, мезозойского и кайнозойского возраста, представленных в основном морскими осадками — песками, мергелями, мелами, глинами и четвертичными глинами и суглинками.

На Лебединском, Чернянском, Погромецком месторождениях все литологические разности осадочных толщ выдержаны по площади, имеют горизонтальное залегание и однородны в фациальном отношении.

Надрудная толща Лебединского месторождения содержит один водоносный горизонт, приуроченный к сеноман-альбским пескам и мергельно-меловой трещиноватой толще; водоносный горизонт — безнапорный, характеризуется сравнительно высокими фильтрационными свойствами вмещающих пород — величина коэффициента фильтрации песков изменяется от 10 до 20 *м/сутки*.

Надрудная толща Чернянского и Погромецкого месторождений отличается от Лебединского наличием плотных карбоновых сланцеватых глин с прослоями песков, песчаников и известняков; к карбоновым отложениям приурочен третий напорный водоносный горизонт.

Месторождения Никопольского марганцевого бассейна сложены толщей морских песчано-глинистых отложений палеогенового и неогенового возраста, залегающей на докембрийском кристаллическом фундаменте и перекрытой четвертичными лёссовидными суглинками.

Пластообразные залежи марганцевых руд залегают на глубине 60—80 *м*.

Подрудная толща, залегающая на кристаллическом фундаменте, местами достигает мощности 100 *м* и слагается палеогеновыми отложениями, представленными каолинами древней коры выветривания, залегающими в понижениях древнего рельефа, песками, известковистыми, песчанистыми глинами, алевролитами с прослоями бурого угля, глинистыми песками, которые замещаются плотными глинами, залегающими в виде отдельных линз непосредственно под рудой. Мощность отложений непостоянна.

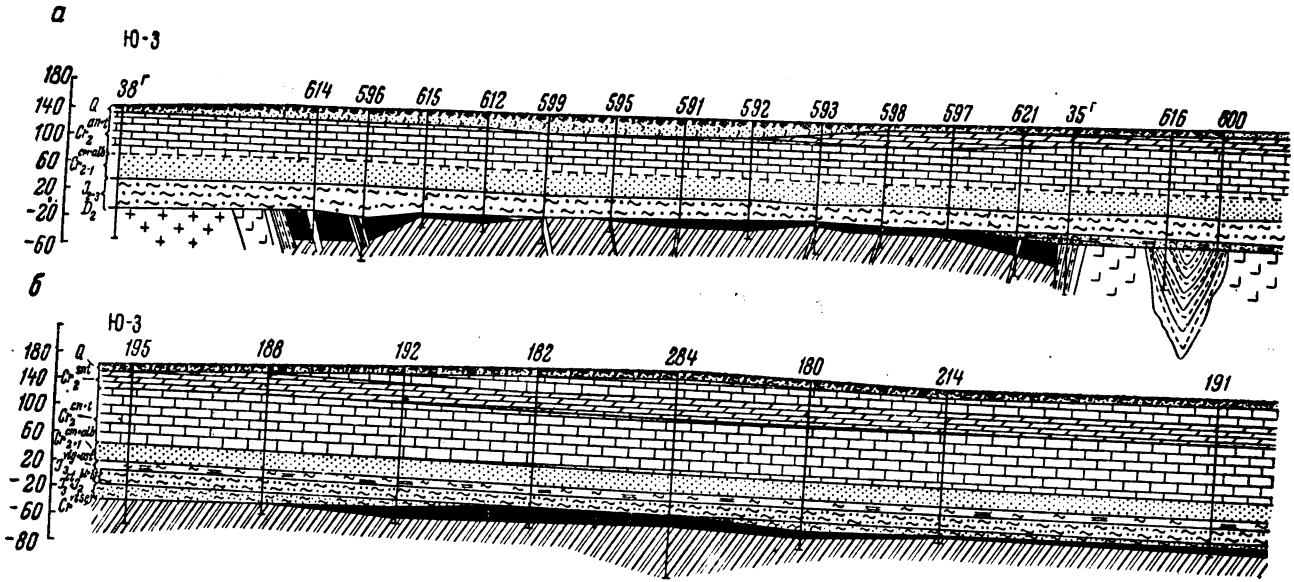


Рис. 23. Геологические разрезы комплексов третьей группы первой подгруппы:
а — покровные отложения Чернянского и *б* — Погромецкого месторождений КМА

Рудный пласт представлен песчано-глинистыми образованиями с включением угловатых ячеистооолитовых и зернистых марганцевых образований.

Надрудная толща представлена трещиноватыми песчаными палеогеновыми глинами, переходящими в пластичные (жирные) глины, разнозернистыми песками, глинами с включением глауконита, сланцеватыми глинами с тонкими прослоями известняка-ракушечника, мергельными глинами, пестроцветными глинами, загипсованными неогеновыми глинами и лёссовидными суглинками.

Слои по мощности и простиранию в пределах месторождений выдержаны, залегают горизонтально, местами с небольшим уклоном.

Толща песчано-глинистых отложений содержит несколько слабообводненных водоносных горизонтов.

Комплексы второй подгруппы характеризуются бо́льшей сложностью инженерно-геологических и гидрогеологических условий, чем рассмотренные выше. Залегание пород также горизонтальное или пологое, реже наклонное, но в зависимости от условий образования степень литологической изменчивости пород может быть значительной. Сложность залегания слоев пород и их фациальная изменчивость определяют сложность гидрогеологических условий.

Из рассмотренных месторождений, сложенных осадочными неуплотненными породами, среднюю сложность инженерно-геологических условий имеют буроугольные месторождения: Кушмурунское, Ирша-Бородинское и Подмосковного бассейна и Керченские железорудные месторождения; к этой же подгруппе относятся покровные комплексы Зыряновского свинцово-цинкового и Михайловского железорудного месторождений.

На рис. 24 в качестве примера изображены геологические разрезы Керченского железорудного и Ушаковского буроугольного месторождений, характеризующие среднюю сложность залегания комплексов осадочных пород. Оба эти месторождения характеризуются значительной фациальной изменчивостью слоев и невыдержанным залеганием.

Комплексы третьей подгруппы характеризуются большой фациальной изменчивостью отложений и сложными условиями залегания (линзообразная форма отложений, наличие размывов и диапировых складок или тектоническая нарушенность).

Гидрогеологические условия комплексов этой подгруппы характеризуются сложностью и невыдержанностью залегания водоносных слоев. Кроме того, играют роль особенности литологического состава некоторых слоев, к которым приурочены подземные воды: если эти слои представлены мелкозернистыми и тонкозернистыми пылеватыми песками, имеющими низкий коэффициент фильтрации и плохую водоотдачу, то они при напоре приобретают свойства плывунов (при вскрытии этих песков).

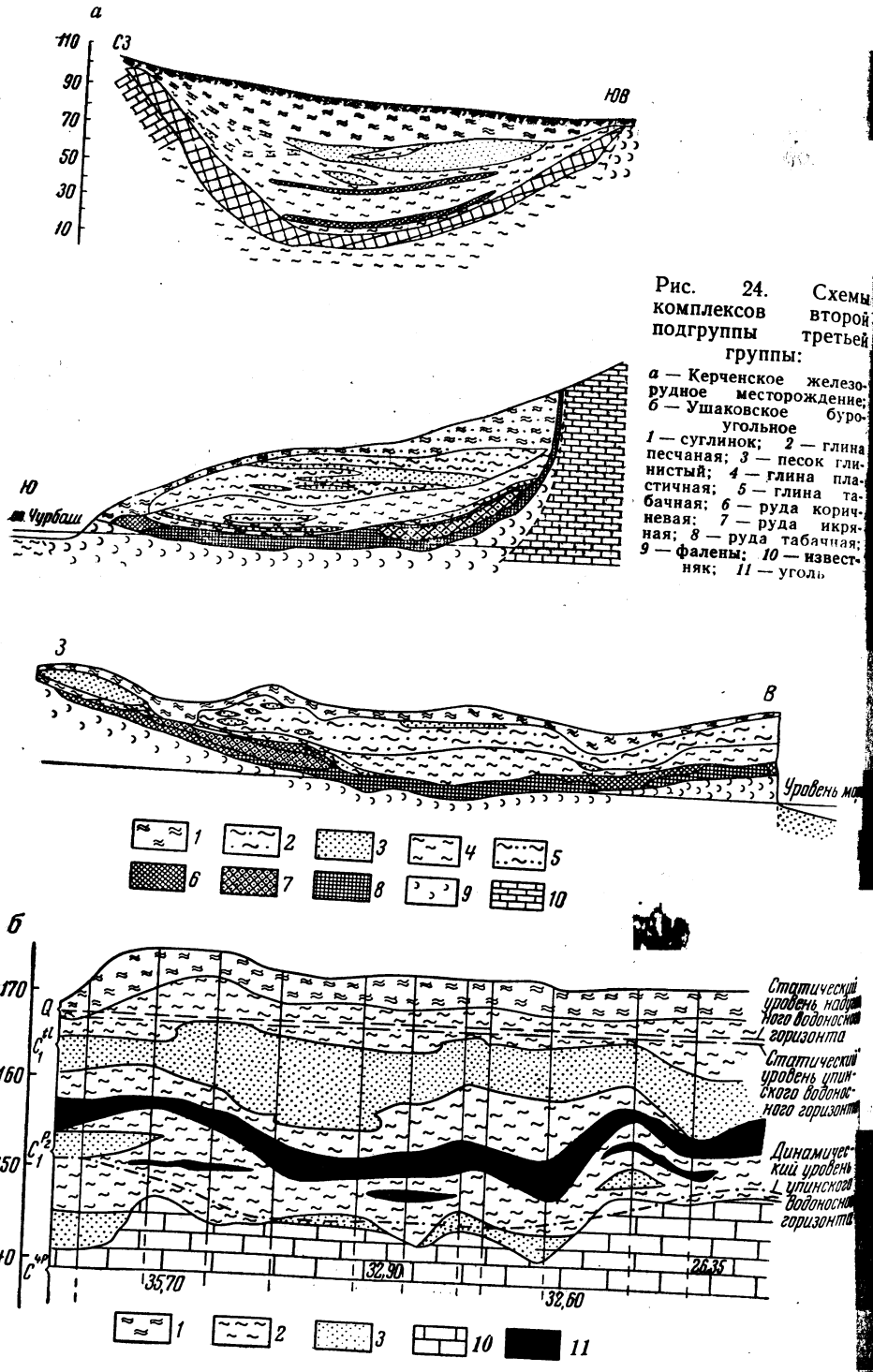


Рис. 24. Схемы комплексов второй подгруппы третьей группы:

а — Керченское железорудное месторождение; *б* — Ушаковское буроугольное

1 — суглинок; *2* — глина песчаная; *3* — песок глинистый; *4* — глина пластичная; *5* — глина табачная; *6* — руда коричневая; *7* — руда икряная; *8* — руда табачная; *9* — фалены; *10* — известняк; *11* — уголь

Примерами комплексов этой подгруппы являются отложения Южно-Уральских и Северо-Уральских буроугольных месторождений.

Месторождения Южно-Уральского буроугольного бассейна (рис. 25) сложены третичными породами и подстилаются отложениями мелового и юрского возраста. Весь комплекс пород залегает во впадинах, смятых в складки пермь-триасовых пород, представленных песчаниками, конгломератами, алевролитами и аргиллитами.

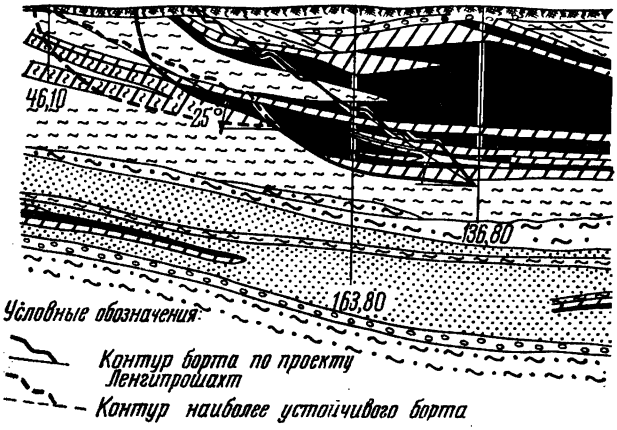


Рис. 25. Геологический разрез участка Тюльганского месторождения Южно-Уральского буроугольного бассейна (группа III—3)

Третичные отложения, пользующиеся повсеместным распространением, подразделяются на три свиты: нижнюю (подугленосную), среднюю (угленосную), верхнюю (надугленосную).

Нижняя свита залегает на размытой поверхности юрских отложений и представлена кварцевыми песками с галькой и гравием, мелкозернистыми и глинистыми песками и глинами. Мощность свиты изменяется от нескольких до 100 *м*.

Угленосная свита имеет более однородный литологический состав, она почти целиком сложена глинами, содержащими маломощные линзы песков и включающими залежи бурого угля. Угольные залежи имеют форму вытянутых линз, расщепляющихся по мере удаления от центра месторождения.

Отложения верхней свиты отличаются большой фациальной изменчивостью. Пески и галечники залегают среди глин в виде прослоев и линз различного размера. Глины обычно песчанистые, а пески тонкозернистые, реже среднезернистые и очень редко — крупнозернистые. Мощность отложений от 10 до 80 *м*.

Выше залегают плиоценовые отложения мощностью до 60 *м*, представленные плотными слоистыми глинами, песчанистыми глинами и глинистыми песками с галькой.

Мощность четвертичных глин, галечников и суглинков достигает 25 *м*.

Угленосные отложения имеют горизонтальное и пологое залегание. Преобладающей формой залегания надугленосных пород и верхних слоев угленосной свиты являются диапировые складки.

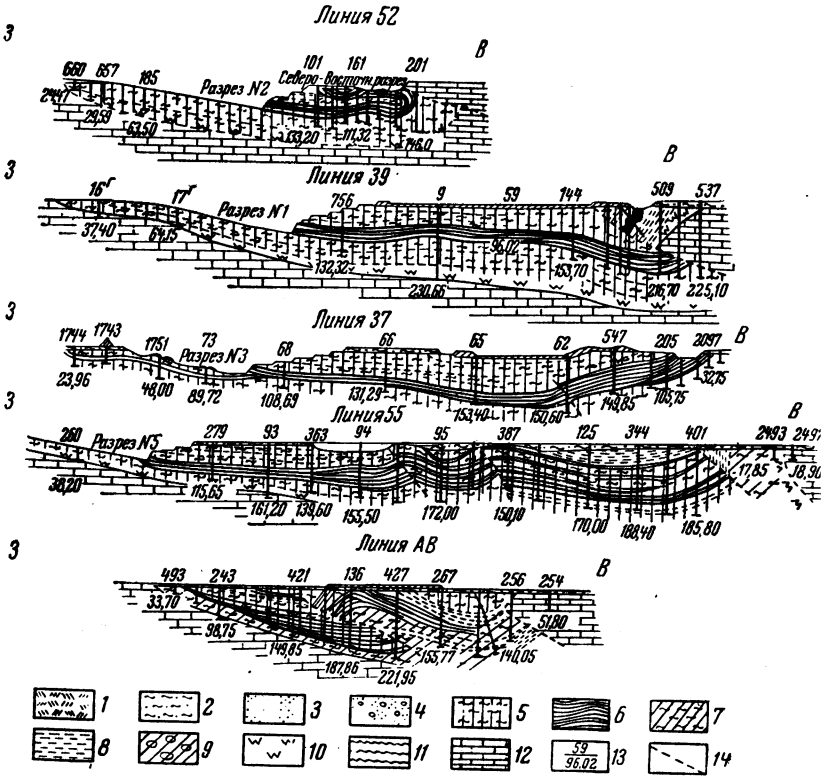


Рис. 26. Геологические разрезы Богословского буроугольного месторождения (группа III—3):

1 — торф; *2* — глина песчаная; *3* — песок; *4* — галечник; *5* — аргиллит; *6* — угольный пласт; *7* — алевролит; *8* — песчаник на глинистом цементе; *9* — конгломерат; *10* — брекчиевидная глина; *11* — бокситовидная глина; *12* — известняк; *13* — скважины и их глубины; *14* — тектонические нарушения

Месторождения Южно-Уральского бассейна имеют сложные гидрогеологические условия. Большое развитие песчано-галечниковых глин, песков и галечников обусловило значительные запасы подземных вод.

Третичные отложения содержат несколько водоносных горизонтов:

1) подугленосный водоносный горизонт представлен тонкозернистыми песками с линзами крупнозернистого песка и очень редко — гальки и гравия; песчаная толща имеет слабую водопроницаемость ($k_ф$ =0,001—2,17 *м/сутки*) и небольшую водоотдачу; пески могут переходить в плывуны; коэффициент фильтрации галечных слоев высокий 30—50 *м/сутки*;

2) угленосный водоносный горизонт, приуроченный к угольному пласту ($k_ф$ =0,0005—0,3 *м/сутки*);

3) надугленосный водоносный горизонт приурочен к песчаным и галечниковым линзам с коэффициентом фильтрации от 2 до 26 *м/сутки* и к песчаным глинам, глинистым пескам, суглинкам с коэффициентом фильтрации 0,1 *м/сутки*.

Питание водоносных горизонтов происходит в основном за счет атмосферных осадков.

В геологическом разрезе преобладают породы с плохой водопроницаемостью и невыдержанным залеганием, что затрудняет дренирование месторождений.

На рис. 26 представлены поперечные геологические разрезы Богословского месторождения Северо-Уральского буроугольного бассейна, характеризующегося значительной фациальной изменчивостью пород, сложной тектоникой и наличием водообильных напорных водоносных горизонтов в закарстованных известняках. Совокупность неблагоприятных факторов и слабая изученность инженерно-геологических условий в период разведки месторождений явились причиной возникновения при разработке этого месторождения оползней большого объема.

Глава VI

ИЗУЧЕНИЕ ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ МЕСТОРОЖДЕНИЙ, ПОДЛЕЖАЩИХ РАЗРАБОТКЕ ОТКРЫТЫМ СПОСОБОМ

§ 1. Общие соображения

Изучение инженерно-геологических условий месторождений, подлежащих разработке открытым способом, должно являться неотъемлемой частью разведки карьерных полей наряду с изучением других качественных показателей месторождений.

Первые сведения о инженерно-геологических условиях месторождений должны быть получены уже в стадии предварительной разведки, так как по результатам предварительной разведки в технико-экономическом докладе дается предварительная оценка месторождения и в большинстве случаев устанавливается вероятный способ его разработки, для чего необходимо знать, наряду

с данными о качестве полезного ископаемого и его запасах, также и инженерно-геологические условия его залегания.

Таким образом, к моменту составления проекта детальной разведки обычно бывает уже известно, каким способом будет отрабатываться данное месторождение (за редкими исключениями), а для крутопадающих рудных тел к этому времени устанавливается и приблизительная глубина карьера. Это дает возможность в период детальной разведки без существенных дополнительных затрат изучить инженерно-геологические и гидрогеологические условия месторождений в такой степени, чтобы при составлении проекта разработки можно было обоснованно устанавливать углы наклона бортов и инженерные противооползневые мероприятия, в том числе способ дренирования карьерного поля.

На наиболее сложных месторождениях обычно возникает необходимость в доразведке перед началом строительства, когда известны контуры карьера, его глубина, способ вскрытия и намечены первоочередные участки разработки. На этой стадии инженерно-геологические работы проводятся на первоочередных или наиболее ответственных участках (нерабочий борт, въездные траншеи и т. д.).

Изучению подлежат факторы, влияющие на устойчивость бортов и на величину углов их наклона, а именно:

а) литологический состав пород и их физические свойства;

б) структура залегания пород и залегание дизъюнктивных нарушений;

в) характер метаморфизма пород (главным образом каолинизация, серицитизация, хлоритизация), степень метаморфизма и границы его распространения;

г) границы распространения зоны выветривания и степень выветрелости;

д) элементы залегания слоев, линз, сланцеватости, контактов различных пород, дизъюнктивных нарушений и трещин большого протяжения (более 10 *м*);

е) характер и степень трещиноватости пород (число систем трещин, их частота и взаимное расположение, по которым можно судить о форме и размерах блоков);

ж) прочностные характеристики пород в куске по участкам, в зависимости от минералогического состава, степени метаморфизма и выветрелости;

з) гидрогеологического условия месторождения.

Геологические факторы, перечисленные в пунктах а—е, изучаются по всем разведочным скважинам, сетка которых определяется общими требованиями к разведке месторождений различных категорий в зависимости от сложности залегания, фациальной изменчивости слоев пород и их прочности.

Прочность пород в образце (главным образом сопротивление сдвигу) и способность их к набуханию и размоканию изучаются по образцам естественной структуры и влажности, отбираемым из

пециальных инженерно-геологических скважин, которые могут ыть использованы и как разведочные.

Гидрогеологические факторы устанавливаются по геологическому строению толщи, климатическим условиям и рельефу земной поверхности района месторождения, а также по результатам опытных откачек из водоносных горизонтов.

Влияние перечисленных факторов на устойчивость бортов каждой группе месторождений неодинаково. Так, например, гидрогеологические условия для инженерно-геологических комплексов третьей группы являются решающими, а для второй и особенности для первой — второстепенными. В то же время залегание дизъюнктивных нарушений и характер трещиноватости имеют решающее значение для комплексов первой и второй групп и меньшее — для третьей.

Объем инженерно-геологических исследований, с достаточной степенью характеризующих инженерно-геологические условия залегания полезных ископаемых на каждом отдельном участке месторождения, зависит от условий накопления осадков и последующих процессов их изменения (окаменения, метаморфизма, выветривания, тектонических процессов и т. д.).

Перечисленные в пунктах «а—е» сведения определяют общие геологические условия залегания полезных ископаемых и устанавливаются обычными геологоразведочными выработками (скважинами, шурфами, канавами и пр.), сетка которых определяется общими требованиями к разведке различных категорий месторождений.

На месторождениях, подлежащих открытой разработке, необходимо соблюдать условие, чтобы граница разведки была удалена за контур промышленных запасов на расстояние не менее L, определяемое по формуле:

$$L = H \operatorname{ctg} \alpha + a, \tag{37}$$

где H — глубина разработки (высота борта);

α — ориентировочная величина угла наклона бортов (берется из табл. 34);

a — ширина призмы возможного обрушения.

Ширина призмы возможного обрушения зависит от высоты борта, угла его наклона и залегания слоев пород, сланцеватости или крупных тектонических трещин и дизъюнктивных нарушений.

Достаточно точное значение ширины призмы возможного обрушения устанавливается расчетом, а ее приближенная величина принимается в зависимости от условий залегания поверхностей ослабления в пределах:

(0,10—0,20) H — при наклонном несогласном залегании поверхностей ослабления (висячий бок — рис. 27, *а*);

(0,25—0,30) H — при наклонном согласном залегании (лежачий бок — рис. 27, *б*);

(0,30—0,40) H — при горизонтальном залегании (рис. 27, *в*).

Это условие при горизонтальном и пологом залегании слоев пород обычно не вызывает необходимости бурения дополнительных скважин, так как при разведке полезного ископаемого за контуром промышленных запасов оказывается достаточное число скважин, по которым можно определить залегание слоев, литологический состав пород, степень выветрелости и пр.

Однако на месторождениях, сложенных наклонными и крутопадающими слоями или толщами пород, это условие в настоящее время не выполняется, что приводит к неправильному выбору в проектах углов наклона бортов в их предельном положении.

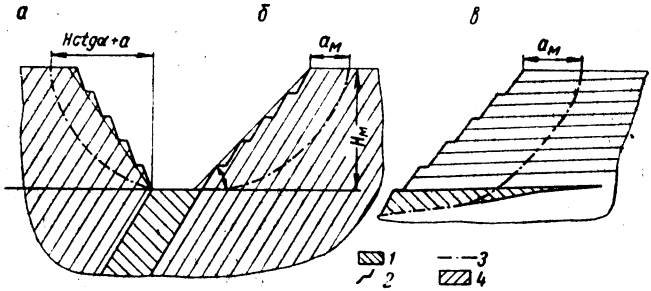


Рис. 27. Схемы призм возможного обрушения при различном залегании пород

1 — полезное ископаемое; *2* — предельный контур карьера; *3* — граница призмы возможного обрушения; *4* — поверхности ослабления

Характер и степень трещиноватости горных пород определяется визуальным изучением керна всех разведочных скважин с использованием аналогии с толщами подобных пород, обнаженных горными выработками на других аналогичных месторождениях или имеющих естественные обнажения.

Гидрогеологические условия месторождений устанавливаются в процессе геологоразведочных работ и по результатам опытных откачек из водоносных горизонтов, которые производятся по специальным «Требованиям к гидрогеологической изученности месторождений полезных ископаемых».

§ 2. Количество и глубина инженерно-геологических скважин

Количество инженерно-геологических скважин в пределах месторождения (или карьерного поля) определяется изменчивостью сопротивления сдвигу слоев пород на отдельных участках месторождения.

Анализ материалов исследований, проведенных автором на ряде месторождений, показывает, что сопротивление сдвигу в различных точках слоев остается постоянным, если слои имеют в этих точках одинаковую фациально-литологическую характеристику и одинаковую глубину залегания. При изменении глубины

залегания изменяется плотность пород слоя и, как следствие этого, изменяется сопротивление сдвигу.

На месторождениях, сложенных комплексами пород первой и второй групп, влияние глубины на прочность пород проявляется лишь в пределах зоны выветривания и разуплотнения пород до 100—150 *м*. Ниже этой глубины прочность уплотненных осадочных, изверженных и метаморфических пород в однородном слое остается постоянной (в зонах тектонических разломов уменьшение прочности распространяется на большую глубину).

Этим обстоятельством определяется глубина инженерно-геологических скважин. В инженерно-геологических комплексах второй и третьей групп глубина инженерно-геологических скважин должна ограничиваться глубиной зон выветривания, разупрочнения или каолинизации. В комплексах третьей группы при наклонном залегании пород инженерно-геологические скважины должны пересекать в лежачем боку толщу пород в пределах призмы возможного обрушения; при горизонтальном залегании слабых пород глубина инженерно-геологических скважин должна на 10—15% превышать глубину залегания подошвы пласта полезного ископаемого, исключая те случаи, когда в почве залегают заведомо более прочные породы, чем вскрышные.

Для определения количества инженерно-геологических скважин все карьерное поле разделяется на участки, характеризующиеся постоянством литологического состава пород и одинаковой глубины залегания слоев.

В комплексах третьей группы при горизонтальном залегании слоев глубина залегания, естественно, определяется рельефом земной поверхности, в этом случае по элементам рельефа выделяются: участки речных долин, участки придолинных склонов и участки возвышенностей.

При наклонном залегании выделяются 3—4 участка с различной глубиной залегания.

Участки с одинаковой глубиной залегания слоев по фациально-литологическим признакам разделяются на более мелкие. На каждом фациально однородном участке обычно достаточно бывает пробурить одну инженерно-геологическую скважину и только в тех случаях, когда в нижней части толщи вскрышных пород встречаются маломощные слои пластичных глин, оказывающих наибольшее влияние на устойчивость бортов, — на одном участке пробуриваются две инженерно-геологические скважины.

Например, на Лебединском месторождении КМА для юрской толщи песчано-глинистых отложений, залегающих в основании толщи вскрышных пород и оказывающих наибольшее влияние на устойчивость бортов, по литологическому признаку было выделено два участка — участок, где юрские отложения представлены песчаными глинами, и участок, где среди песчаных глин встречаются слои жирных глин. По морфологии земной поверхности, определяющей глубину залегания слоев, были выделены три

участка — пойменный, водораздельный и участок склона долины. В соответствии с этим разделением на участки инженерно-геологические условия этого месторождения достаточно хорошо освещались 8—10 инженерно-геологическими скважинами, расположенными по периметру карьера примерно на расстоянии около 1—1,5 *км* одна от другой.

Богословское месторождение Северо-Уральского буроугольного бассейна, характеризующееся довольно сложной тектоникой, значительной фациальной изменчивостью, исходя из фациально-литологических и тектонических признаков, по оси синклинальной складки было разделено на 6 участков. Каждый участок в направлении падения слоев по литологическим признакам и глубине залегания слоев делится на 5—6 более мелких участков. На каждом участке в период разведки необходимо было бы пройти по 6—8 инженерно-геологических скважин, а всего по месторождению площадью около 12 *км*^{2} необходимо было бы пробурить около 40—50 инженерно-геологических скважин. В действительности же в период разведки этого месторождения инженерно-геологические условия не изучались.

В первые годы эксплуатации этого месторождения возникали крупные оползни и прорывы напорных вод. В период составления проекта реконструкции карьера по восточному борту месторождения было пробурено 12 инженерно-геологических скважин и кроме того, были изучены физико-механические свойства горных пород в бортах карьера.

В инженерно-геологических комплексах второй группы, сложенных породами средней прочности, детальному изучению в пределах призмы возможного обрушения бортов в их предельном положении подлежат все факторы, изложенные в главе IV. В этих комплексах наряду с изучением тектоники тщательно оконтуриваются зоны выветривания, каолинизации, а также зоны развития серицитовых и хлоритовых сланцев и отальковaнных пород.

Прочность горных пород (сопротивление одноосному сжатию или срезу крепких и средней крепости пород и сопротивление срезу рыхлых пород) должна быть изучена, по крайней мере, по одной скважине на каждом участке, имеющем однородное литологическое строение и залегание пород.

В комплексах первой подгруппы второй группы при небольшой мощности полностью выветрелых пород обычно бывает достаточно пробурить 3—4 инженерно-геологические скважины; в комплексах второй и третьей подгрупп число скважин возрастает до 8—15; в зависимости от сложности тектоники, разнообразия литологического состава и размеров карьерного поля скважины для отбора образцов необходимо располагать таким образом, чтобы ими были охарактеризованы породы лежачего и висячего боков в зоне выветривания и ниже ее (на границе зоны выветривания) в пределах призм возможного обрушения бортов.

В комплексах первой группы, сложенных скальными породами, решающее значение на устойчивость бортов имеют слоистость, сланцеватость, тектонические нарушения, а также отдельные трещины протяженностью 10—20 *м* и более. Эти особенности выявляются в процессе разведки обычными геологическими и геолого-структурными скважинами; поэтому количество инженерно-геологических скважин, из которых отбираются образцы для изучения прочности всех литологических разностей пород, должно быть минимальным — от 2 до 6 — в зависимости от сложности геологического строения месторождения.

Инженерно-геологические скважины на месторождениях пластового типа с горизонтальным залеганием слоев располагаются по линиям, перпендикулярным простиранию основных элементов рельефа земной поверхности, а на месторождениях с наклонным и крутым падением слоев — по линии вкрест их простирания. На каждой линии проходится по 3—4 скважины. Линии и скважины на них располагаются так, чтобы бóльшая часть скважин оказалась в прибортовой части проектируемого карьера.

Ориентировочное число инженерно-геологических скважин можно определять по табл. 4.

Таблица 4

Количество инженерно-геологических скважин

Группа комплексов пород	Количество инженерно-геологических скважин по подгруппам комплексов		
	1	2	3
I*	2—3	3—4	4—6
II**	0,3—0,4	0,5—1	2—3
III**	1—2	2—3	5—8

* Количество скважин на все поле.
** Количество скважин на 1 *км*².

Приведенные в табл. 4 числа инженерно-геологических скважин необязательные: систематическая и своевременная обработка и анализ получаемых при разведке геологических и инженерно-геологических материалов позволяют выбрать наиболее рациональное число скважин.

Из общего числа необходимых инженерно-геологических скважин около 25% проходится в стадии предварительной разведки, а остальные — во время детальной разведки и доразведки (стадия доразведки оказывается необходимой на месторождениях со сложными условиями залегания).

Изучение инженерно-геологических условий в период строительства или эксплуатации карьера целесообразно поручать специализированным научно-исследовательским организациям.

При изучении инженерно-геологических условий месторождений, расположенных в пониженных районах современного рельефа

особое внимание приходится обращать на форму залегания третичных и четвертичных отложений, являющихся покровными для залегающих более закономерно мезозойских и палеозойских пород.

Эти отложения часто залегают в виде сменяющих друг друга небольших линз пород различного литологического и гранулометрического состава. Их линзообразное залегание затрудняет дренирование и с ними связаны оползни верхних уступов, возникающие почти на всех карьерах.

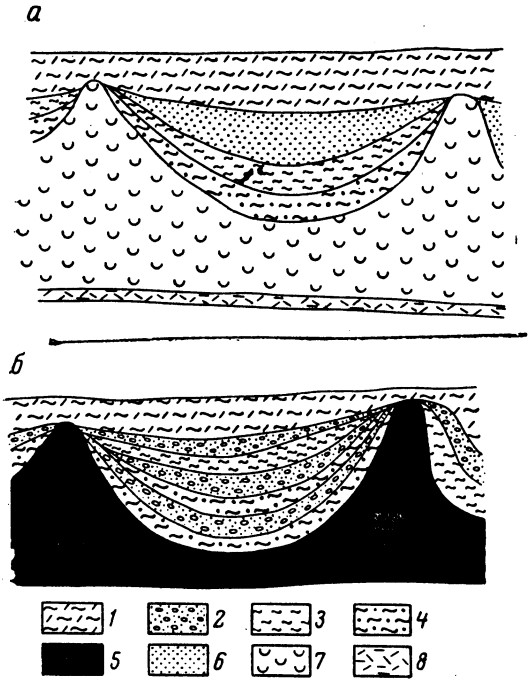


Рис. 28. Диапировые складки: *а* — в четвертичных и *б* — третичных отложениях

1 — суглинок; *2* — галечник; *3* — глина вязкая; *4* — глина песчаная; *5* — бурый уголь; *6* — песок; *7* — глина опоковая; *8* — трещиноватая опока

При неравномерном отложении более тяжелых и плотных песчаных глин и суглинков на иловатых отложениях опоковых глин или на гелевидных отложениях третичных бурых углей и углистых аргиллитов образуется так называемая диапировая складчатость, примеры которой приведены на рис. 28.

Диапировые складки являются существенным элементом формы залегания покровных отложений и влияют на образование оползней, способствуя скольжению пород по наклонным плоскостям наслоения, образованных этой складчатостью.

Среди покровных отложений заслуживают внимания также моренные, делювиальные и аллювиальные. Среди моренных отложений встречаются довольно слабые илоподобные глины с низкой несущей способностью. В этих отложениях нередко возникают оползни бортов и отвалов (например, на карьере огнеупорных глин в Боровичах).

Делювиальные отложения обычно характеризуются наличием древних поверхностей скольжения, при подрезке которых возникают оползни, порою, довольно большого объема (Ангрен, Зыряновск).

Древние оползни встречаются часто на склонах речных долин (например, на месторождениях Никопольского марганцевого бассейна).

Покровные отложения требуют более частой сетки разведочных и инженерно-геологических скважин небольшой глубины.

§ 3. Отбор образцов и их количество

Методика бурения инженерно-геологических скважин предопределяется необходимостью обеспечения максимального выхода керна и сохранения его естественной структуры и влажности.

При изучении скальных и полускальных пород бурение обычных геологических скважин с отбором керна удовлетворяет требованиям инженерно-геологического изучения; минимальный диаметр керна, обеспечивающий возможность лабораторных испытаний, для скальных пород составляет 40 *мм*, а для полускальных 55—60 *мм*; дополнительным требованием к инженерно-геологическим скважинам является детальная документация керна — процент выхода, наличие трещиноватости, заполнителя трещин и пр.

Отбор образцов скальных и полускальных пород производится из каждой литологической разновидности, для которой нужно получить расчетные характеристики. Обычно отбираются образцы длиной 20—30 *см*, которые наиболее удобны для упаковки и хранения. Из каждого неоднородного слоя необходимо отбирать 7—10 таких образцов (общей длиной 1,5—2,0 *м*); для пород более однородных общая длина образцов одного слоя составляет 0,80—1,0 *м*. Образцы скальных пород, как правило, не парафинируются, а складываются в ящики, пересыпаются опилками и в таком виде отправляются в лабораторию. Образцы слабых глинистых и несвязных пород, а также образцы выветрелых скальных пород парафинируются для сохранения их естественной влажности.

Более высокие требования предъявляются к инженерно-геологическим скважинам при разведке толщи слабых глинистых пород. Для этих пород необходимо соблюдать определенный режим бурения, метод отбора образцов, их упаковки и хранения. Нарушение естественной структуры и влажности глинистых пород при бурении происходит по следующим причинам: во-первых, процесс обуривания керна приводит к частичному или полному нарушению его за счет расслаивания или скручивания; во-вторых, керн породы, освобожденный от естественного напряженного состояния, впитывает воду, окружающую его, что приводит к разуплотнению и, следовательно, к разупрочнению. Кроме того, при отборе образцов пород, залегающих выше уровня грунтовых вод, происходит их уплотнение и насыщение водой.

В настоящее время основным видом бурения инженерно-геологических скважин значительной глубины является колонковое вращательное бурение. Отбор образцов ведется непосредственно из поднятого керна или при помощи специальных буровых наконечников — грунтоносов. Практика показывает, что применение специальных грунтоносов не обеспечивает максимального сохране-

ния естественного сложения пород по сравнению с образцами, отобранными из керна, обуренного обычной колонковой трубой с коронкой, и осложняет процесс бурения.

Изложенные требования к методике бурения инженерно-геологических скважин составлены на основе опыта бурения таких скважин, накопленного в процессе исследования устойчивости бортов карьеров. За период с 1950 по 1962 г. по техническим условиям ВНИМИ инженерно-геологические скважины бурились различными организациями.

Во всех случаях по породам различного литологического состава и различной прочности, в том числе и при проходке по породам неводонасыщенным или склонным к набуханию применялось одноколонковое вращательное бурение с промывкой глинистым раствором (только скважины Фундаментпроекта бурились двойной колонковой трубой).

При этом керн сохранял естественную структуру и влажность, что подтверждалось одновременным отбором из бортов карьеров монолитов аналогичных пород.

Дополнительным условием при бурении по пескам и песчаным глинам является сокращение до минимума подачи промывочного раствора, с целью предотвращения размывания керна, и сокращение числа оборотов бурового снаряда до 120—180 в минуту.

Предохранение керна от набухания (при проникновении грунтовой воды и промывочной жидкости), как показывает практика, может быть достигнуто применением густого активного глинистого раствора с удельным весом 1,15—1,20 *Г/см*³. Лучшие результаты дает применение глинистого раствора из тонкодисперсных гидрослюдистых или монтмориллонитовых глин. При этом вязкость раствора доводится до 20—22 *сек*, а для песчаных разностей — до 35 *сек*. Коллоидальность глинистого раствора должна составлять 94—96%, т. е. в течение 24 часов раствор должен давать не более 4—6% отстоя.

Применение глинистого раствора предотвращает насыщение водой образцов, отбираемых выше уровня грунтовых вод. В табл. 5 приведены данные о коэффициенте водонасыщенности образцов суглинка, отобранных на Зыряновском месторождении при одноколонковом бурении с промывкой глинистым раствором.

Как видно из таблицы, образцы пород, залегающих выше уровня грунтовых вод, оказались неводонасыщенными, однако коэффициент водонасыщенности у образцов, отобранных из скважин, выше, чем у образцов, отобранных в шурфе.

Отбор и упаковка образцов должны производиться таким образом, чтобы предотвратить возможность изменения их естественного состояния. Нельзя допускать изгиба керна при его извлечении из колонковой трубы.

Керн, подлежащий отбору, зачищается по периметру ножом со снятием около 10 *мм* толщины слоя, чтобы исключить возможность проникновения промывочной жидкости внутрь образца. За-

щенный образец покрывается тонким слоем парафина, затем бертывается слоем смоченной в парафине бумаги, которая пре-охраняет образец от проникновения воздуха и создает каркас аковки, предохраняющий образец от нарушения естественного ложения. Поверх бумаги образец покрывается смоченной в па-фине марлей, а затем — двумя-тремя слоями парафина.

Таблица 5

Данные одноколонкового бурения скважин на Зыряновском месторождении

№ скважины	Глубина отбора образцов, *м*	Влажность, %	Объемный вес, *т/м³*	Полная влагоемкость, %	Коэффициент водонасыщенности	Примечание
201	2,65	25,0	1,80	34	0,74	Уровень грунтовых вод на глубине 5,5 *м*
	4,00	27,0	1,80	34	0,79	
	6,30	26,5	1,97	27	0,98	
	19,75	29,0	2,00	29	1,00	
	22,25	25,0	2,09	25	1,00	
100	5,30	27,0	1,90	31	0,87	Уровень грунтовых вод на глубине 5—5,5 *м*
	11,75	26,5	1,96	29	0,92	
	16,00	26,5	1,99	28	0,95	
	18,40	25,0	1,99	27	0,93	
	22,55	26,0	2,09	25	1,00	
	21,95	25,5	2,09	25	1,00	

Такие требования предъявляются к парафинированию образцов, сохраняющихся в течение 3—4 месяцев.

Если испытания производятся вскоре после отбора образцов, то парафинирование образцов можно производить меньшим числом слоев парафина. В качестве водонепроницаемого покрытия кроме парафина можно использовать также гудрон с добавкой минерального масла.

Образцы отбираются из каждой литологической разновидности, а при ее мощности более 3—5 *м* из каждого 3—5-метрового интервала. На каждом интервале опробования отбирается не менее двух образцов — монолитов длиной 15—20 *см* каждый. Это позволяет для данного интервала построить график прочности, а затем сравнивать его с графиками прочности для других интервалов и судить об однородности геологического разреза (для слоев жирных глин мощностью до 1 *м*, залегающих в нижней половине вскрышной толщи, парафинируется весь керн).

При таком порядке отбора образцов из каждой скважины объем керна оказывается достаточным для определения гарантированной величины сопротивления сдвигу при 3—4 ступенях нормальных напряжений по каждому однородному слою, отдельно по каждой скважине.

При проведении испытаний может оказаться, что некоторые слои, которые при отборе образцов рассматривались как разно-

родные, по механическим характеристикам оказались однородными и результаты их испытаний можно обрабатывать совместно, построив для них общий график. В этом случае не потребуется испытывать весь керн по каждому слою.

Подобное положение может создаться и при испытании образцов одного и того же слоя, отобранных из нескольких скважин; если при испытании окажется, что средние значения, определенные по небольшому числу испытаний для различных скважин, совпадают, то гарантированные значения для этого слоя можно определять не по каждой скважине отдельно, а по всем этим скважинам одновременно. При этом испытания следует производить в следующем порядке:

1) вначале при трех ступенях нормальных напряжений производится такое количество срезов образцов каждого слоя из каждой скважины, чтобы по средним величинам $\tau_{ср}$ (медианным или среднеарифметическим) при каждой ступени σ_n можно было провести плавную кривую (обычно 6—9 срезов), отклонения от плавной кривой допускаются в пределах 10% от $\tau_{ср}$;

2) затем для смежных инженерно-геологических слоев производится сравнение кривых $\tau_{ср}=f(\sigma_n)$; если эти кривые накладываются одна на другую или пересекаются с максимальным отклонением, не превышающим 10% $\tau_{ср}$, то ранее выделенные смежные слои можно объединить в один;

3) после этого такое же сопоставление кривых делается по различным скважинам для одного и того же слоя. Если устанавливается, что в двух (или трех, а может быть и во всех) скважинах сопротивление сдвигу оказывается одинаковым, то по всем этим скважинам строится общий график сопротивления сдвигу с таким расчетом, чтобы погрешность среднего значения его не превышала 6—7%. Остальной керн этих слоев на срез не испытывается.

Методика испытаний образцов горных пород изложена во второй части.

Обоснование необходимого числа испытаний на сдвиг многослойной толщи горных пород при расчете устойчивости бортов карьеров изложено в статье Т. К. Пустовойтовой [125].

Необходимое число испытаний для однослойной среды определяется формулой

$$n=\left(t_\alpha \frac{v}{m}\right)^2, \tag{38}$$

где t_α — статистический коэффициент, зависящий от доверительной вероятности и количества испытаний (берется из таблиц [39]);

v — коэффициент изменчивости сопротивления сдвигу;

m — максимальная величина относительной погрешности среднего сопротивления сдвигу.

Для многослойной среды **абсолютная** величина средней погрешности сопротивления сдвигу, **приходящейся на единицу площади поверхности скольжения**, может быть определена по формуле

$$M = \frac{\sqrt{(m_1S_1)^2 + (m_2S_2)^2 + \ldots + (m_kS_k)^2}}{S_1 + S_2 + \ldots + S_k}, \qquad (39)$$

где $m_i = \frac{\sigma}{\sqrt{n}}$ — средняя ошибка определения сопротивления сдвигу единицы площади плоскости скольжения каждого слоя;

S — площадь поверхности скольжения по каждому слою.

Если величины m и S для всех слоев принять равными, то

$$M = \frac{mS\sqrt{K}}{KS} = \frac{m}{\sqrt{K}}, \qquad (40)$$

а необходимое число испытаний каждого слоя согласно (38) определится формулой

$$n = \left(\frac{t_a v}{\overline{M}}\right)^2 \cdot \frac{1}{K}, \qquad (41)$$

где $\overline{M}$ — заданная **относительная** погрешность расчетного сопротивления сдвигу всей толщи, выраженная в процентах от среднего сопротивления сдвигу по всей поверхности скольжения.

Величина $\overline{M}$ определяется по формуле

$$\overline{M} = \frac{\sqrt{(m_1S_1)^2 + (m_2S_2)^2 + \ldots + (m_kS_k)^2}}{\tau_1S_1 + \tau_2S_2 + \ldots + \tau_kS_k}, \qquad (42)$$

где τ — средняя величина сопротивления сдвигу каждого слоя.

Подобно (41) для слоев с различными величинами m и S можно записать

$$n = \left(\frac{t_a v}{\overline{M}}\right)^2 \frac{1}{a}, \qquad (43)$$

где $\frac{1}{a}$ — весовое участие каждого слоя в общем сопротивлении сдвигу всей толщи, равное отношению сопротивления сдвигу данного слоя к сопротивлению сдвигу всей толщи.

В приведенных выражениях коэффициент изменчивости определяется по формуле

$$v = \frac{\sigma}{\tau_{ср}} 100\%, \qquad (44)$$

где σ — среднее квадратическое отклонение сопротивления сдвигу от плавной кривой:

$\tau_{ср}$ — средняя величина ординаты этой кривой.

Пример. Если слой с коэффициентом изменчивости $v = 1{,}5$ залегает в основании борта так, что $\frac{1}{a} = \frac{1}{2}$, то число испыт ний слоя при $t_\alpha = 2{,}66$ составит 32 и при каждом из четыр нормальных напряжений необходимо произвести не менее 8 исп таний. Если же слой с таким коэффициентом изменчивости зал гает в верхней части борта и его сопротивление сдвигу составля не более 10% общего сопротивления сдвигу всей толщи, то д него достаточно произвести всего лишь 6 испытаний по 3 испыт ния при двух нормальных напряжениях или по 2 испытания пр трех нормальных напряжениях. (Принимая, что общее чис испытаний всей толщи обычно превышает 60, коэффициент можно принять постоянным, равным 2,66, соответствующим вер ятности 0,99; $\overline{M}$ принято равным 5%).

§ 4. Изучение трещиноватости горных пород

Изучение трещиноватости горных пород является одним из о новных элементов инженерно-геологических изысканий при ра ведке карьерных полей. Характер влияния трещин на устойч вость откосов кратко изложен в главе IV, а примеры деформаци бортов под влиянием трещиноватости горного массива приведен в главе XII.

При изучении трещиноватости необходимо установить: колич ство систем трещин, их частоту и взаимное расположение, эле менты залегания крупных тектонических трещин, тектонически нарушений и разломов; при детальной разведке месторождени изучение трещиноватости может осуществляться по керновому ма материалу и обнажениям — естественным и в горных выработка геофизическими методами и методом аналогий.

Существующие в настоящее время геофизические методы ра ведки дают возможность по каждой скважине определять мощ ность слоев, контакты пород и наличие трещин. Применение эти методов позволяет использовать для изучения трещиноватост скважины бескернового бурения, но не дает ни пространственно расположения трещин, ни их линейных размеров. При изучени трещиноватости по керну можно установить частоту трещин и и наклон без ориентировки трещин в плане.

Наиболее полную характеристику трещиноватости можно по лучить при изучении естественных и искусственных обнажени горных пород. При изучении кернового материала и обнажени горных пород кроме элементов залегания трещин документируется также и характер поверхности блоков по трещинам, заполняющи трещины материал, спайность по трещинам, форма и размеры ограниченных трещинами блоков.

Метод аналогий дает возможность при изучении трещиновато сти горных пород использовать общие закономерности возникно вения трещиноватости горных массивов различного сложения и тектоники, так как количество систем трещин и их расположение

зависят от условий образования пород, их литологического состава и дислоцированности массива [11].

Первая попытка общей оценки трещиноватости горных массивов приведена ниже.

Характеристика массива	Характеристика трещиноватости
Слоистая толща метаморфических и осадочных пород	Трещины большого протяжения развиты главным образом по контактам слоев и довольно редко встречаются под углом к наслоению; кливажные трещины в основном нормальносекущие; кососекущие трещины возникают на участках интенсивной дислокации. Интенсивность трещиноватости обычно определяется мощностью слоев, т. е. $W = \frac{1}{h_{ср}}$.
Толща рассланцованных ортопород (рассланцованных изверженных пород)	Трещины большого протяжения совпадают со сланцеватостью и контактами разнородных пород; отдельность имеет вид плоской или выпуклой чечевицы
Дислоцированные породы кислого состава, обогащенные кварцем (кварцевые гранодиоритпорфиры, вторичные кварциты по эффузивным породам)	Характеризуются наибольшей интенсивностью трещиноватости, достигающей $W = 10 - 20$
Наиболее часто встречающиеся изверженные породы кислого состава, не подвергавшиеся динамометаморфизму	Трещины большого протяжения ориентируются параллельно разломам и дизъюнктивным нарушениям; кливажные трещины большей частью ориентируются близко к нормальному положению относительно трещин большого протяжения; кососекущие трещины встречаются в зонах интенсивной дислокации; W в пределах от 1 до 10
Породы основного и ультраосновного состава (габбро, пироксениты, перидотиты и др.)	Характеризуются меньшей интенсивностью трещиноватости, чем кислые породы; W от 0,5 до 2

W — интенсивность трещиноватости, представляющая собой величину, обратную среднему размеру (в метрах) элементарного блока породы, ограниченного смежными трещинами трех наиболее интенсивных систем (см. стр. 204).

Рекомендации по изучению трещиноватости относятся не только к скальным и полускальным породам, но и к глинистым; довольно часто трещиноватость слабых глинистых пород является основной причиной возникновения оползней.

Дальнейшее накопление и обобщение материалов изучения трещиноватости горных пород в их естественных и искусственных обнажениях позволит, пользуясь методом аналогий, давать

в достаточной степени подробную характеристику трещиноватости в стадии детальной разведки.

Во многих случаях трещиноватыми оказываются делювиальные и элювиальные глины, а также жирные глины морской и лагунной фаций. В свежем керне эта трещиноватость заметна слабо, но хорошо заметна при подсыхании керна. В жирных глинах эти трещины обычно связаны с пластическими деформациями, претерпеваемыми глинами еще в период их накопления и накопления вышележащих отложений, и по этим трещинам в глинах видны неровные поверхности скольжения. В слоях жирных глин в толщах, не подвергавшихся тектоническим процессам, часто встречаются контакты, представленные поверхностями скольжения, по которым сопротивления сдвигу значительно ниже, чем в образце. Такие контакты встречаются во всех случаях, если в глинах имеется трещиноватость, выраженная неровными поверхностями скольжения. Такие же контакты встречаются в глинах, не имеющих этой трещиноватости (например, на месторождениях Никопольского марганцевого бассейна). Сопротивление сдвигу трещиноватых глин в массиве значительно ниже, чем в образце, и поэтому эта трещиноватость должна тщательно изучаться.

§ 5. Гидрогеологические исследования

Исследованиями гидрогеологических условий месторождений, подлежащих разработке открытым способом, устанавливают характер влияния гидрогеологических факторов на устойчивость участков откосов и бортов, влияние обводненности пород на разработку вскрыши и полезного ископаемого и исходные данные для разработки рациональных и эффективных способов дренажа.

Изучение гидрогеологических условий месторождений связано с изучением геологического строения месторождений, физико-механических свойств горных пород, их структуры, трещиноватости и формы залегания и должно освещать следующие вопросы:

1) основные черты режима поверхностных и подземных вод, площадь распространения, условия залегания, области питания и дренажа (разгрузки) водоносных горизонтов;

2) ожидаемые изменения естественного режима подземных вод в процессе вскрытия и эксплуатации месторождения и влияния этих изменений на условия равновесия горных пород;

3) оценка инженерно-геологических условий и разработка мероприятий по дренированию месторождения.

Для полного изучения гидрогеологических условий месторождений используются данные разведки, опытных полевых и лабораторных работ, опытные данные по дренажным выработкам, материалы регионального изучения и теоретического расчета.

При разведке и опытных полевых гидрогеологических работах необходимо получить следующие данные:

1) мощности чередующихся слоев, их водоотдачу и коэффи-

циент фильтрации; коэффициент фильтрации водоносных слоев следует определять путем откачки из скважин и горных выработок, а коэффициент фильтрации «водоупорных» слоев с коэффициентом фильтрации менее 1 *м/сутки* — лабораторным путем;

2) пьезометрические уровни всех водоносных горизонтов;

3) взаимосвязь водоносных горизонтов (слоев) между собой, их выдержанность и распространение по площади;

4) взаимосвязь водоносных горизонтов с поверхностными водоемами и водоносными породами за пределами месторождения;

5) статические запасы водоносных горизонтов в пределах месторождения и связанных с ними водоносных горизонтов за его пределами и их пополнение;

6) возможность изоляции водоносных слоев месторождения от водоносных слоев за его пределами.

Опытные откачки производятся из специальных гидрогеологических скважин, закладываемых в наиболее характерных и наиболее обводненных пунктах месторождения (вблизи поверхностных водотоков и водоемов, на участках поверхностного проявления карстов, в зонах тектонических нарушений и разломов, в местах пересечения наибольшего числа водоносных пластов и в местах понижений последних).

При изучении гидрогеологических условий необходимо исходить из классификации инженерно-геологических комплексов по условиям устойчивости бортов карьеров.

Рельеф местности карьерного участка и в целом района месторождения, климатические условия, наличие покровных слабоводопроницаемых пород и другие факторы, влияющие на питание водоносных горизонтов, должны быть описаны с достаточной полнотой, чтобы получить необходимые исходные данные для балансовых гидрогеологических расчетов.

При наклонном залегании слоев вмещающих пород важно установить взаимосвязь и ее характер между водоносными слоями отрабатываемой зоны и водоносными породами лежачего бока; при отсутствии этой взаимосвязи и отсутствии дренажа напорных вод в лежачем боку часто возникают оползни большого объема.

При горизонтальном залегании слоев пород необходимо устанавливать наличие перетекания между водоносными горизонтами, что имеет существенное значение при организации дренажа.

При изучении гидрогеологических особенностей слабофильтрующих пород необходимо пользоваться методом аналогий; в этих условиях данные строящихся или эксплуатирующихся карьеров с аналогичными по составу водоносными породами оказываются более надежными, чем данные опытных откачек на изучаемом месторождении. В слабофильтрующих породах — песчаных глинах и глинистых песках проведение опытных откачек нецелесообразно, так как по лабораторным испытаниям пород можно получить более достоверные данные о их коэффициенте фильтрации и водоотдаче.

ЧАСТЬ ВТОРАЯ

ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ГОРНЫХ ПОРОД

Глава VII

СОСТАВ И ФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ГОРНЫХ ПОРОД

Горные породы являются материалами сложного состава и строения.

В общем виде горные породы являются трехфазной средой, состоящей из твердых минеральных частиц, воды и газа; ниже уровня грунтовых вод неизмененные (невыветрелые) изверженные и метаморфические породы близки к однофазному состоянию, а все другие являются двухфазными; выше уровня грунтовых вод почти все горные породы являются трехфазными средами.

В зависимости от состава и строения горных пород изменяются их механические свойства — прочность и деформируемость.

В этой главе кратко рассматриваются состав и основные физические свойства горных пород, влияющие на их прочность и деформируемость.

§ 1. Петрографический состав и структура пород средней крепости и крепких

Прочность пород возрастает, если в их составе возрастает содержание более твердых минералов, например: граниты, содержащие роговую обманку (твердость 5,5—6), имеют бо́льшую прочность, чем граниты, содержащие слюду (твердость 2—3).

Прочность мономинеральных горных пород возрастает в той же последовательности, в какой возрастает твердость минералов: тальк—гипс—галит—мрамор (кальцит)—апатит.

Изменение минералов под влиянием выветривания и метаморфизма также влияет на прочность горных пород.

Существенно влияет на прочность изверженных и метаморфических пород структура: мелкокристаллические породы оказываются более прочными, чем крупнокристаллические. Особенно большое влияние структура оказывает на прочность полиминеральных пород, состоящих из минералов с различной твердостью.

На прочность осадочных пород влияет: плотность, состав и прочность обломков и цемента, а также тип цементации.

Если цемент прочнее обломков, то прочность породы меньше при контактном типе цемента, чем при базальном, а при цементе пор — меньше, чем при контактном типе. Если прочность обломков выше, чем прочность цемента, наблюдается обратная зависимость.

Прочность цемента возрастает в следующей последовательности: глинистый, гипсовый, мергелистый, известковистый, железистый, кварцевый.

§ 2. Минералогический и гранулометрический состав слабых глинистых и несвязных пород

Слабые глинистые горные породы могут быть представлены или слабо уплотненными осадочными или выветрелыми до состояния глин изверженными и метаморфическими породами.

В сложении месторождений полезных ископаемых принимают участие все основные группы осадочных пород: обломочные, глинистые, химические и органические; бо́льшая их часть по прочности относится к слабым глинистым.

Обломочные породы с крупностью частиц более 0,1 *мм* без примеси глинистых минералов, а также химических и органических цементирующих осадков составляют группу несвязных пород — несцементированных песков и гравийно-галечных отложений. От более мелких обломочных они отличаются особыми свойствами: хорошей водопроницаемостью и дренируемостью, жестким («скелетом») сложением, не тиксотропны.

Частицы обломочных пород крупностью 0,1—0,002 называются пылеватыми или алевритовыми; более мелкие частицы составляют группы глинистых минералов, возникших при кристаллизации коллоидно-химических продуктов выветривания и являющихся водными алюмо- или ферри-силикатами, обладающими слоистой кристаллической структурой.

Граница между песчаными и пылеватыми частицами точно не установлена. Е. М. Сергеев [152] считает, что к песчаной следует также относить и фракцию 0,1—0,05 *мм*, так как эти частицы «свободно отделяются от других при просеивании сухого песка через сито в 0,1 *мм*. В сухом состоянии они представляют собой типичное сыпучее тело, которое иначе как песок назвать нельзя».

Этот довод нельзя признать убедительным, так как в природных условиях пески и алевриты являются влажными и во влажном состоянии частицы крупностью 0,1—0,05 имеют все свойства более мелких пылеватых частиц: плохо отдают воду, обладают тиксотропностью и свойствами плывунов.

От глинистых пылеватые частицы по физико-механическим свойствам отличаются тем, что при уплотнении в них не возникает связность, поэтому в водонасыщенном состоянии пылеватые пески имеют очень низкое сцепление, а при наличии динамиче-

ского воздействия в них невелико и внутреннее трение, и они оплывают под пологими углами. Более подробно обоснование границы между песчаными, пылеватыми и глинистыми частицами дается в § 4.

В дальнейшем мы пользуемся следующей классификацией гранулометрических элементов (табл. 6).

Таблица

Классификация гранулометрических элементов

Группа фракций		Фракции	
Название	Размер частиц, *мм*	Название	Размер частиц, *мм*
Валуны и камни	>100	Крупные	>800
		Средние	800—400
		Мелкие	400—100
Галька и щебень	40—100	Крупные	60—100
		Мелкие	40—60
Гравий и хрящ	2—40	Крупные	20—40
		Средние	10—20
		Мелкие	4—10
		Очень мелкие	2—4
Песок	0,1—2,0	Грубый	1—2
		Крупный	0,5—1,0
		Средний	0,25—0,5
		Мелкий	0,10—0,25
Пыль	0,002—0,1	Крупная	0,01—0,10
		Мелкая	0,005—0,01
		Иловатая	0,002—0,005
Глина	<0,002	Собственно глина	0,001—0,002
		Коллоидная глина	<0,001

Гранулометрический состав обломочных пород влияет на их минералогический состав: грубообломочные бывают представлены крупными раздельными кристаллами различных минералов и их агрегатами; песчаные частицы почти всегда являются обломками кристаллов кварца, полевых шпатов, слюды и роговой обманки; при этом среди мелкозернистых песков полево-шпатовые частицы, как наименее стойкие, почти не встречаются; пылеватые частицы чаще всего являются обломками кристаллов кварца.

Глинистые частицы наиболее часто бывают представлены следующими минералами: монтмориллонитом, каолинитом, гидрослюдами и бейделитом.

Они имеют форму пластинок или плоских удлиненных чешуек длиной 100—500 *мμ* и толщиной около 3—20 *мμ* [152].

Осадочные горные породы обычно представляют механическую смесь обломков различной крупности и глинистых минералов и в зависимости от процентного содержания различных фракций разделяются на следующие группы (табл. 7).

Классификация обломочных пород по размерам слагающих их обломков (по Л. Б. Рухину)

Классы обломочных частиц	Размеры обломков, *мм*	Группы пород	Наименование обломков данной величины	Наименование пород			
				рыхлых, сложенных обломками		сцементированных, сложенных обломками	
				окатанными	остроугольными	окатанными	остроугольными
I	1000	Грубообломочные	Глыбы	Скопление глыбовых валунов	Скопление глыб	Глыбовые конгломераты	Глыбовые брекчии
II	1000—500 500—250 250—100		Валуны: крупные средние мелкие	Скопление валунов (крупных, средних, мелких)	Скопление остроугольных валунов (крупных, средних, мелких)	Валунные конгломераты (крупно-, средне- или мелковалунные)	Валунные брекчии (крупно-, средне- и мелкообломочные)
III	100—50 50—25 25—10		Галька: крупная средняя мелкая	Галечники (крупно-, средне- или мелкообломочные)	Щебень (крупно-, средне- и мелкообломочный)	Конгломераты (крупно-, средне- или мелкогалечные)	Брекчии (крупно-, средне- или мелкообломочные)

Продолжение табл. 7

Классы обломочных частиц	Размеры обломков, *мм*	Группы пород	Наименование обломков данной величины	Наименование пород			
				рыхлых, сложенных обломками		сцементированных, сложенных обломками	
				окатанными	остроугольными	окатанными	остроугольными
IV	10—5 5—2 2—1	Грубообломочные	Гравийные зерна: крупные средние мелкие (грубые песчаные зерна)	Гравий крупно- или среднезернистый Гравий мелкозернистый (песок грубозернистый)	Дресва крупно- или среднезернистая Дресва мелкозернистая (песок грубозернистый)	Гравийные конгломераты, гравийники (крупно- и среднезернистые) Гравийники мелкозернистые (песчаники грубозернистые)	
V	1—0,5 0,5—0,25 0,25—0,10	Песчаные	Песчаные зерна: крупные средние мелкие	Пески (крупно-, средне- и мелкозернистые)		Песчаники (крупно-, средне- и мелкозернистые)	
VI	0,10—0,05 0,05—0,025 0,025—0,010	Алевритовые	Алевритовые частицы: крупные (тонкие песчаные зерна), средние, мелкие	Крупнозернистые алевриты (тонкозернистые пески) Алевриты средне- и мелкозернистые		Крупнозернистые алевролиты (тонкозернистые песчаники) Алевролиты (средне- и мелкозернистые)	

§ 3. Физические свойства горных пород

Прочность глинистых горных пород и характер их деформирования в бортах карьеров и вокруг других горных выработок в большой степени зависит от пористости и водонасыщенности, определение которых является обязательным при инженерно-геологических исследованиях.

Пористость и водонасыщенность вычисляются по величинам влажности, объемного и удельного веса, которые при исследовании горных пород имеют самостоятельное значение.

Если принять обозначения:

n — пористость, равная объему пор в единице объема горной породы;

d, δ — удельный и объемный вес минерального скелета;

γ — объемный вес породы естественной влажности;

ε — коэффициент пористости как отношение объёма пор к объему твердой фазы;

w — весовая влажность в процентах, выражающая отношение веса воды, заключенного в единице объема горной породы, к весу твердой фазы;

w_0 — объемная влажность, выражающая объем воды в единице объема породы;

G — коэффициент водонасыщенности, выражающий степень заполнения пор водой как отношение объемной влажности и пористости,

то зависимость между этими характеристиками может быть представлена в следующем виде (табл. 8).

В табл. 8 рамкой обведены непосредственно определяемые величины и основные формулы, по которым вычисляются величины, непосредственно не определяемые; остальные формулы используются как контрольные и в других случаях.

Методы определения физических характеристик горных пород изложены в работе В. Д. Ломтадзе [79].

Объемный вес горной породы зависит от ее пористости, водонасыщенности и удельного веса, который в свою очередь зависит от удельного веса минералов, составляющих горную породу.

Удельный вес основных минералов (по Е. М. Сергееву) составляет:

кварца	2,65—2,66	гипса	2,31—2,32
плагиоклаза	2,67—2,74	глауконита	2,20—2,80
ортоклаза	2,54—2,58	монтмориллонита	2,00—2,20
кальцита	2,71—2,72	гумуса	1,25—1,40
мусковита	2,76—3,00	магнезита	3,00—3,12
биотита	2,70—3,10	роговой обманки и авгита	3,00—3,40
доломита	2,80—2,90	лимонита	3,50—4,00
ангидрита	2,90—2,98	магнетита	5,16—5,18
каолинита	2,60—2,65		

Таблица 8

Зависимости между физическими характеристиками

Искомая величина	Зависимости							
	d	γ	δ	n	ε	ω	G	w_0
$\boxed{d}$	d	$\frac{\gamma}{(1+\omega)(1-n)}$	$\frac{\delta}{1-n}$	$\frac{\delta}{1-n}$	$\delta(\varepsilon+1)$	—	—	—
$\boxed{\gamma}$	$d(1-n)+\omega\delta$	γ	$\delta(1+\omega)$	$d(1-n)+\omega d$	—	$\delta(1+\omega)$	$d(1-n)+Gn$	$d(1-n)+w_0$
δ	$\frac{d}{1+\varepsilon}$	$\boxed{\frac{\gamma}{1+\omega}}$	δ	$d(1-n)$	$\frac{d}{1+\varepsilon}$	$\frac{\gamma}{1+\omega}$	—	$\gamma-w_0$
n	$\frac{d-\delta}{d}$	—	$\frac{d-\delta}{d}$	n	$\frac{\varepsilon}{1+\varepsilon}$	$\boxed{1-\frac{\gamma}{d(1+\omega)}}$	$\frac{\omega\cdot\delta}{G}$	$\frac{w_0}{G}$
ε	$\frac{d-\delta}{\delta}$	—	$\frac{d-\delta}{\delta}$	$\boxed{\frac{n}{1-n}}$	ε	—	—	—
$\boxed{w}$	—	$\frac{\gamma-\delta}{\delta}$	$\frac{\gamma-\delta}{\delta}$	—	—	ω	—	—
G	$\frac{\omega d}{\varepsilon}$	—	$\frac{\omega\delta}{n}$	$\frac{\omega d(1-n)}{n}$	$\frac{\omega d}{\varepsilon}$	$\frac{\omega\delta}{n}$	G	$\boxed{\frac{w_0}{n}}$
w_0	$d\omega(1-n)$	$\gamma-\delta$	$\delta\cdot\omega$	nG	—	$\boxed{\frac{\omega\gamma}{1+w}}$	nG	w_0

Удельный вес наиболее распространенных горных пород:

кварцита и кварцевого песка	2,65	каолиновых глин	2,58
песчаника	2,69	алевролита	2,60—2,70
железистого песчаника	2,88	аргиллита	2,55—2,70
известняка	2,70	глины четвертичной	2,60—2,70
суглинка	2,72	глины опоковой	2,45

Присутствие в горной породе органического материала (гумуса) уменьшает, а присутствие железистых минералов увеличивает удельный вес пород. Так, на угольных месторождениях углистые аргиллиты имеют удельный вес 2,0—2,10, а сидеритизированные аргиллиты и алевролиты 2,8—3,0.

§ 4. Взаимодействие глинистых горных пород с водой

При изучении физических свойств глинистых горных пород, влияющих на их механические свойства, наиболее важным является взаимодействие частиц минерального скелета с водой. Вода влияет на прочность этих пород не только при их разрушении, но и при формировании (прочности) пород; особенно это относится к породам, содержащим большой процент глинистых частиц — глинам, суглинкам, аргиллитам, алевролитам, песчаникам с глинистым цементом и др.

Современная наука о горных породах рассматривает воду как агента механического, химического и электрического влияния на горную породу.

Сущность физико-механических процессов, протекающих в горных породах под влиянием электростатических сил, возникающих на поверхности раздела «вода — частица горной породы», становится понятной при рассмотрении строения коллоидов, содержащихся в породах.

Коллоидные частицы горной породы имеют размер 5—0,25μ и менее и несут обычно отрицательный электрический заряд. Под влиянием этого заряда на их поверхности группируются положительно заряженные частицы — катионы. Отрицательно заряженная поверхность частицы и окружающие ее катионы образуют двойной электрический слой, а сами катионы составляют так называемый адсорбционный слой, вокруг которого располагается диффузионный слой ионов, более удаленных от частицы и менее с ней связанных. Ионы адсорбционного и диффузного слоев создают вокруг себя гидратные (водные) оболочки. Силы, обусловливающие притяжение гидратной оболочки, называются молекулярными, а слой притянутой водяной оболочки — молекулярной или адсорбированной водой. Молекулярная вода прочно связана с частицей грунта, которую она окружает — эта связь сохраняется непродолжительное время даже в том случае, если ускорение силы тяжести возрастает в 70 000 раз. Толща диффузного слоя ионов и окружающих их гидратных оболочек зависит от состава

катионов адсорбционного слоя, называемых обменными катионами за их способность замещаться (обмениваться) другими катионами при изменении среды.

Максимальная молекулярная влагоемкость глинистых пород возрастает при замене обменных катионов большой валентности катионами меньшей валентности. Например, величина максимальной молекулярной влагоемкости каштановой почвы изменялась в зависимости от состава обменных катионов по следующему ряду [152]:

$$Li > Na > NH_4 > K > Mg > Ca > H > Ba > Mn > Fe.$$

Кроме того, максимальная молекулярная влагоемкость глинистых пород зависит от дисперсности частиц и от их минералогического состава.

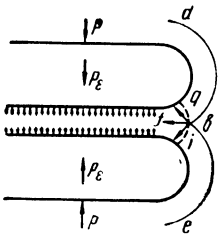


Рис. 29. Схема взаимодействия сил внешнего давления и молекулярного притяжения частиц грунта и воды

Из глинистых минералов наибольшей способностью поглощать воду обладают минералы монтмориллонитовой группы, затем идут бейделлит, гидрослюды и каолинит.

Схему впитывания воды проф. А. Ф. Лебедев описывает следующим образом. Если рассматривать две смежные частицы грунта, сжатые усилием P (рис. 29), то слой связанной воды между этими частицами будет выдавливаться, но этому выдавливанию противодействуют молекулярные силы, «исходящие от слоя молекулярной воды, обрамляющего частицы и ограниченного поверхностью *dвe*». На частицы молекулярной воды, находящиеся у границы частиц грунта, например на частице *в*, действуют силы притяжения как к верхней, так и к нижней частице, а их равнодействующая будет направлена навстречу выдавливанию воды. Естественно, что чем больше толщина слоя воды между частицами, тем меньше силы, сопротивляющиеся выдавливанию воды. При некотором соотношении сжимающей силы P и толщины водного слоя наступает равновесие, которое тотчас нарушается, как только изменяется сила P или изменяется адсорбционность грунта. Свойство молекулярной воды втягиваться между частицами грунта называется «расклинивающим» действием воды.

С «расклинивающим» действием воды связано набухание пород и так называемое «давление набухания».

Втягивание (всасывание) между частицами грунта молекулярной воды имеет активный характер, подобный осмотическому всасыванию, и оно создает внутрипоровое давление воды. Давление набухания влияет на сопротивление сдвигу глинистых пород и его изменяемость с течением времени.

Расклинивающему действию молекулярной воды противостоят силы внешнего давления и взаимного притяжения частиц,

которое тем больше возрастает, чем больше плотность породы.

Е. М. Сергеев [152] отмечает, что «частичное удаление рыхлосвязанной воды из грунта приводит к освобождению молекулярных сил, присущих дисперсным частицам и ранее расходовавшихся на образование связанной воды». Молекулярное притяжение становится возможным непосредственно между самими частицами, что и обусловливает появление механической прочности у глинистых грунтов при их уплотнении под давлением вышележащих пород (процесс «окаменения» по Л. Б. Рухину). Изложенное поясняет возрастание давления набухания и величины порового давления при увеличении плотности пород.

Вопрос о давлении набухания до настоящего времени является слабо изученным. Некоторое представление о давлении набухания дают кривая набухания при компрессионных испытаниях и испытания на срез глинистых пород, подвергавшихся предварительному уплотнению. По кривой набухания компрессионных испытаний установлено, что набухание жирных гидрослюдистых глин начинается при нагрузках 8—9 *кГ/см*², а каолиновых глин — при нагрузках 3—4 *кГ/см*².

Набухание слоистых угленосных пород Кузбасса и Челябинского бассейна распространяется на глубину 70—90 *м*, что с учетом гидростатического взвешивания пород соответствует нагрузкам в пределах 8—10 *кГ/см*².

С увеличением пористости глин сила набухания уменьшается.

При испытании на срез водонасыщенных глинистых пород, подвергавшихся предварительному уплотнению под нагрузкой интенсивности P *кГ/см*², выполаживание кривой $\tau=\psi(\sigma_n)$ начинается при σ_1, которое меньше P на величину давления набухания [190].

Мощные гидратные оболочки вокруг глинистых частиц придают пористое (дисперсное) строение глинистым горным породам, вследствие чего они способны уплотняться при приложении внешнего всестороннего давления или при высушивании.

В противоположность глинистым песчаные породы не имеют таких гидратных оболочек и при воздействии внешних нагрузок сжимаются очень слабо.

По этой способности к уплотнению при увеличении внешних нагрузок и к набуханию при разгрузке в механике грунтов различают грунты с упругим скелетом (сжимаемые глинистые породы) и с жестким (несжимаемые песчаные породы).

Увеличение плотности слабых горных пород с упругим скелетом при увеличении уплотняющей нагрузки иллюстрируется рис. 14.

При разгрузке и наличии свободной воды горные породы с упругим скелетом способны поглощать воду, набухать с увеличением объема и становиться менее плотными (разуплотняться), что ведет к уменьшению их прочности.

Уплотняемость глинистых горных пород с возрастанием на грузок и степень их разуплотнения при снижении нагрузок зави сят от минералогического состава глин и состава обменны катионов. Чем больше величина общей поглотительной способно сти глин (гидрофильность), тем больше их способность к уплот нению и набуханию (разуплотнению).

Уплотнение горных пород с упругим скелетом происходит не только под влиянием возрастания внешней нагрузки, но и под влиянием взаимного притяжения частиц при высыхании грунта.

Так как молекулярная вода тесно связана с частицами грунта и представляет вязкое тело, процесс уплотнения и набухания протекает тем медленнее, чем выше плотность грунта. Например, аргиллиты и алевролиты с коэффициентом пористости 0,15—0,20 при свободном погружении в воду в течение месяца практически не проявили каких-либо признаков набухания, но в течение более длительного времени они все-таки набухают.

Наличием гидратных оболочек вокруг пылеватых частиц объясняются их тиксотропные свойства. Пылеватые частицы имеют диаметр, в 25—300 раз больший толщины пленки жестко связанной воды, которые не могут придать частицам достаточную связность; более мощные гидратные оболочки рыхлосвязанной воды придают пылеватым частицам некоторую связность до тех пор, пока каким-либо внешним воздействием эти оболочки не будут разрушены. Например, если создать гидравлический удар путем резкого внедрения какого-либо предмета в пылеватый песок, находящийся в тиксотропном устойчивом состоянии, то диполи рыхлосвязанной гидратной оболочки придут в движение и потеряют диэлектрическую ориентировку, при этом частицы грунта с тонкими оболочками жесткосвязанной воды потеряют связь между собой, окажутся во взвешенном состоянии и мгновенно придут в движение, подчиняясь законам гидравлики.

§ 5. Виды воды в горных породах

При изучении горных пород с точки зрения их устойчивости в откосах можно пользоваться следующей классификацией видов воды в горных породах, предложенной А. Ф. Лебедевым.

I. Вода в форме пара.

II. Связанная вода:

1) прочно связанная или адсорбированная вода;

2) рыхлосвязанная или слабосвязанная вода.

III. Свободная вода:

1) капиллярная вода:

а) вода углов пор,

б) подвешенная вода,

в) собственно капиллярная вода;

2) гравитационная вода:

а) просачивающаяся вода,

б) вода грунтового потока.

IV. Вода в твердом состоянии.

V. Кристаллизационная и химически связанная вода.

Вода в форме пара, в твердом состоянии, кристаллизационная и химически связанная существенно не влияет на устойчивость горных пород в откосах и поэтому в настоящей работе не описывается.

Связанная вода имеет большое распространение в глинистых породах, прочно связана с ними и не отделяется от них даже в центрифуге, развивающей центробежное ускорение, в 70 000 раз большее ускорения силы тяжести. Эту воду разделяют на прочно связанную, или адсорбционную, которая окружает непосредственно частицу грунта и адсорбционный слой ионов, и слабосвязанную, или пленочную, которая окружает в основном ионы диффузного слоя. Связанная вода удерживается на поверхности частиц молекулярными силами сцепления между частицами горной породы и воды.

Основным признаком пленочной воды в отличие от адсорбционной является ее способность передвигаться под действием молекулярных сил независимо от влияния силы тяжести; пленочная вода частично может быть отжата длительно действующими нагрузками.

Влажность горной породы, определяемая максимальным количеством связанной воды, называется максимальной молекулярной влагоемкостью горной породы.

Капиллярная вода заполняет капиллярные поры горной породы, не занятые связанной водой, и разделяется на: 1) воду углов пор или капиллярно-разобщенную (воздушными пузырьками); 2) подвешенную воду, заполняющую полностью все капиллярные поры, но не имеющую связи с уровнем грунтовых вод, и 3) собственно капиллярную воду, поднимающуюся от уровня грунтовых вод. Капиллярная вода подобно гравитационной передает гидростатическое давление.

Влажность горной породы, у которой все капиллярные поры заполнены водой, характеризует капиллярную влагоемкость.

Капиллярная вода, поднимающаяся над уровнем грунтовых вод, имеет отрицательное гидравлическое давление и способствует увеличению связности пород. При скоплении на земной поверхности воды, проникающей в горную породу и соединяющейся с капиллярной водой, последняя может переходить в напорную воду, что резко понижает устойчивость откосов и ведет к их оползанию.

Гравитационная вода движется под влиянием силы тяжести и создает гидростатическое давление, величина которого на любой глубине равна разности отметок между свободной поверхностью воды и данной точкой, и гидродинамическое давление подвижного потока, градиент которого равен разности потенциа-

лов (напоров), приходящейся на единицу длины линии фильтрации.

Гравитационная вода в основном заполняет трещины и поры песчаных пород; небольшое ее количество находится в порах песчано-глинистых пород.

Максимальное количество связанной, капиллярной и гравитационной воды, которое может вместить горная порода при полном заполнении пор, выраженное в процентах, называют **полной влагоемкостью** породы. Ниже уровня грунтовых вод горные породы находятся в состоянии полной влагоемкости. При длительном обводнении состояние, близкое к полной влагоемкости, достигают и породы, находящиеся выше уровня грунтовых вод.

Представление о соотношении количества воды различных видов, содержащейся в горных породах, дает табл. 9. Из таблицы видно, что песок содержит в основном гравитационную воду, а в глине и суглинках ее очень мало или совсем нет.

Таблица

Виды воды в рыхлых горных породах

Горные породы	Полная влагоемкость		Максимальная молекулярная влагоемкость, %	Содержание капиллярной воды, %	Содержание гравитационной воды, %	Водоотдача (объемная), %
	объемная	весовая, %				
Песок						
Крупнозернистый	0,35	20,2	1,2	4,0	15,0	30
Среднезернистый	0,40	25,0	2,0	8,0	15,0	25—30
Мелкозернистый	0,40	25,0	3,0	10,0	12,0	18—20
Пылеватый глинистый	0,40	25,0	5,0	13,0	7,0	12
Песчаная глина .	0,40	25,0	8,0	14,0	3,0	4
Суглинок						
Лёссовидный . .	0,42	28,2	10,0	15,0	3,0	4
Моренный . . .	0,56	47,0	11,8	22,6	12,6	15
Тяжелый	0,47	32,6	14,8	17,6	0,2	0
Тяжелая глина . .	0,56	47,5	33,2	14,3	0	0
Монтмориллонитовая глина	0,75	134,5	134,5	0	0	0

Виды воды, содержащейся в горной породе, определяют возможность, целесообразность и способ ее дренирования.

Путем естественного стока к дренажным выработкам может быть сдренирована только гравитационная вода. Капиллярная вода частично может быть сдренирована применением электроосмоса, а в глинистых породах капиллярная вода частично может быть отжата давлением вышележащих пород при снижении уровня в слоях водоносных пород, перемежающихся с слоями глинистых пород.

Глава VIII

ЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ОБРАЗЦОВ ГОРНЫХ ПОРОД

§ 1. Основные характеристики прочности горных пород

Горные породы, как и все другие материалы, при механическом здействии могут быть разрушены путем отрыва под влиянием рмальных напряжений растяжения или путем среза под влия-ем касательных напряжений. Сопротивление горных пород этим дам напряжений и определяет их прочность.

При характеристике прочности горных пород различают проч-сть в образце и в массиве, прочность по наслоению и под углом наслоению, прочность по поверхностям, ослабленным отдельно-ью, трещиноватостью и слоистостью (в массиве); по характеру иложенных сил различают прочность при растяжении, сжатии, езе, изгибе и кручении. Несмотря на разнообразие характера иложения сил (нагружения), разрушение материалов происхо-т или путем отрыва, или путем среза.

При сложном напряженном состоянии характер разрушения висит от характера нагружения и от свойств материала; напри-ер, при растяжении цилиндрических тел вдоль их оси хрупкие атериалы разрушаются путем отрыва по площадкам, нормаль-ым к направлению приложенных сил, а пластичные материалы азрушаются путем сдвига (среза) по площадкам, наклоненным направлению приложенной силы; при кручении цилиндрических ел пластичные материалы разрушаются путем сдвига по пло-адкам, нормальным к оси цилиндра, а хрупкие материалы раз-ушаются путем отрыва по сложным поверхностям, наклоненным оси цилиндра; хрупкие материалы при одноосном сжатии между ладкими поверхностями разрушаются путем отрыва, так же как при приложении касательных напряжений при отсутствии нор-альных сжимающих напряжений.

При увеличении нормальных напряжений сжатия по разру-аемой поверхности сопротивление срезу хрупких материалов озрастает, а сопротивление срезу пластичных материалов стается постоянным; при ударных нагрузках крупные тела хруп-их материалов раскалываются (разрушение путем отрыва), пластичные материалы подвергаются смятию (пластическая де-ормация под влиянием касательных напряжений).

Сопротивление отрыву у хрупких материалов меньше, чем со-ротивление срезу, а у пластичных материалов наблюдается братное соотношение.

Горные породы относятся к хрупким материалам.

Пластичность (хрупких) материалов можно охарактеризовать оэффициентом, численно равным отношению временных сопро-ивлений растяжению и сжатию,

$$K_{пл} = \frac{\sigma_р}{\sigma_{сж}}.$$

Этот показатель горных пород оказывает большое влияние на их добываемость, дробление и интенсивность трещиноватости. Прочность материалов может быть охарактеризована табличными данными или графически.

Графическое изображение дает более полную характеристику прочности, чем табличные данные, в особенности для хрупких материалов, в том числе для горных пород, у которых сопротивление срезу возрастает с увеличением нормальных напряжений сжатия, распределенных по плоскости среза.

На рис. 30 изображен график прочности горной породы. Линия ABC характеризует прочность горной породы в образце; при этом отрезок OA численно равен временному сопротивлению растяжению, а отрезок OD — временному сопротивлению сжатию; ординаты кривой на участке BC выражают сопротивление сдвигу в зависимости от изменения нормальных напряжений. Линию BC на некотором протяжении можно принять прямой; параметры этой линии — наклон к оси абсцисс и отрезок, отсекаемый на оси ординат, а также отрезок OA, выражающий временное сопротивление растяжению, являются основными характеристиками прочности; отрезок, отсекаемый на оси ординат, называют сцеплением, а угол его наклона к оси абсцисс — углом внутреннего трения. Тангенс угла наклона линии BC численно равен коэффициенту внутреннего трения; коэффициент внутреннего трения является коэффициентом пропорциональности между приращением нормальных и касательных напряжений при срезе

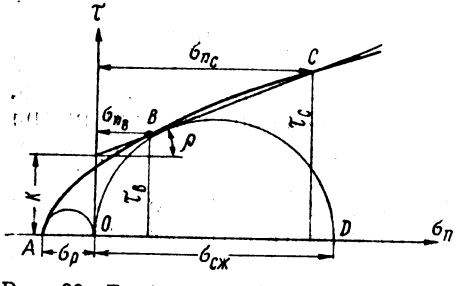


Рис. 30. График прочности горной породы в образце

$$f = \operatorname{tg}\rho = \frac{\tau_c - \tau_в}{\sigma_{n_c} - \sigma_{n_в}} = \frac{\Delta\tau}{\Delta\sigma_n}, \qquad (45)$$

Отрезок, отсекаемый линией BC на оси ординат, характеризует сцепление горной породы и выражается следующим образом:

$$K = \tau_c - f\sigma_{n_c} \quad \text{или} \quad K = \tau_в - f\sigma_{n_в}. \qquad (46)$$

Полное сопротивление срезу равно

$$T = N \operatorname{tg}\rho + KL, \qquad (47)$$

где T — срезывающая сила (параллельная плоскости среза);
N — нормальная сила (перпендикулярная к плоскости среза);
L — площадь плоскости среза.

Разделив все члены уравнения (47) на площадь среза, получим уравнение равновесия, выраженное в напряжениях:

$$\tau = \sigma_n \operatorname{tg}\rho + K. \qquad (47')$$

На графике рис. 31 область, ограниченная линией ABC и осью абсцисс, является областью возможных напряжений для данной породы, а линия ABC выражает предельные напряжения.

При графическом изображении напряжений кругами Мора эти круги не могут пересекать линию ABC, а в предельном состоянии являются касательными к ней; эти круги называются предельными, а точки касания соответствуют предельным напряжениям, при которых происходит срез.

Наибольшие и наименьшие главные напряжения, соответствующие предельным кругам напряжений, зависят от механических характеристик прочности

$$\sigma_1 = 2K \operatorname{ctg}\left(45^\circ - \frac{\rho}{2}\right) + \sigma_3 \operatorname{ctg}^2\left(45^\circ - \frac{\rho}{2}\right).$$

Площадки, по которым происходит срез, располагаются под углом $45^\circ - \frac{\rho}{2}$ к направлению наибольшего главного напряже-

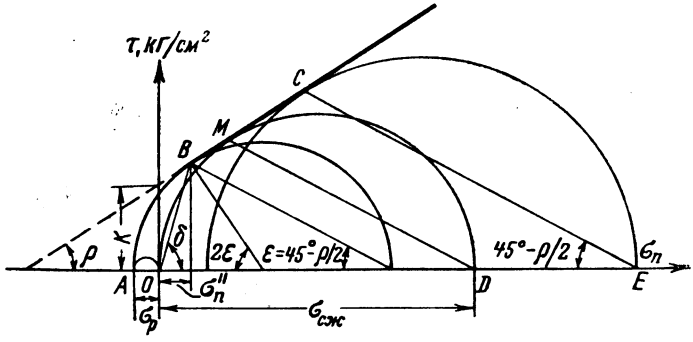


Рис. 31. Предельные круги напряжений и предельная огибающая кривая

ния и называются площадками скольжения. На рис. 31 они выражены линиями MD и CE.

При перемещении центра предельных кругов в сторону начала координат наименьшее и наибольшее главные напряжения постепенно уменьшаются. Перейдя за начало координат, наименьшее главное напряжение приобретает отрицательное значение, т. е. становится растягивающим. Наибольшее значение растягивающего напряжения не может превышать величину временного сопротивления растяжению, которое на графике откладывается по оси абсцисс в сторону отрицательных значений (точка A). Таким образом, предельный круг напряжений, у которого наименьшее главное напряжение равно временному сопротивлению растяжению, является последним слева (со стороны отрицательного напряжения).

Так как горные породы обладают относительно небольшими величинами временного сопротивления растяжению, то огибаю-

щая предельных кругов напряжений может пересекать ось ордн нат ниже, чем пересекает ее продолжение отрезка BC.

Сцепление горной породы можно понимать как сопротивлени срезу при отсутствии нормальных напряжений, но при подобнор рода испытаниях (приложение только касательных нагрузок разрушение большей части горных пород происходит не путе сдвига (среза), а путем отрыва. Такое разрушение горных поро называется сколом. Испытаниям на скол обычно подвергаются крепкие и средней крепости горные породы.

Крепкие горные породы так же, как и слабые, могут быт разрушены путем отрыва, или путем сдвига. В отличие от сла бых, у крепких пород отношение сопротивления отрыву к сопро тивлению сжатию меньше и поэтому они являются более хруп кими. Вследствие хрупкости крепкие горные породы при срез разрушаются при небольших деформациях сдвига, а поверхност среза по виду подобна поверхности при сколе, характеризующей разрушение путем отрыва.

Разрушение путем отрыва при приложении касательных усилий и небольших нормальных напряжениях объясняется тем, что в этом случае главное напряжение получает отрицательное значение (растяжение) и в связи с небольшими величинами временного сопротивления растяжению у хрупких пород их разрушение происходит путем отрыва, а не среза [173].

Наименьшее нормальное напряжение σ_n'', при котором разрушение еще может происходить путем среза, можно определить по формуле [173]

$$\sigma_n'' = K\cos\rho - \sigma_p(1 + \sin\rho), \tag{48}$$

которая легко выводится исходя из схемы, изображенной на рис. 31.

При этом нормальном напряжении возникающее при срезе наименьшее главное напряжение равно временному сопротивлению растяжению и разрушение может произойти или путем среза по площадке, наклоненной к направлению σ_1 под углом $45° - \frac{\rho}{2}$, или путем отрыва по площадке, параллельной направлению σ_1.

Если испытание на срез производится при $\sigma_n < \sigma_n''$, то возникающее при срезе наименьшее главное напряжение должно было бы быть по абсолютной величине больше σ_p, чего быть не может и поэтому разрушение происходит путем отрыва, как только при увеличении τ σ_3 достигнет величины σ_p.

Таким образом, при напряжениях, характеризующихся отрезком AB графика напряжений (рис. 31), прочность горной породы будет определяться сопротивлением отрыву.

Возникновение растягивающих напряжений при приложении касательных сил можно объяснить следующим образом (рис. 32): распределенная по площадке ab сила P создает момент враще-

ния блока $AabC$ вокруг точки A; вращению препятствует момент силы сопротивления отрыву, распределенной по площадке Aa.

Необходимая для разрушения путем отрыва по площадке Aa сила P может быть определена по формуле

$$P = \frac{1}{3}\sigma_p l^2 \frac{b}{a}, \tag{49}$$

где b — ширина призмы (рис. 32).

Для разрушения путем среза по этой площадке потребовалось бы усилие вдвое большее, чем P.

Хрупкость твердых горных пород широко используется для облегчения их разработки: «крупный скол» используется при конструировании режущих органов землеройных и врубовых машин, буровых коронок; дробление используется при разделке негабаритов и пр. (см. § 6 гл. XI).

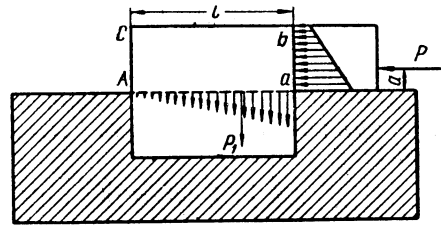


Рис. 32. Схема сил при испытании на скол

При испытании на одноосное сжатие между шероховатыми плитами разрушение образцов горных пород происходит путем сдвига по площадкам, наклоненным, как это ясно из рис. 31, под углом $45° - \frac{\rho}{2}$ к направлению наибольшего главного напряжения. Поэтому высота образцов должна быть не менее чем

$$h = a \operatorname{ctg}\left(45° - \frac{\rho}{2}\right), \tag{50}$$

где a — сторона основания образца, или диаметр образца, если образец имеет цилиндрическую форму.

Если у образцов, испытываемых на сжатие, отношение высоты к длине основания менее величины $\operatorname{ctg}\left(45° - \frac{\rho}{2}\right)$, то напряжения одноосного сжатия испытывают только краевые части образцов. При удалении от краев порода находится в условиях всестороннего сжатия, вследствие чего сопротивление сжатию возрастает от краев образца к его середине. Это ведет к увеличению общей величины сопротивления сжатию при уменьшении отношения высоты к длине основания.

В отличие от испытаний на сжатие между шероховатыми плитами при испытании между гладкими плитами или при смазке оснований парафином разрушение образцов горных пород происходит путем отрыва по площадкам, параллельным оси образца. Напряжения отрыва создаются, по всей вероятности, под влиянием неравномерных поперечных деформаций в образце. Так как сопротивления отрыву незначительны, то достаточно даже

небольших растягивающих напряжений, образующихся при неравномерных поперечных деформациях.

Если нормальное напряжение больше σ_n'' (рис. 31), то сопротивление горных пород разрушению в условиях неравномерного всестороннего сжатия полностью определяется величиной сцепления и углом внутреннего трения.

Рассматривая напряженное состояние обнаженного массива горных пород на открытых разработках, можно убедиться, что область, в которой возникают растягивающие напряжения, незначительна.

Так как почти все горные породы в той или иной степени трещиноваты, то при расчетах напряженного состояния массива горных пород сопротивлением отрыву можно пренебречь и учитывать только сопротивление сжатию и срезу, которые определяются сцеплением и коэффициентом внутреннего трения. Таким образом, можно считать, что **сцепление и коэффициент внутреннего трения являются основными характеристиками прочности горных пород.**

§ 2. Сцепление горной породы в образце

Прочность горных пород в целом характеризуется большой прочностью отдельных ее частиц и более слабой связью между частицами, поэтому разрушение породы и ее деформация происходят в форме скольжения по наиболее слабым поверхностям, которые в основном не пересекают минеральных частиц, а проходят через их контакты, поры и плоскости отдельности. Поэтому поверхности скольжения в горных породах шероховаты и по ним возникают силы трения; разрушению горной породы путем сдвига противодействуют силы сцепления и трения.

В горных породах различают первичное сцепление, сцепление упрочнения и сцепление, определяемое капиллярным натяжением; общая величина сцепления горной породы складывается из этих трех величин.

Величина первичного сцепления зависит от состава и плотности горной породы, так как обусловлена действием молекулярного притяжения между частицами.

При уплотнении происходит сближение частиц и увеличение в единице объема числа связей между ними, что и приводит к повышению первичного сцепления.

Сцепление упрочнения, или цементационное сцепление, возникает в горных породах под влиянием их цементации железистыми соединениями, кремнеземом, известью и др. Оно не возрастает при уплотнении горной породы, а напротив, может быть уменьшено или полностью устранено, если даже при всестороннем сжатии будет превзойдена предельная несущая способность сцементированного минерального скелета горной породы.

Представление о величине сцепления упрочнения горных пород дает разность между сопротивлением срезу или сжатию образ-

шов пород естественной структуры и приготовленных из них паст той же самой плотности, какую имела порода естественной структуры. Н. Я. Денисов считает, что сцепление упрочнения с течением времени возникает также под влиянием соединения глинистых частиц в агрегаты без уплотнения породы.

Сцепление, обусловливаемое капиллярным натяжением, проявляется как дополнительное сопротивление срезу за счет сил трения, развивающихся под влиянием капиллярного давления (натяжения). Это сцепление проявляется при небольших нормальных напряжениях, когда на поверхности породы еще сохраняются вогнутые мениски. Для пород, погруженных в воду, перенасыщенных водой или имеющих большую плотность, сцепление, обусловленное капиллярным натяжением, не проявляется совсем.

