

Геомеханика

Литература

1. Макаров, Александр Борисович. Практическая геомеханика : пособие для горных инженеров / Макаров Александр Борисович. - Москва : Горная книга, 2006. - 391 с. : ил. - ISBN 5-98672-038-5 : 1570-00.
2. Геомеханика : учеб. пособие / Каспарьян Эдуард Варужанович [и др.]. - Москва : Высшая школа, 2006. - 503с. : ил. - ISBN 5-06-005495-0 : 552-10.
3. Бабелло, В.А. Лабораторный практикум по дисциплинам "Механика грунтов" и "Геомеханика" / В. А. Бабелло. - Чита : ЗабГУ, 2016. - 112 с. - ISBN 978-5-9293-1818-4 : 112-00.
4. Гальперин, А.М. Геомеханика открытых горных работ / А. М. Гальперин; Гальперин А.М. - Moscow : Горная книга, 2003. - . - Геомеханика открытых горных работ [Электронный ресурс] : Учебник для вузов / Гальперин А.М. - М: Издательство Московского государственного горного университета, 2003. - ISBN 5-7418-0228-1.
5. Певзнер, М.Е. Геомеханика / М. Е. Певзнер, М. А. Иофис, В. Н. Попов; Певзнер М.Е.; Иофис М.А.; Попов В.Н. - Moscow : Горная книга, 2008. - . - Геомеханика [Электронный ресурс] : Учебник для вузов / Певзнер М.Е., Иофис М.А., Попов В.Н. - 2-е изд., стер. - М: Издательство Московского государственного горного университета, 2008. - ISBN 978-5-7418-0528-2.

Геомеханика

Наука о механических свойствах и механическом состоянии массива горных пород и процессах деформирования и разрушения (геомеханических процессах), происходящих в нем в определенных природных условиях под влиянием горнотехнических (технологических) факторов

Природные факторы:

- Экзогенные - внешние по отношению к массиву горных пород и определяющие его выветривание, эрозию, температурный режим и другие процессы зависящие от климатических условий, солнечной радиации и т.д.
- Эндогенные - внутренние по отношению к массиву горных пород и обусловленные эволюцией планеты и проявляющиеся в виде тектонических движений, магматизма и т.д.

Процессы:

Геомеханические - процессы деформирования и разрушения массива горных пород, возникающие в результате изменения его механического состояния под воздействием природных экзогенных и технологических факторов и достигающие в определённых условиях земной поверхности.

Геодинамические - процессы деформирования и разрушения массива горных пород, возникающие в результате изменения его механического состояния под воздействием природных эндогенных и технологических факторов и достигающие в определённых условиях земной поверхности.

При разработке месторождений в основном проявляются геомеханические процессы

Предмет геомеханики:

Свойства и состояние массива горных пород с учетом твердой жидкой и газообразной фаз и их изменения в процессе техногенного воздействия на массив горных пород

Выделяют:

- Механику грунтов (soil mechanics) - изучение механических свойств и грунтовых массивов и механических процессов, возникающих при производстве строительных работ на поверхности или вблизи поверхности
- Горную геомеханику или механику горных пород и массивов (rock mechanics) - изучение механических свойств горных пород и массивов и механических процессов, возникающих при производстве горных работ - открытых и подземных.

Геомеханика открытых горных работ рассматривает:

- устойчивость карьерных откосов;
- оценка несущей способности естественных и искусственных оснований;
- прогноз деформаций сдвига и уплотнения бортовых и отвальных массивов;
- направленное изменение и контроль состояния массива пород в бортах карьера, а также техногенных насыпных и намывных массивов отвалов и хвостохранилищ

МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ГОРНЫХ ПОРОД

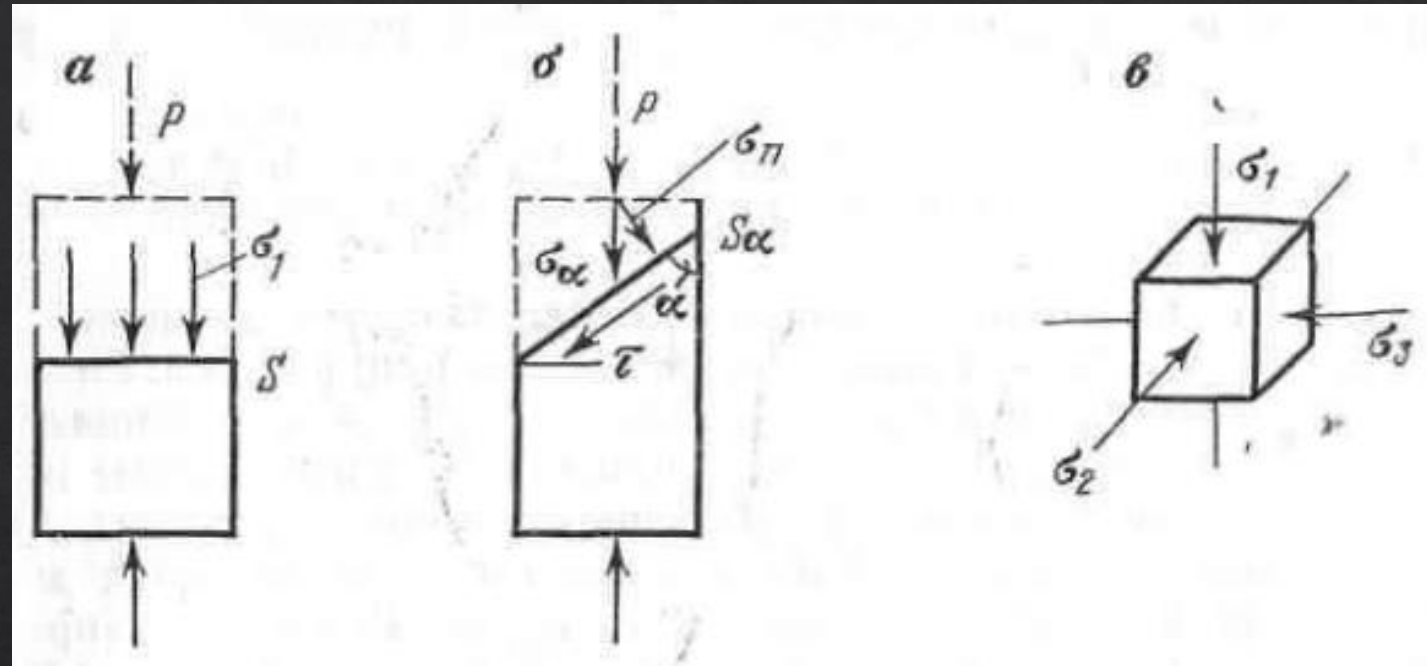
Под действием внешней нагрузки в материале возникают напряжения. При достижении ими предельных значений, которые может выдержать данный материал наступает разрушение. Ему предшествует изменение формы материала. Исходя из этих воззрений в XVIII—XIX вв. были разработаны основы теории упругости и установлена взаимосвязь между напряжениями и деформациями (Навье, Попселе, Гук, Сен-Венан).

Различают три напряженных состояния массива: линейное, плоское и объемное.

При линейном напряженном состоянии на элементарный блок породы вдоль вертикальной оси действуют две противоположно направленные вертикальные силы. Блок породы находится в состоянии одноосного сжатия.

В горизонтальном поперечном сечении блока (а) на площадке сила P вызывает напряжения:

$$\sigma = P/S$$



Схемы действия напряжений в горных породах при одноосном сжатии:

а) на горизонтальной площадке;

б) на наклонной;

в) при трехосном сжатии

Зная величину напряжений на горизонтальной площадке, можно вычислить напряжения на любой другой площадке, составляющей угол α с направлением действия напряжений σ_1 по формуле

$$\sigma_\alpha = P/S_\alpha = \sigma_1 \cdot \sin \alpha$$

Нормальные и касательные напряжения на этой площадке определяют по формулам соответственно:

$$\sigma_n = \sigma_\alpha \cdot \sin \alpha = \sigma_1 \cdot \sin^2 \alpha$$

$$\tau = \sigma_\alpha \cdot \cos \alpha = \frac{\sigma_1}{2} \cdot \sin 2\alpha$$

Нормальные напряжения достигают максимальных значений $\sigma_n = \sigma_1$ при $\alpha = 90^\circ$. В этом сечении $\tau = 0$. Наибольшие значения касательных напряжений соответствуют $\alpha = 45^\circ$.

В теории напряжений выделяют главные напряжения и главные площадки, по которым действуют эти напряжения. Главные напряжения направлены нормально к главным площадкам, а касательные напряжения на главных площадках равны нулю. В каждой точке любого напряженного тела можно выделить три взаимно перпендикулярные площадки, на которых могут действовать главные напряжения $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$. Если эти напряжения не равны нулю, напряженное состояние называется **объемным**. Напряжения σ_1 называются наибольшими, σ_3 — наименьшими, — средними по величине. Если $\sigma_1=0$ или $\sigma_2=0$, или $\sigma_3=0$, то напряженное состояние называется **плоским**, а при $\sigma_2=\sigma_3=0$ — **линейным**.

Задачи по определению величин напряжений решают методами теории упругости. Практическое значение изучения напряженного состояния горных пород для обеспечения устойчивости откосов состоит не в возможности определения их величин, а в получении общего представления о взаимодействии касательных и нормальных напряжений на потенциальной поверхности скольжения.

Аналогично тому, как положение любой точки в пространстве определяется ее координатами в системе прямоугольных и полярных координат, в этих же системах можно представить напряжения в заданной точке.

Теории прочности и критерии разрушения

Под действием нагрузок рост напряжений в материале завершается его разрушением, либо недопустимо большим деформированием. В первом случае происходит хрупкое, а во втором пластическое разрушение.

Возможны и их совместные проявления

Различают **деформации объема и формы**. Прочность с изменением объема материала теряется в результате действия нормальных растягивающих напряжений, форма - в результате действия касательных напряжений и сопровождается сдвигом (течением) вдоль площадки скольжения.

Для оценки прочности материала используют испытания образцов на сжатие, растяжение и кручение. При сложном напряженном состоянии используют механические теории прочности.

Различают три классические теории прочности

Теория наибольших нормальных напряжений (Галилея)

$$\sigma_{max} = \sigma_{пр}$$

где σ_{max} – наибольшее главное нормальное напряжение;

$\sigma_{пр}$ – предельное сопротивление материала при растяжении.

Теория наибольших удлинений (Мариотт, Сен-Венан)

согласно которой разрушение материала возникает при максимальном для него удлинении ε_{max} в процессе простого растяжения

Теория наибольших касательных напряжений (Кулон, Трески).

Условие неразрушаемости материала

$$\tau_{max} < \tau_{пр}$$

где τ_{max} — наибольшее касательное напряжение, испытываемое материалом;

$\tau_{пр}$ — предельное значение касательного напряжения, полученное при одноосном сжатии (растяжении).

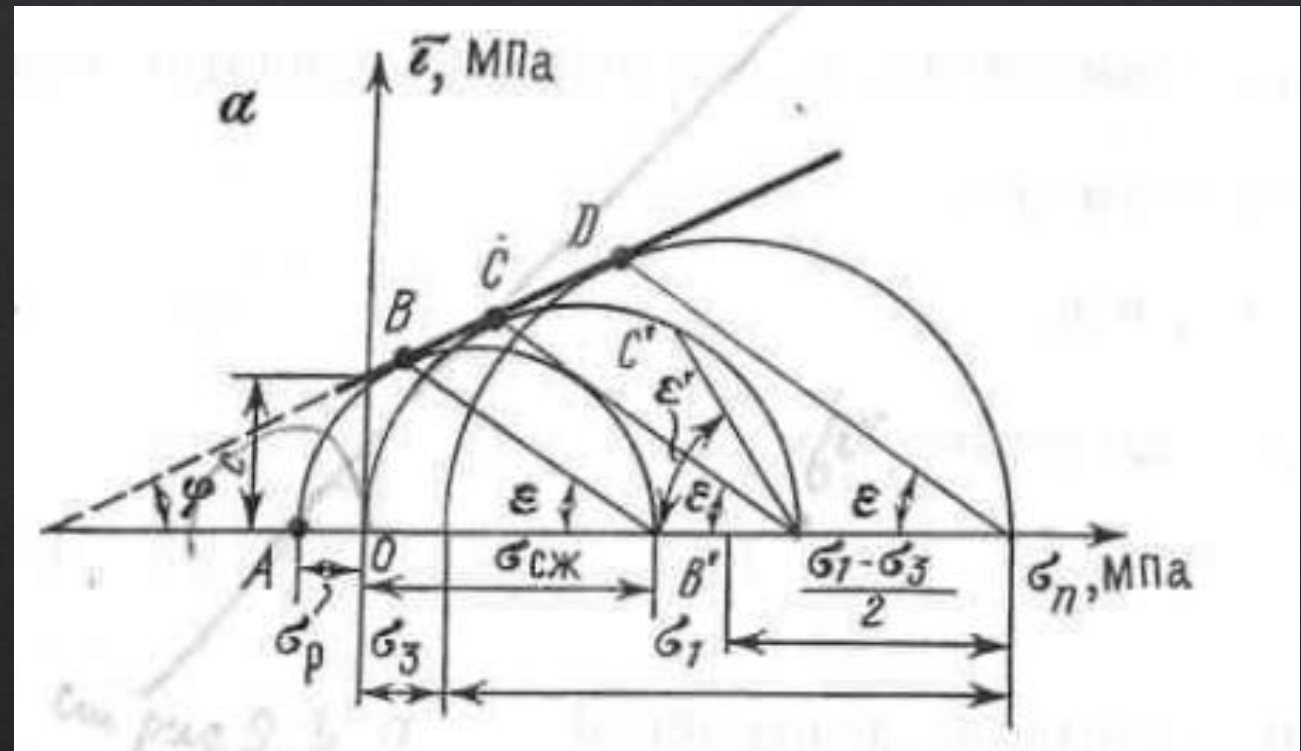
В случае трехосного сжатия (растяжения), когда

$$\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$$
$$\tau_{max} = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} < \frac{\sigma_{пр}}{2}$$

Эта теория хорошо согласуется с результатами испытания пластичных материалов, одинаково сопротивляющихся сжатию и растяжению. Для грунтов и горных пород используют теорию прочности Кулона—Мора.

Критерий Кулона—Мора широко применяют в механике грунтов и горных пород. Предельное равновесие на любой площадке изображают в виде точки на огибающей кругов Мора ABCD. Эту огибающую можно аппроксимировать прямой линией, уравнение которой

$$\tau = \sigma_n \operatorname{tg} \varphi + c$$



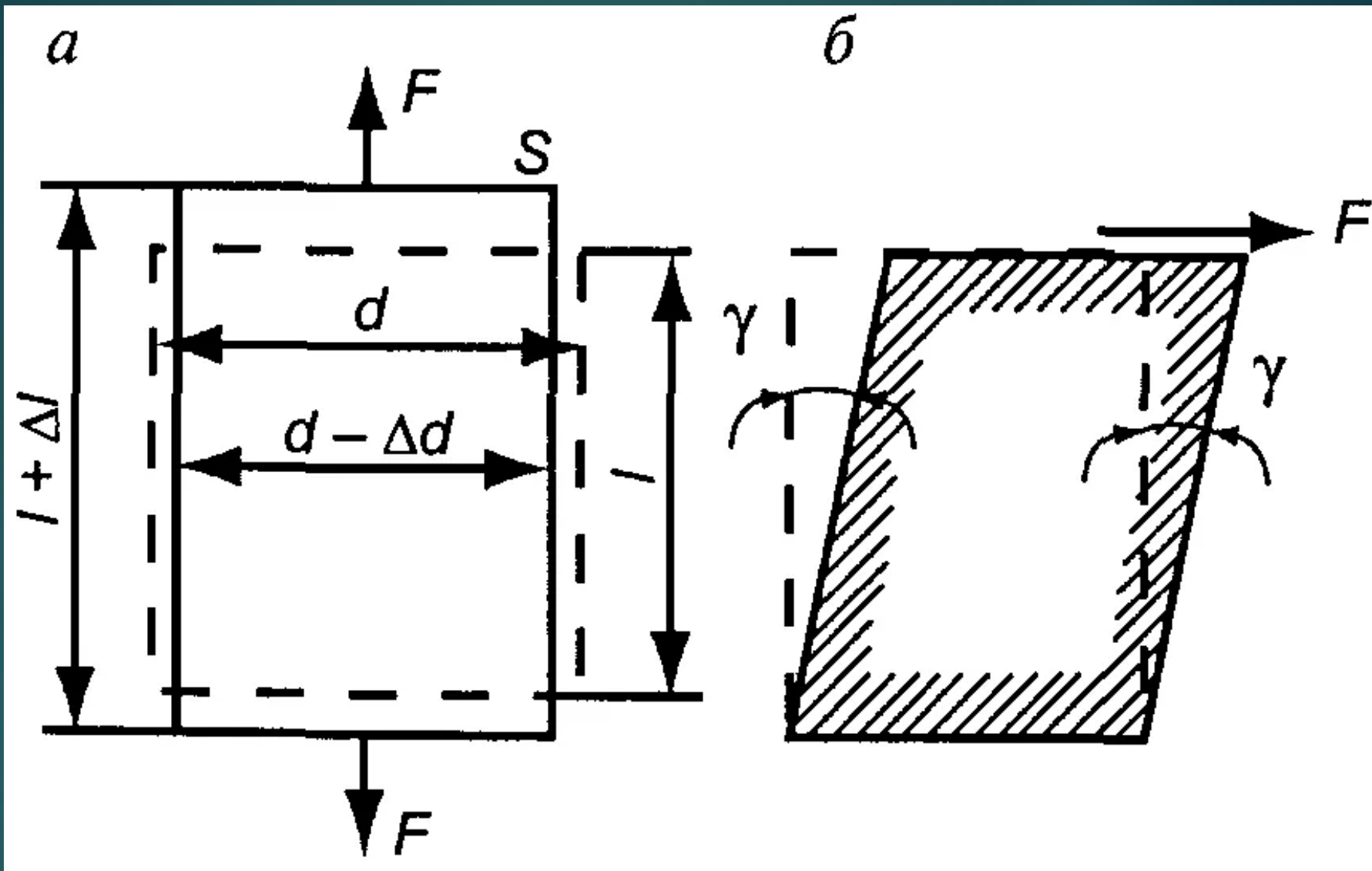
Огибающая ABCD характеризует прочность образца горной породы. Отрезок AO численно равен временному сопротивлению растяжению, а OB' — временному сопротивлению сжатию. Ординаты кривой на участке BD отражают сопротивление сдвигу в зависимости от величины нормальных напряжений. При замене этой кривой прямой линией получим основные (условные) характеристики сопротивления породы сдвигу: сцепление c и угол внутреннего трения φ

ДЕФОРМАЦИОННЫЕ СВОЙСТВА ГОРНЫХ ПОРОД


К основным деформационным свойствам горных пород относят: модуль упругости (Юнга) E , коэффициент Пуассона ν и ползучесть.

Знание деформационных свойств горных пород особенно важно для решения задач управления горным давлением в подземных выработках и целиках. Для больших массивов горных пород, слагающих борта карьеров, пока еще не найдены надежные способы измерения напряжений и деформаций.

Деформационные свойства горных пород будут основными исходными данными для геомеханических расчетов. Для получения деформационных характеристик ограниченного объема горных пород, образцы их испытывают на сжатие и строят график в координатах напряжение — деформация.



Деформация образца породы под действием нормальных и касательных сил



Модулем Юнга называют отношение нормального напряжения σ_n в данном направлении его действия к относительной упругой деформации $\Delta l/l$ в этом же направлении.

$$E = \sigma_n / \varepsilon$$

где ε – относительная упругая деформация

Значение E (МПа) определяют путем осевого сжатия образца породы и измерения его деформации, либо рассчитывают по скорости прохождения сейсмических волн. Модуль упругой деформации характеризуется наклоном кривой напряжение—деформация.

Коэффициент Пуассона получают делением радиальной относительной деформации $\Delta d/d$ цилиндрического образца к осевой относительной деформации $\Delta l/l$.

$$\nu = \frac{\Delta d/d}{\Delta l/l}$$

По более общему определению — это отношение поперечной деформации к продольной при одном и том же значении напряжения.

Характеристики горных пород, полученные при испытаниях образцов на сжатие и растяжения

Породы	Модуль упругости Юнга E , 10^3 МПа	Коэффициент Пуассона, ν	Сопротивление, МПа	
			сжатию $\sigma_{сж}$	растяжению, σ_p
Гранит	0,55—0,9	0,21—0,28	210	9—13
Габбро	1,05	0,34	200	22
Базальт	1	0,28	290	16
Мрамор	1,1	0,28	250	15
Известняк	0,2—0,9	0,23—0,20	30—180	2,1—10
Песчаник	0,02—0,7	0,3—0,4	10—42	0,3—1,1
Мел	0,05—0,7	0,4	15—19	0,5—0,9
Бетон	0,17	0,3	30	2,5

Зависимость между напряжениями и деформациями при линейном деформировании образца однородного изотропного материала, характеризуют следующими параметрами упругости

Модуль сдвига – коэффициент пропорциональности между касательным напряжением τ и соответствующей деформацией сдвига γ

$$\tau = G\gamma$$

С модулем Юнга и коэффициентом Пуассона они связаны зависимостью

$$G = \frac{E}{2(1 + \nu)}$$

При трехосном равномерном сжатии наблюдается зависимость между давлением и относительным изменением объема породы

$$p = K\Delta V/V$$

Коэффициент K называют **модулем объемного сжатия (объемной упругости)**

$$K = \frac{E}{3(1 - 2\nu)}$$

ПЛАСТИЧЕСКИЕ И РЕОЛОГИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПОРОД

Приложение к породам нагрузок, превышающих их пределы упругости, приводит к возникновению необратимых пластических деформаций, в области которых исчезает пропорциональность между величиной деформации породы и нагрузкой. При этом наблюдается увеличение скорости роста деформаций с повышением нагрузки и даже при постоянных или уменьшающихся нагрузках.

Пластическая деформация в породах обусловлена внутризеренным и межзеренным скольжением (постепенное соскальзывание атомов в кристаллической решетке с одного на другой, сдвиг зерен по определенным плоскостям и направлениям под действием нагрузок).

Пластическая деформация происходит без нарушения сплошности тела. Однако часто пластичность, рассматриваемая в породах, не совпадает с понятием идеальной пластичности, так как, ряд явлений, вызывающих в породах остаточные деформации (обжатие, смятие и т.д.) относят к разрушающим – квазипластичность.

Повышение пластичности в породах сопровождается, как правило, снижением их модуля упругости. В то же время коэффициент Пуассона с увеличением пластичности пород растет.

Длительное действие нагрузок на породы приводит к изменению их напряженно-деформированного состояния. Если при этом возможно свободное перемещение частиц породы, наблюдается непрерывное деформирование ее. При ограниченной величине деформации породы в ней происходит снижение напряжения, несмотря на постоянные внешние нагрузки.

Явления изменения деформаций и напряжений в горных породах под действием нагрузки во времени описываются реологическими свойствами. Постепенный рост деформаций во времени называется ползучестью пород (крипом). Явление ползучести— это пластическое деформирование горной породы, только происходящее во времени. Ползучесть может проявляться даже при напряжениях, не превышающих предела упругости.

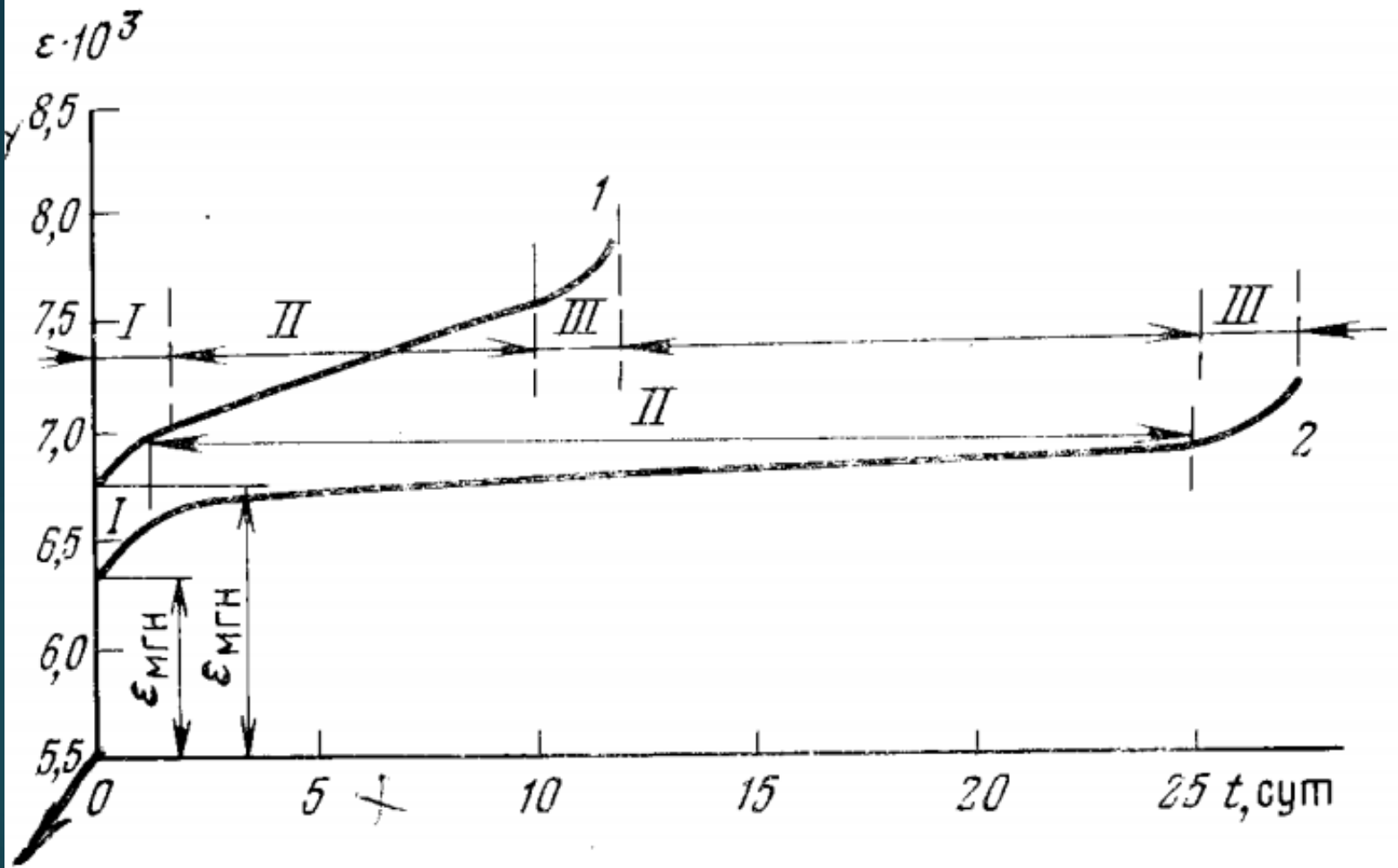


График ползучести горных пород на примере образцов песчанистого сланца при напряжении, равном $0,8\sigma_{сж}$ (1) и $0,7\sigma_{сж}$ (2), где $\sigma_{сж} = 56$ МПа ($\sigma_{мгн}$ — мгновенная деформация)

Кривая ползучести состоит из трех отрезков, соответствующих трем основным стадиям деформации
 I — не установившейся ползучести породы;
 II — установившемуся состоянию пластического течения при постоянной нагрузке;
 III — возрастанию скорости деформации и наступлению момента разрушения породы.

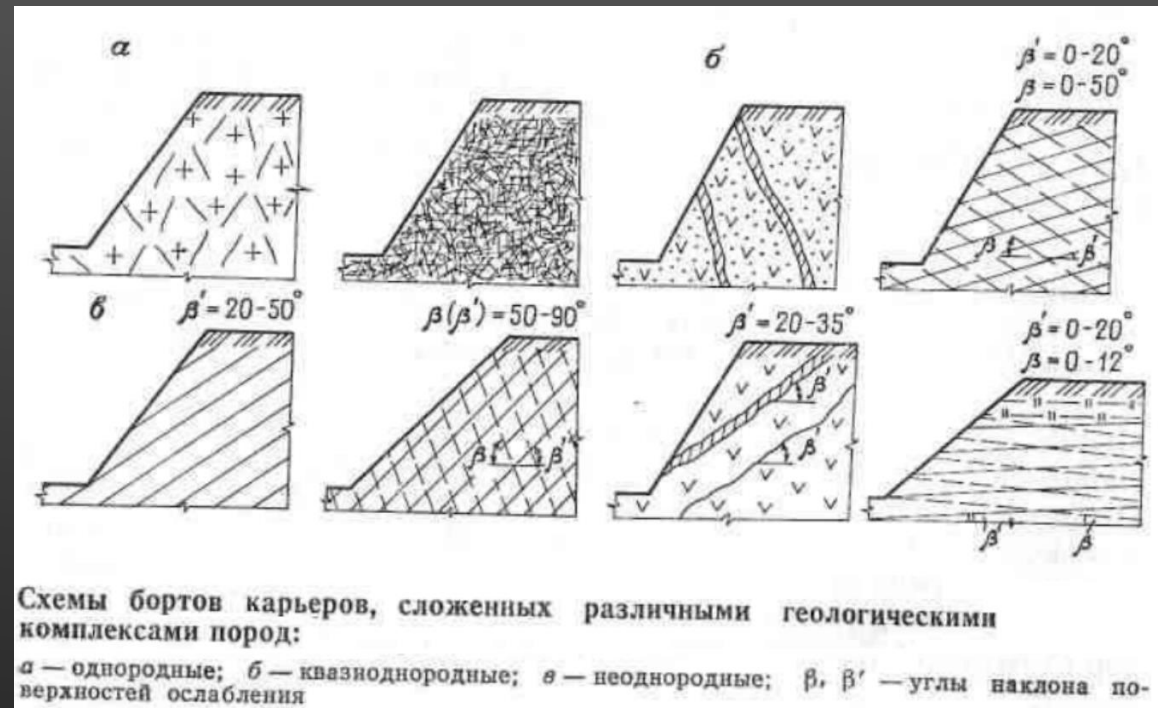
МАССИВЫ ГОРНЫХ ПОРОД В БОРТАХ ОТКРЫТЫХ ГОРНЫХ ВЫРАБОТОК

Рациональное проектирование бортов карьеров, сложенных скальными и полускальными породами, должно базироваться на принципе максимального использования потенциальных возможностей массивов горных пород оказывать сопротивление сдвигу. А это возможно при наличии объективной информации о свойствах, строении и структуре горных пород законтурной зоны.