В разных породах каждый из трех видов сцепления имеет различную относительную величину. Так, в крепких песчаниках с железистым или кремнистым цементом сцепление упрочнения больше первичного сцепления, а третий вид сцепления в них вовсе отсутствует; в плотных аргиллитах, алевролитах и глинах основным видом сцепления является первичное; у глинистых пород большой пористости и влажности значительную относительную величину приобретает сцепление от капиллярного натяжения.

Глинистые породы, обладающие сцеплением упрочнения (опоковые глины, суглинки, лёссы и др.), в естественном строении имеют комковатую структуру и при сжатии пальцами рассыпаются на мелкие кусочки, а при смятии в руке превращаются в пластичную полужидкую пасту.

Влажные глинистые породы, не имеющие сцепления упрочнения, при сжатии в пальцах не рассыпаются на кусочки, а сразу деформируются пластически. При смятии в руках их структура изменяется мало.

Исследованиями установлено, что сцеплением упрочения из группы слабых пород обладают опоки, опоковые глины и другие глины морской фации, суглинки, сидеритизированные аргиллиты и алевролиты, песчаники на известковом цементе, мел, мергель, мергельные глины и угли. Величины сцепления испытанных пород приведены в приложении.

§ 3. Коэффициент внутреннего трения и поровое давление

Коэффициент внутреннего трения является второй основной характеристикой прочности пород. Его величина зависит от шероховатости поверхностей, по которым производится сдвиг, а шероховатость зависит от минералогического и гранулометрического состава породы. Чем больше песчаных и чем меньше глинистых фракций, тем больше шероховатость поверхностей скольжения, а следовательно, и величина коэффициента внутреннего трения.

На величину коэффициента внутреннего трения водонасыщенных глин при их влажности более максимальной молекулярной влагоемкости оказывает влияние также пористость. У более плотных глин коэффициент внутреннего трения при изменении пористости изменяется мало. Так, например, у аргиллитов при изменении пористости от 40 до 15% угол внутреннего трения возрастает только на 5°, а величина сцепления при этом возрастает в 80 раз; у пород алевритового состава изменение угла внутреннего трения еще меньше (в пределах 2—5°), а у песчаников угол внутреннего трения остается постоянным при любой плотности — влажности. Кажущаяся же величина угла внутреннего трения у водонасыщенной породы данного состава сохраняется постоянной лишь до определенной величины напряжений, зависящей от ее прочности.

Если в процессе испытания на срез наибольшее главное напряжение превышает несущую способность минерального скелета горной породы, то последний начинает уплотняться и у водонасыщенных образцов возникает поровое давление воды, которое принимает на себя часть внешней нормальной нагрузки, вследствие чего эффективное давление, воспринимаемое грунтовым скелетом, уменьшается, а также уменьшается сила трения по поверхности среза и выполаживается линия, выражающая зависимость между приложенными нормальными и касательными напряжениями при срезе. Это выполаживание зависит от прочности, гранулометрического и минералогического состава пород, от их плотности и состава обменных катионов, а также от размера образцов, определяющих величину развивающегося по поверхности среза порового давления. При возникновении порового давления при срезе формула (47) принимает следующий вид:

$$\tau = K + \operatorname{tg}(\sigma_n - \delta), \qquad (51$$

где δ — интенсивность порового давления.

У горных пород, обладающих сцеплением упрочения, величина наибольшего главного напряжения, при котором наступают уплотнение образца и отжим воды, кроме испытанной породой уплотняющей нагрузки, зависит от величины сцепления упрочнения. Эта величина наибольшего главного напряжения, так же как и для пород, обладающих только первичным сцеплением, является вполне определенной, соответствующей прочности данной породы.

Величину наибольшего главного напряжения, при котором начинается уплотнение горной породы и отжим воды, т. е. нарушается внутренняя структура минерального скелета породы, в дальнейшем будем называть предельным главным напряжением и обозначать буквой σ_1'.

Поровое давление при срезе проявляется не только в тех случаях, когда величина σ_1' превышает природную нагрузку,

В жирных глинах, обладающих большим давлением набухания, поровое давление имеется и в природных условиях. В силу осмотического характера связанной поровой воды, в глинистых породах давление поровой воды всегда больше гидростатического на величину, равную силе набухания.

При испытаниях в стабилометре, в срезных или компрессионных приборах полная величина порового давления не может быть определена обычными приборами для измерения давления поровой воды, а определяется только разность между полной величиной порового давления и давлением набухания. Полная величина порового давления определяется как разность между значением σ_1 данного испытания и σ_1', при котором начинается выполаживание кривой $\tau = f(\sigma_n)$.

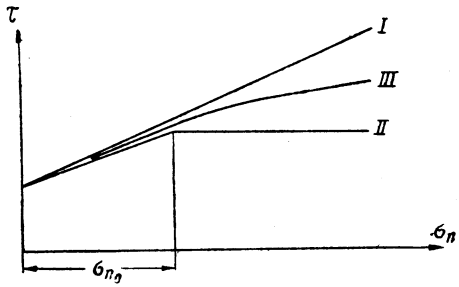


Рис. 33. Различные виды графиков сопротивления сдвигу

В случаях, когда испытанию подвергаются неводонасыщенные образцы ($G<1$) или водонасыщенные глинистые пески по схеме эффективного (медленного) сдвига, поровое давление равно нулю, или ничтожно мало, по сравнению с величиной внешнего нормального давления, и зависимость между τ и σ_n получается близкой к прямолинейной (кривая *I* на рис. 33).

При испытаниях жирных глин прямолинейная зависимость между τ и σ_n наблюдается лишь до определенных величин напряжений, превышение которых вызывает уплотнение образцов; в этом случае будем считать $\sigma_n = \sigma_{n_0}$; при дальнейшем росте σ_n минеральный скелет грунта начинает уплотняться, чему противодействует развивающееся при этом поровое давление, воспринимающее на себя избыточную часть σ_n; при быстром проведении опыта эффективное нормальное давление по плоскости среза в идеальном случае можно считать постоянным, равным

$$\sigma_{n_э} = \sigma_n - \delta = \sigma_{n_0} = \text{const},$$

поэтому и сопротивление сдвигу получается независящим от σ_n и в результате испытания получается кривая *II* (рис. 33).

При испытании по схеме быстрого сдвига (среза) образцов песчаных глин развивающееся поровое давление при $\sigma_n > \sigma_{n0}$ не может полностью сохраняться вследствие отжима воды, и $\sigma_{n_э}$ по мере роста σ_n также несколько возрастает; при испытаниях получается кривая *III* (рис. 33).

При испытании некоторых образцов водонасыщенных песчаных глин и суглинков при больших нормальных нагрузках

происходит не только отжим воды, но и выдавливание грунта в зазор между обоймами прибора, вследствие чего еще до приложения касательных нагрузок по плоскости среза происходит нарушение структуры образца, и сопротивление сдвигу в значительной степени снижается.

При испытании водонасыщенных пород в стабилометре в условиях, исключающих отжим воды из образцов (закрытая система), зависимость между σ_n и τ характеризуется кривой *II*.

В горных породах нарушенной структуры (глинистые породы в отвале) выполаживание линии, выражающей зависимость между нормальным и касательным напряжениями при срезе, происходит медленнее, чем в образцах естественной структуры, вследствие наличия незаполненных водой макропор. При уплотнении насыпного грунта, когда он при определенных напряжениях переходит из трехфазной среды (порода — вода — воздух) в двухфазную (порода — вода), в этих породах также развивается поровое давление, которое снижает силы трения и ведет к оползанию откосов насыпей и отвалов. В этом состоянии уплотненный грунт нарушенной структуры не отличается от водонасыщенной горной породы, обладающей только первичным сцеплением.

Между предельным главным напряжением и основными механическими характеристиками существует определенная зависимость. Для породы однородного состава σ_1' тем больше, чем больше величина сцепления.

Испытания горных пород на срез, произведенные институтом ВНИМИ, показали, что между величиной сцепления и предельным главным напряжением существует зависимость, которую для водонасыщенных глинистых горных пород приближенно можно выразить формулой

$$\sigma_1' = \frac{2K_0}{(1 - \operatorname{tg}\rho)\left(1 - \operatorname{tg}\frac{\rho}{2}\right)}, \qquad (52)$$

где K_0 — сумма первичного сцепления и сцепления упрочнения горной породы в образце.

Область напряжений, при которых скелет горной породы сохраняет устойчивое состояние, необходимо устанавливать опытным путем.

Характер влияния влажности горной породы на коэффициент трения становится понятным при рассмотрении рис. 34.

Произведенными испытаниями на срез водонасыщенных образцов горных пород с упругим скелетом одного и того же минералогического и гранулометрического состава, но разной влажности (прочности), установлено, что линии, выражающие прочность пород различной влажности, подобны между собой (рис. 34).

Если срезáть при одинаковых нормальных нагрузках образцы различной прочности (влажности), то у более влажной породы угол внутреннего трения получается меньшим.

При испытании трех образцов, имеющих объемную влажность 0,37; 0,34 и 0,31, при одинаковых напряжениях, равных 1,0; 2,5 и 4,0 *кГ/см²*, углы внутреннего трения получились 7°30′, 23 и 30° (рис. 34). Так как характер напряжений во всех трех испытаниях был неодинаков, то и результат испытаний следует считать неправильным, так как в третьем образце при всех трех срезах наибольшие главные напряжения не превышали σ_1', а во втором образце при третьем срезе и в первом образце при втором и третьем срезах они уже были значительно больше σ_1'.

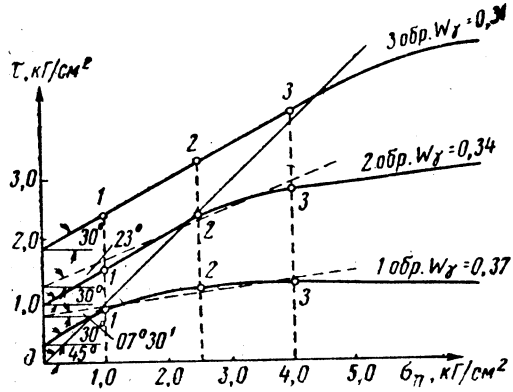


Рис. 34. Зависимость угла внутреннего трения от величины нормальных напряжений при срезе у пород различной влажности

Угол внутреннего трения горной породы рекомендуется определять по отрезку линии, выражающей зависимость между σ_n и τ при срезе, который лежит между осью ординат и биссектрисой координатного угла. На этом отрезке σ_1 не превышает σ_1', поровое давление не возникает и коэффициент внутреннего трения проявляется в полной мере; в этом случае угол внутреннего трения для всех трех образцов получится одинаковым, а пределы напряжений, в которых можно применять этот угол, неодинаковы.

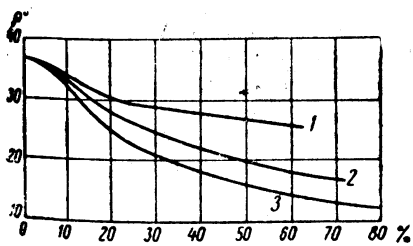


Рис. 35. Зависимость между углом внутреннего трения и процентным содержанием глинистой фракции для глин различного минералогического состава:

1 — гидрослюдистые глины; *2* — каолиновые глины; *3* — монтмориллонитовые глины

Испытаниями глинистых горных пород различного минералогического состава на срез установлена зависимость между гранулометрическим составом породы и ее углом внутреннего трения (рис. 35). Характеризующей ~~функцией~~ фракцией, которая определяет величину угла внутреннего трения, является фракция <0,005 *мм*.

Величины углов внутреннего трения горных пород различного литологического наименования:

Скальные и полускальные породы

Кварцевые порфириты, сиениты, гранодиорит-порфиры, вторичные кварциты, песчаники	35—37
Бурый уголь	36
Известняки, метаморфические кристаллические сланцы, порфириты, серпентиниты, алевролиты	31—33
Выветрелые и каолинизированные: гранодиориты, сиениты, диориты, гранодиорит-порфиры	30—31
Филлиты, глинистые сланцы, габбро-диабазы, аргиллиты	26—27

Несвязные и глинистые породы

Щебень	40
Гравий и галька	38
Пески кварцевые и полевошпатовые крупнозернистые	36
Пески кварцевые и полевошпатовые среднезернистые	34
Пески кварцевые и полевошпатовые мелкозернистые	32
Пески слюдистые	28
Глины песчаные гидрослюдистые, опоковые	30—31
Лёссовидные суглинки, лёссы, краснобурые глины	26—29
Песчаные каолиновые глины	22—25
Глины гидрослюдистые жирные	20—22
Песчаные слюдистые глины	17—20
Каолиновые жирные глины	16
Монтмориллонитовые глины	10—12

У скальных и полускальных горных пород, так же как и у глинистых, с увеличением нормальных напряжений наблюдается постепенное выполаживание линии $\tau=\psi(\sigma_n)$ и при некоторых величинах напряжений сопротивление сдвигу не зависит от σ_n.

Увеличение сопротивления сдвигу при росте σ_1 у горных пород (как и у других материалов) объясняется шероховатостью поверхности среза, являющейся следствием того, что прочность минералов выше, чем прочность связей между минералами или между обломками осадочных пород и цементом.

При больших нормальных напряжениях, когда сопротивление сдвигу породы возрастает до величины, приближающейся к сопротивлению сдвигу минералов, условия для возникновения шероховатой поверхности скольжения исчезают и сопротивление сдвигу становится постоянным.

§ 4. Ползучесть и длительная прочность горных пород

Горные породы, как и другие материалы, в большей или меньшей степени обладают ползучестью, характеризующейся развитием во времени пластических деформаций без роста напряжений. При некоторых условиях ползучесть горных пород приводит к релаксации напряжений — уменьшению напряжений без существенной деформации.

Ползучесть горных пород влияет на длительную устойчивость осов: с одной стороны, она приводит к развитию деформаций ига при напряжениях, не достигающих предельных, что с течением времени может привести к нарушению устойчивости — рушению или оползанию откоса, с другой стороны, ползучесть особствует тому, что разнородные горные породы с отличающимися деформационными свойствами в откосе работают совместно, что положительно влияет на устойчивость откосов.

Вследствие сложной структуры (сложения) горных пород изучение их ползучести является довольно затруднительным. При ытании образцов некоторых ных пород признаки ползучести наблюдаются при напряжениях, составляющих 10—15% от зрушающих. При повторных гружениях предел ползучести зрастает, происходит уменьшение величины относительных деформаций и наблюдается «упрочнение» горной породы.

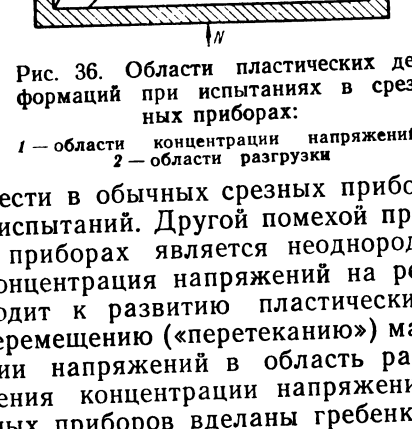


Рис. 36. Области пластических деформаций при испытаниях в срезных приборах:

1 — области концентрации напряжений; 2 — области разгрузки

Поскольку «упрочнение» во ремени водонасыщенных горных пород может происходить следствие снижения порового авления, то при изучении ползучести в обычных срезных приборах невозможно увеличить время испытаний. Другой помехой при зучении ползучести в срезных приборах является неоднородность напряженного состояния: концентрация напряжений на режущих кромках прибора приводит к развитию пластических деформаций на этих участках и перемещению («перетеканию») материала из области концентрации напряжений в область разгрузки (рис. 36). (Для уменьшения концентрации напряжений в основание коробок наших срезных приборов вделаны гребенки, выступающие на 4—5 *мм*). Даже при испытаниях в стабилометрах «в закрытой системе» наблюдаются заметные пластические деформации при самом начале приложения вертикальных (осевых) напряжений.

При повторных нагружениях предел ползучести повышается. Если образец, выдержанный под нагрузкой, разгрузить, то через некоторое время он снова проявит ползучесть при небольших нагрузках. Склонностью к пластическим деформациям при небольших относительных нагрузках особенно отличаются слабоуплотненные глинистые породы.

Это дает основание предполагать, что склонность глинистых горных пород к проявлению пластических деформаций в лабораторных условиях при небольшой нагрузке связано с их структурой, которую можно назвать «чешуйчатой». Как известно [152], глинистые минералы имеют форму вытянутых плоских чешуек

с относительными размерами: у каолинов 20—500 $м\mu$, а у монтмориллонита 3—300 $м\mu$.

При отложении в водной среде пластинки и чешуйки глинистых минералов располагаются беспорядочно, накладываясь крестообразно одна на другую и создавая чешуйчатую структуру. При уплотнении происходит изгиб пластинок и чешуек, а при разгрузке, вследствие их упругости, они частично распрямляются. Поэтому при последующем нагружении в период испытаний наблюдаются остаточные (пластические) деформации при напряжениях значительно меньше тех, которые порода испытывала в природных условиях.

В связи с этим перед определением предела ползучести необходимо выдержать образец под природной нагрузкой, а затем прикладывать касательные напряжения. Выдерживать образцы под природной нагрузкой необходимо в открытой системе, если в период отбора образцы набухали. При определении эффективной «природной нагрузки» в условиях артезианских бассейнов необходимо учитывать величины напоров артезианских вод.

Изучение ползучести горных пород нами были начаты в 1951 г. при испытаниях на «косой срез» с нагружением разрывной машиной Р-5. С 1956 г. эти испытания начали проводить в обычных одноплоскостных срезных приборах, а затем и в стабилометрах.

Как указывалось выше, признаки ползучести глинистых пород наблюдаются при напряжениях, составляющих 10—15% от разрушающих. При небольших напряжениях это проявляется в том, что затухающие деформации продолжаются некоторое время после приложения нагрузки.

По мере увеличения нагрузки одинаковыми ступенями, скорости затухающих деформаций возрастают, вместе с этим увеличивается и время затухания; при некоторых величинах напряжений, после периода постепенного уменьшения скорости деформации (периода неустановившейся ползучести) наступает период деформирования с постоянной скоростью (период установившейся ползучести), который затем сменяется периодом возрастающей скорости деформации, заканчивающимся разрушением (рис. 37 и рис. 41).

В природных условиях, так же как и в лабораторных, всякое изменение напряжений сопровождается постепенно затухающей деформацией или деформацией, заканчивающейся обрушением или оползанием.

Большой практический интерес представляет так называемый «предел ползучести», выражающий величину напряжений, при которых «скорость деформации в пределе стремится к нулю, а величина деформации (при $t \to \infty$) — к некоторому конечному значению l'_{max} [192].

Если действующие напряжения превышают предел ползучести, то возникают незатухающие пластические деформации, заканчивающиеся разрушением горной породы.

Более подробно ползучесть «земляных масс» описана В. А. Флориным [192].

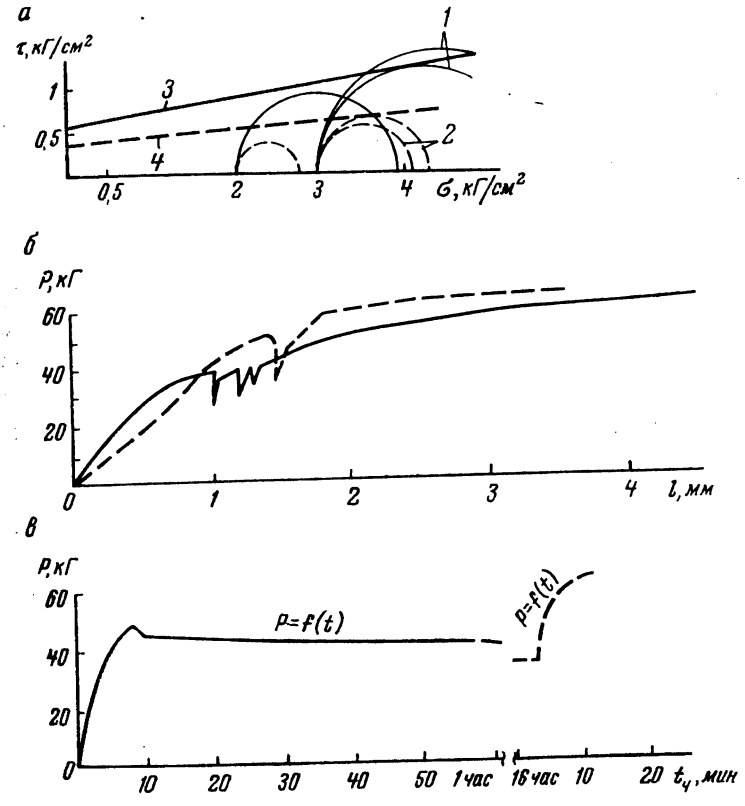


Рис. 37. Графики результатов испытаний на срез и трехосное сжатие:

а — график сопротивления сдвигу; *б* — график зависимости деформаций и нагрузок; *в* — график падения напряжений с течением времени; *1*, *2* — круги напряжений предельных и на пределе ползучести по испытаниям в стабилометре

У слабых глинистых пород период неустановившейся ползучести при напряжениях, близких к пределу ползучести, продолжается до 20—30 дней (рис. 41, *б*), поэтому определение предела ползучести у этих пород путем наблюдения за развитием неустановившейся ползучести при различных величинах напряжений требует длительного времени.

С целью сокращения продолжительности испытаний по определению предела ползучести, автором с 1951 г. применяется следую-

щий прием: вначале ступенями значения напряжений доводятся до величины, существенно превышающей предел ползучести, а затем постепенно уменьшаются до тех пор, пока совсем не прекратится пластическая деформация. За время, в течение которого напряжения превышали предел ползучести, успевает произойти деформация, по величине превышающая деформацию периода не установившейся ползучести при напряжениях, близких к пределу ползучести.

В настоящее время определение предела ползучести при испытаниях слабых пород на срез и трехосное сжатие нами производится одним из следующих способов:

а) по графику падения напряжений и затухания деформаций во времени при испытании образцов на косой срез с использованием универсальной разрывной машины Р-5 и при испытаниях в стабилометре с пружинным силоизмерителем (динамометром);

б) по графику затухания деформаций при постепенном уменьшении касательных напряжений при испытании в обычных двухрычажных одноплоскостных срезных приборах;

в) по графику зависимости между нагрузками и деформациями при испытании на косой срез плотных глин и полускальных пород.

При испытании по первой схеме постепенно увеличивают осевую нагрузку в стабилометре, при постоянном боковом давлении, доводя ее до такой величины, при которой происходит незатухающая осевая деформация со скоростью около 2—3 μ/*сек*. Если пресс непрерывно не подкручивать, то осевая деформация будет вести к уменьшению осевого давления до таких величин, которые перестают вызывать деформацию (рис. 37, *в*); напряжение σ_1, соответствующее этому давлению, и будет характеризовать границу напряжений, вызывающих пластическую деформацию (ползучесть). Так же проводятся испытания пород на косой срез с использованием универсальной разрывной машины Р-5.

После того как предел ползучести установлен, увеличивают осевое давление до полного разрушения образца.

При испытании пород на двухрычажных срезных приборах предел ползучести определяется следующим путем.

Образец породы естественного сложения помещается в срезной прибор, и опыт начинается обычным путем по схеме быстрого (нейтрального) среза; значения касательных напряжений придаются ступенями до тех пор, пока деформации не выйдут из упругой зоны (величина τ_1 на рис. 38); величина τ_1 определяется по скорости деформации. По достижении величины τ_1 начинается разгрузка горизонтального рычага мелкими ступенями. При этом, если напряжение τ_1 действительно вызывало пластическую деформацию, то после ее уменьшения на некоторую небольшую величину будет продолжаться прямая деформация сдвига; она будет продолжаться и при снятии следующих небольших ступеней касательной нагрузки до тех пор, пока касательное напряжение не

меньшится до такой величины, которая не будет вызывать деформацию сдвига; при еще большем уменьшении сдвигающего напряжения происходит обратная деформация (упругое восстановление). Величина касательного напряжения, при которой прекращается деформация сдвига, является предельным напряжением, не вызывающим пластическую деформацию (на рис. 38 обозначена $\tau_п$). После установления предела ползучести опыт доводился до окончательного среза — τ_{max}. Промежуток времени между отдельными ступенями нагрузки составляет 60 *сек*, отсчеты берутся через 30 *сек*.

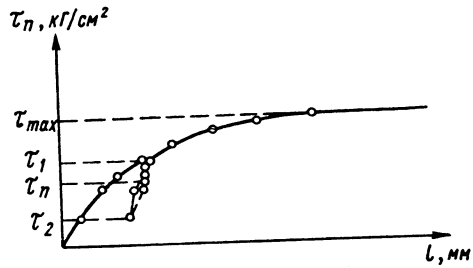


Рис. 38. Определение предела ползучести по графику затухания деформаций при частичной разгрузке сдвигающей силы

При испытании на срез плотных глин и других твердых пород, у которых начальная часть графика зависимости между нагрузкой и деформацией близка к прямой, нижнюю границу напряжений, вызывающих пластическую деформацию, можно определять по точке перегиба (точка максимальной кривизны) этой линии (рис. 39).

В результате таких испытаний на графике сопротивления сдвигу проводятся две линии: верхняя — выражающая сопротивление быстрому срезу, и нижняя — ограничивающая снизу зону напряжений, вызывающих пластическую деформацию. В целом, область возможных напряжений, которые допускает данная горная порода, разделяется на три зоны (рис. 40): 1-я зона — напряжения, при которых породы претерпевают незатухающие пластические деформации сдвига, 2-я зона — напряжения, при которых порода сохраняет устойчивое состояние (условно можно считать эту зону упругой), и 3-я зона — напряжения, при которых порода претерпевает затухающие пластические деформации — уплотнение.

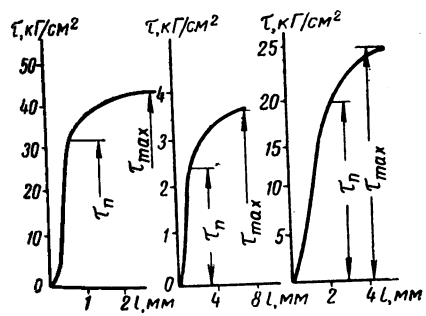


Рис. 39. Определение предела ползучести твердых пород по графику деформаций и нагрузок

Зона упругого состояния отделяется от зоны уплотнений по данным компрессионных испытаний (σ_1' соответствует удельной нагрузке, при которой начинается уплотнение породы).

При расчетах устойчивости откосов, а также других сооружений, устойчивость которых должна сохраняться длительное время, напряжения не должны превышать величин, характеризую-

8 Зак. 2198

щихся 2-й и 3-й зонами; при напряжениях, характеризующихся 1-й зоной, в откосах развиваются оползневые явления, а в подземных горных выработках развивается пучение.

В течение непродолжительного времени устойчивость откосов может сохраняться при напряжениях, превышающих предел ползучести на 40—50% разности между предельными напряжениями и пределом ползучести. В первой половине «зоны ползучести» скорость пластических деформаций не превышает 15 *μ/сутки*, при такой скорости деформации за 1,5—2 года общая деформация откоса не достигнет опасной величины.

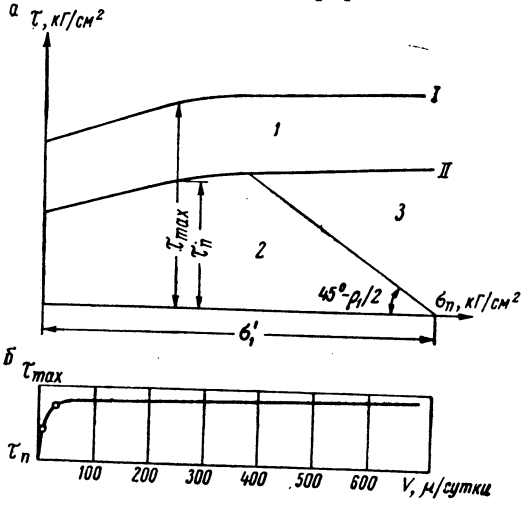


Рис. 40.

а — график сопротивления сдвигу глинистой горной породы; *б* — скорости деформации при росте напряжений от предела ползучести $\tau_п$ до предельных τ_{max}; *I*, *II* — напряжения предельные и на пределе ползучести

В результате проведенных исследований установлено, что для оценки устойчивости горных пород в откосах необходимо проводить испытания на срез по схеме быстрого среза с разгрузкой (для установления пределов напряжений, вызывающих пластические деформации); при испытании песчаных образцов вторую половину кривой $\tau=\psi(\sigma_п)$ получают по испытаниям в стабилометре (рис. 37, *а*), так как в начальной части кривой испытания в срезных приборах и в стабилометре совпадают.

По нашим испытаниям предел ползучести у слабых пород составляет около 50—80% от предельных срезающих напряжений при быстром срезе (продолжительность испытания по схеме быстрого среза составляет 10—12 *мин*).

В табл. 10 приведены величины предела ползучести η для некоторых пород в долях от общего сопротивления срезу.

С ползучестью горных пород связана их длительная прочность. Исследованиями установлено, что при росте касательных напряжений от предела ползучести к предельным срезающим скорость пластических деформаций возрастает (см. рис. 40, *б*).

На рис. 41 представлены графики деформации образцов глин при испытаниях на сдвиг в течение длительного времени (по данным В. И. Веселкова). При напряжениях, составляющих 95% от предельных (рис. 41, *а*), постоянная скорость деформации установилась через 60 *мин* и составляла 2 *μ/мин*; через 5 часов после

приложения касательной нагрузки произошел срез. При напряжениях, составляющих 80 и 90% от предельных (рис. 41, *б*), незатухающие деформации со скоростью 10—30 μ/*сутки* продолжались более двухсот дней, но разрушение образцов за это время еще не произошло (напряжение на пределе ползучести у этих образцов составляло 71% от предельных).

Разрушение при сдвиге у некоторых горных пород наступает после того, как деформация сдвига достигнет определенной величины, свойственной данной породе. Предельная деформация

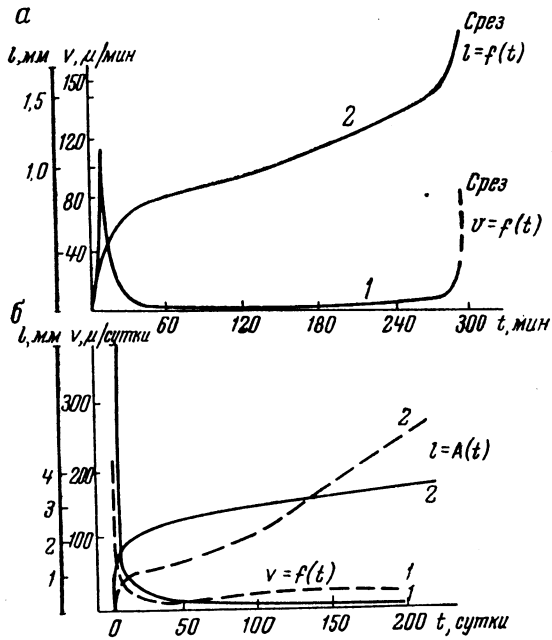


Рис. 41. Графики деформации при длительных испытаниях на сдвиг:

а — напряжения 95% от предельных; *б* — то же, 80 и 90%; *1* — скорость деформации; *2* — общая деформация

Таблица 10

Предел ползучести для некоторых пород

Порода	Содержание глинистой фракции <0,002, %	Пористость, %	Влажность, %	Сцепление, *кГ/см²*	Угол внутреннего трения, *град*	η
Суглинок лёссовидный	8	—	18	0,45	28	0,84
Глина темно-серая	89	51	44	1,20	19	0,75
Глина красно-бурая	70	44	34	0,70	25	0,65
Глина пылеватая .	45	36	21	1,00	21	0,66
Глина пылеватая .	21	57	39	0,90	15	0,56
Глина плотная жирная, углистая . .	82	43	29	1,1	14	0,73
Болотный суглинок пылеватый пластичный	22	46	30	0,22	3	0,35

сдвига может быть достигнута в течение короткого времени при большом напряжении и больших скоростях ползучести или в течение длительного времени при меньшем напряжении и меньших скоростях ползучести.

Эту зависимость можно представить в следующем виде:

$$\gamma_{пред} = \gamma_у \cdot ba^{\ln t_1} + be^{c\Delta\tau} \cdot (t - t_1), \quad (53$$

где $\gamma_{пред}$ — предельная деформация сдвига;

$\gamma_у$ — деформация сдвига через секунду после нагружения;

$\Delta\tau$ — приращение напряжений выше предела ползучести;

a, b, c — коэффициенты, устанавливаемые экспериментальным путем;

t_1; $(t - t_1)$ — время проявления неустановившейся и установившейся ползучести, *сек*.

Член $be^{c\Delta\tau}$ численно равен скорости деформации сдвига при установившейся ползучести.

Опытные данные показывают, что при длительном выдерживании под нагрузкой разрушение большей части горных пород происходит при бо́льших деформациях, чем при кратковременном действии нагрузок, поэтому предельную деформацию у таких горных пород нельзя считать величиной постоянной. Вопрос о влиянии времени и величины напряжений на предельную деформацию сдвига совсем не изучен.

При изучении длительной прочности слабоуплотненных глинистых пород, обладающих давлением набухания, необходимо учитывать изменение естественного напряженного состояния, возникающее в откосах открытых горных выработок, и связанное с этим изменение плотности — влажности пород.

В глинистых водонасыщенных породах в естественных условиях напряженное состояние близко к гидростатическому и может быть охарактеризовано кругами напряжений *1* на рис. 42,*а*.

На этом рисунке отрезок p численно равен вертикальному давлению с учетом взвешивания, а δ равно давлению набухания; эффективное вертикальное давление, воспринимаемое минеральным скелетом, равно отрезку σ_1'. Под этим давлением минеральный скелет в течение длительного времени стабилизировался ($\sigma_2 = \sigma_3 \gg \delta$) и процесс набухания происходить не может.

После проведения открытой горной выработки, если даже на всем протяжении наиболее слабой поверхности величина наибольшего главного напряжения не превысит σ_1' и напряжение на минеральный скелет в первое время будет характеризоваться кругом *2*, а поровое давление будет отсутствовать, то в силу активного характера давления набухания, за счет него снова появится поровое давление интенсивностью δ_1', а напряжение, приходящееся на минеральный скелет, будет характеризоваться кругом *2'*.

При этом, если круг *2'* войдет в область ползучести, то нач-

нется медленное деформирование откоса, при котором процесс всасывания воды в поры грунта еще более возрастает. Процесс набухания глин затухает, когда наступает равновесие между напряжением σ_3 и поровым давлением, соответствующее плотности

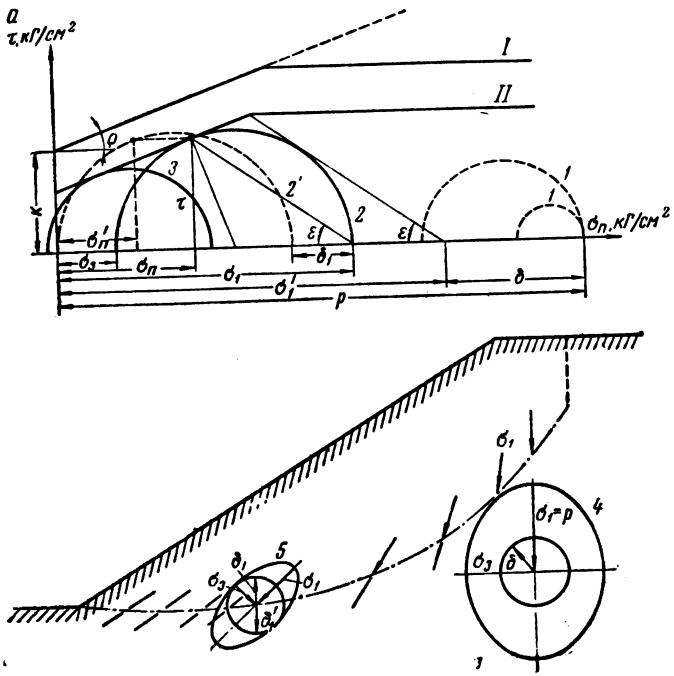


Рис. 42. Изменение напряжений в породах после устройства выемки:

1, 2, 3 — круги напряжений до проходки и после проходки выемки; *4, 5* — эллипсы нормальных напряжений до проходки и после проходки выемки

горной породы (см. § 4 гл. VII). Этот процесс одновременного уменьшения прочности глинистых пород и развития в них ползучести еще совсем не изучен, но только в нем можно найти объяснения причины возникновения целого ряда оползней.

Глава IX

ХАРАКТЕРИСТИКИ СОПРОТИВЛЕНИЯ СДВИГУ МАССИВА ГОРНЫХ ПОРОД

Для определения сопротивления сдвигу горных пород в массиве нами с 1951 г. проводятся натурные испытания на сдвиг

больших призм, оконтуренных в местах их естественного залегания. В этой главе излагается методика и результаты этих испытаний.

§ 1. Методика натурных испытаний на срез

Сущность натурных испытаний горных пород на срез заключается в следующем. В массиве пород оконтуривают призму таким образом, чтобы она сохраняла связь с массивом лишь по той поверхности, по которой необходимо определить характеристики сопротивления сдвигу. К этой поверхности прикладываются нормальные и касательные силы, создаваемые гидравлическими домкратами или плоскими гидравлическими подушками. Применяющиеся схемы приложения сил изображены на рис. 43. Схема *I* в наших испытаниях применяется наиболее часто. В этой схеме нормальные и касательные напряжения по плоскости среза создаются одной силой, направленной под углом 20—45° к плоскости среза; эта сила разлагается на нормальную и касательную составляющие относительно плоскости среза.

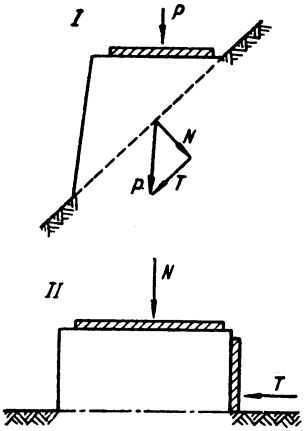


Рис. 43. Схемы нагружения призм при натурных испытаниях

В схеме *II* нормальные и касательные напряжения создаются независимо двумя домкратами.

Нагружение по схеме *I* является наиболее простым и в основном применяется при испытании призм, оконтуренных на площадках или в откосах уступов. По схеме *II* испытания проводятся в подземных выработках или шурфах, где нагружение призм по двум взаимно-перпендикулярным направлениям не представляет сложности. На площадках и в откосах уступов нагружение по схеме *II* является довольно сложным и трудоемким.

При нагружении по схеме *I* направление равнодействующей нормальной и касательной к поверхности среза составляющих сил определяется направлением нормали к плите, на которую устанавливается гидравлический домкрат или укладывается гидравлическая подушка.

Поверхность среза относительно слоистости или трещин ориентируется следующим образом (рис. 44):

а) плоскость гидроподушки или основание гидродомкрата располагается нормально к наслоению или по наслоению; плоскость среза в этих случаях проходит диагонально к слоистости и к нормальносекущим трещинам;

б) поверхность среза проходит параллельно основной системе трещин и характеризует направление наибольшего ослабления массива под углом к наслоению;

а) поверхность среза совпадает с контактами слоев; в этом
лае основание домкрата или плоскость гидроподушки распола-
ся диагонально к наслоению.

Линейные размеры призм составляют 0,6—1,2 *м* в зависимо-
от структуры массива и применяемого оборудования.

При расположении поверхности среза под углом к наслоению
змы таких размеров обычно охватывают несколько структур-
элементов (блоков) во всех направлениях, так что поверх-
ть среза включает ряд трещин и межтрещинных участков и
жет характеризовать сцепление в массиве в заданном направ-

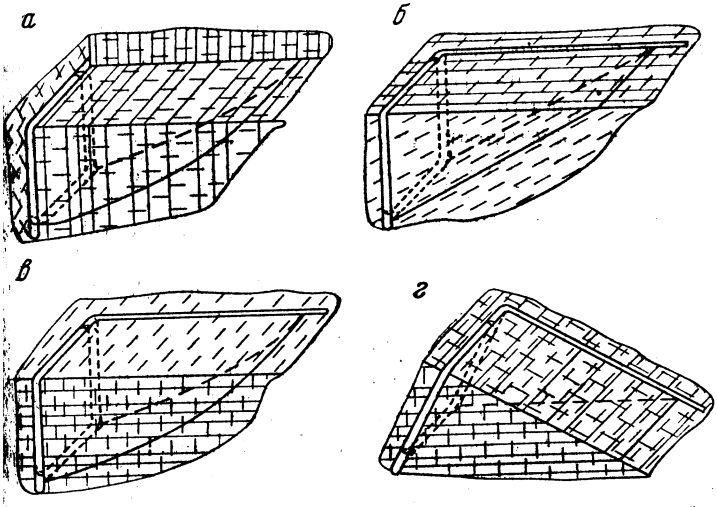


Рис. 44. Схема расположения призм натурных испытаний

нии. То же самое получается и при расположении поверхности
еза по наслоению — она достаточна по размерам, чтобы охарак-
ризовать сопротивление массива сдвигу по наслоению.

При испытаниях по схемам *а* и *в* (см. рис. 44) замеряются
сстояния между трещинами, или размеры кусков породы, огра-
ченных трещинами.

Одновременно с натурными испытаниями из призм отбира-
ся образцы для лабораторных испытаний, причем из каждой
измы испытывается по 4—6 образцов.

Нарезка призм в слабых породах производится кайлом и спе-
альными долотами, в аргиллитах — пневматическими отбой-
ми молотками, а в более крепких породах — электросверлами
и перфораторами. Нарезка призм электросверлами и перфора-
рами производится в следующем порядке: в плоскости оконту-
вающей поверхности пробуривается ряд параллельных шпу-
в, как можно ближе один к другому; затем пробуривается ряд
уров в этой же плоскости диагонально к основным шпурам

в одном и в другом направлениях; оставшиеся после этого столбики породы сбиваются вращающимся буром, при небольшом нажиме бура в сторону сбиваемых породных столбиков, или специальными долотами.

Особенно тщательно разделывается щель, в которую вставляется гидравлическая подушка. После зачистки щели в нее вставляется в сжатом виде гидроподушка, а пустоты между стенками щели и гидроподушкой засыпаются сухим мелким песком.

После этого трубкой насос соединяется с гидроподушкой и в нее нагнетается масло.

Призма считается срезанной, как только прекращается рост давления в подушке, фиксируемое манометром, или как только давление начинает падать. Одновременно наблюдают за появлением трещин в призме.

Обработка результатов натурных испытаний и получение характеристики прочности массива производятся в следующем порядке:

1) тщательно измеряют поверхность среза и определяют ее площадь S;

2) измеряют элементы залегания гидроподушки и плоскости среза и определяют между ними угол α;

3) определяют усилие P, действующее на плоскость среза и являющееся геометрической суммой веса призмы и усилия, развиваемого гидравлической подушкой и определяемого по формуле

$$P_1 = DtL, \tag{54}$$

где D — гидравлическое давление в подушке, *атм*;

t — коэффициент передачи давления подушкой, зависящий от конструкции подушки, ее размеров и величины раздува подушки при испытании (этот коэффициент устанавливается путем тарировки подушки под прессом);

L — площадь подушки;

4) определяют величины касательных и нормального напряжений по плоскости среза

$$\sigma_n = \frac{P}{S}\cos\alpha; \quad \tau = \frac{P}{S}\sin\alpha. \tag{55}$$

По величинам касательных и нормальных напряжений строится график зависимости $\tau = \psi(\sigma_n)$, по которому определяют ρ' и K'; если в параллельных испытаниях не удается достичь необходимой разности нормальных напряжений, то угол трения по поверхности среза определяется путем лабораторных испытаний или берется по табличным данным, а сцепление определяется по формуле

$$K = \frac{P}{S}(\sin\alpha - \operatorname{tg}\rho'\cos\alpha). \tag{56}$$

2. Коэффициент внутреннего трения горных пород в массиве

Из двух характеристик сопротивления сдвигу — сцепления и эффициента внутреннего трения — последняя является менее менчивой. По данным лабораторных испытаний, коэффициент утреннего трения твердых пород изменяется от 0,16 до 0,75 то соответствует углам $\rho = 9—37°$), в то время как величина епления изменяется от 0,2 до 700 *кГ/см²*. С другой стороны, при льших значениях напряжений внутреннее трение создает знательно большие силы сопротивления сдвигу, чем сцепление. Эти бстоятельства вызывают необходимость большей точности опреления величины коэффициента трения, чем сцепления.

Для определения коэффициента внутреннего трения с достаочной точностью даже для однородной породы необходимо провести не менее 4—6 испытаний на сдвиг при значительном инервале нормальных напряжений. Испытаниями в натурных услоиях практически невозможно установить с достаточной точностью оэффициент внутреннего трения, так как в этих условиях невозожно добиться значительной разности нормальных напряжений кроме испытаний по контактам слоев и по сплошным трещинам).

Для определения углов внутреннего трения массива пород небходимо сопоставить углы естественного откоса высоких отваков, углы внутреннего трения, полученные по лабораторным испыаниям на срез, и углы трения, полученные по лабораторным спытаниям на трение.

В табл. 11 приведены значения углов внутреннего трения некоорых пород, полученные по лабораторным испытаниям на срез,

Таблица 11

Значения углов внутреннего трения, естественного откоса и трения по поверхности кусков

Литологическое наименование породы	Угол внутреннего трения в куске, *град*	Угол естественного откоса, *град*	Углы трения по поверхности кусков, *град*			
			по неровным шероховатым	по ровным шероховатым	по ровным гладким	по поверхностям контактов между слоями
Песчаники	36	34—36	31	29	26	26
Алевролиты	33		—	28	23	23
Аргиллиты	27—30		26	—	20	19—21
Аргиллиты с зеркальной поверхностью скольжения	—	—	—	—	—	13
Известняки	34	33—35	—	—	—	—
Метаморфические сланцы	29					
Кварцевые порфиры и гранодиорит-порфиры	36					
Сиениты и порфириты	35	35	31	29	25	22

углы естественных откосов высоких отвалов и углы трения по поверхностям отдельных кусков, ограниченных трещинами и контактными поверхностями слоев.

Из табл. 11 видно, что угол трения по поверхности кусков зависит от гранулометрического состава пород и от ровности поверхности. По неровным шероховатым поверхностям угол трения лишь на 1—3° меньше, чем угол внутреннего трения, полученный по лабораторным испытаниям на срез. Учитывая, что поверхности скольжения пород в массиве, когда они не совпадают с поверхностями контактов между слоями, являются такими же неровными, как и при срезе в лабораторных условиях, можно принять угол внутреннего трения в массиве по поверхностям, пересекающим слои и не совпадающим со сплошными трещинами, равным углу внутреннего трения, полученному для данной породы по лабораторным испытаниям. Это положение подтверждается совпадением углов естественного откоса отвалов (когда угол откоса считается равным углу внутреннего трения среды) с величиной среднего угла внутреннего трения данного комплекса пород, полученного по лабораторным испытаниям.

Угол внутреннего трения по контактам слоев можно уверенно принимать равным углу трения, полученному по лабораторным испытаниям на трение по этим поверхностям.

В табл. 12 приведены значения углов трения по контактам слоев и трещинам некоторых пород.

Таблица 1

Углы трения по контактам слоев

Породы	Углы трения в зависимости от характера поверхности, *град*			
	неровные шероховатые	ровные шероховатые	неровные гладкие	ровные гладкие
Порфиры, роговики, джеспилиты, крепкие песчаники	28—31	24—28	22—27	20—26
Вторичные кварциты, гранодиориты, кварцевые порфиры, гранодиорит-порфиры, скарнированные породы, сиениты, диориты, алевролиты	25—28	22—25	20—23	17—20
Известняки, метаморфические сланцы, магнетиты	24—27	23—25	20—22	16—19
Глинистые сланцы, аргиллиты	23—26	21—23	18—20	15—18
Филлиты, тальк-хлоритовые и серицитовые сланцы	23—25	20—22	13—15	9—12

§ 3. Сцепление горных пород в массиве

Проведенными автором исследованиями установлено, что на величину сцепления в массиве влияет степень трещиноватости пород, а также размер и форма деформирующихся (разрушаемых)

локов (массивов) пород; для пород одних и тех же свойств и степени трещиноватости при увеличении размеров блоков обрушения величина сцепления уменьшается; то же наблюдается при увеличении степени трещиноватости пород в блоках одинаковых размеров. При достаточной однородности механических свойств массиве на значительном протяжении предельно напряженное состояние охватывает целую зону вблизи формирующейся поверхности скольжения; возникающее при этом поле касательных напряжений в зоне предельного состояния придает отдельным ограниченным трещинами блокам породы вращательное движение (рис. 45). Вследствие этого предельное состояние наступает при напряжениях, значительно меньших, чем было бы необходимо для среза пород по поверхности скольжения.

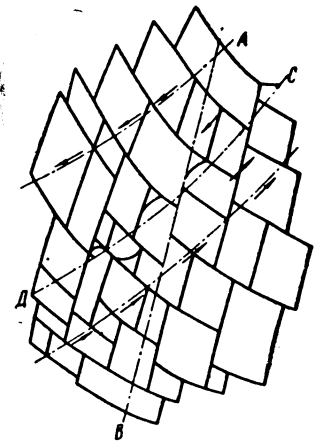


Рис. 45. Схема вращательного перемещения блоков в массиве трещиноватых пород

Величина зоны предельных напряжений зависит от величины деформирующегося массива (призмы обрушения) — чем больше призма обрушения, тем большую мощность имеет зона предельных напряжений, а поэтому тем больших размеров глыбы приобретают вращательное движение, в то время как при небольших размерах призмы обрушения крупные глыбы должны были бы быть перерезанными. Таким образом, становится ясным, почему предельные касательные напряжения с увеличением размеров призм обрушения уменьшаются.

Лабораторные испытания на срез и сжатие больших призм, составленных из большого числа прямоугольных и косоугольных цементных и гипсовых призмочек, показали, что вращательное перемещение элементарных призмочек в области поверхности скольжения возникает при появлении местного разрушения наиболее слабых призмочек. Более широко такие испытания были проведены в Уральском филиале ВНИМИ Д. Н. Ким [62].

Такой характер деформирования трещиноватого массива объясняет причину уменьшения сцепления для тех случаев, когда поверхность скольжения проходит под углом к наслоению и к трещинам, т. е. когда поверхности анизотропии не совпадают с плоскостью скольжения; если считать, что разрушение массива при сдвиге происходит по двухразмерной плоскости скольжения (не имеющей мощности), то для предельного состояния в этом случае необходимы были бы такие напряжения, при которых происходил бы срез всех пересекаемых этой плоскостью блоков породы, а сцепление в массиве было бы равным сцеплению в образце, что в трещиноватых породах не наблюдается.

Такой характер деформирования трещиноватого массива отно сится к тем случаям, когда поверхность скольжения не совпадае с ярко выраженными поверхностями ослабления, например с кон тактами слоев, дизъюнктивными нарушениями, сплошными тре щинами и др. При совпадении поверхности скольжения с поверх ностями ослабления происходит плоское скольжение пород по по верхностям ослабления и в этих случаях величина сцепления н зависит от размеров деформируемых массивов. Характер дефор мирования по трещинам, располагающимся ступеньками (н сплошным), а следовательно, и величина сцепления зависят о частоты и мощности межтрещинных участков, а также от вели чины напряжений и размеров призм обрушения.

Для поверхностей, не совпадающих с поверхностями ослабле ния, по результатам натурных испытаний установлена зависи мость между сцеплением в образце и в массиве, которая може быть выражена эмпирической формулой

$$K_м = \frac{K}{1 + a \ln \frac{H}{l}}, \qquad (57$$

где $K_м$, K — сцепление в массиве и в образце;

a — коэффициент, зависящий от прочности породы в мо нолитном (табл. 13) образце и характера трещино ватости;

$\frac{H}{l}$ — отношение высоты борта к среднему размеру эле ментарных блоков.

Таблица 1

Значения коэффициента a для различных пород

Группа пород	Наименование пород и характер трещиноватости	Величина сцепления в монолите, $кГ/см^2$	Величина коэффициента a
III	Слабоуплотненные и слаботрещиноватые песчано-глинистые отложения, сильно выветрелые полностью каолинизированные изверженные	4—9	0,5
	Уплотненные песчано-глинистые, в основном, нормальносекущей трещиноватости	10—20	2
II	Сильно каолинизированные изверженные	30—80	2
	Уплотненные песчано-глинистые с развитой кососекущей трещиноватостью, каолинизированные изверженные	30—80	3
	Средней крепости слоистые, преимущественно нормальносекущей трещиноватости	100—150 150—170 170—200	3 4 5
I	Крепкие, преимущественно нормальносекущей трещиноватости	200—300 >300	6 7
	Крепкие изверженные с развитой кососекущей трещиноватостью	>200	10

На сцепление в массиве прочность горных пород в образце влияет лишь до определенной ее величины, пока при вращательном перемещении блоков происходит их частичное разрушение (обламывание углов). При сцеплении в образце в пределах 120—150 $кГ/см^2$, по-видимому, такое разрушение прекращается и сцепление в массиве при дальнейшем увеличении прочности пород в образце существенно не возрастает.

По формуле (57) определяется сцепление по поверхностям, не совпадающим с поверхностями анизотропии, когда перемещение пород в зоне предельных напряжений происходит в виде вращения отдельных блоков, а не плоского скольжения.

По поверхностям ослабления при определенных условиях происходит плоское скольжение пород.

Условия плоского скольжения по поверхностям анизотропии определяются большей величиной сцепления в массиве в других направлениях, чем по этим поверхностям, и направлением напряжений, допускающим возможность скольжения по площадкам, параллельным поверхностям ослабления (см. гл. I).

Сцепление в массиве при любой величине деформируемого массива практически остается больше величины сцепления по контактам слоев, вследствие чего контакты между слоями реализуются в поверхности скольжения во всех случаях, когда угол между контактом и направлением σ_1 лежит в пределах α_1 и α_2, определяемых по формулам (14) и (15), при любых размерах деформирующегося массива; то же самое можно сказать и относительно сплошных трещин и дизъюнктивных нарушений.

Величины сцепления по контактам слоев некоторых пород приведены в табл. 14.

Таблица 14

Значения сцепления по контактам слоев

Характеристика поверхностей ослабления	Характеристика толщи	Величина сцепления, $T/м^2$
Поверхности скольжения по контактам слоев	Дислоцированная осадочная толща	2—5
Контакты слоев	Неуплотненная недислоцированная слаборассланцованная осадочная толща	50% от сцепления под углом к наслоению
Контакты слоев	Уплотненная слаборассланцованная осадочная толща	10—18
Контакты слоев	Метаморфизованная осадочная толща	5—10
Сплошные неровные трещины и тектонические нарушения	Массивы изверженных и метаморфических пород	5—10

Поверхности, параллельные несплошным трещинам, проявляют свойства поверхностей ослабления (по которым происходит плоское скольжение) лишь при небольшой высоте откосов, когда

влияние взрывных работ на дробление пород в откосах проявляется в большей степени; например, в уступах, не подвергавшихся специальной заоткоске, несплошные трещины проявляются как поверхности ослабления, по которым может происходить обрушение откосов.

Изложенное воззрение на характер перемещения пород в зонах предельных напряжений и на зависимость сопротивления сдвигу массива горных пород от степени его трещиноватости и от его размеров может дать полезные результаты при решении вопроса об устойчивости бортов и ряда других горнотехнических задач, как, например, при расчете междукамерных целиков, параметров блоков обрушения, горного давления на крепление горизонтальных и вертикальных выработок и т. п.

Полученная эмпирическая зависимость между сцеплением в образце и в массиве не является единственной и исчерпывающей этот вопрос.

В 1955 г. С. И. Поповым [114] была предложена таблица переходных коэффициентов от сцепления в образце к сцеплению в массиве в зависимости от степени трещиноватости. По нашему мнению, в некоторых случаях по этой таблице получаются завышенные величины сцепления в массиве. По формуле, рекомендуемой нами, сцепление в массиве, по-видимому, получается на 20—30% меньше действительных, но из-за недостаточной изученности этого вопроса с дополнительными коэффициентами запаса в настоящее время приходится согласиться. Дальнейшие исследования этого вопроса позволят уточнить характер зависимости между сцеплением в образце и в массиве для каждой конкретной горнотехнической задачи.

§ 4. Сопротивление сдвигу трещиноватых глин

Довольно часто глины имеют скрытую трещиноватость, вследствие чего их сопротивление сдвигу в массиве оказывается значительно меньше, чем в образце.

Трещиноватостью обладают: делювиальные глины, пластичные глины в толще континентальных отложений, глины в районе действия ледников и древних оползней. Во всех этих случаях трещиноватость глин связана с их пластическими деформациями под влиянием неравномерных напряжений, испытанных глинами в различные периоды их формирования. Однако встречается трещиноватость в слоях пластичных глин морского происхождения, не подвергавшихся ранее воздействию неравномерных напряжений; например, трещиноватыми оказались келловейские глины Михайловского месторождения КМА, киловые глины Камышбурунского железорудного месторождения, глины Подмосковного угольного бассейна и др. Трещиноватыми являются элювиальные глины; трещиноватость этих глин является следствием трещиноватости коренных пород, из которых они образовались.

Трещиноватые глины имеют неодинаковое сопротивление двигу даже в образце — по периферии блоков, ограниченных рещинами, влажность глины выше, а сопротивление сдвигу еньше, чем в ядре блока.

При испытании глин на сдвиг обычно за расчетную величину ерут средние значения ряда испытаний; для трещиноватых глин ри таком определении расчетных характеристик получают завы-ленные величины сопротивления сдвигу, так как при приложении асательных напряжений деформация трещиноватых глин в мас-иве происходит по контактам между блоками, представленными оверхностями скольжения или разрыва и имеющими повышен-ую влажность.

Для определения сопротивления сдвигу массива этих глин не-бходимо производить натурные испытания на сдвиг больших ризм, оконтуренных в местах их залегания, или принимать за асчетную величину сопротивления сдвигу в массиве сопротив-ение повторному сдвигу по ранее срезанной поверхности; влаж-ость глин по этой поверхности должна быть равна влажности их периферийных частях блоков, ограниченных трещинами.

Таблица 15

Сцепление трещиноватых глин

Наименование глин и характеристика их трещиноватости	Месторождения	Влажность, %	Сцепление в образце, $T/м^2$	Сцепление по натурным испытаниям, $T/м^2$
Делювиальные глины, трещиноватость неупорядоченная	Зыряновское полиметаллическое	20,0	14,8	7,7
Слабый глинистый песчаник, трещины нормальносекущие	Богословское буроугольное	18,5	17,8	5,3
Слабый алевролит, трещины нормальносекущие	То же	19,0	36,5	10,2
Глина гидрослюдистая жирная чечевидной структуры	Ермолаевское буроугольное	27,0	12,0	4,5
Мергельная глина зеленовато-серая, трещины нормальносекущие	Никопольское марганцевое	26,0	8,0	3,8
Мергельная глина светло-серая, трещины нормальносекущие	То же	22,0	20,0	8,5
Мергельная глина плотная, трещины нормальносекущие	„ „	47,0	29,0	7,4
Глина песчаная слоистая	Усть-Брынкино (Боровичи)	20,0	8,8	4,0
Глина черная сланцеватая, трещины нормальносекущие	Никопольское марганцевое	41,0	23,0	9,0
Глина красно-бурая загипсованная	То же	28,0	11,5	6,2
Мел нормальносекущей трещиноватости	Лебединское (КМА)	26,5	14,5	6,3
То же	То же	28,0	11,8	5,3
Лессовидный суглинок однородный	„ „	18,0	7,5	7,2

При деформации в откосах ограниченные трещинами блок глин вследствие небольшой их прочности, в меньшей степени, че блоки твердых пород, подвержены вращательному перемещени поэтому их сопротивления сдвигу в массиве в меньшей степен чем у твердых пород, зависят от интенсивности трещиноватости.

Сцепление трещиноватых глин, полученное по натурным испы таниям, можно принимать за расчетную величину сцеплени в массиве. Некоторые данные о величинах сцепления в масси глин приведены в табл. 15.

§ 5. Определение характеристик сопротивления сдвигу в массив по съемке обрушений и оползней

Более точное определение механических характеристик горны пород в массиве производится по результатам маркшейдерско съемки участков естественных и искусственных обрушений.

Теоретическое обоснование этого способа вытекает из того п ложения, что при боковом обнажении открытой горной выраб кой массив горных пород удерживается в равновесии сила сцепления и трения, действующими по наиболее слабой повер ности. Сумма сил, удерживающих массив в момент обрушени равна сумме сил, сдвигающих его:

$$\sum_1 T_i = f \sum_1 N_i + kL. \qquad (58)$$

После обрушения массива, когда силы сцепления по наибол слабой поверхности перестают действовать, установление нов равновесия обрушившихся масс наступает тогда, когда сумма ка сательных сил уравнивается силами трения

$$\sum_2 T_i = f \sum_2 N_i. \qquad (59)$$

По равенству (59) определяется коэффициент внутреннего трения пород, а после подстановки f в равенство (58) определяется величина сцепления k. При расчете сцепления необходимо брать величину поверхности скольжения без включения трещины отрыва, часто образующейся в верхней части обрушающегося массива. Этот способ позволяет определять основные характеристики в том случае, когда обрушение по простиранию выемки имеет длину, превышающую в 2—3 раза высоту откоса.

Если уровень грунтовых вод располагается над поверхностью скольжения, то в формулы (58) и (59) вводится гидростатическое давление так же, как оно вводилось при оценке устойчивости обводненных откосов связных пород (см. гл. III).

Изложенный порядок применяется при определении характеристик сопротивления сдвигу твердых и слабосвязных песчаных или гравийных пород, у которых после обрушения сопротивление сдвигу определяется только коэффициентом внутреннего трения.

Мягкие глинистые породы после обрушения сохраняют по поверхности скольжения также и некоторое сцепление, величина которого составляет около 1,5—2 $T/м^2$; кроме того, у мягких глинистых пород по поверхности скольжения имеется значительное поровое давление. Поэтому разделение сопротивления сдвигу на силы трения и силы сцепления у этих пород оказывается затруднительным и лучше определять среднее сопротивление сдвигу по поверхности скольжения до оползня и после, разделив сумму касательных сил на площадь поверхности скольжения.

Глава X

СОПРОТИВЛЕНИЕ СДВИГУ ГОРНЫХ ПОРОД В ОТВАЛАХ

§ 1. Отвалы твердых и несвязных пород

Твердые горные породы в отвалах характеризуются коэффициентом внутреннего трения, равным тангенсу угла естественного откоса.

Коэффициент внутреннего трения массива твердых пород в отвалах зависит от формы обломков и коэффициента трения по их поверхности.

Только в откосах относительно небольшой высоты раздробленные твердые горные породы имеют некоторое зацепление, проявляющееся как сцепление; на наличие этого сцепления-зацепления указывает то, что в этих породах при небольшой высоте наблюдаются откосы, близкие к вертикальным.

В табл. 16 приведены некоторые данные об углах естественных откосов отвалов твердых пород.

Таблица 16

Углы откосов отвалов твердых пород

Характеристика отвалов	Высота отвалов, *м*	Углы естественных откосов, *град*
Внешние отвалы угленосных пород	8—16	35—38
Отвалы тех же пород после 3—4 лет	9—11	32—36
Отвалы внутренней вскрыши (Коркино)	20—30	34—37
Терриконики	30—50	34—37
Известняки и метаморфические сланцы (Алтын-Топкан)	До 50	33—35
Сиениты и порфириты (Гороблагодать)	До 30	32—35
Откосы хлоритовых сланцев	4—5	27—29

Некоторое изменение углов естественного откоса свежеотсыпанных отвалов связано со способом отвалообразования, общей высотой отвала и крупностью блоков. Углы откосов крупноблоко-

вых пород при высоте до 10 *м* достигают 42—45°, в нижней части высоких отвалов, вследствие разлета обломков, углы откоса выполаживаются до 25—30°. Откосы старых отвалов выветривающихся пород выполаживаются до 30—32°.

§ 2. Отвалы мягких пород

Мягкие породы: глины, суглинки, глинистые пески и др. при перемещении в отвалы теряют естественное сцепление, затем под влиянием веса вышележащей толщи, уплотняясь, снова приобретают какое-то сцепление, зависящее от физических свойств пород отвала и от его высоты. При некоторой высоте отвала влажных пород их уплотнение достигает такого состояния, при котором они переходят в двухфазную среду (минеральные частицы и вода); дальнейшее уплотнение может происходить лишь при отжиме воды из области высоких напряжений в область более низких напряжений (где большей частью еще сохранилось состояние трехфазной среды), при этом развивающееся внутреннее поровое давление снижает силы трения, что проявляется как уменьшение сил внутреннего трения. Поэтому рыхлые горные породы в отвалах не могут характеризоваться постоянными величинами ρ и k. При небольшой высоте отвалов (на поверхности откосов) породы характеризуются только углом внутреннего трения, близким к углу естественного откоса, с удалением от поверхности сцепление постепенно возрастает при постоянном значении угла трения, а еще глубже (в области двухфазного состояния) внутреннее трение уменьшается.

В табл. 17 приведены величины сцепления отвальных пород ряда месторождений, полученные по данным лабораторных испытаний на срез образцов, уплотняющихся в каждом испытании под одними и теми же нагрузками.

Таблица 17

Сцепление отвальных пород

Порода	Величина сцепления в зависимости от уплотняющей нагрузки, *кГ/см²*				
	2,5	5,0	7,5	10,0	12,5
Суглинок	0,8	1,2	—	1,5	2,3
Бурая глина	0,9	1,6	—	3,2	—
Серая глина (гидрослюды)	2,1	2,6	3,0	3,4	3,7
Желтая песчаная глина	0,9	1,5	—	2,5	3,5
Каолиновая глина	1,1	1,7	2,3	2,8	3,3

В различных точках отвала уплотняющие нагрузки различны, а следовательно, различны их плотность, сцепление и общее сопротивление сдвигу.

На рис. 46 представлены графики сопротивления сдвигу по испытаниям О. Ю. Крячко [69] отвальных горных пород различного состава и влажности, уплотненных под различными нагрузками.

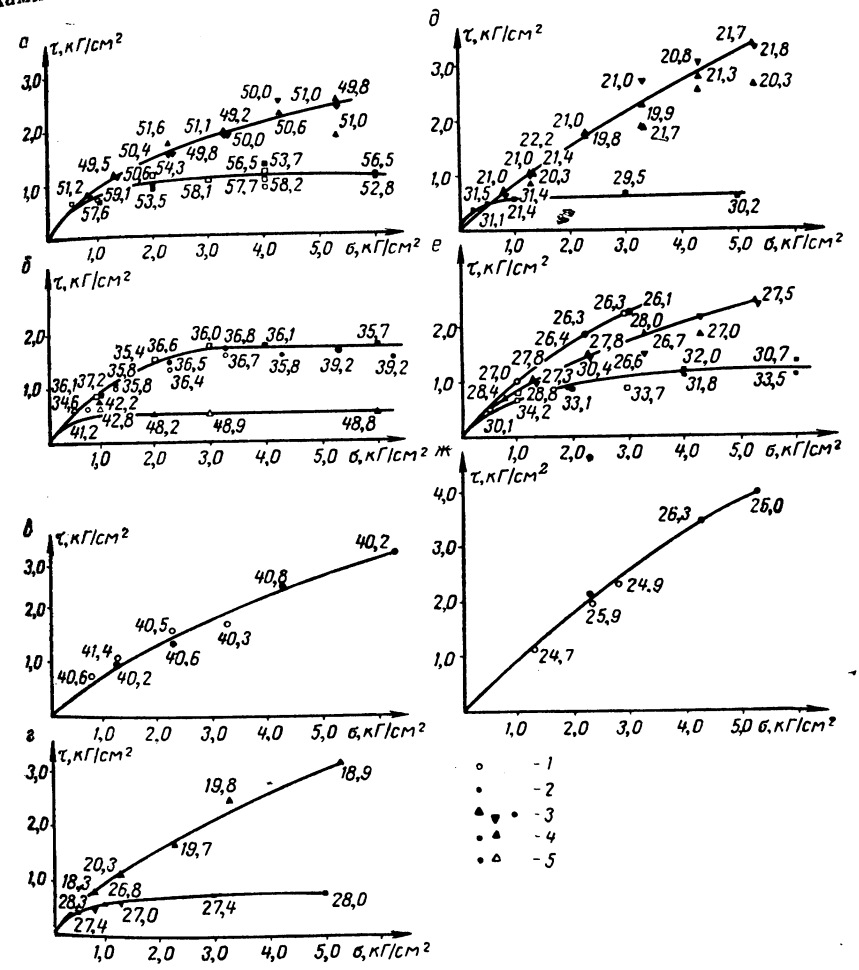


Рис. 46. Графики сопротивления сдвигу глинистых пород в отвалах:
а — глина темно-серая пластичная; *б* — глина пластичная пестроцветная; *в* — глина черная сланцеватая; *г* — суглинок лёссовидный; *д* — глина зеленовато-серая пластичная; *е* — глина бурая трещиноватая тугопластичная; *ж* — глина мергельная, комковатая; цифрами 27 и т. д. обозначена влажность пород

В тех случаях, когда в отвал отсыпаются одновременно или последовательно породы различного литологического наименования и различных физико-механических свойств, перед испытаниями на сдвиг необходимо установить характер их распределения в отвале.

Если породы отсыпаются раздельно наклонными слоями, то необходимо производить испытания на сдвиг каждой разновидности раздельно, если же в процессе отсыпки происходит перемешивание пород, то необходимо устанавливать, в какой пропорции располагаются породы в различных частях откоса по высоте и в такой же пропорции составить смеси этих пород для лабораторных испытаний. Испытания смесей производятся в той же последовательности, как и испытания отдельных литологических разностей.

Основным требованием к испытаниям на сдвиг отвальных пород является полное исключение отжима воды в процессе испытания. Сопротивление сдвигу при минимальном напряжении, вызывающем высачивание воды, следует считать максимальным.

Сопротивление сдвигу мягких пород в отвалах зависит также от степени разрушенности структуры, зависящей от способа отвалообразования. При отсыпке с высоко поднятой консоли отвального моста песчаные глины имели сопротивление сдвигу в два раза меньше, чем в отвалах таких же пород, отсыпаемых из автомобилей.

После возникновения оползней отвалов с автомобильным и железнодорожным транспортом по поверхности скольжения происходит полное разрушение структуры, и сопротивление сдвигу по этим поверхностям в 1,5—2 раза снижается.

§ 3. Изменение сопротивления сдвигу отвальных пород

На устойчивость откосов отвалов так же, как и на устойчивость откосов естественной структуры, большое влияние оказывает изменение сопротивления сдвигу под влиянием различного рода факторов.

Решающее влияние на сопротивление сдвигу оказывает влажность пород (см. рис. 46). Наблюдения показывают, что часто влажность пород в отвалах оказывается значительно больше естественной. Источниками дополнительного увлажнения пород являются: атмосферные и грунтовые воды, скапливающиеся на рабочих площадках уступов, когда их сток не организован, атмосферные и грунтовые воды, скапливающиеся во впадинах основания отвалов, а также воды атмосферных осадков, выпадающих на поверхность отвалов.

Рассмотрим более подробно изменение влажности мягких пород в отвалах.

При уплотнении отвалов двухфазное состояние прежде всего наступает в нижней их части, при этом если основание отвалов представлено неводонасыщенной пористой средой, то нижняя часть отвала отдает воду основанию, а выше располагается водонасыщенная зона с поровым давлением; если основание не поглощает воду, то наибольшее поровое давление возникает в основании отвалов, а кверху оно уменьшается.

После появления уплотненной зоны пород отжимающаяся вверх да из уплотненной зоны, а также фильтрующаяся дождевая да стекает в сторону поверхности откоса и на границе с уплотнной зоной увеличивается влажность пород, чему способствует личие макропор.

Увеличение влажности приводит к сокращению сопротивления вигу и может привести к оползням при достижении предельной соты отвала.

Проведенное разбуривание оползневых участков отвалов на евченковском карьере (Никопольский марганцевый бассейн) и Михайловском карьере КМА показало, что на границе с зоной ухфазного состояния влажность пород близка к пределу текусти.

Особенно большое влияние атмосферные осадки оказывают на тойчивость отвалов пылеватых глин и песков. Пылеватые пески глины нарушенной структуры в водонасыщенном состоянии хаактеризуются весьма низкими сцеплением и коэффициентом внуреннего трения.

При наличии вибрации (например, при отсыпке пород с отвалього моста) породы близки к состоянию тиксотропного разжижеия и располагаются под углом 14—15°.

Старые отвалы пылеватых песков и глин с течением времени подвергаются полному насыщению водой и вследствие высокой пористости могут переходить в состояние тиксотропного разжижеия и создавать катастрофические по своим последствиям оползни — оплывины.

Отвалы твердых пород с течением времени, подвергаясь выветриванию, уплотняются, цементируются продуктами выветривания и приобретают значительное сцепление, не теряя внутреннего трения.

§ 4. Физико-механические свойства пород, являющихся основанием отвалов

Большое влияние на устойчивость отвалов оказывают физико-механические свойства пород, являющихся основанием отвалов.

У пород, слагающих основание отвалов, изучают те же свойства и характеристики, что и у пород естественной структуры: слоистость, влажность, пористость, водонасыщенность, сопротивление сдвигу, предел ползучести и фильтрационные свойства.

При отсыпке внешних отвалов неустойчивым основанием являются торфяники, заболоченные участки рельефа, а также просто увлажненные пониженные участки рельефа.

В гористой местности увлажненные участки склонов связаны с наличием родников и трещинных вод, подпертых чехлом рыхлых отложений.

Неустойчивыми являются основания внутренних отвалов, сложенные слоистыми породами, пластичными глинами или песчано-

глинистыми породами при наличии напорных вод. При напорных водах в подошве отвалов песчано-глинистые породы основания внутренних отвалов подвергаются набуханию и разупрочнению.

На устойчивость отвалов мягких пород большое влияние оказывают фильтрационные свойства основания.

Песчаные основания, а также основания, представленные ракушняком и другими высокопористыми породами, предотвращают возникновение порового давления в нижнем слое отвалов, непосредственно налегающего на фильтрующее основание, и в значительной степени снижают поровое давление в вышележащих слоях. При отсутствии порового давления сопротивление сдвигу глинистых пород возрастает в 2—3 раза.

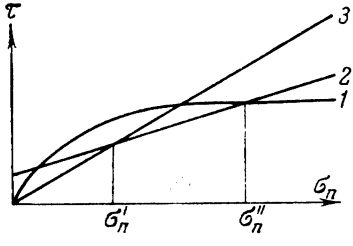


Рис. 47. Соотношение между сопротивлением сдвигу отвальных пород (*1*) и пород основания отвалов, представленного сланцевыми глинами (*2*) и песками (*3*)

При оценке сопротивления сдвигу по контакту между отвалом и его основанием необходимо сравнивать сопротивление при различных нормальных напряжениях пород основания отвалов, отвальных пород и контакта между ними и на каждом участке принимать минимальное сопротивление сдвигу. Сказанное иллюстрируется рис. 47, на котором изображены три линии предельных состояний отвальных пород и пород основания отвалов, представленных тонким слоем сланцеватых глин, ниже которых залегает слой песков. Поверхность скольжения в основании отвалов при нормальном напряжении до величины σ'_n пойдет по слою песков, а при значениях напряжений от σ'_n до σ''_n по сланцеватым глинам, при напряжениях более σ''_n — по отвальным породам. Сам контакт отвальных пород и основания, по-видимому, чаще всего будет оказывать сопротивление сдвигу несколько более высокое, чем сами контактируемые породы, например непосредственный контакт между песками и глинами имеет сопротивление сдвигу более высокое, чем сами эти породы.

Глава XI

ПРИБОРЫ И МЕТОДЫ ИЗУЧЕНИЯ СОПРОТИВЛЕНИЯ СДВИГУ

§ 1. Приборы для лабораторных испытаний на срез

Лабораторные испытания образцов горных пород на срез производятся:

а) в обычных одноплоскостных рычажных срезных приборах верхней подвижной коробкой, имеющих площадь плоскости еза 20, 40 и 120 *см*²;

б) в приборах на косой срез с площадью плоскости среза 16, , 70 и 94 *см*².

Особенностью рычажных срезных приборов является наличие ех пластинок, вделанных в основания срезных коробок и выступающих на 4—5 *мм* (рис. 48); этими пластинками передается асть сдвигающих сил и тем самым уменьшается концентрация апряжений на краях срезных коробок. При испытаниях на срез ластичных глин без этих пластинок наблюдалось перетекание грунта из области высоких напряжений в область пониженных напряжений в то время, огда по плоскости среза напряжения еще не достигали предельных. Особенно большие поехи пластические деформации местах приложения касательных усилий создают при определении предела ползучести в срезных приборах.

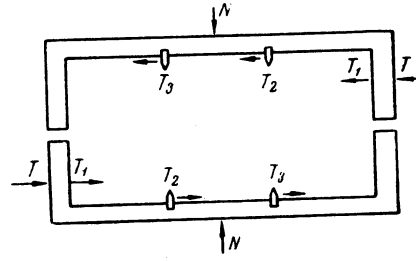


Рис. 48. Схема коробки срезного прибора

Двухтонный срезной прибор с площадью плоскости среза 120 *см*² используется для испытания на срез гравелистых грунтов и отвальных пород, а также для определения коэффициента тре- ния по контактам слоев и по трещинам (рычажная система этого же прибора используется для компрессионных испытаний при удельных нагрузках до 100 *кГ/см*²).

Для испытания на срез водонасыщенных отвальных пород инж. О. Ю. Крячко сконструировал срезной прибор с площадью плоскости среза 550 *см*². Нормальные и касательные силы, достигающие 5 *т*, создаются винтовыми домкратами и измеряются динамометрами ДС-5.

Приборы для испытаний на косой срез плотных глин и твердых пород имеют ряд конструктивных вариантов.

Первые испытания на косой срез проведены были автором в 1951 г. [173] на клиновых приборах для образцов прямоугольной формы размером 15×10×10 *см*³; для исключения трения между матрицами прибора и прессом была применена обойма роликов. Между верхней и нижней матрицами оставалась щель шириной в 2—3 *мм*.

Торцовые и боковые поверхности образцов в этих испытаниях закрывались стальными пластинками. Образец, таким образом, оказывался в состоянии всестороннего сжатия и только узкая полоска образца шириной 2—3 *мм* находилась в плоском напряженном состоянии; влияние щели, как это вытекает из теории упругости [145], распространялось не далее 2—3 *мм* от открытой

поверхности образца. В приборах на косой срез обеспечивает так называемое простое нагружение, характеризующееся тем, что по мере роста напряжений соотношение между касательными и нормальными напряжениями не изменяется.

Применение цилиндрических вкладышей позволило производить испытания на косой срез цилиндрических образцов, изготовляемых из керна.

В 1953 г. Е. И. Ильницкой был сконструирован и применен прибор на косой срез другой конструкции [55].

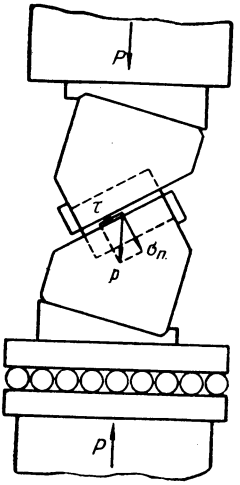


Рис. 49. Схема прибора на «косой срез» цилиндрических образцов

В этом приборе изменение угла наклона плоскости среза достигалось путем поворота круговой матрицы.

Боковые грани образца в этом приборе оставались открытыми и условия всестороннего сжатия не обеспечивались.

Этот же недостаток сохранялся и в приборе К. В. Руппенейта [145].

В 1957 г. во ВНИМИ был сконструирован прибор на косой срез с поворотной матрицей, однако при испытаниях крепких образцов с нагрузкой до 200 *т* эта конструкция прибора оказалась менее удобной, чем клиновые приборы. На рис. 49 изображен применяемый нами прибор для испытания цилиндрических образцов крепких пород, выдерживающий общую нагрузку до 200 *т*; площадь плоскости среза составляет $5{,}4 \times 7 = 37{,}8$ *см*², а набор цилиндрических вкладышей позволяет уменьшать ее до 16 *см*², величина напряжения σ_1, развиваемая этим прибором, достигает 20 тыс. *кГ/см*².

Измерение деформации образца по плоскости среза осуществляется обычным мессуром с ценой деления 0,01 *мм*.

§ 2. Приборы на трехосное сжатие

Отечественные приборы на трехосное сжатие грунтов (стабилометры) характеризуются большой сложностью испытаний или небольшими величинами допустимых напряжений.

Автором был сконструирован и изготовлен в мастерских ВНИМИ стабилометр (рис. 50) простой конструкции, позволяющий развивать боковое давление до 30 *кГ/см*², а осевое давление до 80 *кГ/см*².

Боковое давление осуществляется жидкостью, нагнетаемой в прозрачный стакан гидравлическим насосом или сжатым воздухом от баллона, соединенного с резервуаром, наполненным жидкостью. Осевое давление создается винтовым прессом и измеряется динамометрами ДС-1 или ДС-02. Для устранения добавочного

бокового давления от трения срезаемого образца о верхнюю плиту, передающую осевое давление на образец, между плитой и образцом укладывается шариковая постель. В стабилометре испытываются образцы цилиндрической формы длиной 108 *мм* и диаметром 54 *мм*.

Наличие шариковой постели способствует тому, что при разрушении образца не возникает его бочкование, а происходит срез по наклонным плоскостям (рис. 51), при этом в однородных образцах возникает ряд таких плоскостей, подобных линиям Людерса-Чернова при испытании металлических стержней.

При испытаниях на трехосное сжатие без шариковой прокладки осевая нагрузка возрастает. Это происходит из-за увеличения нормального напряжения по плоскости среза за счет силы трения по торцам образца. За счет возрастания трения по поверхности штока, передающего осевую нагрузку, вследствие прижатия штока к втулке при появлении деформации сдвига [14], осевая нагрузка возрастает на 1—3%.

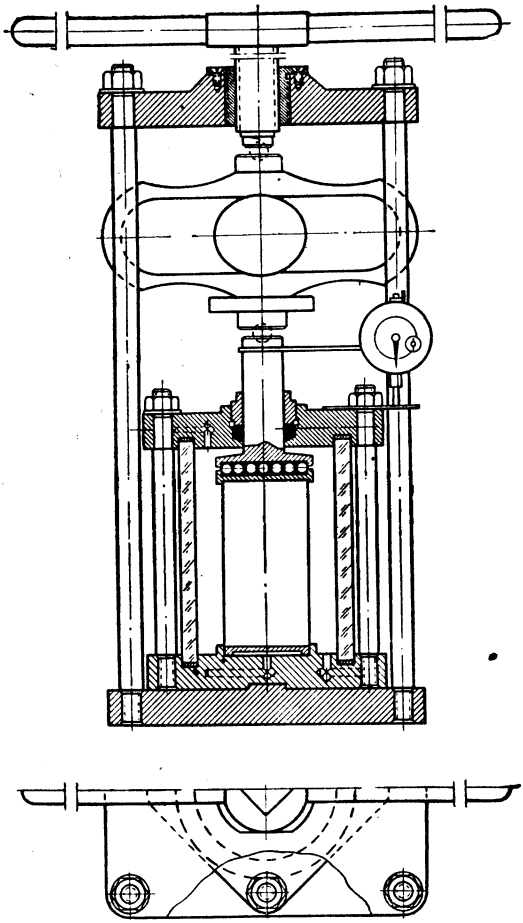


Рис. 50. Схема стабилометра ВНИМИ для испытания слабых пород

Разрушение высоких образцов при всестороннем сжатии, в зависимости от заделки их торцов, может иметь следующие виды (рис. 52).

а. При обеспечении возможности относительного бокового перемещения торцовых частей образца, возникающего при деформации сдвига по наклонной плоскости, в образце не возникает никаких дополнительных напряжений по плоскости сдвига, кроме тех, которые создаются боковым и осевым нагружением образца и определяются по формулам

$$\sigma_n = \sigma_1 \sin^2 \alpha + \sigma_2 \cos^2 \alpha; \quad \tau = \frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_2) \sin 2\alpha.$$

Осевое напряжение с характеристиками прочности связа зависимостью

$$\sigma_1 = 2K \operatorname{ctg}\left(45^\circ - \frac{\rho}{2}\right) + \sigma_2 \operatorname{ctg}^2\left(45^\circ - \frac{\rho}{2}\right).$$

б. Если образцы сжимаются между пуансонами, не имеющи относительного перемещения, и между образцом и пуансон имеется трение, характеризующееся углом γ, то при появлен

Рис. 51. Вид образцов глин, срезанных в стабилометре ВНИМИ

деформации сдвига по наклонной плоскости относительному бок вому перемещению двух частей образца, разделенных этой пло костью, препятствует сила трения, развивающаяся между обра

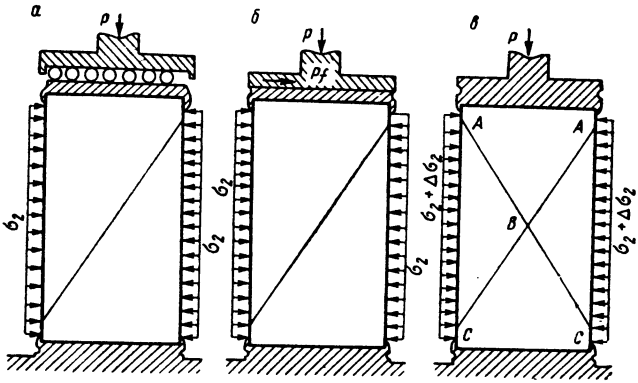


Рис. 52. Схемы сил при испытании образцов на трехосное сжатие:

а — при наличии по торцам шариковой прокладки; *б* — при наличии трения по торцам; *в* — при жесткой заделке торцов

цом и пуансонами. Трение по торцам создает дополнительное бо ковое давление, вследствие чего осевое напряжение, необходимо для разрушения образца по плоскости, возрастает до величины определяемой зависимостью

$$\sigma_1 = 2K \operatorname{ctg}\left(45^\circ - \frac{\rho + \gamma}{2}\right) + \sigma_2 \operatorname{ctg}^2\left(45^\circ - \frac{\rho + \gamma}{2}\right). \quad (60$$

в. При жесткой заделке образцов в соосно жестко центрированные пуансоны деформации образца по плоским поверхностям оказываются невозможными вследствие того, что относительному боковому перемещению частей образца препятствует их жесткая заделка; деформирование и разрушение цилиндрических образцов происходит по коническим поверхностям, основанием которых являются основания образцов; образующееся при этом кольцо сечением ABC (рис. 52) испытывает растягивающие напряжения и создает дополнительное боковое давление, суммирующееся с боковым давлением, создаваемым жидкостью.

Площадь поверхности каждого конуса равна площади плоской поверхности сдвига при первом виде разрушения, но вследствие возросшего бокового давления осевое давление, необходимое для разрушения образца, возрастает до величины, определяемой формулой

$$\sigma_1 = 2K \operatorname{ctg}\left(45^\circ - \frac{\rho}{2}\right) + (\sigma_2 + \Delta\sigma_2) \operatorname{ctg}^2\left(45^\circ - \frac{\rho}{2}\right). \qquad (61)$$

Величина $\Delta\sigma_2$ равна половине сопротивления горной породы растяжению

$$\Delta\sigma_2 = \frac{1}{2}\sigma_p.$$

Если $\sigma_p = 0{,}1\sigma_0$, а $\rho = 30^\circ$, то

$$\sigma_1 = \sigma_0 + \left(\sigma_2 + \frac{1}{20}\sigma_0\right) \operatorname{ctg}^2\left(45^\circ - \frac{\rho^\circ}{2}\right)$$

или

$$\sigma_1 = \sigma_0 + \sigma_2 \operatorname{ctg}^2\left(45^\circ - \frac{\rho}{2}\right) + 0{,}15\sigma_0,$$

где

$$\sigma_0 = 2K \operatorname{ctg}\left(45^\circ - \frac{\rho^\circ}{2}\right).$$

При испытании образцов на одноосное сжатие между соосно-закрепленными давильными шероховатыми плитами осевое давление возрастает на 15—20% по сравнению с сопротивлением сжатию между подвижными давильными плитами или при установке образцов на роликовую постель (рис. 58).

При жестко центрированных пуансонах происходит бочкование образцов, разрушение их часто происходит по коническим поверхностям.

Канд. техн. наук Б. В. Матвеевым и инж. Ю. М. Карташевым разработаны две модели стабилометров [85], позволяющие испытывать: в стабилометре КП-1 образцы диаметром 36 *мм* при осевом давлении до 500 *кГ/см*² и при боковом до 150 *кГ/см*², а в стабилометре КП-3 образцы диаметром 30 *мм* при осевом давлении до 2500 *кГ/см*² и при боковом до 500 *кГ/см*².

Канд. техн. наук А. Н. Ставрогиным разработана гидравлическая установка пропорционального нагружения (ГУПН), позволяющая развивать гидростатическое давление до 10 000 *кГ/см²*.

Стабилометры высокого давления Б. В. Матвеева и ГУПН А. Н. Ставрогина имеют один из пуансонов со сферической опорой, которая, по-видимому, не исключает полностью дополнительное боковое давление, возникающее при сдвиге по плоскости, наклоненной к оси образца.

§ 3. Оборудование для натурных испытаний на срез

Для натурных испытаний на срез больших призм, оконтуренных в массиве, применялись: гидравлические домкраты ДГ-100 и ДГ-200 заводского изготовления, развивающие давление в 100 и 200 *т*; облегченный гидравлический домкрат, развивающий давление до 100 *т*, сконструированный А. М. Мочаловым (рис. 53) и изготовленный мастерскими ВНИМИ; плоские гидравлические подушки (рис. 54) и давильные установки, развивающие давление до 400 *т*, представляющие собой ряд гидравлических цилиндров (4—8), установленных между двумя жесткими стальными плитами.

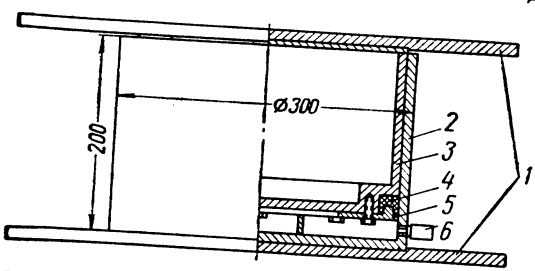


Рис. 53. Гидравлический домкрат конструкции А. М. Мочалова для натурных испытаний: *1* — плиты; *2* — внешний цилиндр; *3* — поршень; *4* — манжета; *5* — кольцо; *6* — штуцер

Гидравлические подушки изготовляются из листовой меди толщиной 1,5—2,0 *мм*, они бывают с жестким основанием или простые.

Простые гидравлические подушки (рис. 54) предложены Я. А. Бичем для испытаний упругих свойств угля и применены Н. Н. Куваевым для натурных испытаний на срез. Они представляют собой два медных листа с отогнутыми краями, сваренные вместе.

Недостатком гидравлических подушек является то, что они не обеспечивают равномерного распределения напряжений по всей поверхности контакта с горной породой — по периферии напряжения меньше, в середине больше. Этот недостаток особенно ощутим при небольших размерах гидравлических подушек. Кроме того, при неодинаковой прочности пород в контакте с подушкой происходит неравномерное деформирование срезаемой призмы и возникают местные разрушения слабых пород и распирание более прочных слоев, в результате чего призма не срезается по заданной поверхности, а раздавливается.

Для исключения этих недостатков были сконструированы гидравлические подушки с жестким основанием (рис. 54), представ-

ляющие собой две стальные пластины толщиной 8—10 *мм*, соединенные между собой медным листом в форме гармоники. Однако гидроподушки этой конструкции имеют скрытый внутренний сварной шов, при появлении течи в котором гидравлическая подушка оказывается непригодной к работе и исправить ее невозможно. Более надежной является простая гидравлическая подушка с накладными стальными плитами (рис. 54), которая нашла широкое применение для подобных работ.

Гидравлическими подушками площадью 40×60 *см* можно создавать давление до 120—150 *т*. Небольшая допустимая высота

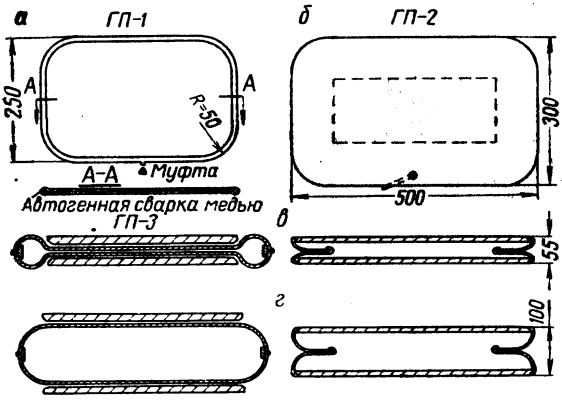


Рис. 54. Гидравлические подушки для натурных испытаний:

а — простые гидроподушки; *б* — то же, с жестким основанием; *в* — то же, в сжатом положении; *г* — то же, при максимальном раздуве

раздува (не более 60 *мм*), определяющая величину максимальной деформации срезаемой призмы и опорной части массива, ограничивает их применение только для испытания твердых пород.

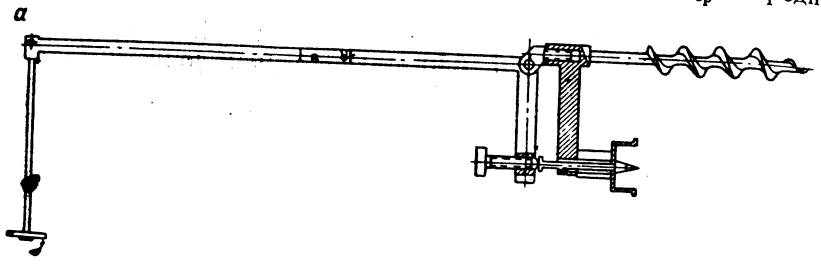
Гидравлические домкраты и гидравлические подушки перед полевыми работами тарируются под прессом. При этом у домкратов устанавливается сила трения между внешним и внутренним цилиндрами, а у гидравлических подушек — изменяемость давления в зависимости от раздува при различных величинах давления.

В комплект для натурных испытаний кроме домкратов (или гидравлических подушек) входят: гидравлический насос, соединительные трубки, манометры, мессуры и оборудование для нарезки призм.

При нарезке призм в крепких породах необходимы: компрессор, перфоратор, комплект буров и долот.

§ 4. Другие приборы для испытаний механических свойств горных пород

Испытаниям на срез образцов горных пород, подвергшихся набуханию при отборе из инженерно-геологических скважин, предшествует их уплотнение под природными нагрузками интенсивностью $H\gamma_{ср} - D$, где H — глубина залегания пород; $\gamma_{ср}$ — средний



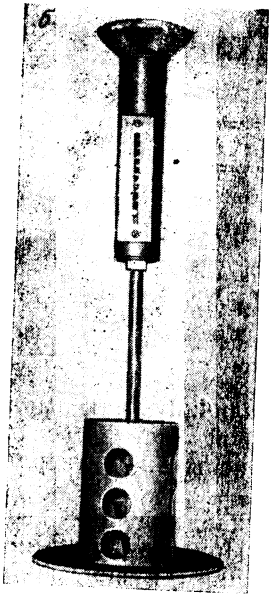


Рис. 55. Конусные приборы:
а — рычажный; *б* — пружинный

объемный вес вышележащей толщи пород; D — гидростатическое давление воды на глубине залегания образца.

Уплотнение образцов производится в приборах-уплотнителях, представляющих собой металлические разборные стаканы с фильтрующими основаниями.

В уплотнителях под водой выдерживаются также образцы глин, слагающих откосы уступов и подвергающиеся в течение длительного времени набуханию и разуплотнению. Интенсивность нагрузки при выдерживании образцов под водой принимается равной 0,5; 1,0; 2; 3 и 4 *кГ/см*².

В уплотнителях без воды под различными нагрузками выдерживаются перед испытанием на срез образцы пород отвалов; в этом случае максимальной уплотняющей нагрузкой является та, при которой наступает полное уплотнение образца и появляется высачивание воды.

В уплотнителях выдерживаются образцы нарушенной структуры при разнообразных методических испытаниях.

Испытания на срез глинистых пород сопровождаются испытаниями в компрессионных приборах, которыми устанавливается зависимость между плотностью (или коэффициентом пористости) и сжимающим давлением, набухаемость пород при различных

давлениях, а также максимальное набухание при заданной плотности пород.

Полевой конусный прибор используется для испытания слабых пород в местах их естественного залегания.

В лаборатории были сконструированы и изготовлены две модели конусных приборов (рис. 55).

В первой модели нагружение конуса осуществлялось через рычаг, опорная часть которого ввинчивалась в откос. Во второй модели нагружение осуществляется нажатием руки, а усилие измеряется пружинным динамометром, вделанным в стойку конуса; на этой же стойке закреплена и шкала с нониусом для измерения глубины погружения конуса.