В природе существует большое разнообразие геологических условий и связанных с ними форм залегания полезного ископаемого и вмещающих пород. Но на устойчивость откосов влияют агрегатное состояние массива и степень его нарушенности, независимо от вида полезного ископаемого, поэтому все месторождения полезных ископаемых группируют по классификационному признаку, отражающему влияние геологического строения на сопротивляемость массива пород сдвигу.

Классификация массивов по их сопротивляемости сдвигу

Класс	Массивы горных пород	Геологическое строение, структура и состав горных пород	Потенциальный механизм разрушения откоса
1	Однородные	Монолитные и равномерно трещиноватые породы, не включающие поверхности, ослабляющие массив в целом	Сдвиг по поверхности разрушения единого блока
2	Условно-однородные	То же, но включающие пассивные поверхности ослабления массива	То же с делением на структурные блоки
3	Неоднородные	Слоистые, трещиноватые, тектонически нарушенные породы, включающие активные поверхности ослабления	Общий сдвиг призмы обрушения (оползания) по поверхности ослабления массива



Классификация отражает макроструктуру массива горных пород.

В однородных породах потенциальная поверхность скольжения пересекает монолитные, ненарушенные породы,

В условно однородных породах имеются трещины, разломы и другие нарушения, но они не совмещаются с гипотетической поверхностью скольжения призмы возможного обрушения. Влияние поверхностей ослабления сказывается только на блочности массива.

В неоднородных породах потенциальная поверхность скольжения совпадает с одной из поверхностей ослабления массива.

НАПРЯЖЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ГОРНЫХ ПОРОД ДО ПРОВЕДЕНИЯ В НИХ ВЫРАБОТОК

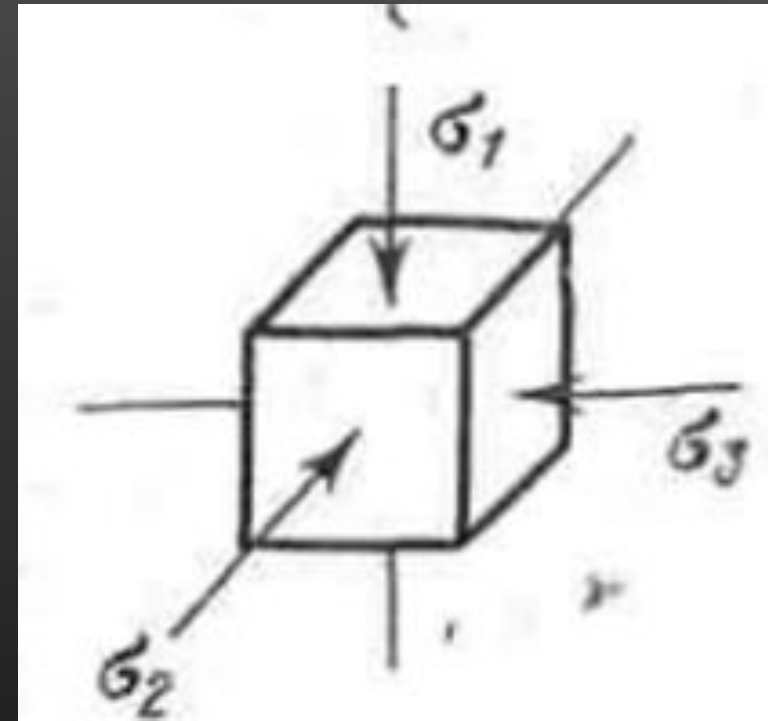
В условиях естественного залегания горные породы находятся в объемном напряженном состоянии. Если на массив действует только вертикальная нагрузка, вызывающая в нем напряжения то в породах возникают напряжения $\sigma_2 = \sigma_3$ бокового отпора. Величину этих напряжений обуславливают упругие свойства горных пород (модуль E упругости и коэффициент ν Пуассона), прочность при одноосном сжатии и наибольшие главные напряжения σ_1 .

Рассмотрим напряженное состояние элементарного кубика горной породы на глубине H от земной поверхности в нетронутом массиве. Элементарный кубик находится в объемном напряженном состоянии, т. е. испытывает всестороннее сжатие под действием главных напряжений $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$. Обычно при расчетах устойчивости бортов карьеров считают, что на любую горизонтальную площадку внутри горного массива давит столб породы высотой H , в результате на площадке возникают вертикальные напряжения

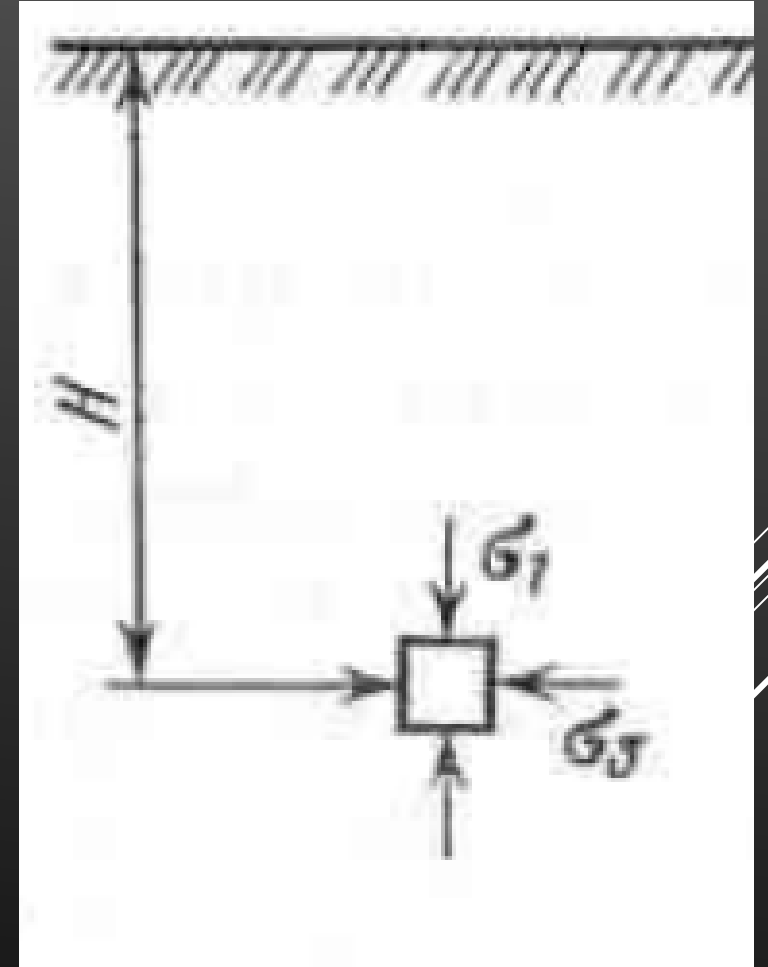
$$\sigma_1 = g \cdot \gamma \cdot H$$

где g – ускорение свободного падения, γ – плотность горной породы

Так как кубик находится в объемном напряженном состоянии, на четырех его вертикальных гранях за счет бокового отпора возникают попарно напряжения σ_2, σ_3 .

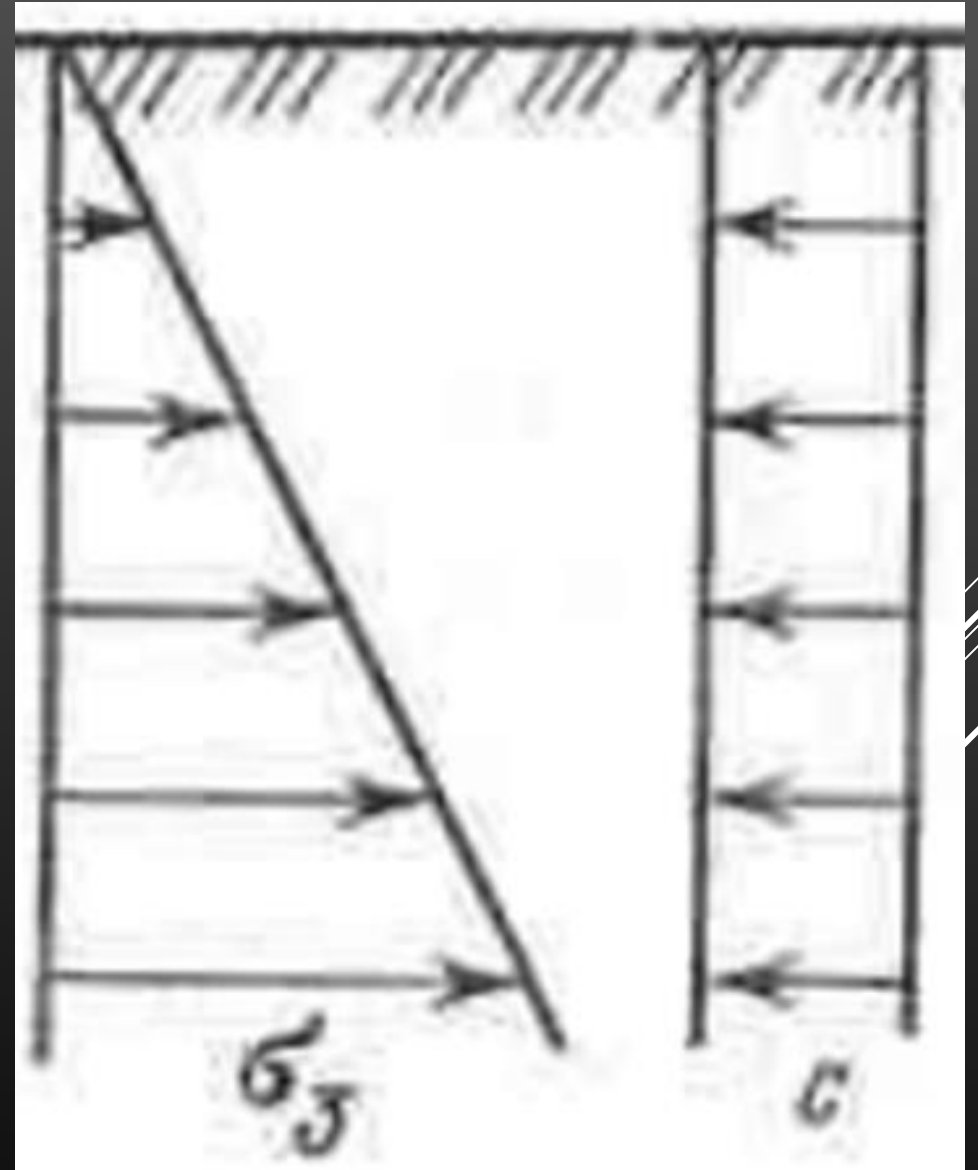


Согласно общепринятой гипотезе, напряженное состояние нетронутого массива пород обусловлено действием гравитационных сил. Но в формировании поля напряжений участвуют и силы сцепления. Гравитационные силы действуют вертикально вниз и вызывают на горизонтальных площадках наибольшие главные напряжения σ_1 . В условиях плоской задачи на вертикальных площадках эти силы вызывают наименьшие главные напряжения. Касательные напряжения на данных площадках равны нулю. В сыпучей среде, не обладающей сцеплением, горизонтальные напряжения σ_3 на земной поверхности равны нулю. С увеличением глубины они линейно возрастают.



Эпюра напряжений имеет форму треугольника. В связной среде, обладающей сцеплением, кроме сил гравитации, действуют силы сцепления. Для однородных пород они постоянны по величине и не зависят от глубины. Эпюра напряжений имеет форму прямоугольника.

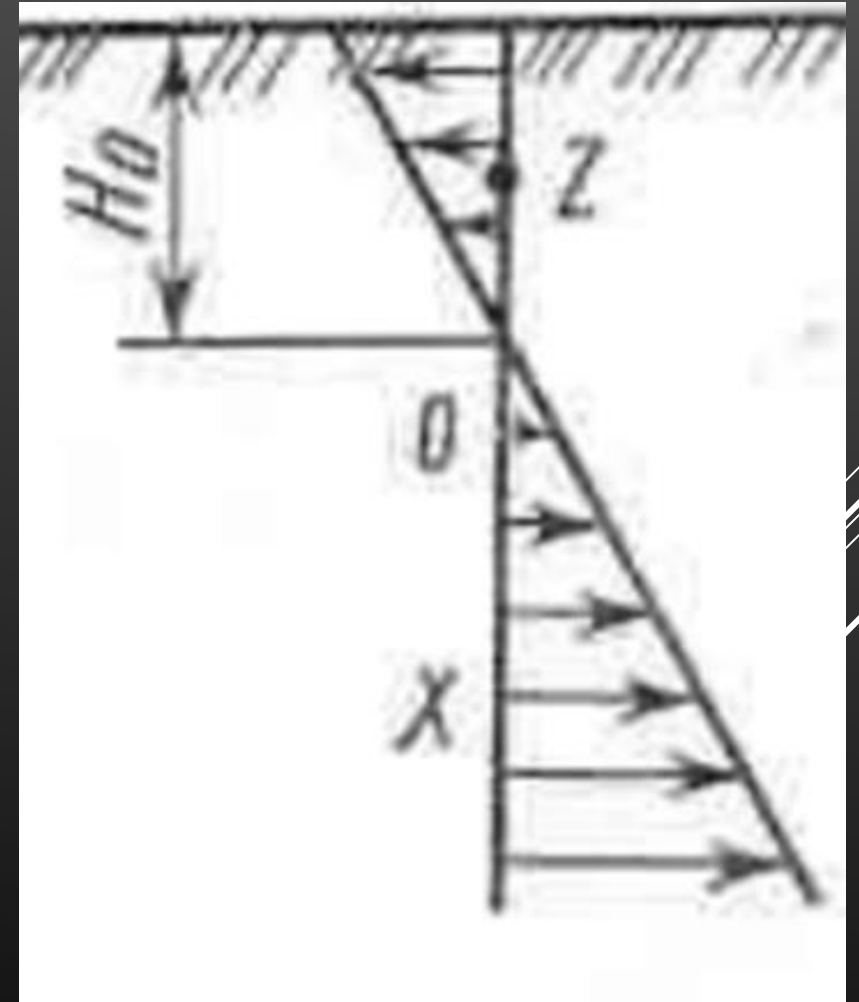
Напряжения σ_z по направлению действия противоположны силам сцепления так как последние всегда противодействуют деформированию массива независимо от направления действия возмущающей силы.



Наложение эпюр даст результирующую эпюру горизонтальных напряжений, действующих в вертикальном сечении.

Результирующая эпюра позволяет сделать следующие выводы:

- ▶ у земной поверхности действуют растягивающие напряжения обусловленные наличием сил сцепления;
- ▶ с увеличением глубины результирующие горизонтальные напряжения уменьшаются и в точке O на глубине H_0 равны нулю; затем они вновь увеличиваются, но при этом меняют знак на противоположный;
- ▶ глубина H_0 пропорциональна сцеплению с пород.



Напряжения в любом другом сечении, наклоненном под углом α к направлению действия напряжений σ_1 , можно определить с помощью кругов напряжений. Для этого необходимо знать плотность γ пород и их механические характеристики c и φ (сцепление и угол внутреннего трения). Напряжения σ_3 на глубине H в точке M площадки C , наклоненной к направлению действия напряжений σ_1 под углом α определяют следующим образом (породы на этой глубине находятся в предельном состоянии).