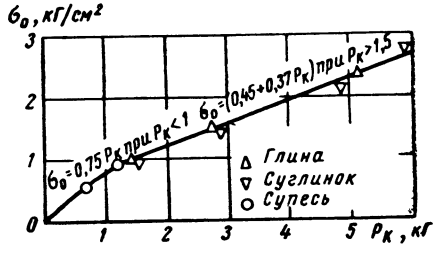


Рис. 56. График для определения сопротивления сжатию по вдавливанию конуса

Конусный прибор применяется для косвенного определения сцепления. Тарировка прибора производится путем одновременного испытания образцов конусом и в срезных приборах.

На рис. 56 представлен график, которым можно пользоваться для определения сопротивления сжатию σ_0 по величине нагрузки, необходимой для внедрения конуса с углом при вершине в 30° на 10 *мм*; при внедрении в грунт конус каждый раз смазывался вазелином.

По величине σ_0 можно определить сцепление по формуле

$$K = \frac{1}{2}\sigma_0 \operatorname{tg}\left(45^\circ - \frac{\rho^\circ}{2}\right), \qquad (62)$$

угол трения ρ берется по табличным данным.

Отклонения в значениях сцепления, полученных непосредственными испытаниями на срез и по испытаниям конусом, обычно не превышают 10% (табл. 18).

Таблица 18

Сцепление пород
(по испытаниям И. П. Иванова)

Породы	Сопротивление вдавливанию конуса, *кГ*	Сцепление по испытаниям		Отношение $K/K_к$
		на срез K	конусом $K_к$	
Грунтовая паста	1,5	0,50	0,50	1,0
Суглинок четвертичный	1,9	0,40	0,36	1,11
Глина надугольная	2,7	0,40	0,43	0,93
Глина аллювиальная	3,4	0,50	0,51	0,98
Суглинок делювиальный	3,5	0,85	0,81	1,05
Глина жирная	5,4	1,00	0,95	1,05
Суглинок лёссовидный	1,3	0,47	0,43	1,09
Глина пластичная	4,3	0,90	0,88	1,02

Испытания конусом в полевых условиях позволяет дать предварительную оценку прочности пород в обнажении, что особенно важно при изучении набухания и разуплотнения пород в откосах. Необходимы они также при отборе образцов из керна, чтобы не пропустить наиболее слабые разности пород.

При определении сопротивления сдвигу отвалов слабых глинистых пород, гидроотвалов, а также иловатых болотных и озерных отложений используется полевой лопастный прибор, которым сопротивление сдвигу определяется (без извлечения керна) непосредственно в скважине.

Рабочая часть лопастного прибора представляет собой четыре стальные лопасти, приваренные крестообразно к стальному тонкому наконечнику штанги.

Изготовленный прибор имеет высоту лопастей 150 *мм*, а их размах (равный диаметру срезаемого цилиндрического тела) составляет 80 *мм*. Прибор штангами задавливается ниже забоя скважины на глубину, равную 2—3 высотам лопастей, и медленно поворачивается штангами с помощью рычажного или дискового приспособления.

Сопротивление сдвигу $\tau_{пр}$ вычисляется по формуле

$$\tau_{пр} = \frac{aM}{\pi r^2 (h + 0{,}3r)},$$

где a — коэффициент, зависящий от свойств грунта и размеров прибора, устанавливаемый путем параллельных испытаний на сдвиг каждой разновидности грунта;

M — вращающий момент, приложенный к штангам;

h — высота лопастей;

r — радиус срезаемого цилиндрического тела.

Для полевых испытаний крепких и средней крепости пород применяется полевой прибор Ю. П. Белова, подобный конусу. Косвенная оценка прочности пород производится по числу ударов стандартным молотком, необходимых для внедрения пенетрометра на заданную глубину. Этот прибор особенно удобен при изучении выветривания пород в откосах.

§ 5. Некоторые замечания к методам испытаний

Ниже излагаются некоторые пояснения к методике испытаний механических свойств пород.

1. Неводонасыщенные образцы всех горных пород и пески испытываются на срез при трех нормальных нагрузках, интенсивность которых в связных породах отличается одна от другой не менее чем на $3K$ (K —сцепление в *кГ/см*²), а в песках составляют 1; 3; 5 *кГ/см*².

Необходимое число испытаний каждого инженерно-геологического слоя при всех нормальных нагрузках определяется по формуле (43) (см. § 3, гл. VI).

Если в откосе слой пород находится в условиях, способствующих его увлажнению, то испытания необходимо произвести не только при естественной влажности, но и при бо́льшей.

2. Образцы водонасыщенных глинистых пород при напряжениях σ_1, не превышающих природные, следует испытывать в срезных приборах, а при напряжениях σ_1, превышающих природные,— в стабилометрах «в закрытой системе» — без оттока поровой воды.

Водонасыщенные образцы испытываются при 3—4 значениях нормальных напряжений, максимальное из которых должно соответствовать максимальному напряжению в этом слое в борту карьера.

Количество образцов может быть определено по формуле (43).

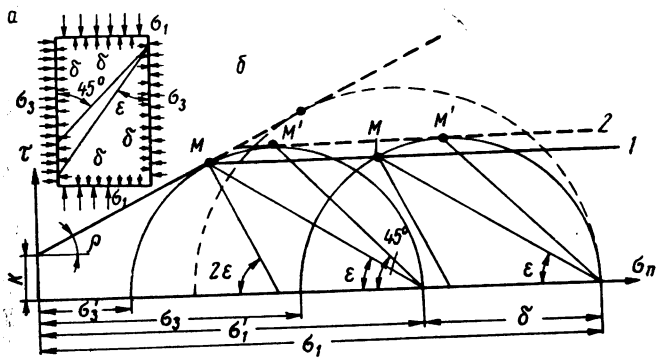


Рис. 57. Определение предельных напряжений при испытании в стабилометре водонасыщенных пород

При испытаниях водонасыщенных пород в стабилометрах предельными считаются напряжения, характеризуемые точками касания огибающей с кругами напряжений, построенных на значениях минимального и максимального главных напряжений. В тех случаях, когда при испытании в стабилометре возникает поровое давление воды δ, предельные напряжения характеризуются точками M пересечения предельных кругов напряжений с линиями, выходящими из точки σ_1, под углом ε к оси абсцисс (рис. 57, *б*). Как видно из рисунка, при построении линии *2* предельных состояний по точкам касания эта линия оказывается выше действительной линии *1* предельных состояний, построенной по точкам M предельных состояний. Точки M' не являются точками предельных состояний, они выражают лишь напряжения по площадкам, проведенным под углом 45° к направлению σ_1, предельными же являются площадки, проведенные под углом $\varepsilon = 45° - \frac{\rho°}{2}$ к направлению σ_1 (рис. 57, *а*). Изложенное не относится к результатам испытаний в стабилометрах плотных

кристаллических пород, когда выполаживание линии $\tau = f(\sigma_n)$ является следствием уменьшения коэффициента внутреннего трения при переходе в пластическое состояние минеральных зерен.

Испытания на срез и трехосное сжатие водонасыщенных глинистых пород должны сопровождаться определением предела ползучести не менее чем для 50% всех испытываемых образцов (методика определения предела ползучести изложена в § 4 гл. VIII).

Рекомендуемое число других испытаний, сопровождающих испытания на срез и сжатие, дано в табл. 19.

Если слой породы в борту карьера находится в условиях, способствующих набуханию и разуплотнению, то он должен быть выдержан под водой в соответствии с рекомендациями, изложенными в § 4, и испытан по схеме «быстрого сдвига» в срезных приборах или в стабилометре без оттока поровой воды.

Часть образцов жирных глин должна быть испытана на срез под водой или в стабилометре при подтоке поровой воды с целью определения влияния давления набухания на сопротивление сдвигу.

3. Образцы твердых горных пород испытываются на «косой срез» и в стабилометрах.

Испытания на косой срез образцов, отобранных из скважин, производятся в следующем порядке.

По признаку однородности состава все образцы, взятые на одном месторождении, разбиваются на три основные группы. Образцы первой группы срезаются под углом 60°, второй — под углом 45°, третьей — под углом 30—20°.

По величине срезающих нагрузок и площади среза вычисляются напряжения, которые являются исходными данными для построения графиков прочности горных пород, составляемых для каждой литологической разности каждого месторождения.

Построение графика прочности производится в такой последовательности: из начала координат под углами, равными углам среза, проводятся радиусы-векторы, на которых в определенном масштабе откладываются величины напряжений при каждом срезе; на каждом радиусе-векторе находятся среднеарифметические значения напряжений.

Полученные точки средних напряжений соединяют кривой, которая и является осредненным графиком прочности образцов для данной литологической разности рассматриваемого месторождения.

Если наблюдаются большие колебания удельных весов или влажностей образцов, то при построении графиков прочности образцы разделяются на группы по этим показателям.

График прочности для каждой группы строится указанным выше способом, а обобщенный (типовой) график для каждой литологической разности получается путем совмещения графиков прочности групп данной литологической разности и их осреднения.

Таблица 19

Перечень и объем лабораторных определений физико-механических свойств горных пород

Наименование испытаний	Какие породы испытываются	Количество испытаний	Краткая характеристика испытаний и приборы
Срез	Слабые песчаные и глинистые	От 12 до 48 испытаний для каждого однородного слоя	Быстрый срез на обычных одноплоскостных срезных приборах при нормальных нагрузках, достигающих 0,8 $H\gamma$
Косой срез	Средней прочности	От 9 до 30 испытаний для каждого однородного слоя	На приборах косого среза, по методике ВНИМИ
Трехосное сжатие	Слабые и средней прочности	Дополнительные испытания к испытаниям на срез	„Недренированные испытания" в стабилометрах при боковом давлении до 0,4 $H\gamma$
Одноосное сжатие	Крепкие	От 9 до 30 испытаний для каждой литологической разности	Высота образца в два раза больше диаметра. Сжатие между шероховатыми плитами
Предел ползучести	Песчано-глинистые и глинистые	Не менее 50% от п. 1	По методике ВНИМИ путем наблюдения деформаций при снижении напряжений до полного затухания ползучести
Компрессия	Глинистые	2—4 для каждого слоя	Компрессионные приборы диаметром 70 *мм*, при нагрузках до $H\gamma$; обратная ветвь до полной разгрузки и полного набухания
Естественная влажность и пористость	Все разновидности	Все образцы, испытываемые пп. 1—6	Влажность при высушивании при $t = 105—110°$ в течение 5—6 часов. Пористость вычисляется по формулам: $n = \frac{\Delta - \delta}{\Delta}$; $n = \frac{\varepsilon}{1 + \varepsilon}$

Продолжение табл. 19

Наименование испытаний	Какие породы испытываются	Количество испытаний	Краткая характеристика испытаний и приборы
Объемный вес γ	Все разновидности	Все образцы, испытываемые пп. 1—6	Методом непосредственных измерений образцов, испытываемых на срез и сжатие, методами режущих цилиндров и парафинирования
Удельный вес Δ	То же	10—15% от пп. 1—5, все п. 6	Пикнометрическим методом
Гранулометрический состав	Слабые песчаные и глинистые	10—15% п. 1	Методами: **визуальным, ситовым, пипеточным,** Сабанина, комбинированным, Рутковского, ареометрическим
Число пластичности	Глинистые	Все п. 6	Предел текучести — методами: стандартным ручным, Охотина, Васильева, **балансирного конуса Васильева,** предел пластичности — методом раскатывания грунта в проволоку
Капиллярная и максимальная молекулярная влагоемкость	То же	То же	Методами влагоемких сред, высоких колонн; **путем непосредственного наблюдения**
Минералогический состав	То же	1—2 для каждого слоя	Иммерсионным методом, методом окрашивания, термометрическим анализом для карбонатных разностей
Петрографический состав	Средней прочности и крепкие	1—2 для каждой литологической разности	Оптическим методом в шлифах и иммерсионных жидкостях, электронной микроскопией, методом рентгенографического анализа
Коэффициент стойкости	То же	То же	Путем сравнения прочности естественной и после многократного увлажнения и высушивания, а также замораживания и оттаивания (по П. И. Панюкову)

Для определения угла трения для каждой литологической разности на графике проводится прямая линия, соединяющая средние значения напряжений при срезах под углами 60 и 45°, которая отсекает на оси ординат отрезок, характеризующий величину сцепления, и образует с осью абсцисс угол, равный углу трения.

Для осреднения углов трения по всем месторождениям строятся для каждого бассейна так называемые обобщенные или типовые графики прочности для каждой литологической разности пород.

Типовые графики для каждой литологической разности строятся исходя из того положения, что форма графика прочности для горной породы определяется ее гранулометрическим и минералогическим составом и не зависит от плотности — влажности. Плотность — влажность влияет лишь на величину сцепления.

Для построения типовых графиков переносятся средние значения по соответствующим радиусам-векторам и из них находятся средневзвешенные значения по числу испытаний. Через полученные точки проводят плавную кривую, которую и принимают за типовой график прочности на сдвиг породы данной литологической разности.

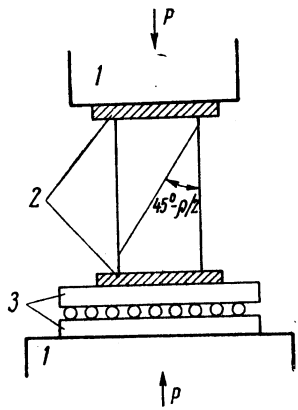


Рис. 58. Схема испытаний на одноосное сжатие цилиндрических образцов или с квадратным основанием:

1 — давильные поверхности пресса; *2* — плоские шероховатые стальные пластинки; *3* — роликовая постель

Величина сцепления каждого образца определяется по величинам напряжений при его срезе с использованием типового графика прочности.

Для каждой литологической разности соотношения между сцеплением K и величиной напряжения P_i для каждого радиуса-вектора являются величинами вполне определенными. Отношение $\frac{K}{P_i}$ позволяет определить сцепление по одному испытанию, для чего нужно напряжение при срезе данного образца умножить на величину этого отношения.

В тех случаях, когда образцам невозможно придать путем обработки необходимую форму (например, уголь), они бетонируются и испытываются в бетонных оболочках по такому же принципу.

4. Если угол внутреннего трения горной породы известен (или установлен испытаниям), величину сцепления можно определить по испытаниям на одноосное сжатие между шероховатыми плитами, устанавливая в основание образца роликовую постель (рис. 58). Применение роликовой постели исключает возникнове-

ние бокового давления при сдвиге образца, и его разрушение в этом случае происходит путем среза по площадке, наклоненной к оси образца под углом $45° - \frac{\rho}{2}$.

Сцепление в этом случае определяется по формуле

$$K = \frac{1}{2}\sigma_{сж}\,\mathrm{tg}\left(45° - \frac{\rho}{2}\right).$$

Высота образца при этих испытаниях принимается вдвое больше диаметра.

Эти испытания особенно удобны при отборе образцов из керна, так как в этом случае обработка образцов сводится к обрезке и шлифовке торцовых поверхностей, единственным условием является параллельность оснований между собой и их перпендикулярность оси образца.

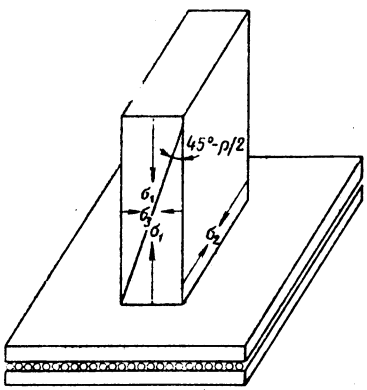


Рис. 59. Схема установки на роликовую постель призматического образца при испытании на одноосное сжатие

Если при выбуривании образцов из штуфов они легко разрушаются вследствие призматической делимости, то образцам может быть придана форма прямоугольных призм, которые испытываются на одноосное сжатие; условием разрушения путем среза в этом случае является высота образца, вдвое превышающая меньшую сторону основания; образец устанавливается на роликовую плиту длинной стороной параллельно роликам (рис. 59).

5. При одноосном сжатии между жесткими шероховатыми плитами образцов, высота которых менее высоты, определяемой по формуле (50), в состоянии одноосного напряженного сжатия находится только периферийная полоса, а внутренняя часть образца находится в состоянии всестороннего сжатия. Боковое давление создается за счет силы трения периферийной части, возникающей при поперечном расширении образца [176]. Чем дальше от боковой поверхности находится часть образца, тем большее боковое давление она испытывает и тем большее вертикальное усилие необходимо для ее разрушения; в результате этого распределение нагрузок на плоский образец и образец кубической формы имеет вид, изображенный на рис. 60.

Временное сопротивление сжатию образцов при увеличении отношения $\frac{a}{h}$ возрастает. Для образцов каменной соли сопротивление сжатию возрастало следующим образом [176].

Отношение $\frac{a}{h}$	1:4	1:2	1:1	2:1	3:1	4:1
Временное сопротивление сжатию, *кГ/см²*	175	225	396	610	715	770

6. Определение коэффициента трения по плоскостям ослабления (трещинам, контактам слоев, поверхностям древних оползней) производится в лабораторных условиях на двухтонном срезном приборе.

При испытаниях контактов твердых пород образцы цементируются в оболочку, размеры и форма которой соответствуют рабочей коробке прибора; открытыми остаются испытываемые поверхности, которые при цементировании устанавливаются парал-

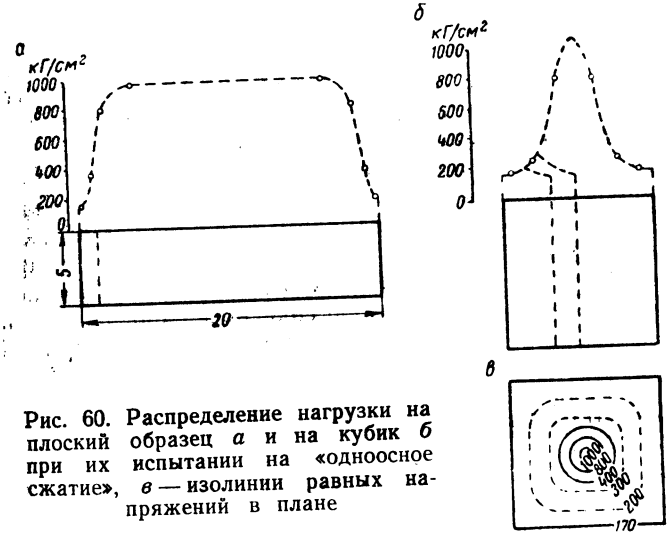


Рис. 60. Распределение нагрузки на плоский образец *а* и на кубик *б* при их испытании на «одноосное сжатие», *в* — изолинии равных напряжений в плане

лельно основаниям коробок. Опыты для одних и тех же поверхностей проводятся при 3—4 нормальных напряжениях, и по полученным результатам строится зависимость $\tau = f(\sigma_n)$.

Эта зависимость выражается прямой линией, угол наклона которой является углом трения по данным поверхностям; опыты повторяются с предварительным смачиванием водой контактирующихся поверхностей.

7. Основные требования к методике испытания на сдвиг мягких отвальных пород сводятся к следующему. При селективном отвалообразовании, когда породы укладываются в отвал послойно, испытаниям подвергаются все литологические разновидности в отдельности: для этого породы естественной влажности нарезаются стружкой размером 2—5 *мм*, которой заполняют несколько колец срезного прибора. Приготовленные таким образом образцы уплотняются и испытываются на срез при 3—4 нормальных нагрузках

в зависимости от диапазона нормальных напряжений для данно породы в отвале.

Основное внимание при испытаниях необходимо обратить на то чтобы в процессе приложения нормальных и касательных на грузок не происходил отжим воды из испытываемой породы.

Если при приложении нормальных нагрузок напряжение с вызывает появление воды в зазоре срезного прибора, то макси мальное нормальное напряжение при испытании на срез следуе принять равным $\frac{1}{2}\sigma'_n$, а сопротивление срезу, полученное пр этом напряжении, считать максимальным для всех нормальны напряжений в отвале более $\frac{1}{2}\sigma'_n$.

Так как в отвалах, особенно в их нижней части, возможно до полнительное увлажнение, уменьшающее сопротивление сдвигу испытания для одних и тех же пород следует проводить при 2—3 значениях влажности, превышающих естественную. Такие ис пытания позволяют выявить зависимость изменения сопротивле ния сдвигу в связи с дополнительным увлажнением.

При валовой выемке породы, попадая в отвал, образуют смесь, в этом случае образцы, изготавливаемые из кусочков указанны выше размеров, также должны представлять смесь всех литологических разновидностей, попадающих в отвал, в пропорции, отвечающей соотношению пород в геологическом разрезе, или их распределению в отвале; испытания также проводятся при влажностях, равных естественной и превышающих ее.

8. Многочисленными испытаниями образцов горных пород одновременно на обычный срез, на косой срез, в стабилометрах, на одноосное сжатие, а также натурными испытаниями больших призм однородных пород, оконтуренных в массиве, установлено, что все эти испытания дают одни и те же результаты независимо от размеров испытываемых образцов при условии достаточной однородности пород.

Результаты испытаний отличаются в следующих случаях.

а. Если породы имеют скрытые трещины, то образцы меньших размеров имеют бо́льшее сцепление, чем более крупные образцы, так как мелкие образцы с трещинами разрушаются при обработке, а в более крупных образцах трещины сохраняются.

б. Если образцы обладают делимостью в определенных направлениях, по которым сцепление меньше, чем в других направлениях, и если при этом ось цилиндрических образцов параллельна этим ослабленным направлениям, то при испытании на срез поверхность среза совпадает с поверхностями ослабления, а при испытаниях на одноосное или трехосное сжатие она ориентируется под углом к ним и поэтому сцепление при сжатии оказывается больше, чем при срезе (рис. 61).

в. При появлении порового давления удельное сопротивление срезу у меньших образцов оказывается больше, чем у более круп-

ных образцов, так как у крупных образцов поровое давление рассеивается медленнее; это особенно проявляется при испытаниях пород отвала, поэтому для их испытания применяются приборы с большой площадью среза.

9. Расчетные значения характеристик сопротивления сдвигу ρ и K по каждому инженерно-геологическому слою или группе пород определяются по монотонным графикам $\tau = f(\sigma_n)$, построенным таким образом, чтобы удовлетворялось условие $\sum(\tau_i - \tau)^2 = \min$, где τ_i — частные значения сопротивления сдвигу при σ_{ni}; τ — ординаты кривой $\tau = f(\sigma_n)$ при тех же значениях σ_{ni}.

Если общее число испытанных образцов каждого инженерно-геологического слоя составляет не менее n, определяемого по фор-

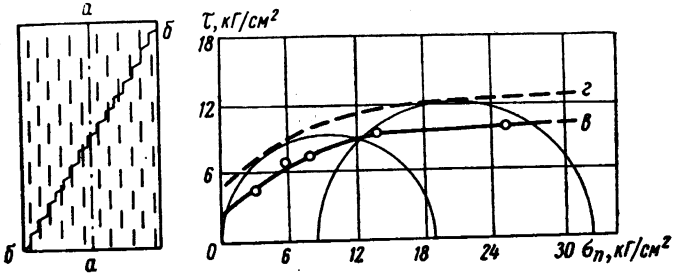


Рис. 61. Ориентировка поверхности среза относительно кливажной делимости при испытаниях на срез (*а—а*) и на сжатие (*б—б*); графики испытаний на срез (*в*) и на сжатие (*г*)

муле (43), то предельная погрешность сопротивления сдвигу всей толщи будет не более заданной величины $\overline{M}$. Это не относится к результатам испытаний элювиальных, делювиальных и других трещиноватых глин, для которых расчетные значения ρ и K должны определяться по минимальному сопротивлению сдвигу или по натурным испытаниям.

Расчетные значения сопротивления сдвигу в образце твердых пород также определяются по кривой $\tau = f(\sigma_n)$. Для получения значения сцепления в массиве сцепление в образце умножается на коэффициент структурного ослабления (см. § 3, гл. IX).

§ 6. Зависимость между характеристиками прочности горных пород и их разрушаемостью при разработке

Между характеристиками прочности горных пород (в образце и в массиве) и их разрушаемостью при разработке имеется определенная корреляционная зависимость, которую необходимо использовать в процессе разведки месторождений и в процессе их разработки.

Как известно, показателями сопротивляемости горных пород разрушению при их разработке являются: дробимость, буримость, взрываемость, сопротивление резанию (зарубаемость) и абразивность.

Все эти показатели зависят от того или иного сочетания следующих характеристик горных пород: петрографического (минералогического) состава; гранулометрического состава (зернистости); выветрелости, плотности, сопротивления сжатию, сопротивления отрыву, трещиноватости.

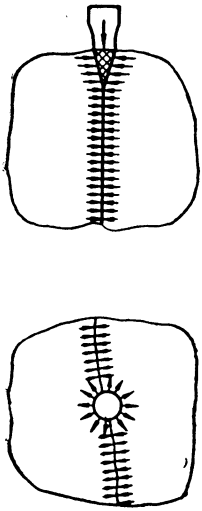


Рис. 62. Схема разрушения блоков твердых пород ударными нагрузками

Разрушение горных пород ударными (динамическими) нагрузками или сосредоточенными статическими нагрузками, характеризующее их дробимость, зависит одновременно от сопротивления сжатию и растяжению, а также от модулей упругости и коэффициента Пуассона. Характер разрушения под влиянием сосредоточенной статической или динамической нагрузки представляется нам следующим: под действием сосредоточенной нагрузки создается ядро сжатия (рис. 62), поперечное расширение которого вызывает растяжение области, окружающей ядро. Для разрушения необходимо, чтобы поперечная деформация сжатого ядра достигала предельной деформации при растяжении. Ясно, что величина поперечного расширения зависит от модуля упругости при сжатии, коэффициента Пуассона и приложенной нагрузки. Таким способом может быть разрушен только хрупкий материал с сопротивлением отрыву в несколько раз меньше, чем сопротивление сжатию, так как в пластичных материалах поперечное расширение не может достичь величины, равной критической деформации при растяжении; например, если временное сопротивление сжатию и растяжению равно и при этом равны модули упругости, то поперечное расширение не может превысить половины предельной деформации при растяжении (такие материалы могут подвергаться ковке).

Вследствие большого числа постоянных, определяющих предельное состояние при сосредоточенной ударной или статической нагрузке ($\sigma_{сж}$, $\sigma_р$, $E_{сж}$, $E_р$, ν) и сложного напряженного состояния, возникающего при этом, зависимость

$$R_1 = f_1(\sigma_{сж}, \sigma_р, \nu, E_{сж}, E_р) \qquad (63)$$

необходимо устанавливать опытным путем (R_1 — показатель дробимости монолитного блока горной породы).

Подобно формуле (10), определяющей прочность при всесто-
ннем сжатии, зависимость (63) будет иметь вид

$$R_1 = a(\sigma_{сж} + b\sigma_р),$$

де b — коэффициент, устанавливаемый экспериментальным пу-
тем;

a — коэффициент пропорциональности.

Буримость горной породы при ударном и ударно-поворот-
ом способе бурения, а также при шарошечном бурении зависит
т ее дробимости. Разрушение горных пород в скважине про-
сходит в стесненных условиях, когда открытой является только
оверхность забоя скважины и поэтому энергоемкость разрушения
ород в скважине оказывается выше, чем при свободном дроб-
лении:

$$R_2 = f_2 R_1; \quad f > 1.$$

Буримостью пород можно широко пользоваться для определе-
ния их прочности в процессе бурения, однако для этой цели бу-
ровые станки должны быть оборудованы автоматической аппара-
турой, регистрирующей режим бурения; в этом случае создава-
лась бы возможность учитывать влияние трещиноватости горных
пород на их прочность.

При вращательном способе бурения режущими коронками,
а также при зарубке врубовыми машинами и при резании зубьями
ковшей экскаваторов разрушение пород происходит путем скола
со сжатием, также характеризующимся сопротивлением отрыву и
сжатию:

$$R_3 = f_3 R_1.$$

Вторым показателем сопротивления горных пород резанию яв-
ляется износ коронок и зубков, зависящий от абразивности гор-
ной породы, которая в свою очередь зависит от твердости мине-
ралов [153], составляющих горную породу, их зернистости и проч-
ности (сопротивления сжатию)

$$R_4 = f_4(\sigma_{сж}, H).$$

Взрываемость горных пород имеет практическое значение как
обобщенная механическая характеристика массива, почти всегда
являющегося трещиноватым.

При взрыве происходит дробление пород и их перемещение,
поэтому показатель взрываемости R_5 может быть представлен
в таком виде

$$R_5 = f_5(R_1, \gamma, W),$$

где γ — объемный вес пород;

W — показатель интенсивности трещиноватости.

Принципу возрастающей прочности на сжатие и растяжение
с учетом объемного веса соответствует таблица взрываемости
Союзвзрывпрома [10], однако ею не учитывается интенсивность

трещиноватости; при открытых разработках трещиноватость оказывает особенно большое влияние на взрываемость пород и на устойчивость откосов.

Наблюдения показывают наличие зависимости между взрываемостью трещиноватых твердых пород и их сопротивлением сдвигу в массиве, определяющим устойчивость бортов карьеров; в настоящее время предпринимаются попытки определения сопротивления сдвигу горных пород в массиве путем обработки результатов взрывов.

Анализ многочисленных показателей сопротивляемости горных пород различным механическим воздействиям, выполненный проф. Л. И. Бароном [10], показывает, что во многих случаях между отдельными показателями и коэффициентом крепости проф. М. М. Протодьяконова наблюдается хорошая корреляционная связь. Однако вследствие того, что большей частью коэффициент крепости М. М. Протодьяконова рассматривается только как $0{,}01\sigma_{сж}$ без учета других механических показателей, в частности сопротивления отрыву и трещиноватости, в тех случаях, когда эти показатели являются существенными, корреляционная связь оказывается недостаточно явной.

Так как в настоящее время техника испытаний на сжатие и растяжение освоена, целесообразно продолжить исследования М. М. Протодьяконова по установлению корреляционной зависимости между основными механическими характеристиками горных пород и показателями их добываемости.

Это в значительной степени повысило бы качество геологоразведочных данных о механических свойствах горных пород и улучшило бы проектирование как в части обеспечения устойчивости бортов карьеров, так и в способе разработки месторождений.

ЧАСТЬ ТРЕТЬЯ

ДЕФОРМАЦИИ БОРТОВ КАРЬЕРОВ И ОТВАЛОВ

Глава XII

КЛАССИФИКАЦИЯ ДЕФОРМАЦИЙ БОРТОВ КАРЬЕРОВ И ОТВАЛОВ

§ 1. Классификация деформаций

Все явления деформации откосов уступов и бортов карьеров разделяются на пять видов: осыпи, обрушения, оползни, просадки и оплывины.

Осыпи образуются в результате выветривания пород на поверхности откосов, они проявляются в виде отрыва отдельных частиц, кусков и глыб от массива и скатывания их к подошве откосов. Осыпи образуются при углах откосов, превышающих углы естественного откоса (раздробленных пород), когда частица, потерявшая связь с массивом, не может удерживаться на поверхности откоса силами трения. Более мелкие частицы сносятся потоками вод атмосферных осадков и при углах меньше угла естественного откоса.

Обрушения отличаются от осыпей тем, что они захватывают значительные массивы пород. Поверхность отрыва пород от основного массива залегает круче угла внутреннего трения, а поэтому после преодоления сил сцепления оторвавшийся массив не может удерживаться по этой поверхности силами трения и скатывается вниз к подошве откоса в течение нескольких секунд.

Оползни характеризуются в основном медленным смещением породных масс по поверхности скольжения, которая залегает в массиве в среднем под углом, меньшим угла внутреннего трения пород, пересекаемых этой поверхностью. При этом величины напряжений по поверхности скольжения на значительной ее части находятся за пределом текучести. Вследствие этого и происходит пластическая деформация пород — оползень, продолжающийся от десятков минут до нескольких месяцев, а при вовлечении новых массивов и до нескольких лет.

Оплывины характеризуются перемещением в виде потока насыщенных водой рыхлых породных масс, которые растекаются по площадкам уступов под углом 4—6° и менее, а при значительном накоплении такого материала он свободно стекает на нижние уступы, огибая пороги коренных пород.

Просадки — вертикальное опускание прибортовых участков высокопористых рыхлых породных масс без образования сплошной поверхности скольжения.

Четкой границы между отдельными видами деформаций не существует. Осыпи и обрушения различаются по относительной величине деформирующихся массивов, а обрушения и оползни — по скорости деформации, зависящей от наклона поверхности скольжения и от характера напряженного состояния пород по поверхности скольжения. Существует непрерывный переход от быстро происходящих «чистых обрушений», когда по всей поверхности скольжения породы находятся в твердом состоянии а сама поверхность скольжения располагается круче угла естественного откоса, к «чистым оползням», длящимся месяцы и годы при небольших скоростях смещения, когда по всей поверхности скольжения породы находятся в пластическом состоянии а сама поверхность скольжения располагается под углом, значительно более пологим, чем угол внутреннего трения пород в их упругом состоянии.

Нет четкой границы также между просадками и оползнями, так как при всех видах просадок при некоторых условиях с течением времени этот вид деформации переходит в оползни; однако довольно часто просадки откосов наблюдаются в «чистом виде» (просадки в «чистом виде» не являются видом деформации горных пород, свойственных только откосам, так как они наблюдаются и на ровных участках вдали от откосов).

В зависимости от степени насыщения водой рыхлых горных пород наблюдается непрерывный переход от оползней к оплывинам: при увеличении влажности пород скорость перемещения возрастает.

В табл. 20 приведена классификация деформаций откосов, наблюдавшихся на карьерах, а на рис. 63 изображены схемы оползней.

При установлении причин развития деформаций бортов карьеров не следует их смешивать с геологическими условиями в которых развиваются эти деформации, и с факторами, способствующими их развитию. При установлении причин появления оползней или крупных обрушений довольно часто причиной считают наличие дизъюнктивных нарушений, слоистости, диапировых складок, обводненности пород и других факторов, характеризующих геологическую обстановку, в которой происходят те или иные деформации. Причиной являются не поверхности ослабления и естественная обводненность пород и не наличие горных разработок (которые тоже часто рассматривают как причину деформаций бортов), а то, что эти поверхности были недостаточно разведаны или при достаточной разведанности их не приняли во внимание при проектировании и при проведении горных разработок.

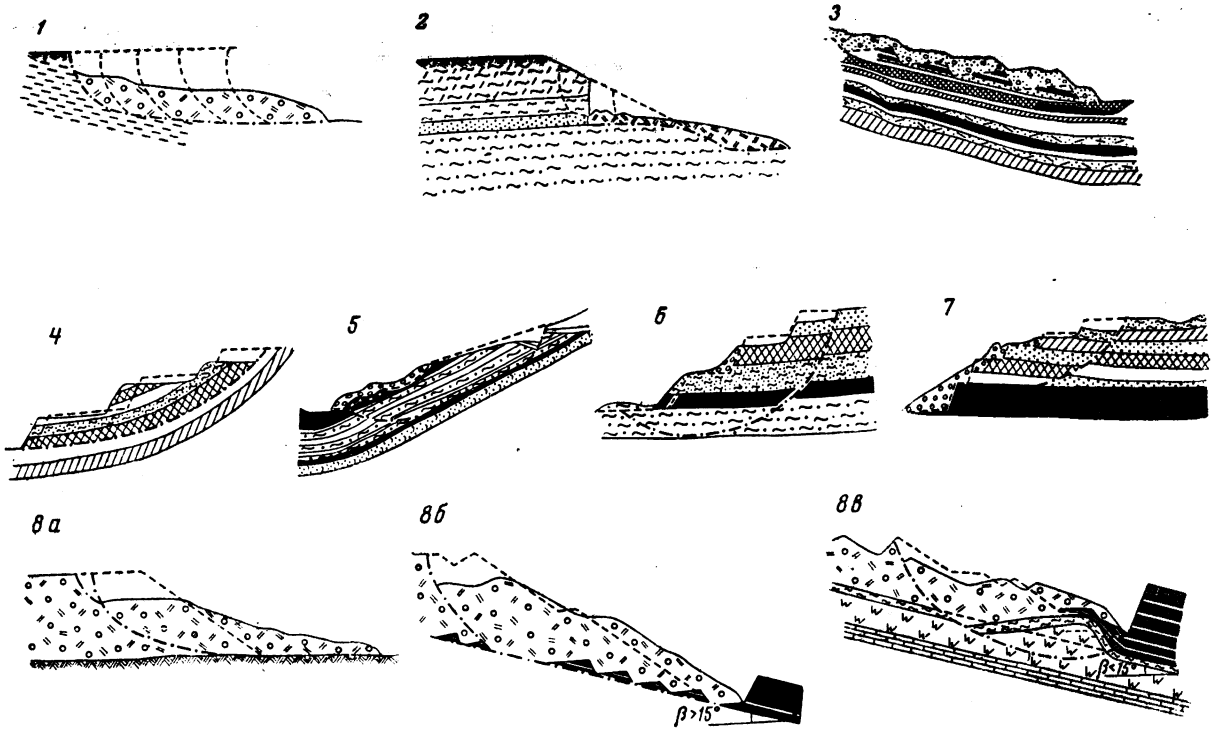


Рис. 63. Схемы оползней, наблюдаемых на карьерах:

1 — изотропных массивов; *2* — фильтрационные; *3* — покровные; *4* — контактные; *5* — глубинные слоистых пород лежачего бока; *6* — выпирания; *7* — оползни-надвиги; *8* — отвалов; *а* — надподошвенные; *б* — подошвенные; *в* — подподошвенные

Таблица 20

Классификация деформаций бортов карьеров и отвалов

Вид и характер деформации	Виды обрушений, оползней и оплывин	Условия и причины возникновения
Осыпи — скатывание отдельных кусков и глыб к основанию откоса	Осыпи откосов мягких связных пород	Возникают под влиянием выветривания крутых откосов; осыпание становится более интенсивным при отсутствии заоткоски уступов
	Осыпи откосов несвязных пород	
	Осыпи откосов трещиноватых твердых пород	Под влиянием массовых взрывов, отсутствия заоткоски наклонными скважинами и выветривания
Обрушения — быстрое смещение породных масс по крутой поверхности скольжения	Обрушения по подрезанным контактам слоев, дизъюнктивам и сланцеватости	При падении слоев и дизъюнктивных нарушений в сторону выемки круче 25—30°
	Обрушения по поверхностям, ослабленным трещинами	При падении трещин в сторону выемки круче 35—40°
	Обрушения по криволинейным поверхностям	При завышенных угле или высоте откоса
	Обрушения по сложным поверхностям ослабления	Условием возникновения обрушения является наличие поверхностей ослабления
Оползни — медленное смещение породных масс по пологой поверхности скольжения	Оползни изотропных массивов	Подток грунтовых вод к откосу или скопление дождевых и талых вод
	Фильтрационные оползни	Подкапывание откоса вследствие выноса фильтрующимся потоком слабо связных частиц
	Покровные оползни	Наличие рыхлых отложений на склоне твердых пород и отсутствие регулирования стока дождевых вод
	Контактные оползни	Подрезка обводненных контактов пологозалегающих слоев глинистых пород и дизъюнктивных нарушений, заполненных глинкой трения

Вид и характер деформации	Виды обрушений, оползней и оплывин	Условия и причины возникновения
	Глубинные оползни слоистых пород лежачего бока	Наличие слоев пластичных глин и напорных вод
	Оползни-надвиги	Наличие слабых контактов или вскрытых слоев пластичных глин
	Оползни выпирания	Наличие невскрытых слоев пластичных глин; обводнение площадок уступов и прибортовой полосы
	Оползни отвалов: надподошвенные	Прочное основание и слабые породы отвала, дополнительное увлажнение отвальных пород (особенно в основании отвала)
	подошвенные (контактные)	наклонное слоистое основание
	подподошвенные (выпирания)	прочные породы отвала, слабое основание, напорные воды в основании отвала
Оплывины — течение насыщенных водой рыхлых пород нарушенной структуры	Консистентные оплывины	Насыщение водой рыхлых пород и высокопористых отложений, обладающих сцеплением упрочнения (лёссов, лёссовидных суглинков и др.) до консистенции текучести
	Фильтрационные оплывины	Оплывание, связанное с выносом песчаных частиц фильтрующимся потоком
Просадки — вертикальное опускание прибортовых участков рыхлых породных масс без образования сплошной поверхности скольжения	Просадки пород естественной структуры	Увлажнение (замачивание) высокопористых отложений (лёссов, лёссовидных суглинков, выщелоченных пород)
	Просадки пород нарушенной структуры (отвалов)	Уплотнение отвалов рыхлых пород (усиливается при увлажнении)
	Просадки с выпиранием оснований	Наличие слабых пластичных слоев в основании откоса

Причинами появления деформаций могут являться: несоответствие углов наклона бортов геологическим условиям или недостаточная разведанность этих условий, отсутствие дренажа или его неэффективность; неправильное ведение горных работ (например, буровзрывных) часто является причиной возникновения обрушений и интенсивного развития осыпей; неправильное представление о характере явления, являющееся следствием его недостаточной изученности вообще или следствием его недооценки; применение неправильного метода расчета, дающего завышенные углы откосов, тоже следует рассматривать как причину развития деформаций бортов. В этом отношении откосы искусственных выемок отличаются от естественных откосов (склонов земной поверхности), где причиной деформаций являются естественные процессы (если человек не оказывал какого-либо воздействия на эти откосы); но в природных условиях и деформации откосов являются неизбежными, чего большей частью нельзя признать при открытых разработках полезных ископаемых.

§ 2. Условия и причины возникновения осыпей и обрушений

Осыпи являются наиболее распространенным на карьерах и наиболее простым видом деформаций откосов.

Осыпям подвергаются все разновидности пород от наиболее крепких, когда они под влиянием выветривания в крутых откосах теряют связность, до самых слабых глинистых, которые теряют связность при высыхании и растрескивании.

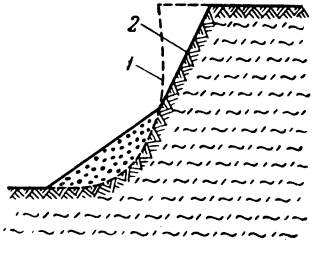


Рис. 64. Уступ в глинах и суглинках:

1 — после выемки экскаватором; *2* — после образования осыпи

При проведении траншей или при выемке экскаватором типа прямой механической лопаты очередной заходки в слабых породах уступы высотой 10—15 *м* имеют форму, изображенную на рис. 64 пунктирной линией. Если вблизи верхней бровки уступа отсутствует скопление дождевой и талой воды, а также нет высачивания грунтовых вод, т. е. нет условий для возникновения оползней, то с течением времени происходит постепенное разрушение верхней части уступа под влиянием высыхания пород и у его подошвы накапливается осыпь. Постепенно откос выполаживается и приобретает форму, изображенную на рис. 64 сплошной линией. Осыпь располагается под углом 34—36°, а верхняя часть откоса имеет угол 55—70°. Процесс разрушения и осыпания крутой части откоса завершится после того, как развитие осыпи достигнет верхней бровки откоса. Интенсивность этого процесса зависит от выветриваемости пород и экспозиции откосов —

более обогреваемые солнечными лучами откосы выветриваются интенсивнее.

На развитие осыпей откосов пород, разрабатываемых с применением буровзрывных работ, влияет и способ ведения буровзрывных работ.

При производстве массовых взрывов в вертикальных скважинах большого диаметра или в штольнях происходит дробление пород за контуром выемки, которое приводит к массовому разви-

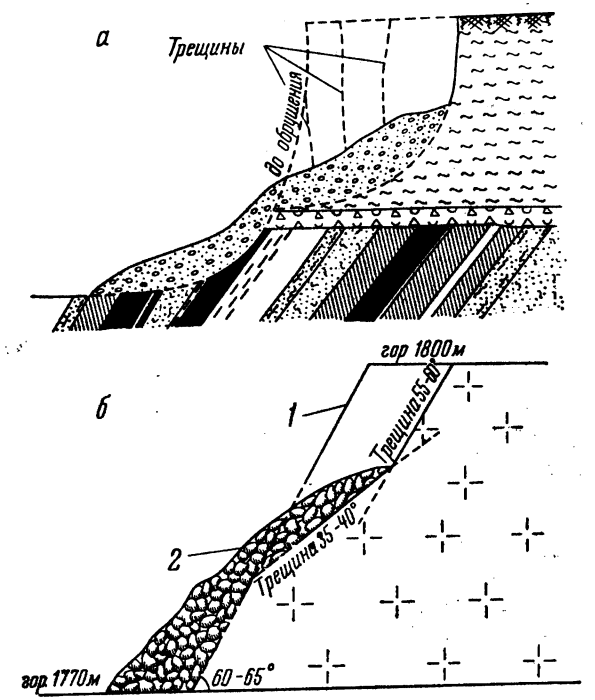


Рис. 65. Примеры обрушений участков бортов:
а — обрушение уступа, сложенного суглинками на Коркинском карьере; *б* — обрушение участка борта на Алтын-Топканском карьере; *1* — положение борта до обрушения; 2 — то же после обрушения

тию осыпей. После выемки экскаватором полностью раздробленной (разрыхленной) породы, в уступах остаются породы, сохраняющие не более 20—25% естественной прочности массива. С течением времени уступы таких пород разрушаются, при этом оставляемые между уступами «бермы безопасности» частично покрываются осыпью вышележащего уступа, а частично разрушаются, вследствие чего борт приобретает вид сплошного откоса большой высоты, работа под которым становится опасной.

Обрушениям, как и осыпям, подвергаются породы почти всех групп (кроме пятой) в тех случаях, когда по наиболее слабой по-

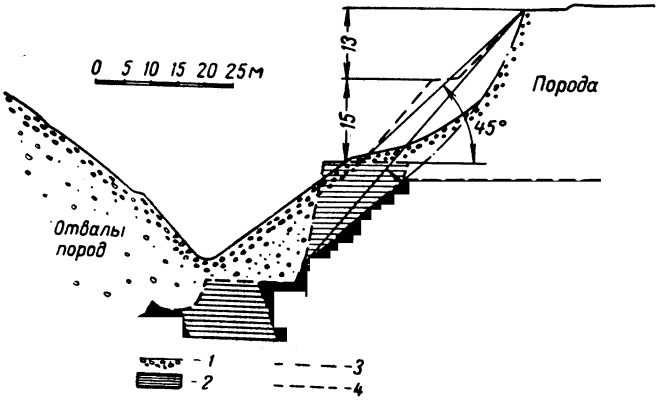


Рис. 66. Обрушение угольного забоя и породных уступов по дизъюнктивному нарушению на Богословском угольном карьере:

1 — контур борта после оползня; *2* — потеря угля от обрушения; *3* — дизъюнктивное нарушение; *4* — контур борта до оползня

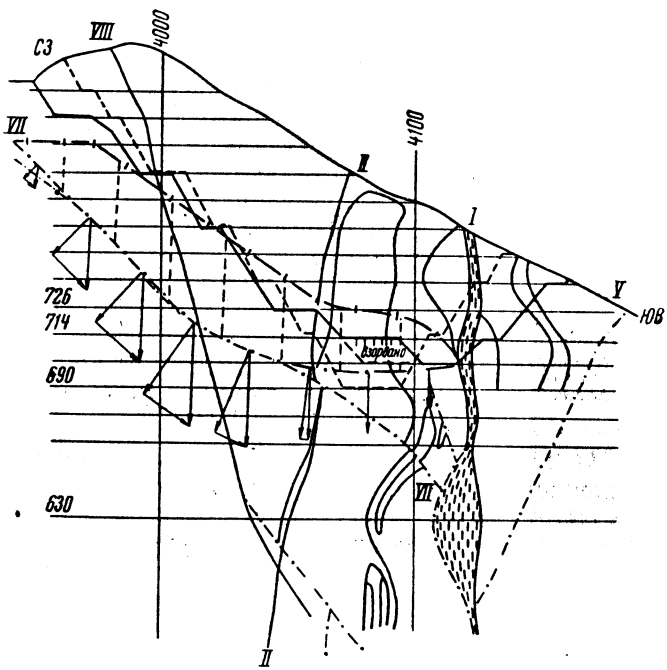


Рис. 67. Обрушение борта на Абаканском карьере

хности наступает предельное равновесие пород, т. е. когда на-
жения по этим поверхностям достигают предельных величин
отличие от обрушений оползни характеризуются тем, что на-
жения по наиболее слабой поверхности превышают предел
зучести, но не достигают предельных).

На карьерах обрушения большей частью происходят по поверх-
тям ослабления: дизъюнктивным нарушениям, контактам
ев и сланцеватости, падающим в сторону выемки под углом
–30° и превышающим угол внутреннего трения по этим по-
хностям. Так как обрушениям предшествуют часто лишь не-
льшие смещения, незаметные визуально, их возникновение ока-
зается неожиданным и проявляется катастрофически.

В практике СССР катастрофические обрушения больших мас-
зов горных пород не возникали.

На рис. 65—67 приведен ряд примеров обрушения уступов и
астков бортов карьеров.

На рис. 66 показано одно из обрушений, возникших на Бого-
овском угольном разрезе № 1 по дизъюнктивному нарушению,
иентированному диагонально к угольному забою; обрушения не
зникали в тех случаях, когда подрезанная тектоническим нару-
ением треугольная призма угля не была нагружена породными
тупами, т. е. когда их отработка опережала угольный забой на
ирину призмы возможного обрушения.

Обрушение наибольшего объема возникло в 1961 г. на Абакан-
ом карьере (рис. 67). Это обрушение также было связано с диа-
нально расположенным тектоническим нарушением. Его разви-
е вследствие большой высоты откосов и диагонального распо-
жения тектонического нарушения проявилось постепенным сме-
ением пород вдоль тектонического нарушения еще до его под-
зки горными выработками.

§ 3. Оползни изотропных массивов и фильтрационные оползни

Оползни изотропных массивов характеризуются тем, что они
е связаны с наличием поверхностей ослабления, слабых про-
лойков и водоносных слоев; ими охватываются большей частью
сдельные уступы однородных слабофильтрующих пород: суглин-
ов, глин и слабых алевролитов. Благодаря тому, что в массиве
оверхности ослабления отсутствуют, поверхность скольжения
меет вид плавной кривой в нижней и средней части, а вверху за-
анчивается вертикальной трещиной отрыва.

Причиной возникновения оползней этого вида является нали-
ие вблизи от откосов водосточных канав или впадин, в которых
капливаются дождевые и талые воды.

Вследствие низких фильтрационных свойств пород, подвер-
ающихся оползням этого вида, поглощаемая ими вода не высы-
ивается в откосе, а увеличивает водонасыщенность вплоть до
олного насыщения и набухания до текучего состояния.

Если место скопления воды находится в некотором удалении от откоса (в 3—4 раза превышающем высоту откоса), его оползание происходит циклами, постепенно приближаясь к месту скопления воды (рис. 68).

Ширина одновременно оползающего блока (вкрест простирания бровки откоса) изменяется от одного до 6—8 *м* и зависит от высоты откоса и пластичности глин; чем пластичность выше, тем шире одновременно оползающие блоки.

Каждый цикл проходит следующие стадии: 1) после очередного оползания блока массив, прилегающий к поверхности от-

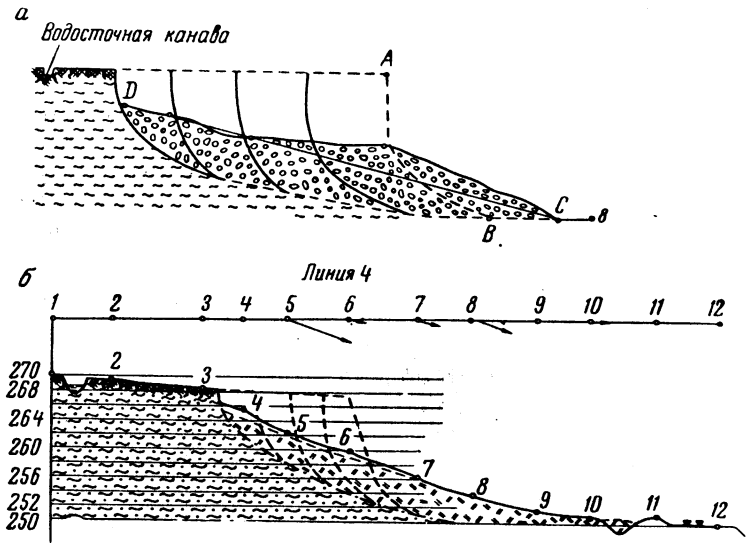


Рис. 68. Примеры цикличного развития оползней изотропных пород:

а — на Коркинском карьере; *б* — на Бочатском карьере в Кузбассе

коса, подвергается набуханию с разуплотнением, происходящему вследствие уменьшения бокового давления в прилегающих к откосу породах; 2) по мере снижения прочности пород начинают постепенно развиваться пластические деформации, параллельно бровке откоса возникают трещины отрыва и наблюдается постепенное оседание отколовшегося блока; 3) с течением времени трещины расширяются и углубляются, скорости оседания увеличиваются и происходит полное оползание пород. При этом оползший блок обычно полностью разрыхляется и приобретает еще большую способность к поглощению воды. Разрыхленные и насыщенные водой суглинки и глины приобретают свойства грунтовой пасты, располагающейся на площадках уступов под углом 12—14°, а при дальнейшем насыщении водой оползневая масса может перейти в оплывину.

После этого начинается новый цикл развития оползня.

Активизация такого рода оползней особенно наблюдается в период обильных и продолжительных дождей; при этом оползают и такие участки незаоткошенных уступов, на которых больших скоплений воды не происходит, но сток воды затруднен. Решающее влияние на возникновение оползней этого вида оказывает переход капиллярной воды в гравитационную, создающую гидростатическое взвешивание массива, прилегающего к откосу, и уменьшающую силы трения по поверхности скольжения. В некоторых случаях, как например, при сложении уступов лёссами и лёссовидными суглинками, решающим оказывается снижение прочности за счет растворения солей, придающих значительную связность породам при их неполной водонасыщенности. Влияние увеличения веса при полном водонасыщении на возникновение оползней незначительно в сравнении с влиянием разупрочнения и гидростатического взвешивания, так как объем свободных пор в лёссовидных суглинках и глинах, залегающих выше уровня грунтовых вод, составляет около 15—20% от общего объема пород (при полном их насыщении объемный вес увеличивается на 7—10%).

Интенсивность развития оползней этого вида довольно высокая. Так, в приведенном на рис. 68 примере оползня на Коркинском карьере, где параллельно верхней бровке уступа на расстоянии 30—40 *м* проходила водосточная канава, оползень менее чем за год продвинулся на 20 *м*.

На другом участке этого же карьера, на котором происходило скопление дождевых и талых вод, за 8 лет (с 1942 по 1950 г.) оползнем была охвачена площадка шириной в 56 *м* при высоте уступа около 10 *м*. Насыщенные водой оползшие глины и суглинки, оползая на нижележащие уступы угленосных пород, создали оползневой склон площадью около 40 тыс. $м^2$.

Такого рода оползни наблюдались на целом ряде угольных и рудных карьеров на тех участках, где происходит скопление дождевых, талых и промышленных вод.

К группе фильтрационных отнесены оползни, связанные с выносом (вымыванием и суффозией) пылеватых частиц, и оползни, связанные с другими видами деформаций откосов, возникающих на участках высачивания грунтовых вод: сплывами насыщенных водой песчаных глин, оплыванием песков и размыванием песчано-глинистых пород, подстилающих не оплывающие водоносные слои (трещиноватых опок, гравия и др.).

Наиболее часто такие оползни возникают под влиянием оплывания водоносных песков. При высачивании воды из песчаных откосов последние подвергаются оплыванию на участке высачивания.

Оплывшие пески располагаются под углом 10—18° и положе в зависимости от гранулометрического состава песков, при этом (рис. 69 и 70) происходит подработка (suffossio — означает

подкапывание) вышележащих песчано-глинистых отложений и их обрушение.

После этого обрушения возникает подпор грунтового потока, уровень которого при этом повышается, что еще больше ухудшает устойчивость и вызывает новые циклы обрушения. Насыщенные водой обрушившиеся породы располагаются под углом 10—12°.

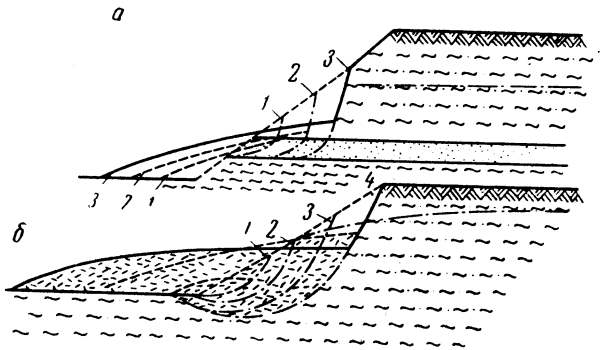


Рис. 69. Фильтрационные оползни:

а — при наличии слоя водоносных песков; *б* — откос песчаных глин; *1, 2, 3, 4* — последовательность участков деформации

Часто возникают оползни заоткошенных уступов, которые начинаются в виде сплыва на участке высачивания насыщенных до текучего состояния песчаных глин и глинистых песков.

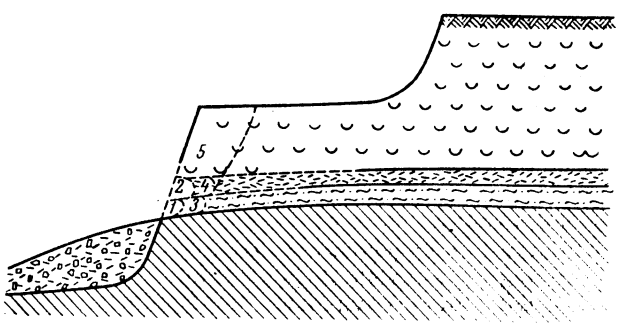


Рис. 70. Фильтрационный оползень с размыванием подстилающего водоносный горизонт слоя:

1, 2, 3, 4, 5 — последовательность участков деформации

Песчаные глины и глинистые пески имеют небольшую силу набухания (до 1—2 *кГ/см²*) и поэтому при разгрузке не разуплотняются на большую глубину, а при наличии заоткоски уступов не оползают широкими блоками, как это наблюдается в лёссовидных суглинках и вязких глинах. С другой стороны, их насы-

щение водой при разгрузке происходит до полной потери связности и превращения их в текучее состояние, вследствие чего и происходят сплывы поверхностных слоев мощностью не более 0,5—0,7 *м*.

После того как возникает первый сплыв, дальнейшее развитие происходит прогрессивно все более широкими блоками (рис. 69,*б*). Такие оползни наблюдались на Ермолаевском угольном карьере [175].

Реже наблюдаются на карьерах оползни, связанные с размыванием песчано-глинистых пород, подстилающих неоплывающие водоносные слои. Условием для возникновения этих оползней является положение подошвы водоносного слоя выше подошвы уступа. После размывания песчано-глинистого слоя происходит подработка вышележащих пород и их обрушение.

Примером оползней этого вида служит оползень, развивающийся на одном участке западного борта Коркинского карьера, где под слоем трещиноватых водоносных опок залегал слой глинистого песчаника, склонного к размоканию (рис. 70). На Ермолаевском карьере такого рода оползни развивались на участках, где водоносные галечники, подстилаемые песчаными глинами, выходят в откосы уступов выше их подошвы. Подобные же оползни происходят на Соколовском карьере, на тех участках, где подошва первого уступа опускается ниже олигоценовых водоносных песков, подстилаемых легко размокающими глинами разного состава.

Если неоплывающий водоносный слой находится у подошвы откоса, то он не приводит к образованию оползней до тех пор, пока поток грунтовых вод не окажется подпертым осыпью вышележащих пород. На Коркинском и Батуринском карьерах вследствие того, что уступы суглинков и глин на длительное время оставались незаоткошенными и происходил подпор осыпью вод опокового водоносного горизонта, мощность которого составляла около 1 *м*, наблюдались массовые оползни.

На тех участках, где опоковый горизонт был безводным, незаоткошенные уступы глин и суглинков высотой до 15 *м* сохраняли устойчивость в течение 2—3 лет, подвергаясь лишь осыпям.

На обводненных же участках устойчивость сохранялась лишь в течение того времени, пока происходил свободный выход воды из опокового горизонта; после того как он оказывался пригруженным осыпью, уровень грунтовых вод повышался, происходило подпитывание вышележащих глин и начиналось интенсивное развитие оползней.

§ 4. Покровные и контактные оползни

Покровные оползни характеризуются тем, что деформации подвергается покров рыхлых водонасыщенных пород, подстилаемый устойчивыми более крепкими породами, имеющими наклонную (пологую) поверхность.

Покровные оползни на карьерах подобны оползням делювиальных отложений по поверхности коренных пород на естественных склонах.

Значительное развитие эти оползни приобретают на нерабочих участках бортов, на которых длительное время накапливаются оползневые массы, образующиеся за счет разрушения уступов, сложенных более слабыми глинистыми породами. Вследствие большого увлажнения и значительного объема оползневые массы сползают на нижележащие уступы, создавая покров над более устойчивыми породами, сохраняющими естественную структуру (в дальнейшем называются коренными породами).

Оползневые массы сползают по неровной поверхности коренных пород в виде покрова, почему и называются покровными.

Большое развитие оползни этого вида имели на южном борту Коркинского карьера [175].

При разработке месторождений, примыкающих к склонам гор, сопок и возвышенностей, у основания которых имеются делювиальные отложения, возникают оползни делювиального покрова.

В 1961 г. на северо-западном борту Зыряновского карьера возникли оползни этого вида. На этом участке поверхность коренных пород была наклонена под углом 10—15°, а мощность делювиальных глин и суглинков изменялась в пределах 10—30 *м*, достигая в тальвеге древнего оврага 40 *м*.

В тех случаях, когда подвижки делювиальных отложений происходили до горных разработок и на контакте с коренными породами образовалась ослабленная поверхность, представленная древней поверхностью скольжения, возникающие оползни относятся к виду «контактных оползней».

Контактные оползни являются наиболее простым видом оползней и возникают при обводнении подрезанных снизу горными выработками ослабленных контактов между слоями пород, полого и наклонно падающими в сторону выемки. Поверхность скольжения на всем протяжении или на большей части проходит по поверхностям ослабления, по которым прочность значительно ниже, чем по другим направлениям.

Поверхностями ослабления часто являются контакты между слоями, а также дизъюнктивные нарушения, заполненные глинкой трения, и поверхности древних оползней. Если падение слоев в сторону выемки составляет более 25—30°, то вследствие небольшой прочности пород по контактам слоев по ним происходит обрушение пород сразу же после проведения выработки, поэтому подрезка таких контактов является недопустимой и по ним следует производить заоткоску уступов.

При залегании слоев положе 25—30° естественная прочность пород по контактам слоев достаточна для их удержания в равновесии по подрезанным контактам при высоте уступов до 15—20 *м* (в зависимости от ρ' и K' по контактам слоев). Однако вследствие обводнения и набухания пород с течением времени по та-

м контактам происходит сползание пород даже при углах на-
ния слоев не более 10—12°. Источником обводнения являются
ждевые и талые воды, а также грунтовые воды, высачиваю-
ися из вышележащих уступов и скапливающиеся на пло-
адках.

Исследования показывают, что поверхности скольжения оползней этого вида приурочены к контактам слоев трещиноватых водоводящих, песчаных или гравелистых пород и слоев набухающих пород: глин, аргиллитов или алевролитов. При этом у поверхности контакта с водопроводящим слоем слой глинистых пород толщиной не более 10—15 *мм* насыщается водой до текучего состояния. Вода, скапливающаяся на верхней площадке уступа, профильтровывается до водопроводящего слоя, стекает по нему и смачивает в течение длительного времени нижележащий слой водонепроницаемых глинистых пород, склонных к набуханию при снижении нагрузки.

Оползни этого вида наблюдались на всех месторождениях, сложенных наклонно- и пологозалегающими слоями глинистых пород: на Коркинском и Батуринском — в Челябинском буроугольном бассейне, на Богословском, Веселовском и Волчанском — на Северном Урале, на Экибастузском угольном, а также на Ермолаевском месторождении, на котором слои угленосных третичных песчано-глинистых отложений имеют в общем горизонтальное залегание, но смяты в мелкие диапировые складки.

Такого же рода оползни наблюдались и на Гороблагодатском железорудном месторождении, где некоторые контакты между слоями туфосланцевой толщи заполнены глинкой трения.

Оползни этого вида большей частью возникают на лежачем боку (нерабочий борт) отрабатываемых пластов полезного ископаемого и реже ими охватываются породы висячего бока, например в тех случаях, когда при односторонней разработке синклинальных складок горные работы подходят к их оси (Богословское и Волчанское буроугольные месторождения).

Обычно оползням подвергаются те участки, на которых происходит скопление воды.

Характерным признаком оползней этого вида является то, что векторы движения реперов, заложенных по поверхности оползня, параллельны наслоению пород на всем протяжении оползня от низа до верха.

§ 5. Глубинные оползни слоистых пород лежачего бока

Оползни этого вида возникают при разработке пластовых месторождений полезных ископаемых, сложенных слабыми глинистыми породами, на тех участках, где слои пород имеют наклонное или пологое падение в сторону выработанного пространства.

Морфологическим признаком оползней этого вида является поверхность скольжения, которая проходит большей частью по наслоению пород, а в нижней части оползня — пересекая слои.

Причиной возникновения этих оползней чаще всего является наличие напорных вод в слоистых породах лежачего бока; оползни этого вида также могут возникать вследствие крутых углов наклона борта.

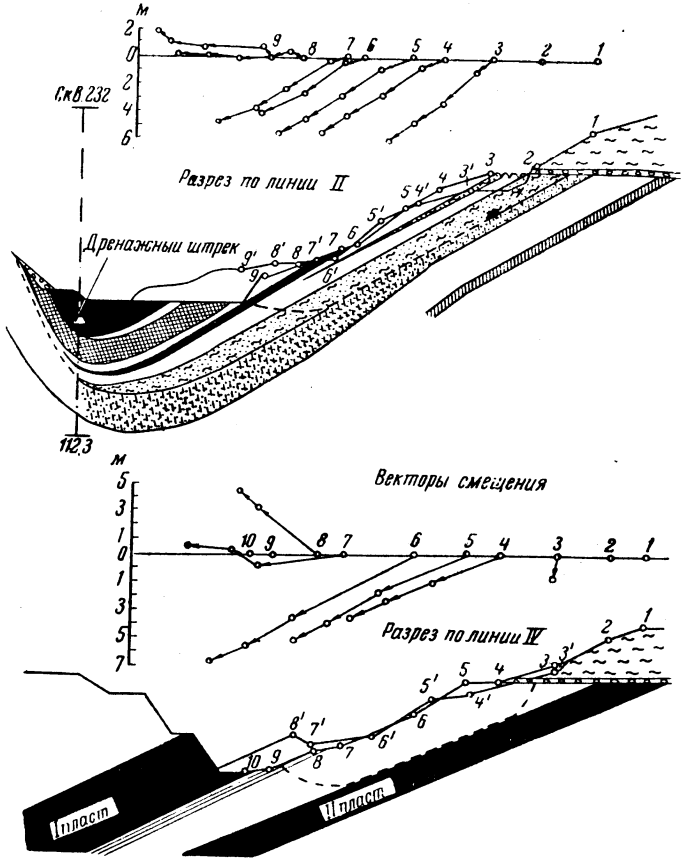


Рис. 71. Глубинные оползни пород лежачего бока на Батуринском угольном карьере

Наблюдавшиеся оползни этого вида имели наибольший объем в сравнении с оползнями других видов. Так, на Батуринском карьере в 1946 г. произошел оползень (рис. 71), охвативший борт лежачего бока по простиранию до 500 *м*, объемом более 1 млн. $м^3$, мощность сползающей толщи достигала 20—25 *м*. На карьере № 1 треста Вахрушевуголь оползень лежачего блока вначале охватил участок около 650 *м* по простиранию и до 250 *м* по падению,

а затем, действуя в течение 7 лет, увеличился до 900 *м* по простиранию и до 360 *м* по падению; поверхность скольжения залегала на глубине около 25 *м* от поверхности борта, а объем сползающих масс достигал 6 млн. $м^3$. Борт лежачего бока на карьере № 4 треста Волчанскуголь был охвачен оползнем на всем своем протяжении, достигающем 1,5 *км*. Объем оползающих масс вначале составлял около 5 млн. $м^3$, а при углубке карьера значительно увеличился; мощность сползающей толщи без учета навалов составляла 25—30 *м*.

Все эти оползни ранее были подробно описаны [175] и все они имеют одинаковую морфологию и динамику и одинаковые причины возникновения.

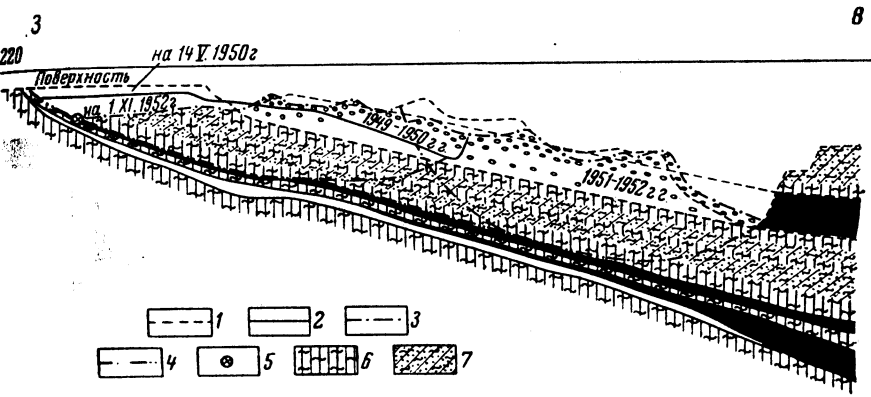


Рис. 72. Глубинный оползень пород лежачего бока на Волчанском угольном карьере

1 — контур поверхности борта до оползня; *2* — после оползня на 14.V-50 г.; *3* — после оползня на 1.IX-52 г.; *4* — поверхность скольжения; *5* — выход воды из угольного пласта; *6* — аргиллит; *7* — песчаник глинистый

Глубина Батуринского карьера ко времени возникновения оползня достигала 60—65 *м*. Разрабатываемый угольный пласт подстилался аргиллитами с прослойками алевролитов и песчаника с включением тонких угольных слоев, угол падения слоев составлял 25—30°, а угол наклона борта 18—28°. Слои песчаников и углей водоносны, а аргиллиты и алевролиты имеют высокую влажность и практически водоупорны. Угленосные породы прикрыты третичными отложениями опоковых глин и четвертичных суглинков общей мощностью 15—18 *м*, покровные отложения подстилаются слоем трещиноватых кремнистых водоносных опок мощностью 0,5—1,0 *м*.

Волчанский карьер № 4 (рис. 72) разрабатывал пласт угля мощностью 20—30 *м*, подстилающийся слоями аргиллитов, алевролитов и рыхлых песчаников на глинистом цементе общей мощностью 25—30 *м*, ниже этой толщи залегает свита водоносных угольных слоев (третья свита). Падение слоев составляло 15—20°,

а на выходах достигало 30°. Угленосные отложения прикрыты глинами и суглинками мощностью 8—10 *м*. Рельеф на участке открытых разработок представлял совершенно ровную заболоченную местность, уровень грунтовых вод совпадал с земной поверхностью.

На Богословском карьере лежачий бок был представлен слоями пестроцветных и бокситовидных глин мощностью 15—40 *м*, ниже которых залегали закарстованные сильно водоносные известняки.

Падение слоев составляло 10—20° с постепенным выполаживанием при углублении работ. Уровень грунтовых вод до начала разработок совпадал с земной поверхностью.

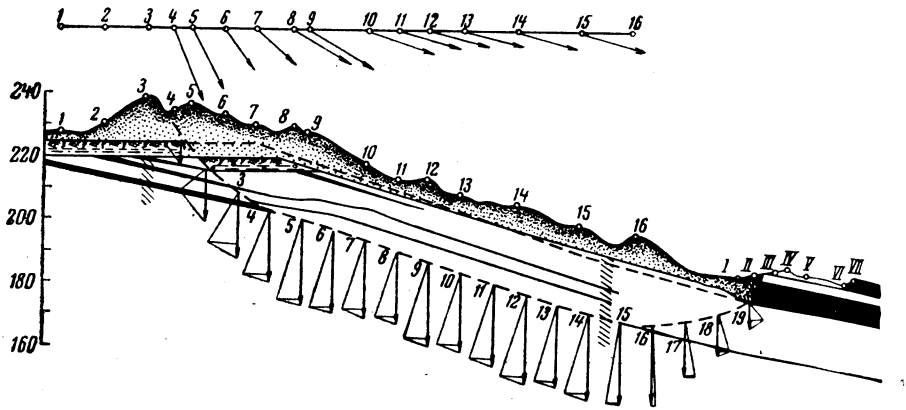


Рис. 73. Глубинный оползень пород лежачего бока на Веселовском угольном карьере

На всех карьерах производился дренаж разрабатываемого угольного пласта (на Богословском и Батуринском — штреками, а на Волчанском — водопонизительными скважинами); лежачий бок не дренировался.

Характер проявления оползней на всех карьерах был одинаковым: векторы сдвижения реперов, заложенных по поверхности оползней, в верхней и средней части были параллельны наслоению (исключая самый верхний участок у трещины отрыва, где наклон поверхности скольжения достигал 60—70°), а в нижней части выполаживались и в самом низу были направлены вверх (рис. 71).

На Батуринском карьере за два месяца перемещение реперов параллельно наслоению в средней части оползня достигло 16 *м*, а в нижней части произошло поднятие реперов до 6 *м*.

На Волчанском карьере № 4 поднятие пород в призабойной части достигало 7—10 *м*; на Богословском карьере маркшейдерская точка у угольного забоя за 3 месяца поднялась на 2027 *мм* и передвинулась к забою на 468 *мм*, а общая величина поднятия пород почвы у забоя достигала 5—7 *м*.

В результате наблюдений за оползневыми явлениями были сделаны следующие выводы:

1) поверхность скольжения проходит по плоскости напластования горных пород с углом наклона к горизонту от 6 до 15°, достигая местами 26°, и только в вершине оползня она имеет форму кривой с максимальным углом наклона 65—70°;

2) в призабойной части происходит поднятие (вспучивание) пород;

3) движение оползневого массива по всей площади происходит почти одновременно и с одинаковой скоростью;

4) глубина залегания поверхности скольжения достигает 22—25 *м* от поверхности борта.

При оценке причин образования этого оползня большинство исследователей и специалистов пришли к выводу, что основной причиной, вызвавшей образование оползня, являются своеобразные геологические условия залегания пород, которые при существующей высоте откоса «не смогли обеспечить устойчивого равновесия последнего». Слоистость глин и плоскости напластования представляют собой «ослабленную зону, по которой происходит перемещение верхних пластов в сторону падения». Оползанию способствовали также дополнительная нагрузка на грунт, создаваемая отвалами породы в выработанном пространстве, и движение поездов.

Действительная же причина образования этих оползней — напорные воды, залегающие в лежачем боку, — или совсем не отмечалась, или отмечалась лишь вскользь.

Учитывая, что уровень грунтовых вод до проведения открытых разработок совпал с земной поверхностью или был близок к ней, а при разработке слои пород лежачего бока не пересекались выработками и, следовательно, в них сохранялись высокие напоры, достигающие величины нормального давления веса вышележащих пород, и учитывая склонность этих пород к набуханию при снижении эффективного всестороннего давления, можно утверждать, что в таких условиях гидростатическое давление в породах лежачего бока оказывает решающее влияние на образование оползней.

Действительно, на участке, где глубина карьера составляет 40 *м*, в подстилающих породах на глубине 20 *м* от поверхности борта гидростатическое давление достигало 50—60 *м*, а эффективное давление в породах до разработки составляло около 135 $T/м^2$; если считать, что после разработки гидростатическое давление существенно не изменилось, то на глубине 20 *м* ниже подошвы карьера породы лежачего бока полностью поддерживаются гидростатическим давлением и вследствие этого получают возможность набухать и разуплотняться. Таким образом, гидростатическое давление не только уменьшает нормальное давление пород по наиболее слабой поверхности и силы трения по поверхности скольжения, но и способствует непрерывному

разуплотнению пород и уменьшению их прочности вследствие уменьшения эффективного давления в подстилающих породах от величины $H\gamma - D_0$ $T/м^2$ до величины $h\gamma - D_i$ $T/м^2$ (где H, h, D_0 и D_i — глубина залегания пород и величина гидростатического давления до начала разработки и к моменту возникновения оползня).

В тех случаях, когда причина образования оползней заключается не в разуплотнении пород, а в их недостаточной естественной прочности, — оползание пород начинается сразу же после проведения выемки. Если же устойчивость борта нарушается лишь по истечении значительного времени, то это происходит вследствие разуплотнения пород.

Вывод о разуплотнении пород вблизи поверхности скольжения подтверждается и данными разбуривания оползневого участка на Волчанском карьере, где наблюдалось увеличение влажности пород до 45—50% при приближении к поверхности скольжения, в то время как в верхних слоях влажность составляла 20—30%.

При наличии дренажных выработок в лежачем боку на Коркинском, Волчанском № 1 и Волчанском № 3 карьерах, характеризуемых такими же геологическими и гидрогеологическими условиями, глубинные оползни пород лежачего бока не возникали, несмотря на то, что на Волчанском № 1 и Волчанском № 3 карьерах падение слоев и наклон борта достигали 30—35°, а глубина карьеров составляла около 80 *м*.

§ 6. Оползни выпирания и оползни-надвиги

Оползни выпирания и оползни-надвиги являются глубинными оползнями слоистых пород висячего бока.

Глубинные оползни слоистых пород висячего бока происходят значительно реже, чем пород лежачего бока. Это объясняется тем, что в породах висячего бока, вследствие подрезки (пересечения) слоев пород горными выработками, не сохраняются высокие напоры воды и, кроме того, борт висячего бока, являясь рабочим, находится в непрерывном движении и обновлении и поэтому набухание и разуплотнение пород не успевает развиваться в такой степени, при которой возникают оползни.

Наблюдавшиеся глибинные оползни слоистых пород висячего бока большей частью связаны с наличием водоемов вблизи карьера или с интенсивным обводнением пород дождевыми, талыми или грунтовыми водами. Фактором, способствующим возникновению оползней этого вида, является наличие в основании борта (или в его средней части) слабых контактов между слоями или слоев пластичных глин.

Причиной возникновения оползней этого вида наряду с обводненностью пород могут являться и завышенные углы наклона борта.

Оползни-надвиги характеризуются тем, что в нижней части оползня поверхность скольжения проходит по ослабленному контакту между слоями или по слабому пластичному прослойку, полностью пересеченному бортом, а средняя и верхняя часть поверхности скольжения пересекает слои.

Оползни выпирания характеризуются тем, что в их основании залегают не пересеченные бортом слабые контакты или слои слабых пластичных глин, прочность которых значительно меньше прочности вышележащих пород.

Поверхность скольжения при оползнях выпирания опускается ниже подошвы выемки (карьера, траншеи и др.) и в нижней ча-

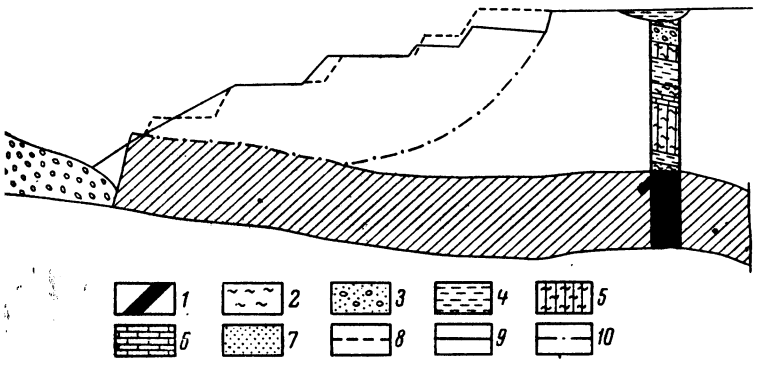


Рис. 74. Оползень висячего бока на Богословском карьере:

1 — уголь; *2* — глина; *3* — галечник с песком; *4* — песчаник глинистый; *5* — аргиллит; *6* — песчаник известковистый; *7* — отвалы; *8* — профиль борта до оползня; *9* — профиль борта после оползня; *10* — поверхности скольжения

сти выходит на дневную поверхность в некотором расстоянии от нижней бровки откоса, а перед откосом образуется вал выпирания.

На оползни выпирания существенное влияние могут оказывать напорные воды водоносных слоев, залегающих ниже подошвы выемки.

Ниже описываются примеры оползней висячего бока.

1. Оползень-надвиг висячего бока наибольшего объема произошел на восточном борту Богословского карьера в апреле 1946 г. Оползень охватил пять вскрышных уступов по простиранию до 600 *м*. Общий угол наклона борта на этом участке до оползня составлял 18—21°, а общая высота оползневого участка борта составляла в среднем 54 *м* (рис. 74). После оползания угол откоса пород составил от 11°30′ до 18°. Породы, покрывающие угольный пласт, состояли из рыхлых песчаников на слабом глинистом и известковом цементе (25%), слабоуплотненных алевролитов и аргиллитов. На расстоянии 300 *м* от верхней бровки карьера находился большой водоем, образовавшийся после отработки вышележащего угольного пласта; из этого водоема происходила

фильтрация воды в покрывающие породы. Из откосов уступов происходило струйчатое истечение воды.

Породы на этом участке имели большую влажность и низкую прочность, о чем свидетельствует обрушение нижнего породного уступа высотой 15 *м*, происшедшее за 20 дней до возникновения большого оползня; размеры обрушения составили до 30 *м* по простиранию и до 15 *м* по ширине. Причиной оползня следует считать наличие водоема вблизи борта.

2. Ряд оползней-надвигов значительного объема наблюдался в 1960—1962 гг. на Шевченковском карьере треста

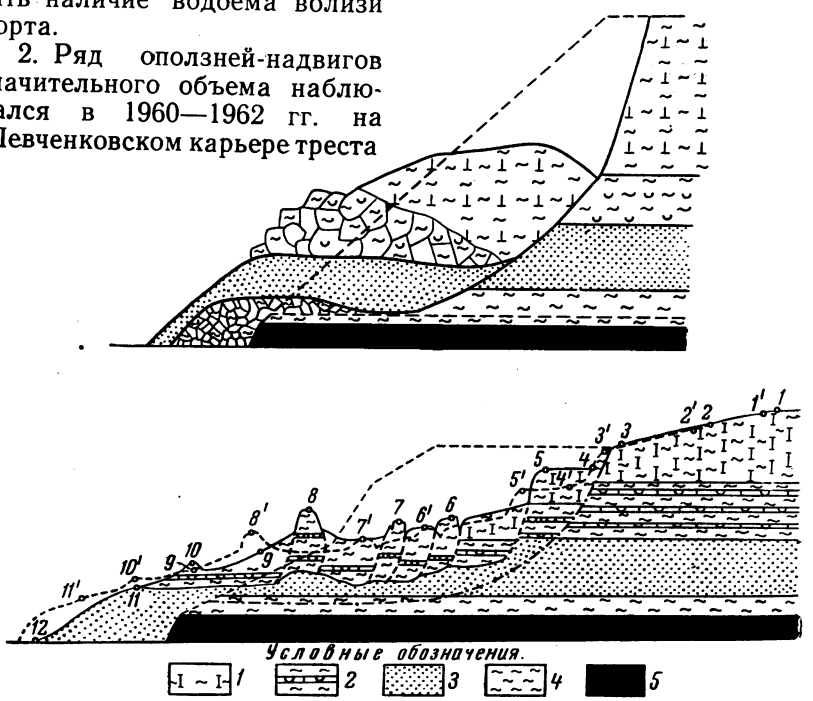


Рис. 75. Оползни-надвиги на Шевченковском карьере:

1 — переслаивание светло-серых и серо-зеленых мергельных глин; *2* — черные и темно-серые сланцеватые глины; *3* — песок кварцевый среднезернистый; *4* — глина надрудная; *5* — марганцевая руда

Никополь-Марганец. Оползням подвергался надрудный уступ, сложенный мергельными глинами и песками, ниже которых залегали два слоя жирных глин.

Контакт между этими слоями глин был представлен ослабленной поверхностью с величиной сцепления 0,1—0,3 *кГ/см*^{2}, что в 3—4 раза меньше сцепления самих слоев глин. По этому контакту, после выемки очередной заходки, повсеместно (в том числе и на соседнем Богдановском карьере) возникал надвиг в виде нависающего «козырька», достигающего 40—60 *мм*.

Поперечные разрезы этих оползней представлены на рис. 75. Оползнями охватывались длительное время необновлявшиеся участки уступа, на которых имелось скопление воды.

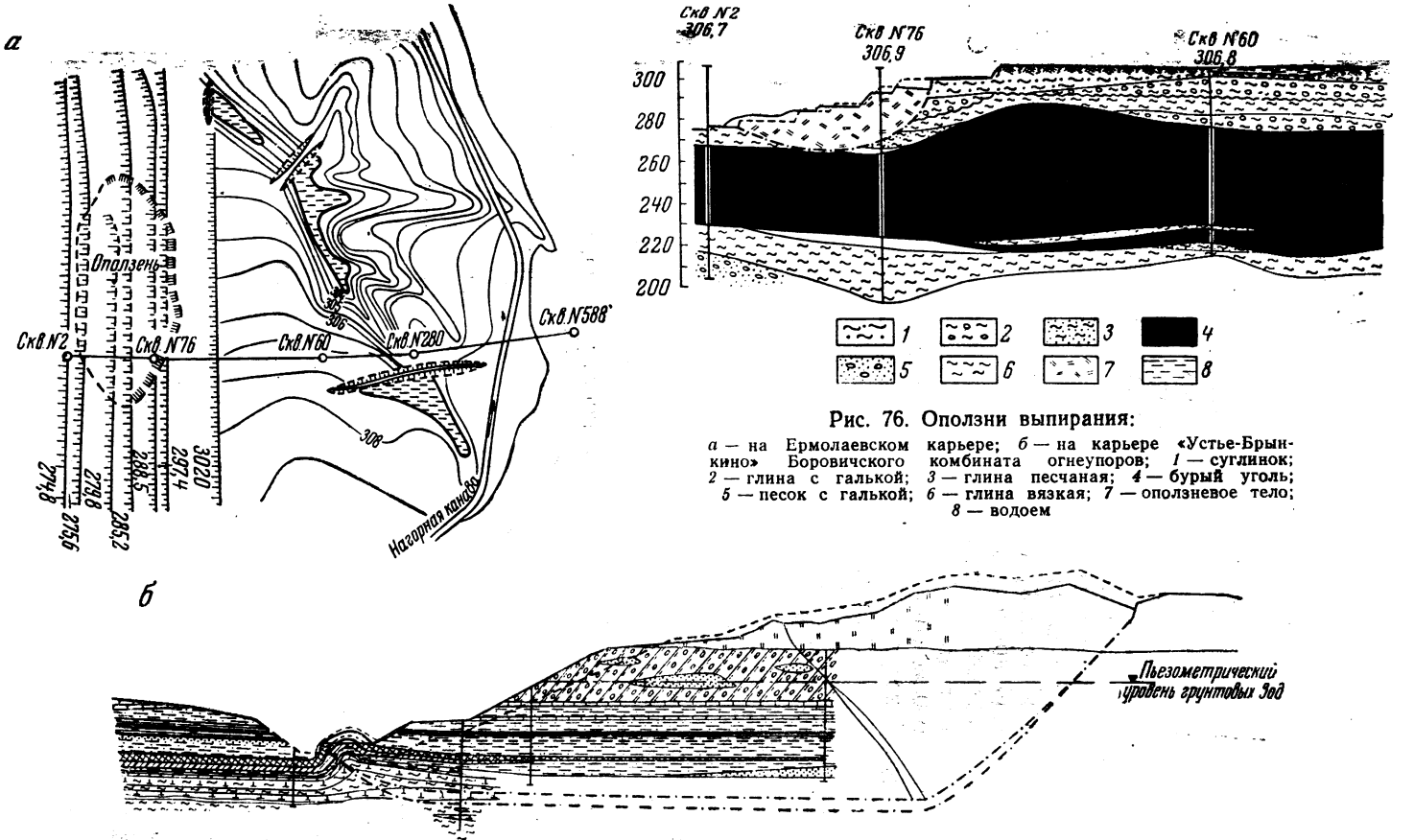


Рис. 76. Оползни выпирания:

а — на Ермолаевском карьере; *б* — на карьере «Устье-Брынкино» Боровичского комбината огнеупоров; *1* — суглинок; *2* — глина с галькой; *3* — глина песчаная; *4* — бурый уголь; *5* — песок с галькой; *6* — глина вязкая; *7* — оползневое тело; *8* — водоем

3. Оползень выпирания пород висячего бока произошел в ноябре 1954 г. в северной части восточного борта Ермолаевского буроугольного карьера (теперь Кумертауский карьер). Протяженность оползня по простиранию составляла около 220 *м*, высота оползневого участка 23 *м*, угол наклона борта до оползня составлял 16—22°. Объем оползающих масс достигал 150 тыс. $м^3$. Борт был сложен суглинками мощностью 10—15 *м*, переходящими в нижней части в глинистые галечники мощностью 4—6 *м*, ниже которых залегали зеленоватые пластичные глины.

На расстоянии 110 *м* от оползня во впадине земной поверхности образовался водоем, площадь которого к моменту возникновения оползня составляла 1800 $м^2$, а в весенний период достигала 7000 $м^2$ (рис. 76, *а*).

Оползень проявился оседанием на 5—6 *м* площадки верхнего уступа, перемещением на запад второго уступа горизонта 290 *м* и поднятием до 2—3 *м* и перемещением на запад площадки горизонта 280 *м*. Причиной возникновения оползня явилось наличие скоплений воды вблизи борта, вследствие чего по всей высоте борта происходило высачивание воды и все площадки уступов были обводнены. В этих условиях на возникновение оползня оказало влияние гидростатическое взвешивание пород и их набухание.

4. Оползень выпирания объемом до 1 млн. $м^3$ возник в 1963 г. на карьере «Устье-Брынкино» Боровичского комбината огнеупоров (рис. 76, *б*). Причиной возникновения оползня явились не установленные разведкой тонкие слои жирных глин, залегающие в подошве полезного ископаемого, напорные воды и близкое расположение внешних отвалов на борту. Возникновению оползня способствовала также заболоченность участка.

§ 7. Оползни внутренних и внешних отвалов

Внутренние и внешние отвалы твердых пород, а также песков и гравелистых пород, размещаемые по поверхности плотных неслоистых пород, сохраняют устойчивость при углах естественного откоса, изменяющихся в пределах 34—37°, практически при любой их высоте.

Оползням подвергаются отвалы любых пород, размещаемые на слабом основании, или отвалы слабых глинистых пород, размещаемых на устойчивом и неустойчивом основании. С. И. Поповым [111] предложено все оползни отвалов разделять на три вида — надподошвенные, подошвенные и подподошвенные.

Надподошвенными называются оползни песчано-глинистых пород, размещаемых на устойчивом основании. Они возникают при определенной высоте отвала (при естественном угле откоса), зависящей от механических свойств пород в образце и от характера отвалообразования. Если откосу отвалов придается угол меньше угла естественного откоса, то предельная высота отвала,

при которой начинают развиваться оползни, зависит также и от этого угла.

Слабые песчано-глинистые породы в отвалах небольшой высоты имеют рыхлое сложение и большая часть кусков породы сохраняет свою форму. С увеличением высоты отвалов увеличивается давление на отдельные куски породы, наиболее слабые из которых разрушаются и заполняют макропоры, приводя к уплотнению отвалов и их оседанию. Процесс уплотнения и оседания отвалов без возникновения оползней происходит до тех пор, пока массив отвала не достигнет состояния, близкого к двухфазному (порода—вода; какая-то часть защемленного воздуха в породах при этом остается).

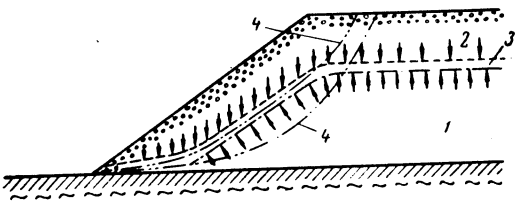


Рис. 77. Схема к пояснению причины появления зоны повышенной влажности в отвалах песчано-глинистых пород:

1 — зона двухфазного состояния; *2* — зона трехфазного состояния; *3* — зона повышенной влажности; *4* — возможные положения поверхности скольжения

При дальнейшем увеличении высоты отвала уплотнению пород препятствует поровая вода и уплотнение может происходить лишь путем отжима воды из области высоких напряжений в область низких напряжений; при этом в отвальных породах развивается неравномерное поровое давление. Появление порового давления снижает силы трения по потенциальной поверхности скольжения и приводит к возникновению оползней.

Величина нагрузки, при которой происходит полное уплотнение отвала и появляется поровое давление, зависит от свойств самой породы и от степени ее влажности.

Разбуриванием оползней отвалов на Богдановском и Михайловском карьерах было установлено, что на границе между зонами двухфазного и трехфазного состояния влажность пород значительно выше, чем в самих зонах, и выше естественной. Это объясняется тем, что частично происходит отжим воды из зоны двухфазного состояния, а атмосферные осадки, проникая по макропористой среде, достигают уплотненной зоны и поглощаются породами в узкой зоне над уплотненным ядром, где они еще сохраняют макропористую структуру и не имеют полной водонасыщенности.

На рис. 77 изображена схема, иллюстрирующая движение воды в зону *3* как снизу, так и сверху.

Зона повышенной влажности часто оказывается поверхностью скольжения, особенно если отсыпка породы в отвал производится с перерывами.

Пример оползней внешних отвалов суглинков и глин, наблюдавшихся на Ермолаевском карьере, представлен на рис. 78.

Причиной их возникновения являлась большая влажность пород, которые увлажнялись еще в рабочих уступах из-за отсутствия стока дождевых, талых и грунтовых вод с площадок. При высоте 15—25 *м* отвалы после оползания приобретают угол откоса 10—12°.

Наблюдения показывают, что после возникновения оползня на экскаваторных и бульдозерных отвалах по поверхности скольжения сопротивление горных пород сдвигу уменьшается в сред-

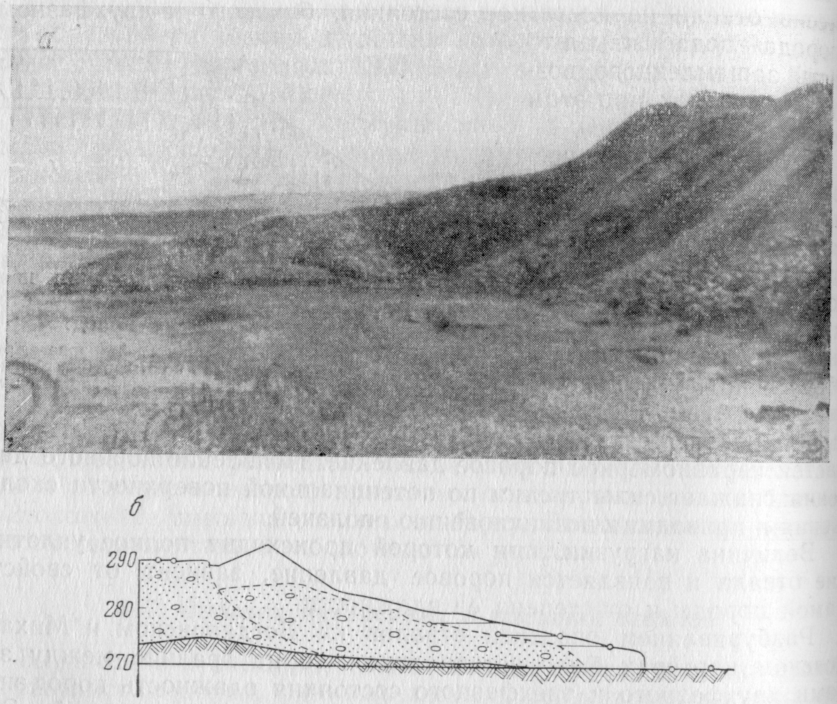


Рис. 78. Оползни внешних отвалов на Ермолаевском карьере:
а — общий вид; *б* — разрез по линии наблюдений

нем в два раза вследствие полного разрушения структуры пород при скольжении.

На оползнях мостовых отвалов на Камышбурунском карьере вследствие высокого падения отвальных пород от головки конвейера до поверхности откоса происходило полное разрушение структуры породы и она превращалась в грунтовую пасту еще до возникновения оползня. При этом более пластичные глины скатывались по откосу в его основание, а более песчаные оставались в верхней и средней части откоса.