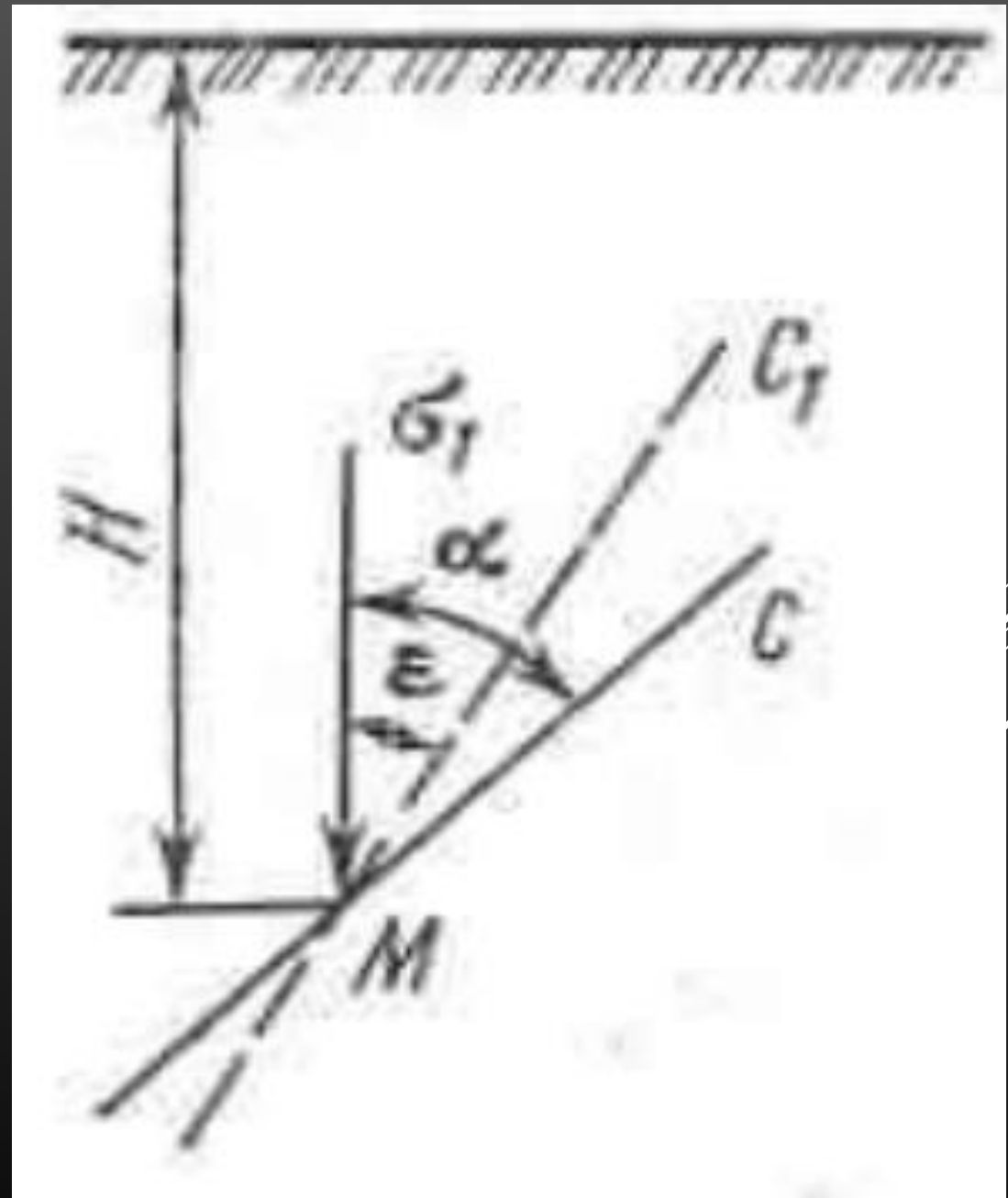


График напряжений дает возможность проанализировать напряженное состояние в характерных точках. Так, напряжениям в точке 0 на глубине H_0 будет соответствовать круг напряжений 3. В точке 0 $\sigma_1 = g \cdot \gamma \cdot H_0$, а $\sigma_3 = 0$. Выражение для глубины H_0 , соответствующей глубине трещинообразования:

$$H_0 = H_{90} = \frac{2c}{g\gamma} \operatorname{ctg}\left(45^\circ - \frac{\varphi}{2}\right)$$

Напряжениям на земной поверхности (максимальные растягивающие напряжения) соответствует круг напряжений 1 с диаметром σ_p . При $\sigma_3 = \sigma_p$ $H=0$

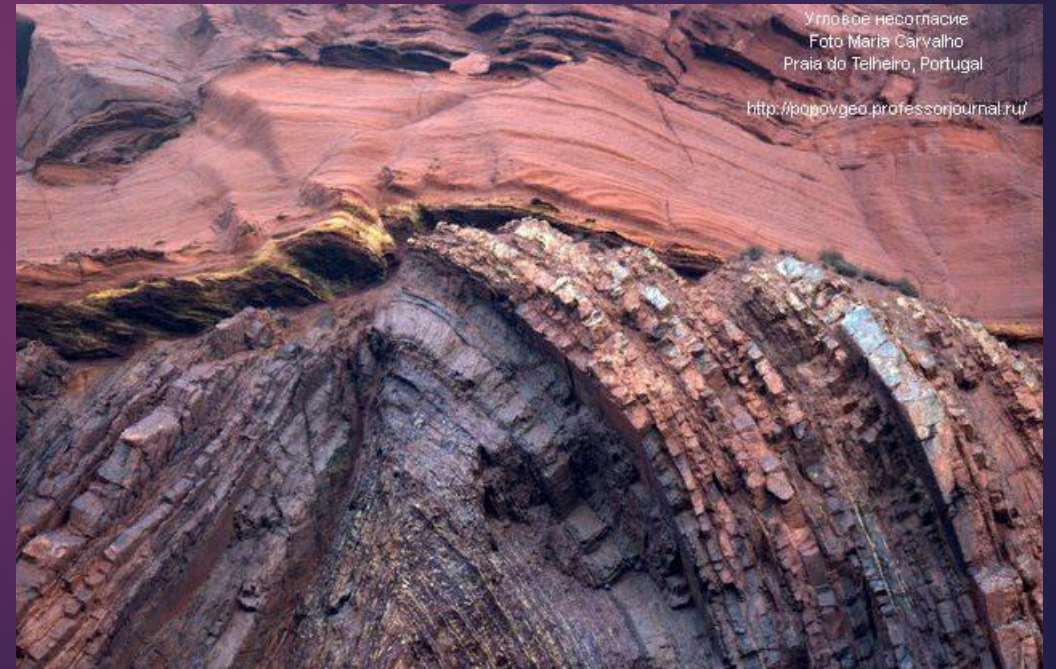
$$\sigma_p = -2c \operatorname{tg}\left(45^\circ - \frac{\varphi}{2}\right)$$

Знак минус указывает на наличие растягивающих напряжений. Напряжениям в точке Z соответствует круг 2, а в точке X круг 4. Так как породы обычно разбиты трещинами, то фактическое сопротивление отрыву у пород менее вычисленного по приведенной выше формуле.

Механические характеристики массивов

Структура и нарушенность массивов горных пород

В результате влияния генетических, тектонических, горообразовательных, гидротермальных процессов, высоких температур и давления, поднятий и опусканий земной поверхности, горные породы претерпевают структурные изменения, сопровождаются образованием разломов, зон дробления, систем трещин складчатости, сбросов, сдвигов, взбросов и др.



Нарушения сплошности массива горных пород являются поверхностями (зонами) его ослабления, которые в благоприятных условиях реализуются в поверхности (зоны) скольжения, межблоковых и межслоевых подвижек.

В зависимости от интенсивности трещиноватости пород (количества трещин на 1 м протяженности массива) и линейных размеров блоков (L , м) различают структуры массивов:

- крупноблочные ($L > 1$),
- среднеблочные ($0,3 < L < 1$)
- мелкоблочные ($L < 0,3$).

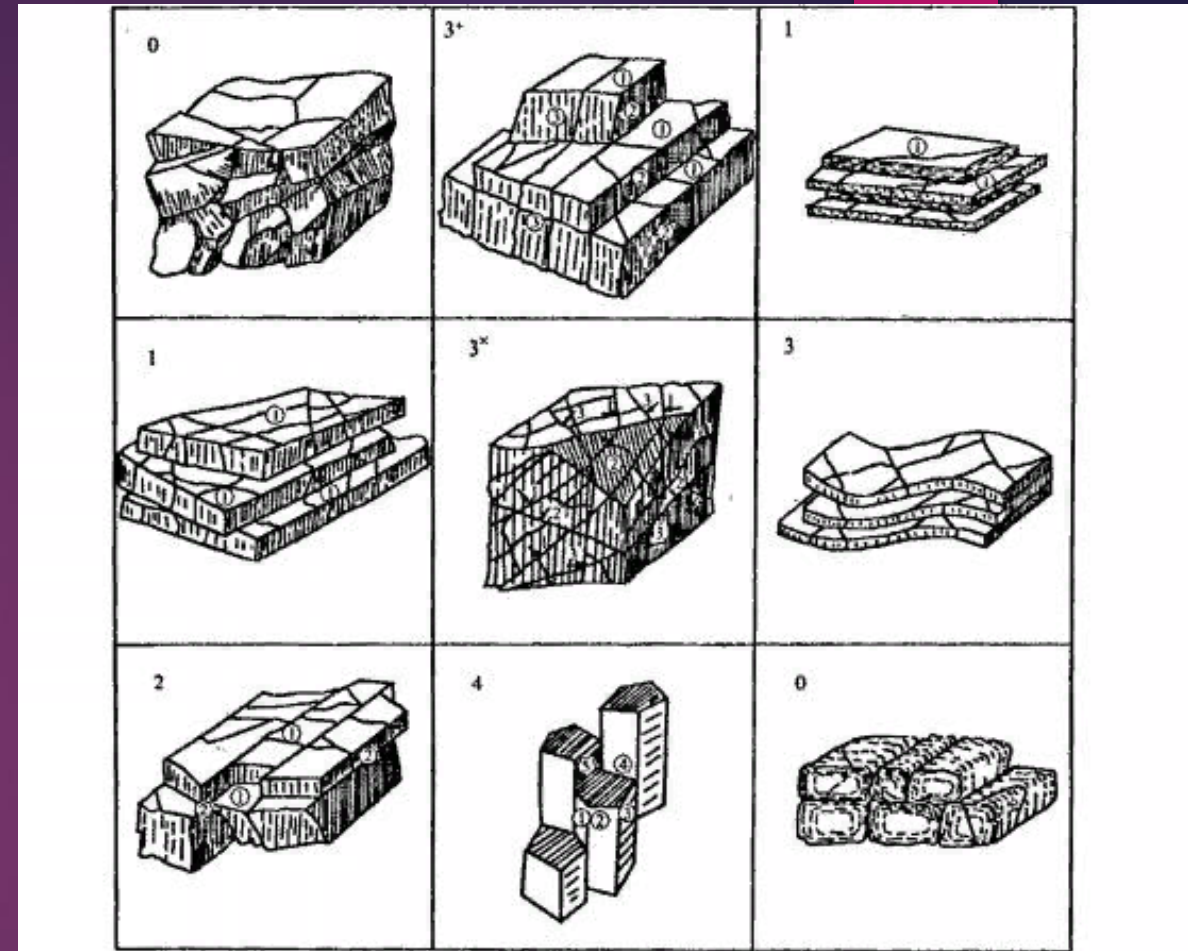


Рис. 1.1. Модели типов блочности массивов скальных пород (по М. Матула и Р. Хольцеру, 1976, 1978):

Тип 0 — глыбовый, полиэдрический: многогранники неправильной формы; тип 1 — плитчатый, пластовый: пластовая отдельность, образованная одной горизонтальной четко выраженной системой трещин; тип 2 — призматический: призматическая или кубическая отдельность, образованная двумя ортогональными равнозначными системами трещин; тип 3* — кубический и 3 — ромбический; 3 — образованные тремя равнозначными системами трещин (две из которых ортогональны при 3*); тип 4 — столбчатый: вытянутые многогранники правильной формы, образованные тремя или более равнозначными системами трещин; цифры в кружках на рисунке — системы трещиноватости

Степень нарушенности однородного и квазиоднородного массивов оценивают по значению коэффициента структурного ослабления λ , величина которого по Г. Л. Фисенко зависит от линейных размеров элементарных блоков и высоты борта Н

$$\lambda = \frac{1}{1 + a \cdot \ln \frac{H}{L}}$$

где a — коэффициент, определяемый по таблице

Для скальных и полускальных пород со средней интенсивностью трещиноватости $\lambda=0,02—0,05$.

Коэффициент структурного ослабления используют для определения удельного сцепления в массиве по сцеплению в образце породы, полученному в результате лабораторных или натуральных испытаний.

Для массивов, сложенных трещиноватыми песчано-глинистыми породами со сцеплением в образце менее 0,4 МПа рекомендуется принимать коэффициент структурного ослабления $\lambda=0,3—0,8$.

Степень нарушенности неоднородных массивов горных пород учитывают разделяя его на нарушенные и ненарушенные зоны (блоки), характеризующиеся соответствующими механическими свойствами (прочностью, сцеплением, углом внутреннего трения, плотностью). Характеристики сопротивления сдвигу либо усредняют и получают общие значения для всей потенциальной призмы обрушения; либо принимают для каждого блока отдельно и учитывают в расчетных схемах, основанных на поблочном суммировании удерживающих и сдвигающих сил.

Порода	Сцепление c , МПа	Коэффициент « a »
Песчано-глинистые рыхлые отложения, сильно выветрелые, полностью каолинизированные породы	0,4—0,9	0,5
Уплотненные рыхлые отложения, сильнокаолинизированные изверженные породы	0,5—0,8	2
Уплотненные рыхлые отложения с развитой кососекущей трещиноватостью, каолинизированные крепкие породы	0,5—0,8	3
Крепкие слоистые, с нормальными трещинами	10—20	3—4
Крепкие однородные, с нормальными трещинами	20—30	6—7
Крепкие однородные, с кососекущей слоистостью	>30	10

Основные механические характеристики массивов горных пород

ВЛИЯНИЕ ПОВЕРХНОСТЕЙ ОСЛАБЛЕНИЯ НА СВОЙСТВА МАССИВА.

Представления о массивах горных пород как однородных, изотропных, сплошных упругих средах часто используемые в аналитических методах расчета напряженного состояния массива, искажают реальный механизм деформирования пород и перехода их в предельное состояние. Результаты решения геомеханических задач, базирующиеся на подобных представлениях о массиве горных пород не отражают действительного напряженно-деформированного состояния ни качественно, ни количественно и поэтому не могут служить надежной основой для разработки противодеформационных мер. Реальные массивы горных пород ослаблены слоистостью, трещиноватостью, тектоническими нарушениями, которые являются поверхностями разрыва сплошности и непрерывности деформаций.

По контактам слоев и блоков пород различного литологического состава, в зонах тектонических нарушений и разломов прочность пород в 2—100 раз меньше, чем в образце, причем, чем выше прочность образца, тем эта разница больше. По гладким контактам между слоями сопротивление сдвигу минимально. Угол трения по «зеркальным» контактам составляет всего 6-9°, в то время как в образцах этих же пород угол внутреннего трения равен 20-25°. По контактам и нарушениям заполненным глиной его значение может снизиться до нуля. В зависимости от формы карьера в плане и ориентировки в пространстве поверхностей ослабления массива, борта карьера будут в большей или меньшей степени испытывать влияние этих поверхностей.

МЕХАНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ МАССИВА ГОРНЫХ ПОРОД

В зависимости от прочности горных пород и степени их нарушенности на конкретных участках бортов карьера законтурный массив должен характеризоваться:

- сцеплением и углом внутреннего трения в однородных породах;
- сцеплением и углом внутреннего трения в неоднородных (нарушенных) породах;
- максимальным (предельным) сопротивлением сдвигу τ_{\max} при наличии глинистых пород;
- интегральным показателем сопротивления сдвигу в бортах, сложенных породами с различными характеристиками.