На Богдановском карьере треста Никополь-Марганец на обводненное основание отвалов отсыпались пластичные красно-бу-

глины и суглинки слоем до метра, чтобы поднять автомобильную дорогу над водой, скапливающейся в основании отвала. Таким образом, в основании отвала создавался слой обводненных пластичных пород (рис. 79).

Причиной появления надподошвенных оползней отвалов песчано-глинистых пород могут являться также атмосферные осадки. Если на увлажненную длительными дождями поверхность глинистых откосов отсыпается новый слой пород, то увлажненный слой пород может явиться поверхностью скольжения, по которой происходит оползание пород. Такое же влияние может оказывать и снеговой покров при отсыпке на него слоя пород в период таяния.

Надподошвенные оползни отвалов пылеватых песков при большом насыщении водой могут с течением времени перейти в оплывину.

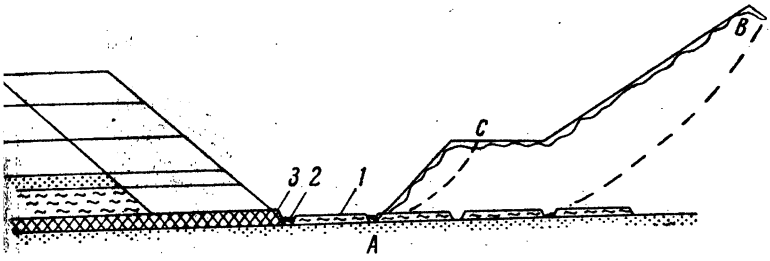


Рис. 79. Оползни отвалов на Богдановском карьере:
1 — автомобильная дорога, отсыпаемая пластичными бурыми глинами; 2 — скопление воды на почве пласта; 3 — рудный пласт; AB — поверхность скольжения

Подподошвенные оползни отвалов возникают при их размещении на слабом основании — на заболоченных участках или на обводненных пластичных породах лежачего бока. По характеру проявления и причинам возникновения эти оползни подобны оползням выпирания слоистых пород висячего бока. Если же внутренние отвалы располагаются по лежачему боку при углах наклона более 5°, эти оползни отвалов подобны глубинным оползням слоистых пород лежачего бока. Основным внешним признаком этих оползней, по которому они отличаются от надподошвенных и подошвенных оползней, является наличие вала выпирания пород основания, возникающего перед откосом отвала.

Причиной возникновения оползней этого вида могут являться низкая природная прочность пород основания отвалов, их дополнительное увлажнение за счет поверхностных и напорных вод, а также гидростатическое давление напорных вод по поверхности скольжения.

Этот вид оползней имел большое распространение на Богословских и Веселовских карьерах треста Вахрушевуголь. Пример выпирания пород между откосом отвалов и угольным забоем приведен на рис. 80, *а*. Этими оползнями охватывалась

призабойная полоса внутренних отвалов шириной 150—250 *м*; подн нятия почвы пласта у забоя достигали 4—7 *м*. Общий вид подпо дошвенных оползней внутренних отвалов изображен на рис. 80, б

Особенно ускоряется образование подподошвенных оползне при большой высоте внутренних отвалов вдали от угольного забо и небольшой их высоте у забоя. При равномерной высоте отвал и максимальном приближении его к угольному забою, когда в наибольшей степени нагружается горизонтальная часть поверх

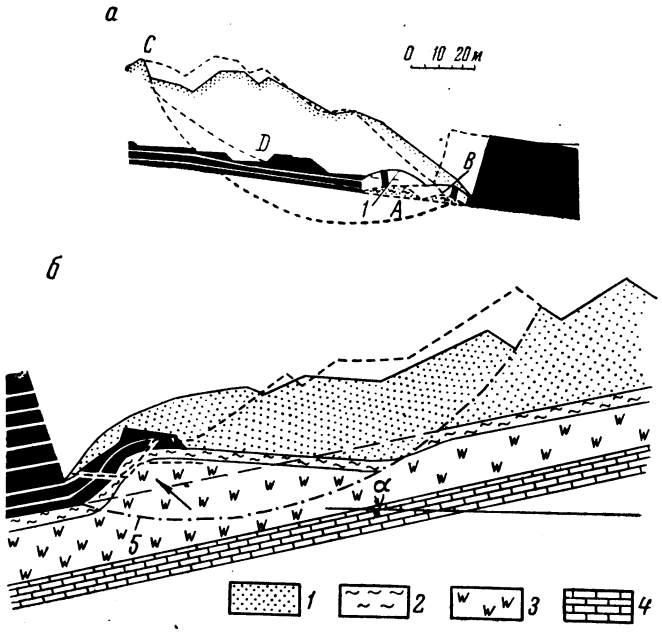


Рис. 80. Оползни внутренних отвалов:

а — оползень на Богословских карьерах: *1* — контур выдавленного угля; *б* — общий вид подподошвенных оползней: *1* — отвалы; *2* — бокситовидные глины; *3* — пестроцветные глины; *4* — известняки

ности скольжения, условия устойчивости отвалов улучшаются; например, на Богословском карьере при увеличении высоты предотвала с 12—15 до 25—30 *м* устойчивость отвалов заметно улучшилась.

Подошвенные оползни отвалов возникают в тех случаях, когда их основанием являются слоистые породы, по контактам которых характеристики сопротивления сдвигу малы. Поверхность скольжения при оползнях этого вида в нижней части проходит по слабым контактам основания в непосредственной близости к поверхности основания. Углы наклона слоев, при которых появляются эти оползни, зависят от характеристик ρ' и K' по контактам слоев и от высоты отвала; при одних и тех же характеристиках, чем

больше угол наклона слоев, тем при меньшей высоте отвала начнутся оползни; расчеты показывают (см. четвертую часть), что такие оползни возможны не только при пологом и наклонном залегании, но и при горизонтальном залегании слоев пород основания.

Такие оползни происходят в Томь-Усинском районе Кузбасса.

§ 8. Просадки и оплывины

Просадки и оплывины при открытых разработках в СССР наблюдаются значительно реже, чем первые три вида деформаций бортов, однако на карьерах ГДР оплывины отвалов в послевоенные годы возникали довольно часто.

Просадки, характеризующиеся вертикальным опусканием (перемещением) прибортовых участков рыхлых породных масс без образования сплошной поверхности скольжения, на бортах карьеров довольно часто являются начальной стадией образования оползней, например оползней выпирания или подподошвенных и надподошвенных оползней отвалов. Наблюдаются случаи, когда после образования просадки дальнейшее развитие деформации прекращается (Еманжелинские угольные карьеры).

Причинами возникновения просадок являются:

1) насыщение водой высокопористых рыхлых пород — лёссов и лёссовидных суглинков, имеющих легко растворимые соли, цементирующие скелет, 2) уплотнение отвалов рыхлых пород при их увлажнении и 3) слабые пластичные слои в основании откоса.

Оплывины или сплывы, так же, как и просадки, могут являться начальной стадией оползнеобразования, например фильтрационных оползней при сложении откосов песчаными глинами и песками разного состава. В оплывины могут переходить покровные и фильтрационные (суффозионные) оползни при их насыщении водой до текучего состояния. Примером этого вида оплывин является возникшая в 1950 г. на Коркинском карьере оплывина, охватившая до 20 тыс. $м^2$ поверхности борта.

На этом участке борта на размытой водоупорной поверхности угленосных пород залегает слой трещиноватых водоносных опок мощностью не более 1 *м*, выше которых располагались бурые глины и суглинки мощностью 8—10 *м*.

В 150—200 *м* от борта был расположен искусственный водоем, питающий опоковый водоносный слой. Воды опокового слоя обильно обводняли площадку первого уступа, создавая фильтрационные оползни, которые при большом накоплении оползневых масс переходили в покровные оползни. Ко времени первой серии наблюдений по реперам оползневыми массами были покрыты уже три уступа. Отсутствие регулированного стока опоковых вод (а также и атмосферных) способствовало еще большему насыщению водой оползневых масс. Активизация этого оползня и его переход в оплывину были вызваны тем, что, с целью обновления

первого уступа, по суглинкам была пройдена экскаватором одна заходка и породы были сброшены на оползневые массы первого уступа. Это вызвало бурные подвижки оползневых масс и в течение трех дней ими были заполнены третий породный уступ и три нижележащих угольных уступа.

Повторная съемка по временным кольям, забитым в места закладки реперов в первой серии наблюдений, показала, что все участки коренных пород, выступающие на профилях (над бровками уступов коренных пород), оказались на прежних местах по высоте и в плане. Последнее подтвердило, что коренные породы в движении не участвовали, а двигались лишь насыщенные водой суглинки и глины, огибающие при движении «пороги» коренного массива.

Такая же оплывина возникла на этом участке и в 1960 году.

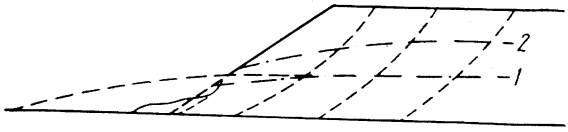


Рис. 81. Развитие оплывины пылеватых песков

На одном из карьеров Калининградского совнархоза возникли крупные оплывины среднего яруса отвалов [154], имеющего высоту 20—26 *м*. В отвал размещались мелкозернистые пылеватые пески и валунные глины.

При насыщении водой эти породы легко переходили в текучее состояние. Возникновению оплывин предшествовал период интенсивных дождей. За два месяца (август—сентябрь) в районе выпало 328 *мм* осадков. Из-за отсутствия стока дождевых вод с поверхности отвалов произошло полное их насыщение водой и они перешли в текучее состояние. 7 ноября 1957 г. в южной части среднего яруса отвала внезапно произошло оплывание 120 тыс. $м^3$ отвальных пород, а в феврале 1958 г. на смежном участке произошла оплывина объемом до 290 тыс. $м^3$. В течение нескольких минут оплывающие породы заполнили разрезную траншею, вследствие чего добычные работы были прекращены. Поверхность оплывины имела уклон в сторону рабочего борта, равный 4—6°. Из смещенных грунтов первое время во многих местах небольшими ручьями вытекала вода.

Большое число оплывин большого объема в послевоенные годы возникло на старых отвалах буроугольных карьеров ГДР.

Оплывины обычно носят катастрофический характер и опасны для горных разработок и для жилых поселков, расположенных вблизи старых отвалов.

Возникновение оплывин старых отвалов пылеватых глин и песков представляется нам в следующем виде. При отсыпке в отвалы неводонасыщенные пылеватые пески и глины имеют рыхлое

сложение и располагаются под углом естественного откоса (34—36°). При постепенном насыщении их водой, когда уровень воды в отвалах поднимается в положение *1* (рис. 81), начинается высачивание воды у основания откоса отвалов и возникают небольшие сплывы на участке высачивания. При обильном выпадании осадков уровень воды в отвалах быстро повышается и фильтрационные деформации захватывают все бо́льшую высоту откоса. Условия для возникновения массовой оплывины возникают при таком уровне воды в отвалах, при котором средняя влажность пород достигает предела текучести. Как известно, влажность на пределе текучести пылеватых глин и песков составляет 20—25%; если пористость пылеватых пород в отвалах составляет 30—35%, то для того, чтобы средняя влажность пород в отвалах достигла предела текучести, необходимо, чтобы уровень воды поднялся на высоту не более 50% высоты отвала.

Влажность на пределе текучести является условием плывучести пород, а условием предельного состояния в откосе является уравнение (34).

§ 9. Морфология и динамика деформаций бортов карьеров

Приведенные в § 2—8 примеры последовательности развития деформаций откосов в некоторой степени характеризуют их морфологию и динамику.

Изучение морфологии и динамики оползневых явлений имеет значение для разработки мер борьбы с ними. Почти все виды деформаций имеют начальную стадию развития, устанавливаемую визуально или путем инструментальных наблюдений.

Каждой группе деформаций соответствует определенный характер начального периода их развития.

Интенсивному развитию осыпей предшествует устанавливаемое визуально значительное выветривание пород и отделение от массива и выпадение отдельных, более выступающих блоков породы; при этом создаются нависи более крупных блоков, а затем наступает и их выпадение.

Фильтрационным оползням предшествуют видимые первые признаки размывания залегающих ниже водоносного слоя слабых пород или сплывов очень тонких слоев на заоткошенной поверхности песчано-глинистых откосов.

Обрушения больших массивов наступают после продолжительного периода микродеформаций, устанавливаемых путем инструментальных наблюдений.

Затухающие деформации оседания и смещения в сторону выемки до 20—30 *мм* наблюдаются даже на бортах, сложенных крепкими скальными породами и имеющих угол наклона не более 30°. Если с течением времени деформации не затухают, а наоборот, возрастают, на этом участке следует ожидать обрушения. Менее заметные микродеформации отмечаются перед обрушением

по крупным поверхностям ослабления, имеющим углы падения более 40—50°, когда производится быстрая их подрезка на широком фронте.

При развитии оползней больших массивов начальный период проявляется неодинаково у различных групп оползней: если поверхность скольжения полностью или только в нижней части проходит по поверхностям ослабления (контактные и оползни-надвиги), то начальный период оползнеобразования менее продолжительный, а суммарные деформации за этот период невелики; при зарождении глубинных оползней лежачего бока, оползней выпирания, оползней изотропных пород и других видов, у которых поверхность скольжения на всем протяжении или только в нижней части не совпадает с поверхностями ослабления, наблюдается начальный период более длительный и с большими величинами деформаций.

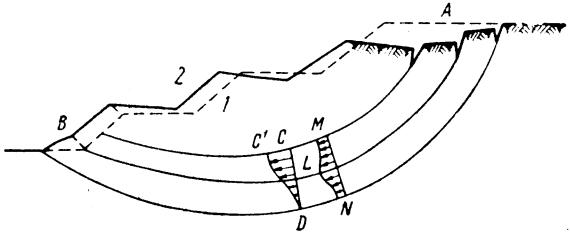


Рис. 82. Схема развития оползня и поверхности скольжения:

1 — поверхность до оползня; *2* — после оползня; *MLN* — эпюра касательных напряжений; *CD* — эпюра смещений

Динамика развития оползней последней группы может быть охарактеризована следующим образом.

Пластическое состояние горных пород (область ползучести) характеризуется широкой зоной напряжений, в которой скорость пластической деформации возрастает от нулевой до бесконечно большой (см. рис. 40). Исходя из этого, и в массиве борта, находящемся в неустойчивом состоянии, в средней части области пластических деформаций напряжения и деформации больше, чем к ее границам (верхней и нижней), за которыми пластические деформации отсутствуют.

На рис. 82 график скоростей деформации сдвига изображен линией *MLN*, а величины перемещения массива изображены линией *C'D*. Оседание массива на верхней площадке оползневого участка будет близко по величине с отрезком *CC'*. Такой характер деформаций и перемещений наблюдается в довольно однородном изотропном массиве.

Если в области потенциальной поверхности скольжения имеется поверхность ослабления, то состояние, близкое к предельному по этой поверхности, наступает при таких напряже-

ниях, которые еще не вызывают пластического деформирования массива, прилегающего к этой поверхности, и поэтому наблюдаемые перемещения развиваются лишь за счет скольжения пород по поверхности ослабления. Так как зона слабых пород может быть очень маломощной или представлена даже только контактом между слоями, то возникающие до полного среза пород пластические деформации могут иметь небольшие величины.

С другой стороны, появление значительных перемещений верхней части оползневого массива до образования полного среза пород по поверхности скольжения определяется также и ее криволинейной формой — крутой вверху и пологой внизу. Вследствие этого оползающий массив разделяется на две части, из которых верхняя располагается по отрезку поверхности скольжения с углом падения, большим угла внутреннего трения (призма активного давления), и удерживается в равновесии лишь при наличии упора со стороны нижней части, называемой призмой упора. Последняя располагается на отрезке поверхности скольжения, наклоненном под углом менее ρ, и не может оползать под собственным весом, а смещается лишь под влиянием давления на нее верхней части.

Наибольшей величины напряжения достигают в средней части поверхности скольжения на границе призмы упора и призмы активного давления. Поэтому пластические деформации начинают проявляться прежде всего в средней части потенциальной поверхности скольжения, где напряжения наибольшие; эти деформации проявляются в форме выпучивания в сторону наименьших нормальных напряжений при отсутствии подвижек нижней части массива. Вследствие деформации средней части верхняя часть оползневого массива начинает проседать и в ней образуется трещина — «закол». С течением времени область выпучивания расширяется и перемещается книзу, в верхней части образуется поверхность скольжения; оседание «заколовшегося» массива при высоком борте может достигать 3—5 *м*, в то время как в нижней его части полного среза пород еще не происходит, а наблюдается лишь выпучивание пород.

Скорость оседания «заколовшегося» массива составляет в этот период развития оползня 10—30 *мм/сутки*. С увеличением поверхности среза пород скорость движения оползня увеличивается и к моменту полного среза по всей поверхности достигает 400—600 *мм/сутки*.

При пологих бортах процесс развития полной поверхности среза длится 3—4 месяца и более, и при надлежащем надзоре развитие оползня может быть приостановлено.

В первый период развития оползня, когда происходит пластическая деформация средней части оползневого массива, в его верхней части на прибортовой полосе земной поверхности образуется не одна трещина «закола», а целая серия «заколов» в виде параллельных дугообразных трещин, по которым происходит ступенчатое оседание оползневого массива. При этом скорости сме-

щения по всем трещинам бывают неодинаковы. С течением времени скорости смещения по одной из трещин становятся преобладающими, а по другим — затухают.

К моменту полного развития поверхности среза по всей высоте смещение происходит по одной поверхности скольжения.

В некоторых случаях оползни не достигают полного развития и полного среза пород по замкнутой поверхности скольжения не происходит, а после выпучивания нижней части оползневого массива и проседания верхней части оползневые явления затухают. Если на таких участках с течением времени возобновляется действие факторов, способствующих развитию этих явлений, то происходит активизация ранее остановившегося оползня.

Большое влияние на развитие оползней оказывает процесс набухания глинистых пород.

В естественных условиях в течение продолжительного времени устанавливается равновесие между внешними силами, обусловливаемыми весом вышележащих пород, и внутренними силами, характеризующимися сложным и слабо изученным взаимодействием механических и физических свойств минеральных частиц и поровых растворов.

После проведения горных выработок естественное равновесие нарушается и начинается процесс изменения физических и механических свойств горных пород. Одним из наиболее существенных является процесс набухания, который приводит не только к разуплотнению глинистых пород, но и к уменьшению эффективных нормальных напряжений, что уменьшает силы трения, удерживающие откос в равновесии в первое время после проведения горных выработок.

Существенным и еще менее изученным является изменение состава обменных катионов, возникающее вследствие изменения режима грунтовых вод.

Все эти изменения происходят постепенно, следствием чего является и постепенное развитие оползней с течением времени. Влияние времени на развитие оползней в количественном отношении можно считать совсем не изученным.

Глава XIII

МАРКШЕЙДЕРСКИЕ НАБЛЮДЕНИЯ ЗА ДЕФОРМАЦИЕЙ БОРТОВ КАРЬЕРОВ

§ 1. Цель и задачи маркшейдерских наблюдений

Для установления формы оползня, а также для выявления причины его возникновения и характера развития во времени и пространстве на оползневых участках производят маркшейдерские инструментальные наблюдения.

Эти наблюдения производят или по створу реперов, заложенных по откосу в направлении сдвижения пород, или по отдельным характерным точкам деформирующегося массива; в последнем случае они называются упрощенными.

Наблюдения проводятся также на тех участках, где нет видимых деформаций бортов, но где они могут возникнуть. Целью наблюдений на этих участках является установление микроподвижек и их развития с тем, чтобы своевременно провести необходимые мероприятия по предотвращению опасных деформаций.

Детальное изучение характера деформирования горных пород в лабораторных и натурных условиях убеждает нас в том, что хорошо поставленные инструментальные наблюдения за процессом деформации бортов дадут возможность производить расчеты устойчивости бортов с меньшим коэффициентом запаса и в значительной степени увеличивать углы их наклона по сравнению с углами, устанавливаемыми путем расчета при большом коэффициенте запаса.

Для этой цели необходимо на каждом карьере закладывать наблюдательные станции и устанавливать для различных геологических и горнотехнических условий критические скорости деформации или критические суммарные деформации.

Как показывают результаты изучения оползневых явлений, вследствие ползучести горных пород, быстрому проявлению крупных деформаций бортов обычно предшествуют микродеформации, развивающиеся в течение длительного времени. Даже в условиях скальных пород обрушения больших массивов возникают не мгновенно. Например, на Абаканском карьере при приближении горных работ к тектоническому нарушению, расположенному диагонально борту и пересекающему в подошве карьера рудную залежь, на прибортовом участке земной поверхности вдоль тектонического нарушения возникла трещина отрыва и затем в течение длительного времени наблюдалось постепенное смещение массива, ограниченного этой трещиной; смещение возрастало во время взрывов большого объема взрывчатки.

Кроме инструментальных наблюдений за сдвижением горных пород, при изучении деформаций бортов производится ряд маркшейдерских съемок: откосов уступов, участков обрушений, трещин, поверхностей скольжения, тектонических нарушений и пр.

§ 2. Методика наблюдений на оползневых участках по линиям реперов

Маркшейдерские наблюдения за сдвижением горных пород на оползневых участках по линиям реперов дают наиболее полные материалы, по которым можно установить характер оползня. Прямолинейный ряд реперов, составляющих наблюдательную линию, закрепляется по направлению наибольшей скорости

сдвижения оползня, совпадающему чаще всего с направлением наибольшего наклона борта.

Опорная часть наблюдательной линии проходит по неподвижной части борта, а рабочая часть линии — по оползневому массиву.

Протяженность опорной части наблюдательной линии принимается от 50 до 150 *м* в зависимости от условий местности и глубины карьера. Длина рабочей части зависит от протяженности оползня по падению борта и может достигать 300 *м* и более. Расстояние между реперами принимается от 5 до 35 *м* в зависимости от высоты уступов и ширины площадок. На каждой площадке

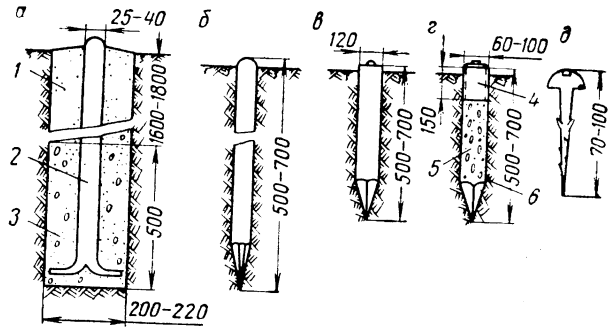


Рис. 83. Конструкции реперов наблюдательных линий:
1 — сухой песок; *2* — железный штырь; *3* — бетон; *4* — деревянная пробка; *5* — шлак; *6* — железная трубка

уступа по прямой линии при помощи теодолита закрепляется не менее двух реперов.

Конструкции реперов, закладываемых по наблюдательным линиям, изображены на рис. 83. Реперы конструкции *а* закладываются на опорной части линий, предназначенных на длительный период наблюдений (до 4—5 лет). Реперы конструкций *б*, *в*, *г* закладываются на срок службы до 3 лет. Каждый вид репера предназначается для пород определенной прочности. Репер конструкции *б*, представляющий собой металлический штырь диаметром 20—30 *мм*, длиной до 700 *мм*, забивается в крепкие породы, репер конструкции *в*, представляющий собой деревянный кол, забивается в рыхлые породы и навалы, а репер конструкции *г* закрепляется в породах средней крепости и представляет собой металлическую трубку с заостренным концом. После того как трубка вбита в грунт, в нее насыпается песок или шлак и забивается деревянная пробка, в которую вбивается кованый гвоздь с головкой, заточенной на полусферу и с отверстием диаметром 2 *мм*, глубиной 3—4 *мм* (рис. 83, *д*). Такой же гвоздь вбивается и в репер конструкции *в*.

Любая конструкция репера должна отвечать следующим требованиям:

иметь на закругленной верхней головке отчетливо нанесен-
центр, обеспечивающий производство точных наблюдений за
ижением репера в вертикальной и в горизонтальной пло-
кости;

2) обеспечивать удобство пользования реперами при наблю-
ениях;

3) обеспечивать прочную связь репера с грунтом, чтобы сдви-
ения репера точно соответствовали сдвижению грунта в данной
очке, и надежную сохранность репера на время наблюдений.

После закрепления реперов опорной части линии произво-
тся привязка к триангуляционной или полигонометрической сети
арьера не менее трех реперов опорной части, расположенных
таких участках, которые гарантировали бы их сохранность на
родолжительное время.

Для удобства отыскания составляется подробный абрис рас-
ложения опорных реперов относительно постоянных предметов
естности и около реперов устанавливаются сторожки.

Привязка опорной части наблюдательной линии должна соот-
тствовать по точности полигонометрии и нивелировке III класса.
нструментальные наблюдения на каждой линии включают в себя
едующие измерения:

1) нивелировку всех реперов, начиная от опорных;

2) измерение расстояния между реперами стальными рулет-
ми при постоянном натяжении при помощи динамометра и
фиксацией температуры;

3) съемку отдельных уступов, навалов пород, трещиноватости,
лов падения слоев и дизъюнктивных нарушений, образовав-
ихся открытых заколов и смещений пород, углов падения обна-
ившихся участков поверхности скольжения.

Нивелировку реперов на ровных и слабо наклоненных участ-
х производят геометрическую, а при наклоне поверхности оползн-
вого участка более 8—10° — тригонометрическую.

Все измерения производятся с контролем. При наших иссле-
ваниях применялись следующие схемы измерений для обеспече-
ия контроля при тригонометрическом нивелировании.

1. Прямые и обратные измерения каждого интервала или из-
ерения в одну сторону при двух установках теодолита, когда на
лощадках закрепляется по одному реперу (в редких случаях).

2. При закреплении на площадке более одного репера с край-
его репера на верхней площадке измерения углов и расстояний
роизводятся при визировании на каждый репер, закрепленный на
ижележащей площадке, а затем все реперы на этой площадке
ивелируются нивелиром или теодолитом при его установке для
изирования на нижележащую площадку.

3. Если на оползневом участке закладываются параллельно
е или три линии наблюдений, то тригонометрическое нивелиро-
ание производится по каждой линии в одном направлении при
дной установке инструмента на каждом уступе, а затем через

2—3 уступа все линии связываются геометрическим нивелированием; при отсутствии грубых ошибок в определении превышений можно принять, что все измерения углов и длин сделаны без ошибок, если в каком-то полигоне появляется недопустимая ошибка в определении превышений, можно установить, в каком звене она допущена, и это звено нивелируется повторно.

Такой порядок контроля измерений в значительной степени сокращает их объем по сравнению с двойным измерением по каждому интервалу.

В тех случаях, когда по створу рабочих реперов в верхней и в нижней части нельзя закрепить опорные реперы, геометрическая привязка рабочих реперов к местности может быть осуществлена прямой или обратной засечкой.

Геометрическое и тригонометрическое нивелирование по точности соответствует технической точности или точности подземной полигонометрии I разряда. Точность измерений несколько возрастает при небольших величинах смещений реперов; необходимо стремиться к тому, чтобы погрешность в определении положения последнего репера находилась в пределах 5—10% от величины вектора его смещения за период между двумя сериями наблюдений.

Если величина отклонения репера от створа оказывает заметное влияние на определение горизонтального расстояния (по створу) от начального репера, то ее измеряют при помощи теодолита в каждой серии наблюдений.

Периоды между сериями наблюдений по линиям могут быть различны — от 5—10 дней до 1 года в зависимости от величины и характера подвижек на отдельных участках, целевого назначения наблюдений, категории сооружений, которым угрожают оползни, и др. Если величины подвижек значительны и необходимо срочно установить характер оползня, то наблюдения следует производить через 5—10 дней, а в некоторых случаях и через день (при больших величинах сдвижения).

По результатам полевых измерений определяют превышения и горизонтальные проложения между смежными реперами. Наблюдения можно считать удовлетворительными, если их точность соответствует следующим требованиям:

1) при геометрическом нивелировании разность превышений из двух нивелировок не превышает 3 *мм*;

2) при измерении длин непосредственно между реперами разность между двумя независимо измеренными и вычисленными горизонтальными проложениями не превышает 2 *мм*;

3) при тригонометрическом нивелировании разность между двумя независимыми измерениями одного и того же превышения и горизонтального проложения не должна превышать 5—8 *мм* в зависимости от длины интервала и угла наклона: при длинах до 10 *м* — 5 *мм*, при длинах до 30 *м* и более — 8 *мм*.

По проверенным горизонтальным проложениям и превышениям оставляют ведомость абсолютных (или относительных) высот и расстояний от начального репера по каждой линии для каждой серии наблюдений.

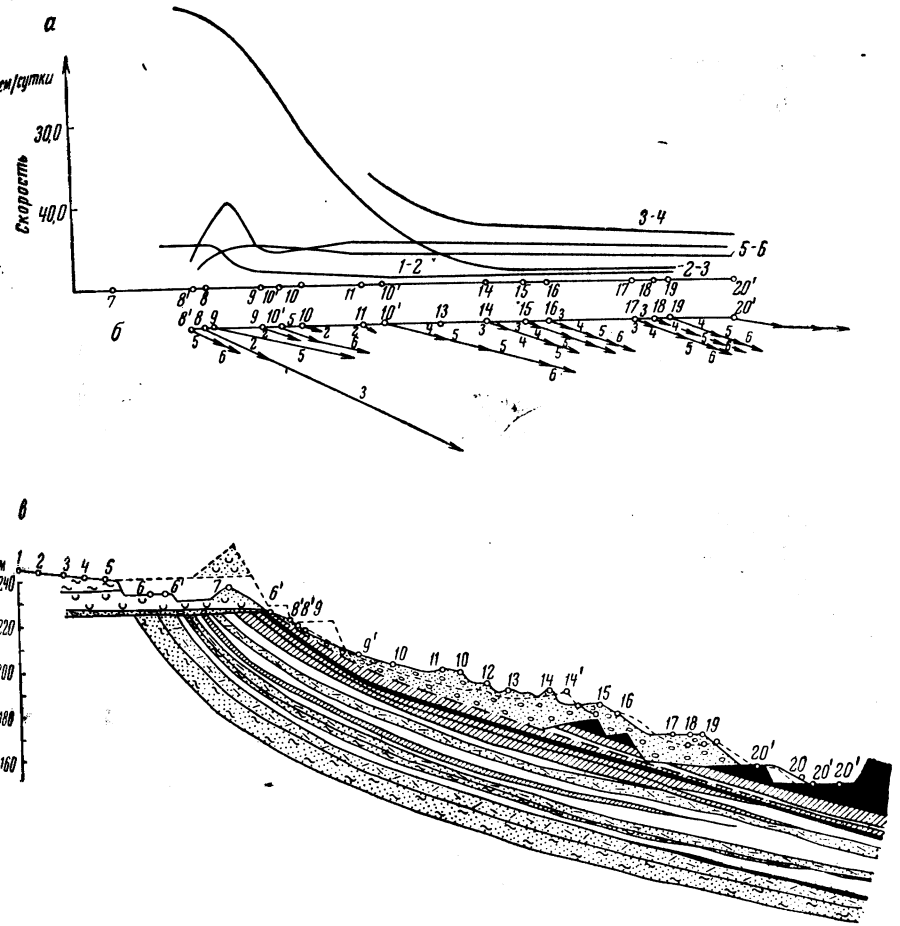


Рис. 84. Графическое изображение результатов маркшейдерских наблюдений по створу реперов:

а — графики скоростей смещения реперов за время между смежными сериями; *б* — векторы смещения реперов; *в* — профиль оползневого склона и геологический разрез

Сравнивая высоты и горизонтальные расстояния от начального репера в смежных сериях, для каждого репера определяют его смещение за период между смежными сериями наблюдений. Разделив величину смещения на время, определяют средние скорости смещения каждого репера за время между смежными сериями наблюдений.

По каждой наблюдательной линии строят геологический разрез в одинаковом вертикальном и горизонтальном масштабе, на который наносят профиль отработки борта (до оползня), контур борта к моменту первой серии наблюдений, и пополняют этот профиль при последующих сериях наблюдений. На геологическом разрезе отражают литологический состав пород, их залегание, уровни грунтовых вод водоносных горизонтов и величины напоров воды в них, все дизъюнктивные нарушения и трещиноватость, а также обнажившиеся участки поверхности скольжения. Все эти элементы наносятся на разрез по результатам инструментальной съемки.

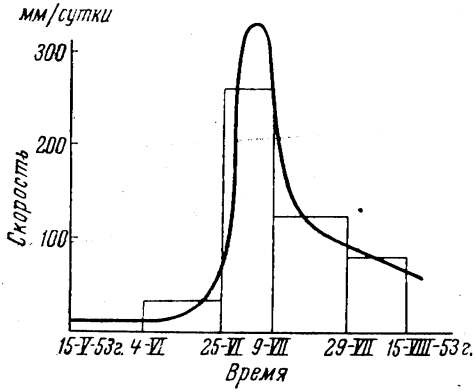


Рис. 85. График изменения скоростей смещения реперов во времени

В верхней части графика над геологическим разрезом строят векторы смещения каждого репера за время между смежными сериями наблюдений; при этом векторы одного и того же интервала времени между смежными сериями обозначаются одной и той же цифрой (рис. 84). На этом же чертеже строят график изменения скоростей смещения реперов по линии и изменения скоростей во времени для отдельных характерных реперов наблюдательной линии (рис. 85).

§ 3. Упрощенные наблюдения за деформацией уступов и бортов карьеров

Упрощенные наблюдения за деформацией уступов и бортов карьеров производят в следующих случаях: 1) если на каких-либо участках, где нет видимых признаков деформации, появление оползней и обрушений является опасным; 2) в период начальной стадии развития оползней или обрушений; 3) при определении смещений в отдельных точках оползневого массива; 4) при определении деформаций уступов под влиянием взрывных работ; 5) при наблюдениях за развитием фильтрационных деформаций.

1. **Периодическое нивелирование отдельных точек** или групп точек, заложенных на характерных участках прибортовой зоны земной поверхности или на площадках уступов. Нивелирование точек производится от опорного репера, закладываемого на расстоянии 150—200 *м* от верхней бровки карьера. Погрешность определения высоты наблюдаемых точек (реперов) при нивелировании в прямом и обратном направлении не должна превышать ±3 *мм*. Эти наблюдения дают возможность установить смеще-

ния, превышающие 5 *мм*, т. е. ими могут быть установлены микродеформации, являющиеся во всех случаях неопасными. Частота нивелирования таких реперов изменяется от недели до года, в зависимости от скорости деформаций и цели проведения наблюдений.

2. Высказывались предложения применить **наклономер для наблюдения за микродеформациями** [98]. Однако недостатком наклономера, наряду со значительной трудоемкостью работы, является то, что довольно часто при наличии вертикального смещения прибортовой зоны земной поверхности она приобретает весьма небольшой уклон или совсем его не имеет.

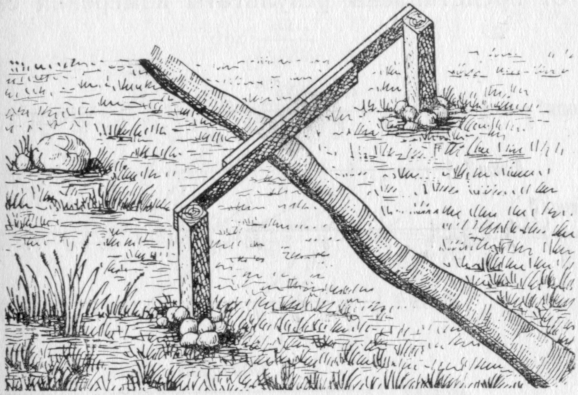


Рис. 86. Упрощенные наблюдения за раскрытием трещин с помощью реек

3. На карьерах широко применяются упрощенные **наблюдения за раскрытием образовавшихся трещин с помощью двух горизонтальных реек,** укрепленных на кольях с обеих сторон от трещины (рис. 86). На рейки наносятся штрихи, по которым наблюдают за относительным смещением реек.

При необходимости более точных измерений для этой же цели используются микрометренные головки.

4. **Измерения частоты звуков,** возникающих в крепких и средней прочности горных породах при напряжениях, близких к предельным.

Для этой цели применяются геофоны [98]. В зарубежной практике при подземных разработках известны случаи успешного применения геофонов для предупреждения внезапного обрушения кровли горных выработок.

Попытки применения геофонов на карьерах не дали обнадеживающих результатов. Необходимость проходки скважин в область предельных напряжений для установки пьезоэлектрических датчиков является существенным недостатком этого метода. Кроме того, критическая частота звуков (тресков) разрушения

породы неодинакова для различных пород, что в условиях открытых разработок делает этот метод практически не применимым, так как опытное обрушение, по которому можно было бы установить критическое число звуков, в этих условиях оказывается невозможным.

5. Для наблюдения за деформацией уступов под влиянием буровзрывных работ применяют комбинированные наблюдения, включающие: измерение смещения реперов, измерение деформаций на отдельных участках и измерение колебаний с помощью сейсмографов, установленных на различных расстояниях от ряда взрываемых скважин.

На рис. 87 представлены результаты измерения смещений ре-

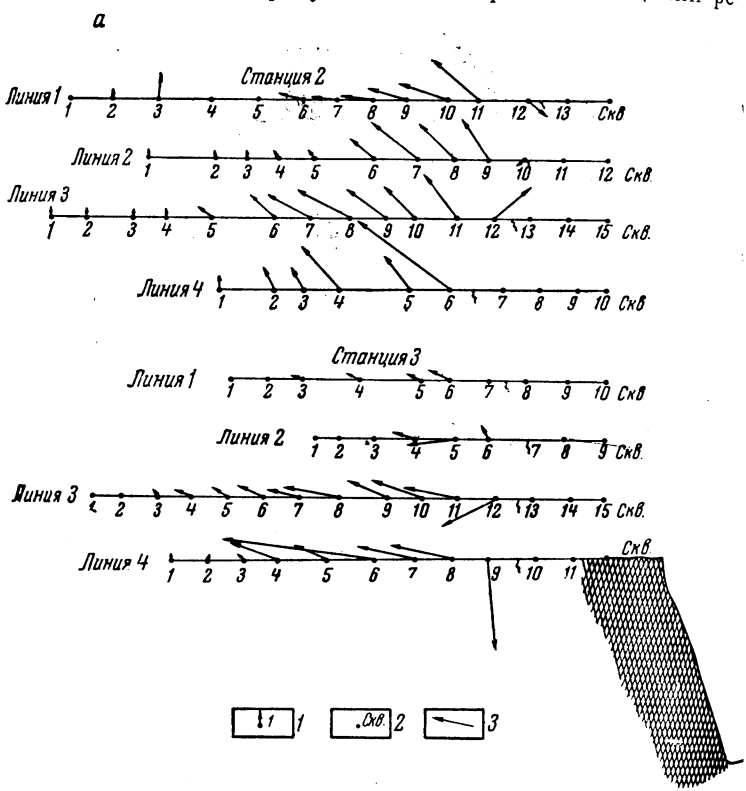


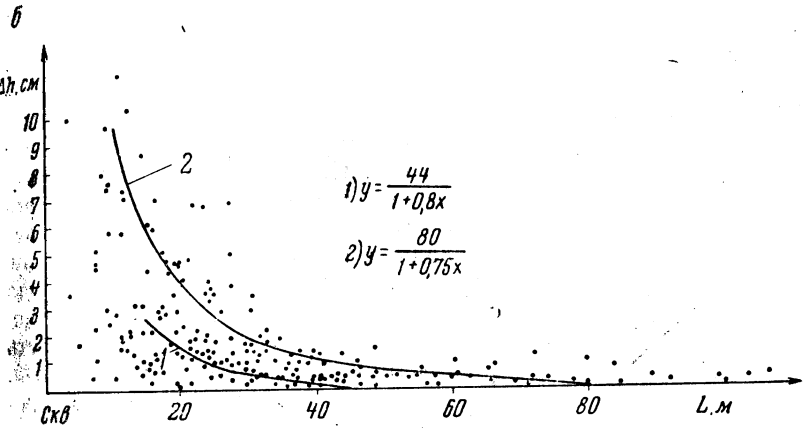
Рис. 87. Графическое изображение результатов наблюдений
а — профильные линии наблюдательных станций за взрывными расстояния до скважины; *в* — то

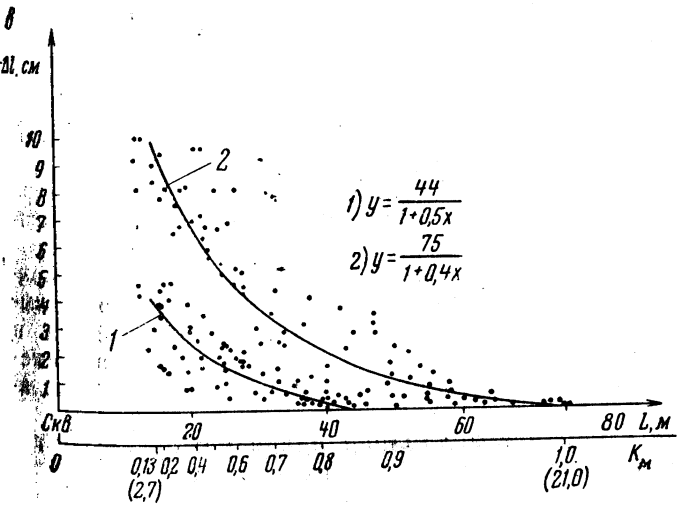
перов по наблюдательным линиям, заложенным перпендикулярно линии скважин.

Обработка данных наблюдений за смещением реперов дает возможность установить вес одновременно взрываемого ВВ, предельный по условиям устойчивости уступов [5].

§ 4. Установление характера оползня по результатам маркшейдерских наблюдений

По результатам маркшейдерских наблюдений можно с достаточной для практики точностью построить поверхность скольже-





за деформацией площадок при массовом взрыве:
работами; *б* — график зависимости вертикальных деформаций от
ке, горизонтальных деформаций

ния, а при наличии геологического и гидрогеологического разреза установить характер оползня и причины его образования.

В тех случаях, когда векторы сдвижения реперов изменяют свое направление закономерно, а по величине почти одинаковы от верха до низа оползня, можно сделать вывод, что такой

оползень движется как одно целое без существенных относительных смещений участков.

В этом случае, пользуясь направлением вектора перемещения реперов, можно построить приближенное положение поверхности скольжения в массиве. Действительно, если массив движется как одно целое, то перемещение любой точки сдвигающегося массива по направлению AB (рис. 88) можно рассматривать как вращательное движение вокруг какой-то точки C, расположенной на перпендикуляре к направлению AB. Естественно, что все точки массива вблизи линии CD, вплоть до поверхности скольжения, будут также перемещаться, как бы вращаясь вокруг точки C, т. е. двигаясь по направлению, параллельному линии AB. Следовательно, и сама поверхность скольжения по обе стороны от перпендикуляра CD также параллельна направлению AB. Пользуясь этим выводом, можно без труда с достаточной для практики точностью построить всю поверхность скольжения по линии наблюдений. Для этого поступают следующим образом:

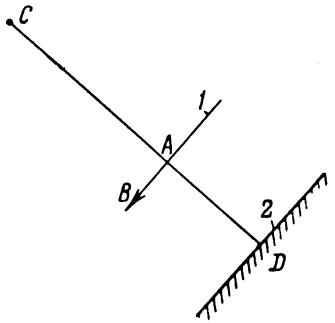


Рис. 88. Параллельность между вектором смещения и отрезком поверхности скольжения:
1 — поверхность оползня;
2 — поверхность скольжения

а) на профиле, где изображены в том же масштабе векторы смещения реперов, заложенных на поверхности откоса, к середине векторов смещения каждого репера восстанавливают перпендикуляр в сторону массива (при небольшой длине вектора его направление отмечают отрезком в большем масштабе);

б) начиная от верхней или нижней линии пересечения поверхности скольжения с поверхностью обнажения горных пород, выраженных вверху трещиной отрыва, а внизу — линией среза и надвига пород, проводят отрезки, параллельные векторам смещения реперов на соответствующих перпендикулярах, как показано на рис. 89;

в) полученная таким путем ломаная линия между верхней и нижней трещинами сглаживается в плавную кривую;

г) если при построении ломаной линии от одной трещины она не смыкается с другой трещиной, то построение необходимо вести от верхней и нижней трещин до середины откоса, а затем провести среднюю кривую, как показано на рис. 89.

Если векторы сдвижения реперов от верха до низа оползневого участка параллельны наслоению пород (см. рис. 84), то это указывает на скольжение оползневых масс по наслоению пород, что наблюдается при контактных оползнях или подошвенных оползнях отвалов.

При оползнях выпирания или надвига, связанных с наличием горизонтально залегающего слабого контакта или слабого прослойка, кроме основной трещины отрыва возникают еще со-

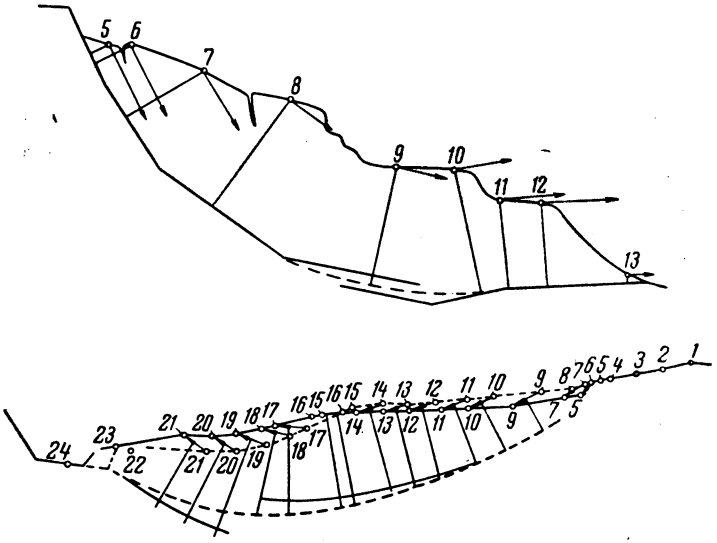


Рис. 89. Построение поверхности скольжения по векторам смещения

ряженные трещины сдвига, идущие от линии пересечения поверхности скольжения со слабым контактом (рис. 90).

При накоплении оползневых масс на поверхности бортов часто затруднительно установить, оползает ли только рыхлый покров

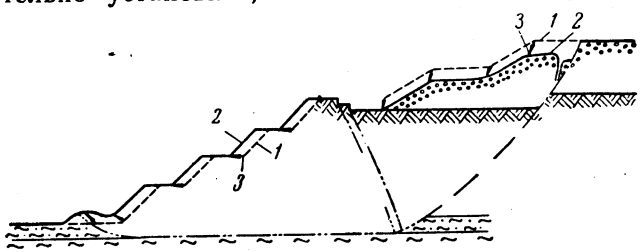


Рис. 90. Схема поверхности оползневого участка при оползнях выпирания, связанных с наличием невскрытого слабого контакта или слабого прослойка:

1 — поверхность до оползня; *2* — поверхность после оползня; *3* — направление векторов смещения

(покровные оползни) или оползают и коренные породы. По векторам смещения реперов это легко установить. При покровных оползнях направления и величины векторов сдвижения реперов изменяются чаще всего незакономерно и при этом среди реперов

с интенсивными подвижками встречаются и неподвижные или с небольшими скоростями сдвижения.

Характерной чертой покровных оползней является также то, что выпуклые части оползневого склона, совпадающие с «порогами» в коренных породах, не меняют своего положения по высоте вследствие того, что насыщенные водой рыхлые отложения огибают эти пороги.

Графики изменения скоростей смещения реперов по линии используются при установлении причины или источника образования оползня.

Например, на участке активного оползня Коркинского карьера причиной образования оползня считалась подрезка слоев, так как оползень активизировался после выемки новой заходки по углю. Однако маркшейдерскими наблюдениями было установлено, что на этом участке скорости смещения реперов в верхней части оползня значительно превышают скорость смещения реперов в нижней части оползня (см. рис. 84). Если бы причина образования оползня заключалась в подрезке слоев в нижней части последнего, то активность оползающего массива и скорости смещения по всей высоте оползневого склона были бы одинаковыми или даже в нижней части они были бы больше.

В данном же случае скорости смещения, а следовательно, и активность оползня больше вверху, где падение слоев круче и где на крутой части поверхности скольжения располагаются навалы насыщенных водой суглинков; нижняя же часть оползня является пассивной и смещается лишь под давлением верхней части.

Впоследствии (летом 1953 г.), когда навалы рыхлых суглинков были отгружены, оползни в нижней части откоса совсем прекратились, и железнодорожные пути, уложенные на последнем уступе лежачего бока, в течение года не деформировались и ни разу не рихтовались. Но ввиду того, что верхним уступам, сложенным суглинками, не была придана устойчивая форма, в июле—сентябре 1954 г. снова начал оползать верхний участок борта; в нижней же части оползней к этому времени еще не было.

Графики изменения во времени скоростей смещения отдельных характерных реперов (см. рис. 85) помогают раскрывать влияние времени, времен года и производственных процессов на интенсивность движения всего оползня и отдельных его частей.

§ 5. Характерные признаки оползней и установление их вида по результатам обследований

Характер оползня во многих случаях можно установить и без инструментальных наблюдений, пользуясь геологической документацией и результатами визуального обследования. Для этого необходимо знать общую закономерность проявления оползней различного вида.

Основным признаком глубинных оползней слоистых пород лежачего бока, подподошвенных оползней отвалов и оползней выпирания является вал выпирания подошвы откоса перед оползающим откосом.

Надподошвенные оползни отвалов и покровные оползни насыщенных водой глин характеризуются тем, что оползневые массы как бы накатываются на коренные породы — в нижней части оползневой массив имеет вид накатывающегося вала; предметы, оставленные в оползне в 1—1,5 *м* от подошвы оползня, с течением времени перемещаются ближе к подошве, а затем затираются между оползнем и его подошвой.

По внешним признакам оползня в большинстве случаев можно установить форму и положение поверхности скольжения, а по ним устанавливаются вероятные причины возникновения оползней. Например, на Богдановском карьере Никопольского бассейна возникали надподошвенные оползни внутренних отвалов, причиной которых считали большую высоту предотвала.

Если бы это было так, то поверхность скольжения должна была бы проходить по линии *AC*, в действительности же она проходила по линии *AB*; в этом случае причина могла заключаться или в повышенной влажности всей массы отвальных пород или только их нижней части; разбуривание отвальных пород показало, что в данном случае причиной возникновения оползней явилось наличие в основании отвала водонасыщенных пластичных глин (см. рис. 79).

На Шевченковском карьере этого же треста возник ряд оползней надрудного уступа, характеризующихся широкой полосой захвата внутрь массива (см. рис. 75), что, наряду с отсутствием выпора основания, свидетельствовало о том, что в данном случае скольжение происходило по слабому контакту или по слабому прослойку, залегающему в основании оползня.

Бóльшая часть других видов оползней распознается по внешним признакам, описанным в главе XII.

§ 6. Съемка трещин и составление структурных планов

При изучении трещиноватости горных пород в карьерах приняты следующие понятия о характере трещиноватости и о ее влиянии на устойчивость откосов уступов и бортов карьеров.

Трещина в горных породах понимается как разрыв сплошности по поверхности ограниченного протяжения. Ряд трещин одного направления и генезиса называется **системой трещин;** совокупность систем трещин в определенном объеме горного массива, характеризующегося однородным литологическим сложением и структурой, называется **трещиноватостью.**

Число трещин системы, приходящихся на 1 *м* в направлении, перпендикулярном плоскости трещин, характеризует **интенсивность** системы, а средняя интенсивность трех близких к взаимно-

перпендикулярным наиболее интенсивных систем, определяющих размер и форму элементарных блоков породы, характеризует **интенсивность трещиноватости.**

Аналитически интенсивность трещиноватости можно представить в следующем виде:

$$W = \frac{1}{l_{ср}} = \frac{1}{3}\left(\frac{1}{l_{I}} + \frac{1}{l_{II}} + \frac{1}{l_{III}}\right), \qquad (64)$$

где l_{I}, l_{II}, l_{III} — расстояние в метрах между трещинами I, II и III систем.

Другие системы, менее интенсивные, чем системы I, II и III, общую интенсивность трещиноватости не изменяют, а влияют лишь на характер трещиноватости. Под характером трещиноватости понимается взаимное относительное расположение трещин, определяющее форму элементарных блоков породы.

Трещиноватость горных пород появляется в верхних слоях земной коры как проявление присущей горным породам делимости по слоистости, сланцеватости, кливажу и другим поверхностям ослабления, возникшим на больших глубинах при пластических деформациях горных пород (см. гл. II).

По размеру трещины разделяются на малые, или трещины отдельности, и трещины большого протяжения.

Трещины отдельности являются более частыми, чем трещины большого протяжения, поэтому в основном ими определяется форма и размеры элементарных блоков горной породы; эти трещины располагаются ступенчато.

Различают трещиноватость пород ниже зоны выветривания, где породы имеют однородную не изменяющуюся по интенсивности трещиноватость, и трещиноватость в зоне выветривания, где появляются трещины выветривания; вокруг горных выработок появляются трещины, связанные с влиянием взрывов и горным давлением. Трещины выветривания большей частью по направлению совпадают с трещинами отдельности ниже зоны выветривания, так как они прежде всего также являются проявлением присущей горным породам делимости, интенсивность (частота) которой велика (в чем можно убедиться при дроблении элементарных блоков горной породы); при выветривании, а также вокруг выработок появляются и такие трещины, которые не связаны с делимостью горных пород и не имеют определенной ориентировки.

На устойчивость откосов решающее влияние оказывают наклонные и пологие **трещины большого протяжения,** развитые по слоистости, сланцеватости и параллельно тектоническим нарушениям (по этим трещинам, так же как и по большей части других трещин, в массиве горных пород имеется какая-то связность, однако в окрестности горных выработок эта связность невелика и все поверхности ослабления рассматриваются как трещины

с определенным сцеплением, величина которого устанавливается натурными испытаниями).

Трещины большого протяжения, которые будут называться основными, изучаются особенно тщательно по всем обнажениям горных пород — искусственным и естественным. Предметом изучения являются элементы залегания основных трещин, плановая и высотная привязки точек их замера, характер поверхности трещин и состав заполняющего материала.

Системы кливажных и всех других ступенчато расположенных трещин отдельности интенсивностью не более 3, т. е. при крупности блоков не менее 0,30 *м*, изучаются также детально, включая: элементы залегания системы, интенсивность и ориентировку относительно трещин большого протяжения и относительно поверхности откоса.

Определение элементов залегания систем трещин производится по участкам с однородным литологическим сложением и структурой; протяженность таких участков измеряется от 10 до 150—200 *м*.

На каждом участке с однородной трещиноватостью берется от 10 до 20 точечных элементов залегания трещин каждой системы, которые сразу же в поле наносятся на круговую равнопромежуточную сетку.

На круговой диаграмме определяются средние значения элементов залегания системы как медианные значения для группы нанесенных на сетку точек каждой системы.

В камеральных условиях с помощью сетки Вульфа определяются углы между основными трещинами и системами ступенчатых трещин, а также между элементами откоса; методика этих определений изложена в книге И. Н. Ушакова [170].

По расположению относительно наслоения пород или относительно основных для данного участка трещин ступенчато расположенные трещины разделяются на нормальносекущие и кососекущие; по расположению относительно простирания слоев и основных трещин ступенчатые трещины разделяются на продольные, поперечные и диагональные [11].

Такая же ориентировка ступенчатых трещин может быть и относительно поверхности откоса, только в этом случае необходимо различать согласные и несогласные трещины по направлению их падения в сторону выемки или в сторону массива.

Элементы залегания ступенчатых трещин отдельности при интенсивности трещиноватости более трех при оценке устойчивости уступов и бортов карьеров можно не изучать, так как при такой интенсивности трещиноватости залегание этих трещин не влияет на устойчивость откосов. При такой интенсивности трещиноватости кроме закономерно ориентированных систем трещин появляются и беспорядочные (бессистемные) трещины выветривания; изучение элементов залегания этих трещин теряет смысл.

С другой стороны, при большой интенсивности трещиноватости вследствие вращательного перемещения блоков породы, ограниченных трещинами даже при отсутствии бессистемных трещин ориентировка ступенчатых трещин не влияет на устойчивость откосов [178]. По участкам с большой интенсивностью трещиноватости дается описание формы ограниченных трещинами блоков горной породы и их размеров.

По данным обработки полевых замеров составляют структурные карты или планы, на которых по каждому уступу выделяются участки с однородной трещиноватостью, и по каждому участку наносятся все точки замеров основных трещин и диаграмма систем ступенчатых трещин с указанием среднего направления падения и среднего угла падения трещин системы. На участках с интенсивностью трещиноватости более 3 условным знаком обозначается форма блоков (прямоугольная, кубическая или параллелепипедальная, косоугольных параллелепипедов или многогранников), а в середине знака числом обозначается интенсивность трещиноватости, на этих участках элементы залегания основных трещин отмечаются так же, как и на всех других.

Замеры элементов залегания трещин производятся горным компасом; в магнитных породах в каждой точке замера определяется магнитное склонение путем визирования компасом по направлению с известным дирекционным углом; для этой же цели может быть использован солнечный ориентир, подобный солнечным часам, ориентированный относительно меридиана в данной местности и градуированный по местному времени.

§ 7. Другие виды геологомаркшейдерских работ по обеспечению устойчивости уступов и бортов карьеров

В задачу маркшейдерской службы горных предприятий по положению о маркшейдерской службе наряду с соблюдением проектных решений входит разработка мероприятий по безопасному ведению горных работ вблизи опасных зон и разработка мер охраны сооружений, природных объектов и горных выработок от вредного влияния горных разработок.

В проектах разработки месторождения углы откосов уступов и общие углы наклона бортов устанавливаются по данным детальной разведки месторождений, в процессе которой структура горных пород устанавливается довольно неточно и ряд существенных структурных элементов при этом пропускается.

Геологомаркшейдерская служба карьеров обязана производить систематическую съемку структуры массива горных пород в каждой заходке и вести непрерывную документацию результатов этой съемки.

По рабочим уступам документируются: литологический состав пород и обнаруженные поверхности ослабления большого протяжения, по которым возможно обрушение уступов.

При подходе уступов к предельному положению документируется также характер и степень трещиноватости пород и по этим данным составляют паспорта на погашение уступов в их предельном положении. Паспортами устанавливаются угол откоса уступа в предельном положении, расстояние между заоткашивающими скважинами и угол их наклона, а для уступов рыхлых пород — угол откоса уступа и технология заоткоски; погашенные и надлежащим образом оформленные уступы должны приниматься специальной комиссией рудоуправления при участии главного маркшейдера и главного геолога карьера или рудоуправления.

Необходимость этого мероприятия определяется тем, что восстановление откосов уступов после погашения нижележащих уступов очень сложно и трудоемко и поэтому устойчивость уступов на длительное время должна быть обеспечена при их погашении.

С помощью маркшейдерских съемок участков обрушения или оползания наиболее точно устанавливается характеристика сопротивления горных пород сдвигу. Для этой цели по данным съемки должны быть составлены профили откосов до оползня и после него, а также должно быть установлено положение поверхности скольжения. После этого массив, ограниченный поверхностью скольжения и профилем оползшего откоса, разбивается на ряд блоков, вес которых раскладывается на нормальные и касательные составляющие (относительно поверхности скольжения); по отношению сумм касательных и нормальных составляющих (см. гл. IX) определяются величины коэффициента внутреннего трения и сцепления горных пород в массиве.

В главах IV и XII было показано большое влияние обводненности пород на их устойчивость в откосах.

Маркшейдерская служба карьеров обязана следить за профилем и надлежащим состоянием нагорных, дренажных и водосточных канав, а также за планировкой прибортовой полосы земной поверхности и площадок уступов, обеспечивающих сток грунтовых, дождевых и талых вод.

В задачу геологомаркшейдерской службы входит разработка противооползневых мероприятий и расчетов, изложенных в главах XV и XVI и в четвертой части, а также контроль за их осуществлением.

На карьерах, разрабатывающих месторождения со сложными инженерно-геологическими условиями, необходимо создавать специальную службу по обеспечению устойчивости бортов карьеров, которая должна располагать техническими средствами для заоткоски и оборки уступов, их укрепления, очистки берм и дренирования.

Глава XIV

ДРЕНИРОВАНИЕ МЕСТОРОЖДЕНИЙ, РАЗРАБАТЫВАЕМЫХ ОТКРЫТЫМ СПОСОБОМ

§ 1. Цели дренирования

Дренирование горных пород является одним из основных мероприятий, обеспечивающих устойчивость бортов карьеров и отвалов, сложенных несвязными и глинистыми породами.

Другой задачей дренирования является удаление свободной воды из разрабатываемого полезного ископаемого и вскрышных пород, чтобы улучшить условия их разработки.

В настоящее время во всех проектах карьеров предусматриваются значительные объемы дренажных работ, направленных главным образом на обеспечение устойчивости бортов. Проектируется глубинное дренирование горных пород и открытый дренаж [1].

В некоторых случаях дренирование необходимо осуществлять для снижения влажности полезного ископаемого. Кроме того, необходимо отличать случаи, когда подземные горные выработки проходятся с целью централизации водоотлива и лишь попутно используются как дренажные.

Так как при обосновании проектных решений по дренажу карьерных полей наибольшее значение придается обеспечению устойчивости бортов карьеров, все перечисленные цели дренирования целесообразно рассматривать в совокупности.

При открытых разработках проходка подземных дренажных выработок производится полностью за счет дополнительных затрат на дренаж, что приводит к большому его удорожанию.

Этим определяется стремление при открытых разработках реже применять дренаж подземными выработками и заменять их более дешевыми дренажными устройствами (однако при строительстве карьеров и эксплуатационных работах выполняются большей частью работы только по глубинному дренажу, которые финансируются за счет капитального строительства, и плохо осуществляется открытый дренаж, требующий меньших затрат средств, но больше организационных работ). При подземном же

[1] В настоящее время еще нет установившейся терминологии по дренажу карьерных полей. В работе принята следующая терминология. Все способы дренажа разделены на: 1) глубинный, 2) открытый и 3) комбинированный; **глубинный дренаж** включает: а) дренаж подземными горными выработками (сквозными и забивными фильтрами и колодцами, пройденными в почву выработок), б) дренаж скважинами (водопонизительными, горизонтальными и поглощающими), в) дренаж иглофильтровыми установками (вакуумными и эжекторными) и г) дренаж закрытыми траншеями; **открытый дренаж** включает все те случаи, когда поток грунтовых вод выходит на поверхность откосов открытых горных выработок и при этом обеспечивается сток воды к водосборникам и устойчивость фильтрующих откосов (путем устройства обратных фильтров и песчаных пригрузок); **комбинированный дренаж** месторождений включает элементы глубинного и открытого дренажа.

особе, наоборот, стремятся максимально использовать горно-одготовительные выработки в качестве дренажных, применяя одопонижающие скважины лишь для облегчения проходки гор-ых подготовительных выработок.

При проектировании дренажей необходимо исходить из того, тобы в каждом конкретном случае был достигнут определен-ый экономический эффект от предварительного (глубинного) ренирования пород; между тем в последние годы в ряде случаев роектируются и сооружаются дорогостоящие системы осушения, казавшиеся или полностью бесполезными, или эффективность оторых не оправдала затрат.

При проектировании дренажей в настоящее время не учиты-ается различие в эффективности дренирования месторождений, ложенных горизонтальными и наклонными слоями пород; при аклонном (и пологом) залегании слоев пород влияние обводнен-ости пород (особенно лежачего бока) на возникновение оползней больше, а дренирование их проще, чем при горизонтальном алегании. Меньшее влияние на устойчивость бортов оказывают идрогеологические условия на месторождениях, сложенных кальными и полускальными породами.

В настоящей работе рассматриваются только схемы дренажа типовых условиях, исходя из условия обеспечения устойчивости откосов. При сложных гидрогеологических условиях вопросы дре-нирования карьерных полей должны решаться специализирован-ными организациями с учетом специфики открытых горных раз-работок.

§ 2. Фильтрационные характеристики горных пород

Основными фильтрационными характеристиками горных по-род являются: водоотдача, коэффициент фильтрации, коэффи-циент уровнепроводности или пьезопроводности, действительные скорости движения подземных вод, высота капиллярного под-нятия.

Водоотдача горных пород характеризуется коэффициентом во-доотдачи, численно равным количеству воды, вытекающей из еди-ницы объема горной породы под действием гравитационных сил. Из видов воды, заключенной в горных породах, подробно рас-смотренных в главе VII, только гравитационная и собственно ка-пиллярная дренируются под действием гравитационных сил.

Гравитационная вода в основном заполняет поры рыхлых песчаных пород и трещины сцементированных пород; небольшое ее количество находится в порах песчано-глинистых пород.

Капиллярная вода в песках и трещиноватых породах подни-мается в виде бахромы над уровнем гравитационной воды, а в рых-лых песчано-глинистых породах она преобладает над всеми дру-гими видами воды и остается защемленной в порах при снижении уровня грунтовых вод.

В несвязных породах коэффициент водоотдачи может быть определен по формуле

$$\mu = w_0 - w_м, \tag{65}$$

где w_0 — объемная влажность горной породы при полном ее насыщении, численно равная пористости;

$w_м$ — максимальная молекулярная влагоемкость (объемная).

Поскольку в водоотдачу, вычисленную по этой формуле, входит вся капиллярная вода, формула применима только для тех водоносных слоев, в которых высота капиллярного поднятия невелика по сравнению с общей мощностью слоя.

Для слоев тонкозернистых песков, особенно при небольшой их мощности, эта формула неприменима. Для определения статических запасов воды в тонкозернистых песках необходимо над депрессионной поверхностью строить зону капиллярного поднятия и для вышележащего объема песков применять формулу (65).

Водоотдача трещиноватых твердых пород определяется опытным путем по объему откачанной воды и объему сдренированной зоны с учетом инфильтрации за время дренирования.

Ориентировочные величины коэффициентов водоотдачи некоторых пород:

Пески:	
крупнозернистые	0,30—0,35
среднезернистые	0,25—0,30
мелкозернистые	0,18—0,20
Супеси и суглинки	0,10—0,15
Закарстованные известняки	0,05
Выветрелые изверженные и метаморфические породы	0,02—0,03
Угленосная толща	0,01—0,02
Плотные средней крепости и крепкие породы	0,005

Высоту капиллярной зоны можно определять по формуле Тейлора [23]

$$h_к = (0{,}7 \div 2{,}4)\frac{1}{\sqrt{k_ф}}, \tag{66}$$

где $h_к$ — высота капиллярной зоны, *см*;

$k_ф$ — коэффициент фильтрации, *см/сек*.

Водоотдача глинистых песков, песчаных глин, супесей и суглинков изучена слабо. Большая часть капиллярной воды в этих породах при быстром снижении уровня грунтовых вод отрывается от собственно капиллярной зоны и оказывается подвешенной.

Коэффициент фильтрации является основной характеристикой при расчетах дренажей, определяющей водопроницаемость горных пород, скорость водоотдачи и радиус влияния дренажных устройств.

Скорость фильтрации связана с коэффициентом фильтрации и гидродинамическим градиентом известным законом Дарси

$$v = k_ф J, \tag{67}$$

где v — фиктивная скорость фильтрации;

$k_ф$ — коэффициент фильтрации, *м/сутки*;

J — градиент напора, являющийся отношением снижения напора к длине пути фильтрационного потока.

Ориентировочные величины коэффициента фильтрации для различных горных пород, *м/сутки*:

Очень чистые галечники, гравий с крупным песком, сильнозакарстованные известняки и сильнотрещиноватые породы	100—1000 и более
Галечники и гравий с песчаным заполнителем, крупнозернистый песок	20—100
Мелкозернистые и среднезернистые пески, галечники с песчаным и суглинистым заполнителем	5—20
Тонкозернистые пески, песчаники с глинистым цементом, трещиноватые сильновыветрелые изверженные и метаморфические породы	0,5—5
Супеси	0,1—1
Суглинки	0,01—0,1
Мергели, песчаные и трещиноватые глины	<0,01

Несвязные и слабосвязные горные породы с $k_ф < 1$ *м/сутки* считаются слабопроницаемыми и плохо поддаются дренированию. Трещиноватые твердые породы в отношении их дренируемости недостаточно характеризовать только величиной $k_ф$, необходимо знать также действительную скорость фильтрации, так как при редкой сетке крупных трещин коэффициент фильтрации может быть небольшим, а дренируемость пород хорошая.

Коэффициенты уровнепроводности и пьезопроводности учитывают характер неустановившегося режима при фильтрации грунтовых потоков.

Коэффициент уровнепроводности для безнапорных условий определяется по формуле

$$a = \frac{k_ф h_{ср}}{\mu}, \tag{68}$$

где $h_{ср}$ — средняя мощность фильтрационного потока.

В условиях напора неустановившийся характер фильтрации определяется сжимаемостью минерального скелета грунта и частично сжимаемостью воды. Этот процесс носит название

упругого режима фильтрации и характеризуется коэффициентом пьезопроводности [23]

$$\beta = \frac{k_ф (1 + \varepsilon)}{\gamma_в \left(a_у + \frac{\varepsilon}{E_в} \right)}, \qquad (69)$$

где ε — коэффициент пористости грунта;
$\gamma_в$ — объемный вес воды;
$a_у$ — коэффициент уплотнения грунта;
$E_в$ — модуль упругости воды ($E_в \approx 2 \cdot 10^4$ *кГ/см²*).

Значения коэффициентов a и β принимают по табл. 21.

Значения коэффициентов a и β [23] Таблица 21

Тип грунта	Пески			Супесь	Суглинок
	среднезернистые	мелкозернистые	тонкозернистые		
a, *м²/сутки*	1000—3000	500—2000	50—500	20—100	—
β, *м²/сутки*	—	10^5	$5 \cdot 10^3$—10^5	10^3	100—500

Начальный градиент является существенным фактором, который необходимо учитывать при расчетах дренажей.

Начальным называется гидродинамический градиент такой величины, до которого в глинистых породах еще не происходит фильтрация воды.

Величина начального градиента зависит от минералогического состава глин, их плотности, органических примесей, поглощенных катионов и многих других факторов. С. А. Роза приводит величины начального градиента при фильтрации воды через торф, изменяющиеся от 0,4 до 2,1 в зависимости от изменения уплотняющей нагрузки от 0,05 до 2 *кГ/см²*.

Природа начального градиента, по-видимому, связана с физико-химическими явлениями взаимодействия связанной воды и минеральных частиц.

В глинистых породах значительной плотности влажность несколько превышает максимальную молекулярную влагоемкость или может быть даже меньше ее. В том случае, когда влажность глинистой породы превышает максимальную молекулярную влагоемкость, капиллярные поры могут не иметь непрерывной гидравлической связи между собой и поэтому для фильтрации воды через такую породу необходимо привести в движение в отдельных точках и связанную воду, для чего требуется градиент несравнимо больший, чем для перемещения свободной воды.

Начальный градиент учитывается при расчетах перетекания потока через песчано-глинистый слой, разделяющий два водоносных слоя.

§ 3. Дренаж земной поверхности вокруг карьера и площадок уступов

Атмосферные осадки на многих карьерах являются основным источником обводнения разрабатываемых полезных ископаемых и пород, поэтому обязательно устройство стока дождевых и талых вод с площадок уступов и с земной поверхности вокруг карьера в границах, отстоящих от его верхнего контура на 150—200 *м*, а при отсутствии слабопроницаемых покровных отложений — на 400—500 *м* (это мероприятие необходимо выполнять не только при сложении бортов рыхлыми породами, но также и скальными, так как атмосферные осадки являются основным источником обводнения взрывных скважин и каолинизированных пород в зонах тектонических нарушений). Сток воды с земной поверхности вокруг карьера осуществляется планировкой поверхности и приданием ей уклона в сторону нагорных канав, защищающих карьер от ливневых вод. В указанных границах производится также осушение заболоченных участков.

Сток дождевых и талых вод с площадок уступов осуществляется путем устройства продольных и поперечных канавок (последние устраиваются через 200—300 *м*), а также путем выравнивания площадок и придания им продольного или поперечного уклона не менее 5‰. На площадках уступов, сложенных слабыми склонными к размоканию породами, в условиях влажного климата эти мероприятия осуществляются на рабочих и на нерабочих бортах.

Водосточные канавы на спусках по откосам рыхлых пород и в капитальных траншеях оборудуются железобетонными лотками.

На площадках уступов, сложенных полностью каолинизированными или сильно выщелачиваемыми породами (например, на соляных месторождениях) для обеспечения стока дождевых и талых вод необходимо производить покрытие площадок плотными глинами слоем 20—30 *см*.

§ 4. Дренаж пород при пологом и наклонном залегании слоев

При пологом и наклонном залегании слоев слабых пород и пород средней прочности почти во всех случаях глубинный дренаж является обязательным. Необходимость глубинного дренажа при пологом и наклонном залегании слоев пород определяется тем, что в этих условиях даже при слабой водообильности пород в лежачем боку сохраняются высокие напоры воды (при наличии водоупорных слоев), что в большинстве случаев приводит к возникновению наиболее крупных оползней, а также тем, что в этих условиях, в отличие от горизонтального залегания, эффективное дренирование пород может быть достигнуто относительно простыми средствами: водопонизитель-

ными скважинами, пробуриваемыми на рабочем борту, или самоизливающимися горизонтальными или наклонными скважинами, пробуриваемыми в лежачий бок из выработанного пространства (если требуется дренаж только лежачего бока); в редких случаях могут быть применены штольни, проходимые из карьера, и сквозные фильтры, пробуренные на них; в благоприятных геологических условиях могут быть применены также поглощающие скважины.

Расстояние между рядами дренажных скважин по падению слоев устанавливается технико-экономическими расчетами, с учетом скорости подвигания забоя, угла наклона слоев и глубины дренажных скважин. При пологом залегании это расстояние может достигать 1000—1200 *м*; при мульдообразном залегании пород линию скважин целесообразно задавать в осевой части; в последнем случае дренаж месторождения может быть осуществлен одной линией скважин.

Расстояние между дренажными скважинами в ряду при наклонном залегании определяется с учетом необходимого годового снижения уровня, дебита скважин, статических запасов, динамических притоков и питания водоносных горизонтов. На угольных месторождениях обычно оказывается достаточным расположение скважин не чаще чем через 300 *м* (исключая случаи наличия закарстованных известняков, мощных отложений конгломератов и галечников). Мощность подлежащей дренажу толщи лежачего бока устанавливается путем расчета устойчивости бортов с учетом гидростатического давления.

По условию предотвращения прорыва напорных вод остаточные напоры на подошву водоупора, залегающего в лежачем боку, не должны превышать

$$D'_i \leqslant m\gamma \cos\alpha, \tag{70}$$

где m — мощность водоупорного слоя;

γ — объемный вес пород;

α — угол падения слоев.

Если учесть сопротивление сдвигу горных пород по линии AB (рис. 91), то допустимая величина напора возрастает на величину, определяемую по формуле

$$\Delta D_i = \sqrt{2m\tau \sin\alpha}, \tag{71}$$

(τ — средняя величина сопротивления сдвигу водоупорного слоя), которая выводится исходя из следующих соображений:

1) гидростатическое давление по наклонному водоупорному слою возрастает с ростом глубины и в каждой точке равно разности отметок пьезометрической поверхности и данной точки;

2) в прибортовой зоне на участке BE (рис. 91) шириной L гидростатическому давлению противостоит нормальная составляющая веса и сила сцепления по поверхности AB (рассматривается плоская задача при длине участка по простиранию, равной 1 *м*);

3) в точке E давление равно нормальной составляющей веса столба

$$D'_i = m\gamma \cos\alpha, \tag{72}$$

а в точке B оно больше на величину разности отметок точек E и B, равную

$$\Delta D = L \sin\alpha; \tag{73}$$

4) равновесие сохраняется при условии

$$Lm\gamma \cos\alpha + \tau m = D'_i L + \frac{1}{2}\Delta D L$$

или, заменяя D'_i величиной (72), а L величиной (73), получим (71) и, таким образом, величина гидростатического давления в точке B составит

$$D_{пр} = m\gamma \cos\alpha + \sqrt{2\tau m \sin\alpha}. \tag{74}$$

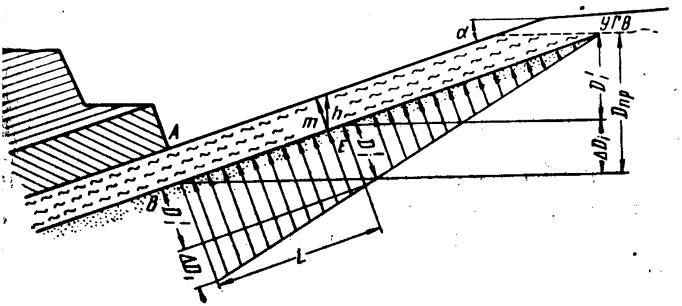


Рис. 91. Схема к расчету допустимых напоров на подошву водоупорного слоя в лежачем боку при наклонном залегании слоев; УГВ — уровень грунтовых вод

При внутренних отвалах предельная по условию прорыва величина гидростатического давления на водоупорный слой в средней точке участка, не загруженного отвалами, шириной L составит

$$D_{пр} = m\gamma \cos\alpha + 2\tau \frac{m}{L}. \tag{75}$$

По условию устойчивости лежачего бока зона необходимого дренажа определяется исходя из следующих соображений.

Устойчивость лежачего бока зависит от коэффициента внутреннего трения пород по контактам слоев ρ' и прочности пород под углом к наслоению, характеризующейся величиной H_{90} (см. гл. I и XIX).

Зависимость между параметрами откоса и характеристиками прочности имеет вид

$$H = H_{90}\left(\frac{1}{1 - \operatorname{ctg}\alpha \cdot \operatorname{tg}\rho'_n}\right). \tag{76}$$

Если преобразовать это выражение относительно ρ'_n, получим

$$\operatorname{tg} \rho'_n = \left(1 - \frac{H_{90}}{H}\right) \operatorname{tg} \alpha, \tag{77}$$

где ρ'_n — необходимый для обеспечения устойчивости угол внутреннего трения по контактам слоев;

H — высота борта;

α — угол борта карьера, равный углу наклона слоев.

Если по контактам слоев угол внутреннего трения ρ' больше величины ρ'_n, то по этому контакту можно допустить гидростатический напор средней интенсивности $D_{ср}$, при котором сила трения будет такой же, как при ρ'_n, но без гидростатического напора

$$\operatorname{tg} \rho'_n m\gamma \cos \alpha = \operatorname{tg} \rho' (m\gamma \cos \alpha - D_{ср}),$$

откуда получаем

$$D_{ср} = m\gamma \cos \alpha \left(1 - \frac{\operatorname{tg} \rho'_n}{\operatorname{tg} \rho'}\right). \tag{78}$$

Естественно, что должно соблюдаться условие

$$D_{ср} < \frac{1}{2} D_{пр}.$$

При большой высоте борта и $\alpha \leqslant \rho'$ при определении ρ'_n по формуле (77) за величину H берется не вся высота борта, а только та ее часть, по которой распределено гидростатическое давление.

Соблюдение условия (78) обеспечивает устойчивость борта в тех случаях, когда породы водоупорного слоя не набухают или скорость подвигания забоя большая и для набухания недостаточно времени. Если породы лежачего бока склонны к набуханию, а продвижение забоя относительно невелико, то вследствие снижения эффективного давления в породах почвы пласта будет происходить набухание и уменьшение прочности пород лежачего бока, что в конечном счете может привести к развитию оползней.

Поэтому необходимая зона дренирования пород лежачего бока и снижение напора должны быть несколько увеличены по сравнению с расчетными.

При наклонном залегании слоев пород применяется в основном глубинный дренаж посредством: дренажных горных выработок, проходимых в лежачем боку (Коркинский и Волчанский № 1 угольные карьеры), водопонижающих скважин, пробуренных со стороны рабочего борта (Волчанский № 4 и 3 и Богословский угольные разрезы), самоизливающихся скважин и водопонизительных колодцев, пробуренных в лежачий бок. Расстояние между дренажными скважинами при их расположении на рабочем борту зависит от фильтрационных свойств водоносных

слоев, условий их питания, скорости продвигания забоя, угла падения слоев и расстояния дренажного ряда от забоя.

Дренаж покровных отложений, горизонтально залегающих над наклонно падающими слоями пород, изложен в § 5.

При этом необходимо отметить следующее:

1) если горизонтальная поверхность слоистых коренных пород покрыта водоупорным слоем, то воду покровных отложений можно принимать в водосточную канаву на площадке уступа при удалении канавы от верхней бровки уступа на расстояние 8—12 *м* в зависимости от набухаемости водоупорного слоя;

2) если водоносный горизонт покровных отложений залегает на глубине не более 10 *м*, его воды целесообразно перехватывать дренажной траншеей на расстоянии 100—150 *м* от верхней бровки карьера;

3) если слоистые породы лежачего бока предрасположены к набуханию и водоносный горизонт покровных отложений гидравлически связан со слоистой толщей, то воды этого водоносного горизонта должны быть перехвачены на расстоянии не менее 100—150 *м* от верхней бровки карьера независимо от глубины его залегания дренажным штреком, пройденным по подошве водоносного слоя, или закрытой дренажной траншеей (последнее при глубине залегания не более 15 *м*).

§ 5. Дренаж пород при горизонтальном залегании слоев

При горизонтальном залегании слоев слабосвязных и средней прочности пород глубинный дренаж необходимо применять лишь при такой их водообильности (или обводненности), при которой возникают не допустимые по условиям разработки деформации откосов. Так как при горизонтальном залегании водоносные слои, имеющиеся в бортах карьеров, пересекаются горными выработками, в них не сохраняются высокие напоры воды в пределах призмы возможного обрушения и их влияние на общую устойчивость несущественно[1]; с другой стороны, при горизонтальном залегании полный дренаж гравитационной воды в породах и полезном ископаемом чаще всего практически недостижим. Поэтому в этих условиях основной целью дренажных работ является предотвращение опасных фильтрационных деформаций откосов уступов и улучшение условий экскаваторных работ.

Песчано-глинистые породы: суглинки, супеси, песчаные глины и сильно глинистые пески, имеющие коэффициент фильтрации менее 1 *м* в сутки, дренажу обычными средствами не подлежат из-за небольшого радиуса влияния водозахватных средств; предотвращение деформации обводненных откосов этих пород достигается путем их пригрузки.

---

[1] Исключением в этом отношении являются карьеры вблизи водоемов, создающих неограниченное питание водоносных горизонтов; в этом параграфе такие водоносные горизонты не рассматриваются.

Фильтрационные деформации песчаных откосов зависят от гранулометрического состава песков и удельного расхода фильтрующегося потока, который зависит от коэффициента фильтрации, мощности и напоров водоносных горизонтов. Чем больше мощность и напор водоносных горизонтов одинакового состава песков, тем больше удельные расходы и тем больше возникающие фильтрационные деформации. Водоносные горизонты небольшой мощности и небольших напоров при установившемся режиме фильтрации вызывают лишь незначительные деформации откосов и поэтому их дренаж нецелесообразен.

Песчаные водоносные горизонты по их мощности, водообильности и фильтрационным деформациям было бы целесообразно разделить на несколько категорий, например: маломощные или слабообводненные, средней мощности или среднеобводненные и мощные или водообильные водоносные горизонты.

При свободной фильтрации грунтового потока со стороны рабочего борта через незащищенный откос слабообводненные водоносные горизонты в период их вскрытия и в период эксплуатации не вызывают существенных деформаций откосов и в этих условиях дренирования не требуется.

Водоносные горизонты средней обводненности только в период неустановившегося режима в течение двух-трех лет при свободной фильтрации воды вызывают недопустимые деформации рабочих уступов; в этих условиях глубинный дренаж осуществляется до вскрытия водоносных горизонтов и в первый период отработки.

Мощные и водообильные водоносные горизонты в период установившегося режима фильтрации вызывают недопустимые деформации и требуют глубинного дренажа.

Ориентировочный удельный расход потока (приходящийся на 1 *м* протяженности откоса), не вызывающий опасных деформаций откоса рабочих уступов, может быть рассчитан по формуле [23]

$$q = k_ф l \operatorname{tg}^2 \alpha \frac{1}{1 + 0{,}5 \operatorname{tg} \alpha}, \qquad (79)$$

где q — удельный расход, *м³/сутки*;

$k_ф$ — коэффициент фильтрации, *м/сутки*;

l — допустимая величина горизонтального заложения оплывшего откоса;

α — угол оплывшего откоса.

Значения угла оплывшего откоса для пород различного состава характеризуются данными табл. 22.

По данным наблюдений за деформацией фильтрующих откосов, величина l для рабочих уступов, отрабатываемых механическими лопатами и роторными экскаваторами, может достигать 5 *м*.

В связи с неровностью рельефа водоупора высачивание воды в откосах обычно происходит сосредоточенными очагами, по-

этому среднюю величину удельного расхода, при котором не требуется заградительный дренаж, можно принимать вдвое меньше величины, получающейся при расчете по формуле (79). Допустимые средние величины удельных расходов (которые в дальнейшем называются критическими) приведены в табл. 22.

Таблица 22

Углы оплывшего откоса

Характеристика песков	Коэффициент фильтрации, *м/сутки*	Угол оплывшего откоса, *град*	Допустимый средний удельный расход, *м³/сутки*
Мелкозернистые	3—4	8—10	0,2—0,4
Среднезернистые	5—10	10—12	0,5—1,5
Крупнозернистые	15—20	12—16	2,5—4,0

В тех случаях, когда всхолмленность водоупора настолько значительная, что расходы на участках сосредоточенной фильтрации превышают средние более чем в два раза, может быть применен дренаж горизонтальными скважинами или штольнями.

Если по гидрогеологическим расчетам при неустановившемся режиме через три-четыре месяца после вскрытия месторождения средняя величина удельного расхода не превышает значений, указанных в табл. 22, то в устройстве заградительного дренажа со стороны рабочего борта нет необходимости.

Если период снижения удельного расхода до критического, после вскрытия водоносного горизонта, продолжается от четырех месяцев до трех-четырех лет, то можно считать, что такой водоносный горизонт имеет среднюю обводненность. Более обводненные водоносные горизонты следует считать водообильными.

Расчеты по формулам для неустановившегося режима фильтрации (см. § 8) показывают, что при мощности напорных водоносных горизонтов до 3 *м* и напорах до 20 *м* предварительный дренаж нецелесообразен. Водоносные горизонты мощностью до 10 *м* с напорами до 30—40 *м* через 3—4 года после их вскрытия также будут иметь удельные расходы не более критических (к этому времени приведенный радиус вскрытой части водоносного горизонта должен достигать примерно 500 *м*); для таких водоносных горизонтов, безусловно, не следует создавать капитальный заградительный дренаж подземными горными выработками со сквозными фильтрами, а достаточно ограничиться временным заградительным рядом водопонизительных скважин.

Критерием целесообразности применения глубинного дренажа пород со стороны рабочего борта при горизонтальном залегании водоносных слоев может явиться также сравнение объема грунтовой воды, поступающей в выработанное пространство, и вод атмосферных осадков, скапливающихся на тех же площадках. Сравнение производится за период наибольшей интенсивности

осадков продолжительностью не менее 3 месяцев. Если количество дождевой воды за три месяца наиболее дождливого периода, поступающее в карьер, сопоставимо (равно или в 1,5—2 раза меньше) с объемом грунтовой воды, поступающей в карьер за тот же период, следует считать такой водоносный горизонт слабообводненным и его дренаж целесообразно осуществлять открытым способом, выполаживая откосы на участке высачивания и принимая воду в водосточные канавы.

В связи с тем, что при горизонтальном залегании водоносных горизонтов полный перехват воды водопонизительными скважинами и сквозными фильтрами невозможен, заградительный

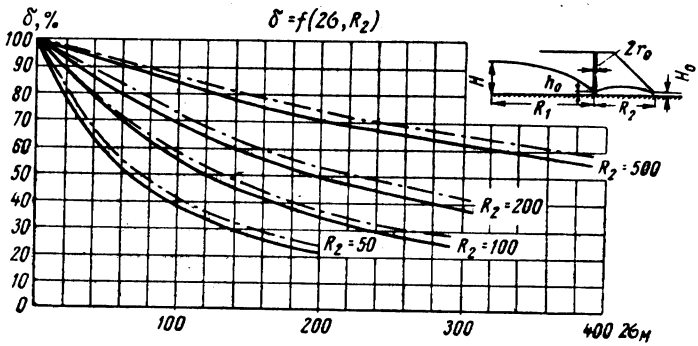


Рис. 92. График заслона, создаваемого дренажными скважинами:

δ — коэффициент заслона, %; 2σ — расстояние между скважинами, м; R — расстояние от ряда скважин до фильтрующего откоса: сплошная линия — для $r_0 = 0{,}1$; пунктирная — для $r_0 = 0{,}2$

дренаж водообильных и средней водообильности водоносных горизонтов со стороны рабочих бортов осуществляется лишь с целью сокращения удельного притока к поверхности откоса до величин, не превышающих критические.

Частичное снижение уровня грунтовых вод может быть осуществлено водопонизительными скважинами или подземными горными выработками и забивными или сквозными фильтрами, если срок службы заградительного ряда превышает 5 лет.

Глубинный дренаж водопонизительными скважинами пород нерабочего борта целесообразно осуществлять только в период строительства, а затем он должен быть заменен открытым или дренажом подземными горными выработками, так как при дренаже продолжительностью более 4—5 лет заградительный дренаж водопонизительными скважинами оказывается дороже других способов.

Расстояние между дренажными скважинами в зависимости от удаленности ряда и необходимого коэффициента заслона (коэффициентом заслона называется отношение перехваченной воды

к общему расходу потока, выраженное в процентах) легко определяется по графику рис. 92, составленному В. А. Мироненко.

Полный перехват потока грунтовых вод при горизонтальном залегании можно осуществить дренажными траншеями. (В проектах института Фундаментпроект по Лебединскому, Соколовскому и Сарбайскому карьерам был запроектирован перехват потока грунтовых вод, поступающих со стороны рабочего борта, иглофильтровыми установками. Практика работ на Лебединском карьере показала, что этот способ является громоздким и слишком дорогим. На Соколовском и Сарбайском карьерах вместо дренажа иглофильтровыми установками был применен дренаж траншеями, который оказался проще, дешевле и эффективнее; с 1962 г. дренажные траншеи начали применять и на Лебединском карьере).

На рабочем борту открытые дренажные траншеи могут применяться для дренирования водоносных горизонтов средней водообильности и для дренажа воды, проскакивающей сквозь заградительный ряд глубинного дренажа водообильных водоносных горизонтов.

Наблюдения за состоянием фильтрующих откосов показывают, что при высоте надводного участка высачивания в пределах 0,5—0,8 *м* и уклонах потока к траншее до 0,10 деформации ее откосов несущественны и она в течение года оказывается работоспособной. Это позволяет перехватывать передовыми дренажными траншеями поток грунтовых вод с удельным расходом до 2—5 $м^3/сутки$ (в зависимости от $k_ф$ и глубины потока в траншее над уровнем водоупора).

Ширина рабочей площадки на горизонте устройства траншей должна быть на 8—10 *м* больше расстояния между смежными траншеями; оптимальное расстояние между траншеями устанавливается в основном горнотехническими и гидрогеологическими факторами и может достигать 60 *м*. Целесообразно это расстояние принимать равным годовому подвиганию вскрышных работ на горизонте.

Дренажные траншеи с успехом могут быть применены для перехвата со стороны нерабочего борта потока вод ближайшего к поверхности водоносного горизонта при его залегании до глубины 10—12 *м*; при этом применяются открытые и закрытые траншеи (рис. 93); открытые — в случае устойчивых откосов траншей, закрытые — в случае неустойчивых.

В некоторых случаях открытый дренаж оказывается достаточным и при вскрытии водообильных месторождений, сложенных несвязными породами, если толща водоносных вскрышных пород представляет один водоносный горизонт или водоносный горизонт залегает в подошве разрабатываемого слоя полезного ископаемого.

Если водоносный горизонт имеет высокий напор, то при его вскрытии рассчитывают допустимый угол откоса с учетом

гидростатического давления; при необходимости высокие напоры водообильного горизонта могут быть снижены самоизливающимися скважинами, пробуренными на участке первоочередного вскрытия.

Если мощная толща несвязных водоносных пород представляет один водоносный горизонт, то при ее разработке без предварительного (глубинного) дренажа выход воды в разрезную траншею происходит только в нижней части откосов, так что большая часть толщи в прибортовой зоне оказывается сдренированной (исключением в этом отношении являются карьеры, расположенные вблизи открытых водоемов).

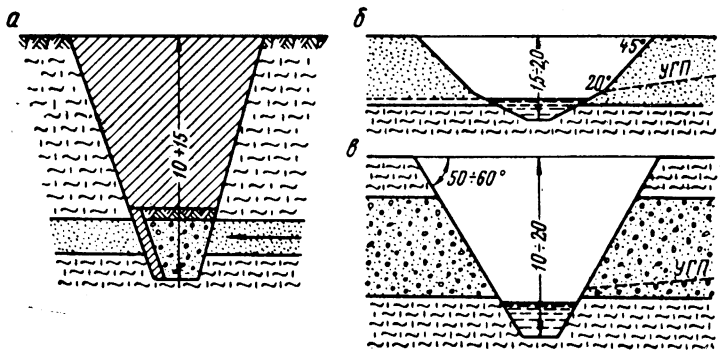


Рис. 93. Дренажные траншеи и канавы:
а — закрытая траншея; *б* — канава; *в* — открытая траншея

В таких условиях экономически более целесообразной оказывается разработка без предварительного глубинного дренажа.

При такой разработке разрезная траншея по каждому горизонту является в то же время и дренажной траншеей; ее проходка осуществляется драглайнами или плавучими земснарядами. Минимальные размеры дренажных траншей (котлованов) и скорость понижения горных работ устанавливаются путем расчета приведенного радиуса дрены (большого колодца) исходя из величины притока и допустимой величины оплывания на участке высачивания. Вскрытие обводненного месторождения без глубинного дренажа рекомендуется следующее. На каждом новом горизонте с помощью земснаряда или драглайна проходится передовой дренажный котлован размерами в плане, установленными гидрогеологическими расчетами; по мере снижения депрессионной воронки постепенно углубляется передовой дренажный котлован и одновременно производится нарезка рабочих горизонтов по сдренированным породам (рис. 94).

Заградительный дренаж необходим только при подходе к водоупору, если водоносная толща представлена песками, когда градиенты потока и надводная часть промежутка высачивания возрастают до недопустимых величин.

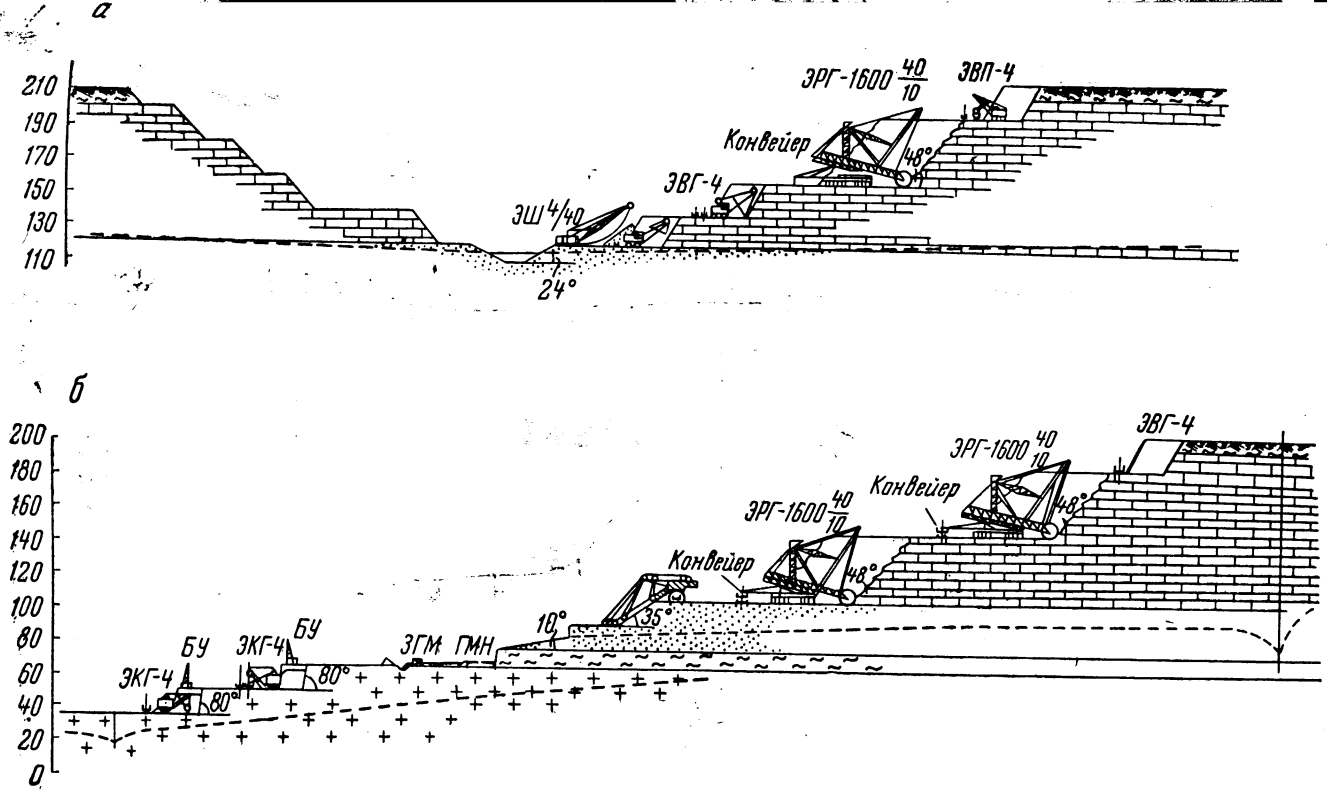


Рис. 94. Схема вскрытия обводненных пород при открытом дренаже:
а — без предварительного дренирования; *б* — схема гидромониторной отработки водоносного слоя

Таким способом дренируется значительная часть статических запасов воды, тяготеющих к карьеру, что дает большую экономию в расходе электроэнергии и в стоимости оборудования.