Прочность горных пород оценивается усредненными показателям сопротивления их сжатию и растяжению. При сжатии породы трещины смыкаются и лишь в момент разрушения проявляется влияние естественной трещиноватости пород. При растяжении сопротивление отрыву уже в начале приложения нагрузки будет тем меньше, чем больше интенсивность трещиноватости породы. В массиве основную роль играют протяженные трещины, которых нет в образце. По этим причинам оценивать сопротивление массива горных пород отрыву довольно сложно. Но в связи с тем, что оно невелико, его чаще не принимают во внимание, особенно по отношению к откосам с длительным сроком стояния.

Основное различие между характеристиками сопротивления сдвигу образца породы и массива состоит в величине сцепления. Так по данным лабораторных испытаний коэффициент внутреннего трения $\text{tg}\varphi$ твердых пород изменяется от 0,16 до 0,75 (что соответствует углам $9\text{--}37^\circ$), в то время как величина сцепления изменяется от 0,02 до 70 МПа. С другой стороны, при больших значениях напряжений внутреннее трение создает значительно большие силы сопротивления сдвигу, чем сцепление. Для определения величины коэффициента внутреннего трения $\text{tg}\varphi$ даже для однородной породы необходимо провести не менее 4-6 испытаний на сдвиг. Более точное представление о величине угла внутреннего трения в массиве можно получить, сопоставляя значения угла естественного откоса одноярусного отвала, отсыпанного из данной разновидности пород, угла внутреннего трения в образце и угла трения по поверхности ослабления, при этом угол естественного откоса отвала из скальных пород может колебаться в пределах $33\text{--}43^\circ$ в зависимости от габаритов и форм кусков породы, а также высоты отвала.



Средние значения углов внутреннего трения горных пород (градусы)

Генетический тип; порода	В куске, φ	По контактам φ'			В отвале φ_0
		ШН	ШР	ГП	
Крепкие изверженные и метаморфические; кварцевые порфиры, кварциты, сиениты, базальты, роговики, филлиты и др.	35—37	30—32	28—30	26—28	34—36
Средней крепости метаморфические и осадочные, неводные; сланцы кварцево-хлоритовые, серпентиновые, глинистые; серпентиниты, известняки, песчаники, алевролиты, аргиллиты	30—35	—	24—26	16—22	33—35
Осадочные связные, водонасыщенные; алевролиты, аргиллиты, плотные глины и суглинки и др.	14—20	—	10—14	6—8	Зависит от W
Осадочные текучие; глины пылеватые, жирные; суглинки пылеватые; илы и др.	2—6	—	—	—	—

Примечания. ШН — шероховатые неровные, ШР — шероховатые ровные, ГП — гладкие притертые, W — влажность породы.

Для определения сцепления в однородных (квазиоднородных) массивах горных пород в бортах карьеров используют эмпирическую формулу Г. Л. Фисенко

$$c_m = \lambda \cdot c_{об}$$

Для песчано-глинистых трещиноватых пород со сцеплением в образце менее 0,4 МПа, сцепление в массиве рекомендуют определять с помощью натуральных испытаний больших призм непосредственно в откосе. Коэффициент структурного ослабления для этих пород $\lambda = 0,3-0,8$. Однако, характеристика массива, представленного глинистыми породами (или включающего глинистые пропластки), имеющими высокую естественную влажность значительно отличается от характеристики образцов в связи с влиянием поровой воды.

Сцепление и угол трения по поверхностям ослабления в массиве и образце также не идентичны, но более близки по значениям в сравнении с однородным массивом. Но эти показатели зависят еще и от состояния контактирующих поверхностей. Сцепление c' по поверхностям ослабления предпочтительнее определять натурными испытаниями. Значение угла трения φ' принимают по результатам лабораторных определений. В данном случае масштабный эффект срабатывает в пользу массива, так как идеально прямолинейные, протяженные трещины и контакты между слоями скорее исключение, чем правило.

Термин «угол трения», применяемый к поверхностям ослабления отражает действительный коэффициент трения между двумя соприкасающимися поверхностями. Его значение можно определить непосредственно, опытным путем из равенства:

$$f = \operatorname{tg} \varphi = R/N$$

где R - сила трения, необходимая для сохранения условия предельного равновесия;

N - нормальное давление на трущихся поверхностях.

Прочность массива горных пород — интегральный показатель, который можно оценить совокупностью следующих параметров:

- прочностью образцов породы $\sigma_{сж}$;
- размерами элементарных блоков l , обусловленных интенсивностью трещиноватости пород и мощностью слоев (в слоистых породах);
- степенью шероховатости трещин $K_{ш}$, их раскрытия m и наличием заполнителя;
- характеристиками c' , φ' и влажностью W заполнителя трещин и контактов между слоями пород;
- гидростатического давления $u_{г}$.

В общем виде прочность массива можно выразить как функцию приведенных переменных показателей

$$Q = f(\sigma_{сж}, l, K_{ш}, m, c, \varphi, W, u_{г})$$

Важным параметром, дающим представление о степени нарушенности массива является показатель выхода керна RQD. Его определяют из отношения (в %)

$$K_{вк} = \frac{L_{к}}{L_{скв}} \cdot 100$$

где $L_{к}$, $L_{скв}$ - соответственно суммарная длина извлеченного керна длиной более 10 см и глубина скважины.

ДЕФОРМАЦИИ БОРТОВ И УСТУПОВ

Деформирование карьерных откосов обусловлено влиянием природных и горнотехнических факторов:

природные факторы

- геологическое строение месторождения;
- физико-механические свойства;
- структура и тектоническая нарушенность горных пород;
- гидрогеологические условия месторождения.

горнотехнические факторы:

- ориентировка горных выработок или фронта горных работ в карьере относительно поверхностей ослабления массива,
- параметры откосов,
- наличие на бортах и уступах дополнительных нагрузок в виде тяжелого горно-транспортного оборудования и навалов горной массы,
- способы отработки приконтурных заходок и заоткоски уступов,
- эффективность дренажных работ и их своевременность,
- время стояния откосов без обновления их поверхности

Различают три состояния массива горных пород в бортах (уступах) открытых выработок:

допредельное

напряжения не достигли значений, при которых в приоткосной зоне образуются площадки скольжения, объединяющиеся в общую поверхность скольжения - в таких откосах нет призмы обрушения. Безопасность работ обеспечивают устройством бермы безопасности, ограждения или ограничивающего вала. Коэффициент устойчивости откоса $n > 1$.

предельное

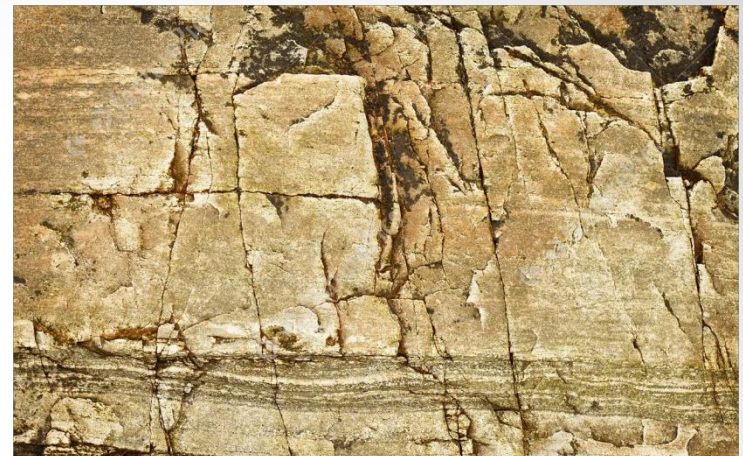
нормальные и касательные напряжения достигли максимальных значений, при которых образуются площадки скольжения и общая для приконтурного массива наиболее напряженная поверхность (потенциальная поверхность скольжения). В приконтурной полосе шириной, равной ширине призмы обрушения, нахождение людей и механизмов должно быть исключено. Достаточно даже незначительного превышения сдвигающих сил по отношению к удерживающим, чтобы началось разрушение массива. До наступления этого состояния массив предельно напряжен, но еще сохраняет природную прочность.

запредельное

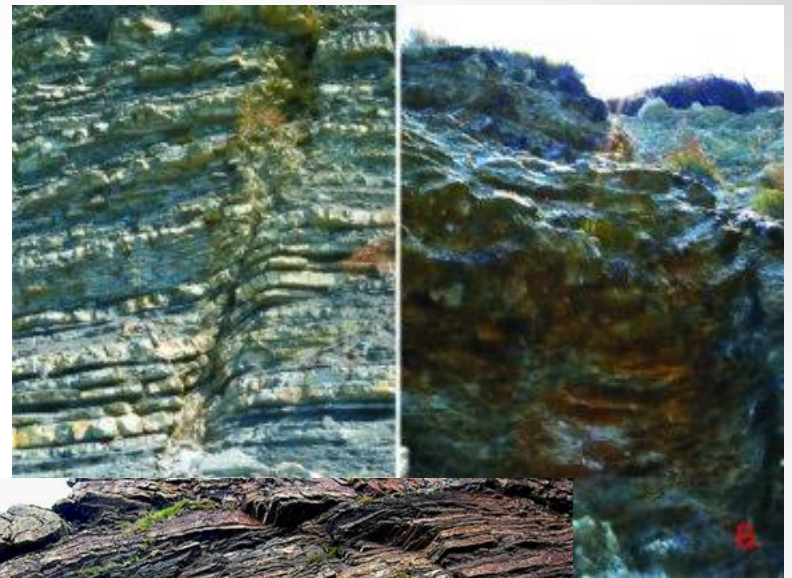
напряжения релаксировались, породы, разрушились, откос частично (при оползании) или полностью (при обрушении) деформировался. В первом случае дальнейшее поведение массива обуславливается остаточным сопротивлением сдвигу.

Нарушения сплошности горных пород являются поверхностями ослабления массива. Различают следующие поверхности:

- **трещины - шероховатые, гладкие, заполненные**
- **слабые слои и прослои (включения водонасыщенных глинистых пород в осадочной толще);**
- **контакты между слоями: нейтральные (не участвуют в формировании первичной поверхности сдвига), пассивные (дополняют основную поверхность сдвига), активные (являются основной поверхностью сдвига);**



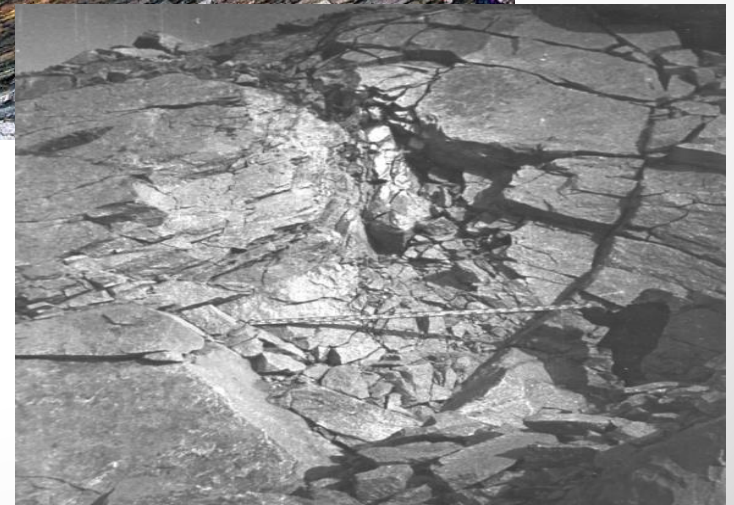
- **крупные разломы и тектонические нарушения;**



- **границы сбросов, взбросов, сдвигов, местных поднятий и опусканий с образованием разрывов;**



- **зоны дробления и смятия пород.**



Классификация деформаций карьерных откосов и их причины

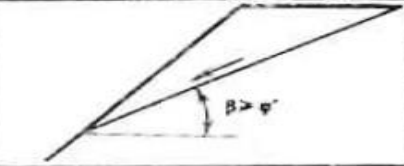
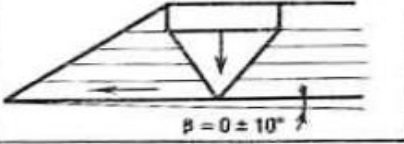
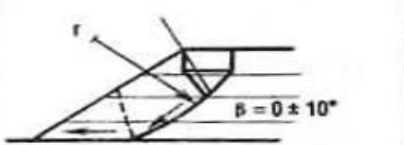
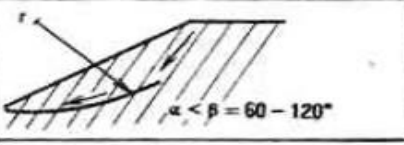
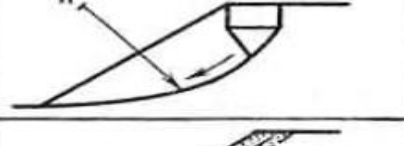



Для условий открытых горных работ Г. Л. Фисенко, предложена классификации где типы деформаций расположены в порядке убывания степени их опасности.

Класс и под-класс	Деформации и их генетический признак	Причины и условия развития процесса
I	Обрушения:	
I.1.	Контактные	а) Подрезка горными выработками поверхностей ослабления массива с углами наклона $\beta \geq 35^\circ$
I.2	Бесконтактные	б) Завышение параметров откоса в однородных породах
I.3.	Смешанные	в) Сочетание а) и б)
II	Оползни	
II.1	Покровные	а) Слабый контакт между рыхлыми и коренными породами
II.2.	Контактные (зопные)	б) Наличие активных поверхностей ослабления подрезаемых и не подрезаемых откосом, увлажнение контактной зоны
II.3	Бесконтактные	в) Завышение параметров откоса в рыхлых породах
II.4.	Смешанные	г) Сочетание б) и в)
II.5	Фильтрационные	д) Вынос потоком слабосвязных частиц на поверхность
II.6	Консистентные	е) Насыщение водой рыхлых связных пород
III	Осыпи	
III.1	Естественные	а) Завышение угла откоса в выветривающихся породах
III.2	Техногенные	б) Влияние дробящего и сейсмического действия взрывов
IV	Промоины	
IV.1	Эрозионные	а) Неорганизованный сброс поверхностных вод
V	Просадки	
V.1	Пустотные	а) Осушение, уплотнение пористых пород, наличие карстов, подземных выработок
V.2	Компенсационные	б) Отжатие (выпор) слабых водонасыщенных пород, залегающих в основании откоса (эффект «тюбика»)

Геомеханическая классификация крупномасштабных деформаций карьерных откосов

Крупномасштабные деформации даны в частной классификации которая позволяет более детально отразить признаки процесса наиболее характерные для данного типа деформации. Эти же признаки должны найти отражение в паспортах деформаций, которые используют для уточнения характеристик сопротивления пород сдвигу.

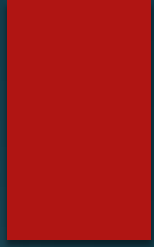
Крупномасштабные деформации отличаются наличием поверхности скольжения, будь то в крепких или слабых породах, в откосах или отвалах.