После вскрытия водоупора со стороны нерабочего борта под защитой иглофильтровой установки производится сооружение прибортовой гравийной пригрузки в соответствии с приводимыми в главе XV рекомендациями. Со стороны рабочего борта при разработке гидромониторами нижнего обводненного слоя песков не потребуется сооружения заградительного дренажа (при удельном расходе до 0,4 $м^3/ч$) или потребуется лишь частичный перехват потока заградительным дренажом.

Если непосредственная почва горизонтально залегающего пласта полезного ископаемого представлена напорным водоносным слоем, то этот водоносный слой может быть вскрыт открытой горной выработкой (разрезной траншеей) при углах наклона бортов, установленных с учетом гидростатического взвешивания, оказываемого напорным горизонтом. При таком вскрытии горизонтально залегающего напорного водоносного горизонта некоторая часть водоносных песков на участке первоочередного вскрытия придет в движение в форме прорыва [95], а при дальнейшем вскрытии песков разрезной траншеей будет наблюдаться небольшой выпор песков в разрезную траншею. С момента вскрытия и по мере того как из траншеи будет производиться откачка воды, от разрезной траншеи будет развиваться депрессионная воронка, параметры которой в зависимости от времени и интенсивности откачки можно рассчитать.

После того как в окрестности разрезной траншеи напоры снизятся до величин, при которых уклон потока будет составлять не более 0,3, можно приступить к проходке по водоносному слою передовой дренажной траншеи глубиной 1,5—2 *м*. Дальнейшее осушение подошвы карьера может осуществляться дренажными канавами глубиной 0,7—0,8 *м*, проходимыми вдоль очистного забоя. Расстояние между дренажными канавами зависит от фильтрационных свойств водоносного горизонта, глубины канавы, ширины заходки и рельефа подошвы пласта. Не составит трудности аналитическое определение этого расстояния в зависимости от фильтрационных свойств пород, однако лучше всего это расстояние принимать равным ширине заходки, а глубину канавы устанавливать опытным путем с таким условием, чтобы ко времени выемки следующей заходки депрессионная поверхность снизилась ниже пласта по всей ширине заходки.

Проходка дренажных штреков с целью осушения подошвы отрабатываемого пласта является нецелесообразной, так как при наличии опережающего дренажа штреками (или скважинами) подошва пласта снова обводняется дождевыми и талыми водами, для стока которых все равно необходима проходка дренажных или водосточных канав по подошве карьера. Примером в этом отношении является Кумертауский карьер.

§ 6. Дренаж твердых пород

Трещиноватые твердые песчано-глинистые породы, а также скальные и полускальные в большинстве случаев не требуют предварительного глубинного дренирования и могут быть сдренированы передовыми траншеями или водопонижающими колодцами, проходимыми с подошвы карьера.

Трещиноватые породы изверженные и метаморфические в большинстве случаев характеризуются слабой водообильностью, измеряющейся долями процентов. Более водообильными — до 3—5% — являются закарстованные известняки и трещиноватые породы в зоне выветривания, глубина которой обычно не превышает 30—40 *м*. Характерной особенностью трещиноватых пород является неоднородная водообильность как следствие неоднородной трещиноватости массива; поэтому довольно часто дренажные выработки не вскрывают наиболее водообильные зоны и грунтовые воды, а, минуя эти выработки, выходят в борт карьера.

Обводненность скальных и полускальных пород не оказывает влияния на устойчивость бортов, а их дренирование осуществляется лишь с целью улучшения условий разработок — главным образом производства буровзрывных работ. На обводненность рабочих уступов большое влияние оказывают не грунтовые воды, поступающие в карьер в основном только на нижнем горизонте и по подошве карьера, а воды атмосферных осадков, выпадающих в пределах и за пределами карьера.

Исключением в этом отношении являются те случаи, когда в бортах оказываются не вскрытые карьером водонепроницаемые тектонические нарушения, за которыми могут сохраняться запасы воды с большими напорами по отношению к подошве карьера. Эта вода существенно влияет на общую устойчивость борта.

Дренажные штреки в условиях крепких и средней крепости пород оказываются малоэффективными. Например, дренажные штреки на Сибайском, Блявинском, Чернушинском и Зыряновском карьерах, пройденные на глубинах 60—100—130 *м*, практически оказались сухими. При этом слабоэффективными оказались также скважины, пробуренные из этих штреков (Блявинский, Сибайский и Чернушинский карьеры).

Вода поступает лишь по скважинам, пересекающим водоносные слои рыхлых покровных отложений или крупные тектонические трещины и нарушения. Для дренирования трещинных вод нет необходимости проходить дренажные штреки, так как они могут быть сдренированы открытым способом; если в бортах карьеров имеются **водонепроницаемые завесы**, то их следует пересекать самоизливающимися скважинами из карьера, как указывалось выше.

Воды рыхлых покровных отложений оказывают большое влияние на обводнение уступов коренных пород, и их необходимо дренировать способами, изложенными в § 4 и 5 этой главы; при дре-

нировании их сквозными фильтрами водосборные штреки следует располагать на небольшом удалении от водоносного горизонта.

Решающее влияние на обводнение скальных пород в уступах оказывают дождевые и талые воды вследствие того, что в условиях трещиноватых крепких пород сток этих вод весьма затруднен. В таких условиях никакой дренаж не может быть эффективным без обеспечения стока дождевых и талых вод с площадок уступов и с поверхности вокруг карьера, особенно при условии, если покров слабофильтрующих пород невелик.

Месторождения типа Уфалейских никелевых и Бакальских железорудных, сложенных трещиноватыми или закарстованными вмещающими породами и рыхлыми рудами, целесообразно дренировать водопонижающими скважинами, проходимыми в наиболее трещиноватых зонах.

Целесообразность проходки на упомянутых карьерах дренажных шахт и штреков можно рассматривать только с точки зрения обеспечения централизации водоотлива; при наличии шахт, штреков и водоспускных скважин отпадает необходимость во внутрикарьерном водоотливе и в постоянно перекладываемых поверхностных водоотливных трубопроводах; в каждом конкретном случае целесообразность проходки дренажных штреков для централизации водоотлива должна устанавливаться путем технико-экономических расчетов.

§ 7. Дренаж основания и поверхности отвалов

Дренаж основания отвалов является обязательным условием устойчивости отвалов рыхлых пород на любом основании, сложенном крепкими и слабыми породами.

При горизонтальном (или слегка холмистом) основании, сложенном неводоносными породами, его дренирование осуществляется посредством водосточных канавок, обеспечивающих сток дождевых и талых вод к водосборникам, из которых регулярно производится откачка.

Если непосредственная почва горизонтально залегающего пласта полезного ископаемого представлена водоносным горизонтом, то перед отсыпкой внутренних отвалов на подошву пласта вдоль нерабочего борта проходится передовая дренажная траншея (см. § 6), которая засыпается щебнем или гравием и покрывается фашиной. Эта дрена служит преградой для грунтовых вод, поступающих со стороны нерабочего борта (рис. 95).

По мере подвигания очистного забоя вдоль него проходятся дренажные канавы, которые снижают уровень воды в среднем на 30—50 *см* ниже поверхности основания отвалов, и каких-либо дополнительных устройств в этом случае не требуется.

Предварительное дренирование лежачего бока залежи из пройденных специально для этой цели дренажных штреков оказывается нерациональным, так как при этом не исключается не-

обходимость внутрикарьерного дренажа для откачки дождевых и талых вод.

Расстояние между поперечными канавами устанавливается опытным путем в зависимости от рельефа подошвы пласта; в проектах это расстояние можно ориентировочно принимать равным 70—100 *м* (в действительности расположение канав будет неравномерным — на пониженных участках расстояние между ними может уменьшаться до 30—40 *м*, на возвышающихся участках они вовсе не понадобятся).

Заполнение дренажных или водосточных канав дренирующим материалом при планировке поверхности отвалов песчаных пород окажется излишним, а при преобладании глинистых пород в отвале устройство дрен под ним является неэффективным вслед-

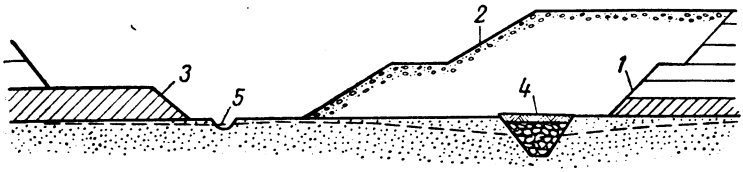


Рис. 95. Дренажная траншея в основании нерабочего борта:
1 — нерабочий борт; *2* — поверхность внутренних отвалов; *3* — рабочий борт; *4* — закрытая дренажная траншея; *5* — дренажная канава

ствие незначительной величины коэффициента фильтрации и ограниченного радиуса влияния таких дрен.

В тех случаях, когда напорный водоносный горизонт в почве рудного (угольного) пласта отделен от него водоупорным слоем глин относительно небольшой мощности (при больших напорах и при пологом залегании эта мощность может достигать 25—30 *м*), при которой на устойчивость отвалов существенно влияет гидростатическое давление и набухание основания отвалов, дренаж основания отвалов можно осуществлять трубчатыми водопонизительными колодцами, пробуриваемыми вслед за продвиганием очистного забоя.

Глубина колодцев и расстояние между ними (вдоль и поперек фронта) взаимосвязаны и, кроме того, зависят от фильтрационных свойств пород водоносного слоя и от набухаемости водоупорного перекрытия. Необходимо стремиться к тому, чтобы депрессионная воронка была ниже подошвы водоупора на участке, где высота борта и отвала не превышает 10—15 *м*, так как в этой зоне происходит наиболее интенсивное набухание пород.

Если водоупорный слой представлен слабонабухающими глинами, то колодцы можно не оборудовать насосами, а обеспечивать лишь сток самоизливающейся воды, соединяя устья колодцев водосточными канавами.

При пологом и наклонном залегании пластов лежачий бок дренируется водопонизительными скважинами совместно с породами

висячего бока; если же породы висячего бока не требуют дренажа, то дренаж подошвы внутренних отвалов осуществляется так же, как и при горизонтальном залегании.

Напорные водоносные горизонты в подошве карьера не вскрываются только в тех случаях, когда они гидравлически связаны с источником неограниченного питания и при вскрытии имеют большие расходы (дебиты); для предотвращения прорыва воды подошва карьера пригружается внутренними отвалами. Необходимая по условию предотвращения прорыва и допустимая по условию устойчивости высота отвала определяется расчетом; условием, исключающим прорыв, в этом случае является

$$D < m\gamma + 2\tau\frac{m}{l} < m\gamma + h\gamma_{отв}, \qquad (80)$$

где D — величина напора на кровлю водоносного горизонта;
m — мощность толщи до водоносного горизонта;
γ и $\gamma_{отв}$ — объемный вес пород подошвы и отвала;
τ — средняя величина сопротивления сдвигу пород водоупорного слоя, $т/м^2$;
l — отставание отвалов от забоя разрабатываемого пласта;
h — высота отвала.

С поверхности отвалов необходимо обеспечивать сток дождевых и талых вод. Для этой цели поверхность отвалов необходимо планировать, придавая ей уклон около 3—4‰ в сторону водосточных канав, которые располагаются через каждые 400—500 *м*. По водосточным канавам обеспечивается сток воды за пределы отвалов; уклон водосточных канав должен быть не менее 2‰.

§ 8. Основные расчетные формулы [1]

Условные обозначения

h — глубина потока при безнапорном движении,
h_1 — глубина потока на контуре питания,
h_2 — глубина потока на контуре котлована (траншеи),
h_c — глубина воды в скважине,
m — мощность напорного водоносного горизонта,
S — понижение при напорном движении,
$k_ф$ — коэффициент фильтрации, *м/сутки*,
Q — общий приток воды к выработке,
q — приток воды на 1 *пог. м* выработки,
Q_c — расход скважины,
$r_к$ — приведенный радиус выработки, определяемый по формуле

$$r_к = \frac{p}{2\pi},$$

где p — периметр,

[1] Параграф составлен канд. геол.-минер. наук В. А. Мироненко.

d и b — максимальный и минимальный размеры выработки,
r_c — радиус скважины,
R_* — расстояние от центра выработки до ближайшей границы пласта,
L_* — расстояние от контура карьера (траншеи) до контура питания,
l_1 и l_2 — расстояние от водопонизительного контура до контура питания и до карьера,
R — радиус влияния,
σ — расстояние между скважинами или водопонизительными выработками,
x и r — расстояние от выработки (водопонизительного контура) до расчетной точки,
t — время в сутках,
a — коэффициент уровнепроводности, определяемый опытным путем или по формуле $\frac{k_ф h_{ср}}{\mu}$ $\left(\text{где } h_{ср} = \frac{2h_1 + h_2}{3}, \right.$ $\left.\mu \text{ — водоотдача}\right)$,
β — коэффициент пьезопроводности, определяемый опытным путем,
$Q_{вз}$ — водозахватная способность скважины, определяемая по формуле

$$Q_{вз} = 130\pi r_c l_ф \sqrt{k_ф}, \ м^3/сутки,$$

где $l_ф$ — длина рабочей части фильтра.

Ниже приведены основные расчетные формулы, позволяющие просто и вместе с тем достаточно надежно оценить эффективность тех или иных дренажных сооружений.

А. Расчет фильтрации к открытым горным выработкам[1]

1. Общие притоки можно определять по формуле [17]

$$Q = \frac{1{,}37 k_ф (h_1^2 - h_2^2)}{\lg \frac{R}{r_к}}. \tag{81}$$

Расчетный радиус влияния R определяется:

а) для моментов времени $t \leqslant \frac{R_*^2}{\pi a}$ по формуле [21]

$$R = \sqrt{\pi a t}; \tag{82}$$

[1] Формулы этого раздела могут использоваться и для расчета притоков к дренажным штрекам. Все формулы приводятся для безнапорного движения; для перехода к напорному режиму следует заменить величины $(h_i^2 - h_k^2)$ на $2mS$, а величины a на β.

б) для моментов времени $t > t_0$ по табл. 23 [23]. Формула (81) при $t > t_0$ применима только в случаях, приведенных в табл. 23, при выполнении условий

$$\frac{R_*}{R} > 0{,}1 \quad \text{и} \quad \frac{R_*}{d} > 0{,}5. \tag{83}$$

Таблица 23

Формулы для определения радиуса влияния для моментов времени $t > t_0$

Условия питания и стока водоносного горизонта	Схема	Выражение для R
1. Котлован у реки (у линейной области питания)		$R = 2L$
2. Котлован в углу между двумя областями питания		$R = \frac{2LL_0}{\sqrt{L^2 + L_0^2}}$
3. Котлован в углу между областью питания и непроницаемой границей		$R = 2L\sqrt{\frac{L^2}{L_0^2} + 1}$
4. Котлован между двумя областями питания или стока		$R = \frac{2}{\pi} L_0 \sin \frac{\pi L}{L_0}$
5. Котлован между областью питания и непроницаемой границей		$R = \frac{4}{\pi} L_0 \operatorname{tg} \frac{\pi L}{2L_0}$
6. Котлован в круговой области питания		$R = R_0 - \frac{\delta^2}{R_0}$

Следует учесть, что формула (81) дает общую величину притока к выработке, а по отдельным участкам она позволяет лишь весьма приближенно оценить притоки.

2. Для вытянутых выработок, ориентированных параллельно границе пласта, расчет удельных притоков может проводиться по формуле

$$q = \frac{k(h_1^2 - h_2^2)}{2L}. \qquad (84)$$

Величина L при $t \leqslant t_0$ определяется по формуле (82); при $t > t_0$ $L = L_*$ — для границы с постоянным напором, $L = \frac{L_*}{T(t)}$ — для непроницаемой границы; величина $T(t)$ приведена ниже [21].

$\frac{at}{L_*^2}$	0,3	0,4	0,6	0,8	1,0
$T(t)$ . . .	1,0	0,75	0,45	0,3	0,2

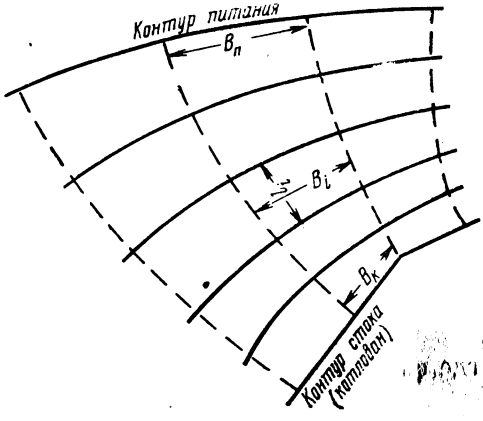
Формула (84) справедлива при выполнении условий

$$\frac{b}{d} < 0{,}1\ldots \text{ и } \frac{L}{d} < 0{,}5 \div 1{,}0, \qquad (85)$$

при $t > t_0$ по этой формуле можно определять притоки лишь со стороны, обращенной к контуру питания.

3. Для случаев, не охватываемых формулами (81) и (84), необходимо предварительно построить характерные линии тока фильтрационного поля (графически или на приборе ЭГДА), после чего расчет ведется отдельно в пределах каждой выделенной «ленты тока». Для этого «лента» (рис. 96) приводится к плоской путем введения расчетной ее длины $L_р$ по формуле [23]

$$L_р = \delta \frac{B_к}{\left(\frac{B}{l}\right)}, \qquad (86)$$



— — — Линии тока
——— Эквипотенциалы

Рис. 96. Схема ленты тока

где δ — число отсеков;

$\frac{B}{l}$ — среднее отношение ширины отсека к его длине.

После приведения удельный расход в пределах ленты рассчитывается по формуле (84), при замене L на $L_р$.

4. Уровни вблизи выработки рассчитываются по формуле

$$h = \sqrt{\frac{2q}{k_ф} x + h_2^2}, \qquad (87)$$

а вдали от выработки — приближенно по формуле

$$h = \sqrt{h_2^2 + \frac{0{,}73Q}{k_ф} \lg \frac{r}{r_к}}. \qquad (88)^*$$

Более точно уровни определяются моделированием на ЭГДА — для установившегося режима или по известным формулам Н. Н. Веригина [21] — для неустановившегося движения.

5. При взаимодействии двух параллельных вытянутых выработок $\left(\frac{b}{d} < 0{,}1\right)$ уровень в средней точке $h_ц$ определяется по формуле

$$h_ц(t) = 1{,}13 h_ц^0 l^{-\frac{1}{2}\frac{\pi^2}{\sigma^2}at}, \qquad (89)$$

где $h_ц^0$ — первоначальная глубина в средней точке; время t отсчитывается от момента начала работы обеих выработок.

Б. Расчет водопонизительных скважин

Водопонизительные скважины могут работать с постоянным расходом или с постоянным напором в них. В приближенных расчетах можно считать, что с постоянным расходом работают лишь скважины вокруг затопленных или несовершенных котлованов [1], оборудованные насосами. В этом случае расход скважин равен производительности насосов (если $Q_н \leqslant Q_{вз}$) или водозахватной способности скважины (если $Q_н > Q_{вз}$). Во всех остальных случаях можно считать, что скважины работают при постоянном понижении.

1. Расчет водопонизительных скважин вокруг несовершенного котлована при установившемся режиме имеет два случая:

а) расчет одиночной скважины осуществляется по формуле (81),

б) расчет группы скважин производится по формуле

$$Q_с = \frac{k_ф\left(h_{ос}^2 - h_с^2\right)}{2\varphi_0}, \qquad (90)$$

где φ_0 — «функция понижения», определяется по нижеприведенным формулам [23].

Вид системы	Выражение для φ_0
Бесконечный ряд (цепочка) скважин:	
между областью питания и стока (в частном случае — между двумя контурами питания) . .	$\varphi_0 = 0{,}367 \lg \frac{\sigma}{2\pi r_с} + \frac{l_1 l_2}{\sigma L}$
параллельно линейному контуру питания . . .	$\varphi_0 = 0{,}367 \lg \frac{\sigma}{2\pi r_с} + \frac{L}{\sigma}$

* Формула (88) применима в тех же условиях, что и формула (81).

[1] Котлован называется несовершенным по отношению к водоносному горизонту, если он не вскрывает его на всю мощность.

Две скважины:

между областью питания и стока . . . . . $$\varphi_0 = 0{,}367 \lg\left[\frac{2L}{\pi r_c}\cos\frac{\pi(l_1 - l_2)}{2L}\right] + 0{,}367 \times \lg\left[\frac{\cos\frac{\pi(l_1 - l_2)}{2L}}{\frac{\pi\sigma}{2L}}\right]$$

параллельно линейному контуру питания . . . $$\varphi_0 = 0{,}367 \lg\left[\frac{2L}{r_c} + \sqrt{\frac{4L^2 + \sigma^2}{2\sigma}}\right]$$

в круговом пласте . . . $$\varphi_0 = 0{,}367 \lg\frac{R^2}{\sigma r_c}$$

Три скважины по углам равностороннего треугольника в круговом пласте . . . . $$\varphi_0 = 0{,}367 \lg\frac{R^3}{\sigma^2 r_c}$$

Четыре скважины (по углам квадрата) в круговом пласте $$\varphi_0 = 0{,}367 \lg\frac{R^4}{1{,}41\sigma^3 r_c}$$

Кольцевая батарея скважин в круговом кольце . . . . $$\varphi_0 = 0{,}367 \lg\left[\frac{R^4}{n r_к^{n-1} r_c}\right],$$

где $r_к$ — радиус батареи

или

$$\varphi_0 = 0{,}367 \lg\frac{R}{r_к} + 0{,}367 \lg\frac{\sigma}{2\pi r_c}.$$

Если задан расход скважин Q_c, то по формуле (90) определяется уровень в ней h_c.

2. Расчет водопонизительных скважин вокруг совершенного котлована при установившемся режиме производится по формуле [23]

$$Q_c = \frac{k_ф}{2} \cdot \frac{\frac{l_{гр}}{L_р}(h_1^2 - h_2^2) + h_2^2 - h_c^2}{\frac{l l_{гр}}{\sigma L_р} + 0{,}367 \lg\frac{\sigma}{2\pi r_c}}, \tag{91}$$

где $L_р$ — расчетное расстояние от котлована до контура питания;

l и $l_{гр}$ — расчетные расстояния от водопонизительного контура до области питания и до котлована (см. п. А, 3).

Средний удельный расход потока, выходящего на откос, определяется по формуле [23]

$$q_0 = k_ф \frac{h_1^2 - h_2^2}{2L_р} - Q_c \frac{l}{\sigma L_р}. \tag{92}$$

3. Уровни в точках пласта, удаленных от скважин на расстояние, бо́льшее величины σ, определяются исходя из предположения, что на месте контура скважин работает выработка (траншея), уровень в которой $h_{ср}$ определяется формулой

$$h_{ср} = \sqrt{h_c^2 + \frac{Q_c}{\pi k_ф}\ln\frac{\sigma}{2\pi r_c}}. \tag{93}$$

В этом случае применимы все формулы п. А при замене в них величины h_2 на $h_{ср}$.

4. Расчет водопонизительных скважин с заданными расходами при неустановившемся режиме производится по формуле [23]

$$h^2 - h_0^2 = \frac{2}{k_ф} \sum_{i=1}^{n} Q_{ci} f_{ti}, \qquad (94)$$

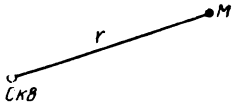
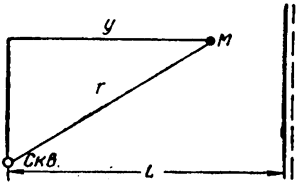
где h_0 — естественный уровень в расчетной точке, индекс i относится к скважине номер i;

n — число скважин;

f_t — функция понижения, определяемая по табл. 24 [23].

Таблица 24

Формулы для определения функции понижения

Условия питания и стока водоносного горизонта	Схема	Выражение для f_t
Скважина в неограниченном пласте		$f_t = -\frac{1}{4\pi} E_i\left(-\frac{r^2}{4at}\right)$
Скважина у прямолинейного контура питания (стока)		$f_t = \frac{1}{4\pi}\left[E_i \times \left(-\frac{4L^2 - 4Ly + r^2}{4at}\right) - E_i\left(-\frac{r^2}{4at}\right)\right]^*$

Для скважин с одинаковым дебитом, расположенных по круговому контуру, при определении уровня в центре контура [17]

$$\sum_{i=1}^{n} Q_{ci} f_{ti} = nQ_c \ln \frac{2{,}25at}{r_0^2}, \qquad (95)$$

где r_0 — приведенный радиус контура.

5. Расчет контуров водопонизительных скважин с заданными уровнями при неустановившемся режиме может приближенно осуществляться по формулам установившегося режима при подстановке в них вместо величины L расчетного радиуса влияния при неустановившемся режиме, определяемого по формуле (82).

---

* E_i — интегральная показательная функция [23].

В. Некоторые дополнительные замечания

1. Приток к несовершенным скважинам рассчитывается по приведенным выше формулам (п. Б) при введении в них условного радиуса скважины [23]

$$r = r_c \exp\left[-\frac{1-\bar{b}}{\bar{b}} \ln\left(\frac{b}{r_c} - \varepsilon\right)\right], \qquad (96)$$

где ε определяется по графику (рис. 97).

Приток к несовершенным котлованам, траншеям может рассчитываться непосредственно по формулам п. А.

2. При расчете фильтрации в слоистых толщах вводится расчетный коэффициент фильтрации

$$k_{ср} = \frac{\sum_{i=1}^{n} k_i m_i}{\sum_{i=1}^{n} m_i}, \qquad (97)$$

где i — номер слоя,
n — число слоев.

При неустановившемся безнапорном движении величина a должна соответствовать тому слою, в котором проходит депрессионная поверхность.

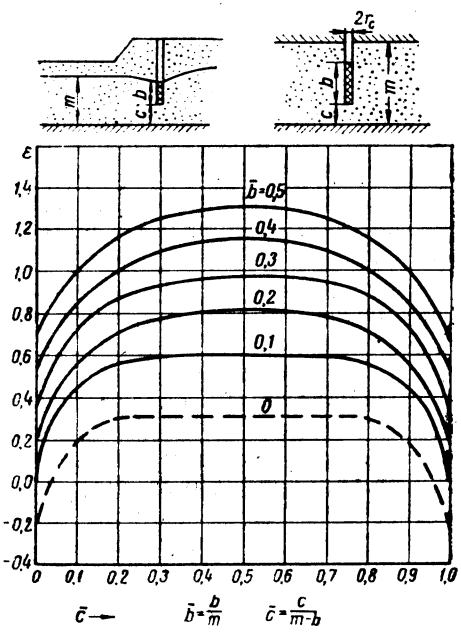


Рис. 97. График к определению приведенного радиуса скважин

3. Для учета естественного уклона потока, понижения при определении уровней необходимо отсчитывать от естественного уровня в расчетной точке.

4. При отсчете понижения от естественных уровней автоматически учитывается инфильтрация (за исключением величины инфильтрации на площади карьера).

5. Расчет притоков в условиях наклонного залегания водоносных слоев может проводиться по тем же формулам, что и при горизонтальном залегании, при замене

$$h_i^2 - h_k^2 \text{ на } (h_i + h_k)(H_i - H_k),$$

где H — напор, отсчитанный от произвольной горизонтальной плоскости сравнения.

Глава XV

МЕРОПРИЯТИЯ ПО ПРЕДОТВРАЩЕНИЮ ДЕФОРМАЦИЙ ОТКОСОВ УСТУПОВ И ОТВАЛОВ

§ 1. Общая характеристика мероприятий

Предотвращение деформаций больших массивов горных пород достигается разгоном уступов под углами, не превышающими допустимых, устанавливаемых расчетом на основе геологических и гидрогеологических условий. Методика расчета допустимых углов наклона бортов карьеров и откосов отвалов изложена в четвертой части.

Однако и при допустимом общем угле наклона отдельные наиболее ослабленные участки бортов могут подвергаться местным деформациям.

Для предотвращения такого рода деформаций необходимо применять мероприятия, общая характеристика которых дана в табл. 25.

Мероприятия по обеспечению устойчивости откосов, сложенных рыхлыми породами, сводятся в основном к предотвращению их набухания и фильтрационных деформаций, что достигается путем дренажа и песчано-гравийной пригрузки.

Мероприятия по обеспечению устойчивости откосов скальных и полускальных пород сводятся в основном к заоткоске уступов с учетом характера трещиноватости пород и к искусственному укреплению наиболее слабых участков.

§ 2. Углы откосов уступов

Придание откосам уступов углов, соответствующих свойствам пород, является одним из первых мероприятий, способствующих предотвращению развития деформаций бортов карьеров.

По расчетам на предельное равновесие углы откосов уступов, сложенных скальными и полускальными породами, при отсутствии неблагоприятно ориентированных сплошных трещин получаются равными 90° при большой высоте и большом коэффициенте запаса устойчивости. Однако вследствие трещиноватости пород, интенсивность которой усиливается взрывными работами, а также под влиянием выветривания крутые откосы уступов подвергаются интенсивному осыпанию. Поэтому основным критерием, определяющим величины углов откосов уступов скальных и полускальных пород, является их склонность к осыпанию.

В крепких скальных крупноблоковых породах при благоприятно расположенных трещинах и заоткоске часто расположенными наклонными скважинами углы откосов отдельных уступов могут достигать 80—85°. При наличии в массиве трещин большого протяжения, падающих в сторону выемки (согласно

Таблица 25

Мероприятия по предотвращению деформаций бортов, уступов и отвалов

Характеристика горных пород, слагающих откосы	Виды ожидаемых деформаций откосов	Факторы, способствующие развитию деформаций	Мероприятия по предотвращению деформаций постоянных откосов
Крепкие, средней крепости и выветрелые породы	Обрушения	Наличие в откосах сланцеватости, слоистости, дизъюнктивных нарушений и крупных тектонических трещин, падающих в сторону выемки под углами круче 25—30°	Заоткоска уступов по поверхностям ослабления; укрепление анкерным креплением при небольшом протяжении поверхностей ослабления при углах до 40—45°
	Осыпи	Массовые взрывы, интенсивная естественная трещиноватость, отсутствие заоткоски	Заоткоска наклонными скважинами, цементация сильнотрещиноватых пород и торкретирование
Слабые глинистые, песчано-глинистые и песчаные породы, а также полностью дезинтегрированные изверженные и метаморфические породы	Обрушения	Завышенные углы откосов и наличие поверхностей ослабления	Заоткоска уступов под углами, характеризующимися табл. 26
	Осыпи:		
	а) слабосвязных пород	Под влиянием выветривания крутых откосов	Заоткоска и одернование откосов
	б) песчаных откосов	Крутые откосы (более 35°), выветривание, развевание	Заоткоска и цементация или торкретирование откосов
	Просадки:		
	а)	Насыщение водой высокопористых отложений (лёссов, лёссовидных суглинков)	Обеспечение стока дождевых и талых вод с площадок
	б)	Наличие пластичных слоев в основании откоса	Выполаживание откосов, уменьшение их высоты или образование контрфорса
	в)	Полностью каолинизированные выщелоченные полевошпатовые породы	Покрытие площадок слоем плотных глин и обеспечение стока воды

Продолжение табл. 25

Характеристика горных пород, слагающих откосы	Виды ожидаемых деформаций откосов	Факторы, способствующие развитию деформаций	Мероприятия по предотвращению деформаций постоянных откосов
Слабые глинистые, песчано-глинистые и песчаные породы, а также полностью дезинтегрированные изверженные и метаморфические породы	Оползни:		
	а) однородных пород	Скопление воды в прибортовой полосе и на площадках уступов	Дренаж прибортовой полосы и площадок уступов
	б) фильтрационные	Подкапывание откосов при оплывании и размывании фильтрующих и размокающих слоев	Пригрузка фильтрующих участков; расположение площадок уступов непосредственно под фильтрующим слоем
	в) покровные	Отсутствие стока дождевых и талых вод	Обеспечение стока поверхностных вод; устройство контрфорсов
	г) контактные	Подрезка контактов слоев и их обводненность	Предотвращение увлажнения контактов путем покрытия площадок уступов слоем плотных глин
	д) глубинные лежачего бока	Наличие напорных вод и пластичных слоев	Дренирование пород лежачего бока; выполаживание откоса
	е) оползни-надвиги висячего бока	Вскрытые слабые контакты и обводнение толщи пород	Ликвидация источников обводнения; выполаживание откосов
	ж) выпирания	Наличие невскрытых слабых контактов и пластичных слоев в основании откосов	Уменьшение высоты откоса, его выполаживание, образование контрфорса
	Оплывания:		
	а) слабосвязных песчано-глинистых откосов	Фильтрация грунтовых вод: скопления атмосферных вод на оползневом теле	Дренаж водоносных слоев; покрытие фильтрующей части откоса слоем крупнозернистого песка, гравием и щебнем

Характеристика горных пород, слагающих откосы	Виды ожидаемых деформаций откосов	Факторы, способствующие развитию деформаций	Мероприятия по предотвращению деформаций постоянных откосов
Слабые глинистые, песчано-глинистые и песчаные породы, а также полностью дезинтегрированные изверженные и метаморфические породы	б) песчаных откосов	Фильтрация грунтовых вод	Пригрузка гравием фильтрующей части откоса
Отвальные породы	Оползни: а) надподошвенные	Слабые породы отвала; дополнительное увлажнение пород — особенно в основании отвала	Предотвращение дополнительного увлажнения отвальных пород, дренаж основания; селективное отвалообразование; многоярусные отвалы
	б) подподошвенные	Слабое основание отвалов; обводнение основания отвалов	Уменьшение высоты отвала; дренаж основания отвалов; образование предотвала
	в) подошвенные (контактные)	Наклонное слоистое основание отвалов	Уменьшение высоты отвала; взрывание основания отвалов
	Просадки	Увлажнение рыхлых отвальных пород	Обеспечение стока дождевых и талых вод; осушение основания отвалов
	Оплывание	Насыщение в течение длительного времени отвальных пород пылеватых и глинистых песков дождевыми и талыми водами	Обеспечение стока атмосферных вод с поверхности отвалов; устройство дренажа в основании отвалов, выполаживание откосов

с откосом) под углами более 35° (а если трещины заполнены глинкой трения, то при углах более 25°), заоткоска уступов должна производиться по этим трещинам.

Как показывают наблюдения, при заоткоске уступов наклонными скважинами ориентировка ступенчато расположенных трещин отдельности на величины углов уступов существенного влияния не оказывает, а влияет только характер и степень трещиноватости (крупность и форма блоков, ограниченных трещинами). Уступы сильно трещиноватых скальных пород, имеющих остроугольные и многогранные блоки размером 10—15 *см*, подвергаются в откосах интенсивному осыпанию при углах откоса более 55—60°; если при этом зоны интенсивной трещиноватости имеют небольшую ширину, но такие участки целесообразно цементировать, чтобы обеспечить устойчивость уступов при таких же углах, как и на соседних участках менее трещиноватых пород.

Выветрелые породы имеют более интенсивную трещиноватость за счет появления трещин выветривания; благодаря тому, что в этих породах трещины заполнены цементирующим глинистым материалом, на непродолжительное время могут быть допущены углы откосов уступов до 60—70°. С течением времени уступы начинают осыпаться и выполаживаться до углов 45—50°. Интенсивному осыпанию подвергаются также уступы, сложенные серицитовыми, хлоритовыми и талько-хлоритовыми сланцами, если углы откоса превышают 40—45°.

Необводненные уступы, сложенные суглинками и глинами разного состава, сохраняют устойчивость в течение длительного времени при углах 35—40°, а сложенные плотными глинами — при 45—50°. Углы откосов уступов, сложенных склонными к набуханию глинистыми породами, обычно рассчитываются по предельному равновесию с коэффициентом запаса 1,5—2 по схемам III или V (см. четвертую часть).

Фильтрующие откосы песчаных глин и глинистых песков склонны к оплыванию и для обеспечения устойчивости их необходимо покрывать слоем в 1,5—2 *м* песчано-гравийного материала, придавая им на участке высачивания угол в 20—25°. Песчано-гравийные отложения длительное время сохраняют устойчивость при углах естественного откоса 36—38°, а при наличии глинистого материала — 40—45°.

В табл. 26 приведены рекомендуемые величины углов откосов рабочих и нерабочих уступов высотой 15—20 *м*. Сдвоенные и строенные уступы крепких пород сохраняют устойчивость при тех же углах, что и одиночные, так как углы устойчивых откосов уступов этих пород устанавливаются в зависимости от склонности пород к осыпанию, а не по предельному равновесию. Углы откосов при сдваивании уступов рыхлых пород необходимо рассчитывать по условию предельного равновесия, с коэффициентом запаса 1,3—1,5.

Углы откосов уступов

Категория пород по устойчивости в откосах	Общая характеристика горных пород	Факторы, определяющие углы откосов уступов	Литологическое наименование пород	Высота одиночных уступов	Углы откосов уступов, *град*		
					рабочих	нерабочих	
						одиночных	сдвоенных
I	Крепкие горные породы	Степень трещиноватости и форма отдельных блоков	Крепкие песчаники, кварциты, известняки, изверженные породы прямоугольной отдельности крупностью более 50 *см*	15—20	До 90	70—75	65—70
			Крепкие осадочные и метаморфические породы прямоугольной отдельности крупностью 30—50 *см* и косоугольной отдельности крупностью более 50 *см*	15—20	70—75	60—65	57—60
			Крепкие породы интенсивной трещиноватости — крупность блоков 10—30 *см*	15—20	65—70	55—60	52—57
II	Породы средней крепости и выветрелые разности крепких	Степень трещиноватости и выветрелости	Песчаники, глинистые сланцы, аргиллиты	15—20	До 90	55—60	52—57
			Выветрелые интенсивно трещиноватые изверженные или рассланцованные породы	10—15	65—70	50—55	50—55
			Сильно выветрелые породы	10—15	55—60	45—50	45—50

Продолжение табл. 26

Категория пород по устойчивости в откосах	Общая характеристика горных пород	Факторы, определяющие углы откосов уступов	Литологическое наименование пород	Высота одиночных уступов	Углы откосов уступов, *град*		
					рабочих	нерабочих	
						одиночных	сдвоенных
II	Породы средней крепости и выветрелые разности крепких	Степень трещиноватости и выветрелости	Хлоритовые, серицитовые и тальк-хлоритовые сланцы	10—15	50—55	40—45	40—45
III	Глинистые и полностью дезинтегрированные изверженные и метаморфические породы	Угол внутреннего трения и сцепление; обводненность пород	Суглинки различного состава, полностью дезинтегрированные изверженные породы, мел, мергель	10 До 50	55—60 35—50*	40—50 35—40	35—40 —
			Глинистые песчано-гравийные отложения	10—50	35—55*	40—45	35—40
			Фильтрующие откосы песчаных глин и суглинков	10—20	30—50*	20—25**	—
IV	Несвязные породы	Угол внутреннего трения	Песчано-гравийные отложения без глины	10—50	35—40	36—38	36
			Фильтрующие песчаные откосы	На участке высачивания	12—18	20—25***	—

* Углы откосов устанавливаются путем расчета.

** При песчаной пригрузке.

*** При гравийной пригрузке.

При падении слоев, рассланцованных толщ и тектонических трещин большого протяжения в сторону карьера под углом 30—65° уступам следует придавать угол откоса, соответствующий углу падения этих поверхностей ослабления, но не более приведенных в таблице значений.

В табл. 26 указаны двойные значения углов откоса уступов для каждой разновидности пород. Из этих значений большее можно принимать для более крутых бортов меньшей высоты, а меньшее — для высоких, но более пологих бортов. В целом углы откосов уступов следует принимать в соответствии с общим углом наклона борта, установленным расчетом, с учетом ширины берм, расстояния между ними и необходимого времени сохранения устойчивости; при пологих углах наклона борта придавать откосам уступов крутые углы не следует.

§ 3. Заоткоска уступов

Чтобы придать уступам в их предельном (нерабочем) положении углы откосов, рекомендуемые в предыдущем параграфе, необходимо производить их искусственную заоткоску. Многочисленные инструментальные съемки откосов уступов, сложенных

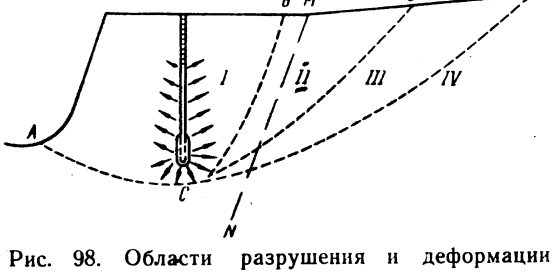


Рис. 98. Области разрушения и деформации пород в уступах при массовых взрывах:

I — зона отрыва и дробления; *II* — зона заколов; *III* — зона остаточных деформаций; *IV* — зона колебания

крепкими и слабыми породами, показывают, что без специальной заоткоски даже в наиболее крепких слаботрещиноватых породах углы откосов уступов часто не превышают 45°.

На углы откосов уступов, сложенных скальными и полускальными породами, большое влияние оказывают буровзрывные работы.

Как известно, энергия взрыва расходуется на отрыв породы по линии *ACB* (рис. 98), дробление массива в границах зоны отрыва и его перемещение, деформацию масива за поверхностью отрыва и его колебание. В соответствии с этим часть массива горных пород, прилегающую к откосу и оказывающуюся в сфере действия взрыва, разделяют на четыре зоны: 1) отрыва и дробления, 2) заколов, 3) остаточных деформаций, 4) колебаний.

Ширина каждой зоны зависит от физико-механических свойств и структуры горных пород, от характеристики ВВ, его веса и формы распределения во взрываемом массиве (форма распределения включает и последовательность взрыва отдельных зарядов при микрозамедленном взрыве).

Форма заряда и распределение его в массиве зависят от назначения взрыва.

При взрывании горных пород полезной для дробления оказывается часть энергии взрыва, расходуемая на отрыв и дробление, в том числе на частичное дробление в зонах заколов и остаточных деформаций, так как в последующих заходках частичное дробление пород будет использовано; бесполезной оказывается часть энергии, расходуемая на перемещение массива в зоне отрыва и на колебание в зоне колебаний.

При подходе к предельному контуру бесполезной оказывается и та часть энергии, которая расходуется на дробление пород в зоне заколов и зоне остаточных деформаций. С точки зрения устойчивости бортов эта работа взрыва оказывается вредной, так как при частичном дроблении крепкие породы экскаватором не забираются, а с течением времени в откосах обрушаются. Вследствие этого происходит выполаживание уступов до углов менее проектных и происходит ликвидация берм очистки, а также нарушение транспортных берм.

Проведенные инструментальные наблюдения (методика наблюдений изложена в главе XIII) за деформацией горных пород в уступах при действии массовых взрывов (мгновенных) скважинных зарядов показывают, что ширина зоны заколов достигает 10—13 *м*, а ширина зоны остаточных деформаций 50—70 *м*. Ширина обеих зон сокращается в следующих случаях:

а) при применении короткозамедленного взрывания (в этом случае сокращается также и зона колебаний);

б) при наличии в этих зонах согласно падающих тектонических нарушений, являющихся поверхностями отражения; в этом случае по тектоническому нарушению происходит максимальное смещение пород; такую же роль играют слоистость и сланцеватость пород, а также крупные тектонические трещины;

в) при сокращении веса ВВ, приходящегося на 1 *м* протяженности скважины и борта, до такого, при котором не происходит дробление пород за линией скважин, а происходит лишь их отрыв по этой линии.

Таким образом, для уменьшения влияния массовых взрывов на дробление горных пород за пределами контура отработки уступов необходимо применять короткозамедленное взрывание скважин, начиная с расстояния 30—40 *м* от предельного контура каждого уступа. В последней заходке уступ необходимо заоткашивать наклонными скважинами, располагая последний ряд скважин на проектной берме (бровке уступа) под углом наклона, равным углу откоса уступа, соответствующего свойствам пород

(согласно табл. 26). Заоткашивающие скважины следует располагать в два ряда (рис. 99). Диаметр заоткашивающих скважин в крепких породах должен быть 100—110 *мм*, а в выветрелых 60—80 *мм*, расстояние между заоткашивающими скважинами не должно превышать 3 *м*.

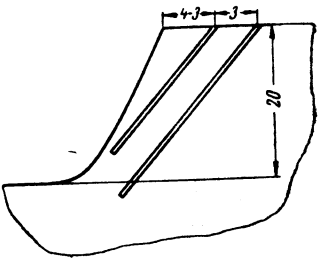


Рис. 99. Расположение заоткашивающих скважин

При диаметре скважин 100—110 *мм* в крепких породах происходит отрыв по линии скважин; в сильно выветрелых и слабых породах при таком заряде происходит дробление пород за линией скважин и поэтому необходимо уменьшать диаметр скважин до 60—80 *мм*.

В 1964 г. на одном карьере успешно начали применять обуривание и взрывание наклонных заоткашивающих скважин малого диаметра по предельному контуру уступа до его подхода к предельному контуру. В этом случае улучшаются условия бурения скважин, а образующаяся «отрезная щель» предотвращает дробление пород за предельным контуром.

Взрывание в недоступной гористой местности следует производить не камерными зарядами, при которых происходит дробление пород далеко за предельным контуром, а обуривать из штолен веер скважин в плоскости откоса (рис. 100).

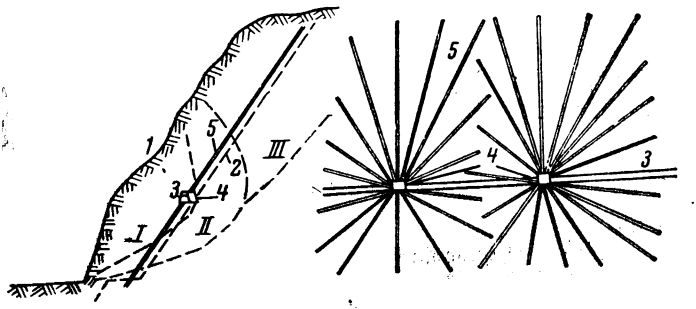


Рис. 100. Расположение веера скважин по контуру карьера при обуривании из штолен:

1 — природный откос; *2* — проектный контур; *3* — штольня; *4* — буровая камера; *5* — скважины; *I*, *II*, *III* — при камерных зарядах соответственно зоны: отрыва, дробления и заколов

Заоткоску уступов слабых глинистых и слабосвязных песчаных пород наиболее удобно производить драглайнами.

§ 4. Искусственное укрепление откосов скальных и полускальных пород

Изучением устойчивости бортов карьеров, сложенных скальными и полускальными породами, установлено, что общий угол наклона борта довольно часто определяется участками наиболее

слабых пород, характеризующихся интенсивной трещиноватостью, интенсивным выветриванием или наличием неблагоприятно ориентированных тектонических трещин, нарушений или ослабленных контактов слоев.

Экономические расчеты показывают, что целесообразно искусственно укреплять ослабленные участки с тем, чтобы общий угол наклона можно было устанавливать по более крепким породам, преобладающим в сложении бортов.

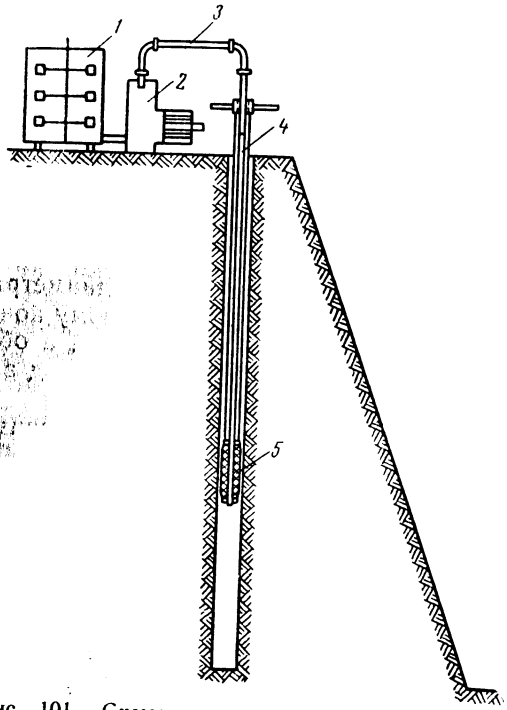


Рис. 101. Схема установки для нагнетания цементного раствора:

1 — растворный узел; *2* — насос; *3* — напорный трубопровод; *4* — инъектор; *5* — резиновый тампон

Из известных в строительной технике способов искусственного укрепления откосов наиболее перспективными для применения на карьерах являются:

а) цементация участков с интенсивной трещиноватостью;

б) штанговое и свайное укрепление участков, ослабленных тектоническими нарушениями и слоистостью;

в) анкеровка металлическими тяжами-тросами;

г) торкретирование интенсивно выветриваемых пород;

д) комбинированные способы.

Экспериментальные работы по цементации участка протяженностью 30 *м* борта Кургашинканского карьера были проведены в 1962 г. сотрудниками ВНИМИ И. А. Агу и М. А. Ревазовым.

На участке на расстоянии 3 *м* от проектного положения верхней бровки сдвоенного уступа и 6 *м* одна от другой были пробурены 5 скважин глубиной 20,7 *м*. Схема установки для нагнетания цементного раствора изображена на рис. 101.

Перед нагнетанием в скважину цементного раствора в нее подавалась вода для промывки трещин и определения поглощаемости пород.

При пробном нагнетании расход воды составлял около 6 $м^3/ч$ при давлении 2—3 $кГ/см^2$. Максимальное давление при нагнета-

нии цементного раствора составляло 15 *кГ/см²*. Концентрация цементного раствора постепенно увеличивалась.

Данные о расходе цемента по каждой скважине приведены в табл. 27.

Таблица 27

Расход цемента по скважинам

№ скважин	Глубина скважин, *м*	Время промывки скважин, *час*	Время нагнетания цементного раствора, *час*	Расход цемента, *т*
1	20,2	4,5	3,0	6,0
2	20,7	5,0	2,3	7,0
3	20,7	3,5	2,0	4,0
4	20,7	6,0	1,5	0,5
5	20,7	5,0	0,5	0,5

В 1963—64 гг. на этом карьере были продолжены работы по укреплению ослабленных участков бортов цементацией. В 1963 г. был укреплен участок протяженностью 125 *м*, а в 1964 г. — протяженностью 120 *м*.

Было выявлено, что при цементации пород во всех случаях целесообразно опускать в скважину арматуру, так как затраты на арматуру составляют лишь 10—12% от общей стоимости укрепительных работ, а сопротивление сдвигу при этом возрастает в несколько раз. Цементационные скважины располагаются вертикально или наклонно на 10—15° круче откоса.

Экспериментальные работы по укреплению железобетонными сваями и штангами были проведены бригадой ВНИМИ на участке выездной траншеи Коунрадского карьера. Проекции и размеры участка с расположением штанг и свай изображены на рис. 102.

Бурение скважин под штанги осуществлялось из подвесной люльки (рис. 103), закрепленной на канате пятитонной ручной лебедки.

Расчет необходимого числа штанг производится из условия предельного равновесия и заданного коэффициента запаса, вводимого в характеристики сопротивления сдвигу материала, заполняющего тектоническую трещину, и в сопротивление отрыву материала штанг [2]

$$m = -\frac{P\left(\operatorname{tg}\alpha - \frac{1}{n}\operatorname{tg}\rho\right) - \frac{1}{n}KL}{\frac{1}{n}\sigma_p S\left(1 + \frac{1}{n}\operatorname{tg}\alpha\cdot\operatorname{tg}\rho\right)}, \qquad (98)$$

где m — число штанг;

P — вес закрепляемого массива, *кГ*;

α — угол между штангой и трещиной;

n — заданный коэффициент запаса устойчивости;

K, ρ — сцепление, выраженное в *кГ/см²*, и угол внутреннего трения по трещинам;

L — площадь трещины, *см²*;

S, σ_p — сечение штанг и сопротивление разрыву.

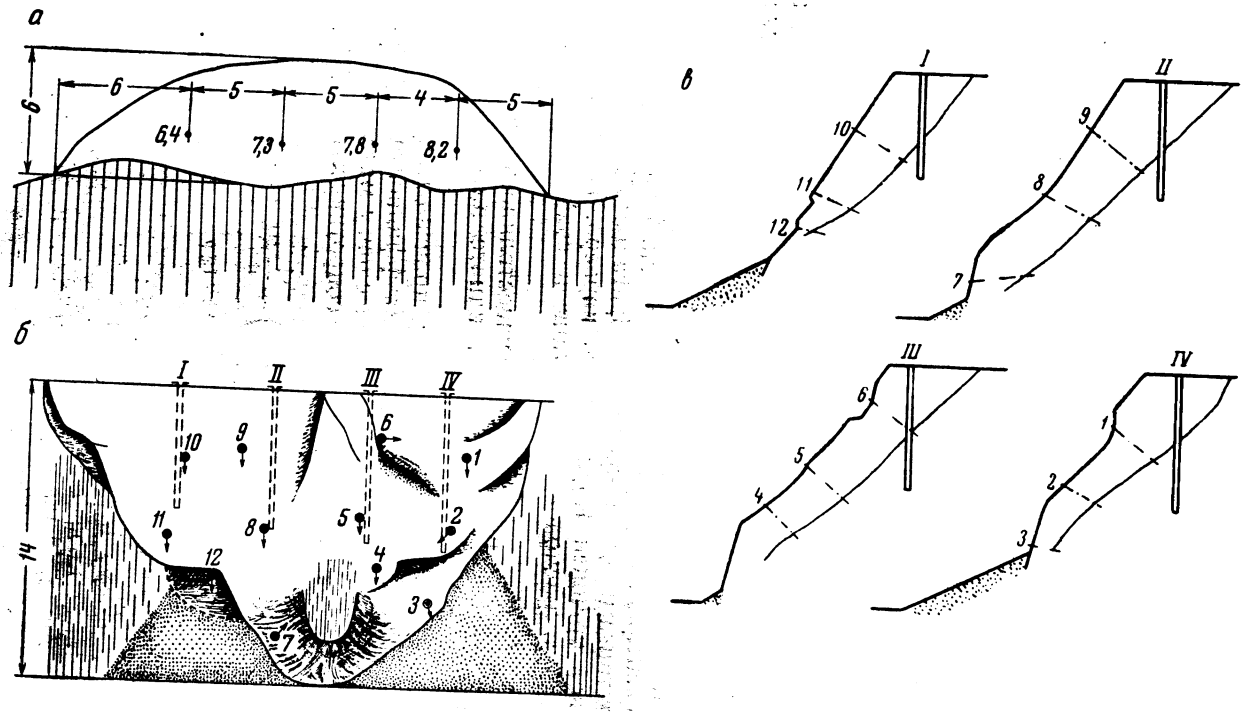


Рис. 102. Участок откоса, закрепленный штангами и сваями:
а — план бермы; *б* — проекция на плоскость откоса; *в* — разрезы

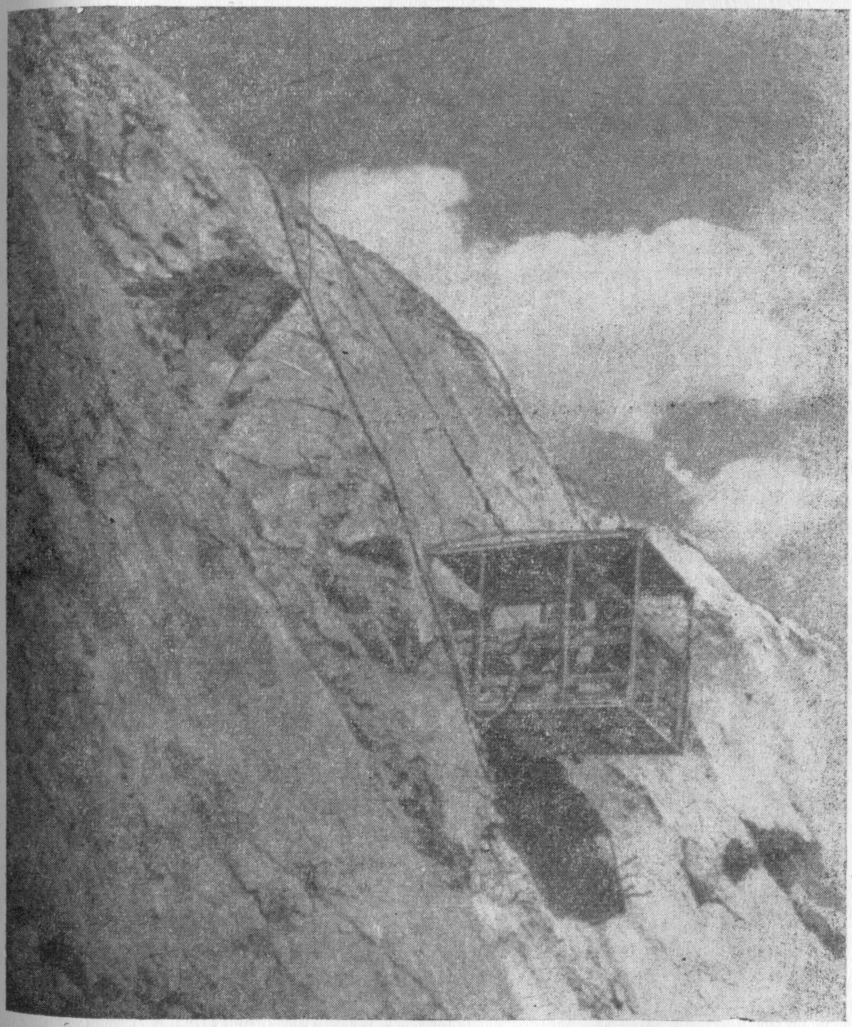


Рис. 103. Бурение скважин под штанги из подвесной люльки

ВНИМИ составлено проектное задание и произведено укрепление железобетонными сваями участка борта Златоуст-Беловского карьера в Джезказгане, ослабленного двумя диагонально расположенными тектоническими нарушениями (рис. 104).

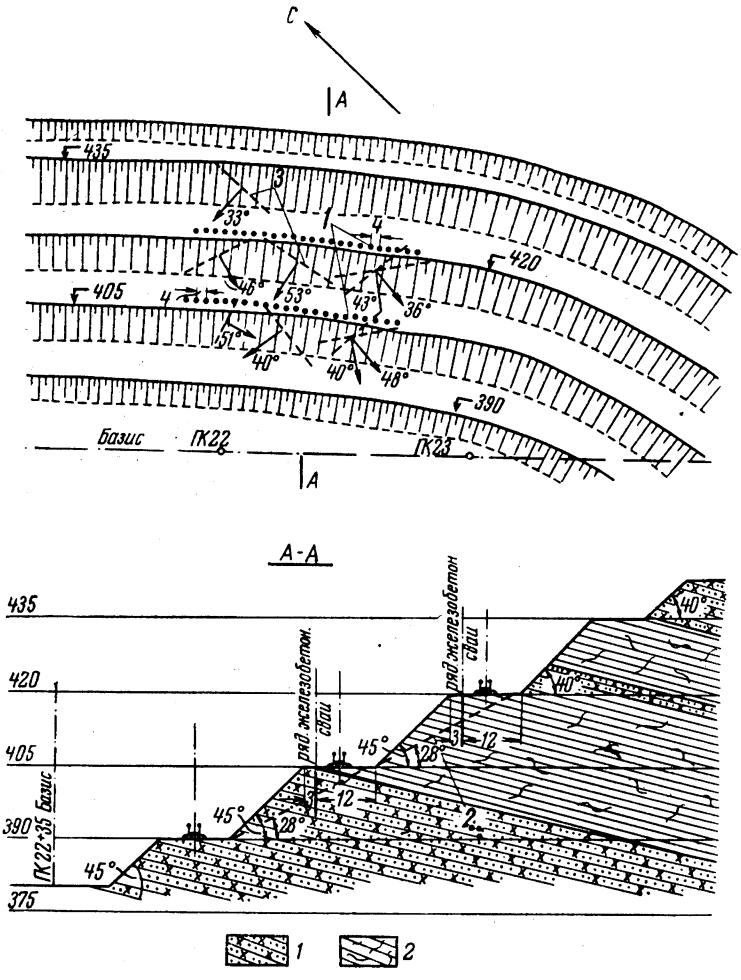


Рис. 104. Участок борта Златоуст-Беловского карьера, укрепленный сваями

По этим нарушениям, составляющим угол 35—40° с простиранием откоса и имеющим угол падения 45—50°, дважды происходило обрушение двух уступов; при уборке очередного обрушения деформация уступов распространялась дальше.

Укрепление горных массивов анкерными гибкими тяжами применяется в гидротехническом строительстве и может быть

применено для укрепления оснований откосов большой высоты, ослабленных тектоническими нарушениями или интенсивной трещиноватостью. В последнем случае анкеровка откосов может быть применена в комплексе с цементацией пород и устройством железобетонной подушки.

Если в интенсивно выветривающихся и интенсивно осыпающихся породах необходимо сохранить крутые откосы уступов (до 60°), то в этих условиях может быть применено укрепление откосов набрызгбетоном по металлической сетке с анкеровкой штангами длиной до 2 *м*.

Такое укрепление было применено на одном из карьеров Чехословакии. Этот вид укрепления целесообразно применять на карьерах большой глубины и небольших размеров в плане, когда при породах средней прочности бортам можно придавать большие общие углы наклона; это становится возможным вследствие большой кривизны бортов в плане.

§ 5. Укрепление песчаных и песчано-глинистых постоянных откосов

Фильтрующие постоянные песчаные откосы (откосы траншей и нерабочих уступов) для предотвращения оплывания необходимо пригружать гравийной призмой треугольного сечения, параметры которой зависят от коэффициента фильтрации водоносного слоя $K_ф$, удельного расхода q и от заложения откоса в пределах промежутка высачивания m. Высота пригрузки должна быть несколько больше высоты промежутка высачивания $h_в$, определяемого по формуле [23]

$$h_в = (m + 0{,}5)\frac{q}{K_ф}. \qquad (99)$$

Ширина основания гравийной призмы a определяется по формуле

$$a = \frac{h_в}{A}\left(\frac{\bar{a}}{2\gamma_{пр}A} + \frac{K_ф}{K_{пр}}\right), \qquad (100)$$

где

$$A = \sin\alpha\left(1 - \frac{K_ф}{K_{пр}}\cos\alpha\right);$$

где $K_ф$ и $K_{пр}$ — коэффициенты фильтрации грунта и материала пригрузки;

α — угол откоса без пригрузки;

$\gamma_{пр}$ — объемный вес материала пригрузки;

ρ — угол трения грунта;

вспомогательная величина, $\bar{a}$ определяется по графику (рис. 105).

График, рассчитанный В. А. Мироненко, подобен графику В. М. Шесткова [198], по которому определяются параметры пригрузочной призмы четырехугольного сечения. При треугольном сечении призмы расход гравия сокращается вдвое.

Фильтрующие откосы песчаных глин, суглинков, и глинистых песков для предотвращения набухания и оплывания необходимо пригружать слоем чистых песков, гравия или щебня. Минимальная мощность слоя пригрузки может быть определена путем расчета устойчивости откоса по характеристикам сопротивления сдвигу пород, выдержанных в водной среде под удельными нагрузками 0; 0,5; 1 и 2 *кГ/см*². При угле фильтрующего песчано-глинистого откоса в 25° достаточная мощность пригрузки внизу откоса составляет 2—2,5 *м*; кверху она уменьшается до нуля. Если среди пород имеются пески или скальные породы (т. е. стоимость пригрузочного материала невысока), то заоткоску

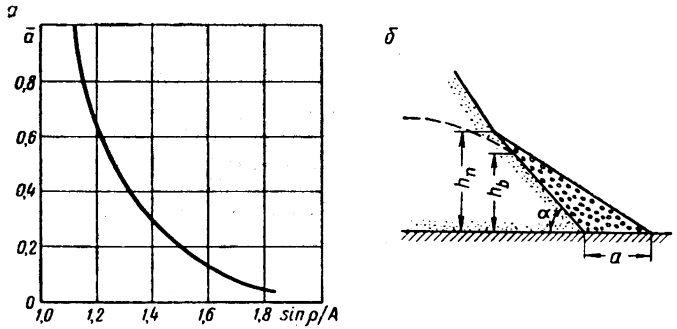


Рис. 105. Вспомогательный график и схема пригрузки:
а — для определения мощности гравийной пригрузки; *б* — схема пригрузки

уступов, сложенных песчано-глинистыми породами, можно не производить, а пригружать их более мощной призмой фильтрующего материала, располагая его под углом естественного откоса (рис. 106).

Различные виды пригрузок песчаных и песчано-глинистых откосов изображены на рис. 106.

Откосы длительного срока службы, сложенные легко размывающимися суглинками, необходимо покрывать растительным слоем и засевать травами.

Откосы мелкозернистых или пылеватых песков в капитальных траншеях и в нерабочих бортах в условиях сухого климата и сильных ветров необходимо укреплять против развевания ветром; укрепление их может осуществляться торкретированием, цементацией или глинизацией; технология укрепления песчаных откосов в настоящее время разрабатывается.

В тех случаях, когда угол наклона борта по расчету общей устойчивости может достигать 32—35° и более, песчаные откосы целесообразно укреплять путем цементации через скважины с тем, чтобы была обеспечена их устойчивость под углом не менее 40°.

Предотвращение контактных оползней и оползней откосов однородных песчано-глинистых пород может быть осуществлено покрытием площадок уступов слоем жирных глин мощностью 30—40 *см*; таким же путем могут быть защищены уступы высокопористых пород от просадок. Естественно, что площадки в этих случаях должны быть спланированы и должны иметь водосточные канавы.

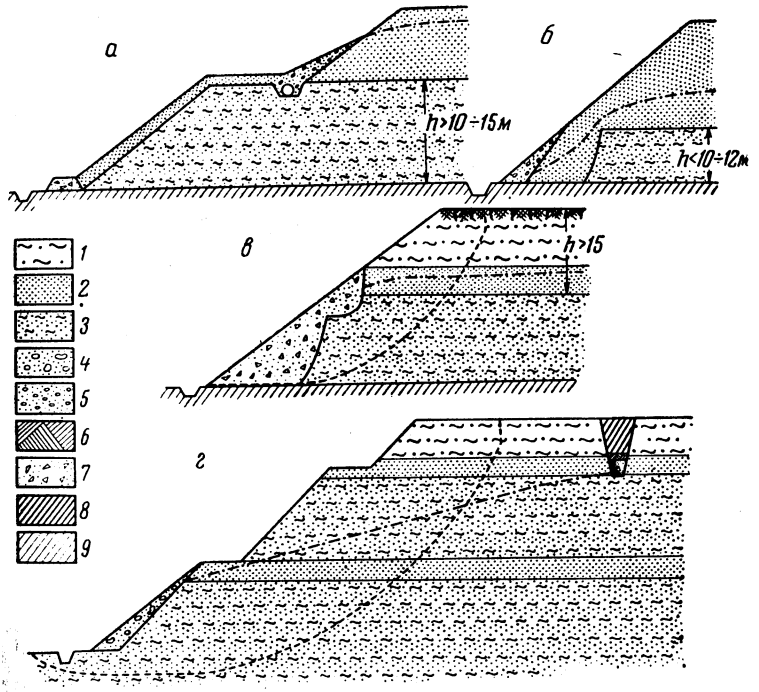


Рис. 106. Виды пригрузок песчаных и песчано-глинистых откосов:

1 — суглинок; *2* — песок; *3* — песчаная глина; *4* — галечник; *5* — песчано-гравийный материал; *6* — фашина; *7* — щебенка; *8* — мятая глина; *9* — местный грунт

Разрабатывается способ укрепления откосов песчано-глинистых пород путем электросиликатизации [6].

§ 6. Бермы и тип съезда в карьер

Одним из основных мероприятий, обеспечивающих безопасную работу на нижних горизонтах глубоких карьеров, является очистка берм от осыпей с целью предотвращения возникновения сплошных откосов большой высоты.

Ширину бермы очистки необходимо принимать в соответствии со склонностью пород к выветриванию, учитывая необходимый срок службы берм и минимальную ширину их рабочей части,

достаточную для размещения оборудования по очистке берм от осыпей. Принимая минимальную ширину рабочей части бермы равной 5—6 *м*, а ширину бермы безопасности равной 2—3 *м*, получаем минимальную ширину бермы очистки равной 8 *м*. Бермы такой ширины рекомендуется оставлять на нижних горизонтах, срок существования которых составляет не более 4—5 лет. На средних и верхних горизонтах ширину берм следует увеличивать до 10—12 *м*, учитывая, что с течением времени часть бермы осыпается. Ширину транспортных берм также необходимо увеличи-

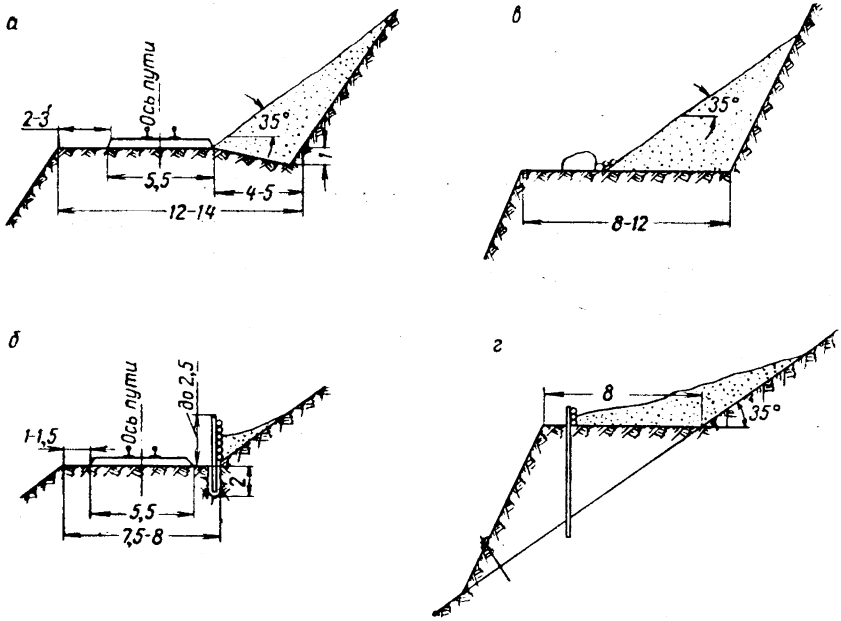


Рис. 107. Бермы:
а, *б* — транспортные; *в* — очистные; *г* — укрепленные сваями

вать на 2—3 *м* с внешней стороны проезжей части, рассматривая эту полосу как берму безопасности и, кроме того, следует оставлять 3—4 *м* между проезжей частью (полотном железнодорожного пути) и откосом вышележащего уступа для накапливающейся осыпи. Таким образом, ширина транспортной бермы составит около 12—13 *м* при одноколейном железнодорожном пути и одностороннем движении автотранспорта и 15—16 *м* — при двухколейном пути.

У внешней бровки берм очистки и транспортных берм при автотранспорте рекомендуется сооружать барьер из железобетонных столбов, а на бермах очистки, кроме того, следует сооружать вал из породы (главным образом негабаритов), как изображено на рис. 107. Под пологими откосами ширину берм можно принимать минимальной, равной 7—8 *м*.

Расстояние по вертикали между бермами очистки и транспортными бермами следует принимать по возможности бо́льшим; как показывают наблюдения за состоянием бортов и откосами железнодорожных полувыемок на склонах гор, это расстояние при хорошей оборке откосов, достаточной ширине берм и устройстве барьера может достигать 45—50 *м*. Для оборки откосов такой высоты необходимо спроектировать специальное оборудование.

Если прочность горных пород позволяет придать бортам углы наклона в 55—60°, бермы очистки следует оставлять только там, где вертикальная высота между транспортными бермами оказывается более 45—50 *м*.

Больший угол наклона бортов возможен также при спиральном съезде в карьер, обеспечивающем бо́льшую высоту между транспортными бермами, чем при тупиковом съезде. Особенно большое выполаживание борта происходит при расположении тупикового съезда на лежачем боку слоистых пород, падающих под углом 25—40°.

Спиральный тип съезда в карьеры со средней протяженностью около 2 *км* позволяет увеличить углы наклона бортов на 5—8° по сравнению с углами при тупиковом типе съезда. Кроме увеличения общего угла наклона борта, при спиральном съезде в 1,5—2 раза сокращается протяженность путей и контактной сети и возрастает провозная способность съезда.

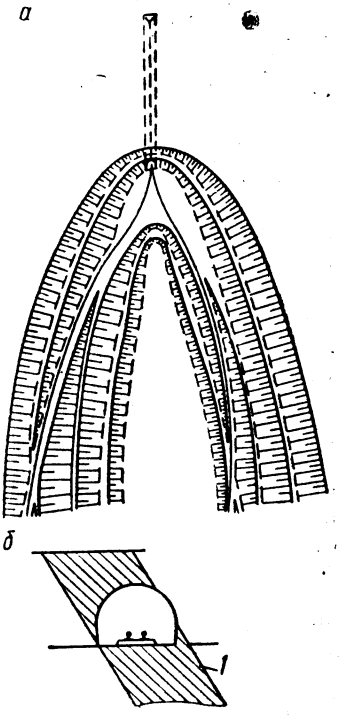


Рис. 108. Штольневый железнодорожный тупик в карьере:

а — схема расположения тупика; *б* — штольня в разрезе; *1* — полезное ископаемое

Если на нижних горизонтах карьера радиус кривизны борта в торцовых участках становится меньше допустимого радиуса закругления железнодорожного пути, могут быть применены штольневые тупики, располагающиеся в торцах карьера. При разработке жильных или пластовых залежей обычно в торцовых частях карьера в бортах остается часть полезного ископаемого; при устройстве штольневых тупиков значительная часть этих запасов может быть выработана, а расположение тупиков в штольнях позволит увеличить наклонную (полезную) часть съезда и даст возможность располагать тупиковый съезд не по одному борту, а по двум бортам (рис. 108), что также будет способствовать увеличению общего наклона борта.

§ 7. Мероприятия по предотвращению опасных деформаций внутренних и внешних отвалов

Параметры внутренних отвалов должны устанавливаться путем расчетов по характеристикам сопротивления сдвигу пород основания отвалов и вскрышных пород, отсыпаемых в отвалы.

При расчетах параметров внутренних отвалов, естественно, учитывается также способ отвалообразования и общая высота отвала.

Для предотвращения опасных деформаций внутренних отвалов необходимо обеспечить сохранение сопротивления сдвигу пород отвала и их основания.

Основными мероприятиями для этой цели являются:

а) предотвращение дополнительного увлажнения пород во вскрышных уступах, что достигается путем обеспечения стока по площадкам уступов и земной поверхности грунтовых, дождевых и талых вод к водосборникам и регулярной их откачкой;

б) дренирование основания отвалов;

в) планировка поверхности отвалов и обеспечение стока дождевых и талых вод с поверхности отвалов в сторону от откосов отвалов.

Одним из мероприятий, повышающих устойчивость отвалов рыхлых пород на устойчивом основании, является первоочередная отсыпка предотвала, с последующим заполнением пазухи между предотвалом и основным отвалом; при этом предотвал в пониженных участках почвы необходимо прерывать для обеспечения стока дождевых и талых вод. Образование предотвала особенно необходимо в период дождей и таяния снега.

На внешних отвалах к перечисленным мероприятиям добавляется еще срезка бульдозерами увлажненного заторфованного слоя, если его мощность невелика, при большой мощности торфов работы производятся при деформации отвалов.

На Ермолаевском карьере наблюдались оползни внешних отвалов при заваливании снежных сугробов отвалами перед началом снеготаяния, причем снежные сугробы оказались в зоне наиболее слабых поверхностей. Такое заваливание сугробов нельзя допускать; отсыпать отвалы на этих участках необходимо более широкой заходкой с тем, чтобы погребенные сугробы оказались как можно дальше от откоса отвальных пород; необходимую ширину заходки можно установить расчетом на предельное равновесие.

При отгрузке в отвалы пород большой влажности следует применять раздельное отвалообразование; в нижние горизонты помещать более песчаные и менее влажные породы, а в верхние — глинистые и более влажные. Так, на Ермолаевском карьере глины и суглинки влажностью 15—18% сохраняют устойчивое состояние в отвалах под углом 34—36° при высоте до 23 *м* и более, а при влажности этих пород 25—27% высота устойчивых отвалов не превышает 5 *м*.

Раздельное отвалообразование не представляет никаких трудностей при наличии нескольких ярусов внешних отвалов, а при применении роторных экскаваторов и отвальных мостов даже при наличии одного яруса можно помещать более песчаные и менее влажные устойчивые породы вниз, а более влажные неустойчивые глинистые — в верхнюю часть отвала.

Развитие подошвенных оползней отвалов при наклонном слоистом основании, представленном твердыми породами, может быть предотвращено или приостановлено путем взрывания основания с образованием воронок рыхления глубиной 3—4 *м*. Площадь воронок может быть установлена путем расчета по формуле

$$n = \frac{f'' - f'}{f - f'} 100\%, \qquad (101)$$

где n — площадь воронок, выраженная в процентах к общей площади основания отвалов (на участке призмы упора);

f' и f — коэффициенты трения по контактам слоев и разрыхленных пород (в воронках);

f'' — необходимый коэффициент трения по основанию отвалов, при котором обеспечивается устойчивость (см. гл. XIX).

Например, при $f=0{,}60$; $f'=0{,}20$ и $f''=0{,}26$ взорванная площадь должна составлять 15% от общей площади основания на участке призмы упора.

Глава XVI

ГОРНЫЕ РАБОТЫ НА ОПОЛЗНЕВЫХ УЧАСТКАХ

§ 1. Борьба с возникшими или зарождающимися оползнями

Если возникновение оползня не было предотвращено и его развитие мешает горным работам, приходится осуществлять мероприятия по приостановке движения оползня, чаще всего более трудоемкие, чем мероприятия по его предотвращению.

Для того чтобы борьба с возникшими оползнями была эффективной, необходимо установить действительную причину их возникновения, ликвидировать ее, а затем уже осуществлять какие-либо другие меры борьбы. Ниже излагаются наиболее эффективные мероприятия по остановке возникших или зарождающихся оползней.

Планировка поверхности оползня и обеспечение стока поверхностных вод оказываются эффективными в тех случаях, когда причиной возникновения оползней является наличие скоплений атмосферных осадков в прибортовой полосе земной поверхности, на площадках уступов и в отвалах.

Примером эффективного применения этого способа борьбы с оползнями может служить прекращение оползания насыщенных

водой разрыхленных пород на южном борту Коркинского карьера в районе углеподъемника № 1-бис [175].

Накопление рыхлого материала произошло вследствие ряда обрушений незаоткошенного уступа покровных отложений, образовавшихся из-за скоплений воды атмосферных осадков в прибортовой полосе земной поверхности. Рыхлый материал накапливался также и вследствие наличия породных прослойков в отрабатываемом пласте. К моменту возникновения оползня на уступах борта располагались грядами, вытянутыми параллельно бровкам уступов, большие навалы пород, достигающие местами высоты 15—17 *м*, которые способствовали большому скоплению воды. Грунтовых вод на этом участке не было, так как в борту была заложена дренажная шахта.

Вначале оползни образовывались небольшими участками, а затем объединились и создали угрозу действующему углеподъемнику. После планировки навалов и обрушившихся пород была создана равномерная заоткоска борта под углом 18—20°, обеспечившая сток воды, и оползни прекратились.

Оставление угольных целиков для борьбы с оползнями насыщенных водой рыхлых пород применялось довольно часто на угольных карьерах. Например, на Коркинском карьере на участке так называемого активного оползня в течение 10 лет недобирали в почве от 6 до 9 *м* угольного пласта с целью удержания надвигающихся на призабойную часть насыщенных водой глин и суглинков.

На южном борту Коркинского карьера в районе углеподъемника № 1-бис был даже «рассчитан» для этой цели целик, вмещающий более полумиллиона тонн готового к выемке угля.

На Волчанском карьере № 1 на отдельных участках для удержания насыщенных водой пород оставляли барьеры из угля по всей мощности пласта.

Этот метод борьбы с оползнями оказался неэффективным.

Если не обеспечить стока вод атмосферных осадков по поверхности рыхлых пород, располагающихся на бортах, то они могут передвигаться вниз при любых углах заоткоски. При большом насыщении водой эти породы могут оползать при общей заоткоске борта под углом 5—10°, и никакие целики не остановят их движение.

Отгрузка оползневых масс оказывается экономически более целесообразной, чем другие меры борьбы на участках лежачего бока, где падение слоев превышает 18—20° и появляется неизбежность скольжения пород по подрезанным контактам. Недопустимо, чтобы эти оползни объемом в 20—40 тыс. $м^3$ вели к образованию потерь сотен тонн готового к выемке угля, как это было на южном борту Коркинского карьера и на Волчанском карьере № 1.

Одновременно с отгрузкой оползающих пород необходимо принять меры и по предотвращению дальнейшего обрушения и оползания верхних уступов, сложенных рыхлыми породами.

Разгрузка призмы активного давления и увеличение веса призмы упора путем отсыпки дамб в его нижней части оказываются эффективными при возникновении оползней выпирания и глубинных оползней лежачего бока.

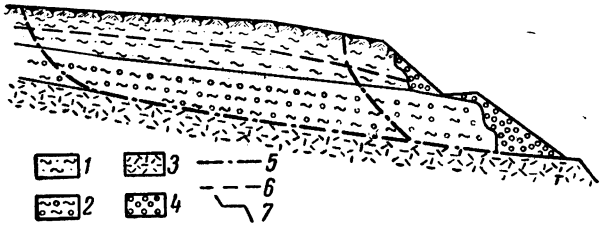


Рис. 109. Устройство контрфорса на Зыряновском карьере:

1 — суглинки; *2* — глины коры выветривания; *3* — выветрелые коренные породы; *4* — контрфорс; *5* — поверхность скольжения; *6* — уровень грунтовых вод; *7* — поверхность борта

Постепенное развитие оползня при углах наклона борта, меньших 20—25°, позволяет выполнить большой объем работ в период небольших скоростей движения массива и полностью прекратить подвижки.

Этот метод был успешно применен в 1952 г. при возникновении оползней юго-восточного борта на Волчанском угольном карьере № 4.

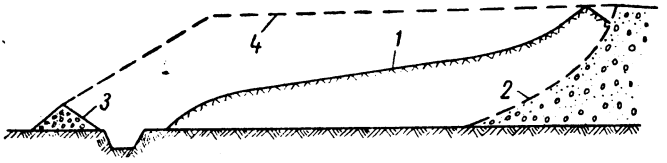


Рис. 110. Устройство контрфорса из твердых пород перед надподошвенным оползнем отвала:

1 — поверхность оползающего отвала; *2* — поверхность скольжения; *3* — вал твердых пород; *4* — поверхность отвала после остановки оползня

Устройство контрфорса из твердых пород у основания покровных оползней является недорогим и эффективным мероприятием. Этот способ был успешно применен на северо-западном борту Зыряновского карьера для остановки оползня суглинков, двигающихся по наклонной поверхности коренных палеозойских пород (рис. 109).

Устройством контрфорса (вала) из твердых пород (рис. 110) можно остановить движение надподошвенных оползней отвалов

в тех случаях, когда основание отвалов представлено твердыми породами. Высота вала должна составлять около 20—25% высоты оползающего отвала.

Взрывание основания, сложенного твердыми породами, при контактных, покровных и подошвенных оползнях может быть эффективным мероприятием по остановке движения оползня. В перечисленных оползнях сопротивление сдвигу по увлажненным глинистым контактам определяется коэффициентом внутреннего трения, не превышающим обычно 0,17—0,25 (угол внутреннего трения 10—15°). У раздробленных твердых пород коэффициент внутреннего трения составляет 0,6—0,7, т. е. в три раза больше, чем по поверхностям скольжения оползней. Чтобы остановить движение оползня, необходимо увеличить сопротивление сдвигу по поверхности скольжения на 10—15%; для этого потребовалось бы взорвать лишь около 5% площади поверхности скольжения.

При борьбе этим способом с покровными оползнями глубина скважин и вес заряда должны устанавливаться в зависимости от мощности покрова сползающих пород с таким расчетом, чтобы при взрыве образовались поднятия дробленых твердых пород достаточной высоты, препятствующие переползанию водонасыщенных глинистых пород. После взрыва, естественно, необходимо произвести выравнивание поверхности для обеспечения стока поверхностных вод.

В практике железнодорожного, гидротехнического и гражданского строительства в оползневых районах применяется целый ряд других способов борьбы с оползнями откосов, из которых наиболее известными являются [42]: механические — подпорные стены, сваи и шпоны; улучшающие свойства грунтов — силикатизация, электродренаж и обжиг; применяется также укрепление склонов растительностью, покрытием оползневых склонов противофильтрационной одеждой и ряд других способов.

§ 2. Горные работы на оползневых участках

В ряде случаев полное предотвращение деформаций откосов или их приостановление требует очень больших затрат, а в некоторых случаях — технически неосуществимо.

В этом параграфе описываются примеры из практики открытых разработок, когда полное предотвращение развития оползней оказывалось технически невозможным или нецелесообразным.

1. На 4-м Волчанском угольном разрезе отработка мульдового участка пласта, подстилаемого слабыми пучащими породами, произведена заходками вкрест простирания при использовании оползневого давления для рыхления пласта [107]. Отработка этих участков в таких условиях без деформации подошвы пласта потребовала бы значительного выполаживания лежачего бока и большого увеличения объема вскрыши.

2. Отработка угольных пластов с образованием внутренних отвалов при слабых породах в подошве на Богословском и Волчанском месторождениях в течение длительного времени осуществлялась в условиях непрерывного деформирования лежачего бока, нагруженного отвалами [107].

Отработка осуществлялась с заваливанием выработанного пространства между угольным забоем и отвалами вскрышными породами, при этом угольный пласт являлся упором для деформирующегося лежачего бока, нагруженного отвалами (рис. 111). После того как очередная заходка угольного пласта была подготовлена к выемке, производилась зачистка забоя драглайном на

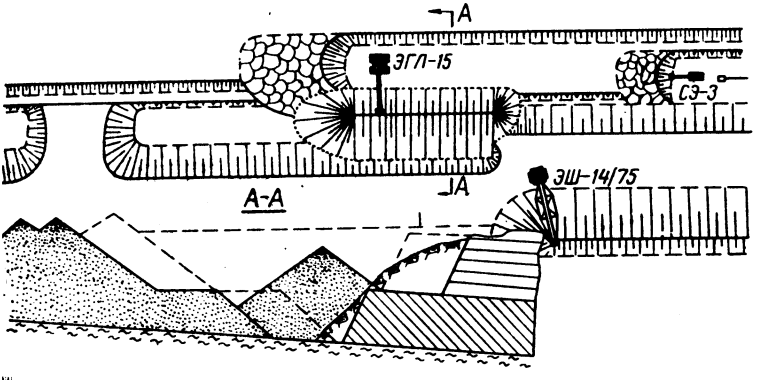


Рис. 111. Схема отработки пласта при пучащей почве

нешироком фронте и вслед за выемкой этой заходки снова производилось заваливание выработанного пространства породами.

В этих условиях полное предотвращение деформации лежачего бока потребовало бы его выполаживания и отказа от внутренних отвалов, что привело бы к удорожанию вскрышных работ.

3. Внешние отвалы, отсыпаемые на торфяниках, могут сохранять устойчивость при углах естественного откоса лишь при высоте не более 4—5 *м*; поэтому отсыпка отвалов на торфяниках всегда сопровождается деформацией, к которой необходимо приспосабливать способ отвалообразования.

На рис. 112 представлена схема развития отвала на борту разрезной траншеи при заторфованной поверхности, рекомендованная нами для Боровичского карьера огнеупорных глин.

Вначале вдоль проектного положения разрезной траншеи по торфам проходится вспомогательная траншея, в которую затем отсыпается гребень устойчивых суглинков, являющийся защитным валом (контрфорсом) против развития оползня в сторону

разрезной траншеи. За этот вал на торф отсыпается остальная часть породы из разрезной траншеи. Неустойчивое основание этой части отвала способствует его расползанию под углом

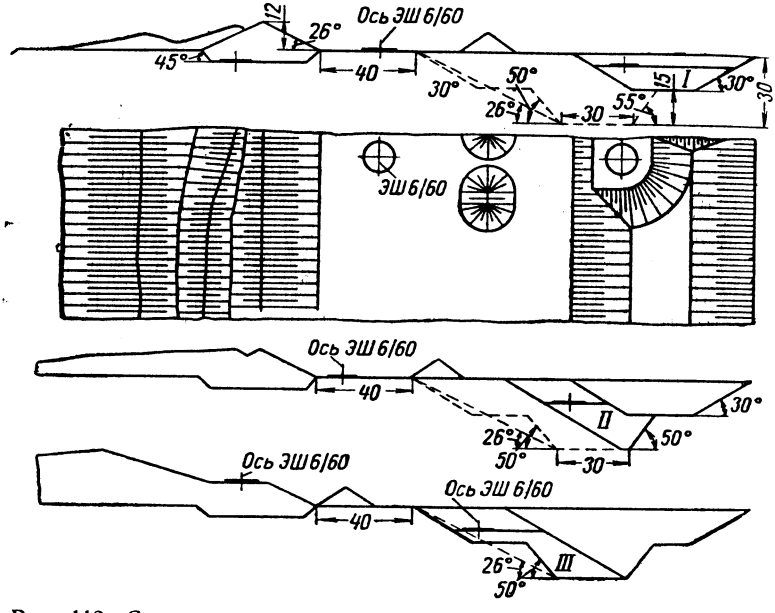


Рис. 112. Схема развития отвала на борту траншеи, проходимой через болото

6—8°, что дает возможность разместить на борту траншеи в заболоченной местности всю породу разрезной траншеи с коэффициентом переэкскавации 1,7—1,9.

§ 3. Использование обрушений и оползней при отработке вскрыши

В некоторых случаях экономически целесообразно искусственно вызывать деформации откосов.

Одним из примеров искусственно вызываемых деформаций откосов являются гидроотвалы, создаваемые на склонах, когда из одного пункта разгрузки может быть размещено в отвал несколько миллионов кубометров слабых глинистых пород.

Примером искусственно вызываемых деформаций откосов при отработке вскрыши является гидромониторная разработка рыхлых пород; при подрезке вертикальных откосов струей воды происходит их обрушение и разрыхление обрушившейся массы.

При гидромониторной разработке обводненных песков создается возможность использовать деформацию песчаного откоса, вызываемую грунтовым потоком; в этом случае облегчается размыв откоса, сокращаются расходы на дренаж месторождения и уменьшается удельный расход возвратной воды. Схема гидромо-

ниторной отработки обводненных песков и подстилающих их глин, рекомендованная нами в 1961 г. для Лебединского карьера КМА, изображена на рис. 113. Расходы на дренаж в этом случае сокращаются вдвое.

Давно высказывались предложения использовать обрушения откосов горных пород для их рыхления при разработке вскрыши.

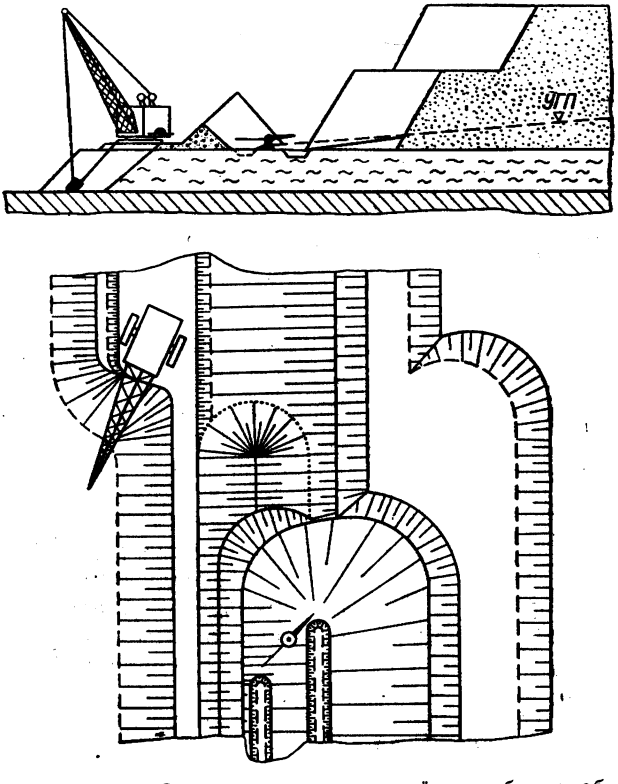


Рис. 113. Схема гидромониторной отработки обводненных песков на Лебединском карьере КМА

Первые исследования обрушаемости пород в откосах и возможности использования обрушений для рыхления пород были проведены ИГД СО АН СССР под руководством докт. техн. наук Г. В. Родионова [134].

Предложенная Г. В. Родионовым схема заключалась в следующем: в результате подрезки специальным экскаватором происходит обрушение слоя на приемное устройство, через которое порода попадает затем на конвейер.

При этом предполагалось, что обрушение будет происходить при глубине вруба около 40 *см* блоками высотой 0,6—0,9 *м*; объем блока при этом составлял бы 0,2—0,4 $м^3$. Экспериментальные работы были проведены на откосах высотой 3—4 *м*. Ожида-

лось, что этим способом можно отрабатывать уступы высотой до 8—12 *м*.

В 1962 г. сотрудниками ВНИМИ А. В. Пашкевичем и В. В. Голицыным по заявке Гипрошахта были проведены исследования на моделях характера и параметров обрушения пород для условий Ирша-Бородинского месторождения Канско-Ачинского бассейна. Этими исследованиями было установлено, что обрушение происходит блоками значительно большего объема, чем наблюдалось в опытах Г. В. Родионова; при этом объем блоков оказался непостоянным: вначале происходит выкол объемов около 50 $м^3$ и образуется устойчивая консоль, а при дальнейшей подрезке обрушается блок объемом около 200 $м^3$; это в значительной степени усложняет приемное устройство, на которое обрушается блок.

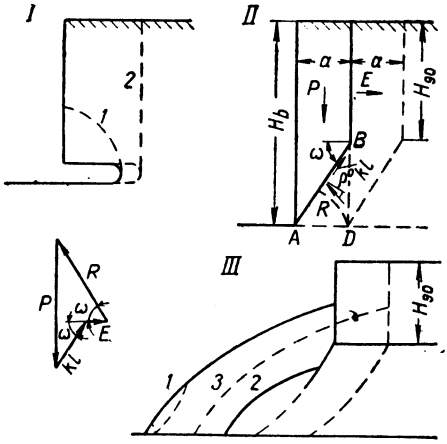


Рис. 114. Виды обрушений уступов: *I* — при $H < H_в$; *II* — при $H = H_в$; *III* — при $H > 2H_{90}$

Нами предложен принципиально иной подход к использованию обрушения при отработке вскрыши.

Рассматривая характер обрушения откосов в реальных геологических условиях, можно отметить следующие виды обрушения (рис. 114):

1) если мощность слоя меньше предельной высоты вертикального откоса $H_в$, то для обрушения откоса необходимо производить его подрезку (вруб); обрушение в этом случае происходит блоками непостоянного объема, о чем было сказано ранее;

2) если мощность слоя достигает или несколько превышает предельную высоту вертикального откоса, то обрушение проявляется в форме отрыва вертикального блока шириной *a* и поворота его в сторону выемки; это наиболее опасная форма обрушения откоса; для повторного цикла обрушения необходимо произвести подрезку призмы АВД;

3) если мощность слоя существенно превышает предельную высоту вертикального откоса, то обрушение приобретает характер спокойного скольжения по наклонной поверхности; при этом для возобновления повторного обрушения нет необходимости производить подрезку откоса по целику, а достаточно произвести уборку обрушившихся пород, служащих контрфорсом для откоса после каждого цикла обрушения; в этом случае чем больше отношение $\frac{H}{H_в}$, тем более спокойно проявляется обрушение.

В этом отношении обрушение откосов подобно обрушению кровли при подземном способе разработки: при небольшом обнажении кровли обрушение носит катастрофический характер, а в длинных забоях после того как забой отойдет на некоторое расстояние от разрезной печи, создается возможность управлять посадкой кровли. Если у основания откосов имеется слабый кон-

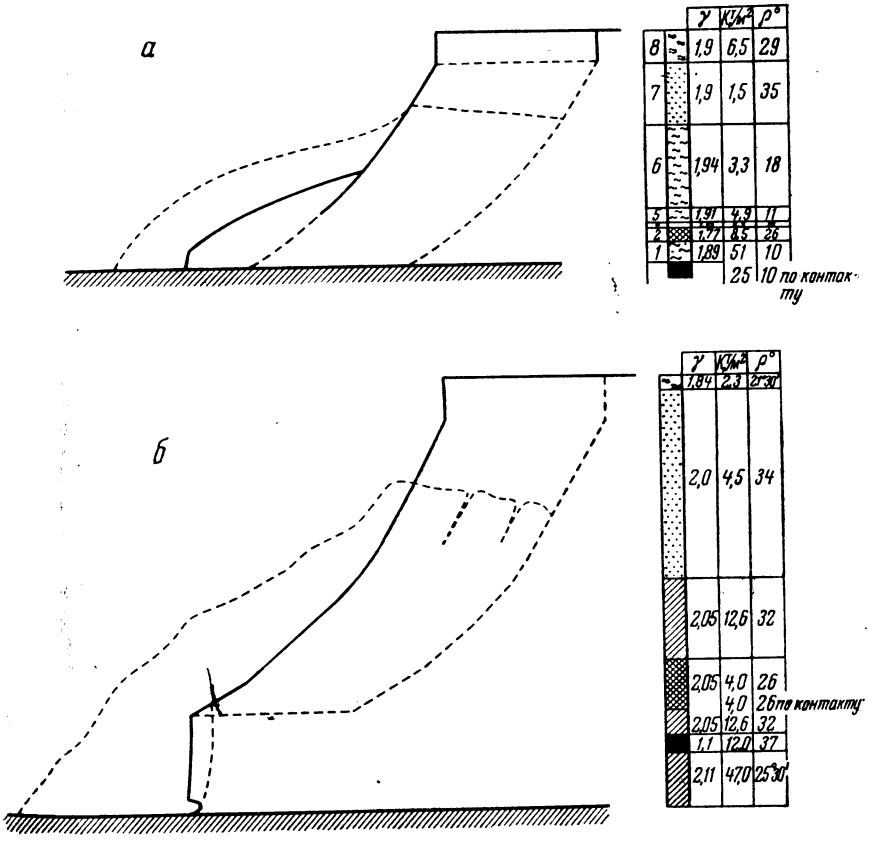


Рис. 115. Обрушение откоса:
а — при наличии слабого контакта в основании; б — при наличии твердого прослойка в основании

такт между слоями, то поверхность скольжения проходит по этому контакту (рис. 115).

В тех случаях, когда в основании откоса залегает слой более крепких пород, обрушение происходит над этим слоем (рис. 115).

В породах средней прочности, у которых высота вертикального откоса близка к общей мощности вскрыши, можно применить отработку наклонными слоями с углом наклона более 40° с искусственной подрезкой слоев специальными машинами (рис. 116).

Такая схема отработки рекомендована для Ирша-Бородинского месторождения.

Параметры блоков обрушения могут быть рассчитаны по характеристикам прочности горных пород.

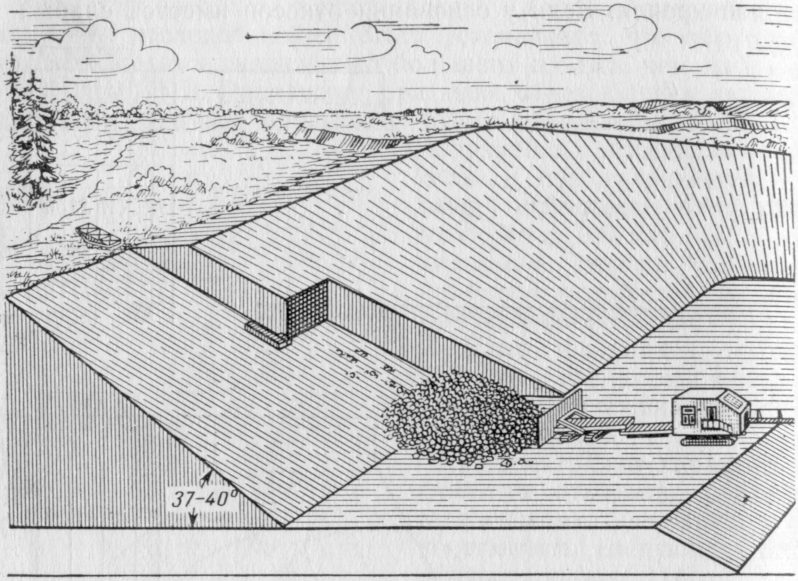


Рис. 116. Схемы искусственного обрушения откоса при подрубке машиной

Предельная высота вертикального откоса определяется по формуле

$$H_в = \frac{2K}{\gamma} \operatorname{tg} \omega \left(1 + \sqrt{\frac{\sigma_р}{K} \operatorname{tg} \omega}\right). \qquad (102)$$

Ширина призмы обрушения вертикального откоса определяется по формуле

$$a = \frac{2K}{\gamma} \sqrt{\frac{\sigma_р}{K} \operatorname{tg} \omega}, \qquad (103)$$

где K — сцепление, $т/м^2$;

$\sigma_р$ — сопротивление отрыву, $т/м^2$;

γ — объемный вес пород;

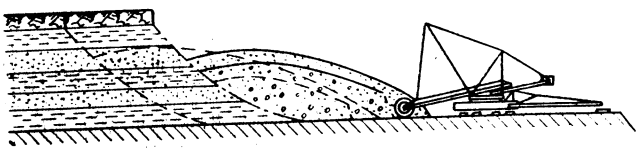
$\omega = 45° + \frac{\rho}{2}$ — угол наклона поверхности скольжения.

Ширина блоков обрушения при $H > H_в$ определяется по условию предельного равновесия по ряду поверхностей скольжения.

На рис. 115 представлены примеры таких расчетов, выполненных В. В. Голицыным.

Зная параметры блока обрушения, нетрудно определить форму и параметры развала обрушившихся пород перед обрушением и после обрушения, которые определяют параметры стрелы погрузочной машины.

При этом вскрышу мощностью до 80 *м* можно отрабатывать в один слой, применяя мощное погрузочное и транспортное оборудование; в данном случае потребуется погрузочная машина



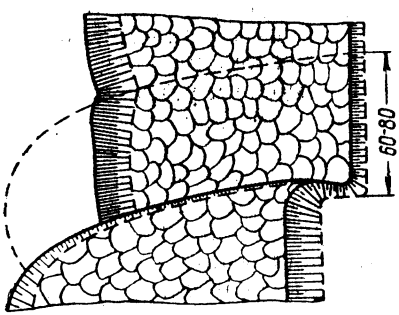


Рис. 117. Схема разработки самообрушающегося откоса

с относительно небольшой высотой погрузки (не более 10 *м*) (рис. 117).

Процессом обрушения высоких откосов можно управлять. Вследствие значительной ползучести глинистых пород их обрушению предшествуют деформации проседания верхней площадки, прилегающей к откосу.

Скорость деформации к моменту обрушения откосов высотой более 50 *м* в слабых породах достигает 15—20 *мм/ч*, а суммарные деформации превышают 1—2 *м* и могут быть зафиксированы простейшими автоматическими станциями.

Такой способ отработки вскрыши имеет следующие преимущества перед отработкой горизонтальными и наклонными слоями небольшой мощности, а также перед отработкой роторными экскаваторами:

1) достигается регулируемое самообрушение пород, не требующее подрезки слоя, что сокращает энергоемкость вскрышных работ;

2) сокращается в 4—6 раз число рабочих площадок (в сравнении с отработкой горизонтальными слоями механическими лопатами);

3) сокращается удельная металлоемкость оборудования по вскрыше, даже по сравнению с роторными экскаваторами.

Достоинства отработки вскрыши с использованием обрушения приводят к значительному сокращению стоимости 1 $м^3$ вскрыши в сравнении с другими способами разработки.

Использование обрушения вида *III* (см. рис. 114) дает возможность применить мощное высокопроизводительное оборудование на месторождениях, сложенных весьма слабыми породами.

Так, на Камыш-Бурунском месторождении Керченского железорудного бассейна на участке «С» для отработки вскрыши общей мощностью около 25 *м* применяются два многочерпаковых экскаватора; несмотря на небольшую высоту уступов и пологий угол откоса (около 26°), происходит оползание откосов, создающее угрозу экскаватору и отвальному мосту.

Высота уступов 15 *м* для этих условий оказалась предельной; при отработке вскрыши с использованием обрушения всю толщу вскрыши, достигающую на месторождениях этого бассейна 50 *м*, можно было бы отрабатывать одним уступом.

Для месторождений Никопольского марганцевого бассейна проектируемые в настоящее время роторные экскаваторы производительностью 8000 $м^3/ч$ с высотой черпания до 50 *м* являются предельными, так как уже при высоте уступа в 50 *м* угол устойчивого откоса выполаживается до 30—35°; при отработке вскрыши с обрушением можно применить более производительное оборудование и отрабатывать вскрышу мощностью до 80 *м* одним уступом.

Отработка самообрушающихся уступов сходна с отработкой снизу оползневых участков. Такая отработка наблюдалась нами в 1954—1955 гг. на Ермолаевском угольном карьере.

Оползневой участок был сложен суглинками и бурыми глинами; высота оползшего борта составляла 23 *м*, а общий угол наклона составлял 16—22°. В период отгрузки оползневых масс снизу оползание борта повторялось 18/IV, 29/V и 3/VI 1955 г. Повторные оползания происходили в следующей последовательности: при отгрузке оползневых масс в нижней части вверху происходило проседание площадки шириной 4—5 *м*; после того как оседание достигало 1—2 *м*, происходило новое оползание; угол развала оползших пород составлял 15—17°.

ЧАСТЬ ЧЕТВЕРТАЯ

РАСЧЕТЫ УСТОЙЧИВОСТИ БОРТОВ КАРЬЕРОВ И ОТВАЛОВ

Глава XVII

МЕТОДЫ РАСЧЕТА УСТОЙЧИВОСТИ ОТКОСОВ

§ 1. Метод предельного напряженного состояния

Как было отмечено в главе I, механико-математической основой расчетов устойчивости откосов является теория предельного равновесия грунтовых масс или так называемой сыпучей среды.

Там же было отмечено, что в теории предельного равновесия сыпучей среды рассматриваются две основные группы задач, принципиально отличающиеся в методах их решения:

1) задачи, в которых условие предельного равновесия удовлетворяется в каждой точке некоторой области,

2) задачи, в которых условие предельного равновесия удовлетворяется не во всех точках некоторой области массива, а лишь по ее внутренней границе.

В дальнейшем изложении метод решения первой группы задач называется методом предельного напряженного состояния сыпучей среды, а метод решения второй группы задач — методом предельного равновесия сыпучей среды.

Развитие первого метода в его современном виде завершено советскими учеными, чл.-корр. АН СССР В. В. Соколовским [157, 159] и проф. С. С. Голушкевичем [30, 31].

В главе I упоминалось, что решение задач методом теории предельного напряженного состояния в значительной степени упрощается, если линию BC (см. рис. 10) продолжить до пересечения с осью абсцисс и точку O' рассматривать как начало условных (приведенных) величин напряжений. Перенесение начала координат σ_n из точки O в точку O' соответствует увеличению нормальных напряжений на величину

$$H = K \operatorname{ctg} \rho. \tag{104}$$

Соотношение действительных и приведенных напряжений по заданной площадке изображено на рис. 10, из которого видно, что увеличение нормального напряжения на величину H приводит к изменению угла δ между направлением p и нормалью

к площадке. В предельном состоянии угол δ' становится равным ρ (см. рис. 10) и в силу того, что в условиях предельного напряженного состояния однородной изотропной среды в каждой ее точке существует **две площадки скольжения, пересекающиеся под углом** $\frac{\pi}{2} - \rho$, приведенные напряжения, действующие по этим площадкам, оказываются сопряженными, т. е. направление одного из них параллельно площадке, на которой действует другое.

Для карьеров, борта которых в плане имеют относительно небольшую кривизну, достаточная точность получается при решении плоской задачи объемного напряжения, когда компоненты касательных напряжений τ_{zy} и τ_{zx} равны нулю, а остальные компоненты напряжений не зависят от координаты z, совпадающей по направлению с верхней и нижней бровками откоса.

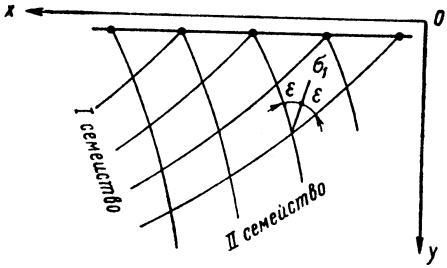


Рис. 118. Два семейства линий скольжения

В плоской задаче на плоскости xy пересекающиеся поверхности скольжения дают сетку линий скольжения (рис. 118).

Решая дифференциальные уравнения плоского равновесия

$$\frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} = 0; \quad \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_y}{\partial y} = \gamma \tag{105}$$

совместно с уравнением предельного равновесия сыпучей среды, записанным в виде

$$\frac{1}{4}(\sigma_x - \sigma_y)^2 + \tau_{xy}^2 = \frac{\sin^2 \rho}{4}(\sigma_x + \sigma_y + 2H)^2, \tag{106}$$

чл.-корр. АН СССР В. В. Соколовский получил дифференциальные уравнения характеристик вдоль линий скольжения, которые для среды с объемным весом γ, направленным вертикально, записываются в следующем виде:

$$\left.\begin{aligned} dy &= dx \operatorname{tg}(\varphi \mp \varepsilon), \\ d\sigma \mp 2\sigma \operatorname{tg} \rho \cdot d\varphi &= \gamma (dy \mp \operatorname{tg} \rho \, dx), \end{aligned}\right\} \tag{107}$$

где φ — угол между направлением наибольшего главного напряжения σ_1 и осью x (рис. 119);

σ — средняя величина приведенного напряжения (рис. 120);

$\varepsilon = \frac{\pi}{4} - \frac{\rho}{2}$ — угол между направлением σ_1 и площадками скольжения.

В этих уравнениях знак минус относится к первому семейству линий скольжения, а знак плюс — ко второму.

Численное решение конкретных задач В. В. Соколовский предложил проводить в безразмерных переменных $\bar{x}$, $\bar{y}$, $\bar{\sigma}$, которые связаны с действительными соотношениями

$$\bar{x}=\frac{\gamma}{K}x, \quad \bar{y}=\frac{\gamma}{K}y, \quad \bar{\sigma}=\frac{\sigma}{K};$$

в дальнейшем черточки над буквами отброшены, т. е. по существу все расчеты в дальнейшем производятся при $\gamma=1$ и $K=1$; чтобы перейти от безразмерных координат к действительным, достаточно первые умножить на отношение $\frac{K}{\gamma}$.

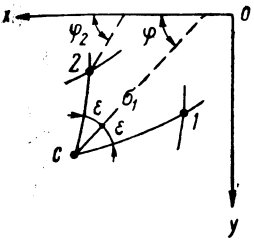


Рис. 119. Положительные направления осей координат и направление отсчета углов φ

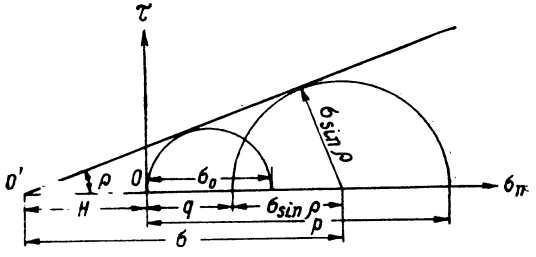


Рис. 120. Зависимость между приведенным напряжением и внешними нормальными нагрузками

Далее, заменяя дифференциалы dx, dy, $d\sigma$, $d\varphi$ конечными разностями для первого семейства линий скольжения

$$\Delta x_1 = x - x_1; \quad \Delta y_1 = y - y_1; \quad \Delta\sigma_1 = \sigma - \sigma_1; \quad \Delta\varphi_1 = \varphi - \varphi_1,$$

а для второго семейства линий скольжения

$$\Delta x_2 = x - x_2; \quad \Delta y_2 = y - y_2; \quad \Delta\sigma_2 = \sigma - \sigma_2; \quad \Delta\varphi_2 = \varphi - \varphi_2,$$

вместо дифференциальных уравнений (107) получим уравнения

$$\left.\begin{aligned} \Delta y_1 &= \Delta x_1 \operatorname{tg}(\varphi_1 - \varepsilon), \\ \Delta\sigma_1 &= 2\sigma_1 \cdot \Delta\varphi_1 \operatorname{tg}\rho + \Delta y_1 - \Delta x_1 \operatorname{tg}\rho, \\ \Delta y_2 &= \Delta x_2 \operatorname{tg}(\varphi_2 + \varepsilon), \\ \Delta\sigma_2 &= -2\sigma_2\Delta\varphi_2 \operatorname{tg}\rho + \Delta y_2 + \Delta x_2 \operatorname{tg}\rho. \end{aligned}\right\} \qquad (108)$$

Пользуясь этими уравнениями, можно определить приближенные величины x, y, σ, φ точки C пересечения двух линий скольжения, если эти величины известны в точках *1* и *2*, лежащих на этих линиях (рис. 119).

Естественно, может быть решена и обратная задача: по заданным x, y, σ, φ в точках C и *2* могут быть определены координаты точки *1*, если в ней известны σ, φ, или могут быть

определены x, y, φ, если в этой точке известно σ; то же самое можно сказать и относительно точки *2*.

Часто встречается так называемый вырожденный случай, когда при определенных условиях линии одного семейства постепенно сближаются и стягиваются в одну точку; в этом случае приведенные напряжения на площадках, являющихся началом пучка линий скольжения, изменяются по закону

$$\sigma' = \sigma'' e^{\pm 2\Delta\varphi \cdot \operatorname{tg}\rho}.$$

Точка, в которую стягивается одно семейство линий скольжения, называется точкой Прандтля.

Рассматривая основные вопросы плоской задачи теории предельного напряженного состояния сыпучей среды, необходимо упомянуть о зонах минимального и максимального напряженных состояний, или, вернее, о зонах оседания и зонах выпирания.

Зоной оседания называют ту часть деформирующегося массива, по поверхности которой распределена активная нагрузка интенсивностью p, вызывающая появление площадок скольжения и смещение всей зоны в направлении действия этой активной нагрузки.

Зоной выпирания называют прилегающую к обнаженной поверхности деформирующегося массива часть его, подвергающуюся выпиранию под влиянием давления со стороны области оседания; при этом поверхность зоны выпирания может быть свободной или нагруженной некоторой нагрузкой интенсивностью q.

Если нагрузки p и q нормальны к поверхности сыпучей среды, находящейся в предельном напряженном состоянии, то первая из них по направлению совпадает с σ_1, а вторая с σ_3, и в этом случае площадки скольжения составляют с поверхностью среды на участке зоны оседания угол, равный $\left(45° + \frac{\rho}{2}\right)$, а на участке зоны выпирания $\left(45° - \frac{\rho}{2}\right)$.

Минимальная величина наибольшего главного напряжения, необходимая для условия предельного состояния в зонах оседания и выпирания, равна временному сопротивлению на одноосное сжатие

$$\sigma_1 = \sigma_0 = 2K \operatorname{ctg} \varepsilon,$$

при этом по поверхности зоны оседания это напряжение может быть создано упругим слоем горных пород вертикальной мощностью $H_{90} = \frac{\sigma_0}{\gamma}$.

Если поверхность зон оседания и выпирания горизонтальна, а распределенные по ним действительные нагрузки p и q вертикальны и постоянны, то линии скольжения в этих зонах прямо-

линейны (рис. 121), а приведенные напряжения в них не зависят от x и определяются в зоне оседания по формуле

$$\sigma = \frac{p + H + \gamma y}{1 + \sin\rho},$$

а в зоне выпирания по формуле

$$\sigma = \frac{q + H + \gamma y}{1 - \sin\rho};$$

если $p = \sigma_0$ и $q = 0$, то по поверхности зон оседания и выпирания проведенные напряжения оказываются одинаковыми

$$\sigma = \sigma^0 = \frac{\sigma_0 + H}{1 + \sin\rho} = \frac{H}{1 - \sin\rho} = \frac{\operatorname{ctg}\rho}{11 - \sin\rho}.$$

Соотношение между действительными нормальными нагрузками интенсивностью p и q и приведенными напряжениями иллюстрируется рис. 120.

Для того чтобы сыпучая среда в каждой точке некоторой области находилась в предельном напряженном состоянии, необходимо обеспечивать определенные условия распределения напряжений по поверхности этой области, называемые контурными (граничными) условиями.

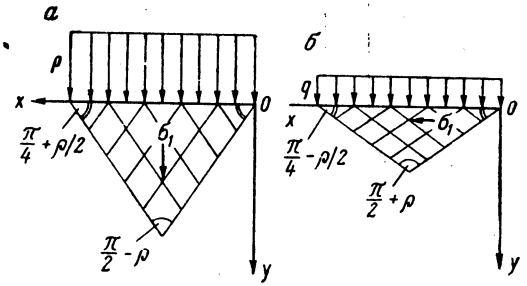


Рис. 121. Сетки линий скольжения:
а — в призме оседания; *б* — в призме выпирания

В зависимости от контурных (граничных) условий возможен ряд решений по определению границ области предельного напряженного состояния и характеристик σ и φ в узловых точках этой области; причем для конкретных задач совместно решается та или иная пара уравнений (108) с учетом граничных условий.

Рассмотрим некоторые задачи для откосов, решаемые этим методом.

§ 2. Обобщенная задача Ренкина, расчет откосов вогнутого профиля и нагруженных откосов

Обобщенной задачей Ренкина называют [30] задачу о построении сетки поверхностей скольжения в плоском откосе связной среды, нагруженном равномерно распределенной нагрузкой.

В качестве внешней нагрузки на откос можно рассматривать упругий слой грунта вертикальной мощностью

$$H_{90} = \frac{2K}{\gamma}\operatorname{ctg}\left(\frac{\pi}{4} - \frac{\rho}{2}\right) = \frac{\sigma_0}{\gamma}. \qquad (109)$$

Направление действия этой нагрузки вертикально, а поэтому в основании этого слоя

$$\varphi = \frac{\pi}{2}; \quad \sigma = \sigma^0 = \frac{\sigma_0 + H}{1 + \sin\rho} = \frac{H}{1 - \sin\rho} = \frac{\operatorname{ctg}\rho}{1 - \sin\rho} \qquad (110)$$

(последнее при $K=1$; дальше все расчеты методом предельного напряженного состояния производятся в безразмерных координатах при $K=1$ и $\gamma=1$).

Отметив на поверхности предельно напряженной среды ряд точек и рассматривая их, как начало поверхностей скольжения,

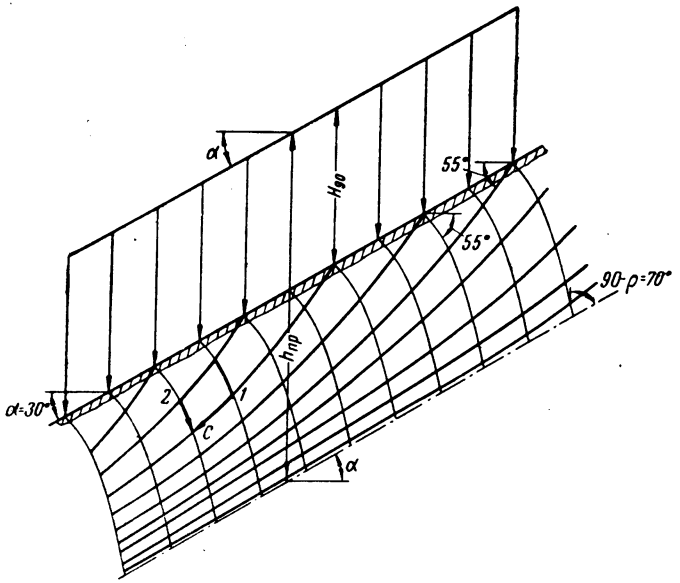


Рис. 122. Сетка поверхностей скольжения в задаче Ренкина

по формулам (108) можно построить сетку поверхностей скольжения во всей области, находящейся в предельном напряженном состоянии (рис. 122). При построении этой сетки можно убедиться, что при $\alpha > \rho$ поверхности скольжения первого семейства (активные) не опускаются ниже плоскости, залегающей на глубине $h_{пр}$ от поверхности откоса, так как при неограниченной высоте откоса с углом $\alpha > \rho$ слой грунта вертикальной мощностью $h_{пр}$ будет находиться в предельном равновесии также и по этой плоскости; эта глубина определяется по формуле

$$h_{пр} = \frac{K}{\gamma} \cdot \frac{\cos\rho}{\cos\alpha \cdot \sin(\alpha - \rho)}. \qquad (111)$$

В целом решение обобщенной задачи Ренкина не приводит к законченному расчету параметров откоса, а является лишь частью этого расчета.

Откосы со свободной наклонной поверхностью могут находиться в предельном напряженном состоянии при наличии нагрузки, определенным образом распределенной по горизонтальной поверхности, прилегающей к откосу. При этом наклонная поверхность откоса может иметь не изменяющийся по высоте угол (плоский откос), увеличивающийся книзу (выпуклый откос) или убывающий книзу (вогнутый откос).

На вогнутых откосах интенсивность нагрузки может быть переменной при угле α'' в верхней части менее $\frac{\pi}{2}$ или равномерной — при $\alpha''=\frac{\pi}{2}$ и при определенной форме поверхности откоса. В последнем случае интенсивность нагрузки должна быть равна

$$p=\sigma_0=$$

$$=2K\operatorname{ctg}\left(\frac{\pi}{4}-\frac{\rho}{2}\right) \quad (112)$$

и координаты точек поверхности откоса рассчитываются, начиная от верхней точки откоса, последовательно для других точек, расположенных ниже. Во всех других случаях при заданных параметрах откоса определяется интенсивность нагрузки, а расчет производят снизу вверх по рекурентным формулам (108).

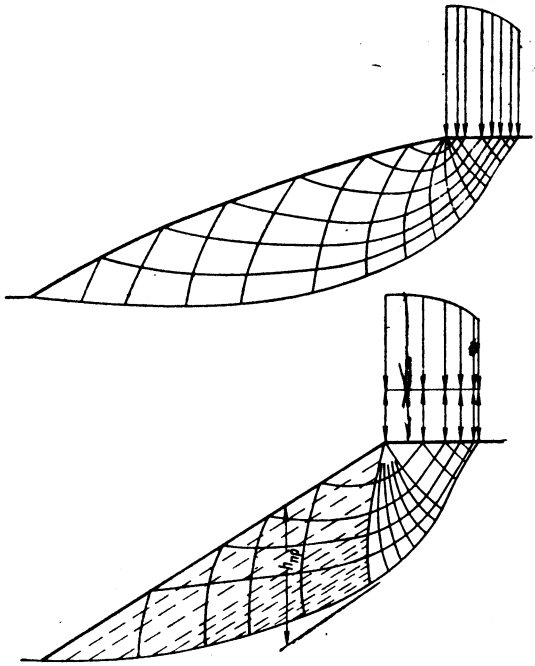


Рис. 123. Сетки поверхностей скольжения в нагруженных откосах

На рис. 123 эпюры нагрузок имеют масштаб, в γ раз мельче, чем параметры откоса, т. е. внешнюю нагрузку можно рассматривать как дополнительный массив пород с таким же объемным весом, как и у пород, которыми сложен откос. Из этих рисунков видно, что при открытых разработках все виды нагруженных откосов не могут найти широкого применения. Поэтому при расчетах параметров бортов карьеров нередко рассчитывают параметры откоса с учетом внешней нагрузки, которую затем отбрасывают [36] и выполаживают верхнюю часть оставшегося откоса. Такой метод расчета откосов не имеет смысла, и можно ограничиться приближенными значениями углов.

§ 3. Расчет откосов выпуклого профиля

Рассматривая предельно напряженный откос вогнутого профиля при достаточно большой его высоте, когда наклон нижней части откоса приближается к углу ρ, легко заметить, что устойчивость этого откоса возрастает, а объем вскрыши уменьшается, если нижнюю его часть пригрузить некоторой нагрузкой по контуру MN (рис. 124). При этом поверхности AB и $A'B'$ перестают быть предельно напряженными. Очевидно, мощность слоя пригрузки не должна превышать определенной величины, обусловливаемой устойчивостью самой пригрузки и ее основания. С увеличением высоты пригрузки в нижней части откоса возникает новое предельное состояние сыпучей среды с другими поверхностями скольжения (AC и AC' на рис. 124); при этом откос приобретает выпуклый профиль и его расчет производится по тем же формулам (108), по которым решаются все другие задачи о предельном напряженном состоянии сыпучей среды.

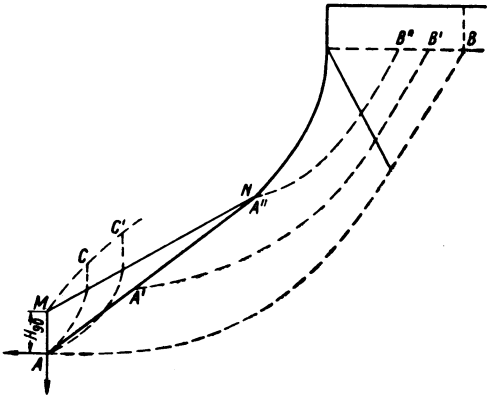


Рис. 124. Вогнутый откос, пригруженный снизу

Граничные условия при расчете откоса выпуклого профиля аналогичны граничным условиям в обобщенной задаче Ренкина.

Если в задаче Ренкина поверхности откоса с нагрузкой σ_0 придать переменный угол, увеличивающийся книзу от угла $\alpha > \rho$ (близкого к ρ) до угла $\alpha = \frac{\pi}{4} + \frac{\rho}{2}$ (т. е. придать откосу выпуклый профиль), то первое семейство поверхностей скольжения в нижней части сближается и при определенной форме поверхности выпуклого откоса стягивается в одну точку, являющуюся нижней точкой откоса. В этом случае нижняя точка откоса будет являться точкой Прандтля, на что первым обратил внимание В. Т. Сапожников [148]; ему принадлежит аналитическое определение координат точек на поверхности выпуклого откоса, которое до выхода в свет третьего издания «Статики сыпучей среды» В. В. Соколовского было не таким простым, как теперь.

Расчет предельно напряженного откоса выпуклого профиля с углом $\left(\frac{\pi}{4} + \frac{\rho}{2}\right)$ в его нижней точке производится по формулам (108), начиная от нижней точки, в которой первая пло-

щадка наклонена под углом $\frac{\pi}{4}+\frac{\rho}{2}$, а следовательно, в ней $\varphi_0=\frac{\pi}{2}$ и, кроме того,

$$\sigma=\sigma^0=\frac{\operatorname{ctg}\rho}{1-\sin\rho}.$$

По другим площадкам, проходящим через эту точку и отклоняющимся от первой площадки на угол $-\Delta\varphi_1$; $-\Delta\varphi_2$; —...; $-\Delta\varphi_n$, напряжения σ определяются по формуле

$$\sigma=\sigma^0\cdot e^{-2\Delta\varphi_i\operatorname{tg}\rho}. \qquad (113)$$

На поверхности предельно напряженного откоса (под внешней нагрузкой, которую можно заменить упругим слоем породы вертикальной мощностью H_{90}, как и в расчете вогнутого откоса В. В. Соколовского) соблюдаются условия

$$\varphi=\frac{\pi}{2} \text{ и } \sigma=\sigma^0,$$

а координаты x, y определяются по формулам (108). Координаты первой точки на поверхности откоса в непосредственной близости к начальной точке O определяются по формуле

$$y=x\operatorname{tg}\left(\frac{\pi}{2}-\varepsilon\right).$$

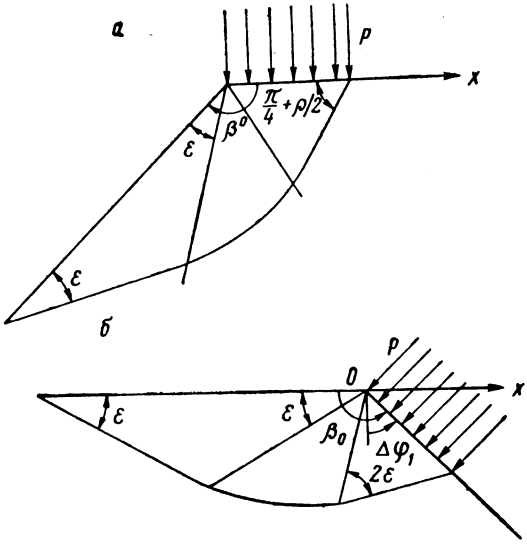


Рис. 125. Схемы к определению условий выпирания подошвы выпуклого откоса

Анализ состояния массива в основании откоса показывает, что при наклоне наиболее пологой площадки скольжения, проходящей через точку O, под углом, меньшим $\frac{\rho}{2}$, начинается выпирание основания (подошвы).

Для определения условия, при котором наступает выпирание основания выпуклого откоса, можно воспользоваться формулой (2.37) В. В. Соколовского [158]

$$\beta_0=\frac{\pi}{2}+\frac{\operatorname{ctg}\rho}{2}\ln\left(\frac{p}{H}\cdot\frac{1-\sin\rho}{1+\sin\rho}\right) \qquad (114)$$

зависимости между углом откоса β_0 и величиной удельной приведенной (условной) нагрузки p, распределенной по горизонтальной площадке (рис. 125, *а*). Для невесомой среды это условие справедливо при любой ориентировке площадок (поскольку

решение необходимо для точки, в этом случае можно пользоваться решением для невесомой среды). В данном случае рассматриваем горизонтальное положение свободной поверхности выпирания (рис. 125, *б*).

Уравнение (114) можно записать в виде

$$\beta_0 = \frac{\pi}{2} + \frac{\operatorname{ctg}\rho}{2} \ln \frac{\sigma}{\sigma^0}, \tag{115}$$

так как $p = \sigma(1 + \sin\rho)$, а $\sigma^0 = \frac{H}{1 - \sin\rho}$.

Из уравнения (115) легко заметить, что при $\beta_0 = \frac{\pi}{2}$ $\sigma = \sigma^0$; при дальнейшем увеличении β_0 σ возрастает по зависимости

$$\sigma' = \sigma^0 e^{2\Delta\varphi_1 \operatorname{tg}\rho}. \tag{116}$$

В этом случае уравнение (115) можно записать в таком виде

$$\beta_0 = \frac{\pi}{2} + \frac{\operatorname{ctg}\rho}{2} \ln \frac{\sigma^0 e^{2\Delta\varphi_1 \operatorname{tg}\rho}}{\sigma^0}$$

и

$$\beta_0 = \frac{\pi}{2} + \Delta\varphi_1.$$

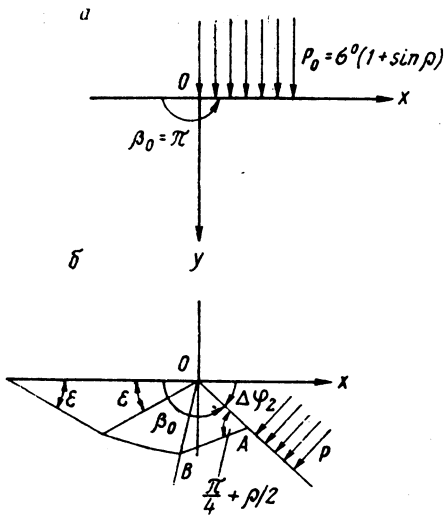


Рис. 126. Схемы к определению условий выпирания подошвы выпуклого откоса

При вертикальном откосе высотой H_{90} в его основании $\beta_0 = \pi$, а $\sigma = \sigma^0$ и, следовательно, выпирания нет (рис. 126).

При уменьшении угла β_0 одновременно по площадкам, пересекающимся в точке *O*, напряжение возрастает по зависимости

$$\sigma'' = \sigma^0 e^{2\Delta\varphi_2 \operatorname{tg}\rho}$$

и при условии (115) наступает выпирание.

Таким образом, условием выпирания является

$$\beta_0 = \frac{\pi}{2} + \Delta\varphi_1$$

и

$$\beta_0 = \pi - \Delta\varphi_2,$$

и, следовательно, $\Delta\varphi_1 + \Delta\varphi_2 = \frac{\pi}{2}$, но так как $\sigma' = \sigma''$, то и $\Delta\varphi_1 = \Delta\varphi_2$, а следовательно,

$$\Delta\varphi_1 = \Delta\varphi_2 = \frac{\pi}{4}.$$

Так как между площадкой, по которой распределена нагрузка p, и площадками скольжения угол равен $\frac{\pi}{4}+\frac{\rho}{2}$, то площадка скольжения, по которой распределено напряжение $\sigma''=\sigma^0 e^{2\Delta\varphi_2 \operatorname{tg}\rho}$, наклонена к оси x под углом $\frac{\rho}{2}$.

Расчет откоса выпуклого профиля при наличии выпирания основания не вызывает каких-либо затруднений: в области A_4OA_3 (рис. 127), примыкающей к подошве откоса, среда находится в максимальном напряженном состоянии; в области A_3OA_2 второе семейство поверхностей скольжения стягивается в пучок линий; напряжения в точке O определяются по формуле

$$\sigma=\sigma^0 e^{2\Delta\varphi \operatorname{tg}\rho},$$

а во всей области A_3OA_2, так же как и в области A_2OA_1 и A_1OA, определение напряжений и величин x, y, φ производится по формулам (108).

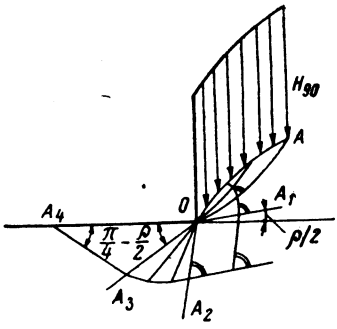


Рис. 127. Схема линий скольжения в области, примыкающей к подошве выпуклого откоса

В результате такого расчета строится сетка поверхностей скольжения и поверхности откоса выпуклого профиля (рис. 128). Имея в виду определение С. С. Голушкевича, что «Задачу о предель-

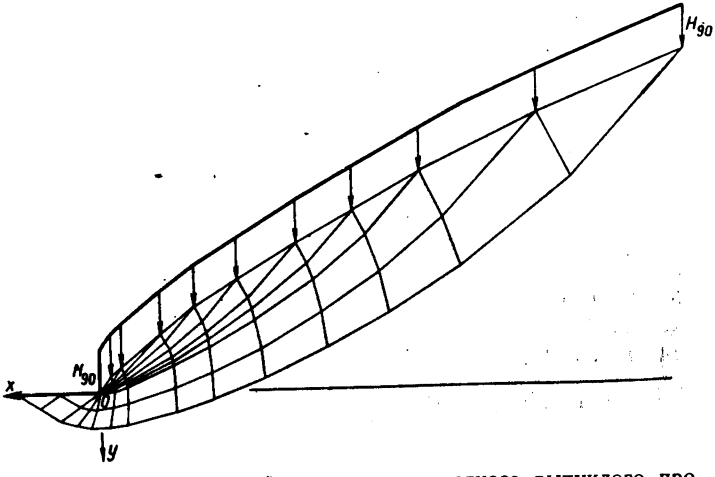


Рис. 128. Схема линий скольжения в откосе выпуклого профиля

ном равновесии сыпучей среды принято считать решенной до конца, когда установлены границы области предельного напряженного состояния и построены кривые скольжения, определяющие

форму поверхностей скольжения, заполняющих эту область», можно считать, что решение о выпуклом откосе доведено до конца.

Подобно расчету откоса выпуклого профиля при наличии выпирания основания могут быть рассчитаны также нагруженные плоские откосы при наличии выпирания основания. Схема расположения сетки линий скольжения для этого случая изображена на рис. 129, *а*. В зоне A_4OA_3, примыкающей к подошве откоса, среда находится в максимальном напряженном состоянии, а в зонах A_3OA_2 и A_1OA одно семейство линий скольжения стягивается в точку O; при этом в зоне AOA_1 напряжения в точке O возрастают по логарифмической спирали от σ^0 до $\sigma'=\sigma^0 e^{\alpha \operatorname{tg}\rho}$, а в зоне

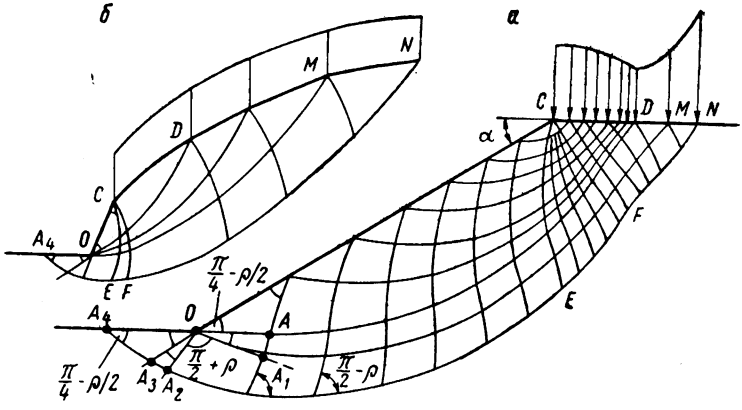


Рис. 129. Схема линий скольжения в нагруженных откосах при наличии выпирания подошвы

A_2OA_3 — убывают от σ' до σ^0, углы $AOA_1=A_2OA_3=\frac{1}{2}\alpha$, что вытекает из построения и равенства напряжений по площадкам OA и OA_3.

На рис. 129, *б* изображена схема откоса переходной формы от нагруженного плоского откоса к выпуклому; при сокращении высоты свободного откоса CO и увеличении его угла зона выпирания, прилегающая к свободной поверхности откоса, уменьшается и в пределе вся зона COD превращается в точку. Зона DOM расширяется по мере увеличения угла α, так как $\measuredangle AOA_1=\frac{1}{2}\alpha$. Таким образом, откос выпуклого профиля можно рассматривать как разновидность нагруженного откоса, в котором свободная часть откоса и прилегающая к нему зона выпирания вырождены.

Борта выпуклого профиля более выгодны, чем плоские, и тем более вогнутые, так как при выпуклых бортах значительно сокращается объем вскрыши. На рис. 130 приведен пример относи-

тельного расположения предельного контура бортов вогнутого *3*, плоского *2* и выпуклого *1* профилей для условий: $\rho=25°$, $K:\gamma=5$, $H=200$ *м* и $n=1{,}3$. Для этих условий выпуклый профиль борта дает экономию в объеме вскрыши по сравнению с плоским профилем, равную 7 млн. $м^3$ на 1 *км* длины борта, а по сравнению с вогнутым профилем — 15,8 млн. $м^3$.

Преимущество бортов выпуклого профиля объясняется увеличением объема призмы упора и уменьшением объема призмы активного давления по сравнению с объемом этих призм в бортах вогнутого профиля. Общий угол наклона борта значительной высоты при любом его профиле изменяется несущественно, а при бесконечно большой высоте борта во всех случаях приближается к углу внутреннего трения пород. Применение бортов выпуклого профиля невозможно лишь при наличии в их нижней части мощных слоев пластичных глин и обводненных песков.

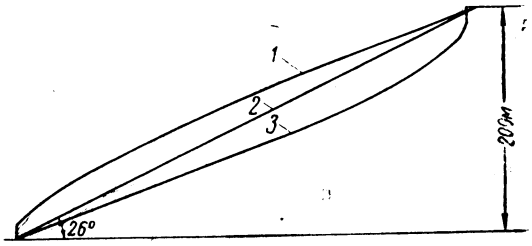


Рис. 130. Сравнение контуров откосов выпуклого (*1*), плоского (*2*) и вогнутого (*3*) профилей

§ 4. Применение метода предельного напряженного состояния при наличии поверхностей ослабления

Методом предельного напряженного состояния можно решать ряд задач для откосов, содержащих поверхности ослабления с характеристиками $K'<K$ и $\rho'<\rho$.

Для этого необходимо, чтобы в точках на слабом контакте одновременно удовлетворялись условия обыкновенного и специального предельного равновесия, т. е.

$$\tau=\sigma_n \operatorname{tg}\rho+K \text{ или } \tau=(\sigma_n+H)\operatorname{tg}\rho, \tag{117}$$

$$\tau_{nt}=\sigma_t \operatorname{tg}\rho'+K' \text{ или } \tau_{nt}=(\sigma_n+H')\operatorname{tg}\rho'. \tag{118}$$

Графически это условие представлено на рис. 131.

Поверхность скольжения *NM* пересекает слабый контакт и в точке *M* имеет напряжения, характеризующиеся точкой M_A на графике напряжений (рис. 131, *б*). Для того чтобы в этой точке одновременно удовлетворялось условие специального предельного равновесия, характеризующееся на графике напряжений точкой M_B, необходимо, чтобы угол между площадками *MA* и *MB* был равен углу θ, изображенному на графике напряжений.

Определим аналитическую зависимость $\theta = f(K', \rho', K, \rho, \sigma)$. Для этого воспользуемся формулами (1,12) В. В. Соколовского [158] для определения нормальных и касательных напряжений по площадкам, наклоненным под углом ω к направлению σ_1; заменив в них φ—α углом ω (рис. 132)

$$\left.\begin{aligned} \sigma_n &= \sigma(1 - \sin\rho\cos 2\omega) - H \\ \tau_{tn} &= \sigma\sin\rho \cdot \sin 2\omega \end{aligned}\right\} \qquad (119)$$

и подставив значения τ_{tn} и σ_n (119) в (118), получим

$$\sigma\sin\rho \cdot \sin 2\omega = [\sigma(1 - \sin\rho \cdot \cos 2\omega) - H + H']\,\mathrm{tg}\,\rho'.$$

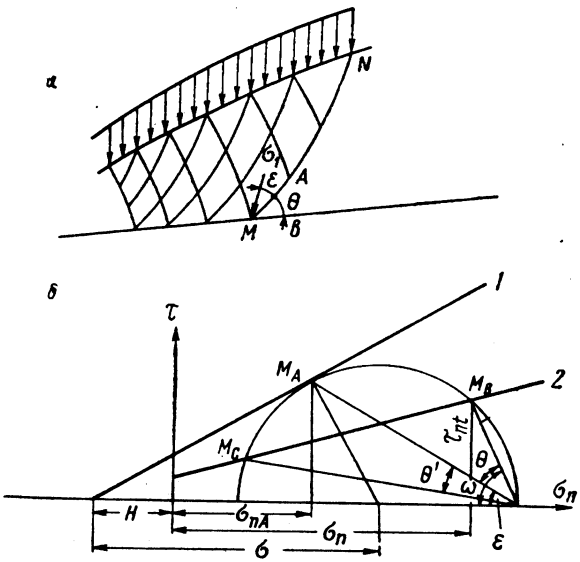


Рис. 131. Схема, иллюстрирующая условия предельного состояния по слабой поверхности

После преобразования получим

$$\sin(2\omega + \rho') = \frac{\sin\rho'}{\sin\rho}\left(1 - \frac{H - H'}{\sigma}\right). \qquad (120)$$

Как видно из рис. 131, *б*, при специальном предельном равновесии по слабому контакту максимальное напряженное состояние может быть, когда угол между направлением σ_1 и слабым контактом больше угла ε, равного $\frac{\pi}{4} - \frac{\rho}{2}$, а минимальное напряженное состояние, когда этот угол меньше ε. Минимальное напряженное состояние на графике напряжений (рис. 131, *б*) характеризуется точкой M_C. Поэтому при максимальном напря-

женном состоянии угол $2\omega+\rho'$ будет больше $\frac{\pi}{2}$ и для этого случая выражение (120) записывается следующим образом:

$$2\omega+\rho'=\pi-\arcsin\left[\frac{\sin\rho'}{\sin\rho}\left(1-\frac{H-H'}{\sigma}\right)\right]. \qquad (121)$$

Из рис. 131—132 видно, что $\theta=\omega-\varepsilon$ и окончательно

$$\theta=\frac{\pi}{4}+\frac{1}{2}(\rho-\rho')-\frac{1}{2}\arcsin\left[\frac{\sin\rho'}{\sin\rho}\left(1-\frac{H-H'}{\sigma}\right)\right]. \qquad (122)$$

При минимальном напряженном состоянии угол θ' между площадками, находящимися в специальном и обыкновенном напряженных состояниях, определится по формуле

$$\theta'=\frac{\pi}{4}-\frac{1}{2}(\rho-\rho')-\frac{1}{2}\arcsin\left[\frac{\sin\rho'}{\sin\rho}\left(1-\frac{H-H'}{\sigma}\right)\right]. \qquad (123)$$

Как легко заметить из уравнений (122) и (123), при любых напряжениях разность между θ и θ' равна разности углов ρ и ρ'

$$\theta-\theta'=\rho-\rho'.$$

Рассматривая зависимость (122), можно установить, что с увеличением σ угол θ уменьшается, а в откосах вогнутого профиля по мере удаления от поверхности этот угол возрастает при одновременном возрастании величины σ. Из этого вытекает, что при вогнутом откосе специальное предельное равновесие оказывается вообще невозможным.

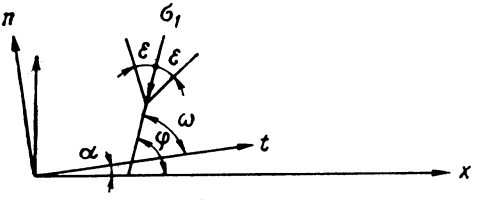


Рис. 132. Схема к определению угла между площадками, находящимися в специальном и обыкновенном напряженных состояниях

В откосах выпуклого профиля угол между направлением σ_1 и плоскостями ослабления (горизонтальными или наклонными) уменьшается при удалении от поверхности откоса и поэтому эти откосы могут быть рассчитаны методом предельного напряженного состояния при наличии поверхностей ослабления.

На рис. 133 изображена сетка поверхностей скольжения в откосе выпуклого профиля, сложенного слоистыми породами, у которых по контактам слоев $\rho'<\rho$ и $K'<K$.

При расчете откосов выпуклого профиля и наличии поверхностей ослабления граничными условиями являются равенства (110) и (122) — первое по поверхности предельно напряженной среды, а второе — по поверхности ослабления.

В приведенном на рис. 133 примере по слабому контакту напряженное состояние является максимальным.

Минимальное напряженное состояние по площадкам, находящимся в специальном предельном равновесии, будет наблюдаться в тех случаях, когда крутопадающие согласные поверхности ослабления пересекают призму активного давления и когда пологие поверхности ослабления пересекают призму выпора.

Формулы (122) и (123) справедливы не только для условий

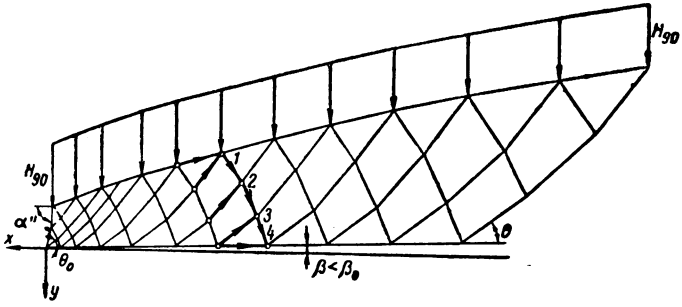


Рис. 133. Сетка поверхностей скольжения в выпуклом откосе, находящемся в специальном напряженном состоянии по контактам слоев

предельного напряженного состояния, но также для условий предельного равновесия; этими формулами можно пользоваться при построении наиболее слабых поверхностей в откосах, сложенных слоистыми породами.

§ 5. Ограниченность условий применения метода предельного напряженного состояния

Изложенными в § 1—4 примерами ограничивается круг возможного применения метода предельного напряженного состояния при расчетах устойчивости бортов карьеров и откосов других выемок в горных породах.

В реальных геологических и горнотехнических условиях этот метод при открытых разработках может быть применен для расчета параметров бортов карьеров лишь в весьма редких случаях.

Так называемые «равноустойчивые» откосы вогнутого профиля приводят к значительному увеличению объема вскрыши в сравнении с откосами выпуклого профиля и плоскими. Они не могут быть рассчитаны в условиях слоистой анизотропной среды, и, кроме того, вертикальный откос высотой H_{90} при открытых горных разработках является недопустимым; вертикальный участок откоса приходится выполаживать, вследствие чего основное преимущество метода предельного напряженного состояния — точность — утрачивается.

Этот же недостаток присущ также и откосам выпуклого профиля, рассчитываемым этим методом. Вследствие изменяющейся прочности пород от слоя к слою и обычного увеличения прочно-

сти с увеличением глубины, в откосах выпуклого профиля в реальных геологических условиях выпирание основания редко встречается, что приводит к большему, чем в однородных породах, сокращению объема вскрыши.

Отмеченные недостатки метода предельного напряженного состояния не означают полного его отрицания; в настоящее время этот метод является математически наиболее обоснованным и он нами широко применяется при разработке математически достаточно обоснованных упрощенных методов расчета, применимых в реальных геологических и горнотехнических условиях.

В этих условиях приходится применять метод предельного равновесия по наиболее слабым поверхностям, положение которых устанавливается методом последовательного приближения.

Основными вопросами при разработке инженерных методов расчета устойчивости откосов являются: а) определение схемы поверхности скольжения в зависимости от структуры горных пород, б) определение границ между смежными блоками, которые можно рассматривать жесткими, в) определение сил, действующих по поверхности скольжения и по граням между смежными блоками.

Проверка точности инженерных методов осуществляется путем поверочных расчетов этими методами откосов, ранее рассчитанных методом предельного напряженного состояния.

Вторая группа задач при открытых разработках находит бо́льшее применение, так как эти задачи имеют удовлетворительное решение и при неоднородной сложной среде, какой в большинстве случаев и являются горные породы. Эта группа задач решается методами:

а) многоугольника сил,

б) алгебраического сложения сил по круглоцилиндрической поверхности.

в) алгебраического сложения сил по монотонной криволинейной поверхности или

г) комбинацией этих методов и метода предельного напряженного состояния.

Эти методы, известные ранее, усовершенствованы нами с учетом основных положений теории предельного напряженного состояния и по ряду схем геологических структур разработаны графики и таблицы, пользование которыми является элементарно простым.

§ 6. Метод круглоцилиндрической поверхности скольжения

Из упрощенных методов расчета устойчивости откосов или их углов наиболее распространен метод круглоцилиндрической поверхности скольжения, основанный на допущении, что поверхность возможного скольжения является круглоцилиндрической, а ограниченный ею массив является «жестким клином».

При таких условиях ожидаемое смещение массива рассматривается как вращение «жесткого клина» вокруг оси, параллельной откосу и служащей осью кругового цилиндра, поверхность которого является поверхностью скольжения. В плоской задаче круглоцилиндрическая поверхность скольжения превращается в дугу окружности ACB, а ось этой поверхности в точку O (рис. 134).

Вращательным моментом жесткого клина вокруг точки O является произведение его веса на горизонтальное расстояние между центром тяжести клина и центром вращения, т. е.

$$M_в = AP.$$

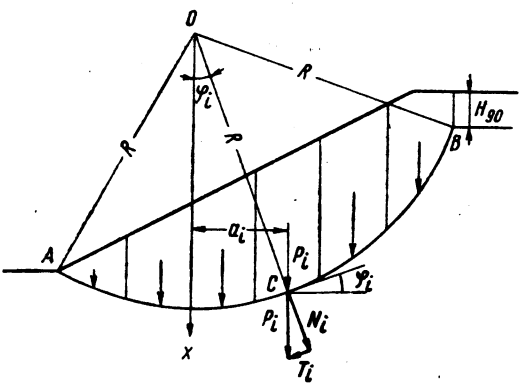


Рис. 134. Схема к расчету методом круглоцилиндрической поверхности скольжения

$M_в$ обычно определяется путем алгебраического сложения моментов от веса отдельных блоков P_i, на которые разделяют призму возможного обрушения

$$M_в = AP = \sum a_i P_i.$$

Из рис. 134 легко видеть, что

$$a_i = R \sin \varphi_i,$$

где a_i — горизонтальное расстояние между центром тяжести отдельных блоков и точкой O;

R — радиус круглоцилиндрической поверхности скольжения;

φ_i — угол наклона поверхности скольжения в точке, лежащей на одной вертикали с центром тяжести блока.

Моментом сил, удерживающих призму возможного обрушения от вращения, является произведение сил трения и сцепления на радиус круга

$$M_у = R(\sum S + KL),$$

где $\sum S$ — сумма сил трения по этой поверхности;

K — удельная сила сцепления;

L — длина дуги ACB, численно равная площади поверхности скольжения цилиндрического тела длиной в 1 *м*.

Силы трения по поверхности скольжения определяются как произведение коэффициента внутреннего трения пород на сумму нормальных напряжений, распределенных по поверхности скольжения. Нормальные силы определяются путем разложения на составляющие веса отдельных блоков

$$N_i = P_i \cos \varphi_i.$$

Приравнивая нулю сумму моментов, действующих на призму возможного обрушения, получают выражение

$$\frac{Rf\sum N_i + RKL}{R\sum P_i \sin\varphi_i} = 1.$$

Как видно из рис. 134, величина $P_i \sin\varphi_i$ равна касательной составляющей веса отдельных блоков призмы возможного обрушения

$$P_i \sin\varphi_i = T_i.$$

Подставляя эту величину в предыдущее выражение и сокращая на R, получают формулу

$$\frac{f\sum_1^n N_i + KL}{\sum_1^n T_i} = 1, \qquad (124)$$

которая является наиболее распространенным выражением предельного равновесия пород в откосах при круглоцилиндрической поверхности скольжения. Из этой формулы видно, что при круглоцилиндрической поверхности скольжения можно производить алгебраическое сложение сдвигающих и удерживающих сил, возникающих в основании каждого элементарного блока породы.

При этом способе расчета устойчивости откосов величины нормальных напряжений в области призмы активного давления получаются заниженными, а в области призмы упора — завышенными, в отдельных точках погрешности в определении нормальных напряжений достигают 20—25%.

Это является следствием того, что массив, ограниченный поверхностью скольжения, рассматривается как жесткий клин и реакции между смежными блоками в расчет не принимаются. В действительности же этот массив не является жестким; как следует из законов статики сыпучей среды и данных наблюдений, в нем появляется второе семейство поверхностей скольжения и, вследствие возникающего при этом заклинивания блока, заключенного между двумя пересекающимися поверхностями скольжения, нормальные напряжения в области призмы активного давления оказываются больше, чем в том случае, когда они определяются как нормальные составляющие веса вертикального столба породы, опирающегося на элементарную площадку.

Поэтому в методе круглоцилиндрической поверхности удовлетворяется только одно условие статики — равенство нулю моментов, условия же равенства нулю проекций сил на координатные оси не удовлетворяются, что является существенным недостатком метода круглоцилиндрической поверхности. Как показывают поверочные расчеты, суммы нормальных напряжений по всей поверхности скольжения для однородных пород отличаются на

величины, не превышающие точности расчетов более строгими методами; на рис. 135 представлен пример поверочного расчета устойчивости методом круглоцилиндрической поверхности вогнутого откоса, построенного методом С. С. Голушкевича. При алгебраическом суммировании сил по круглоцилиндрической поверх-

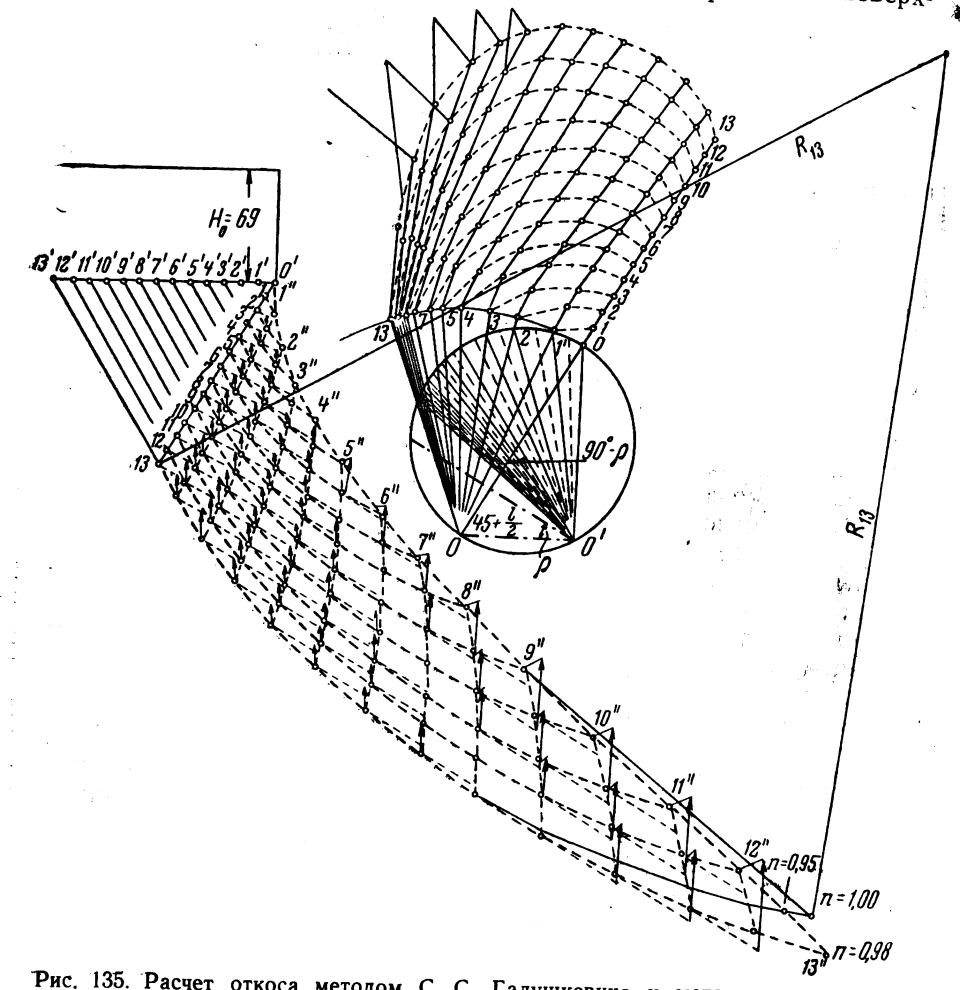


Рис. 135. Расчет откоса методом С. С. Галушкевича и методом круглоцилиндрической поверхности

ности AC коэффициент запаса получился равным 0,95, а при алгебраическом сложении сил по криволинейной поверхности AB коэффициент запаса получился равным 0,98. Подобные же результаты получились и в ряде других поверочных расчетов.

Поэтому можно считать, что метод круглоцилиндрической поверхности в условиях, когда в массиве нет согласно падающих

поверхностей ослабления, дает достаточную точность расчета; необходимо только поверхность скольжения проводить таким образом, чтобы она пересекала откос в его нижней точке под углом $45° - \frac{\rho}{2}$, а в верхней части была наклонена под углом $45° + \frac{\rho}{2}$ и заканчивалась трещиной отрыва глубиной H_{90}. При $\rho < 13°$ и $\alpha < 40°$ наиболее слабая круглоцилиндрическая поверхность выходит в подошву откоса.

§ 7. Метод многоугольника сил

В тех случаях, когда в массиве пород, слагающих откос, имеется ряд поверхностей ослабления, по которым сопротивление сдвигу значительно меньше, чем по другим направлениям, поверх-

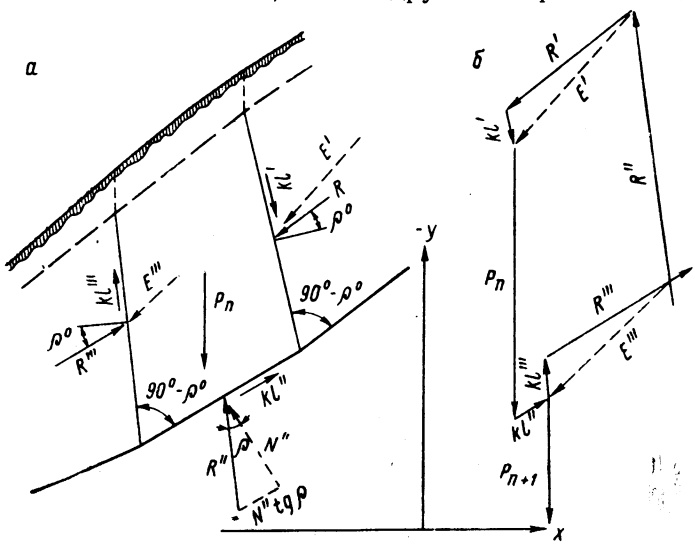


Рис. 136. Схема и многоугольник сил:
а — действующих на элементарный блок горных пород; *б* — многоугольник сил

ность скольжения может частично или полностью проходить по такого рода поверхностям ослабления. Если поверхности ослабления пересекаются между собой в пределах призмы возможного обрушения, то в этом случае поверхность скольжения в плоской задаче имеет вид ломаной линии.

Расчет устойчивости откоса или его угла производится по условию предельного равновесия методом многоугольника сил, который строится для каждого блока породы с учетом реакций со стороны смежных блоков. При этом в расчет принимаются следующие силы (рис. 136):

E', E''' — реакции со стороны верхнего и нижнего смежных блоков;

P_n — вес рассматриваемого блока;

Kl'' — силы сцепления, возникающие в основании блока, направленные параллельно основанию;

R'' — реакция со стороны основания блока, являющаяся равнодействующей сил трения и нормальной составляющей.

При расчете методом многоугольника сил точность расчета зависит от расположения границ между смежными блоками и от направления реакций между ними. Чаще всего границы между блоками принимаются вертикальными, а реакции между ними — горизонтальными; в этом случае погрешности расчета методом

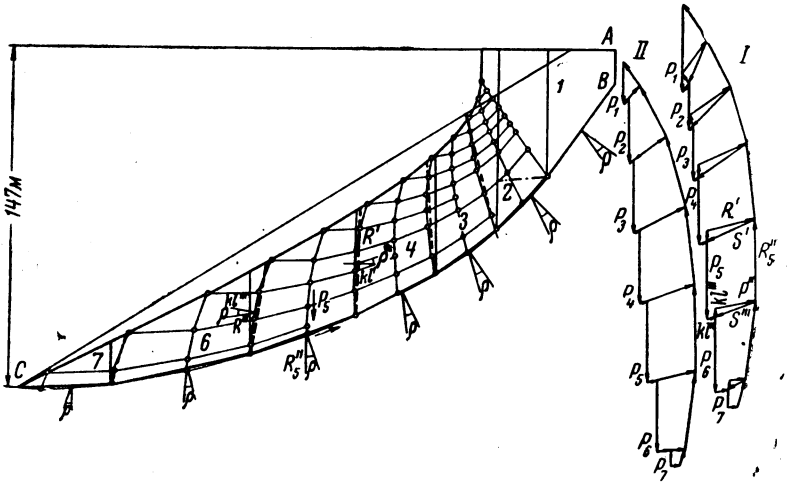


Рис. 137. Пример расчета устойчивости откоса методом многоугольника сил

многоугольника сил оказываются значительными; при согласном наклонном залегании поверхностей ослабления, выходящих в нижней точке откоса, погрешность достигает 10%. Высокая точность расчетов, достигающая точности графических построений (порядка 1—2%), получается при расположении границ между блоками подобно тому, как располагается второе семейство поверхностей скольжения при расчете методом предельного напряженного состояния (рис. 137); направление реакций между блоками отклоняется от нормали к этим поверхностям на угол ψ равный углу сдвига

$$\operatorname{tg}\psi = \operatorname{tg}\rho + \frac{K}{\sigma_{n\,ср}}, \qquad (125)$$

где $\sigma_{n\,ср}$ — средняя интенсивность нормального напряжения по смежным граням.

В приведенном на рис. 137 примере откос вначале был рассчитан по методу В. В. Соколовского, при характеристиках $\rho = 20°$,

$K=10$ $T/м^2$ и $\gamma=2$ $T/м^3$, при высоте откоса, равной 147 *м*. Затем устойчивость этого же откоса была рассчитана методом многоугольника сил, причем в первом случае грани между блоками были приняты наклонными (в этом случае при определении реакций между блоками учитывалось сцепление и трение), а во втором — вертикальными (в этом случае направление реакций принималось параллельным наклону площадки скольжения в последующем блоке). В обоих случаях получилось полное замыкание многоугольников сил, т. е. решение точно совпадало с расчетом по методу В. В. Соколовского.

Если призма возможного обрушения пересекается поверхностью ослабления, то в большинстве случаев эту поверхность необходимо принимать за границу между смежными блоками.

§ 8. Алгебраическое сложение сил по плавной криволинейной поверхности скольжения

При углах откосов положе 45° и большом числе блоков границы между ними можно принимать вертикальными, а направления реакций — совпадающими с наклоном площадок скольжения в основании последующего блока, как показано на рис. 138, т. е. под углом δ к основанию рассматриваемого блока, при этом

$$\delta_i=\varphi_i-\varphi_{i+1}.$$

В этом случае реакция между блоками может быть определена аналитически по формуле

$$E_i=\frac{P_i(\sin\varphi_i-\cos\varphi_i\operatorname{tg}\rho)-Kl_i+E_{i-1}}{\cos\delta_i+\sin\delta_i\cdot\operatorname{tg}\rho_i}. \qquad (126)$$

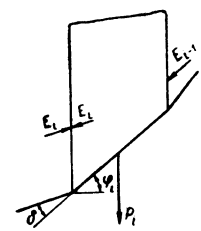


Рис. 138. Направление реакций между смежными блоками к обоснованию метода алгебраического сложения сил

При уменьшении угла δ знаменатель формулы стремится к единице и при $\delta=5°$, а $\rho=20°$ он будет равен 0,985, т. е. если принять его равным единице, погрешность в определении реакции будет не более 1,5%.

Решая это уравнение при знаменателе, равном единице последовательно для всех блоков, и приняв для последнего блока $E_n=0$, получим следующее равенство:

$$\begin{aligned}
E_1&=P_1(\sin\varphi_1-\cos\varphi_1\operatorname{tg}\rho)-Kl_1;\\
E_2&=P_2(\sin\varphi_2-\cos\varphi_2\operatorname{tg}\rho)-Kl_2+E_1;\\
E_3&=P_3(\sin\varphi_3-\cos\varphi_3\operatorname{tg}\rho)-Kl_3+E_2;\\
&\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\\
E_n&=P_n(\sin\varphi_n-\cos\varphi_n\operatorname{tg}\rho)-Kl_n+E_{n-1}=0.
\end{aligned} \qquad (127)$$

$$E_n=\sum_1^n P_i(\sin\varphi_i-\cos\varphi_i\operatorname{tg}\rho)-\sum_1^n Kl_i=0, \qquad (128)$$

которое является обычным алгебраическим сложением сил, действующих по поверхности скольжения; запишем (128) в таком виде

$$\frac{\sum_1^n P_i \cos\varphi_i \operatorname{tg}\rho + \sum_1^n Kl_i}{\sum_1^n P_i \sin\varphi_i} = \frac{\operatorname{tg}\rho \sum_1^n N_i + KL}{\sum_1^n T_i} = 1. \qquad (129)$$

Поверочные расчеты устойчивости откосов методом многоугольника сил, а также методом алгебраического сложения сил

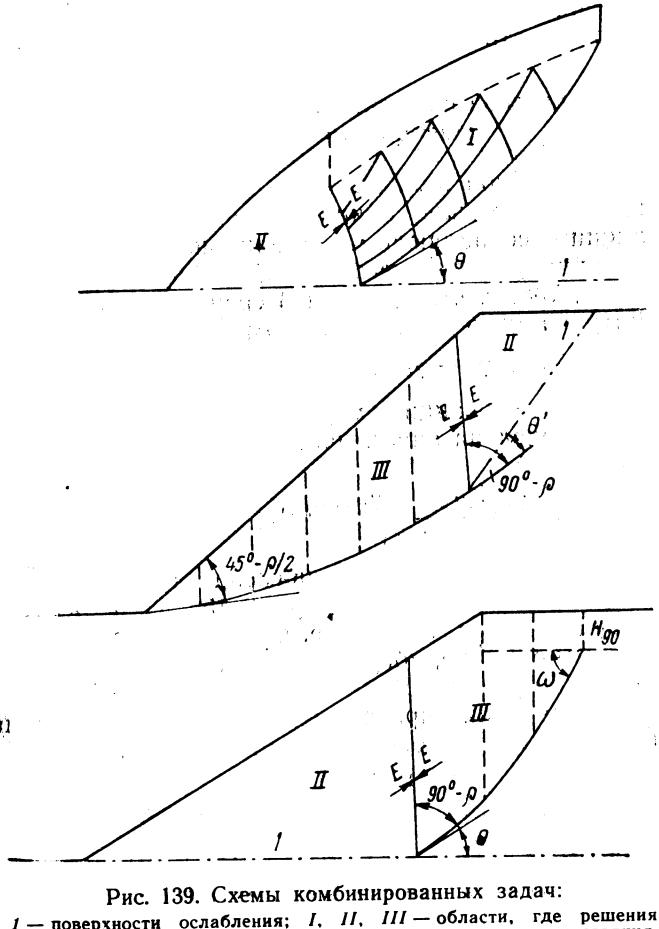


Рис. 139. Схемы комбинированных задач:

1 — поверхности ослабления; *I*, *II*, *III* — области, где решения производятся методами предельного напряженного состояния, многоугольника сил, алгебраического сложения сил

по монотонной криволинейной поверхности показывают, что коэффициенты запаса при расчетах этими методами отличаются

руг от друга незначительно — на 2—5%, причем расчетный коэффициент всегда меньше в методе алгебраического сложения сил, т. е. получающаяся при этом погрешность приводит к увеличению действительного коэффициента запаса на 2—5% (см. рис. 135 и 137).

Основным доводом против применения алгебраического сложения сил по монотонной криволинейной поверхности обычно является представление о призме обрушения как о жестком клине. В действительности же призму возможного обрушения, безусловно, нельзя рассматривать как жесткую, во всех случаях только некоторые ее части находятся в упругом состоянии, большей же частью она находится в предельном напряженном состоянии, т. е. в ней существуют два семейства пересекающихся поверхностей скольжения, а поэтому скольжение может беспрепятственно происходить при любой кривизне поверхности скольжения, в том числе и при возрастающей книзу.

§ 9. Комбинированные методы

В реальных геологических условиях при расчетах устойчивости бортов карьеров часто необходимо применять комбинированные методы решения задач на предельное равновесие.

На рис. 139 приведен ряд схем решения комбинированных задач на предельное равновесие горных пород в откосах.

При решении комбинированных задач используются методы предельного напряженного состояния, многоугольника сил и алгебраического сложения по плавной криволинейной поверхности. Метод круглоцилиндрической поверхности скольжения по существу является разновидностью алгебраического сложения сил. Круглоцилиндрическая поверхность скольжения в неоднородных породах большей частью не является наиболее слабой и поэтому ее необходимо избегать.

Глава XVIII

ОБЩИЕ ВОПРОСЫ РАСЧЕТА УСТОЙЧИВОСТИ БОРТОВ КАРЬЕРОВ В РЕАЛЬНЫХ УСЛОВИЯХ

§ 1. Общие положения

Углы наклона бортов карьеров устанавливаются и уточняются по стадиям проектирования:

а) в технико-экономическом обосновании (ТЭО) по данным предварительной разведки устанавливается группа месторождения, в соответствии с которой по таблице ориентировочных углов наклона бортов (табл. 34) определяется общий угол наклона борта; на месторождениях с простыми условиями залегания при наличии в разрезе пластичных глин общий угол наклона борта

должен быть установлен путем расчета по данным единичных инженерно-геологических скважин с использованием табличных данных характеристик по поверхностям ослабления;

б) в проектном задании углы наклона бортов устанавливаются путем расчета на основе данных детальной разведки, с использованием табличных материалов о влиянии трещиноватости и поверхностей ослабления;

в) в стадию составления рабочих чертежей по месторождениям со сложными условиями по данным доразведки производится уточнение углов наклона бортов на первоочередных участках разработки (или вскрытия);

г) после вскрытия месторождения детально изучают тектонику, трещиноватость и характеристики сопротивления сдвигу по поверхностям ослабления и на основе этого производится корректировка углов наклона бортов.

В силу реологических свойств горных пород и широкой зоны напряжений, близких к предельным, в массиве не могут существовать изолированные предельно напряженные площадки, а в предельном напряжении могут находиться сплошные поверхности, пересекающие поверхность откоса по замкнутой кривой линии. Это позволяет производить сложение сдвигающих и удерживающих сил, действующих по всей предельно напряженной поверхности, называемой поверхностью скольжения.

Большая протяженность бортов дает возможность при расчете их устойчивости ограничиться решением плоской задачи объемного напряженного состояния.

Расчетные сечения могут располагаться одно от другого на расстоянии, равном трехкратной глубине карьера, если в залегании пород, участвующих в сложении бортов, на этом протяжении нет существенных изменений. При изменчивом залегании пород расчетные сечения сближаются до полуторной высоты борта. На тех участках бортов, где установлены поверхности ослабления прочности массива, имеющие циркообразную форму, следует производить сложение сил по трем-четырем поперечникам, параллельным направлению возможного скольжения пород (параллельно тальвегу поверхности ослабления); после чего составляется общая сумма удерживающих и сдвигающих сил для всего участка, отношение которых является коэффициентом запаса устойчивости всего участка.

В торцовых участках карьера при радиусе кривизны верхней бровки борта менее $2H$ угол наклона борта увеличивается в зависимости от его кривизны (см. § 9 гл. XIX).

§ 2. Определение расчетных характеристик прочности пород

Расчет углов наклона бортов карьеров начинается с разделения бортов на участки, на протяжении которых горногеологические условия можно считать неизменными; для этого использу-

ся данные детальной разведки месторождений и первой стадии оектного решения о контуре и глубине карьера. Каждый уча-ок борта характеризуется неизменной на всем протяжении уча-ка высотой, постоянством литологического состава пород, усло-й их залегания, степени трещиноватости и тектоники.

Для каждого участка необходимо построить геологический азрез, нормальный к простиранию борта и отображающий новные геологические факторы, влияющие на углы наклона ортов: инженерно-геологические слои, тектонические нарушения трещины. На разрез наносится ориентировочное положение по-рхности борта и поверхности скольжения; этими поверхностями раничивается призма возможного обрушения пород.

В этих границах выделяются слои или группы пород, характери-ющиеся определенными показателями сопротивления сдвигу ρ K и степенью трещиноватости, полученными по данным раз-едки. Пользуясь этими данными и табл. 13, определяют величину цепления в массиве с учетом его трещиноватости по формуле

$$K_м = \frac{K}{1 + a \ln (HW)}, \qquad (130)$$

де $K_м$; K — сцепление в массиве и сцепление в образце, $T/м^2$;
a — коэффициент, зависящий от прочности пород в образце, степени и характера трещиноватости (принимается по табл. 13);
H — общая высота борта, $м$, включая толщу рыхлых отложений;
W — число, характеризующее степень (интенсивность) трещиноватости, величина W обратна средним линейным размерам блоков, ограниченных смежными трещинами: $W = \frac{1}{l_{ср}}$ в $1/м$.

После того как установлено сцепление в массиве для всех рупп пород, составляющих призму возможного обрушения, про-зводится определение средневзвешенных значений $K_{ср}$ и $\rho_{ср}$ по всей поверхности скольжения по формулам:

$$K_{ср} = \frac{K_{м1} l_1 + K_{м2} l_2 + \ldots + K_{мn} l_n}{L}, \qquad (131)$$

$$\rho_{ср} = \frac{\rho_1 \sigma_1 l_1 + \rho_2 \sigma_2 l_2 + \ldots + \rho_n \sigma_n l_n}{\sum_1^n \sigma_i l_i}, \qquad (132)$$

де $l_1, l_2, \ldots, l_n$ — длины отрезков вероятной поверхности скольжения для каждого блока пород с характеристиками $K_{мi}$ и ρ_i;
L — общая длина поверхности скольжения;
$\sigma_1, \sigma_2, \ldots, \sigma_n$ — средние величины нормального напряжения по соответствующим отрезкам поверхности скольжения.

Углы внутреннего трения принимаются по данным лабораторных испытаний на срез или по табличным данным.

При наличии поверхностей ослабления (слоистости, сланцеватости, дизъюнктивных нарушений), падающих согласно с наклоном борта, необходимо знать характеристики прочности по этим контактам (ρ' и K').

Величина сцепления по поверхностям ослабления определяется натурными испытаниями. Ориентировочно величины K' могут быть приняты согласно табл. 14, в которой приведены результаты испытаний пород ряда изученных нами месторождений.

Величины углов трения по поверхностям ослабления определяются путем лабораторных испытаний на трение, по некоторым поверхностям ослабления эти данные приведены в табл. 12.

Если характер поверхности ослабления в достаточной степени не установлен, то для расчета принимается минимальное значение угла трения для данной поверхности ослабления.

Объемный вес пород при небольшой изменчивости его значений в каждом слое определяется как средневзвешенный в целом для всей призмы возможного обрушения по каждому расчетному разрезу; при изменчивости объемных весов с глубиной более чем на 10% средневзвешенные значения объемного веса устанавливаются отдельно для призмы упора и призмы активного давления или даже для каждого вертикального блока.

§ 3. Коэффициент запаса устойчивости

Коэффициент запаса прочности в инженерно-геологических расчетах понимается как отношение сумм всех сил, удерживающих откос, к сумме всех сил, сдвигающих его:

$$n = \frac{f\sum N + KL + A}{\sum T + B}, \qquad (133)$$

где $f\sum N$; KL — сумма сил трения и сцепления, удерживающих откос;

A — другие силы, удерживающие откос;

$\sum T$ — сумма касательных сил, сдвигающих откос и действующих по расчетной поверхности;

B — другие силы, сдвигающие откос.

Если по наиболее слабой поверхности действуют только силы, обусловленные весом породы, то коэффициент запаса устойчивости можно определять по формуле

$$n = \frac{f\sum N + KL}{\sum T}. \qquad (134)$$

Если правый и левый члены этого выражения разделить на величину n, получим выражение

$$1 = \frac{\frac{f}{n}\sum N + \frac{K}{n}L}{\sum T}, \qquad (135)$$

т. е. устойчивое равновесие по поверхности с коэффициентом запаса n можно рассматривать как предельное равновесие с новыми характеристиками прочности пород, меньшими исходных характеристик в n раз:

$$K_n = \frac{K_{ср}}{n}; \quad \operatorname{tg} \rho_n = \frac{\operatorname{tg} \rho_{ср}}{n} = \frac{f_{ср}}{n}. \qquad (136)$$

Поэтому и построение наиболее слабой поверхности с заданным коэффициентом устойчивости необходимо строить как поверхность скольжения только по характеристикам, уменьшенным в n раз против расчетных.

По уменьшенным таким способом механическим характеристикам можно построить откос с переменным углом (откос вогнутой формы), когда коэффициент запаса устойчивости по наиболее слабой поверхности на любой высоте откоса одинаковый, а также определить элементы откоса выпуклого профиля и плоского с заданным коэффициентом запаса по наиболее слабой поверхности, проходящей через основание откоса.

Более сложным является определение коэффициента запаса устойчивости откоса с заданными параметрами и известными физико-механическими характеристиками горных пород, слагающих откос.

При решении этой задачи рекомендуется поступать следующим образом:

1) принять ориентировочно величину коэффициента запаса устойчивости и ввести его в исходные характеристики прочности;

2) по полученным таким способом характеристикам прочности по графику, изображенному на рис. 153, или другим путем определить высоту откоса при заданном угле;

3) если полученная высота откоса не равна заданной величине, принять новое значение коэффициента запаса (если при первом значении коэффициента запаса высота откоса получилась больше заданной, то новое значение коэффициента запаса берем больше первого и наоборот) и снова определить величины механических характеристик с введением коэффициента запаса, по которым определяем высоту откоса. Таким образом, получают два-три значения высоты откоса при соответствующих коэффициентах запаса устойчивости и по этим данным строят график зависимости между высотой откоса и коэффициентом запаса, на котором по оси абсцисс откладывают коэффициенты запаса, а по оси ординат соответствующие высоты откоса. Полученные точки

соединяют плавной кривой. Затем на оси ординат откладывают заданную высоту откоса, проводят горизонтальную линию до кривой, из точки пересечения с кривой опускается перпендикуляр на ось абсцисс и по основанию перпендикуляра отсчитывается искомый коэффициент запаса.

В такой же последовательности можно строить график зависимости между коэффициентом запаса устойчивости откоса и его углом при заданной высоте. В этом случае после первой попытки, если α_1 существенно не отличается от α, коэффициент запаса можно определить по формуле

$$n = \frac{n_1 \operatorname{tg} \alpha_1}{\operatorname{tg} \alpha}, \qquad (137)$$

где α, n — заданный угол откоса и определяемый коэффициент запаса;

α_1 — угол откоса при заданной высоте и ориентировочно взятом коэффициенте запаса n_1.

Величина коэффициента запаса устойчивости, принимаемого при расчетах углов наклона бортов, откосов уступов и отвалов, зависит от следующих факторов:

а) погрешности методов расчета, включая и погрешности самих расчетов;

б) погрешности лабораторного определения основных расчетных характеристик сопротивления сдвигу;

в) снижения этих характеристик с течением времени под влиянием выветривания и набухания;

г) снижения сопротивления сдвигу с течением времени вследствие ползучести, обусловливающей так называемую длительную прочность материалов, в том числе и горных пород;

д) погрешности определения элементов залегания неблагоприятно ориентированных поверхностей ослабления;

е) погрешности в определении влияния трещиноватости на сопротивление сдвигу горных пород в массиве;

ж) влияния динамических нагрузок от массовых взрывов и землетрясений;

з) погрешности определения средней величины объемного веса пород, составляющих призму возможного обрушения.

При расчетах методом предельных состояний в явной форме учитываются только важнейшие факторы, от которых зависит переход в предельное состояние; менее значительные факторы учитываются совокупно так называемым коэффициентом условий работы; дальнейшая дифференциация коэффициентов в настоящее время считается нецелесообразной [160].

При расчетах устойчивости бортов карьеров все перечисленные факторы, кроме снижения сопротивления сдвигу скальных и полускальных пород под влиянием выветривания, имеют количе-

ственную оценку, по которой можно выделить наиболее существенные из них.

На величину коэффициента запаса устойчивости откосов, в сложении которых значительную часть составляют глинистые породы, наибольшее влияние оказывает ползучесть. У пластичных глин соотношение между пределом ползучести и предельным сопротивлением быстрому сдвигу (продолжительность недренированного неконсолидированного испытания обычно составляет 5—7 *мин*) находится в пределах 0,50—0,65, а у слабоуплотненных болотных отложений снижается до 0,30—0,40.

У трещиноватых скальных и полускальных пород наименее изучено влияние трещиноватости на сопротивление сдвигу (часто встречаются и глины со скрытой трещиноватостью, у которых сопротивление сдвигу в 1,5—2 раза меньше, чем в монолитном образце). Погрешность определения сопротивления сдвигу массива трещиноватых горных пород при существующих методах учета трещиноватости колеблется в пределах 20—25%. Существенные погрешности в расчетах получаются также за счет ошибок в определении элементов залегания поверхностей ослабления.

Погрешности за счет других факторов оказываются значительно меньше. Так, погрешность определения средней величины объемного веса пород, составляющих призму возможного обрушения, не превышает 2—3%, погрешности методов расчета 3—5%, погрешность лабораторного определения основных расчетных характеристик не превышает 5—8%, если методика испытания соответствует условиям деформации пород в откосах.

Динамические нагрузки от массовых взрывов вблизи откосов, находящихся в состоянии, близком к предельному, могут быть существенными, однако вес одновременно взрываемого заряда в этих условиях ограничивается дробимостью твердых пород (скальных и полускальных) в откосах; при весе одновременно взрываемого вблизи откоса заряда ВВ не более 3 *т* дополнительные сдвигающие нагрузки не превышают 15—18% и, в силу кратковременности их действия, не оказывают существенного влияния на устойчивость больших массивов горных пород; однако на устойчивость уступов твердых пород их влияние существенно и должно учитываться при определении коэффициента запаса.

Учитывая совокупное влияние перечисленных факторов на коэффициент запаса устойчивости бортов карьеров, в настоящее время можно рекомендовать следующие величины этого коэффициента.

А. По нерабочим бортам со сроком службы более 5 лет:

1) расчет общей устойчивости борта с преобладанием глинистых пластичных пород производится по пределу ползучести с коэффициентом запаса $n=1$ (коэффициент запаса по предельному сопротивлению сдвигу в этом случае составляет не менее 1,3);

2) расчет общей устойчивости борта с преобладанием песчаных пород производится по предельному сопротивлению сдвигу с коэффициентом запаса 1,2, с последующей проверкой коэффициента запаса по пределу ползучести, который должен быть не менее 1;

3) расчет общей устойчивости борта, сложенного трещиноватыми породами, производится по предельному сопротивлению сдвигу горных пород в массиве, определенному по натурным испытаниям или с учетом трещиноватости по табличным данным; коэффициент запаса принимается равным 1,3;

4) углы откосов нерабочих уступов рассчитываются с коэффициентом запаса 1,5—2, так как при неглубоко залегающей поверхности скольжения породы набухают интенсивнее, чем в области расчетной поверхности скольжения, определяющей устойчивость всего борта, залегающей значительно глубже; кроме того, на устойчивость уступов в большей степени, чем на устойчивость всего борта, влияют взрывы и местные поверхности ослабления, неблагоприятно ориентированные относительно откоса уступа; особенно большое влияние местные поверхности ослабления оказывают на устойчивость уступов скальных и полускальных пород.

Б. По рабочим бортам, а также по нерабочим со сроком службы менее пяти лет:

1) общая устойчивость борта при учете поверхностей ослабления рассчитывается с коэффициентом запаса не менее 1,2 — по предельному сопротивлению сдвигу; по пределу ползучести допускается коэффициент 0,9;

2) расчет устойчивости ненагруженных и нагруженных уступов, а также отвалов рекомендуется производить с коэффициентом запаса 1,2; при этом по пределу ползучести коэффициент запаса может снижаться до 0,8.

§ 4. Расположение поверхностей скольжения

Точность и надежность расчетов устойчивости откосов методами предельного равновесия в большой степени зависит от расположения в откосе расчетной поверхности скольжения, важно, чтобы эта поверхность действительно являлась наиболее слабой.

При простейших расчетах принимают форму поверхности скольжения плоской, но последняя не является наиболее слабой, если она в массиве однородных пород не совпадает с поверхностями ослабления. Чаще всего форма наиболее слабой поверхности принимается круглоцилиндрической, а ее положение в откосе определяется методом подбора. Так, для отыскания положения этой поверхности по способу Феллениуса необходимо выполнить от трех до пяти построений, причем часто построенные таким путем поверхности не являются наиболее слабыми.

Положение поверхности скольжения можно построить значительно проще, пользуясь теорией сыпучей среды.

Согласно этой теории, элементарные площадки скольжения в однородном массиве горных пород могут возникать лишь при напряжениях не менее

$$\sigma_0 = 2K \operatorname{ctg}\left(45^\circ - \frac{\rho}{2}\right). \qquad (138)$$

Располагаются эти площадки под углом $\left(45^\circ - \frac{\rho}{2}\right)$ к направлению наибольшего главного напряжения.

В массиве горных пород направление наибольших главных напряжений совпадает с вертикалью, а при приближении к поверхности откосов выполаживается в сторону откоса и на поверхности вогнутых и плоских откосов совпадает с ними. С изменением направления главных напряжений изменяется и направление площадок скольжения — от направления под углом $(45^\circ - \rho/2)$ к вертикали в некотором удалении от откоса, до направления под углом $\left(45^\circ - \frac{\rho}{2}\right)$ к поверхности откоса при его пересечении. Общее расположение поверхностей скольжения в предельно напряженном откосе вогнутой формы изображено на рис. 135 и 137.

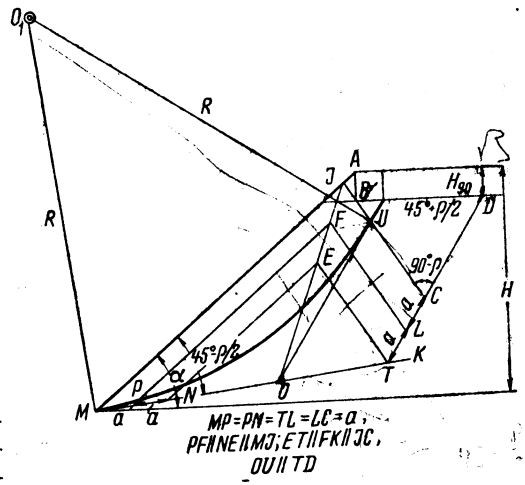


Рис. 140. Построение поверхности скольжения в однородном массиве плоского откоса

Из формулы (138) вытекает, что площадки скольжения возникают лишь, начиная с глубины H_{90}:

$$H_{90} = \frac{2K}{\gamma} \operatorname{ctg}\left(45^\circ - \frac{\rho}{2}\right). \qquad (139)$$

В области BDC (рис. 140), где направление σ_1 совпадает с вертикалью, площадки скольжения наклонены под углом $\left(45^\circ - \frac{\rho}{2}\right)$ к вертикали и поверхность откоса пересекается плоскостью скольжения под этим же углом.

В области между поверхностью откоса и линией BC поверхность скольжения, исходя из анализа кривых, построенных по методам В. В. Соколовского и С. С. Голушкевича [175], можно принимать круглоцилиндрической или плавной криволинейной.

Исходя из указанных основных элементов положения поверхности скольжения, ее можно легко построить в откосе. Для этого

через нижнюю точку откоса проводят окружность, пересекающую откос под углом $\left(45° - \frac{\rho}{2}\right)$ и линию BC под углом $(90° - \rho)$.

Эти условия вполне определяют единственное положение окружности, проходящей через нижнюю точку откоса.

Построение поверхности скольжения изображено на рис. 140. От основания откоса проводим линию MK под углом $\left(45° - \frac{\rho}{2}\right)$ к откосу и продолжаем линию DC, наклоненную к вертикали тоже под углом $\left(45° - \frac{\rho}{2}\right)$.

В точке M линия MK должна касаться круга. Другая касательная будет параллельна DC. Отрезки пересекающихся касательных, заключающихся между линиями AM и BC, должны быть равны. На линиях MK и DC от точек M и C отложим по два равных отрезка $MP = PN = CL = LT$ и через их концы проведем линии, параллельные AM и BC, до их взаимного пересечения в точках F и E. Линия FE будет являться геометрическим местом точек пересечения касательных к окружностям, пересекающим линию AM под углом $\left(45° - \frac{\rho}{2}\right)$, а линию BC — под углом $(90° - \rho)$. Продолжим FE до пересечения с MK в точке O, которая и будет являться точкой пересечения касательных к окружности, пересекающей откос под углом $\left(45° - \frac{\rho}{2}\right)$ в его нижней точке. Через точку O проведем линию OU, параллельную DC. Из точек M и U восстановим перпендикуляры к касательным до их взаимного пересечения в точке O_1, которая является центром отыскиваемой окружности.

Изложенным выше способом определяется положение поверхности скольжения в откосе, по которой сумма сил сдвигающих равна сумме сил удерживающих, т. е. откос находится в предельном состоянии.

В откосе с коэффициентом запаса n наиболее слабую поверхность отыскивают вышеописанным способом, вводя в исходные характеристики коэффициент запаса n.

В массиве откоса выпуклой формы имеется ряд предельно напряженных поверхностей (или поверхностей с одинаковым коэффициентом запаса устойчивости, когда он вводится в расчет).

В откосе выпуклой формы поверхности скольжения также начинаются на глубине H_{90} от поверхности откоса и в верхней части наклонены под углом $\left(45° - \frac{\rho}{2}\right)$ к вертикали; постепенно выполаживаясь, они пересекают откос в его нижней точке (рис. 141).

Форму поверхности скольжения без ущерба для точности расчета можно принимать круглоцилиндрической и ее построение производить в следующем порядке. Через точку на глубине H_{90} от поверхности откоса проводится отрезок, наклоненный под

углом $\left(45° - \frac{\rho}{2}\right)$ к вертикали, касательный в этой точке к поверхности скольжения. Второй точкой окружности, частью которой является поверхность скольжения, будет нижняя точка откоса. Имея две точки окружности и направление касательной к ней в одной из этих точек, нетрудно построить всю окружность. Для этого достаточно соединить точки хордой и построить на ней, как на основании, равнобедренный треугольник, одна сторона которого должна быть перпендикулярна заданной касательной. Вершина треугольника будет являться центром искомой окружности.