Класс и подкласс	Деформации и механизм разрушения	Геологические условия в прибортовой зоне	Механическая модель разрушения массива
I Поверхностные (надподшвенные и подшвенные)			
I.1	Общий сдвиг (отвал, борт)	Наклонные или пологие активные контакты и прослой (между средними слоями, коренными и рыхлыми породами)	
I.2	Оседание со сдвигом, надвигом (борт, отвал)	Активный контакт (слой) в однородных (слоистых) породах или пассивный контакт в слоистых породах	
I.3	Вращение со сдвигом, надвигом (борт)	Пассивный контакт в основании слоистой толщи	
I.4	Сдвиг с вращением (борт)	Пассивный контакт в верхней части борта (лежащий и вислый бока)	
I.5	Вращение (борт, отвал)	Однородные породы, наличие нейтральных контактов (горизонтальные слои, вислый бок, мушкет)	
I.6	Течение (борт, отвал)	Рыхлые водонасыщенные породы	
II Глубинные (подподшвенные)			
II.1	Вращение с выпором (борт, отвал)	Мощный слой глинистых пород в основании	
II.2	Оседание со сдвигом и выпором (борт, отвал)	Активный заглубленный слабый контакт или прослой	

В различных инженерно-геологических условиях непосредственное обрушение пород длится от нескольких секунд до нескольких минут. Непосредственному обрушению предшествует более продолжительная по времени неявная стадия микроподвижек. На этой стадии вдоль наиболее напряженной поверхности (потенциальная поверхность обрушения) происходит перераспределение напряжений.

Этот процесс можно наглядно представить следующим образом.

Неустойчивый массив обладает определенным запасом потенциальной энергии, которая в момент нарушения устойчивости откоса переходит в кинетическую энергию обрушения. Эта потенциальная энергия распределена вдоль наиболее напряженной поверхности между частицами и представляет собой энергию связности породы. В определенных условиях в массиве возникают микродефекты и нарушаются микросвязи. Потеря энергии «лопнувших» связей компенсируется за счет резервов еще существующих, так как количество ее должно сохраняться неизменным до перехода в новое качество. В итоге потенциальная энергия сдвига концентрируется в каком-то критическом минимальном числе «устоявших» связей. Этот момент соответствует состоянию предельного равновесия массива, когда коэффициент его устойчивости $n = 1$. При дальнейшем нарушении связей массив, исчерпавший все свои потенциальные возможности сохранения устойчивости, обрушается. Весь запас потенциальной энергии мгновенно переходит в кинетическую энергию обрушения. Этим и объясняется катастрофический характер этого вида деформации откосов.



Продолжительность неявной стадии микроподвижек зависит от соотношения сдвигающих и удерживающих сил в массиве сразу же после проведения выработки (исходное соотношение сил) и интенсивности потерн прочности пород до наступления состояния предельного равновесия. В каждом отдельном случае эта стадия будет иметь различную продолжительность. Наблюдать инструментально микроподвижки обычно начинают уже после появления явных признаков деформации массива. Следовательно, можно говорить только о продолжительности этой стадии. Она длится от нескольких дней до нескольких месяцев. Иногда процесс затухает (например, в результате предотвращения попадания воды в нарушенную зону) и прекращается или же вновь активизируется. На бортах карьеров можно встретить трещины отрыва, образовавшиеся карьеров можно встретить трещины отрыва, образовавшиеся несколько лет назад. Основное отличие обрушения от оползня, проявляющееся после преодоления равновесного барьера ($n=1$). заключается в том, что в случае обрушения преодоление состояния предельного равновесия разрешается катастрофически (происходит своего рода «взрыв») и прежнее состояние равновесия уже не может быть восстановлено.

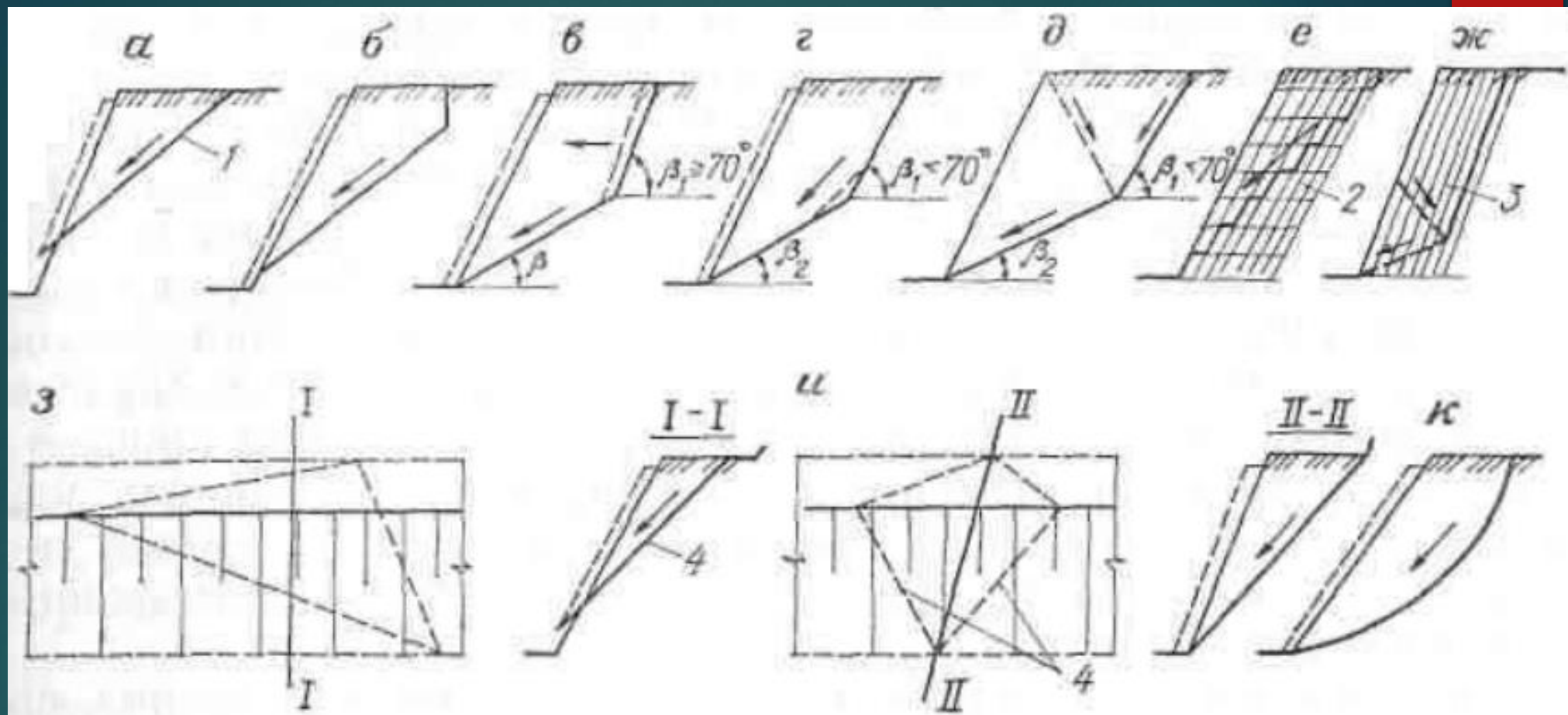


С точки зрения геомеханики *обрушение* — это прогрессирующий во времени необратимый процесс нарушения связности в горных породах, завершающийся быстрым смещением неустойчивого массива.

Наиболее часто обрушения происходят в результате:

- несоответствия проектных параметров откосов геологическим, инженерно-геологическим или горнотехническим условиям;
- несоответствия фактических параметров откосов проектным;
- нарушения технологии ведения горных работ (изменения направления подвигания фронта горных работ, подрезки слабых контактов горными выработками, несоблюдения очередности отработки отдельных блоков или заходок и др.);
- наличия поверхностен ослабления массива, не обнаруженных во время инженерно-геологических изысканий;
- снижения прочностных характеристик пород в результате непредвиденных воздействий на породы;
- нарушения режима осушения месторождения.





Схемы обрушения уступов в нарушенных зонах и формы поверхностей скольжения:

а — плоская; б — то же, с вертикальной трещиной отрыва; в — то же, с наклонной поверхностью отрыва; г — монотонная криволинейная; д — призматическая с дополнительной поверхностью скола; е — ступенчатая; ж — призматическая с дополнительными поверхностями сдвига вкrest слоистости; з — кососекающая с поверхностью отрыва в торце консоли; и — желобчатая; к — круглоцилиндрическая; 1 — согласпопадающие трещины; 2 — системы трещин; 3 — слоистость; 4 — кососекающие нарушения

Механизм разрушения уступов в основном определяется геологическим строением и структурой массива. В анизотропных породах сдвиг происходит по поверхностям ослабления, положение которых predetermined строением пород и степенью их нарушенности.

В изотропных породах поверхность скольжения образуется в процессе разрушения откоса. Важное значение имеет также взаимная ориентация поверхностей ослабления и откоса. Более простой случай—падение основной поверхности ослабления в сторону выработки. Параметры откосов определяют путем решения плоской задачи.

При диагональной ориентации поверхностей ослабления в ряде случаев необходимо решать объемную задачу, так как сдвиг происходит по двум поверхностям скольжения, ориентированным под некоторым углом друг к другу, что обуславливает сложный характер взаимодействия сил, приложенных к призме возможного обрушения.





ОПОЛЗНИ

Оползание откосов обычно связано с наличием увлажненных глинистых пород. Практически каждый глинистым слой или прослоек может дать начало развитию оползневого процесса.

Но оползни возникают не только в глинистых породах. Они возможны в скальных и полускальных породах. Поверхностью скольжения в этих случаях служат трещины, заполненные вторичным материалом (глинкой трения), или тектонические нарушения, в пределах которых породы обычно сильно раздроблены и переувлажнены. Поверхность скольжения оползня проходит по трещинам или зонам дробления, которые и обуславливают ее форму.

Оползание пород—наиболее сложный геомеханический процесс.

В оползневом процессе решающую роль играют пластические деформации, переходящие при переувлажнении пород в пластическое течение. Стадию зарождения оползня сопровождают те же процессы потери связей между частицами пород, которые происходят в подготовительный период обрушения. Но если нарушение состояния предельного равновесия откоса завершается его обрушением и процесс на этом закапчивается, то переход процесса в оползневую стадию - только начало деятельности оползня. При первых же подвижках сцепление по поверхности скольжения полностью утрачивается и дальнейшее состояние оползня целиком управляется фрикционными силами. В период затухания процесса оползания происходит некоторое уплотнение пород и сцепление частично может восстановиться, но оно существенной роли уже не играет и вновь утрачивается после активизации оползня. С точки зрения геомеханики оползание представляет собой непостоянный во времени регулируемый фрикционными силами процесс медленного смещения пород нарушенной структуры, иногда циклически повторяющийся.



Наиболее существенные отличительные признаки оползней - скорость движения и ее изменение во времени, форма и глубина залегания поверхности скольжения.

Скорость движения оползня влияет на выбор параметров системы разработки при использовании управляемого обрушения. В зависимости от времени формирования оползня и скорости его движения устанавливают длину экскаваторного блока, число экскаваторов одновременно участвующих в работе, высоту вскрышных уступов и др. Зная скорость деформирования нерабочего борта и внутренних отвалов, можно рассчитать скорость подвигания добычного фронта работ, обеспечивающую постоянное опережение надвигающегося сзади оползня отвала.

В условиях открытых работ скорость движения затяжных оползней в активной стадии составляет от нескольких миллиметров до нескольких сантиметров в сутки. Если не принимать меры к стабилизации оползня или его ликвидации, то движение оползня может длиться годами. После преодоления равновесного барьера скорость движения оползня может быть постоянной, нарастающей и убывающей во времени, периодически нарастающей и убывающей.

Осыпание откосов — наиболее распространенный вид деформирования. Осыпанию в результате выветривания в той или иной степени подвержены все разновидности пород. Интенсивность осыпания пород зависит от их крепости, стойкости, состава, структуры, влажности и др. Наиболее интенсивно осыпаются песчано-глинистые породы, которые после обнажения быстро теряют влагу. К ним относят аргиллиты, алевролиты и некоторые разновидности сланцев. Легко выветриваются также породы, в состав которых входят полевошпатовые минералы.



С точки зрения геомеханики, *осыпание* — *необратимый процесс отделения от массива и скатывания к основанию откоса отдельных кусков породы.*

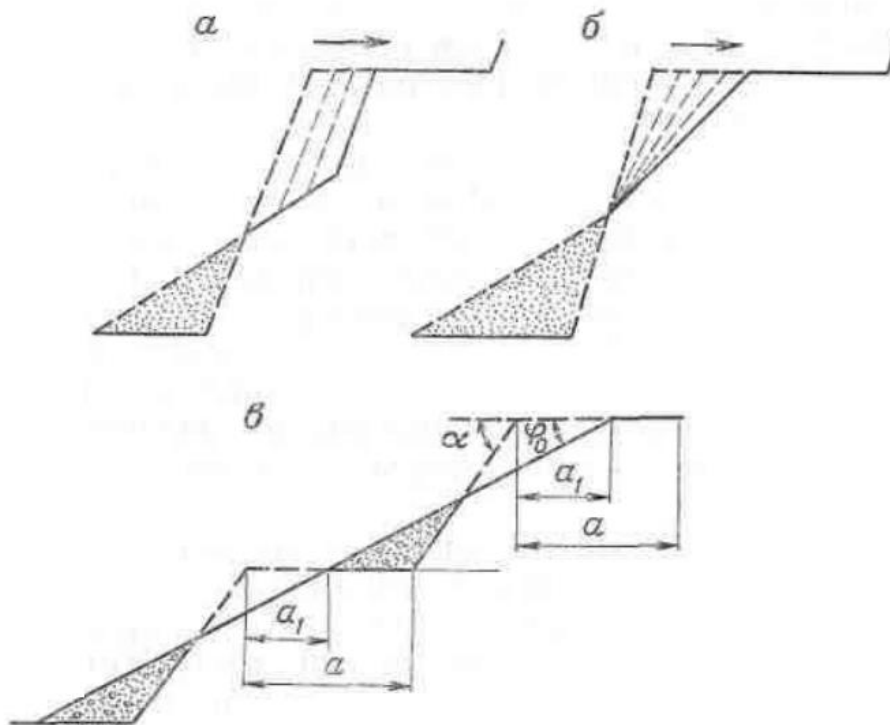
Различают физическое и химическое выветривание пород.

Физическое (или механическое) выветривание обуславливается колебанием температуры, числом циклов замораживания-оттаивания воды, содержащейся в трещинах и порах, водной и ветровой эрозией, увлажнением и высыханием пород, механическими колебаниями (сейсмическим действием взрывов и вибрациями работающего оборудования).

Химическое выветривание пород связано с изменением их минералогического состава в результате воздействия агрессивных вод, растворов и газов (кислорода, углекислоты и др.)

Если осыпание происходит равномерно по всей поверхности откоса, то профиль уступа отступает параллельно самому себе (**параллельное отступление откоса**). При более интенсивном осыпании верхней части откоса, которая обычно больше разрушена, профиль уступа постепенно изгибается, приобретая выпуклую форму (**непараллельное отступление откоса**).

Параллельное отступление характерно для слоистых откосов с крутым падением слоев. На большинстве карьеров происходит непараллельное отступление откосов. Породы верхней части откосов обычно сильнее разрушены взрывами в связи с наличием двух обнаженных поверхностей и двойным воздействием на них взрывов: в процессе отработки верхнего горизонта при взрывании скважин с перебором и заоткоски уступа на данном горизонте.



Схемы изменения профиля уступов в результате осыпания пород и сработки верхней части уступа:

а — параллельная, *б* — непараллельная, *в* — выполаживание уступов под углом естественного откоса; a_1 — ширина срабатываемой части бермы; a — первоначальная ширина бермы; α , φ_0 — соответственно углы откоса уступа и образовавшейся оси

Просадки — деформации откосов в вертикальной плоскости без бокового смещения массива. Иногда просадки сопровождаются выпором пород в основании откоса.

Причины просадок откосов следующие:

- ✓ увлажнение слабых пористых пород (лесс и лессовидных суглинков);
- ✓ наличие карстовых пустот в массиве борта карьера, каверн, зон выщелачивания и др.;
- ✓ подработка борта карьера подземными выработками при совместной отработке месторождения открытым и подземным способами;
- ✓ наличие слабых пластичных пород в основании борта;
- ✓ интенсивное осушение водообильных пород, слагающих борт карьера;
- ✓ образование пустот в массиве в результате интенсивного окисления, выщелачивания или сгорания полезного ископаемого (сульфидные руды, соли, уголь и др.);
- ✓ уплотнение рыхлых вскрышных пород в отвалах.

Просадки обычно носят локальный характер и существенно не влияют на устойчивость борта в целом. Отрицательным последствием просадок может быть опасность попадания в них людей и оборудования (при значительных их размерах), а также нарушения транспортных коммуникации.

Появление просадок часто является признаком начала процесса оползнеобразования.



Опывины — деформации поверхности откосов, характеризующиеся смещением к его основанию водонасыщенных тонкозернистых и пылеватых песчано-глинистых пород в виде грязевых потоков.

Поток перемещается по откосу с различными скоростями (в зависимости от консистенции) и в основании откоса растекается под весьма пологим углом.

Возникновение опывин связано с суффозионными явлениями и слабой фильтрацией. Последнее обстоятельство затрудняет осушение пород и снятие напоров. Опывины напоминают оползни и иногда сопровождаются оползневыми явлениями, но в чистом виде отличаются от оползней отсутствием поверхностей скольжения. Опывает небольшой по мощности верхний водонасыщенный и слой пород откоса. Остальная часть массива находится в устойчивом состоянии.

Опывание прекращается после уменьшения запасов воды, фильтрующей через поверхность откоса.



Промоины — деформации поверхности откоса, вызванные поверхностным стоком. Участки концентрированного стока воды образуются в местах понижения рельефа местности около карьера и на бермах, оформленных без качественной планировки их поверхности. Промоины сами по себе не создают какой-либо опасности, но по ним в карьер устремляется большое количество воды, которая по трещинам может проникнуть на лежащие ниже горизонты и снизить устойчивость борта. Большие потоки воды разрушают бермы, размывают железнодорожное полотно и автодороги.



РАСЧЕТ УСТОЙЧИВОСТИ КАРЬЕРНЫХ ОТКОСОВ

Геомеханическими расчетами можно определить *степень устойчивости карьерных откосов или их предельные параметры*. В методах, основанных на теории предельного равновесия, используют законы статики.

Потенциальную призму обрушения рассматривают как геометрическое тело, к которому приложены сосредоточенные силы в виде векторов, а устойчивость откоса оценивают в результате решения силовой задачи.

ПОЛОЖЕНИЕ В МАССИВЕ ПОТЕНЦИАЛЬНОЙ ПОВЕРХНОСТИ СКОЛЬЖЕНИЯ

При применении традиционных методов расчета устойчивости откосов вначале необходимо установить положение в массиве поверхности, по которой откос разрушится в случае потери им устойчивости. Ее называют поверхностью скольжения, сдвига, разрушения, наиболее напряженной поверхностью.

Поверхности скольжения могут быть трех типов:

- Естественного происхождения — поверхности ослабления массива, обусловленные геологическим строением месторождения, структурой и степенью нарушенности горных пород.
- Гипотетические (расчетные), образующиеся в процессе разрушения массива. Форму поверхности скольжения принимают в зависимости от предполагаемого механизма разрушения массива.
- Комбинированные, образующиеся в результате частичного сдвига призмы обрушения по естественной и вновь образованной поверхностям.

Форма поверхности скольжения predeterminedena естественными условиями ее образования, а реализация сдвига по той или иной поверхности зависит от ее ориентации относительно поверхности откоса и элементов залегания. Положение в массиве поверхностей ослабления определяют по результатам геологоразведочных работ и инженерно-геологических изысканий.

Однако однозначно задача решается только при наличии одиночных поверхностей — тектонических нарушений, контактов между различными комплексами пород, протяженных трещин, разрывов.

В скальных и полускальных породах деформации как уступов, так и бортов происходят только при наличии согласнопадающих и кососекущих поверхностей ослабления массива — плоских, криволинейных, волнистых, призматических, ломаных (отдельных поверхностей и их сочетаний).

Гипотетические поверхности скольжения.

До разрушения массива процесс перехода среды в предельное состояние сопровождается формированием наиболее напряженной поверхности (зоны), которая в момент нарушения равновесного состояния реализуется в поверхность скольжения.

Скольжение в чистом виде происходит только по готовым поверхностям. В ненарушенных массивах образуется зона сдвига, в которой одновременно происходит взаимное проскальзывание и поворот блоков породы, образующихся в процессе их разрушения. Такая зона в крепких породах может образоваться только в тектонически нарушенных и интенсивно трещиноватых породах.

В крепких однородных породах вероятность обрушения бортов при современной их высоте (200-400 м) крайне мала. Сложно прогнозировать и форму потенциальной поверхности скольжения.

Условно ее принимают круглоцилиндрической исходя из дискретности среды и сходства ее свойств со связносипучей средой.

В однородных породах средней крепости даже строенные уступы (высота 30—36 м, углы откоса 60—75°) не обрушаются даже в тех случаях, когда удельное сцепление примерно равно высоте вертикального откоса. Если же деформации возможны, в расчетах принимают плоскую или круглоцилиндрическую форму поверхности скольжения. В бортах наиболее вероятна криволинейная форма поверхности скольжения.

В однородных рыхлых породах принимают криволинейную форму поверхности скольжения и в уступах, и в бортах.

Круглоцилиндрическая поверхность скольжения. В откосах плоского профиля обычно принимают круглоцилиндрическую поверхность скольжения. Положение ее в массиве можно определить по методу Г. Л. Фисенко или с помощью одного из приведенных вариантов.

Плоская поверхность скольжения.

Плоскую поверхность скольжения иногда применяют в однородных породах при расчете устойчивости уступов, сложенных рыхлыми породами.

Положение ее в массиве определяют в такой последовательности:

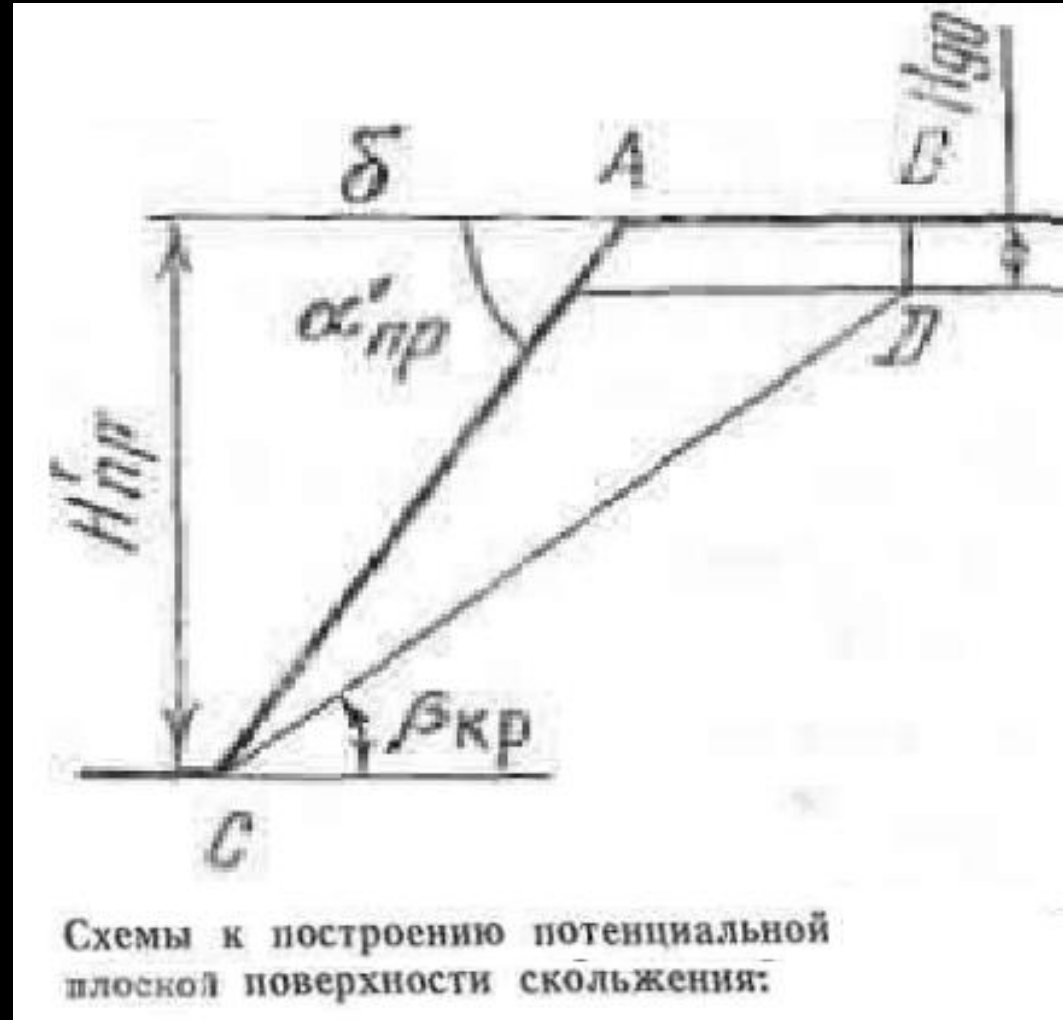
1. На глубине, равной H_{90} , проводим прямую параллельную верхней площадке откоса.

2. Под углом $\beta_{кр} = \frac{\alpha + \varphi}{2}$

проводим прямую до пересечения с горизонтальной прямой в точке D (отрезок CD).

3. В точке D восстанавливаем перпендикуляр (отрезок BD).

Погрешность, допускаемая при замене криволинейной поверхности скольжения плоской, обуславливается углом откоса уступа. При крутых откосах она незначительна.



КОЭФФИЦИЕНТ ЗАПАСА УСТОЙЧИВОСТИ КАРЬЕРНЫХ ОТКОСОВ

Под коэффициентом устойчивости уступа или борта карьера понимают отношение суммы удерживающих сил к сумме сдвигающих сил:

$$n = \frac{\sum T_{уд}}{\sum T_{сд}}$$

Сдвигающие силы, действующие вдоль поверхности скольжения, силы внешние: объемные, обусловленные гравитационными, сейсмическими и фильтрационными силами, или поверхностные, представленные внешними нагрузками на откос, гидростатическим давлением, а также другими силами, приложенными к призме возможного обрушения.

Удерживающие силы, действующие вдоль поверхности скольжения — силы внутренние, обусловленные сопротивлением горных пород деформированию под действием внешних сил.

Внутренние силы всегда возникают как реакции на действие внешних сил, поэтому их величина равна внешним силам, распределенным по любой площадке поверхности скольжения.

Максимальная величина внутренних сил ограничивается прочностью материала, в частности сопротивлением сдвигу.

Коэффициент устойчивости откосов при криволинейной поверхности скольжения выражают формулой

$$n = \frac{f \sum N_i + \sum l_i c_i}{\sum T_i}$$

где $f = \operatorname{tg} \varphi$ — коэффициент трения по основанию призмы возможного обрушения;

N_i, T_i — соответственно нормальная и касательная составляющие массы i -го блока пород, включая и дополнительную внешнюю нагрузку;

l_i — длина отрезка поверхности скольжения i -го блока шириной 1 кв.м, на который действует сила сцепления c_i .

При плоской поверхности скольжения коэффициент запаса устойчивости откоса определяют по формуле

$$n = \frac{fN + cL}{T}$$

Согласно рекомендациям ВНИМИ величина коэффициента запаса обуславливается типом откоса и временем его стояния в стационарном положении.

Рекомендуемое значение коэффициента запаса¹ в различных геологических условиях

Общая характеристика пород, тип откоса	До 5 лет	Более 5 лет
Нерабочий борт, глинистые или трещиноватые	1,2	1,3
То же, преобладание песчаных и гравелистых	1,15	1,2
Рабочий борт	1,2	—
Рабочие уступы и отвалы	1,2	—
Нерабочие уступы, глинистые и трещиноватые	1,5	2,0
То же, песчаные и гравелистые	1,15	1,2

¹ При необходимости учитывают: сейсмичность района, дополнительное увлажнение пород, увеличение нагрузки и другие дополнительные факторы.

Призму обрушения разбивают на ряд вертикальных блоков, в пределах которых криволинейный участок поверхности скольжения можно заменить плоским, не допуская при этом большой погрешности. Степень устойчивости откоса определяют как отношение удерживающих $T_{уд}$ сил к сдвигающим $T_{сд}$.

$$n = \frac{\sum T_{уд}}{\sum T_{сд}}$$

Если призма возможного обрушения включает m блоков, то степень устойчивости откоса:

$$n = \frac{g \cdot P_1 \cos \beta_1 \cdot \tan \varphi_1 + c_1 \cdot L_1 + \dots + g \cdot P_m \cos \beta_m \cdot \tan \varphi_m + c_m \cdot L_m}{g \cdot (P_1 \cdot \sin \beta_1 + \dots + P_m \cdot \sin \beta_m)}$$

Где P_i — масса i -го породного блока ($i=1... M$);

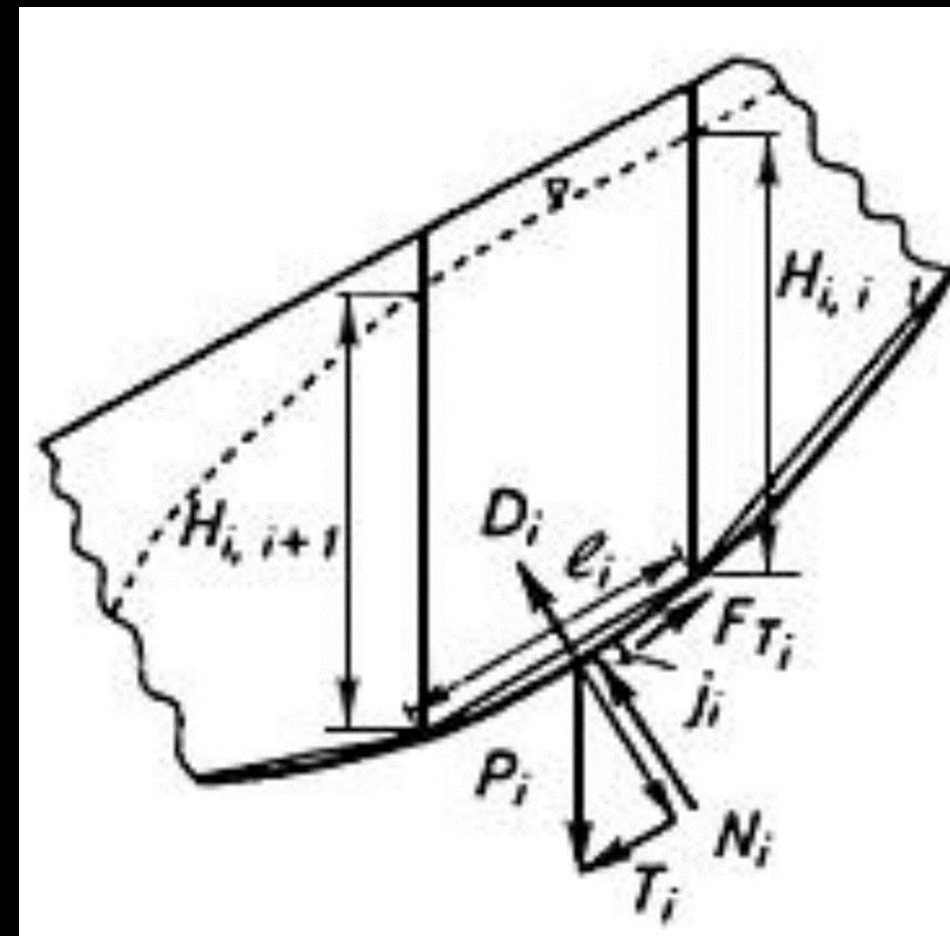
β_i — угол наклона поверхности скольжения в пределах i -го блока;

L_i — длина поверхности скольжения в пределах i -го блока;

c_i — удельное сцепление по поверхности ослабления i -го блока,

φ_1 — угол трения по поверхности ослабления i -го блока.