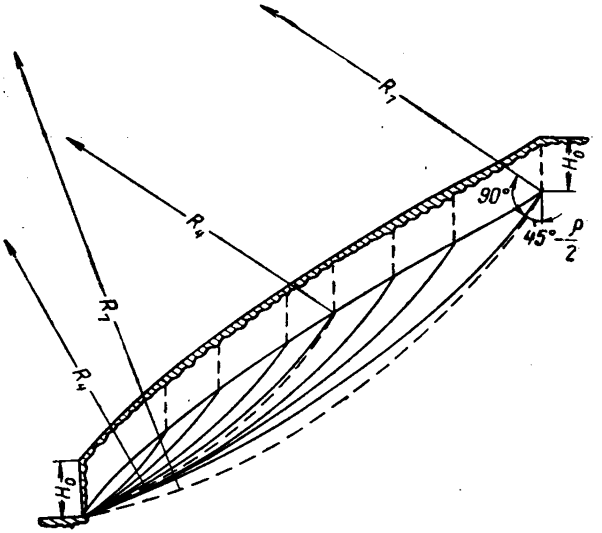


Рис. 141. Расположение поверхностей скольжения в откосе выпуклого профиля

Если в основании откоса залегает слой жирных глин с углом внутреннего трения ρ_1 менее 13°, то наиболее слабая поверхность выходит в подошву откоса под углом $\left(45° - \frac{\rho_1}{2}\right)$ к ее поверхности (рис. 142, а), а в верхней части она также начинается на глубине H_{90} и наклонена к вертикали под углом $\left(45° - \frac{\rho}{2}\right)$. Форма наиболее слабой поверхности является плавной криволинейной, исключая прямолинейный участок BD. Если слой жирных глин, залегающих в основании откоса, имеет небольшую мощность, то у почвы этого слоя также появляется прямолинейный участок поверхности скольжения (рис. 142, б).

В откосах выпуклого профиля при общем угле $\alpha < \left(22° + \frac{\rho}{2}\right)$ наиболее слабая поверхность также выходит в подошву откоса (см. рис. 128).

Положение крайних точек наиболее слабой поверхности устанавливается путем повторных расчетов.

Если в массиве имеются поверхности ослабления в виде слоистости, трещин, отдельностей и дизъюнктивных нарушений, поверхность скольжения может проходить или полностью по этой поверхности ослабления или частично, о чем будет подробнее сказано ниже. Изменение механических характеристик с увеличе-

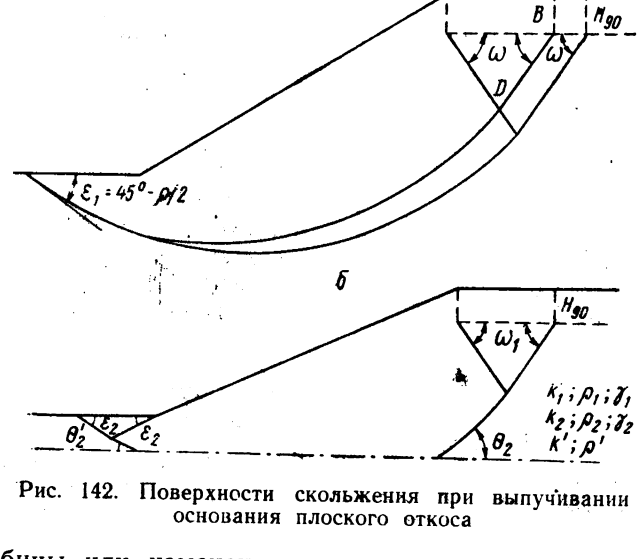


Рис. 142. Поверхности скольжения при выпучивании основания плоского откоса

нием глубины или изменение напряженного состояния от упругого в верхней части до пластичного в средней и нижней частях откоса делает более сложной также и поверхность скольжения.

§ 5. Определение напряжений в откосах

Нередко при расчете углов наклона бортов возникает необходимость определять величины напряжений в отдельных точках массива; приближенные значения напряжений получают исходя из того, что при определении предельного равновесия в расчет принимается сумма сил, действующая по всей поверхности скольжения; таким образом, следует считать, что в каждой элементарной площадке этой поверхности существует предельное равновесие при характеристиках ρ_n и K_n.

Если известна величина нормального, касательного или одного из главных напряжений, величину напряжений в предельном равновесии можно определить аналитически или по паспорту прочности.

В треугольной зоне ABC (рис. 143) величина наибольшего главного напряжения легко определяется как вес вертикального столба породы. На криволинейном участке поверхности скольже-

ния нормальное напряжение можно определять приближенно, как нормальную составляющую σ_n веса вертикального столба породы, приходящуюся на единицу поверхности скольжения.

Для определения σ_n берем вертикальный столбик породы с площадью сечения, равной 1 $м^2$ (рис. 144). Вес этого столбика составит $p = h\gamma$. Столбик породы будет опираться на наклонную площадку скольжения размером $S = \frac{1}{\cos\alpha}$ $м^2$. Нормальная состав-

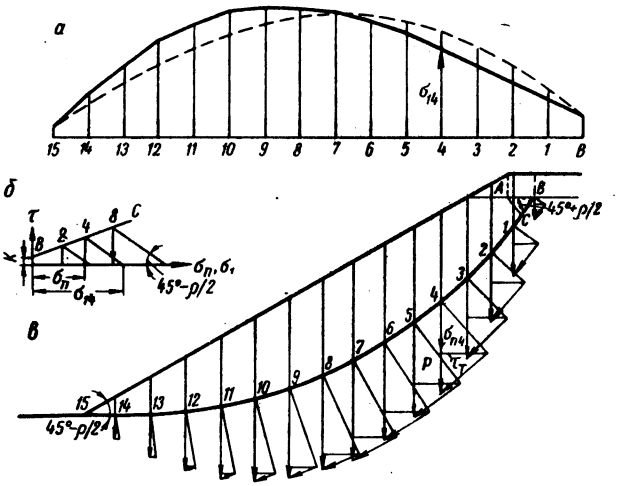


Рис. 143. Определение напряжений в откосе

ляющая веса столбика, приходящаяся на всю площадку, составит $N = h\gamma\cos\alpha$, а на 1 $м^2$ площади

$$\sigma_n = \frac{N}{S} = h\gamma\cos^2\alpha. \qquad (140)$$

Графически нормальное напряжение на криволинейном участке поверхности скольжения определяется следующим образом: через интересующую нас точку поверхности скольжения проводится вертикальная линия, на которой вниз от поверхности скольжения откладывается отрезок, равный высоте столба породы; этот отрезок проектируется на нормаль к площадке скольжения, а проекция еще раз проектируется на вертикальную линию; полученный отрезок в соответствующем масштабе является приближенным значением нормального напряжения в данной точке (рис. 144).

По нормальному напряжению на паспорте прочности определяется касательное напряжение как ордината до линии, выражающей сопротивление сдвигу породы при соответствующем нормальном напряжении; наибольшее главное напряжение отсекается на

оси абсцисс линией, проведенной под углом $\left(45^\circ - \frac{\rho_n}{2}\right)$ к оси абсцисс через точку с известными σ_n и τ.

На рис. 143 приведен пример определения наибольших главных напряжений указанным способом. Все определения произведены графически. Масштаб графика напряжений (паспорт прочности) подобран так, чтобы величины напряжений выражались высотой столба породы над рассматриваемой точкой.

Измеряя откос в метрах, а напряжения в тоннах на квадратный метр, масштаб графика напряжений следует уменьшить в γ раз по сравнению с масштабом откоса.

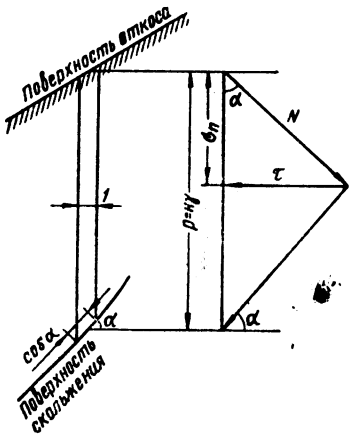


Рис. 144. Определение действующих нормальных и касательных напряжений от веса элементарных блоков

На рис. 143 пунктирной линией показан график наибольших главных напряжений, построенный по методу С. С. Голушкевича [30], а сплошной линией — по предлагаемому способу. Как видно, расхождения в определении величин напряжений небольшие и предлагаемый способ удовлетворяет практическим целям.

Для определения величин напряжений по наиболее слабым поверхностям с определенным коэффициентом запаса прочности допускаем, что для удержания массива в равновесии в равной степени используются сцепление и коэффициент внутреннего трения. Тогда равновесие по поверхности с коэффициентом запаса n рассматривается как предельное равновесие массива с механическими характеристиками, уменьшенными в n раз, а напряжения определяются по паспорту прочности, где ρ и K уменьшены в n раз.

Для более точного определения напряжений по поверхности скольжения можно воспользоваться формулой (108) В. В. Соколовского или графическим методом С. С. Голушкевича.

§ 6. О рациональном профиле бортов карьеров

Методом предельного напряженного состояния могут быть рассчитаны нагруженные откосы трех профилей — вогнутые, плоские и выпуклые; методами предельного равновесия также могут быть рассчитаны откосы трех профилей, не имеющих вертикальных участков.

В условиях анизотропной среды разность в объемах вскрыши при бортах различного профиля получается еще больше, чем в однородных породах. Преимущество бортов выпуклого профиля

над вогнутыми и плоскими особенно очевидно при пологом или горизонтальном залегании поверхностей ослабления. В этом случае положение поверхности скольжения в массиве в меньшей степени зависит от профиля борта, а определяется в основном залеганием поверхностей ослабления.

Придавая борту выпуклый профиль, достигают увеличения веса призмы упора, при этом увеличивается общая устойчивость борта и создается возможность некоторого увеличения также и призмы активного давления (рис. 145), что и приводит к сокращению объема вскрыши при неизменном положении нижней точки борта.

Борта выпуклого профиля приняты в проектах Коркинского, Богословского, Коунрадского, Кальмакырского и других карьеров.

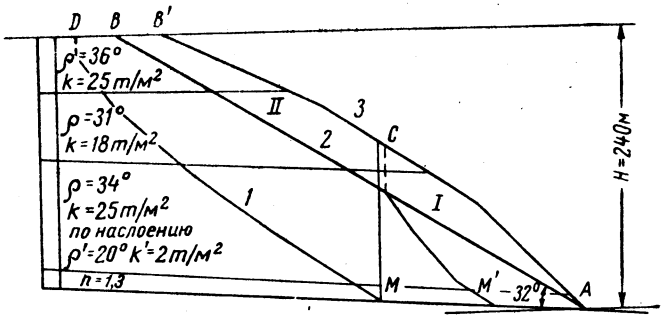


Рис. 145. Плоский и выпуклый борта при горизонтальной поверхности ослабления в их основании:

1 — поверхность скольжения; *2* — плоский откос; *3* — выпуклый откос; *I*, *II* — разность объемов призмы упора и призм активного давления в плоском и выпуклом откосах. Объем призмы *ABB'C* — 10 тыс. *м*³ на 1 *м* протяженности борта

Борту нельзя придать выпуклый профиль только в тех случаях, когда в основании залегают мощные слои более слабых пород, чем в верхней части борта.

Так как в большинстве случаев прочность пород возрастает с увеличением глубины, коэффициент запаса устойчивости нижней более крутой части борта получается значительно больше, чем коэффициент запаса борта в целом (при одинаковой прочности пород по всей высоте борта Д. Ф. Борисов рекомендует для нижней части выпуклого борта принимать коэффициент запаса на 10—15% больше коэффициента запаса устойчивости всего борта).

У бортов, сложенных однородными породами, при различном профиле с одинаковым коэффициентом запаса устойчивости общий угол наклона борта (определяемый по наклону линии, соединяющей верхнюю и нижнюю бровки борта) получается примерно одинаковым. Если сравнивать средние углы наклона, эквивалентные по объему вскрыши плоскому борту, то у бортов выпуклого

профиля средний угол наклона получается на 4—6° круче, чем у бортов плоского профиля, и на 8—10° круче, чем у бортов вогнутого профиля, поэтому при применении бортов выпуклого профиля получается большое сокращение объема вскрыши.

Глава XIX

СХЕМЫ РАСЧЕТА УСТОЙЧИВОСТИ БОРТОВ КАРЬЕРОВ В РАЗЛИЧНЫХ ГЕОЛОГИЧЕСКИХ УСЛОВИЯХ

§ 1. Общие замечания к схемам расчета

Как отмечалось в главе XVIII, точность расчета устойчивости откосов зависит от расположения в откосе расчетных поверхностей скольжения; важно, чтобы эти поверхности действительно являлись наиболее слабыми. Форма поверхностей скольжения и их расположение в откосе зависят от геологического строения откоса и его профиля.

Вторым вопросом, определяющим точность расчетов, является метод сложения сдвигающих и удерживающих сил, действующих по наиболее слабой поверхности. Допустимость применения того или иного метода сложения сил зависит от формы расчетной поверхности скольжения.

В связи с многообразием геологических условий многообразны и формы расчетных поверхностей скольжения.

Ниже (стр. 309—312) представлены наиболее типичные формы поверхностей скольжения и соответствующие им методы сложения сил. Форма поверхности скольжения и метод сложения сил определяют схему расчета устойчивости откоса.

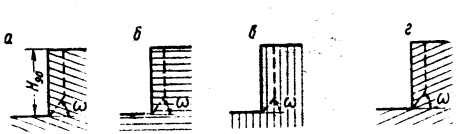
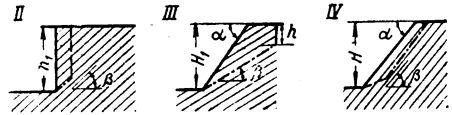
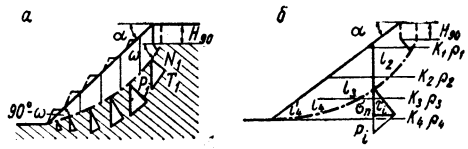
В последующих параграфах этой главы излагаются пояснения к рекомендуемым схемам расчета.

§ 2. Предельная высота вертикального откоса

Схема I. Вертикальные откосы на карьерах встречаются редко, однако предельная высота вертикального откоса используется как вспомогательная величина в других схемах расчета; предельная высота такого откоса используется также при моделировании откосов.

При рассмотрении устойчивости вертикальных обнажений горных пород большинство авторов исходит из условия равновесия по плоской или круглоцилиндрической поверхности, проходящей от основания вертикального обнажения до земной поверхности, считая породы, ограниченные этими поверхностями, как целый монолит (рис. 146—147), в действительности же, как установлено при моделировании и при наблюдениях за деформацией откосов однородных пород, вследствие того, что сопротивление отрыву

Схемы расчета устойчивости бортов карьеров

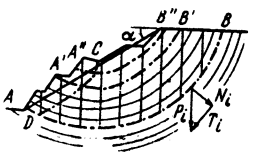
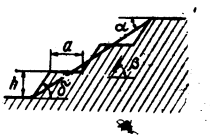
№ схем расчета	Расчетные схемы в различных условиях залегания пород	В каких условиях применяется схема	Формулы и графики
I		При определении высоты вертикального откоса и трещины отрыва при благоприятном залегании поверхностей ослабления; в случае $\beta < \rho'$	$H_{90} = \frac{2K_n}{\gamma} \operatorname{tg} \omega_n$
II III IV		При определении высоты уступов и бортов при неблагоприятном залегании поверхностей ослабления $\beta > \rho'$	$h_1 = \frac{K'_n \cos \rho'_n}{\gamma \cos \beta \sin (\beta - \rho'_n)}$; $h_1 < H_{90}$; $H_1 = h_1 \frac{1}{1 - \sqrt{\operatorname{ctg} \alpha \operatorname{tg} \beta}}$; $\operatorname{ctg} \alpha = \operatorname{ctg} \beta \left(1 - \frac{h_1}{H_1}\right)^2$; $H = H_{90} \frac{1}{1 - \operatorname{ctg} \alpha \operatorname{tg} \psi'_n}$; $\operatorname{ctg} \alpha = \operatorname{ctg} \psi'_n \left(1 - \frac{H_{90}}{H}\right)$
V		а. Плоский борт при отсутствии неблагоприятно ориентированных поверхностей ослабления б. Горизонтальное залегание слоев при отсутствии ослабленных контактов: $K_n = \frac{\Sigma K_{nl} l_l}{\Sigma l_l}$; $\operatorname{tg} \rho_n = \frac{\Sigma l_l \sigma_{nl} \operatorname{tg} \rho_{nl}}{\Sigma l_l \sigma_{nl}}$	Алгебраическое суммирование сил по круглоцилиндрической поверхности скольжения; условие устойчивости $K_n L \frac{+\operatorname{tg}}{\Sigma T_l} \rho_n \Sigma N_l = 1$. Углы откосов определяются по графику (рис. 153)

Продолжение

№ схем расчета	Расчетные схемы в различных условиях залегания пород	В каких условиях применяется схема	Формулы и графики
VI	а б	а. Борт выпуклого профиля при отсутствии неблагоприятных поверхностей ослабления и пластичных слоев в основании б. Многоярусные отвалы рыхлых пород на устойчивом основании	Расчет на предельное равновесие по круглоцилиндрическим или плавным криволинейным поверхностям, пересекающимся в нижней точке откоса; используется так же метод предельного напряженного состояния
VII	а б	а. Борт сложен обводненными рыхлыми породами $K < \frac{1}{2} H\gamma\,(1 - \operatorname{tg}\rho_n) \times$ $\times \left(1 - \operatorname{tg}\frac{\rho_n}{2}\right)$. б. В основании борта или отвала залегает слой пластичных глин $K_{осн} < 0{,}4H$	Алгебраическое суммирование сил по плавной криволинейной поверхности Условие устойчивости $\frac{\Sigma\tau_{уд}}{\Sigma\tau_{сдв}} > 1$, $\tau_{уд} = f\,\lvert\sigma_n\rvert$ — по графику сопротивления сдвигу; $\sigma_n = h_l\,\gamma\cos^2\varphi_l - D$; $\tau_{сдв} = \frac{1}{2} h_l\gamma\sin 2\varphi_l$
VIII	а б	а. В борту имеется ряд неблагоприятно ориентированных поверхностей ослабления. б. Отвалы на слоистом основании	Метод многоугольника сил $l_m = \frac{E_{m-1}\sin\theta\left(\operatorname{ctg}\theta - \operatorname{tg}\rho_n'\right)}{K_n' + \frac{1}{2} h\gamma\cos^2\varphi_m \times \left(\operatorname{tg}\rho_n' - \operatorname{tg}\varphi_m\right)}$; $\theta = \varphi_{m-1} - \varphi_m$

№ схем расчета	Расчетные схемы в различных условиях залегания пород	В каких условиях применяется схема	Формулы и графики
IX	а б	Борт висячего бока при горизонтальном или пологом согласном залегании слоев при условии: $\alpha > \rho'$; $\beta < \rho'$; $H > H_1$; а) $\beta < 10°$, б) $\beta > 10°$	а. Алгебраическое суммирование сил на участке призмы активного давления $E = \Sigma T - \operatorname{tg}\rho\Sigma N - K_n L_2$; $L_1 = \dfrac{E\sin\theta\left(\operatorname{ctg}\theta - \operatorname{tg}\rho_n'\right)}{K_n' + \frac{1}{2}h_1\gamma\cos^2\beta \times \left(\operatorname{tg}\rho_n' - \operatorname{tg}\beta\right)}$. б. Метод многоугольника сил
X	$n_{min} > 1$	Борт лежачего бока при условии: $\rho < \alpha < \beta < 80°$	Алгебраическое суммирование сил на участке призмы упора $E = \operatorname{tg}\rho_п\Sigma N_i + K_п L_1 - \Sigma T_i$; $P_2 = \dfrac{E\sin\theta\left(\operatorname{ctg}\theta + \operatorname{tg}\rho_п'\right) + K_п' L_2}{\cos\beta\left(\operatorname{tg}\beta - \operatorname{tg}\rho_п'\right)}$. Углы α могут быть определены по графику с поправкой по таблице П. Д. Козленко

Продолжение

№ схем расчета	Расчетные схемы в различных условиях залегания пород	В каких условиях применяется схема	Формулы и графики
XI		При мульдообразном залегании слоев пород $\alpha > \rho_п'$	Условие устойчивости $\Sigma T_i < K_n L + \operatorname{tg} \rho_n' \Sigma N_i$. Сохраняется по всем поверхностям: ADB; $A'B'$; $A''B''$ и ADC
XII		В породах весьма крепких слаботрещиноватых или при небольшой высоте бортов и средней прочности пород; $\delta = \beta$ при $\beta > 30°$; при $\beta < 20°$ $\delta = 65°$	$\alpha = \operatorname{arctg} \dfrac{\Sigma h_i}{\Sigma a_i + \Sigma h_i \operatorname{ctg} \delta_i}$; $\alpha = \beta$ при $20° < \beta < 30°$

H, α — высота и угол наклона борта; h, δ — высота и угол откоса уступа; H_{90} — предельная высота вертикального откоса; β — угол падения слоев и поверхностей ослабления; $\omega = 45° + \frac{1}{2} \rho_n^0$ — угол наклона расчетной поверхности скольжения в верхней части; φ_i — угол наклона поверхности скольжения в любой точке; K_n, ρ_n — расчетные величины сцепления и угла внутреннего трения пород; K_n', ρ_n' — то же, по поверхности ослабления; γ — объемный вес пород; L — площадь поверхности скольжения; D_i — гидростатическое давление; P — вес элементарных блоков.

у горных пород меньше, чем сопротивление сдвигу, в верхней части возникает поверхность отрыва по линии MN.

Глубина трещины отрыва $H_{отр}$ определяется величиной минимального напряжения σ_0, при котором возникают площадки скольжения, определяемого по формуле (138), и величиной объемного веса пород γ

$$H_{отр} = H_{90} = \frac{2K}{\gamma} \operatorname{tg} \omega. \qquad (141)$$

Для определения предельной высоты вертикального откоса пород, обладающих сопротивлением отрыву $\sigma_р$, рассмотрим условие

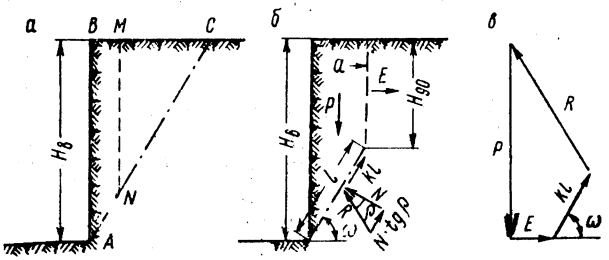


Рис. 146—147. Схемы к расчету предельной высоты вертикального обнажения горных пород

предельного равновесия блока $ABMN$; на него действуют следующие силы:

P — сила веса блока;

E — сопротивление отрыву по линии MN;

Kl — сила сцепления по поверхности скольжения AN;

R — реакция со стороны наклонного основания блока, равная равнодействующей силы трения и нормальной составляющей;

$$P = \frac{1}{2}(H_в + H_{90})\gamma l \cos \omega; \quad E = H_{90}\sigma_р. \qquad (142)$$

На рис. 147 изображен многоугольник этих сил; если многоугольник замкнут, условие предельного равновесия будет выполнено.

Составляя суммы вертикальных и горизонтальных проекций этих сил и решая полученные уравнения относительно $H_в$, получим формулу

$$H_в = \frac{2K}{\gamma} \operatorname{tg} \omega \left(1 + \sqrt{\frac{\sigma_р}{K} \operatorname{tg} \omega}\right) \qquad (143)$$

или

$$H_в = H_{90}\left(1 + \sqrt{\frac{\sigma_р}{K} \operatorname{tg} \omega}\right).$$

В естественных условиях бо́льшая часть горных пород в массиве вследствие трещиноватости и отдельности имеет очень

небольшую величину сопротивления отрыву, которым в расчетах можно пренебречь. В этом случае высота вертикального откоса будет равна по величине

$$H_в = H_{90} = \frac{2K}{\gamma} \operatorname{tg}\left(45^\circ + \frac{\rho}{2}\right)^* . \qquad (144)$$

Предельную или допустимую (с коэффициентом запаса) высоту вертикального обнажения горных пород можно определить по формуле (143) при условии, если слои пород падают в сторону массива, вертикальны, горизонтальны или падают в сторону выемки под углом, меньшим, чем угол внутреннего трения по контактам слоев ρ'. Если массив пород имеет развитую систему делимости или трещиноватости, падающую в сторону выработки, то механические характеристики должны быть определены с учетом этих структурных элементов.

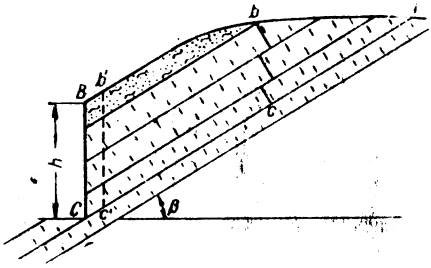


Рис. 148. Схема к расчету предельной высоты подрезки слоев

Если уступ сложен слоями пород, имеющими различную прочность, высота вертикального обнажения определяется по наиболее слабому из них, залегающему на данной высоте.

Схема II. При определении устойчивости обнажений горных пород, подобных изображенному на рис. 148, массив в области *ABC* обычно рассматривается как единое связное целое, тогда как в действительности слои пород не являются связными монолитами, а разбиты целой серией трещин.

Так как мощность подрезанных слоев по всей наклонной высоте наиболее слабого контакта неодинакова, то и напряжения, действующие по этому контакту, будут бо́льшими внизу и меньшими вверху. Вследствие этого при образовании площадок скольжения в нижней части контакта в его верхней части они могут и не образоваться.

При появлении площадок скольжения в нижней части наиболее слабого контакта нижняя часть массива стремится сползти вниз и оторваться от верхней части, где площадок скольжения нет. Так как по наклонно залегающему контакту *CA* действуют силы трения, отрыв легче всего произойдет по системе трещин, образующих ломаную поверхность *cb*, близкую к вертикальной. Действительно, когда в основании уступа возникают площадки скольжения, то по мере развития трещиноватости обрушение уступа происходит небольшими вертикальными лентами, а следовательно, предельной высотой уступа следует считать такую вы-

* Значения входящих в формулы букв приведены в подписи к рис. 146.

соту, при которой в основании уступа появляются площадки скольжения.

Из рис. 148 следует, что вес столба породы, приходящегося на единицу площади в плоскости AC, составляет

$$p = h_1 \gamma \cos \beta. \qquad (145)$$

Предельному равновесию на этой площадке соответствует равенство сил, сдвигающих (касательной составляющей от веса столба) и препятствующих сдвижению (сил трения и сцепления):

$$h_1 \gamma \cos \beta \cdot \sin \beta = h_1 \gamma \cos^2 \beta \cdot \operatorname{tg}' + K', \qquad (146)$$

откуда

$$h_1 = \frac{K'}{\gamma} \cdot \frac{\cos \rho'}{\cos \beta \cdot \sin (\beta - \rho')}. \qquad (147)$$

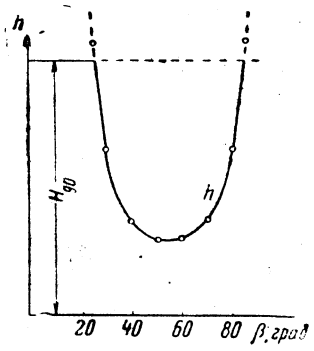


Рис. 149. График изменения предельной высоты уступа подрезанных слоев в зависимости от их угла падения

Если высота подрезки слоев превышает величину H_{90} (случай, возможный при β, близком к ρ'), то она и будет предельной высотой вертикального откоса.

Минимальная высота вертикального откоса получается при падении слоев под углом $\beta = 45° + \frac{\rho'}{2}$. При уменьшении или увеличении угла падения слоев величина h_1 настолько возрастает, что при некоторых значениях начинает превышать величину H_{90}. Это указывает на то, что при таком падении слоев поверхности ослабления по контактам слоев не влияют на устойчивость вертикального обнажения горных пород, и предельную высоту вертикального обнажения горных пород необходимо определять по формуле (144).

Проследим изменение предельной высоты вертикального откоса породы, имеющей $\gamma = 2$ $т/м^3$; механические характеристики по контактам слоев $K' = 2$ $Т/м^2$, $\rho' = 20°$; механические характеристики пород под углом к наслоению $K = 6$ $Т/м^2$, $\rho = 30°$.

На рис. 149 изображен график изменения предельной высоты вертикального откоса h_1 в зависимости от угла падения слоев β. Минимальная высота в 2,9 $м$ получилась при падении слоев под углом 55°. При падении слоев положе 25° и круче 85° $h_1 > H_{90}$.

При падении слоев положе 25° по контактам слоев не будет происходить скольжения, так как в этом случае наиболее слабая площадка будет располагаться под углом $\left(45° + \frac{\rho}{2}\right)$ к горизонту, пересекая контакты слоев. При падении слоев круче 85° мощность подрезанного слоя становится незначительной, вследствие чего по контактам слоев в этом случае также не будет происходить скольжения пород.

§ 3. Условия устойчивости откосов, сложенных слоями пород, падающими в сторону выемки

Схема III. При открытых разработках поверхность бортов карьеров состоит из ряда уступов, нередко имеющих подрезанные контакты слоев, падающих в сторону выработки, а форма уступов имеет вид, изображенный на рис. 150. Поверхность, ограничивающая уступ со стороны выемки, наклонена под углом α.

Устойчивость уступа такой формы отличается от рассмотренного выше случая тем, что непосредственно в основании уступа не создается площадок скольжения, так как они возникают лишь при высоте подрезки, достигающей величины h_1, определяемой по формуле (147). Призма COK, в основании которой нет площадок скольжения, будет противодействовать сползанию вышележащего участка $OKNM$, границами которого справа и слева является предельная высота h_1. Вся призма $CBMN$ будет в предельном равновесии, когда площадь ее сечения будет равновелика площади параллелограмма $CDMN$, т. е. когда $S_{\Delta CDO} = S_{\Delta OBM}$.

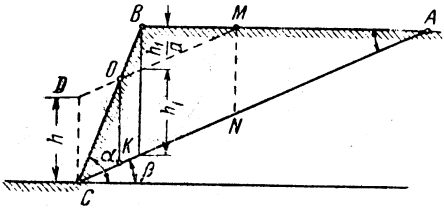


Рис. 150. Схема к расчету предельной высоты заоткошенного уступа, сложенного слоями пород, падающими в сторону выемки

В этом случае предельную высоту подрезки слоев можно увеличить на величину $\frac{h_1}{a}$ по сравнению с величиной, определяемой по формуле (147), где $a = \sqrt{\operatorname{tg}\alpha \cdot \operatorname{ctg}\beta}$.

Приводя все выражение к высоте уступа, получим

$$H = \frac{K' \cos\rho'}{\gamma \cos\beta \cdot \sin(\beta - \rho')\left(1 - \sqrt{\operatorname{ctg}\alpha \cdot \operatorname{tg}\beta}\right)}. \qquad (148)$$

Формула (148) применима в тех же пределах углов падения слоев, как и формула (147). При крутом падении слоев высота откоса определяется по графику, изображенному на рис. 153, а при пологом залегании слоев, когда h_1 получается больше H_{90}, расчет высоты откоса производится согласно расчетной схеме, приводимой ниже (схема IX).

Если высота откоса известна и требуется определить его угол, то формулу (148) нетрудно решить относительно α

$$\operatorname{ctg}\alpha = \operatorname{ctg}\beta\left(1 - \frac{h_1}{H}\right)^2. \qquad (149)$$

Схема IV. Если падающие в сторону выемки под углом $\beta > \rho'$ слои пород не подрезаются горной выработкой, то условие предельного равновесия имеет простое аналитическое выражение. Предельное равновесие наступает при определенном соотношении вертикальной высоты откоса и механических характеристик по-

род по контактам слоев и под углом к наслоению. Условие предельного равновесия становится простым в том случае, если сцепление и угол внутреннего трения заменить одним показателем — углом сдвига

$$\operatorname{tg}\varphi' = \operatorname{tg}\rho' + \frac{K'}{\sigma_{ср}}, \qquad (150)$$

где $\sigma_{ср}$ равно средней интенсивности нормального напряжения по наиболее слабому контакту.

Предельная высота откоса определяется из следующих соображений.

Призма $ABCD$ (рис. 151) будет находиться в равновесии под действием сил трения по поверхности AB и сил трения и сцепления по поверхности AD, наклоненной к поверхности откоса (к наслоению) под углом $\left(45° - \frac{\rho}{2}\right)$.

Вес призмы $ABCD$ с достаточной точностью можно считать равным

$$P = aH\gamma. \qquad (151)$$

Разность A касательной составляющей и силы трения по плоскости AB равна

$$A = aH\gamma \times (\sin\alpha - \cos\alpha \cdot \operatorname{tg}\psi'). \qquad (152)$$

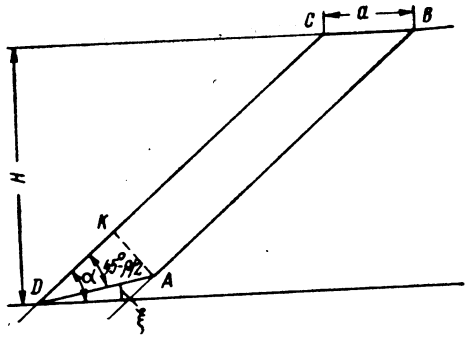


Рис. 151. Схема к расчету предельной высоты откоса слоистых пород, заоткошенного по наслоению

Призма $ABCD$ давит на свое основание по направлению падения слоев с силой A.

Предельному равновесию, согласно формуле (138), соответствует соотношение

$$aH\gamma(\sin\alpha - \cos\alpha \cdot \operatorname{tg}\psi') = a\sin\alpha \cdot 2K\operatorname{ctg}\left(45° - \frac{\rho}{2}\right), \qquad (153)$$

где $a\sin\alpha$ — площадь нормального сечения призмы $ABCD$;

$2K \cdot \operatorname{ctg}\left(45° - \frac{\rho}{2}\right)$ — временное сопротивление сжатию пород основания призмы.

Решая относительно высоты откоса H, получим

$$H = \frac{2K}{\gamma}\operatorname{ctg}\left(45° - \frac{\rho}{2}\right)\left(\frac{1}{1 - \operatorname{ctg}\alpha \cdot \operatorname{tg}\psi'}\right), \qquad (154)$$

или

$$H = H_{90}\left(\frac{1}{1 - \operatorname{ctg}\alpha \cdot \operatorname{tg}\psi'}\right). \qquad (155)$$

Для случаев, когда высота откоса известна и требуется определить угол падения слоев, при котором допустима заоткоска

по наслоению, формулу (155) можно привести к такому виду

$$\operatorname{ctg}\alpha = \operatorname{ctg}\psi'\left(1 - \frac{H_{90}}{H}\right). \qquad (156)$$

Если в массиве горных пород имеются пологие поверхности ослабления, пересекающие слоистость пород под углом, близким углу $\left(45° - \frac{\rho}{2}\right)$, то в этом случае расчетные характеристики K и ρ определяются по этим поверхностям.

§ 4. Расчет устойчивости бортов при отсутствии поверхностей ослабления

Схема V. В тех случаях, когда в массиве горных пород нет поверхностей ослабления, падающих в сторону выемки, или горизонтальных, применяется схема расчета, характеризующаяся тем, что в этом случае поверхность скольжения можно принимать круглоцилиндрической; порядок построения поверхности скольжения поясняется рис. 140.

Пользуясь изложенным способом построения поверхности скольжения, произведен ряд определений предельной высоты откоса при заданных величинах угла и физико-механических характеристик. Эти определения выполнялись в следующем порядке:

1) при заданных значениях γ, K, ρ и α задавались высотой откоса и через его основание указанным выше способом строили расчетную поверхность;

2) участок откоса, ограниченный этой поверхностью, вертикальными линиями, как показано на рис. 17, разбивался на ряд полос равной ширины (a метров);

3) высоты полос условно принимались за их вес и раскладывались на касательные T_i и нормальные N_i составляющие;

4) суммировались в миллиметрах отдельно все отрезки T_i и N_i и суммы умножались на множитель C, являющийся масштабом векторов T_i и N_i, равный

$$C = \frac{a\gamma M}{1000},$$

где M — знаменатель масштаба, в котором построен чертеж (множитель C численно равен весу столба породы высотой 1 *мм* на графике);

5) измерялась длина расчетной поверхности L;

6) производилось сравнение сил, удерживающих откос и сдвигающих его:

$$n = \frac{C\operatorname{tg}\rho \sum N_i + KL}{C \sum T_i};$$

7) если n получалось не равным единице, то бралась новая бо́льшая или меньшая высота откоса в зависимости от того,

больше или меньше единицы получалось n, и производился новый расчет; при этом при построении новой расчетной поверхности использовали уже построенную линию EF, являющуюся геометрическим местом точек пересечения касательных к расчетным кривым;

8) если при двух построениях получены значения n, близкие к единице, то их достаточно для определения предельной высоты откоса; для этой цели к точкам, являющимся основаниями откоса в двух расчетах, восстанавливаются перпендикуляры к линии откоса и откладываются в одинаковых единицах отрезки, превышающие единицу (в одну сторону) или недостающие до единицы (в другую сторону), соединяются их концы отрезком, который проводится до пересечения с линией откоса. Точка пересечения h будет ограничивать предельную высоту откоса (рис. 152).

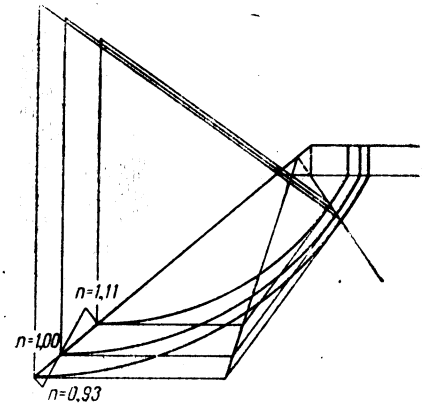


Рис. 152. Определение предельной высоты плоского откоса по двум расчетам

Если при двух построениях расчетной поверхности величины в обоих случаях отличаются от единицы более чем на 0,10, то необходимо проверить соотношение сил и по третьей поверхности.

Если в основании откосов залегают жирные глины с углом внутреннего трения менее 13°, то в этом случае при $\alpha < 45° - \frac{\rho_n}{2}$ поверхность скольжения выходит в подошву откоса (см. рис. 142).

По результатам большого количества решений построен график (рис. 153), выражающий зависимость между высотой откоса и его углом при любых заданных величинах физико-механических характеристик.

На этом графике по оси абсцисс отложены углы откоса, а по оси ординат — высота откоса.

Масштаб графика определяется из соотношений

$$\frac{H_0}{H_{90}} = \frac{1}{M},$$

где H_0 берется с графика, а H_{90} вычисляют по формуле (144).

Графиком пользуются в следующем порядке:

1) определяют величину H_{90};

2) если задан угол откоса и необходимо определить высоту, то на оси абсцисс берут заданный угол и по ординате, соответствующей этому углу, проводят линию до кривой, соответствующей заданному углу внутреннего трения ρ_n; на оси ординат

определяют условную высоту откоса H'; величину H' умножают на величину H_{90} и таким путем получают определяемую высоту откоса;

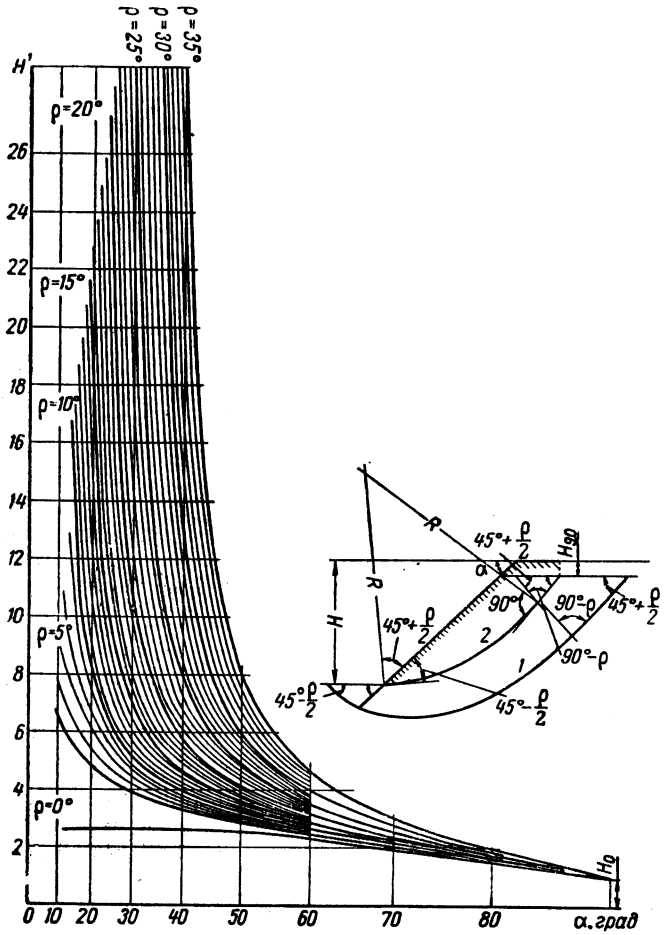


Рис. 153. График зависимости между высотой плоского откоса и его углом для различных значений расчетных характеристик

3) если задана высота откоса и необходимо определить его угол, то вначале определяют условную высоту как отношение

$$H' = \frac{H}{H_{90}},$$

по которой при заданном ρ_n на оси абсцисс находят угол откоса.

Графиком, изображенным на рис. 155, можно пользоваться в следующих случаях:

1) при вертикальном падении слоев;

2) при крутом падении слоев в сторону откоса (не положе 80°);

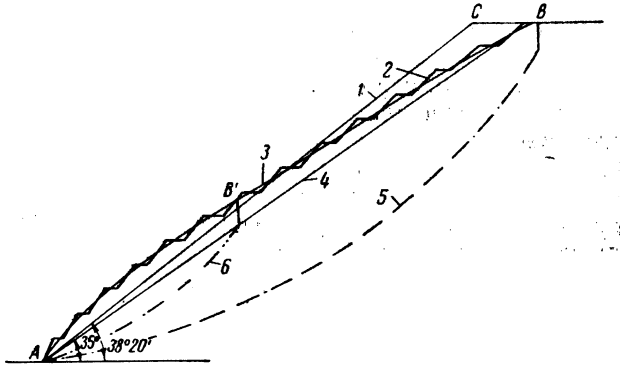


Рис. 154. Схема к расчету борта выпуклого профиля:

1 — линия, характеризующая средний наклон борта выпуклого профиля; *2* — профиль борта; *3* — сглаженный (расчетный) профиль выпуклого борта; *4* — линия, характеризующая общий угол наклона борта; *5* — наиболее слабая расчетная поверхность; *6* — наиболее слабая расчетная поверхность нижней части борта

3) при падении слоев в сторону массива (при этом угол между плоскостью наслоения и поверхностью откоса должен быть не меньше 65°);

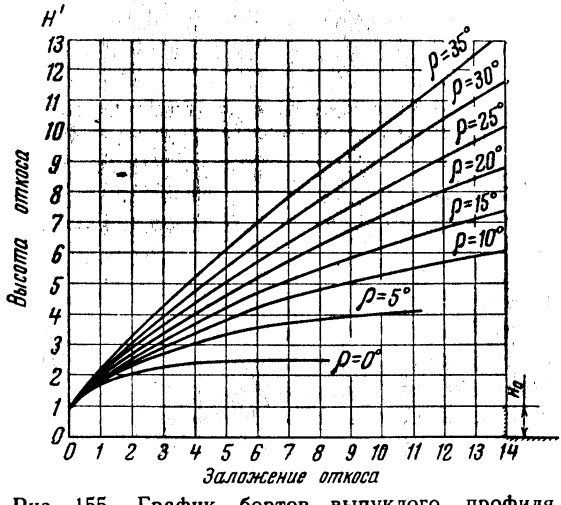


Рис. 155. График бортов выпуклого профиля для однородных пород

4) при горизонтальном залегании слоев и крутом угле откоса (не менее 65°).

Такое же ограничение распространяется на дизъюнктивные нарушения и плоскости большого развития трещиноватости.

При сложении откосов чередующимися слоями пород с различными механическими характеристиками их скольжение при условии предельного равновесия может происходить лишь по монотонной кривой, не имеющей выступов и впадин, изменяющей равномерно свое направление и пересекающей поочередно все слои. Последнее дает возможность пользоваться средними показателями механических характеристик по расчетной поверхности.

Та же зависимость, что и на графике рис. 153, приводится в табличной форме (табл. 28).

Таблица 28

Зависимость между высотой плоского борта и его углом

Условная высота откоса H'	Угол внутреннего трения ρ, *град*							
	0	5	10	15	20	25	30	35
	Угол наклона борта α, *град*							
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	53,9	58,5
5,5		14,7	27,8	35,0	41,4	47,0	51,7	56,6
6,0		12,0	25,8	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	39,3	45,2	50,2
9,0			18,4	25,6	31,7	38,0	43,9	48,6
10,0			17,1	24,2	30,3	36,7	42,6	47,4
11,0			16,4	23,4	29,7	36,7	41,6	46,4
12,0			15,8	22,7	29,0	36,0	40,7	45,6
14,0			14,6	21,4	27,9	34,0	39,2	44,3
16,0			14,2	20,8	26,8	33,0	38,3	43,0
18,0				19,8	26,2	32,3	37,7	42,7
20,0				19,2	25,5	31,7	37,1	42,1
24,0					24,7	30,3	36,5	40,9
28,0						29,7	35,7	40,3

Пример расчета угла наклона борта при заданной его высоте $H = 300$ *м*; $\rho_n = 26°$; $K_n = 40$ *Т/м²*; $\gamma = 2{,}5$ *Т/м³*;

1) вычисляем допустимую высоту вертикального откоса пород по заданным характеристикам

$$H_{90}=\frac{2\times 40}{2{,}5}\operatorname{ctg}(45^\circ-13^\circ)=51{,}2\ м;$$

2) вычисляем условную высоту борта как отношение

$$H'=\frac{H}{H_{90}}=\frac{300}{51{,}2}=5{,}9;$$

3) по графику рис. 153 при $\rho_n=26^\circ$ и $H'=5{,}9$ определяем угол откоса, который в этом случае составляет 46°30′.

Схема VI. В таких же геологических условиях может быть рассчитан и построен борт выпуклого профиля.

В однородных породах борт выпуклого профиля, как было изложено в § 3 гл. XVII, может быть рассчитан методом предельного напряженного состояния.

В слоистой толще неоднородных пород расчет откосов методом предельного напряженного состояния большей частью оказывается невозможным или очень сложным.

В этих условиях расчет борта выпуклого профиля производится следующим образом.

Вначале по формулам (132) определяют по ориентировочно проведенным криволинейным поверхностям скольжения значения средневзвешенных характеристик сопротивления сдвигу и по графику для плоских откосов (рис. 153) определяют общий угол наклона борта. После этого в нижней части откоса, примерно на $^1/_3$ его высоты, угол увеличивается до максимально допустимого для пород, залегающих в нижней части откоса; этот угол также может быть определен по графику для плоских откосов. Затем точка B' соединяется плавной кривой с точкой B (рис. 154); следующим этапом являются поверочные расчеты устойчивости по ряду поверхностей скольжения, из которых обязательными являются поверхности, контролирующие устойчивость нижней части откоса и отсутствие выпирания основания откоса, если общий угол наклона откоса менее $22^\circ+\frac{\rho_n}{2}$.

Поверочные расчеты начинают с поверхности, контролирующей устойчивость нижней части откоса с заданным коэффициентом запаса, а затем последовательно по всем другим поверхностям. Если по какой-либо из поверхностей коэффициент устойчивости получается меньше или больше заданного, откос в этой точке соответственно понижается или повышается.

Поверочные расчеты производят методом алгебраического сложения сил по расчетной поверхности скольжения; по поверхности, контролирующей устойчивость на выпирание основания в нижней части, применяется метод многоугольника сил.

Для ориентировочного построения борта выпуклого профиля можно воспользоваться графиком, изображенным на рис. 155,

рассчитанным для однородных изотропных пород методом алгебраического сложения сил, а на участке выпирания основания — методом многоугольника сил. В табл. 29 та же зависимость выражена численно по результатам расчета по формулам (108), выполненного на электронно-счетной машине «Урал-1» В. Т. Сапожниковым.

Таблица 29

Зависимость между высотой и заложением выпуклого борта

Условная высота откоса H'	Углы внутреннего трения ρ, *град*						
	$\rho=5$	$\rho=10$	$\rho=15$	$\rho=20$	$\rho=25$	$\rho=30$	$\rho=35$
	Заложение откоса l' при $H_{00}=1$						
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		23,30	17,20	13,30	10,80	9,15	7,70
10,0			20,05	15,40	12,45	10,55	8,90
11,0			23,00	17,55	14,20	11,90	10,05
12,0			25,90	19,80	15,95	13,25	11,25
13,0				22,10	17,70	14,65	12,45
14,0				24,30	19,50	16,10	13,65
15,0				26,60	21,35	17,50	14,65
16,0					23,20	18,95	16,05
17,0					25,00	20,40	17,25
18,0						21,85	18,46
19,0						23,35	19,65
20,0						24,80	20,85

Для многослойной толщи вначале определяют средневзвешенные характеристики $K_{ср}$ и $\rho_{ср}$ по ориентировочно проведенной в массиве поверхности скольжения, в которые затем вводится заданный коэффициент запаса.

Пользование графиком, изображенным на рис. 155, и таблицей такое же, как и для случая плоского откоса, только на графике для выпуклого откоса по оси абсцисс отложены заложения откоса, а не углы.

Схема VII[6] применяется для расчета устойчивости откосов, в основании которых залегают более слабые породы, чем вышележащие, и для расчета устойчивости отвалов на слабом основании. В этом случае используется общее сопротивление сдвигу, без раз-

ления на силы трения и сцепления, и проводится ряд плавных поверхностей скольжения, по которым затем производится алгебраическое сложение сил — графически или в табличной форме.

Поверхность скольжения в верхней части наклонена под углом $\left(45° + \frac{\rho_n}{2}\right)$, а в нижней части выходит в подошву откоса под углом $\left(45° - \frac{\rho_n}{2}\right)$ на некотором расстоянии от его нижней точки; это расстояние устанавливается также путем ряда расчетов, по которым выбирается такое положение нижнего участка поверхности скольжения, чтобы коэффициент запаса был наименьшим. Глубина погружения поверхности скольжения ниже подошвы откоса зависит от мощности слабого слоя, а обратный уклон поверхность скольжения имеет только на участке под подошвой откоса, как указано на схеме.

§ 5. Равновесие пород при других условиях залегания поверхностей ослабления

Рассмотренные в § 3 условия равновесия пород по наиболее слабым контактам, как отмечалось ранее, называются специальным предельным равновесием в отличие от обыкновенного предельного равновесия по поверхностям, не совпадающим с наслоением, тектоническими нарушениями и другими ослаблениями прочности горных пород.

Условия специального предельного равновесия не ограничиваются рассмотренными случаями, допускающими аналитическое их выражение. При большом многообразии форм залегания слоев пород и расположения элементов ослабления трудно для всех возможных случаев предложить формулы или графики для условий специального предельного равновесия.

Во многих случаях невозможно в настоящее время дать выражение равновесия в аналитическом виде. В таких условиях необходимо строить графики зависимости между высотой откоса и его углом для каждого отдельного случая залегания пород и структурных элементов. Во всех этих случаях частично или полностью используется метод многоугольника сил.

Схема VIII. Если в массиве борта имеется несколько неблагоприятно ориентированных поверхностей ослабления, расчет производится методом многоугольника сил. Границу между смежными блоками можно принимать вертикальной, если вблизи нет крутопадающих поверхностей ослабления, пересекающихся с поверхностью скольжения; в противном случае граница между блоками проходит по этим поверхностям. В последнем случае реакция между смежными блоками определяется с учетом сопротивления сдвигу по этим поверхностям.

По схеме VIII[а] отрезок поверхности скольжения, являющийся основанием последнего блока, может быть определен аналитически по формуле

$$l_m = \frac{E_{m-1} \sin\theta (\operatorname{ctg}\theta - \operatorname{tg}\rho_n')}{K_n' + \frac{1}{2} h\gamma \cos^2\varphi_m (\operatorname{tg}\rho_n' - \operatorname{tg}\varphi_m)}, \qquad (157)$$

где E_{m-1} — реакция смежного (предпоследнего) блока;

θ — разность углов наклона площадок скольжения, являющихся основаниями блоков;

h — высота грани, разделяющей блоки.

Схема IX. При горизонтальном залегании слоев пород или при падении слоев под пологими углами в сторону выемки или в сторону массива, когда угол между поверхностью откоса и наслоением составляет менее $(90° - \psi')$, где ψ' — угол сдвига по контактам слоев, определяемый по формуле (150), поверхность скольжения в нижней части откоса пойдет по наслоению, а в верхней части — по кривой, построенной обычным способом без учета наслоения пород.

При таком положении поверхности скольжения ограниченный ею массив отчетливо разделяется на два участка — нижний, называемый призмой упора, и верхний, называемый призмой активного давления (рис 156). Призма активного давления давит на призму упора с силой, направленной параллельно поверхности скольжения призмы активного давления. Касательная составляющая этой силы сдвигает призму упора, а нормальная составляющая прижимает призму упора к основанию и создает силы трения (дополнительно к силам трения от веса призмы упора).

По этой схеме определяется высота откоса при заданном угле, заданных характеристиках сопротивления сдвигу по контактам слоев и под углом к слоистости и при заданном угле наклона слоев. Расчет производится в следующем порядке:

а) определяют средневзвешенные значения характеристик прочности по отрезку поверхности скольжения, расположенному под углом к поверхностям ослабления, и в них вводится необходимый коэффициент запаса;

б) по установленным расчетным характеристикам без учета поверхностей ослабления определяют высоту борта (по графику рис. 153) при заданном угле и в этом откосе строится поверхность скольжения без учета поверхностей ослабления (как это показано на рис. 140);

в) в откосе проводится ряд параллельных поверхностей ослабления и путем расчетов по формуле

$$P_1 \cos\beta (\operatorname{tg}\rho_n' \mp \operatorname{tg}\beta) = E \sin\theta (\operatorname{ctg}\theta - \operatorname{tg}\rho_n') - K_n' L_1, \qquad (158)$$

где

$$E = \sum T_i - \operatorname{tg}\rho_n \sum N_i - K_n L;$$

устанавливается такое положение поверхности ослабления, при котором удовлетворяется условие предельного равновесия; высота борта в этом случае является определяемой величиной H_I.

Если необходимо определить угол наклона борта при заданной высоте, задаются двумя-тремя значениями углов α и по ним в изложенном порядке находят соответствующие им высоты откосов, по которым строят график зависимости между высотами и углами

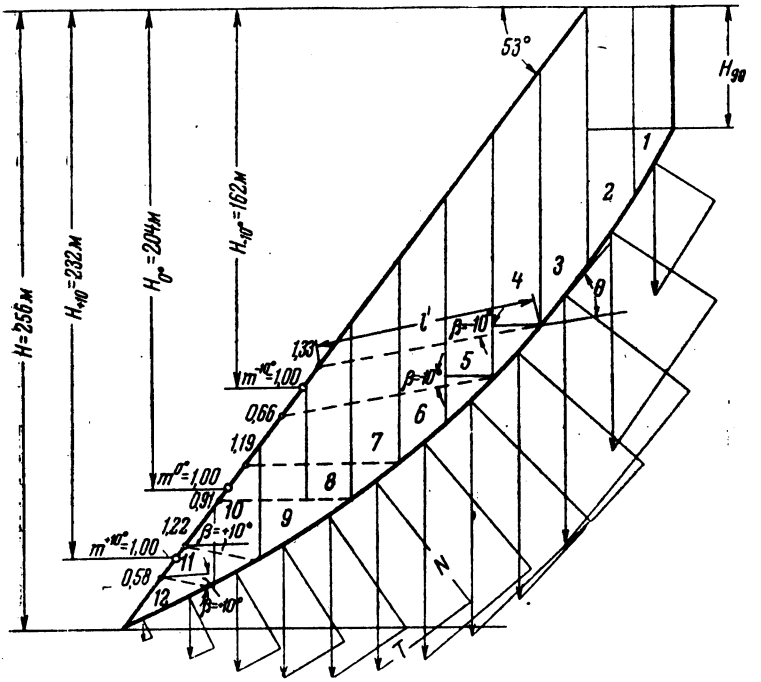


Рис. 156. Схема к расчету устойчивости борта при горизонтальном и пологом залегании слоев

наклона борта. По этому графику и определяют угол при заданной высоте борта.

Пример расчета по этой схеме представлен на рис. 156. Изложенный порядок расчета применяется при горизонтальном и пологом залегании поверхностей ослабления; в этом случае достаточная точность расчета получается при алгебраическом сложении сил в области призмы активного давления, а разность сдвигающих и удерживающих сил E рассматривается как давление на призму упора; в области призмы упора решение производится методом многоугольника сил.

При падении поверхностей ослабления под углом более 10° алгебраическое сложение сил дает недостаточную точность, и в этом случае в области призмы активного давления решение

также производится методом многоугольника сил, как показано на схеме IX[6]. При этом решении грани между смежными блоками располагаются под углом $90° - \rho_n$ к поверхности скольжения, а при определении реакций учитываются сцепление и трение по этим граням.

По большому числу подобных расчетов П. Д. Козленко [67] составлена табл. 30, с помощью которой легко определяется высота борта по заданному углу и по заданным характеристикам сопротивления сдвигу. Сначала по графику для плоских откосов (по характеристикам ρ_n и K_n) без учета поверхностей ослабления определяется высота борта H, которая умножается на поправочный коэффициент b для получения искомой высоты H_1.

Таблица 30

Значения вспомогательных коэффициентов b_0 и δ при пологом залегании слоев

Угол наклона борта α, *град*	Значения коэффициентов b_0 и δ при угле падения слоев, *град*													
	+30		+20		+10		±0		−10		−20		−30	
	b_0	δ	b_0	δ	b_0	δ	b_0	δ	b_0	δ	b_0	δ	b_0	δ
40	1,000	0,045	0,920	0,079	0,850	0,118	0,795	0,160	0,740	0,300	0,532	0,400	0,470	0,440
50			1,000	0,063	0,910	0,110	0,815	0,150	0,765	0,250	0,687	0,340	0,550	0,380
60					1,000	0,100	0,880	0,140	0,800	0,220	0,660	0,295	0,590	0,340
70							1,000	0,135	0,880	0,205	0,720	0,265	0,620	0,305
80									1,000	0,195	0,800	0,245	0,690	0,280

Для определения поправочного коэффициента b сначала определяется величина c, равная

$$c = \frac{\operatorname{tg} \rho_n}{\operatorname{tg} \psi'_n} - 1{,}28.$$

По найденной величине c находится коэффициент b по формуле

$$b = b_0 - c\delta.$$

Входящие в формулу коэффициенты b_0 и δ принимаются из табл. 30 по заданным значениям α и β; при необходимости допускается интерполяция.

В табл. 30 углы падения поверхностей ослабления считаются положительными в случае, если они падают в сторону массива, и отрицательными — при падении в сторону выемки.

При пологом залегании поверхностей ослабления особенно выгодно придавать борту выпуклый профиль, увеличивая вес призмы упора. Выпуклый профиль борта строится по графику рис. 155 после определения средневзвешенных характеристик прочности по поверхности скольжения, проходящей в нижней части по поверх-

ности ослабления. Порядок поверочных расчетов остается таким же, как и при плоском профиле борта, причем поверочные расчеты устойчивости производятся не только по поверхности скольжения AB, но и по поверхности AC.

Схема X применяется при крутопадающих в сторону выемки поверхностях ослабления. Расчетная поверхность скольжения в этом случае проходит в верхней части по этим поверхностям ослабления, а в нижней по круглоцилиндрической поверхности. Высота борта или его угол устанавливается путем ряда расчетов. Как и в схеме IX, по средневзвешенным значениям характеристик ρ_n и K_n по графику для плоского откоса определяют высоту борта при заданном угле наклона и в нем проводят круглоцилиндрическую поверхность скольжения как в однородном откосе. Затем производят алгебраическое сложение сил на участке призмы упора и определяют допустимую величину давления (реакцию) E на призму упора и по формуле

$$P_2 = \frac{E \sin \theta' (\operatorname{ctg} \theta' + \operatorname{tg} \rho_n') + K_n' L_2}{\cos \beta \left(\operatorname{tg} \beta - \operatorname{tg} \rho_n'\right)} \qquad (159)$$

определяют вес призмы активного давления, при котором достигается предельное состояние.

В этом случае расчет производится подобно предыдущему, с помощью вспомогательной табл. 31, но в формулу определения величины c вместо 1,28 подставляют 1,40, т. е.

$$c = \frac{\operatorname{tg} \rho_n}{\operatorname{tg} \psi_n'} - 1{,}40.$$

Далее, как и в предыдущем случае, находится коэффициент b по формуле $b = b_0 - c\delta$, причем коэффициенты b_0 и δ берутся из табл. 31 [67].

Таблица 31

Значения вспомогательных коэффициентов b_0 и δ при крутом залегании слоев

α, град	β, град									
	40		50		60		70		80	
	b_0	δ	b_0	δ	b_0	δ	b_0	δ	b_0	δ
35	0,365	0,0765	0,760	0,0610						
40			0,595	0,0260	0,835	0,0195	0,920	0,0130	0,960	0,0065
50					0,715	0,0210	0,880	0,0140	0,950	0,0070
60							0,740	0,0168	0,900	0,0084
70									0,795	0,0110

При крутом согласном залегании слоев пород также целесообразно придавать бортам выпуклый профиль.

Пример. Определить угол наклона борта при следующих условиях: $H=300$ *м*; $\gamma=2{,}5$ *т/м*^{3}; $\rho_n=26°$; $K_n=40$ *т/м*^{2}; $\psi=18°$; $\beta=60°$.

Прежде всего необходимо определить высоты откосов при $\beta=60°$ для двух или трех значений α_i, а затем путем интерполяции определить α при заданной высоте. Поскольку определяемая величина α заключена в пределах $\beta>\alpha>\rho_n$, определим высоты откосов для трех значений α_i, а именно: $\alpha_1=40°$, $\alpha_2=45°$ и $\alpha_3=50°$. По графику для плоских откосов получим:

	$\alpha_1=40°$	$\alpha_2=45°$	$\alpha_3=50°$
Условная высота H'	8,4	6,3	5,15
Действительная высота $H'\times H_{90}$, *м*	430	324	264
Величина c равна . . .	$\frac{\text{tg } 26°}{\text{tg } 18°}-1{,}4=\frac{0{,}488}{0{,}325}-1{,}4=1{,}5-1{,}4=0{,}1.$		

Теперь вычисляем поправочный коэффициент b и с его помощью высоту откоса для тех же трех значений α. Получим:

	$\alpha_1=40°$	$\alpha_2=45°$	$\alpha_3=50°$
Поправочный коэффициент b	0,833	0,773	0,713
Высота откоса $H_i=H'\cdot H_{90}b$, *м*	358	250	188

Построив по трем точкам кривую зависимости между α и H, нетрудно определить угол наклона для данной высоты; в нашем примере этот угол равен 42°. Для месторождений с переменными углами падения слоев пород целесообразно строить графики, подобные изображенному на рис. 157.

Схема XI применяется в случае залегания пород в форме синклинальных складок, одно крыло которых срезается горными выработками. Поверхность скольжения в этих случаях может проходить:

а) полностью по наиболее слабым контактам разнородных пород, смятых в складки;

б) частично по контактам разнородных пород и частично по другим поверхностям ослабления (тектоническим нарушениям, крупным трещинам и т. д.);

в) частично по массиву, не совпадая с поверхностями ослабления, если кривизна поверхности контактов слоев в нижней части откоса существенно возрастает.

Форма поверхностей скольжения имеет вид плавных кривых, их положение в массиве борта и конфигурация поверхности борта определяются методом подбора.

При такой форме залегания пород целесообразно придавать бортам выпуклый профиль. Устойчивость нижней, наиболее крутой части борта проверяется поверочными расчетами по схеме V или IX.

Схема XII применяется при тех же условиях залегания пород, как и схема X, отличаясь от нее тем, что предельный угол

борта карьера определяется не прочностными характеристиками пород (при их большой прочности или небольшой высоте борта), а технологическими факторами — высотой уступов h, углами их

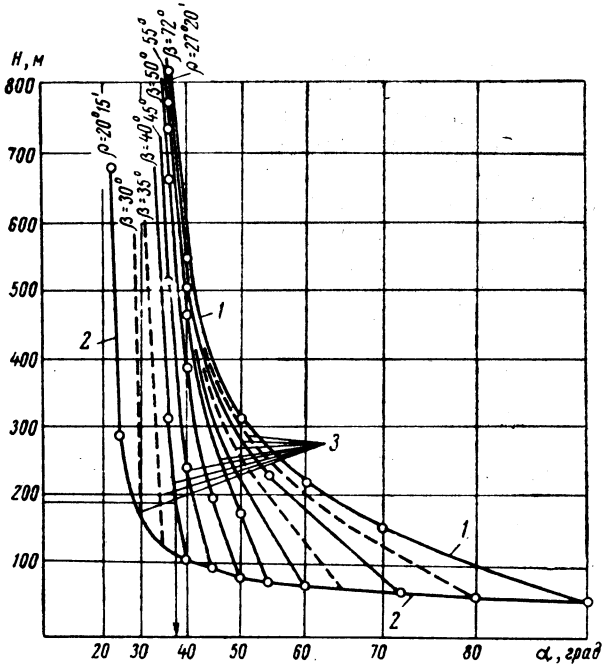


Рис. 157. График зависимости между высотами и углами наклона бортов для крутого падения слоев

откосов δ и шириной берм a. Угол наклона борта определяется по формуле проф. Б. П. Боголюбова

$$\alpha = \operatorname{arctg} \frac{\sum h_i}{\sum a_i + \sum h_i \operatorname{ctg} \delta_i}. \qquad (160)$$

По этой же формуле могут быть определены допустимые углы наклона бортов и при других условиях залегания пород, когда при расчете по прочностным характеристикам получаются углы более технически допустимых.

§ 6. Расчет устойчивости обводненных откосов

При расчете устойчивости обводненных откосов необходимо учитывать устойчивость фильтрующей части поверхности откоса и общую устойчивость откоса по наиболее слабой поверхности.

Устойчивость фильтрующей части свободной поверхности песчаных откосов характеризуется углами оплывания, описанными

в главе III. Для обеспечения устойчивости фильтрующих песчаных откосов под бо́льшими углами, чем углы оплывания, их необходимо пригружать гравием и щебнем. Расчет пригрузки в зависимости от угла откоса изложен в главе XV. В этой же главе изложен расчет пригрузки, необходимой для обеспечения устойчивости поверхности фильтрующих песчано-глинистых откосов.

Расчет общей устойчивости обводненных откосов отличается от расчета сдренированных откосов наличием сил гидростатического взвешивания и гидродинамического давления, которые, однако, не вносят существенных осложнений в схемы расчета.

В фильтрующих неподтопленных откосах на каждый элементарный объем горного массива, расположенного ниже уровня грун-

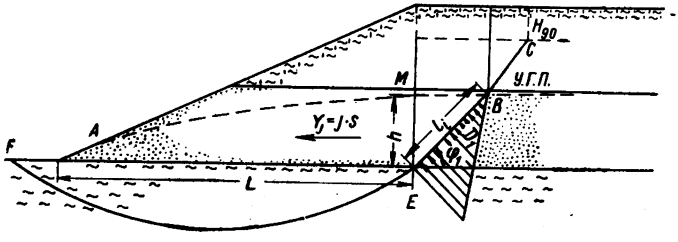


Рис. 158. Схема к пояснению влияния грунтового потока на устойчивость борта

товых вод, одновременно влияют и обычное Архимедово взвешивание и боковое гидродинамическое давление, возникающее вследствие разности напоров по боковым граням этого объема. Гидростатическое взвешивание, уменьшая вес элементарных блоков, тем самым уменьшает нормальную и касательную составляющие веса, а гидродинамическое давление увеличивает касательную составляющую. Суммарное влияние гидростатического взвешивания и гидродинамического давления на призму возможного обрушения проявляется как гидростатическое давление, распределенное по поверхности скольжения, нормальное к ней и изменяющее только нормальную составляющую; на касательную составляющую водное давление существенного влияния не оказывает.

На рис. 158 представлен откос, в основании которого залегают плотные водоупорные глины, а выше — фильтрующий слой с депрессионной поверхностью *AB*; наиболее слабой поверхностью в откосе является поверхность *CBEF*.

Необходимо показать, что влияние фильтрующегося потока на устойчивость откоса можно учитывать путем уменьшения нормального давления пород по поверхности скольжения на величину гидростатического давления по отрезку поверхности скольжения *BE* и что на касательную составляющую веса пород по поверхно-

сти скольжения фильтрующийся поток влияния не оказывает, т. е. нужно доказать, что

$$\Delta N = \frac{1}{2} lh,$$

$$\Delta T = 0.$$

Определим потерю веса водонасыщенной пористой горной породы при обычном гидростатическом взвешивании. Вес водонасыщенной горной породы в объеме V составляет

$$P = V(1-n)d + nV\gamma_в = Vd - Vdn + Vn\gamma_в.$$

Вес этой же породы при гидростатическом взвешивании составляет

$$P_1 = V(1-n)(d-\gamma_в) = Vd - Vdn + Vn\gamma_в - V\gamma_в.$$

Сила взвешивания равна разности этих весов

$$\Delta P = P - P_1 = V\gamma_в \tag{161}$$

при объемном весе воды, равном единице, сила взвешивания водонасыщенной пористой горной породы равна ее объему, расположенному ниже уровня грунтового потока.

Затем определим силу гидродинамического давления потока на ту часть призмы обрушения, по которой движется поток. Она равна объему этого блока, умноженному на градиент. Объем блока, занятого потоком, приближенно можно принять

$$S = \frac{1}{2}(h + h_0)L,$$

а градиент

$$J = \frac{h - h_0}{L},$$

таким образом, сила движущегося потока будет

$$J_J = SJ = \frac{1}{2}(h^2 - h_0^2)$$

или из-за малости h_0

$$J_J = \frac{1}{2} h^2.$$

Эту силу по линии действия (которую можно считать параллельной водоупору) можно перенести на линию BE и разложить на составляющие относительно этой линии — нормальную и касательную

$$\left.\begin{aligned} \Delta N_J &= \frac{1}{2} h^2 \sin\varphi_l \\ \Delta T_J &= \frac{1}{2} h^2 \cos\varphi_l \end{aligned}\right\}. \tag{162}$$

Гидростатическое взвешивание в балансе сил, действующих на призму обрушения, принимается только для блока водоносных

пород, опирающегося на поверхность скольжения, так как для той части поверхности скольжения, которая проходит по плотным глинам, не передающим гидростатическое взвешивание (содержащим только связанную воду), водоносный слой является обычной гравитационной силой.

Таким образом, к расчету необходимо принимать только взвешивание блока *EMB*, объем которого в плоской задаче равен

$$S_1 = \frac{1}{2} hl \cos \varphi_i.$$

Этой величине равна и сила взвешивания, т. е. на эту величину уменьшается вес блока, опирающегося на площадку *BE*. Вследствие этого уменьшаются нормальная и касательная составляющие веса блока на величины

$$\Delta N_S = \frac{1}{2} hl \cos^2 \varphi_i; \quad \Delta T_S = \frac{1}{2} h\gamma \cos \varphi_i \sin \varphi_i. \tag{163}$$

Суммируя нормальные и касательные составляющие от гидродинамического давления и гидростатического взвешивания получим

$$\Delta N = -\Delta N_J - \Delta N_S; \quad \Delta T = \Delta T_J - \Delta T_S;$$

$$\Delta N = -\frac{1}{2} h^2 \sin \varphi_i - \frac{1}{2} hl \cos^2 \varphi_i = -\frac{1}{2} hl (\sin^2 \varphi_i + \cos^2 \varphi_i) = \frac{1}{2} hl$$

(так как $h = l \sin \varphi$);

$$\Delta T = \frac{1}{2} h^2 \cos \varphi_i - \frac{1}{2} hl \sin \varphi_i \cdot \cos \varphi_i = 0.$$

Этим показано, что гидростатическое взвешивание и гидродинамическое давление можно заменять давлением воды, распределенным по поверхности скольжения и направленным по нормали к ней; касательная составляющая при этом не изменяется и при ее определении берется полный вес водонасыщенного грунта. Таким образом, уравнение равновесия с учетом давления воды *D*, которое в каждой точке поверхности скольжения равно разности отметок этой точки и высоты пьезометрического уровня над ней, приобретает вид

$$n = \frac{\sum \operatorname{tg} \rho_i (N_i - l_i D_i) + \sum K_i l_i}{\sum T_i}, \tag{164}$$

где ρ_i, K_i — угол внутреннего трения и сцепление по основанию блоков;

N_i, T_i — нормальные и касательные составляющие веса элементарных блоков породы без учета гидростатического взвешивания;

l_i — длина наклонного основания блоков;

D_i — величина гидростатического давления в середине основания блоков.

Если расчет производится без разделения сопротивления сдвигу на силы трения и сцепления, то сопротивление сдвигу в каждой точке поверхности скольжения принимается с паспорта прочности при нормальном напряжении, уменьшенном на величину гидростатического давления в этой точке. Положение наиболее слабой поверхности устанавливается так же, как и при отсутствии обводнения откоса, путем расчета по ряду поверхностей.

Гидростатическое взвешивание принимается в расчет для пород трещиноватых, гравелистых, песчаных и песчано-глинистых; в пластичных глинах, у которых сопротивление быстрому сдвигу характеризуется плавной кривой, обычно возникает поровое давление, по величине больше гидростатического; в этом случае гидростатическое давление не следует учитывать.

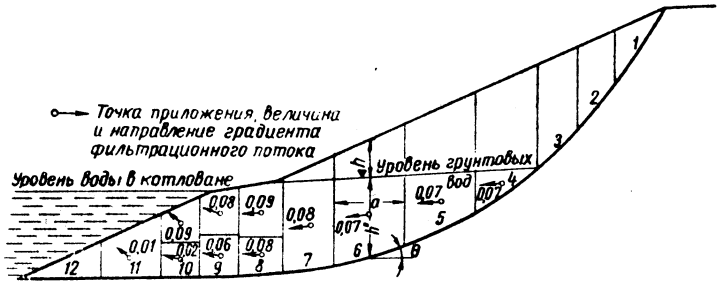


Рис. 159. Пример расчета устойчивости фильтрующего подтопленного откоса

Если слабофильтрующий слой песчаных глин или глинистых песков залегает между водоносными слоями с большим коэффициентом фильтрации, то пьезометрический уровень в каждой точке этого слоя изменяется пропорционально расстоянию от его кровли к почве; при этом пьезометрический уровень в точках кровли равен высоте депрессионной (или пьезометрической) поверхности верхнего водоносного слоя, а в точках почвы песчано-глинистого слоя этот уровень отсчитывается от пьезометрического уровня нижнего песчано-глинистого слоя; если по подошве этого слоя напора нет, то и пьезометрический уровень по его подошве равен нулю.

При расчете устойчивости подтопленного фильтрующего откоса гидростатическое и гидродинамическое воздействие потока необходимо учитывать путем сложения векторов гидростатического взвешивания, направленного вверх и равного объему песчаного скелета в объеме блока, и гидродинамического давления, направленного по линии тока и равного произведению градиента на объем блока. Пример расчета устойчивости фильтрующего подтопленного откоса представлен на рис. 159.

Расчет произведен для условий Лебединского карьера КМА при следующих исходных данных: угол откоса $\alpha = 24°$, удельный

вес песка $d=2{,}66$, пористость $n=0{,}35$, водонасыщение песка в надводной части $G=0{,}20$; угол трения в песках над водой 33°, под водой 30°, объемные веса под водой γ_n и над водой γ определялись по формулам

$$\gamma_n=(d-\gamma_в)(1-n)=1{,}08\ т/м^3,$$

$$\gamma=d(1-n)+nG\gamma_в=1{,}80\ т/м^3,$$

где $\gamma_в$ — удельный вес воды, равный 1 $т/м^3$.

Для учета гидродинамического давления воды откос моделировался на приборе ЭГДА, в результате строилась фильтрационная сетка. Поверхность скольжения принималась круглоцилиндрической.

Дальнейшие расчеты проводились в следующем порядке.

Часть массива, заключенная между поверхностью скольжения и поверхностью борта (рис. 159), разбивалась на блоки, для каждого из которых определялись нормальные N_i и касательные T_i силы по следующим формулам:

$$N_i=a\cos\varphi_i\,[h'\gamma+h''(\gamma_n-J_y)]-ah''J_x\sin\varphi_i, \qquad (165)$$

$$T_i=a\sin\varphi_i\,[h'\gamma+h''(\gamma_n-J_y)]+ah''J_x\cos\varphi_i, \qquad (166)$$

где a — ширина элементарного блока;
h' — высота надводной части блока;
h'' — высота подводной части блока;
J_y, J_x — соответственно вертикальная и горизонтальная составляющие градиента фильтрационного потока J.

В области призмы упора, где происходит значительное искривление линий течения, так что изменение градиента фильтрационного потока по высоте блока делается заметным, подводная часть блока разбивалась на две части горизонтальной прямой. В каждой из этих частей вычислялись свои значения градиентов.

В табл. 32 приведены определения N_i и T_i по каждому блоку.

В этом примере коэффициент запаса, рассчитанный по формуле (133), получился равным 1,26.

Расчеты устойчивости подтопленных откосов показывают, что общая устойчивость откосов, сложенных взвешиваемыми породами, существенно не изменяется при наличии потока (фильтрации) в сторону откоса, в обратную сторону или при отсутствии фильтрации. Само подтопление откосов взвешиваемых пород существенно уменьшает коэффициент запаса устойчивости; при высоте подтопленной части, составляющей третью часть общей высоты откоса, коэффициент запаса снижается на 15—20%.

Определение значений N_i и T_i по блокам

Номер блока	h'	h'_1	h''	$J_n - J_y$	3×4	2+5	a	φ_i, град	$\cos\varphi_i$	$ah''J_x \sin\varphi_i$	N_i	$\sin\varphi_i$	6×7×12	J_x	$ah''J_x \cos\varphi_i$	T_i
1	1,8	3,2	0,0	—	—	3,2	3,5	57	0,55	0,00	6,2	0,84	9,4	—	—	9,4
2	4,6	8,3	0,0	—	—	8,3	2,5	53	0,80	0,00	12,4	0,80	16,6	—	—	16,6
3	6,2	11,1	0,0	—	—	11,1	2,7	42	0,74	0,00	22,2	0,67	20,0	—	—	20,0
Сумма											40,8					
4	6,1	11,0	1,4	1,08	1,5	12,5	4,1	38	0,79	0,25	40,3	0,62	31,8	0,07	0,32	31,2
5	4,3	7,7	3,7	1,08	4,0	11,7	4,6	27	0,89	0,54	47,5	0,45	24,3	0,07	1,06	25,4
6	2,5	4,5	5,3	1,08	5,7	10,2	4,7	17	0,96	0,50	45,6	0,29	13,9	0,07	1,66	15,6
7	0,9	1,8	5,9	1,08	6,4	8,0	3,5	8	0,99	0,16	27,5	0,14	3,9	0,07	1,43	5,3
8	0,0	0,0	3,5	1,08	3,8	6,5	2,9	6	1,00	0,01	18,8	0,10	1,8	0,10	1,00	3,7
9	0,0	0,0	2,5	1,08	2,7	6,1	2,5	5	1,00	0,07	15,2	0,09	1,4	0,09	0,90	2,3
10	0,0	0,0	2,9	1,05	3,0	4,6	4,0	0	1,00	0,03	18,4	0,00	0,0	0,06	0,04	0,8
11	0,0	0,0	2,9	1,07	3,1	4,0	4,0	0	1,00	0,03	16,0	0,00	0,0	0,06	0,44	0,0
12	0,0	0,0	2,0	1,02	2,0	1,5	5,7	0	1,00	0,00	8,5	0,00	0,0	0,06	0,54	0,0
Сумма			2,4	1,08	2,8						237,8			0,02	0,22	130,0
			3,7	1,08	4,0									0,00	—	
			1,4	1,08	1,5									0,00	—	

При подтоплении откосов, сложенных невзвешиваемыми породами, их устойчивость возрастает. Сила гидростатического давления, распределенного по подтопленной части поверхности откоса, может быть определена по формуле

$$D = \frac{h^2}{2 \sin \alpha}, \qquad (167)$$

где D — сила давления, *т*;
h — высота подтопленной части откоса, *м*;
α — угол откоса, *град*.

Сила D направлена по нормали к поверхности откоса и существенно увеличивает его устойчивость.

При расчете устойчивости подтопленного откоса невзвешиваемых пород необходимо применять метод многоугольника сил.

§ 7. Расчет устойчивости отвалов

Отвалы крепких и средней прочности пород на устойчивом основании могут иметь любую высоту при угле естественного откоса, равном 34—36°. При размещении внешних отвалов на ровной поверхности их максимальная высота может быть установлена технико-экономическими расчетами, учитывающими: удорожание транспортировки при увеличении высоты отвалов, расходы на устройство и поддержание пути, а также возможность применения более мощного оборудования на высоких отвалах.

При расчете устойчивости основания отвалов необходимы поверочные расчеты на выпирание основания. К расчету принимаются характеристики сопротивления сдвигу пород основания, устанавливаемые путем испытания на сдвиг, и сопротивление сдвигу отвальных пород, характеризующееся углом внутреннего трения, равным 36°, при отсутствии сцепления.

Расчеты производятся по схеме VII[6] по двум-трем поверхностям скольжения. Поверхность скольжения в верхней части начинается на поверхности отвалов с углом наклона ω к горизонту; на участке BC поверхность скольжения прямолинейна. В нижней части поверхность скольжения выходит на поверхность основания под углом $45° - \frac{\rho_{осн}}{2}$ к нему в некотором расстоянии от нижней точки откоса; это расстояние устанавливается также путем 2—3 расчетов и по ним определяется такое положение нижнего участка поверхности скольжения, при котором коэффициент запаса получается наименьшим. Глубина погружения поверхности скольжения в толщу пород основания отвалов зависит от мощности слабого слоя пород, а обратный уклон поверхность скольжения имеет только на участке под подошвой откоса (рис. 160).

При размещении отвалов на слабом горизонтальном основании предельная высота отвала при угле естественного откоса в зависимости от мощности и прочности горизонтально залегающего в осно-

вании отвала слабого слоя ориентировочно может быть определена по графику, рассчитанному А. В. Пашкевичем [123] (рис. 161).

При построении этого графика сопротивление сдвигу пород основания, откладываемое по оси абсцисс, принималось не зави-

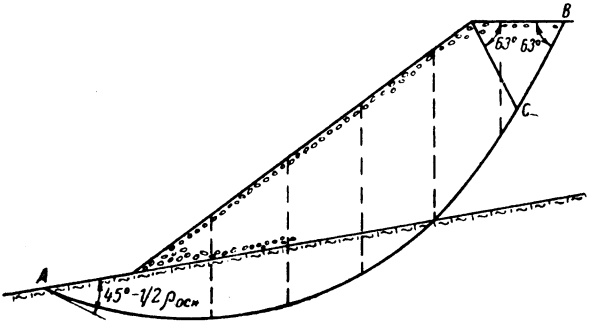


Рис. 160. Схема поверхности скольжения к расчету устойчивости отвалов на слабом основании

сящим от нормального напряжения, как это обычно наблюдается в области напряжений, вызывающих пластическое состояние горных пород.

При размещении отвалов на склонах горы особенно тщательно должен быть изучен покров рыхлых пород и условия его увлажне-

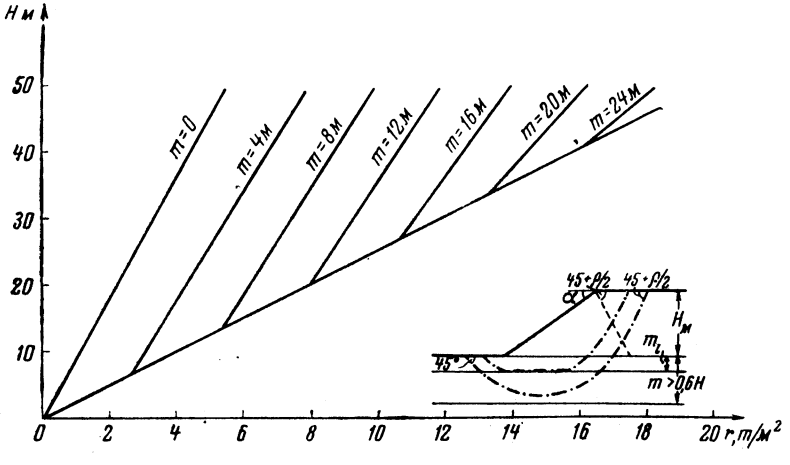


Рис. 161. График зависимости между высотой отвала твердых пород и сопротивлением сдвигу основания

ния, наличие источников и впадин, в которых скапливаются атмосферные воды.

Расчет устойчивости отвалов глинистых пород на слабом основании производится по той же схеме VII[6],

как и расчет устойчивости твердых пород, с тем лишь отличием, что сопротивление сдвигу глинистых пород в отвалах характеризуется сцеплением и внутренним трением, устанавливаемыми путем испытаний на сдвиг.

Схема расчета устойчивости отвалов глинистых пород на устойчивом основании по расположению поверхностей скольжения подобна схеме расчета бортов выпуклого профиля (схема VI[6]). В этом случае в нижней точке откоса также пересекается ряд поверхностей скольжения, наклоненных в верхней части под углом $45° + \frac{\rho_{отв}}{2}$, поверхности скольжения являются плавными криволинейными, но не обязательно круглоцилиндрическими.

Рыхлые горные породы (глины, суглинки, глинистые пески и др.) при перемещении в отвалы теряют естественное сцепление, а затем, уплотняясь под влиянием веса вышележащей толщи, вновь приобретают некоторое сцепление, зависящее от физических свойств пород и от высоты отвала. Если отвал сложен из влажных рыхлых пород, то при некоторой определенной высоте отвала они уплотняются до такой степени, что переходят из двухфазного состояния в трехфазное, так что дальнейшее уплотнение может происходить лишь при условии отжима воды из области высоких напряжений в область более низких. При этом развивается поровое давление воды, снижающее силы трения, что проявляется при испытании на срез в виде выполаживания линии, выражающей зависимость между касательными и нормальными напряжениями. Поэтому рыхлые породы в отвалах не могут характеризоваться постоянными величинами ρ и K.

Для определения сопротивления срезу (сдвигу) рыхлых горных пород в отвале необходимо производить в лабораторных условиях их уплотнение под различными нагрузками, при их естественной влажности, в условиях, исключающих отжим воды, и испытывать на срез при этих же нормальных нагрузках. В результате получается график зависимости сопротивления срезу от величины нормальных напряжений, пользуясь которым можно рассчитать профиль устойчивого отвала методом алгебраического сложения сил по монотонной криволинейной поверхности.

При расчете по схеме VI[6] отвал получает наиболее выгодный профиль — выпуклый с углом наклона, в нижней части равным углу естественного откоса и постепенно выполаживающимся кверху (на рис. 162 расчетный контур устойчивого откоса показан сплошной линией, а вписанные в этот контур ярусы отвалов — пунктиром).

При испытаниях на срез пород отвалов и при расчетах их устойчивости необходимо исходить из действительного распределения по высоте отвала различных литологических разностей пород, которое устанавливается путем наблюдений в натурных условиях.

При применении усложненной бестранспортной системы разработки угол откоса предотвала может превышать угол естественного откоса на 10—15° вследствие появления у пород отвалов связности. Определение путем расчета высоты и угла откоса предотвала способствует значительному сокращению объема переэкскавации.

Пример расчета профиля отвалов представлен на рис. 162. Расчет выполняется в следующем порядке:

а) по осредненной прямой линии AB сопротивления сдвигу с параметрами ρ_n и K_n по графику выпуклого откоса определяются координаты сглаженного профиля откоса;

б) нижняя вертикальная часть откоса выполаживается до 32—35° и в откосе через его нижнюю точку проводится ряд плавных поверхностей с углом наклона в верхней части, равным $45° + \frac{\rho_n}{2}$, после чего на каждой поверхности отмечается несколько точек;

в) в отмеченных точках определяются касательные и нормальные напряжения по формулам

$$\left.\begin{aligned} \sigma_n &= h\gamma \cos^2 \varphi_i \\ \text{и} \\ \tau_c &= \frac{1}{2} h\gamma \sin 2\varphi_i \end{aligned}\right\}; \quad (168)$$

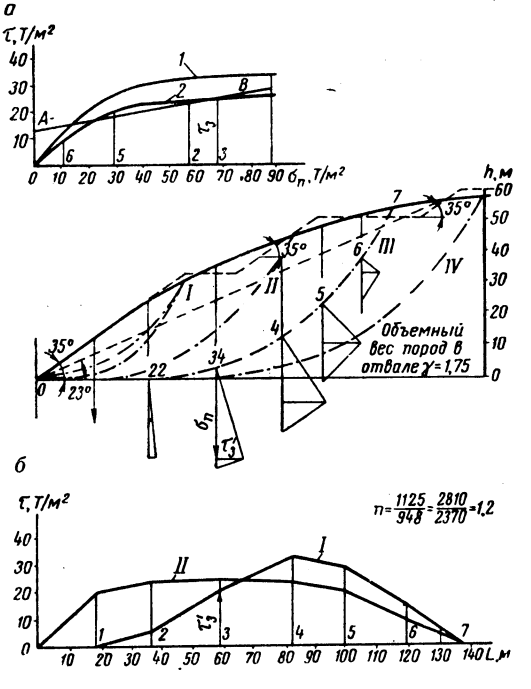


Рис. 162. Пример расчета устойчивости отвалов глинистых пород на устойчивом основании:

а — график сопротивления сдвигу пород отвала: *1* — предельное сопротивление; *2* — устойчивое сопротивление; *б* — эпюры касательных напряжений по поверхности *III*; *I* — сдвигающих; *II* — удерживающих

г) каждая поверхность скольжения с отмеченными точками развертывается в горизонтальную прямую и в каждой точке по оси ординат откладываются отрезки, соответствующие касательным напряжениям τ_c, концы которых соединяются плавной кривой; площадь, ограниченная осью абсцисс и этой кривой, выражает сумму сдвигающих сил, действующих по поверхности скольжения;

д) по паспортам прочности при соответствующих нормальных напряжениях определяются сопротивления сдвигу τ_y, величины которых также откладываются по оси ординат и соединяются

плавной кривой; площадь этой эпюры будет являться суммой удерживающих сил, а отношение

$$\frac{\sum \tau_y}{\sum \tau_c} = n \tag{169}$$

будет равно коэффициенту запаса устойчивости по каждой поверхности скольжения;

е) если величина n получается меньше заданной, то высоту откоса в этой точке понижают, а если больше, то повышают и повторяют расчет, пока по каждой поверхности скольжения будет получен заданный коэффициент запаса.

Определение сил и их суммирование можно производить и в таблицах; в этом случае производится умножение напряжений на длину отрезка кривой, по которому они распространены.

Отвалы на слоистом основании рассчитываются по схеме VIII[6]. Расчет производится методом многоугольника сил. Граница между призмой активного давления и призмой упора принимается наклонной, расположенной под углом $90° - \rho_n$ к поверхности скольжения призмы активного давления; реакция по этой грани направлена под углом ρ_n к нормали, как показано на схеме VIII[6].

Для определения высоты отвала твердых пород, отсыпаемого на наклонном слоистом основании, Т. К. Пустовойтовой [123] получена аналитическая зависимость

$$H = \frac{2K_n' \sin 2\alpha \cdot \sin(\omega - \beta)}{\gamma \sin(\alpha - \beta)\left[\frac{(1 - \sin\rho_n)\sin(\alpha - \beta)}{\cos(90° - \omega - \beta)} - 2\cos\beta \cdot \sin(\omega - \alpha)\left(\operatorname{tg}\rho_n' \cos\beta - \sin\beta\right)\right]}. \tag{170}$$

В частном случае, когда угол откоса отвалов равен углу естественного откоса, т. е. $\alpha = \beta$, формула (170) принимает более простой вид

$$H = \frac{2K_n' \sin\rho_n [\sin(\rho_n - \beta) + \cos\beta]}{\gamma \sin(\rho_n - \beta)\left[\frac{\sin(90° - \omega)\sin(\rho_n - \beta)}{\cos(90° - \omega - \beta)} - \frac{\sin(\rho_n' - \beta)\cos\beta}{\cos\rho_n'}\right]}. \tag{171}$$

Как установлено при изучении оползней отвалов глинистых пород, на их устойчивость влияет увлажнение поверхности откоса ранее отсыпанной заходки. В зависимости от свойств пород и продолжительности дождей влажность пород по поверхности откоса может достигнуть предела текучести; при этой влажности сопротивление сдвигу равно нулю. Исходя из этого можно установить минимальную ширину заходки, на устойчивость которой увлажненная до текучего состояния поверхность предыдущей заходки не будет оказывать влияния.

§ 8. Расчет устойчивости нагруженных уступов слабых глинистых пород

Расчет устойчивости или углов откосов уступов слабых глинистых пород, нагруженных весом тяжелого оборудования, производится также на предельное равновесие по наиболее слабой поверхности. В качестве расчетных характеристик, кроме K, γ, ρ, используются ширина b опорной части оборудования и вес P, приходящийся на 1 *м* длины опорной части.

Ниже излагается расчет путем решения плоской задачи без учета защемления призмы возможного обрушения со стороны участков, не нагруженных весом оборудования; наличие этого защемления повышает действительный коэффициент запаса устойчивости. При необходимости более точного определения коэффициента запаса устойчивости нагруженного откоса следует производить расчет по трем-четырем поперечникам, принимая во внимание, что поверхность скольжения имеет циркообразную форму.

При решении этой задачи возможны два случая:

а) откос при наличии нагрузки должен иметь такой же коэффициент запаса, как и без нагрузки; расчетом устанавливается ширина призмы, на которую не должно помещаться оборудование;

б) откос без нагрузки имеет коэффициент запаса устойчивости, значительно бо́льший, чем требуется при наличии нагрузки; требуется определить ширину той же призмы (бермы безопасности).

В первом случае ширина бермы безопасности будет превышать ширину призмы возможного обрушения ненагруженного откоса, ограничиваемую положением поверхности скольжения, которая строится подобно тому, как изображено на рис. 140.

Расчет производится в следующем порядке. В массиве уступа проводится ряд поверхностей скольжения (рис. 163); в верхней части эти поверхности наклонены к вертикали под углом, равным $45° - \frac{\rho}{2}$; в случае, если удельное давление оборудования на 1 $м^2$ опорной части $\frac{P}{b}$ больше величины σ_0, рассчитываемой по формуле

$$\sigma_0 = 2K \operatorname{ctg}\left(45° - \frac{\rho}{2}\right),$$

площадки скольжения возникают непосредственно под опорной частью оборудования, если же $\frac{P}{b} < \sigma_0$, то площадки скольжения будут возникать только начиная с глубины

$$H' = \frac{\sigma_0 - \frac{P}{b}}{\gamma}, \qquad (172)$$

а выше будет образовываться вертикальная трещина отрыва.

В средней и нижней части поверхности скольжения имеют вид круглоцилиндрических или плавных криволинейных поверхностей.

После построения поверхностей скольжения для каждой из них определяется дополнительная нагрузка, при которой обеспе-

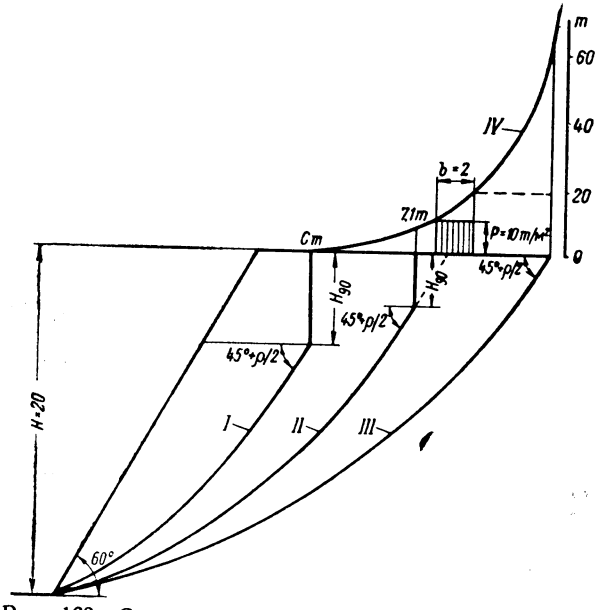


Рис. 163. Схема к упрощенному расчету допустимых нагрузок на откос (первый случай)

чивается заданный коэффициент запаса устойчивости по формуле

$$n = \frac{KL + \operatorname{tg}\rho \sum N + P\cos\omega \cdot \operatorname{tg}\rho}{\sum T + P\sin\omega}, \qquad (173)$$

или

$$P = \frac{K_n L + \operatorname{tg}\rho_n \sum N - \sum T}{\cos\omega\,(\operatorname{tg}\omega - \operatorname{tg}\rho_n)}, \qquad (174)$$

где P — допускаемая дополнительная нагрузка опорной части оборудования, *т/м*;

K, ρ — расчетные характеристики прочности пород в уступе;

K_n, ρ_n — те же характеристики, разделенные на коэффициент запаса устойчивости;

L — длина поверхности скольжения, *м*;

$\sum N$, $\sum T$ — суммы нормальных и касательных составляющих от веса элементарных столбиков породы, *т*;

ω — угол наклона поверхности скольжения в верхней части $\left(\omega = 45° + \frac{\rho}{2}\right)$.

После расчета величины P для заданных поверхностей скольжения строится кривая IV зависимости допускаемых нагрузок от расстояния от верхней бровки уступа.

Во втором случае расчетные поверхности располагаются в откосе подобно тому, как изображено на рис. 164, причем положение наиболее слабой поверхности определяется подбором; кривая допустимых нагрузок строится так же, как и в первом случае.

Для определения расстояния от верхней бровки до оборудования на уступе, при котором сохраняется заданный коэффициент запаса устойчивости, необходимо на кривой IV найти точку, соот-

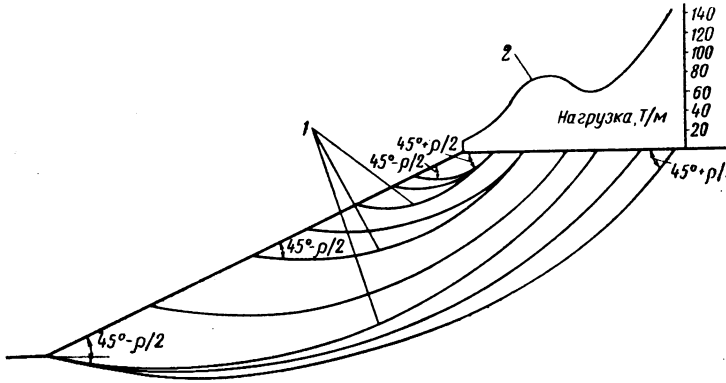


Рис. 164. Схема к упрощенному расчету допустимых нагрузок на откос (второй случай)

ветствующую нагрузке, приходящейся на 1 *м* длины опорной части оборудования, и из этой точки опустить перпендикуляр на ось абсцисс; опорная часть оборудования расположится в сторону выемки от этого перпендикуляра (рис. 163).

Если расстояние между опорами экскаватора значительно или если при пологом откосе экскаватор может близко подойти к краю площадки, расчет необходимо производить для двух случаев — для нагрузки на 1 *м* длины одной опоры и для нагрузки на 1 *м* длины обеих опор, так как возможны случаи, когда местоположение экскаватора будет определяться только одной крайней опорой или же весом, приходящимся на 1 *м* длины обеих опор.

В тех случаях, когда в массиве уступов имеются контакты слоев, поверхности древних оползней или другие поверхности ослабления, падающие в сторону выемки под углом более 10—15°, поверхность скольжения частично или полностью будет проходить по этим поверхностям ослабления.

Расчет углов или высоты нагруженных откосов производится методом подбора при таком же расположении поверхностей

скольжения, как и при расчете бермы безопасности. Ориентировочную величину угла откоса при заданной высоте или высоту при заданном угле можно определять по графику для плоских откосов (см. рис. 153), заменив предварительно удельный вес оборудования эквивалентным слоем породы; тогда условная расчетная высота откоса будет складываться из действительной высоты откоса и величины ΔH, равной $\Delta H = \frac{P}{b\gamma}$; после того, как таким путем будут установлены ориентировочные параметры нагруженных уступов, производятся поверочные расчеты способом, изложенным выше.

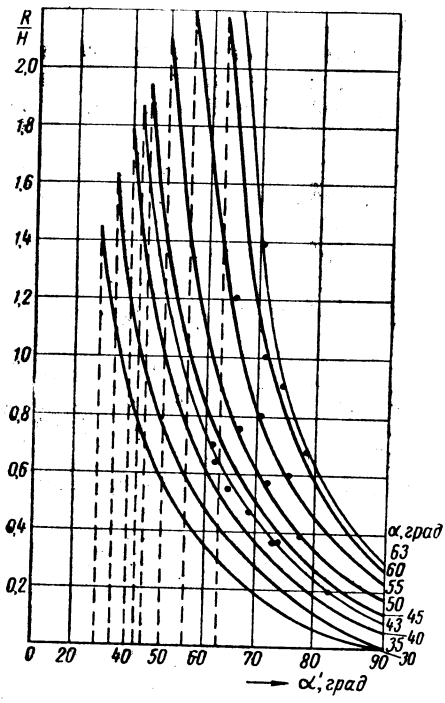


Рис. 165. График зависимости угла наклона борта от его кривизны в плане

§ 9. Определение углов наклона бортов карьеров, имеющих в плане круглую или овальную форму

При увеличении глубины карьеров возникает все больше случаев, когда при расчетах устойчивости бортов нельзя ограничиться решением плоской задачи. Например, устойчивость торцовых участков бортов карьеров вытянутой формы и бортов глубоких карьеров, имеющих в плане круглую или овальную форму, при радиусе кривизны верхней бровки менее $2H$ существенно возрастает.

В связи со сложным напряженным состоянием пород, создающимся в таких случаях, и в связи со сложной формой поверхности обрушения определение углов наклона бортов карьеров путем расчета в настоящее время является весьма затруднительным. В этих условиях рекомендуется применять моделирование.

Большую работу по изучению на моделях влияния кривизны бортов на величины углов их наклона провел в 1962—1963 гг. И. И. Ермаков. По большому числу обрушенных моделей бортов карьеров круглой формы им составлен график зависимости между отношениями $\frac{R}{H}$, углами наклона плоских бортов α при высотах бортов H и соответствующими углами наклона бортов для пород

с такими же характеристиками, имеющих радиус кривизны верхней бровки карьера R.

Вначале по характеристикам ρ_n, K_n и γ при заданной высоте борта по графику рис. 153 определяется угол наклона α плоского прямолинейного борта.

Затем при заданном отношении $\frac{R}{H}$ на графике проводится горизонталь до кривой, соответствующей углу α, и из точки пересечения опускается перпендикуляр на ось абсцисс, на которой и отсчитывается определяемый угол α'.

Как видно из графика (рис. 165), заметное влияние кривизны борта проявляется при радиусе кривизны верхней бровки менее $2H$; при $R=H$ разность в углах наклона достигает 7—12°, что дает существенную разницу в объемах вскрыши при большой глубине карьеров.

§ 10. Определение углов наклона бортов карьеров, подработанных подземными горными выработками

Устойчивость бортов карьеров, подработанных подземными горными выработками, зависит от свойств горных пород в их естественном залегании, от характера подземных горных выработок или разработок и от характера деформации горных пород при подземной разработке.

В настоящей работе не ставится задача даже кратко изложить характер деформации горных пород при подземной разработке, так как этот вопрос подробно изложен в ряде специальных работ [1, 59 и др.].

При разработке пластовых месторождений почти во всех случаях большая часть толщи покрывающих пород подвергается сдвижению в форме плавного оседания без существенного нарушения их естественной структуры (исключая разработку мощных пластов с обрушением кровли, а также разработку короткими забоями с оставлением целиков). Например, Коркинским карьером вскрыта толща пород, подработанных системами длинных столбов по простиранию и наклонных слоев с полным обрушением кровли; наблюдения показали, что при отработке мощного пласта двумя слоями зона беспорядочного обрушения распространилась на 60—70 *см*, затем идет слой с частично нарушенной структурой, а выше структура пород почти совсем не изменилась.

В таких условиях подработка бортов подземными горными выработками почти не влияет на сопротивление сдвигу трещиноватых горных пород в массиве, а поэтому существенно не влияет и на устойчивость бортов.

В тех случаях, когда обрушение пород с полным нарушением их естественной структуры распространяется на большую высоту, необходимо оконтуривать такие зоны, и в их пределах по поверхности скольжения к расчету следует принимать только коэффициент внутреннего трения, а сцепление считать равным нулю.

При разработке камерно-столбовыми системами с закладкой выработанного пространства по участкам поверхности скольжения в пределах заложенных камер к расчету принимаются характеристики закладочного материала; в пределах междукамерных целиков сцепление необходимо уменьшать на 20—30%.

Наиболее сложным является расчет устойчивости бортов, подработанных незаложенными камерами; в этих условиях междукамерные целики находятся в сложном напряженном состоянии и их сопротивление сдвигу можно определить только путем моделирования. Поэтому углы наклона бортов, подработанных незаложенными камерами, необходимо определять путем моделирования.

Глава XX

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ПРОВЕРКА МЕТОДОВ РАСЧЕТА УСТОЙЧИВОСТИ ОТКОСОВ И ОРИЕНТИРОВОЧНЫЕ УГЛЫ НАКЛОНА БОРТОВ КАРЬЕРОВ

§ 1. Предельное состояние бортов карьеров и уступов

Экспериментальная проверка методов расчета возможна и целесообразна лишь при высокой точности определения сопротивления сдвигу горных пород или других материалов, слагающих откос, так как точность методов расчета составляет 2—5%, а применение ошибочных методов дает максимальные погрешности порядка 15—20%. В реальных условиях определить сопротивление сдвигу горных пород в массиве с учетом трещиноватости, поверхностей ослабления и разуплотнения с погрешностью менее 15% в настоящее время практически невозможно. Поэтому в механико-математическом отношении контроль метода расчета может быть осуществлен в основном только методом моделирования или на откосах однородных пород, обычно имеющих небольшую высоту.

Путем расчета устойчивости бортов карьеров, подвергшихся деформации, можно дать только общую оценку точности расчетов; при этом точность этой оценки будет такого же порядка, как и применяемый при расчетах коэффициент запаса, учитывающий совокупное влияние ряда факторов, в том числе и погрешности метода расчета.

Ниже описываются примеры определения коэффициента запаса устойчивости деформирующихся бортов.

Пример 1. Расчет устойчивости борта висячего бока Богоеловского карьера № 1, подвергшегося оползанию в 1946 г. на протяжении 600 *м*. Геологические условия и факторы, способствующие возникновению оползня, описаны в § 6 гл. XII.

Высота оползшего борта составляла 54 *м*, а средний угол наклона борта 20°; борт был сложен аргиллитами, алевролитами и

рыхлыми песчаниками. По данным исследований ВНИМИ, средние характеристики сопротивления сдвигу этих пород в образце до глубины 50 *м* составляли:

аргиллиты	$\rho = 27°$;	$K = 24$ $T/м^2$;
алевролиты	$\rho = 30°30'$;	$K = 36$ $T/м^2$;
песчаники	$\rho = 35°$;	$K = 27$ $T/м^2$;
средние значения . . .	$\rho = 29°$;	$K = 25{,}5$ $T/м^2$; $\gamma = 2{,}20$ $T/м^3$

по контактам слоев средние характеристики по месторождению составляли $\rho' = 19°$ (при изменении в пределах 17—21°), а $K' = 2$ $T/м^2$; средняя интенсивность трещиноватости составляла 3. Коэффициент структурного ослабления рассчитан по формуле

$$K_м = \frac{1}{1 + a \ln HW} = \frac{1}{1 + 0{,}51 \ln (54 \times 3)} = 0{,}286;$$

сцепление в массиве составило $25{,}5 \times 0{,}286 = 7{,}3$ $T/м^2$. При расчете учитывалось гидростатическое давление потока, поверхность которого на рис. 166 показана пунктиром (У.Г.П.).

При расчете методом алгебраического сложения сил (табл. 33) коэффициент запаса устойчивости получился равным 1,155.

Таблица 33

Удерживающие и сдвигающие силы по блокам

№ блока	N_i	T_i	l_i	h_i	$h_i l_i$	$f = \operatorname{tg} \rho$
1	650	970	32,0	13,5	432	
2	1450	1230	26,3	32,0	840	
3	1870	1070	23,0	43,0	990	
$\sum$	3970	3270	81,3		2262	0,555
4	7100	—806	120	24,5	2940	0,306

$$h = \frac{0{,}555\,(3970 - 2262) + 81{,}3 \cdot 7{,}3 + 0{,}306\,(7100 - 2940) + 120 \cdot 2 + 806}{3270} =$$

$$= \frac{3781}{3270} = 1{,}155.$$

Повторно расчет был сделан методом многоугольника сил на участке призмы упора с учетом ползучести пород, т. е. к расчету были приняты не предельные характеристики сопротивления сдвигу, а по пределу ползучести, который для этих пород составляет 80—85% от предельных.

На рис. 166, *в* изображен график сопротивления сдвигу по пределу ползучести, а на рис. 166, *б* — многоугольник сил.

Величина отрезка несмыкания треугольника сил (отрезок OO') составила 350 *т*, что в отношении к сумме сдвигающих сил составляет +10,7%; таким образом, в этом случае коэффициент запаса устойчивости получился равным 1,107, т. е. в обоих

случаях коэффициент запаса оползшего борта оказался выше единицы. По-видимому, в этом сказалось уменьшение характеристик сопротивления сдвигу вблизи водоема, неустановленное точное

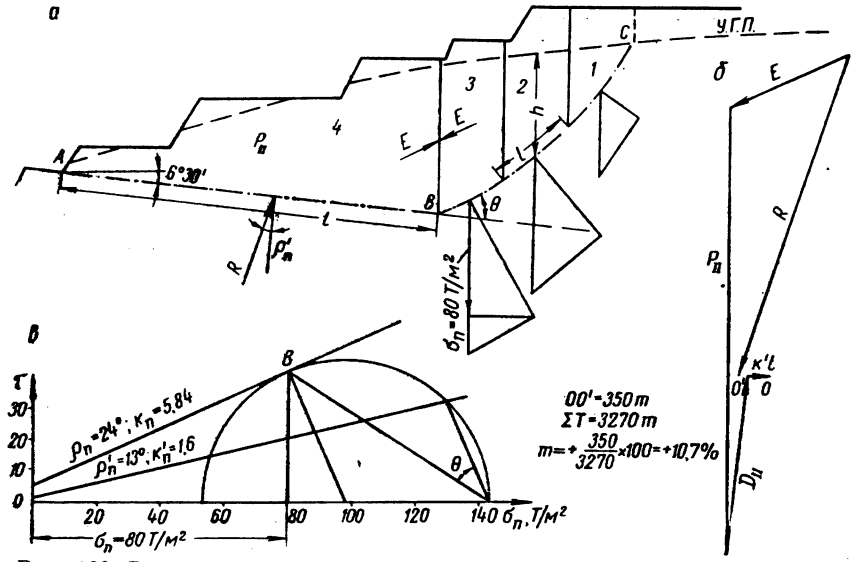


Рис. 166. Расчет устойчивости оползневого участка борта Богословского карьера:

а — профиль борта до оползня; *б* — многоугольник сил; *в* — график сопротивления сдвигу пород по пределу ползучести

положение контакта покрывающих пород с угольным пластом, погрешности расчета и другие факторы.

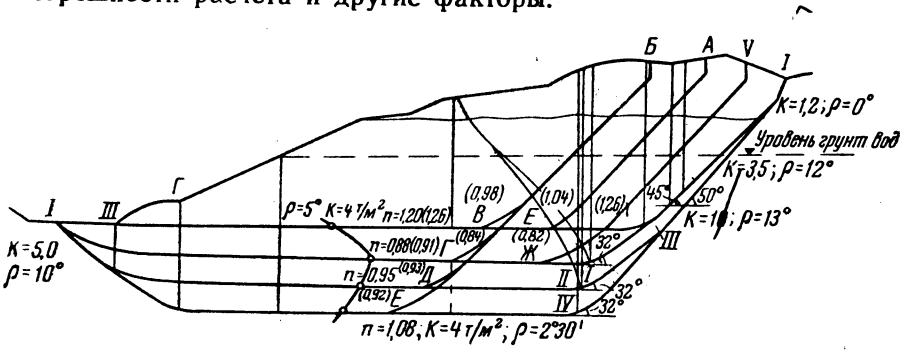


Рис. 167. Расчет устойчивости оползневого участка борта карьера «Устье-Брынкино»

Пример 2. На рис. 167 представлен профиль борта карьера «Устье-Брынкино» Боровичского комбината огнеупоров, подвергшийся оползанию на протяжении около 500 *м*.

На этом же рисунке показаны поверхности, по которым произведен расчет устойчивости борта. Расчет произведен по сопротивлению сдвигу на пределе ползучести, поэтому по наиболее слабой поверхности коэффициент запаса получился равным 0,82. В пересчете на предельные характеристики сопротивления сдвигу по наиболее слабой поверхности коэффициент запаса получился равным 1,26.

Действующие напряжения входили в область ползучести примерно на $^2/_5$ ее ширины (соотношение между напряжениями на пределе ползучести и предельными у пород, слагающих борт, в среднем составляет 0,65). Это определило медленное развитие оползня, продолжающееся около одного года. Можно считать, что в этом случае получилось хорошее совпадение опытных и расчетных данных.

§ 2. Моделирование откосов [1]

Моделирование откосов проводилось в лаборатории Уральского филиала ВНИМИ. Моделировались откосы вогнутого, плоского и выпуклого профилей; результаты моделирования сравнивались с откосами, полученными по расчетным методам при известных ρ и K эквивалентного материала, и таким образом определяли, насколько рассчитанные откосы соответствуют фактическим. Моделированием проверяли правильность методов расчета откосов выпуклого и плоского профилей, разработанных во ВНИМИ, и метода В. В. Соколовского и С. С. Голушкевича для вогнутых откосов.

Первый цикл моделирования был проведен в 1957 г. на стенде малых размеров; обрушались откосы с углом 58—70° при высоте 50—80 *см*. Материалом моделирования служил глинистый слегка увлажненный песок со следующими физико-механическими характеристиками: $\gamma=1{,}6—1{,}7$ *г/см*^{3}, $\rho=35°$ и $K=5—15$ *г/см*^{2}. Было обрушено 20 откосов. Моделирование на песчаных откосах показало хорошее совпадение фактических и расчетных откосов плоских и выпуклых профилей; фактические откосы во всех случаях получались на 1—4° круче расчетных. Положение поверхности обрушения в откосе для большинства опытов весьма близко к теоретическому, с наличием вертикального отрыва, по высоте близкого к H_{90}.

В 1960—1962 гг. опыты с моделированием были возобновлены с целью проверки расчетных методов при меньших углах откосов, близких к реальным углам наклона бортов карьеров. За счет увеличения размеров стенда и увеличения объемного веса эквивалентного материала удалось уменьшить углы обрушаемых откосов до 46°.

---

[1] Параграф составлен ст. научным сотрудником Уральского филиала ВНИМИ канд. техн. наук В. Т. Сапожниковым.

В качестве эквивалентного материала применяли смесь слегка глинистого песка с железными опилками при соотношении 7 : 3; смесь увлажняли трансформаторным маслом, что обеспечивало на продолжительное время постоянство влажности смеси и подходящие для условий моделирования механические характеристики.

Стенд для моделирования (рис. 168) представляет собой прямоугольный ящик размером: длина 1,35 *м*, высота 1,20 *м*, ширина 0,9—1,0 *м*. Выполнен стенд из уголкового железа. Нижняя и задняя грани стенда — закрытые, верхняя и передняя грани — открытые; боковые грани — из плексигласа; на боковых гранях через 20—25 *см* установлены вертикальные стояки, которые одновременно служат координатной сеткой для документирования откосов. Изменение угла наклона стенда производится подъемом задней части стенда с помощью домкрата.

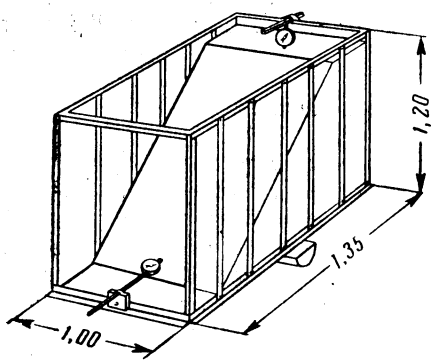


Рис. 168. Поворотный стенд для моделирования откосов

Порядок проведения одного испытания по обрушению откоса следующий.

1. Для известных механических характеристик по графикам плоского, вогнутого или выпуклого откосов определяются параметры предельного откоса, выносятся в натуру, т. е. на стенд, и отмечаются карандашом на боковой грани.

2. Материал в стенд закладывается слоями по 15—20 *см* и уплотняется определенной нагрузкой.

3. По среднему профилю откоса бурится 3—5 скважин, которые засыпаются материалом, отличающимся по цвету от эквивалентного материала (в нашем случае засыпался гипс). Устанавливаются индикаторные головки, по которым фиксируются деформации откоса вплоть до обрушения. Индикаторные головки устанавливаются: одна в нижней части откоса и 1—2 головки по поверхности откоса (рис. 168).

4. Подъемом задней стенки стенда угол откоса постепенно увеличивается до предельного положения, т. е. до обрушения, причем при подходе к предельному положению скорость подъема уменьшается. В тех случаях, когда обрушение откоса производится с фиксированием деформаций, через 1,5—2° подъема производится отсчет по индикаторным головкам.

5. В момент скачка деформации и в момент обрушения, практически являющегося моментом предельного равновесия откоса, фиксируется угол откоса.

6. Поверхность скольжения документируется по трем сечениям — по обеим боковым граням и посередине.

В середине откоса поверхность скольжения устанавливается по срезам скважин.

За счет сил трения смеси о боковые грани, создаваемых боковым распором, возникает дополнительное сопротивление силам, стремящимся сдвинуть откос. Для уменьшения сил трения о боковые грани применяли один из следующих трех способов:

1. Между эквивалентным материалом и боковыми гранями (плексиглас) прокладывали бумагу, покрытую графитом, поскольку угол трения графит—плексиглас в два раза меньше угла трения материал—плексиглас.

2. Между материалом и боковыми гранями вставляли доски с роликами, т. е. заменяли трение скольжения трением качения роликов по плексигласу, которое весьма незначительно, и поэтому влияние бокового распора на устойчивость испытываемого откоса было значительно меньше, чем при первом способе.

3. Боковой гранью откоса служат шайбы диаметром до 10 *см*, скрепленные проволокой попарно с шайбами другой боковой грани. В этом случае полностью исключается влияние бокового распора на устойчивость откоса.

Камеральная обработка данных по обрушению откоса производится в следующем порядке.

1. В крупном масштабе на миллиметровке строятся профили по всем трем задокументированным сечениям с нанесением контура откоса и поверхности скольжения таким образом, чтобы линия горизонта в момент обрушения совпадала с одним из направлений ортогональной сетки миллиметровой бумаги. Это значительно ускоряет поверочные расчеты.

2. По всем сечениям определяются силы сдвигающие и силы удерживающие по поверхности скольжения по методике, изложенной в главе XIX.

3. Очевидно, что в момент обрушения откоса по поверхности скольжения практически силы удерживающие равны силам сдвигающим, т. е. существует предельное равновесие. При отсутствии сил трения о боковые грани уравнение предельного равновесия имеет обычный вид

$$\frac{\operatorname{tg}\rho \sum N_i + Kl}{\sum T_i} = 1,$$

где $\sum N_i$ и $\sum T_i$ — суммы нормальных и касательных составляющих веса расчетных столбиков на поверхности скольжения;

l — длина поверхности скольжения.

Этому уравнению при известных значениях ρ и K должно удовлетворять соотношение сил сдвигающих и сил удерживающих на поверхности скольжения в момент обрушения откосов с боковыми гранями, удерживаемыми шайбами. При наличии

бокового распора за счет сил трения о боковые грани мощность призмы обрушения неодинакова по ширине стенда; в середине откоса она больше, а по боковым сечениям меньше. Поэтому сравнение сил сдвигающих и удерживающих производили не по одному сечению, а по всей площади поверхности скольжения. Как показал опыт моделирования, для необходимой точности расчетов практически достаточно по $^1/_5$ ширины модели отнести на боковые сечения и $^3/_5$ на среднее сечение. В этом случае уравнение предельного равновесия по поверхности скольжения будет

$$1=\frac{C\cdot \operatorname{tg}\rho\left(0{,}2A\sum N'+0{,}2A\sum N''+0{,}6A\sum N^{c}\right)+ K(0{,}2Al_1+0{,}2Al_2+0{,}6Al_c)+2S\tau}{C\left(0{,}2A\sum T'+0{,}2A\sum T''+0{,}6A\sum T^{c}\right)},$$

где C — масштаб векторов;

$\sum N'$, $\sum N''$, $\sum N^c$ — суммы нормальных составляющих по двум боковым и среднему профилю;

$\sum T'$, $\sum T''$, $\sum T^c$ — суммы касательных составляющих по боковым и среднему профилям;

l_1, l_2, l_c — длины поверхности скольжения по тем же профилям;

A — средняя ширина откоса (стенда);

$2S$ — площадь боковых граней призмы обрушения;

τ — среднее удельное сопротивление сдвигу по боковым граням.

В последнем уравнении все величины, кроме τ, известны. Решая его относительно τ, находим величину последнего для каждого откоса. Величина τ зависит от уплотнения материала, от мощности призмы обрушения и главным образом от характера контакта материала с боковой гранью.

4. Для того чтобы сравнить параметры обрушенного откоса с расчетными, необходимо дополнительное сопротивление по боковым граням и сцепление до высоты H_{90} (которое в расчетных методах не учитывается) пересчитать на приведенное сцепление по поверхности скольжения

$$K_{пр}=\frac{2\tau S+AKl_c}{Al_1}, \qquad (175)$$

где $K_{пр}$ — приведенное сцепление;

l_1 — длина боковой поверхности скольжения;

l_c — среднее значение длины поверхности скольжения.

5. Для характеристик $K_{пр}$, ρ и γ данной высоты откоса по графику (см. рис. 153) определялся угол расчетного откоса и сравнивался с фактическим.

В течение всего периода моделирования систематически определялись физико-механические свойства эквивалентных материалов.

Объемный вес эквивалентного материала при том уплотнении, при котором закладывались откосы, получился равным 2,26 *г/см*³. При определении характеристик ρ и K материала неоднократно определялась зависимость этих величин от уплотняющей нагрузки. Угол внутреннего трения практически не зависит от уплотняющей нагрузки и получился равным 34°. Сцепление при уплотнении до 2,0 *кГ/см*² заметно зависит от уплотнения, а при уплотнении от 2 до 4 *кГ/см*² практически остается неизменным и колеблется в пределах 6—7 *Г/см*². Уплотнение материала при закладке откоса соответствовало примерно 2—3 *кГ/см*² и поэтому физико-механические свойства материала откосов были равны: $\gamma=2{,}26$ *Г/см*³, $K=6$—7 *Г/см*². Угол трения материала по плексигласу равен 23—24° и сцепление 1—2 *Г/см*²; угол трения по контакту бумаги с графитом — плексиглас равен 13—15°.

Всего было произведено 75 обрушений откосов, из которых в 61 случае получились качественные результаты.

Из забракованных обрушений больше половины относится к методическим поискам начального периода моделирования.

Плоских откосов обрушено 31, выпуклых 23 и вогнутых 7. Максимальная высота обрушаемых откосов составляла 125 *см*, минимальная 53 *см*. Максимальный угол откоса при обрушении был 64°30′, минимальный 46°. Во всех испытаниях, кроме 11 последних, проведенных в 1962 г., за счет бокового распора возникли силы трения по боковым граням, которые являются дополнительным сопротивлением для обрушения откоса. Так, для контакта плексиглас—смесь среднее сопротивление сдвигу, обусловленное силами трения, находилось в пределах 8—15 *Г/см*² при среднем его значении $\tau=11{,}8$ *Г/см*²; для контакта графитовая бумага—плексиглас $\tau=5{,}0$ *Г/см*² при колебании от 0 до 10 *Г/см*² и для контакта плексиглас—ролики $\tau=1$ *Г/см*² при колебании от 0 до 3,5 *Г/см*².

Приведенное сцепление, в котором учитывается сопротивление сдвигу по боковым граням, отнесенное к поверхности скольжения, и по которому производится сравнение ф ктических откосов с расчетными, определяли по формулам (175).

Для контакта плексиглас—эквивалентный материал приведенное сцепление получалось в среднем 10,7 *Г/см*² при колебании от 9,5 до 11,4 *Г/см*², для контакта графитовая бумага—плексиглас $K=8{,}5$ *Г/см*² с колебаниями от 7 до 10 *Г/см*² и для роликового контакта $K=7{,}9$ *Г/см*².

Измерение деформаций откоса в период обрушения проводилось в 23 случаях. Почти во всех случаях получалась одинаковая картина деформирования откоса: по мере увеличения угла откоса происходит незначительная деформация; при угле на 1—2,5° меньше предельного угла откоса при обрушении происходит

мгновенный скачок деформаций величиной порядка 0,5—2,5 *мм*, свидетельствующий о существенной подвижке массива в призме обрушения; дальше при увеличении угла откоса деформаций массива не наблюдается вплоть до обрушения. Откосы, оставленные после скачка деформации на продолжительное время, в неподвижном состоянии не обрушаются. Применительно к натуре для борта высотой 50 *м* скачок деформации выражается величинами 2,5—13 *см*, т. е. проявляется на верхней площадке борта хорошо видимыми трещинами.

Одной из основных задач моделирования откосов являлось выяснение формы поверхности скольжения. Из 61 испытаний в 7 случаях по разным причинам не удалось задокументировать поверхность скольжения.

В испытаниях, где действовали силы трения, обусловленные боковым распором, трещина отрыва в плане имеет вогнутую форму: т. е. мощность призмы обрушения по среднему сечению больше, чем по боковым.

В разрезе поверхность скольжения по форме близка к круглоцилиндрической во всех испытаниях, кроме 5, в которых поверхность скольжения по форме близка к плоскости. Почти во всех испытаниях поверхность скольжения в верхней части начинается вертикальной трещиной отрыва. Если на разрезах обрушения откосов построить поверхности скольжения согласно расчетным методам, получается, что в 25 испытаниях фактическую поверхность скольжения можно считать совпадающей с расчетной; в 15 испытаниях фактическая поверхность скольжения довольно близка к расчетной и в 14 испытаниях она не совпадает с расчетной. В испытаниях, где поверхность скольжения не совпадает с расчетной, фактическая мощность призмы обрушения почти в равной мере больше или меньше расчетной мощности призмы обрушения.

На рис. 169 для примера каждого случая расположения поверхности скольжения даны профили обрушенных откосов. Штрихпунктирной линией показано положение расчетной поверхности скольжения, сплошной — фактическое положение поверхности скольжения по среднему профилю, пунктирной — фактическое положение поверхности скольжения по боковым профилям.

Сравнение углов обрушенных откосов с углами откосов, полученных по расчетным методам для соответствующей высоты и физико-механических характеристик, показало, что в подавляющем большинстве испытаний фактически полученные откосы круче теоретических. Так, плоские фактические откосы круче расчетных в среднем на 2°30′ при колебании от 0 до 5°30′; выпуклые — на 2°30′ при колебании от 1 до 6°; вогнутые — на 2° при колебании от 1 до 4°. Из всего цикла испытаний фактические откосы положе расчетных на 1° получились лишь в трех случаях.

Наибольшее отклонение фактических откосов от расчетных наблюдалось в трех испытаниях, где фактическая поверхность

скольжения не совпадает с расчетной. Для таких испытаний фактические углы больше теоретических в среднем на 3°30′. Наилуч-

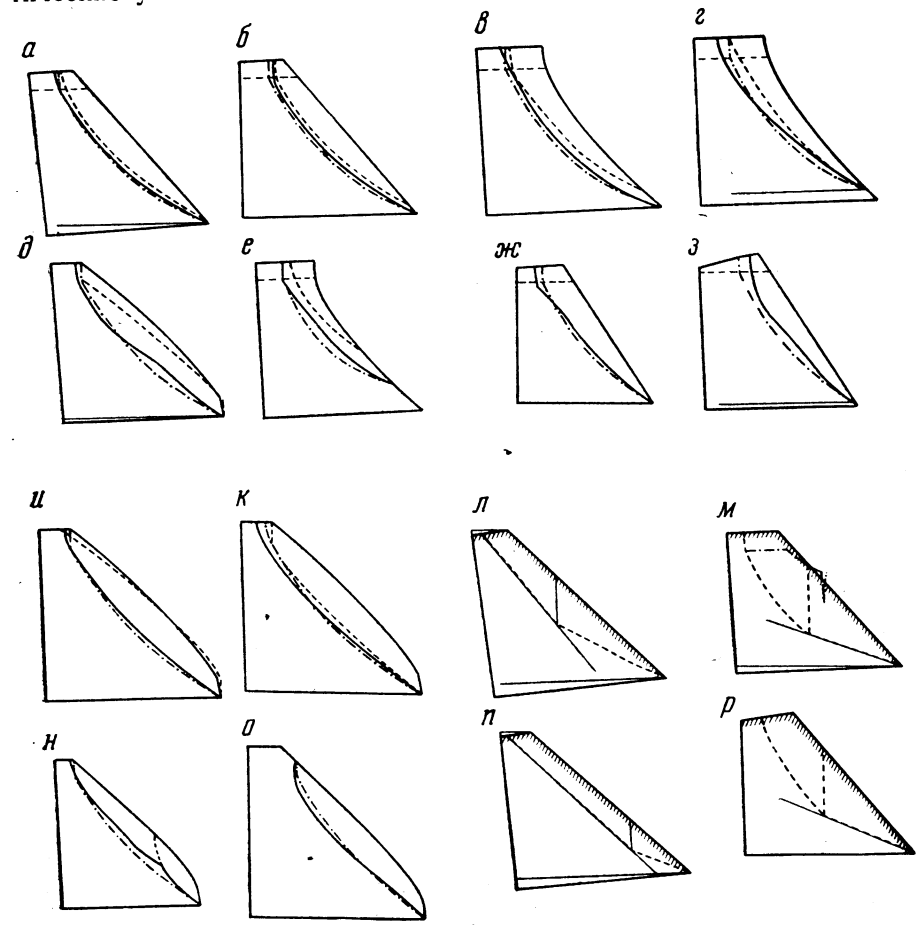


Рис. 169. Поперечные разрезы призм обрушения:

а — $H=117$ *см*; $\alpha_р=48°30'$; $\alpha_{расч}=47°$; $K_{пр}=7{,}4$ *Г/см²*; *б* — $H=119$ *см*; $\alpha_р=50°$; $\alpha_{расч}=48°$; $K_{пр}=7{,}9$ *Г/см²*; *в* — $H=123$ *см*; $\alpha=56°$; $\alpha_{расч}=55°$; $K_{пр}=114$ *Г/см²*; *г* — $H=117$ *см*, $\alpha_р=57°$; $\alpha_{расч}=54°$; $K=9{,}6$ *Г/см²*; *д* — $H=121$ *см*, $\alpha_ф=48°$, $\alpha_{расч}=45°30'$, $K_{пр}=8{,}1$ *Г/см²*; *е* — $H=97$ *см*, $\alpha_ф=58°$, $\alpha_{расч}=56°30'$, $K_{пр}=7{,}9$ *Г/см²*; *ж* — $H=101$ *см*, $\alpha_ф=56°30'$; $\alpha_{расч}=55°$, $K_{пр}=109$ *Г/см²*; *з* — $H=111$ *см*, $\alpha_ф=56°30'$, $\alpha_{расч}=54°00'$; *и* — $H=125$ *см*, $\alpha_ф=49°30'$, $\alpha_{расч}=48°$, $K_{пр}=9{,}8$ *Г/см²*; *к* — $H=123$ *см*, $\alpha_ф=50°$, $\alpha_{расч}=47°30'$, $K_{пр}=9{,}0$ *Г/см²*; *л* — $H=115$ *см*, $\alpha=44°30'$, $\beta=52°30'$, $\theta=23°$, $\rho'=24°$, $K'=2$ *Г/см²*; *м* — $H=102$ *см*, $\alpha=46°$, $\beta=18°$, $\theta=21°$, $\rho'=23°$, $K'=2{,}0$ *Г/см²*; *н* — $H=107$ *см*, $\alpha_ф=50°30'$, $\alpha_{расч}=47°30'$, о — $H=116$ *см*, $\alpha_ф=52°$, $\alpha_{раб}=49°$, $K_{пр}=9{,}8$ *Г/см²*; *п* — $H=112$ *см*, $\alpha=45°30'$ р — $H=106$ *см*, $\alpha=48°30'$, $\beta=21°30'$, $\theta=24°0'$, $\rho'=24°$, $K=20$ *Г/см²*

шее совпадение фактических и расчетных откосов получилось в испытаниях, где фактические и расчетные поверхности совпадают и отсутствует боковой распор.

Сравнение обрушенных откосов, рассчитанных методами П. Д. Лобасова и В. Феллениуса, как наиболее приемлемыми из других методов, показало, что обрушенные откосы чаще оказываются положе рассчитанных на 1—2°.

Так, в испытании 9/62 откос высотой 110 *см* обрушился при угле наклона 46°30′, а по расчетным методам П. Д. Лобасова и В. Феллениуса он должен обрушиться при угле 48°30′ и по методу Г. Л. Фисенко — при угле наклона 45°30′, т. е. моделирование показало, что методы П. Д. Лобасова и В. Феллениуса являются пригодными для расчетов устойчивости откосов и дают несколько завышенные значения углов откосов против действительно устойчивых.

Таким образом, моделирование изотропных откосов показало хорошую сходимость фактических углов обрушаемых откосов с рассчитанными для этих условий углами по методам расчета для плоского и выпуклого профилей, разработанных во ВНИМИ, и тем самым подтвердило правильность этих методов. Некоторое увеличение фактических углов откосов на моделях против расчетных получилось за счет влияния бокового распора, который уменьшает толщину призмы обрушения по боковым граням.

Наряду с моделированием откосов в изотропной среде в лаборатории Уральского филиала ВНИМИ проводилось моделирование откосов в анизотропной среде. Основной целью моделирования было выявление характера обрушения откосов и выяснение формы и положения поверхности обрушения.

Плоскостями ослабления в массиве служила триацетатная пленка; механические свойства контакта пленки с материалом модели были $\rho'=23—24°$ и $K'=0—2$ *Г/см²*; при покрытии пленки слоем графита характеристики прочности снижались до $\rho'=13—15°$ и $K'=0$.

Моделирование проводилось при двух положениях плоскости ослабления: 1) крутое падение плоскости ослабления в сторону подошвы откоса, 2) пологое залегание плоскости в подошву откоса. Всего было обрушено 19 откосов: из них 11 — при крутом падении плоскости ослабления и 8 — при пологом.

Из 11 откосов с крутым залеганием плоскости ослабления 3 откоса были с выпуклым профилем; характер обрушения и параметры обрушенных откосов выпуклого профиля не отличались от плоских откосов. Обрушение откоса происходит в виде оседания верхней части на 10—12 *см* вдоль плоскости ослабления и горизонтального выпирания нижней части откоса; в средней части откоса наблюдается почти вертикальная (чаще с наклоном в сторону массива) плоскость скола. Поверхность скольжения в этих моделях в верхней части совпадает с плоскостью ослабления, а в нижней по форме близка к плоскости или круглоцилиндрической поверхности с весьма большим радиусом. На границе специального и обыкновенного предельных состояний наблюдается излом поверхности скольжения. Угол излома поверхности скольже-

ния колеблется в пределах 15—23°. При уменьшении угла трения по плоскости ослабления угол излома увеличивается.

При пологом залегании плоскости ослабления обрушение откоса происходило при угле наклона этой плоскости $\beta=16—21°$ для $\rho'=23—24°$ и $\beta=8—9°$ для $\rho'=13°$ и проявилось оседанием верхней части на 10—15 *см* и выпиранием нижней части откоса с наличием четко выраженной вертикальной плоскости скола в средней части откоса. Поверхность скольжения в верхней части откоса близка к круглоцилиндрической, в нижней — идет по плоскости ослабления как для выпуклых, так и для плоских откосов. Призма обрушения характеризуется большой мощностью, равной в средней части откоса 35—45 *см* при высоте откоса в пределах 93—118 *см*. У выпуклых откосов поверхность обрушения в верхней части располагается заметно ближе к бровке откоса, чем у плоских. Угол излома поверхности обрушения на границе призмы давления и призмы упора получился в пределах 21—36°.

Зависимость угла излома θ от величины угла трения по плоскости ослабления здесь выражается более резко, чем при крутом падении; так, для $\rho'=23—24°$ в среднем $\theta=25°$, а для $\rho'=13°$ $\theta=34°$.

Условия устойчивости откосов с плоскостями ослабления значительно хуже, чем в изотропной среде. При высоте 93—118 *см* анизотропные откосы находятся в предельном равновесии при углах 48—39°, а изотропные — при углах откосов 55—50°.

Начатые в Уральском филиале ВНИМИ В. Т. Сапожниковым исследования устойчивости бортов карьеров на моделях из эквивалентных материалов продолжены во ВНИМИ по более широкой программе Ю. С. Козловым, И. И. Ермаковым, В. В. Голициным и А. М. Мочаловым.

В качестве основного материала для моделей используется смесь чугунной дроби и песка, слегка смоченная машинным маслом; расчетные характеристики этой смеси находятся в пределах $\gamma=3{,}5—4{,}3$; $K=1—3{,}6$ *Г/см²*; $\rho=32—35°$. Ослабленные контакты моделируются молотой слюдой по органическому стеклу $\rho=13—25°$, $K'=1$ *Г/см²*.

На моделях решаются разнообразные задачи: плоские задачи при наличии выпирания основания и при различном положении поверхностей ослабления, объемные задачи для карьеров круглой формы, подработка бортов подземными горными выработками, влияние трещиноватости на устойчивость бортов, самообрушение бортов при отработке вскрыши.

Сравнение предельных параметров откосов на моделях с расчетными данными в плоской задаче показывает их хорошую сходимость, что дает право с доверием относиться к данным, полученным на моделях при сложном напряженном состоянии.

§ 3. Ориентировочные величины углов наклона бортов карьеров

При отсутствии данных детального изучения условий устойчивости бортов карьеров (например, при составлении технико-экономического обоснования детальной разведки или при составлении комплексного проекта освоения района) величины углов наклона бортов карьеров можно устанавливать ориентировочно, исходя из общих свойств прочности горных пород, изложенных во второй части.

Для определения ориентировочных величин углов наклона бортов проектируемых карьеров необходимо знать литологический состав пород, залегание слоев пород и тектонику месторождения.

Если месторождение сложено крепкими породами, то при глубине карьера 250—300 *м* углы наклона бортов можно принимать максимальными, технически допустимыми, определяемыми по формуле (160) проф. Б. П. Боголюбова. Углы откосов уступов при этом определятся в соответствии с табл. 26; для лежачего бока при крутом залегании слоев пород ни в коем случае не допускаются углы откосов уступов более углов падения слоев или углов падения тектонических нарушений, часто расположенных параллельно залеганию рудных тел.

При глубине более 300 *м* максимальные технически допустимые углы наклона можно принимать только для бортов, сложенных крепкими слаботрещиноватыми породами.

Бортам карьеров, сложенным крепкими породами интенсивной трещиноватости, не следует придавать углы более 45°.

При падении слоев и дизъюнктивных нарушений в сторону выработки под углами 15—25° углы откосов уступов можно принимать в соответствии с табл. 26, а угол наклона борта не должен превышать углов падения слоев и дизъюнктивных нарушений; при этом необходимо иметь в виду, что отдельные участки транспортных берм, располагаемых на подрезанных поверхностях ослабления, необходимо укреплять сваями.

На месторождениях, сложенных породами средней прочности при небольших глубинах (100—150 *м*), общие углы наклона бортов также могут достигать максимальных технически допустимых величин, устанавливаемых по углам откосов уступов, ширине берм и высоте уступов. При глубинах более 150 *м* углы наклона бортов постепенно выполаживаются и при глубине 500 *м* не должны превышать 30° для лежачего бока и 38° — для висячего; бóльшая дифференциация ориентировочных величин углов наклона бортов в зависимости от глубины карьера без учета других факторов (прочность пород, степень их трещиноватости и др.) была бы неоправданной.

Еще большая изменчивость углов наклона бортов карьеров получается на месторождениях, сложенных слабыми глинистыми породами. Для этих месторождений можно более или менее уве-

ренно рекомендовать углы до 30° при отсутствии жирных глин в средней и нижней части бортов; при пологом падении слоев в сторону выемки угол наклона борта выполаживается до 25°.

При наличии в бортах слоев жирных глин, характеризующихся низким коэффициентом внутреннего трения и наличием порового давления (вследствие большой величины давления набухания), углы наклона бортов могут в значительной степени выполаживаться; приведенные в табл. 34 ориентировочные углы для этой группы месторождений (20—25°) необходимо рассматривать как максимальные.

Таблица 34

Ориентировочные углы наклона бортов карьеров

Группа и общая характеристика пород, слагающих борта карьеров	Геологические условия и основные факторы, оказывающие влияние на углы наклона бортов	Ориентировочные величины углов наклона, *град*
I[а]. Преимущественно крепкие слаботрещиноватые породы	Ширина берм, высота уступов (одиночных или сдвоенных) и угол их откосов, зависящие от углов падения в сторону карьера поверхностей ослабления (слоистости, сланцеватости, тектонических нарушений и крупных трещин)	До 60
I[б]. Крепкие породы интенсивной трещиноватости	При отсутствии неблагоприятно ориентированных поверхностей ослабления	40—45
II. Наряду с крепкими участвуют хлоритовые, серицитовые и талько-хлоритовые сланцы, выветрелые и уплотненные песчано-глинистые породы	Борт лежачего бока при падении слоев под углом более 40° и при глубине более 200 *м*	30—40
	При отсутствии поверхностей ослабления большого протяжения, падающих в сторону карьера	38—45
	При наличии поверхностей ослабления, падающих в сторону карьера	30—40
	При мульдообразном залегании слоев	25—30
III. Борта или их участки сложены рыхлыми (слабоуплотненными) и несвязными осадочными или полностью дезинтегрированными (выветрелыми) породами	Преобладают песчано-гравийные, меловые, выветрелые изверженные и другие хорошо дренируемые отложения; в нижней части бортов пластичных глин и поверхностей ослабления нет	25—30
	В средней или нижней части борта имеются горизонтальные или согласнопадающие поверхности ослабления или слои пластичных глин; наличие в основании откоса пластичных глин	20—25

При наличии в основании бортов слоев жирных глин углы наклона целесообразно устанавливать путем расчета на

любых стадиях проектирования, так как ориентировочные углы в этих условиях могут существенно отличаться от расчетных.

§ 4. Ориентировочные величины углов откосов устойчивых отвалов и их высоты

При размещении отвалов твердых и несвязных пород на устойчивом горизонтальном основании их высота при естественном угле откоса (34—36°) по условиям устойчивости практически может быть неограниченной.

Условием устойчивости основания отвалов является средняя величина сопротивления сдвигу, которая, будучи выражена в $T/м^2$, должна составлять не менее 0,4 высоты отвала, выраженной в метрах.

Отвалы, размещаемые на наклонном слоистом основании, для обеспечения устойчивости должны располагаться ярусами с общим углом разгона 25—30°; высота нижнего яруса не должна превышать 25 *м*; при наличии на склонах увлажненных суглинков высота первого яруса не должна превышать 15 *м*.

Отвалы слабых песчано-глинистых пород на устойчивом основании необходимо размещать ярусами с общим углом разгона ярусов 18—25° в зависимости от общей высоты отвала, состава и влажности отвальных пород.

Высота одного яруса отвала глинистых пород с углом естественного откоса также в большой степени зависит от их состава и влажности.

Изменяемость предельной высоты одного яруса отвала иллюстрируется табл. 35, в которой приведены фактические данные об устойчивых участках откосов отвалов, располагающихся рядом с оползневыми участками и характеризующих предельные высоты ярусов.

При определении ориентировочной высоты яруса с углом откоса менее угла естественного откоса можно пользоваться зависимостью

$$H_1 = H_\alpha \frac{\operatorname{tg} \alpha}{\operatorname{tg} \alpha_1}, \qquad (176)$$

где α и H_α — угол естественного откоса и его предельная высота;

α_1 и H_1 — угол и высота откоса с углом менее естественного.

Этой же зависимостью можно пользоваться и при определении высоты или угла откоса по параметрам деформирующегося (предельного) откоса с углом α_1, не равным углу естественного откоса; в этом случае высота или $\operatorname{tg} \alpha_1$ устойчивого откоса для обеспечения минимального коэффициента запаса устойчивости должна быть на 10—15% меньше, чем получается по зависимости (176).

Таблица 35

Характеристика устойчивых участков откосов отвалов

Месторождения	Состав отвальных пород	Влажность, %	Угол откоса, *град*	Высота яруса, *м*
Ермолаевское буроугольное	Суглинки и бурые глины	23	34—36	23
То же	То же	26	34—36	10
„Устье-Брынкино"	Моренные суглинки и глины	19	35	23
То же	То же	21	35	17
Никопольское марганцевое	Мергельные и гидрослюдистые глины с включением песка	31	35	27
То же	То же	32	31	35
„	„	34	36	23
„	„	34	24	38
Лебединское (КМА)	Мел	30	35—37	36
То же	То же	26,5	35—37	45
„	Суглинок	18,0	34—35	32

ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА НЕКОТОРЫХ ГОРНЫХ ПОРОД

Литологическое наименование горных пород	Физико-механические характеристики					Размер элементарного структурного блока, *м*
	Объемный вес, *г/см³*	Удельный вес, *Г/см³*	Влажность, %	Сцепление в образце, *кГ/см²*	Угол внутреннего трения, *град*	
I. Крепкие породы						
Изверженные ($K>300$ *кГ/см²*)						
Гранитоиды	2,62			425	36,5	
Кварцевые порфиры	2,56	2,64	0,36	395	37	0,40
Сиениты	2,76		0,37	363	37	0,40
Гранодиориты	2,63	2,78	0,39	560	32	0,50
Порфириты	3,02		0,50	365	33	0,45
Габбро-диориты	2,70			373	35,5	
Габбро	3,11			300	36	
Габбро-диабазы	2,86			353	32	0,80
Диабазы	2,95			460	30	
Перидотиты	2,80			323	36	0,70
Пироксениты	3,23			350	35,5	
Метаморфические и осадочные ($K>200$ *кГ/см²*)						
Кварциты	2,64	2,84	0,50	350—700	36	0,5—0,7
Джеспилиты	3,43			360	36	0,40
Роговики	2,58			305	35	0,40
Роговики гидрогематитовые	3,17			300	32	0,40
Сланцы кремнисто-глинистые	2,82		0,24	380	33,5	0,30
Сланцы кварцево-хлорито-серицитовые	2,73			210	33	0,30
Филлиты, туффиты	2,87			300	28	0,40
Серпентиниты	2,7—3,1		0,40	230—300	35	0,6—1,0
Скарны	2,75		0,28	587	31	0,4—0,5
Кварцевые песчаники	2,50	2,65	2,50	250	35	0,5—1,5
Известняки	2,70	2,77	0,14	220	33	0,3—1,0
II. Породы средней прочности						
Изверженные слабовыветрелые ($K<300$ *кГ/см²*)						
Гранитоиды	2,56			220	36,5	0,3—0,5
Кварцевые порфиры	2,50	2,64	0,20	227	34	0,3—0,5
Сиениты, сиенито-диориты, диориты	2,50	2,66	1,00	205	32	0,3—0,5
Гранодиориты, гранодиорит-порфиры	2,57	2,75	1,05	285	36,5	0,50
Порфириты	3,00			260	37	
Габбро-диориты	3,00			210	36	
Габбро	2,83			275	35	
Габбро-диабазы	2,98			260	36,5	
Диабазы	2,75			200—260	36—37	
Спилиты				240	36	0,70

Литологическое наименование горных пород	Физико-механические характеристики					Размер элементарного структурного блока, *м*
	Объемный вес, *г/см³*	Удельный вес, *Г/см³*	Влажность, %	Сцепление в образце, *кГ/см²*	Угол внутреннего трения, *град*	
Изверженные выветрелые ($K = 20—200$ *кГ/см²*)						
Сиенито-диориты				120	32	
Кератофиры				165	33	
Гранодиорит-порфиры	2,40	2,74	0,90	180	36	0,3—0,5
Порфириты				170	31	
Габбро-диориты	2,66			180	36	
Диабазы				70	34	
Метаморфические ($K = 20—200$ *кГ/см²*)						
Кварциты	2,61	2,78	0,40	165	34	0,5—0,7
Кварциты каолинизированные	2,24	2,59	0,94	48	30	0,2—0,3
Сланцы песчано-глинистые	2,78			180	37	0,40
Сланцы хлорито-кварцевые и хлоритовые	2,86			140	35	0,30
Филлиты				152	27	0,30
Тальково-карбонатная порода	2,89			115	30	
Магнетиты	4,32			190	34	0,2—0,3
Серпентиниты выветрелые	2,50			84	34	0,2—0,3
Серпентиниты рассланцованные, сильновыветрелые	2,50			23	33	0,05—0,3
Осадочные ($K = 20—200$ *кГ/см²*)						
Известняки	2,44—2,67	2,83	0,1—4,0	140—165	27—32	0,3—0,8
Известняки выветрелые	2,37			73	32	
Песчаники аркозовые	2,46			175	38	
Песчаники глинистые	2,67			170	37	
Песчаники с карбонатным цементом	2,57	2,68	2,27	170	36	0,40
Песчаники с глинисто-железистым цементом	2,31	2,70	2,70	87	36	0,30
Песчаники	2,53	2,75		50—90	35	0,3—0,8
Алевролиты	2,51	2,72	4,00	35—70	33	0,35—0,7
Аргиллиты	2,45	2,80	8,00	40	29	0,2—0,45
Уголь	1,26—1,58		5,00	28	36	0,03—0,6
III. Слабые породы ($K<20$ кГ/см²)						
Сильно выветрелые						
Габбро-диориты	2,40			14,3	36	
Сланцы	2,12		18 0	1,2—13,6	26—30	
Песчаники				7,5	36	
Диабазы	2,07		19,6	3,2	34	
Доломиты, сидериты	2,00		31,6	1,39	32	

Литологическое наименование горных пород	Физико-механические характеристики					Размер элементарного структурного блока, *м*
	Объемный вес, *г/см³*	Удельный вес, *Г/см³*	Влажность, %	Сцепление в образце, *кГ/см²*	Угол внутреннего трения, *град*	
Осадочные						
Песчаники	2,11	2,65	11,0	11,0	35	
Алевролиты	2,13	2,48	20,0	3—17	31	
Аргиллиты	2,02	2,67	18,0	3—10	29	
Песок разнозернистый	2,04	2,65	16,5	0,0—0,24	35	
Песок среднезернистый	1,75	2,64	17,0	0,1—0,15	33—34	
Песок мелкозернистый	1,96	2,68	23,0	0,1—0,35	31—32	
Песок тонкозернистый	1,80	2,66	17,0	0,28	30	
Песок глинистый уплотненный	2,08	2,65	18,0	0,45—0,8	26—32	
Песок глинистый мелкозернистый	1,80		40,0	0,4—0,70	28—30	
Песок глинистый тонкозернистый	1,99	2,67	25,0	0,35—0,6	26—28	
Супесь	1,80	2,66	13,0	0,17	30—34	
Суглинок пылеватый лёссовидный	1,76	2,68	16,0	0,35—0,65	27—32	
Суглинок пылеватый	1,90	2,69	21,0	0,23—0,4	22—27	
Лёссы	1,76			1,05	29	
Мел трещиноватый	1,90	2,64	31	1,40	35	
Мел переотложенный	1,92	2,70	26	0,5	35	
Глина брекчиевидная	2,19		15	1,6—7,6	28	
Глина бокситовидная	2,20		13	1,25—4,1	27	
Глина опоковидная	1,64	2,55	46	1,55	23	
Глина песчаная	2,02	2,70	22	0,5—1,25	18—23	
Глина плотная	1,98	2,69	25	1,3—3,5	16—25	
Глина пестроцветная	1,96	2,70	27	0,8—1,5	14—18	
Глина коры выветривания	1,94	2,78	26	1,00	15—17	
Глина плотная пылеватая	1,96	2,70	25	0,6—1,75	9—15	
Глина плотная лигнитовая	1,96	2,43—2,98	30	1,75	13	
Глина жирная	1,91	2,64	26	0,50	9	

ЛИТЕРАТУРА

1. Авершин С. Г. Горные работы под сооружениями и водоемами. Углетехиздат, 1954.

2. Агу И. А., Ревазов М. А. Укрепление участка борта штангами и сваями. «Горный журнал», 1964, № 10.

3. Агу И. А., Ревазов М. А., Глозман Г. Р. Опыт укрепления бортов карьера цементацией. «Цветная металлургия», 1963, № 21.

4. Агу И. А. Некоторые результаты наблюдений за влиянием взрывных работ на устойчивость бортов карьеров. Сб. трудов ВНИМИ, XLV, изд. ВНИМИ, 1962.

5. Агу И. А. Наблюдения за влиянием взрывов на устойчивость бортов карьеров. Сб. «Обмен передовым опытом в маркшейдерском деле». ГОСИНТИ, 1964.

6. Акимов А. А. Основные положения по укреплению грунтов электросиликатизацией. Изд. НИИ по строительству в Ростове-на-Дону, 1961.

7. Артемьев А. В. Опыт применения системы горизонтальных дренажных скважин на Лебединском карьере. Сб. «Совершенствование добычи и обогащения железных руд Курской магнитной аномалии». ГОСИНТИ, 1963.

8. Бабков В. Ф., Орнатский Н. В., Маслов Н. Н., Иванов Н. Н. Вопросы дорожного строительства на V международном конгрессе по механике грунтов и фундаментостроению. Автотрансиздат, 1963.

9. Барченков В. И., Бастан П. П. Дренаж Сибайских карьеров. «Горный журнал», 1959, № 6.

10. Барон Л. И., Логунов Б. М., Позин Е. З. Определение свойств горных пород. Госгортехиздат, 1962.

11. Белоусов В. В. Основные вопросы геотектоники. Госгеолтехиздат, 1954.

12. Беляев Н. М. Сопротивление материалов. Гостехиздат, 1949.

13. Бернацкий Л. Н. Прикладная геотехника. Трансжелдориздат, 1935.

14. Бишоп А., Хенкель Д. Определение свойств грунтов в трехосных испытаниях. Госстройиздат, 1961.

15. Борисов Д. Ф. Уточнение методики определения границ открытых работ при конкретном проектировании. Записки ЛГИ, т. XXXVI, вып. 1, изд. ЛГИ, 1958.

16. Бутырин С. И. Борьба с оползнями при строительстве Ермолаевского разреза. Сб. «Проектирование и строительство угольных предприятий», № 6. ЦИТИ. Углетехиздат, 1958.

17. Бочевер Ф. М., Веригин Н. Н. Методическое пособие по расчету эксплуатационных запасов подземных вод для водоснабжения. Госстройиздат, 1961.

18. Веселков В. И., Мочалов А. М. Деформация бортов и уступов на карьерах Никополь-Марганцевого бассейна. Сб. трудов ВНИМИ, XLIII, изд. ВНИМИ, 1961.

19. Веселков В. И. Определение коэффициента разупрочнения и сопротивления сдвигу по контактам в глинистых породах. Сб. трудов ВНИМИ, LIX, изд. ВНИМИ, 1965.

20. Веселков В. И. Изучение деформаций ползучести глинистых пород. Сб. трудов ВНИМИ, LII, изд. ВНИМИ, 1964.

21. Веригин Н. Н. Движение грунтовых вод вблизи водохранилищ. Труды ВОДГЕО. Госстройиздат, 1958.

22. Вечеркин С. Г., Старцев Ю. Г. Оползание внутренних отвалов на Камышбурунском руднике. «Горный журнал», 1956, № 4.

23. Воробков Л. Н., Шестаков В. М. и др. Водопонижение в гидротехническом строительстве. Госстройиздат, 1960.

24. Вълев Г. С. Свлачища в открытите рудници у нас. Държавно издательство «Техника». София, 1959.

25. Герман А. П. Свод равновесия и оседание поверхности над горными выработками. Изв. АН СССР. ОТН, № 6, 1952.

26. Герсеванов Н. М. Основы динамики грунтовой массы. ОНТИ, 1937.

27. Герсеванов Н. М., Польшин Д. В. Теоретические основы механики грунтов. Стройиздат, 1948.

28. Голицын В. В. Нахождение параметров открытой разработки с обрушением пород моделированием. Изв. высш. учебн. завед. «Горный журнал», № 6, 1964.

29. Голицын В. В., Ревазов М. А., Бряков С. П. Расчеты устойчивости и искусственное укрепление участков уступов, подсеченных трещинами большого протяжения на Златоуст-Беловском карьере. Сб. трудов ВНИМИ, LIII. Изд-во «Недра», 1964.

30. Голушкевич С. С. Плоская задача теории предельного равновесия сыпучей среды. Гостехиздат, 1948.

31. Голушкевич С. С. Статика предельных состояний грунтовых масс. Гостехтеоретиздат, 1957.

32. Гольдштейн М. Н. Механические свойства грунтов. Госстройиздат, 1952.

33. Гольдштейн М. Н. О прочности глинистых грунтов. Сб. «Основания, фундаменты и механика грунтов», Днепропетровское кн. изд-во, № 3, 1961.

34. Гольдштейн М. Н., Бабицкая С. С., Мизюмский В. А. Методика испытаний грунтов на ползучесть и длительную прочность. «Вопросы геотехники». Сб. 5. Днепропетровское кн. изд-во, 1962.

35. Демин А. М. Устойчивость откосов внешних отвалов. Сб. «Вопросы открытой разработки угольных месторождений». Углетехиздат, 1960.

36. Демин А. М. Применение теории предельного равновесия к расчету устойчивости породных отвалов. «Уголь», 1957, № 9.

37. Денисов Н. Я. К теории оползневых процессов. Доклады АН СССР. 1946, т. 54, № 8.

38. Денисов Н. Я. Строительные свойства лёсса и лёссовидных суглинков. Изд. 2. Госстройиздат, 1953.

39. Длин А. М. Математическая статистика в технике. Изд-во «Советская наука». 1958.

40. Дранников А. М. Мостовые отвалы и меры, обеспечивающие их устойчивость. Изд. КГУ, НТО горное, Киев, 1954.

41. Дранников А. М. Управление высокими отвалами при разработке вскрыши транспортно-отвальными мостами. «Уголь Украины», 1958, № 4.

42. Емельянова Е. П. Методическое руководство по стационарному изучению оползней. Госгеолтехиздат, 1956.

43. Емельянова Е. П. О влиянии прочности горных пород и ее изменения на оползневые процессы. Сб. «Вопросы гидрогеологии и инженерной геологии», № 17. Госгеолтехиздат, 1959.

44. Ермаков И. И. Испытания скальных пород на срез. Сб. трудов ВНИМИ, XXXVIII, изд. ВНИМИ, 1960.

45. Ермаков И. И. О влиянии кривизны борта на его устойчивость. Сб. трудов ВНИМИ, LII, изд. ВНИМИ, 1964.

46. Ермаков И. И. О влиянии трещиноватости горных пород на устойчивость бортов карьеров. Сб. трудов ВНИМИ, LI, изд. ВНИМИ, 1964.

47. Залесский А. С., Леонов Ф. А., Скиргелло О. Б., Сиимс К. М. Опыт осушения углеразреза бесшахтным способом. «Уголь», 1951, № 2.

48. Звонарев Н. К. Номограммы для решения задач статики грунтовых масс. Сб. трудов ВНИМИ, XLVII, изд. ВНИМИ, 1962.

49. Звонарев Н. К. Обработка результатов лабораторных испытаний прочности грунтов. Сб. трудов ВНИМИ, LII, изд. ВНИМИ, 1964.

50. Звонарев Н. К. Методика обоснования величины коэффициента запаса устойчивости бортов карьеров. Сб. трудов ВНИМИ, LII, изд. ВНИМИ, 1964.

51. Золотарев Г. С. Классификация природных устойчивых откосов. Сб. «Вопросы гидрогеологии и инженерной геологии», № 12. Госгеолиздат, 1949.

52. Золотарев Г. С. Кора выветривания архейских пород Цейлона и ее инженерно-геологическое строение. Изв. высш. учебн. завед. «Геология и разведка», 1962, № 2.

53. Золотарев Н. Д. Основные вопросы проектирования карьеров. Изд. ЛГИ, 1963.

54. Иванов И. П., Мочалов А. М. Полевой метод испытаний на сдвиг неоднородных, слоистых и гравелистых грунтов в условиях естественного залегания. «Методы исследования механических свойств грунтов в условиях естественного залегания». (Доклады совещания) Днепропетровский облиздат, 1962.

55. Ильницкая Е. И. Определение сопротивления углей сдвигу и разрыву. Труды института горного дела, т. I, изд-во АН СССР, 1954.

56. Инженерно-геологические свойства горных пород и методы их изучения (Труды совещания 1957 г.). Изд-во АН СССР, 1962.

57. Иофин С. Л. Устойчивость бортов карьеров. Металлургиздат, 1953.

58. Истомина В. С. Фильтрационная устойчивость грунтов. Госстройиздат, 1957.

59. Казаковский Д. А. Сдвижение земной поверхности под влиянием горных разработок. Углетехиздат, 1953.

60. Камшилов В. В. Зависимость высоты внутренних отвалов от угла наклона их основания. Изв. высш. учебн. завед. «Горный журнал», № 6, 1958.

61. Карташов Ю. М. Лабораторные определения физико-механических свойств горных пород Яковлевского месторождения КМА для расчета давлений на крепь шахтных стволов. Сб. трудов ВНИМИ, XLVI, изд. ВНИМИ, 1962.

62. Ким Д. Н. Исследования структурного ослабления трещиноватых пород моделированием прочностных свойств в лабораторных условиях. В сб.: «Вопросы исследования горного давления и сдвижения пород». ИГД, Свердловск, 1963.

63. Клевцов И. А. Опыт инженерно-геологических исследований оползневых объектов в связи с проектированием противооползневых мероприятий, Труды семинара «Оползни и борьба с ними». Ставрополь, кн. изд-во, 1964.

64. Коган Я. Л. Методы полевого и лабораторного определения порового давления и оценка его влияния на устойчивость оползневых склонов. Труды семинара «Оползни и борьба с ними». Ставрополь, кн. изд-во, 1964.

65. Коломенский Н. В. Инженерная геология, ч. 2. Госгеолтехиздат, 1956.

66. Коломенский Н. В., Комаров И. С. Инженерная геология. Изд-во «Высшая школа», 1964.

67. Козленко П. Д. Расчет углов наклона бортов карьеров в условиях анизотропной среды. Сб. трудов ВНИМИ. XXXVIII, изд-во ВНИМИ, 1960.

68. Крашенинников Г. Ф. Условия накопления угленосных формаций СССР. Изд-во МГУ, 1957.

69. Крячко О. Ю. Расчет параметров бестранспортной системы разработки в зависимости от устойчивости внутренних отвалов в условиях Нико-

польского марганцевого бассейна. Сб. трудов ВНИМИ, XLII, изд. ВНИМИ, 1961.

70. Куваев Н. Н. Расчет устойчивости бортов карьеров, сложенных твердыми трещиноватыми породами. Сб. трудов ВНИМИ, XXXII, изд. ВНИМИ, 1958.

71. Куваев Н. Н. О сохраняемости ориентировки трещин на различных глубинах. Сб. трудов ВНИМИ, XXXIV. Госгортехиздат, 1960.

72. Куваев Н. Н. Роль трещиноватости в устойчивости откосов и требования к методике ее изучения. Сб. трудов ВНИМИ, LI, изд. ВНИМИ, 1964.

73. Кузнецов Г. Н. Определение механических свойств горных пород на малых образцах. Сб. «Вопросы разрушения и давления горных пород». Углетехиздат, 1955.

74. Кузнецов Г. Н. Механические свойства горных пород. Углетехиздат, 1947.

75. Кузнецов Г. Н., Будько М. Н. и др. Изучение проявлений горного давления на моделях. Углетехиздат, 1959.

76. Кузнецова Н. А., Шестаков В. М. Расчет оплывания песчаных откосов в пределах участка высачивания. Изв. АН СССР, № 4, 1958.

77. Ломизе Б. М. Нахождение опасной поверхности скольжения при расчете устойчивости откосов. «Гидротехническое строительство», 1954, № 2.

78. Ломтадзе В. Д. Об инженерно-геологической оценке угрожаемости обвальных явлений. Зап. ЛГИ, т. XXIII, 1949.

79. Ломтадзе В. Д. Методы лабораторных исследований физико-механических свойств песчаных и глинистых грунтов. Госгеолиздат, 1952.

80. Малюшицкий Ю. Н. К вопросу об устойчивости бортов карьеров. Углетехиздат, 1952.

81. Малюшицкий Ю. Н. Условия устойчивости бортов карьеров. Изд. АН УССР, 1957.

82. Малюшицкий Ю. Н. Методика лабораторных исследований и расчетов устойчивости углов отвальных откосов. Научные записки УкрНИИпроекта, Киев, 1961.

83. Маслов Н. Н. Условия устойчивости склонов и откосов в гидроэнергетическом строительстве. Гидроэнергоиздат, 1955.

84. Маслов Н. Н. Прикладная механика грунта. Машстройиздат, 1949.

85. Матвеев Б. В. Руководство по проведению испытаний объемной прочности на сжатие горных пород. Изд. ВНИМИ, 1962.

86. Матвеев Б. В. Механические испытания горных пород методом соосных пуансонов. Углетехиздат, 1956.

87. Мачак Г. Устойчивость откосов бортов и отвалов на буроугольных карьерах ГДР. ЦНИИТЭИ, М., 1963.

88. Мачак Г. Оползни в результате имеющихся поверхностей скольжения и контактов слоев в ледниковых отложениях. Сб. «Материалы совещания по вопросам изучения оползней и мер борьбы с ними». Изд-во Киевского университета, 1964.

89. Медведев К. Д. К вопросу определения устойчивых углов бортов карьера. «Горный журнал», 1956, № 6.

90. Мельников Н. В. Развитие горной науки в области открытой разработки месторождений в СССР. Госэнергоиздат, 1961.

91. Мельников Н. В. За дальнейший прогресс техники открытых горных работ. «Горный журнал», 1954, № 10.

92. Мельников Н. В. Горная наука. (Задачи в связи с развитием промышленности). Изд-во «Недра», 1964.

93. Методические указания по производству маркшейдерских наблюдений за оползневыми явлениями на угольных карьерах. ВНИМИ, Углетехиздат, 1953.

94. Методические указания по производству геологоразведочных работ. Госгеолиздат, 1957.

95. Мироненко В. А. Дренирование напорных водоносных грунтов при строительстве и эксплуатации карьеров. Сб. трудов ВНИМИ, XLV, изд. ВНИМИ, 1962.

96. Мироненко В. А. К вопросу об устойчивости обводненных песчаных откосов на карьерах КМА. Изв. высш. учебн. завед. «Геология и разведка», 1962, № 7.

97. Мироненко В. А. О применении горизонтальных скважин при дренировании карьеров. Сб. трудов ВНИМИ, XLVII, изд. ВНИМИ, 1962.

98. Никитин С. Н. К вопросу распознавания скрытого периода сдвижения пород в бортах карьеров. Сб. трудов Магнитогорск. горн.-мет. ин-та. Вып. 9, 1955.

99. Панюков П. Н. Краткий курс инженерной геологии. Углетехиздат, 1957.

100. Панюков П. Н. Инженерная геология. Госгортехиздат, 1962.

101. Пастухов Г. И. Оползни на угольных карьерах и борьба с ними. ЦИТИуглестрой, 1955.

102. Пашкевич А. В. и Голицын В. В. К вопросу о моделировании трещиноватого массива. Сб. трудов ВНИМИ, LI, изд. ВНИМИ, 1964.

103. Певзнер М. С., Скиргелло О. Б. Совершенствовать защиту месторождений от подземных вод. «Горный журнал», 1964, № 4.

104. Пельдяков И. С. Геология месторождений ископаемых углей. Углетехиздат, 1954.

105. Померанцев В. В. Об устойчивости бортов карьеров. «Горный журнал», 1956, № 12.

106. Пономарев И. П. Оползни на уральских разрезах. Углетехиздат, 1949.

107. Попов И. И. Опыт разработки угольных разрезов Волчанского месторождения. ЦИТИ угольной промышленности, 1955.

108. Попов И. И. Предупреждение оползней на угольных карьерах Северного Урала. ЦБТИ Свердловского СНХ, 1958.

109. Попов И. И. Условия устойчивости внутренних отвалов (Богословские карьеры). Изв. высш. учебн. завед. «Горный журнал», 1960, № 5.

110. Попов И. В. Инженерная геология. Изд-во МГУ, 1959.

111. Попов С. И. Деформации отвалов на открытых горных работах. «Горный журнал», 1945, № 7—8.

112. Попов С. И. Определение устойчивости бортов карьера. «Горный журнал», 1948, № 6.

113. Попов С. И. Выбор угла борта карьера в зависимости от его глубины. «Горный журнал», 1949, № 11.

114. Попов С. И. Номограмма для построения профиля борта карьера в сложных геологических условиях. Сб. трудов МГМИ, вып. 9, изд. МГМИ, 1955.

115. Попов С. И. Типы деформаций карьерных отвалов. Сб. трудов МГМИ, вып. 2, изд. МГМИ, 1945.

116. Попов С. И. Рациональный профиль бортов карьеров. Сб. трудов МГМИ, вып. 19, изд. МГМИ, 1959.

117. Попов С. И., Дудушкина К. И. Влияние времени на устойчивость уступов и бортов рудных карьеров. «Горный журнал», 1962, № 4.

118. Приклонский В. А. Грунтоведение, ч. I. Госгеолиздат, 1949.

119. Проблемы инженерной геологии. Сб. статей. Вып. 1. Под редакцией Г. С. Золотарева и В. А. Приклонского. Изд-во иностр. лит. М., 1958.

120. Проблемы инженерной геологии. Сб. статей. Вып. 2. Под редакцией Г. С. Золотарева и С. К. Максимова. Изд-во иностр. лит. М., 1960.

121. Протодьяконов М. М. Давление горных пород и рудничное крепление. Ч. I. Гос. научно-техн. горное изд-во, 1933.

122. Прохоров С. П. Требования к гидрогеологической изученности месторождений полезных ископаемых. Госгеолиздат, 1951.

123. Пустовойтова Т. К., Пашкевич А. В. К расчету предельной высоты отвалов на неустойчивом основании. Сб. трудов ВНИМИ, XLV, изд. ВНИМИ, 1962.

124. Пустовойтова Т. К. и Кагермазова С. В. Влияние структуры массива скальных пород на устойчивость бортов карьеров. Сб. трудов ВНИМИ, LI, изд. ВНИМИ, 1964.

125. Пустовойтова Т. К. Определение необходимого числа испытаний на сдвиг многослойной толщи пород при расчете устойчивости бортов карьеров. Сб. трудов ВНИМИ, LII, изд. ВНИМИ, 1964.

126. Ревазов М. А., Голицын В. В. Укрепление железобетонными сваями уступов карьера. «Цветная металлургия», 1964, № 10.

127. Ревазов М. А., Глозман Г. Р. Укрепление цементацией участка борта Кургашинканского карьера. «Цветная металлургия», 1964, № 17.

128. Ревазов М. А. Укрепление откосов скальных пород на карьерах. «Материалы IV Всесоюзного совещания по закреплению и уплотнению грунтов». Тбилиси, 1964.

129. Ревазов М. А. Определение дополнительного удерживающего усилия при искусственном укреплении скальных откосов. Сб. трудов ВНИМИ, LII, изд. ВНИМИ, 1964.

130. Рогозин И. С. Опыт исследования оползней песчано-глинистых пород. Труды Московского геологического управления, вып. 28, ГОНТИ, 1939.

131. Рогозин И. С. Вольские оползни. Труды лаборатории ГГП, т. XVIII. Изд-во АН СССР, 1958.

132. Рогозин И. С. Оползни Ульяновска и опыт борьбы с ними. Изд-во АН СССР, 1961.

133. Родионов Л. Е. Определение углов откоса рабочих уступов угольного разреза. Углетехиздат, 1956.

134. Родионов Г. В., Владимиров В. М. К обоснованию способа разработки грунтов обрушением. Сб. «Вопросы механизации открытых горных и земляных работ». Госгортехиздат, 1961.

135. Ржевский В. В. Строительство карьеров. Углетехиздат, 1958.

136. Ржевский В. В. Проектирование контуров карьера. Металлургиздат, 1956.

137. Роза С. А. Механика грунтов. Изд-во «Высшая школа», 1962.

138. Роза С. А. О влиянии ползучести скелета грунта в процессе консолидации. «Гидротехническое строительство», 1956, № 5.

139. Рудаков М. Л., Попов И. И., Ли А. П. Предупреждение оползней на карьерах. Госгортехиздат, 1960.

140. Рудаков М. Л., Трифонов И. А., Ли А. П. Устойчивость бортов некоторых карьеров Казахстана. ЦИНТИ. Сб. «Горнодобывающая промышленность Казахстана», № 5, 1960.

141. Руководство по лабораторному определению физико-механических характеристик грунтов при устройстве оснований сооружений. Госстройиздат, 1956.

142. Руководство по определению оптимальных углов наклона бортов карьеров и откосов отвалов. Изд. ВНИМИ, Л., 1962.

143. Руппенейт К. В. Некоторые вопросы механики горных пород. Углетехиздат, 1954.

144. Руппенейт К. В. Сжатие цилиндра между двумя шероховатыми жесткими плитами. Доклады АН СССР, т. 72, 1950, № 2.

145. Руппенейт К. В. Механические свойства горных пород. Углетехиздат, 1956.

146. Рухин Л. Б. Основы литологии. Гостоптехиздат, 1953.

147. Саваренский Ф. П. Инженерная геология. ГОНТИ, 1939.

148. Сапожников В. Т. Решение задачи об откосе выпуклого профиля. Сб. трудов ВНИМИ, XXXVIII, изд. ВНИМИ, 1960.

149. Сапожников В. Т. Графическое решение задач на предельное равновесие пластической среды. Сб. трудов ВНИМИ, XXXVI, изд. ВНИМИ, 1959.

150. Сапожников В. Т. Типовые паспорта прочности горных пород. Сб. трудов ВНИМИ, XXXVI, изд. ВНИМИ, 1959.

151. Сапожников В. Т., Фисенко Г. Л. Расчет откосов выпуклой формы. Сб. трудов ВНИМИ, XXXII, изд. ВНИМИ, 1958.

152. Сергеев Е. М. Общее грунтоведение. Изд-во МГУ, 1952.

153. Серпухов В. Й. и коллектив авторов. Курс общей геологии. Госгеолтехиздат, 1960.

154. Скворцов Г. Г. Внезапные оползневые деформации внутренних отвалов. «Горный журнал», 1959, № 9.

155. Скворцов Г. И., Прохоров С. П. Требования к инженерно-геологической изученности месторождений полезных ископаемых. Сб. «Гидрогеология и инженерная геология», № 18, 1959.

156. Скворцов Г. Г., Романовская Л. И. Инженерно-геологические прогнозы условий разработки месторождений твердых полезных ископаемых. Госгеолтехиздат, 1961.

157. Соколовский В. В. Статика сыпучей среды. Изд. АН СССР, 1942.

158. Соколовский В. В. Статика сыпучей среды. Гостехиздат, 1954.

159. Соколовский В. В. Статика сыпучей среды. Физматгиз, 1960.

160. Строительная механика в СССР 1917—1957 гг. Госстройиздат, 1957.

161. Сыроватко М. В. О роли инженерно-геологических факторов в развитии оползней при открытой разработке буроугольных месторождений. Сб. «Советская геология», № 56. Госгеолиздат, 1956.

162. Сыроватко М. В. Гидрогеология и инженерная геология при освоении угольных месторождений. Госгортехиздат, 1960.

163. Тейлор Д. Основы механики грунтов. Госстройиздат, 1960.

164. Терцаги К. Инженерная геология. ГОНТИ, 1939.

165. Троицкая М. Н. Новый способ расчета устойчивости откосов и склонов. Дориздат, 1951.

166. Трофименко Ю. Г. Полевые методы определения некоторых свойств грунтов. Труды семинара «Оползни и борьба с ними». Ставрополь, кн. изд-во, 1964.

167. Труды совещания по инженерно-геологическим свойствам горных пород и методам их изучения. М., 1956.

168. Туринцев Ю. И. К вопросу об устойчивости бортов Уральских меднорудных карьеров. «Безопасность труда в промышленности», 1959, № 10.

169. Туринцев Ю. И. Устойчивость бортов меднорудных карьеров. Труды ин-та Унипромедь, вып. 4, изд. Унипромеди, 1958.

170. Ушаков И. Н. Горная геометрия. Госгортехиздат, 1962.

171. Федоров И. В. Методы расчета устойчивости склонов и откосов. Госстройиздат, 1962.

172. Фелленниус В. Статика грунтов. Госстройиздат, 1933.

173. Фисенко Г. Л. Определение сцепления и коэффициента внутреннего трения полускальных горных пород Коркинского месторождения. Сб. трудов ВНИМИ, XXVII, Углетехиздат, 1953.

174. Фисенко Г. Л. Определение углов заоткоски бортов Коркинских угольных карьеров. Углетехиздат, 1953.

175. Фисенко Г. Л. Устойчивость бортов угольных карьеров. Углетехиздат, 1956.

176. Фисенко Г. Л. и Петухов И. М. К вопросу о распределении нагрузок на целик. Сб. трудов ВНИМИ, XXXII, изд. ВНИМИ, 1958.

177. Фисенко Г. Л., Иванов И. П., Мироненко В. А. К вопросу об устойчивости бортов Лебединского карьера КМА. «Шахтное строительство», 1959, № 7.

178. Фисенко Г. Л. Прочностные характеристики массива горных пород. Сб. «Механика горных пород и маркшейдерское дело». ЦИТИ угольной промышленности, 1959.

179. Фисенко Г. Л. О расчетах устойчивости бортов карьеров. Сб. трудов ВНИМИ, XXXIV. Госгортехиздат, 1960.

180. Фисенко Г. Л., Пашкевич А. В. К вопросу определения ширины призмы возможного обрушения карьеров. Сб. трудов ВНИМИ, XXXVI, изд. ВНИМИ, 1960.

181. Фисенко Г. Л., Иванов И. П., Мироненко В. А., Писанец Е. П. Об устойчивости бортов карьеров КМА. «Горный журнал», 1960, № 11.

182. Фисенко Г. Л. Задачи геолого-маркшейдерской службы по обеспечению устойчивости бортов карьеров. Сб. «Внедрение новой техники в маркшейдерском обслуживании горных предприятий». ГОСИНТИ, 1961.

183. Фисенко Г. Л. Об углах наклонов бортов карьеров в скальных породах. «Горный журнал», 1961, № 3.

184. Фисенко Г. Л. О методах расчета устойчивости бортов глубоких карьеров. Статья в сб. «Математические методы в горном деле». Ч. II, СО АН СССР. Новосибирск, 1963.

185. Фисенко Г. Л. Устойчивость бортов карьеров КМА. Сб. «Совершенствование добычи и обогащения железных руд Курской магнитной аномалии». ГОСИНТИ, М., 1963.

186. Фисенко Г. Л., Мироненко В. А. К вопросу открытой разработки обводненных месторождений без предварительного дренажа. «Шахтное строительство», 1963, № 9.

187. Фисенко Г. Л., Иванов И. П., Веселков В. И. Оползни и дренаж на карьерах Никопольского марганцевого бассейна. Сб. трудов ВНИМИ, LII, изд. ВНИМИ, 1964.

188. Фисенко Г. Л. Исследование пластических свойств грунтов при изучении оползней. Труды семинара «Оползни и борьба с ними». Ставрополь, кн. изд-во, 1964.

189. Фисенко Г. Л. Отработка вскрыши с использованием обрушения. Сб. «Обмен передовым опытом в маркшейдерском деле». ГОСИНТИ. М., 1964.

190. Фисенко Г. Л. Роль прочности и ползучести горных пород в формировании оползней. Сб. «Материалы совещания по вопросам изучения оползней и мер борьбы с ними». Изд-во Киевского университета, 1964.

191. Фисенко Г. Л. Оползни на карьерах и мероприятия по их предотвращению. Сб. «Материалы совещания по вопросам изучения оползней и мер борьбы с ними». Изд-во Киевского университета, 1964.

192. Флорин В. А. Основы механики грунтов. Т. II. Госстройиздат, 1961.

193. Цытович Н. А. Механика грунтов. Госстройиздат, 1951.

194. Чепик В. Ф. Методика определения давления набухания глинистых пород при взаимодействии их с водой. Труды семинара «Оползни и борьба с ними». Ставрополь, кн. изд-во, 1964.

195. Чугаев Р. Р. Расчет устойчивости земляных откосов и бетонных плотин на нескальном основании по методу круглоцилиндрических поверхностей обрушения. Госэнергоиздат, 1963.

196. Чугаев Р. Р. Расчет устойчивости земляных откосов по методу плоских поверхностей сдвига грунта. Изд-во «Энергия», 1964.

197. Шахунянц Г. М. Основы практического расчета свободных и поддерживающих откосов. Труды МИИТ, вып. 71, 1948.

198. Шестаков В. М., Кузнецова Н. А. Фильтрационная устойчивость песчаных откосов. Труды института ВОДГЕО, 1958.

199. Ясюнас Л. П. Об определении расчетного значения оползневого давления на поддерживающие сооружения. Труды Всесоюзн. НИИ жел. дор. стр-ва и проект., вып. 7, 1952.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Стр.

Введение 3

ЧАСТЬ ПЕРВАЯ

Общие сведения и геологические условия

Глава I. *Общие сведения* 6

§ 1. Горные породы — слоистая трещиноватая среда 6
§ 2. Основные сведения о напряжениях 7
§ 3. Условия предельного равновесия горных пород 12

Глава II. *Горные породы и их изменяемость в природе* 17

§ 1. Классификация горных пород по их устойчивости в бортах карьеров 17
§ 2. Зависимость свойств пород от их состояния и условий образования 21
§ 3. Влияние тектоники и метаморфизма на прочность массива пород 23
§ 4. Выветривание и разуплотнение пород 25
§ 5. Инженерно-геологические комплексы пород 28

Глава III. *Основные условия устойчивости откосов горных пород* 29

§ 1. Условия равновесия в откосах несвязных горных пород . . 29
§ 2. Условия равновесия в откосах горных пород средней крепости и слабых 31
§ 3. Условия устойчивости фильтрующих откосов 33

Глава IV. *Факторы, влияющие на устойчивость уступов и бортов карьеров* 36

§ 1. Общая характеристика факторов 36
§ 2. Геологические факторы 37
§ 3. Гидрогеологические факторы 40
§ 4. Климатические условия 44
§ 5. Горнотехнические факторы 45

Глава V. *Классификация инженерно-геологических комплексов горных пород по условиям устойчивости бортов карьеров* . . . 46

§ 1. Основные положения классификации 46
§ 2. Комплексы первой группы 49
§ 3. Комплексы второй группы 55
§ 4. Комплексы третьей группы 60

Глава VI. *Изучение инженерно-геологических условий месторождений, подлежащих разработке открытым способом* 67

§ 1. Общие соображения 67
§ 2. Количество и глубина инженерно-геологических скважин . . 70
§ 3. Отбор образцов и их количество 75
§ 4. Изучение трещиноватости горных пород 80
§ 5. Гидрогеологические исследования 82

ЧАСТЬ ВТОРАЯ

Физико-механические свойства горных пород

Глава VII. *Состав и физические свойства горных пород* 84

§ 1. Петрографический состав и структура пород средней крепости и крепких 84
§ 2. Минералогический и гранулометрический состав слабых глинистых и несвязных пород 85
§ 3. Физические свойства горных пород 89
§ 4. Взаимодействие глинистых горных пород с водой 91
§ 5. Виды воды в горных породах 94

Глава VIII. *Механические свойства образцов горных пород* . . . 97

§ 1. Основные характеристики прочности горных пород . . . 97
§ 2. Сцепление горной породы в образце 102
§ 3. Коэффициент внутреннего трения и поровое давление . . 103
§ 4. Ползучесть и длительная прочность горных пород 108

Глава IX. *Характеристики сопротивления сдвигу массива горных пород* 117

§ 1. Методика натурных испытаний на срез 118
§ 2. Коэффициент внутреннего трения горных пород в массиве . . 121
§ 3. Сцепление горных пород в массиве 122
§ 4. Сопротивление сдвигу трещиноватых глин 126
§ 5. Определение характеристик сопротивления сдвигу в массиве по съемке обрушений и оползней 128

Глава X. *Сопротивление сдвигу горных пород в отвалах* . . . 129

§ 1. Отвалы твердых и несвязных пород 129
§ 2. Отвалы мягких пород 130
§ 3. Изменение сопротивления сдвигу отвальных пород 132
§ 4. Физико-механические свойства пород, являющихся основанием отвалов 133

Глава XI. *Приборы и методы изучения сопротивления сдвигу* . . 134

§ 1. Приборы для лабораторных испытаний на срез 134
§ 2. Приборы на трехосное сжатие 136
§ 3. Оборудование для натурных испытаний на срез 140
§ 4. Другие приборы для испытаний механических свойств горных пород 142
§ 5. Некоторые замечания к методам испытаний 144
§ 6. Зависимость между характеристиками прочности горных пород и их разрушаемостью при разработке 153

ЧАСТЬ ТРЕТЬЯ

Деформации бортов карьеров и отвалов

Глава XII. *Классификация деформаций бортов карьеров и отвалов* 157

§ 1. Классификация деформаций 157
§ 2. Условия и причины возникновения осыпей и обрушений . . 162

§ 3. Оползни изотропных массивов и фильтрационные оползни . 165
§ 4. Покровные и контактные оползни 169
§ 5. Глубинные оползни слоистых пород лежачего бока . . . 171
§ 6. Оползни выпирания и оползни-надвиги 176
§ 7. Оползни внутренних и внешних отвалов 180
§ 8. Просадки и оплывины 185
§ 9. Морфология и динамика деформаций бортов карьеров . . 187

Глава XIII. *Маркшейдерские наблюдения за деформацией бортов карьеров* 190

§ 1. Цель и задачи маркшейдерских наблюдений 190
§ 2. Методика наблюдений на оползневых участках по линиям реперов 191
§ 3. Упрощенные наблюдения за деформацией уступов и бортов карьеров 196
§ 4. Установление характера оползня по результатам маркшейдерских наблюдений 199
§ 5. Характерные признаки оползней и установление их вида по результатам обследований 202
§ 6. Съемка трещин и составление структурных планов . . . 203
§ 7. Другие виды геолого-маркшейдерских работ по обеспечению устойчивости уступов и бортов карьеров 206

Глава XIV. *Дренирование месторождений, разрабатываемых открытым способом* 208

§ 1. Цели дренирования 208
§ 2. Фильтрационные характеристики горных пород 209
§ 3. Дренаж земной поверхности вокруг карьера и площадок уступов 213
§ 4. Дренаж пород при пологом и наклонном залегании слоев . 213
§ 5. Дренаж пород при горизонтальном залегании слоев . . . 217
§ 6. Дренаж твердых пород 225
§ 7. Дренаж основания и поверхности отвалов 226
§ 8. Основные расчетные формулы 228

Глава XV. *Мероприятия по предотвращению деформаций откосов уступов и отвалов* 236

§ 1. Общая характеристика мероприятий 236
§ 2. Углы откосов уступов 236
§ 3. Заоткоска уступов 243
§ 4. Искусственное укрепление откосов скальных и полускальных пород 245
§ 5. Укрепление песчаных и песчано-глинистых постоянных откосов 251
§ 6. Бермы и тип съезда в карьер 253
§ 7. Мероприятия по предотвращению опасных деформаций внутренних и внешних отвалов 256

Глава XVI. *Горные работы на оползневых участках* 257

§ 1. Борьба с возникшими или зарождающимися оползнями . . . 257
§ 2. Горные работы на оползневых участках 260
§ 3. Использование обрушений и оползней при отработке вскрыши 262

ЧАСТЬ ЧЕТВЕРТАЯ

Расчеты устойчивости бортов карьеров и отвалов

Глава XVII. *Методы расчета устойчивости откосов* 269

§ 1. Метод предельного напряженного состояния 269
§ 2. Обобщенная задача Ренкина, расчет откосов вогнутого профиля и нагруженных откосов 273

§ 3. Расчет откосов выпуклого профиля 276
§ 4. Применение метода предельного напряженного состояния при наличии поверхностей ослабления 281
§ 5. Ограниченность условий применения метода предельного напряженного состояния 284
§ 6. Метод круглоцилиндрической поверхности скольжения . . 285
§ 7. Метод многоугольника сил 289
§ 8. Алгебраическое сложение сил по плавной криволинейной поверхности скольжения 291
§ 9. Комбинированные методы 293

Глава XVIII. *Общие вопросы расчета устойчивости бортов карьеров в реальных условиях* 293

§ 1. Общие положения 293
§ 2. Определение расчетных характеристик прочности пород . . 294
§ 3. Коэффициент запаса устойчивости 296
§ 4. Расположение поверхностей скольжения 300
§ 5. Определение напряжений в откосах 304
§ 6. О рациональном профиле бортов карьеров 306

Глава XIX. *Схемы расчета устойчивости бортов карьеров в различных геологических условиях* 308

§ 1. Общие замечания к схемам расчета 308
§ 2. Предельная высота вертикального откоса 308
§ 3. Условия устойчивости откосов, сложенных слоями пород, падающими в сторону выемки 316
§ 4. Расчет устойчивости бортов при отсутствии поверхностей ослабления 318
§ 5. Равновесие пород при других условиях залегания поверхностей ослабления 325
§ 6. Расчет устойчивости обводненных откосов 331
§ 7. Расчет устойчивости отвалов 338
§ 8. Расчет устойчивости нагруженных уступов слабых глинистых пород 343
§ 9. Определение углов наклона бортов карьеров, имеющих в плане круглую или овальную форму 346
§ 10. Определение углов наклона бортов карьеров, подработанных подземными горными выработками 347

Глава XX. *Экспериментальная проверка методов расчета устойчивости откосов и ориентировочные углы наклона бортов карьеров* 348

§ 1. Предельное состояние бортов карьеров и уступов 348
§ 2. Моделирование откосов 351
§ 3. Ориентировочные величины углов наклона бортов карьеров . 360
§ 4. Ориентировочные величины углов откосов устойчивых отвалов и их высоты 362
Приложения 364
Литература 367

ФИСЕНКО ГЕОРГИЙ ЛАВРЕНТЬЕВИЧ

Устойчивость бортов карьеров и отвалов

Редактор издательства *С. Н. Быховская*
Технический редактор *В. Л. Прозоровская*
Корректоры *Р. Т. Баканова, М. В. Дроздова*

Подписано к наб. 31/XII 1964 г. Подписано к печ. 3/III 1965 г.
Формат 60×90¹/₁₆. Печ. л. 23,75. Уч.-изд. л. 24,52. Тир. 1800 экз.
Зак. № 2198/1052-10. Т-03463. Цена 1 р. 86 к.

Объявлено в сводном темплане издательства „Недра"
на 1965 г. № 310. Индекс 1-4-1

Издательство „НЕДРА"

Москва, К-12, Третьяковский проезд, д. 1/19

Ленинградская типография № 6 Главполиграфпрома
Государственного комитета Совета Министров СССР
по печати, Ленинград, ул. Салтыкова-Щедрина, 54

ЗАМЕЧЕННЫЕ ОПЕЧАТКИ

Стр.	Строка	Напечатано	Должно быть
5	9 снизу	в ней	в книге
38	2 »	табл. 16	табл. 12
104	13 »	породы	породой
107	3 »	функцией	фракцией
116	6 сверху	$\gamma_{пред} = \gamma_у \cdot ba^{lnt_1} + e^{c\Delta\tau} \times \times (t - t_1)$	$\gamma_{пред} = \gamma_у + ba^{lnt_1} + + be^{c\Delta\tau}(t - t_1)$
	14 »	$e^{c\Delta\tau}$	$be^{c\Delta\tau}$
139	10 снизу	(рис. 52)	(рис. 58)
145	5, 6 сверху	σ_1'	σ_1
213	22 »	5%	5‰
233	4 »	$\frac{\pi}{2L}$	$\frac{\pi\sigma}{2L}$
314	7 »	по формуле (138)	по формуле (143)

Г. А. Фисенко. Устойчивость бортов карьеров и отвалов. Зак. 2198.