Формулу можно использовать для расчетов устойчивости откосов плоских и выпуклых, в однородных породах, слоистых породах всячего бока, при горизонтальном и мульдообразном залегании слоев; со ступенчатым профилем; при наличии в основании борта рыхлых глинистых пород; в многослойной среде с различными характеристиками пород в слоях.

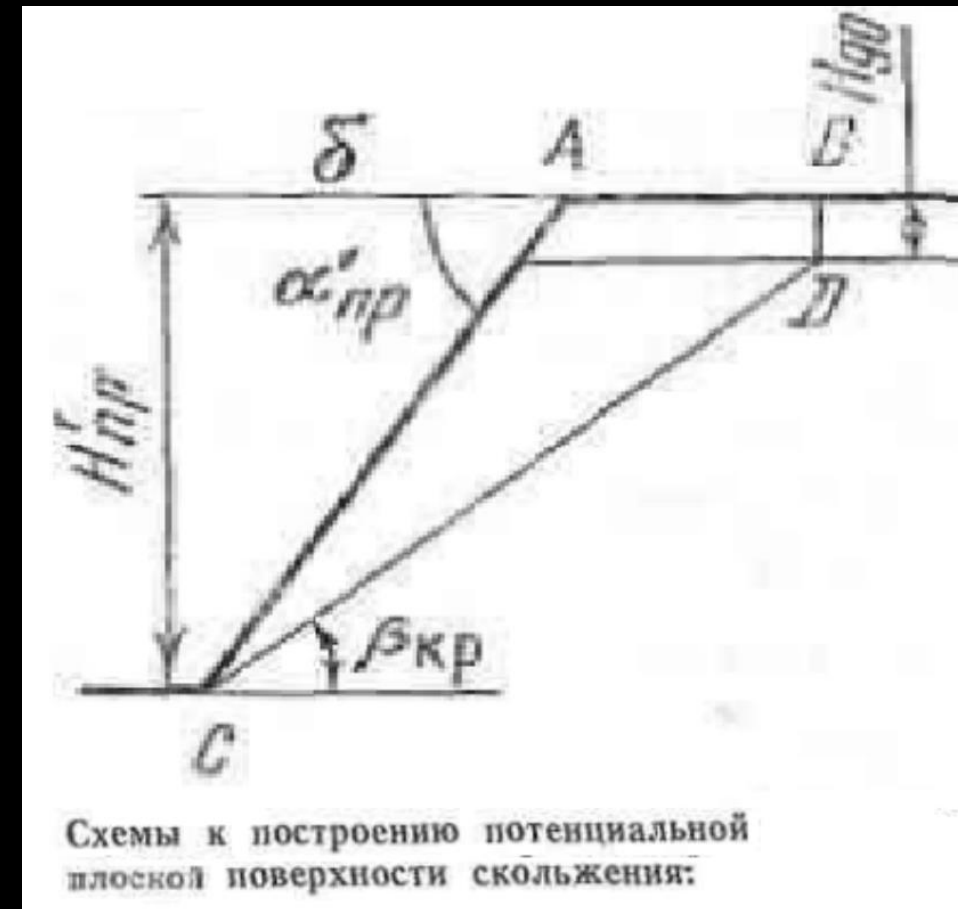


ПЛОСКАЯ ПОВЕРХНОСТЬ СКОЛЬЖЕНИЯ

Плоская поверхность скольжения — частный случай криволинейной поверхности. Так как $m=1$, формула имеет вид

$$n = \frac{g \cdot P \cdot \cos \beta \cdot \tan \varphi + c \cdot L}{g \cdot (P \cdot \sin \beta)}$$

Формулу используют для расчета устойчивости уступов и бортов карьеров, ослабленных активными контактами, падающими согласно с откосом и подрезаемыми им.



РАСЧЕТ УСТОЙЧИВОСТИ ОТКОСОВ МЕТОДОМ МНОГОУГОЛЬНИКА СИЛ

Призматическая поверхность скольжения.

При применении графических методов расчета в одних случаях используют параметры потенциальной призмы обрушения, к которой приложены векторы действующих сил (метод многоугольника сил), в других – исходят из характеристик сопротивления пород сдвигу. Первый применяют преимущественно в нарушенных массивах, когда потенциальная поверхность скольжения имеет сложную форму (включает криволинейные, прямолинейные участки и резкие изломы). Расчет устойчивости бортов карьеров этим методом заключается в построении многоугольника сил, действующих на отдельные блоки призмы возможного обрушения. Второй применяют в однородных породах

Рассмотрим более простой случай - сдвиг призмы обрушения по двум плоским поверхностям скольжения с различными углами наклона (α). В процессе деформирования откоса призма обрушения делится на два блока – призму активного давления ABB_1CA_1 и призму упора A_2DC . Следует отметить, что сдвиг возможен только при условии образования поверхности скола AA_1C .

На блок 1 действуют силы: P_1 — масса блока; $c'L_1$ - сцепление по поверхности контакта B_1C ; cl — сцепление по поверхности скола A_1C ; R_1 — реакция основания блока 1; E — реакция блока 2 на давление блока 1.

На блок 2 действуют силы: P_2 — масса блока; $c'L_2$ — сцепление по контакту CD ; R_2 — реакция основания блока 2; E_1 — давление блока 1 на блок 2.

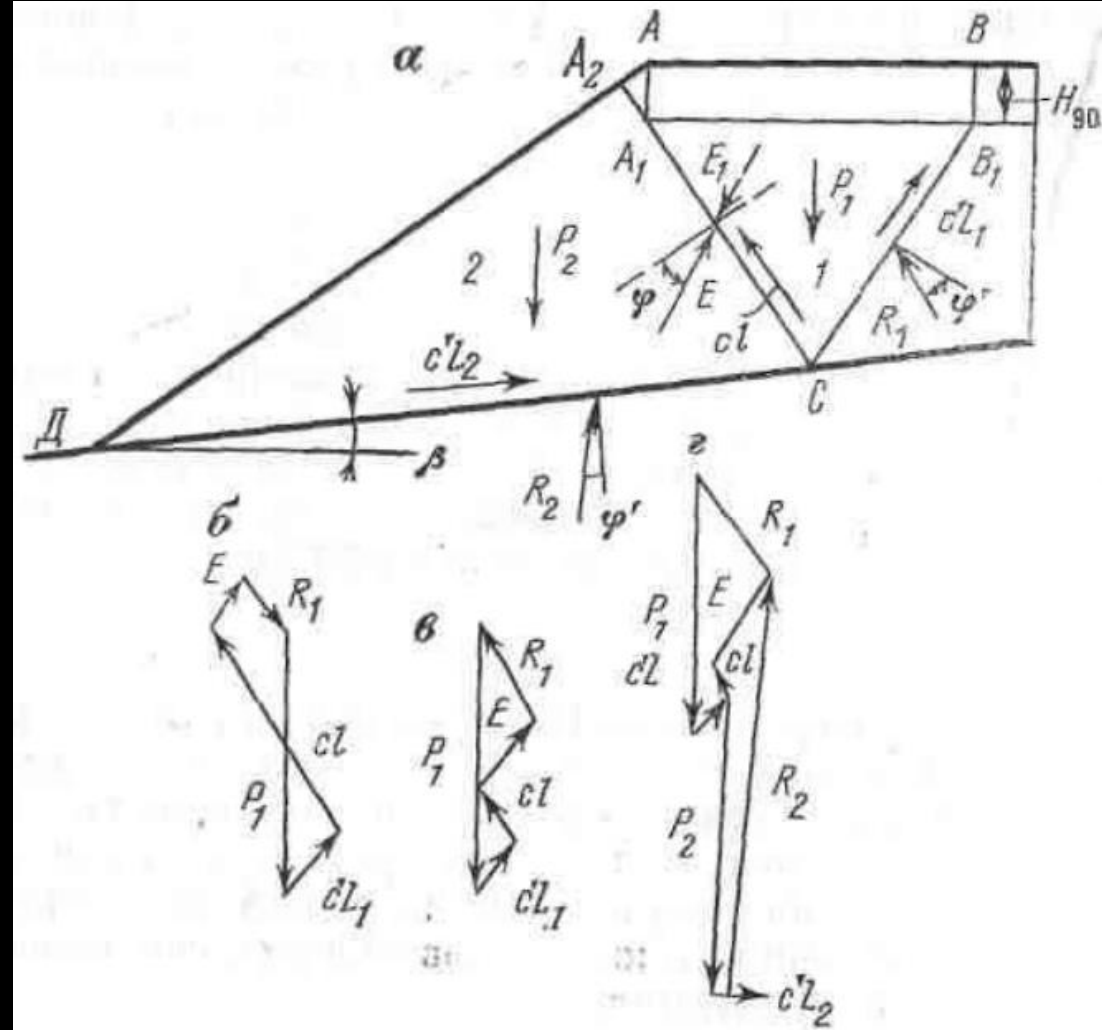
Построение многоугольника сил начинают с блока 1. Вначале необходимо проверить возможность образования поверхности скола. Для этого выберем масштаб векторов сил и построим многоугольник сил для блока 1. Вектора сил, начиная с P_1 , проведем параллельно направлению их действия в массиве.

На рисунке (б) изображен многоугольник сил для случая, когда поверхность скола образоваться не может, а на рисунке (в)— когда скол возможен. На рисунке (г) приведен полный многоугольник сил. Его замыкание свидетельствует об устойчивости откоса с тем коэффициентом запаса, который введен в характеристики пород.

Результаты расчетов устойчивости откосов методом многоугольника сил могут быть следующие:

- многоугольник сил замкнулся точно — коэффициент устойчивости $n=1$;
- многоугольник сил разомкнулся — $n<1$;
- многоугольник сил перезамкнулся — $n>1$.

Если окажется, что борт траншеи неустойчив ($n<1$), то необходимо изменить его параметры (уменьшить высоту или угол откоса) и повторить расчеты.



Метод многоугольника сил применяют только при условии образования поверхности скола между призмами активного давления и упора. Это условие зависит не только от механических характеристик и структуры пород, но и угла наклона основания призмы упора к горизонту. Если основание борта на всем протяжении имеет угол наклона $\beta > \phi$, то будет происходить общий сдвиг. Ориентировочно считается, что призма упора сохраняет устойчивость при углах $\beta \geq 10^\circ$. Сдвиг ее возможен только в результате избыточного давления со стороны оседающего клина. Деформации возможны и в виде надвигов, когда поверхность ослабления падает в массив под углами $\beta \leq -10^\circ$. Наличие в массиве поверхностей ослабления совпадающих с положением боковых поверхностей клина, способствует активизации процесса деформирования (например, висячем боку при крутом падении слоев или наличии тектонических нарушений). Криволинейно плоская поверхность скольжения. Если поверхность скольжения в верхней части борта проходит по однородным породам, а в нижней — по слабому контакту рассчитать устойчивость откоса можно методом многоугольника сил, заменив криволинейные поверхности в основании блоков плоскими.

АНАЛИТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ РАСЧЕТА ПРЕДЕЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ ОТКОСОВ

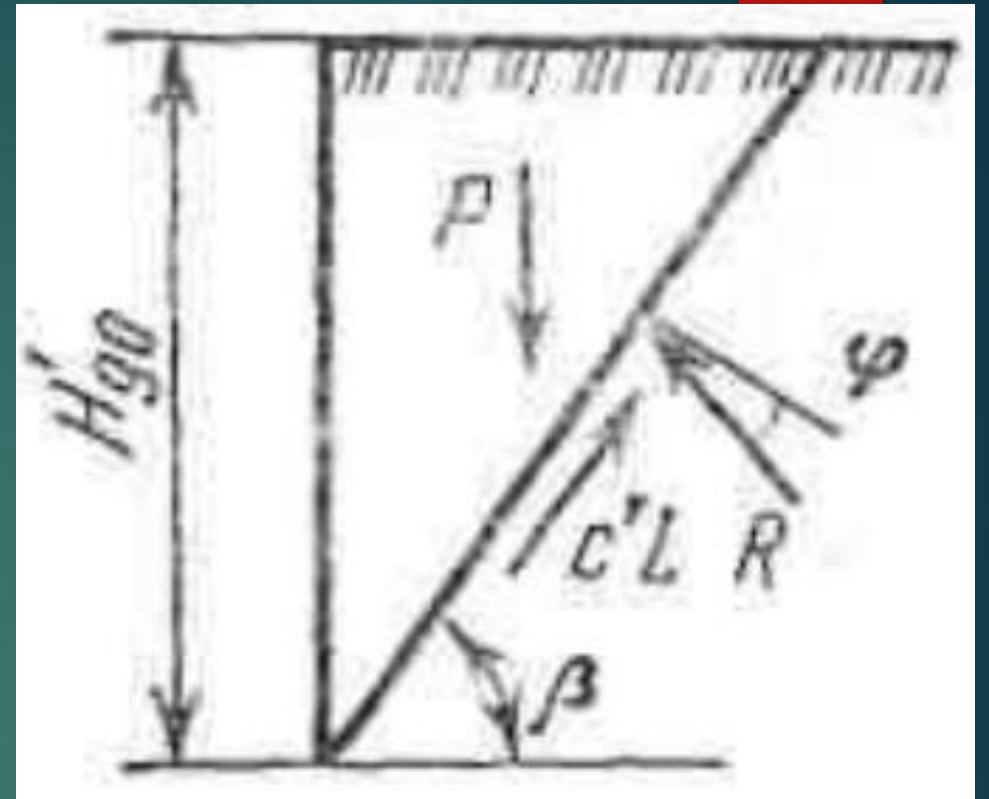
Аналитические методы расчета применяют для непосредственного определения одного из параметров — высоты или угла откоса, при известном другом. Расчетные формулы получают решением статических задач взаимодействия сил, действующих на призму обрушения.

Высота или угол откоса в однородных породах — функция физико-механических свойств пород вида

$$H(\alpha) = f(c, \gamma, \varphi)$$

При наличии поверхностей ослабления массива, по которым возможен сдвиг, в расчетную формулу входят показатели сопротивления сдвигу по этой поверхности c' , φ' и угол ее наклона β .

Предельные параметры откоса при плоской поверхности скольжения, подрезаемой откосом. Из условия предельного равновесия вертикального откоса его высота



$$H_{90} = \frac{2c'}{g\gamma} [\operatorname{tg} \beta + \operatorname{ctg} (\beta - \varphi')]$$

$$H_{\text{пр}} = \frac{2c'}{g\gamma} \left[\frac{1 + \text{ctg}\beta \text{ctg}(\beta - \varphi')}{\text{ctg}\beta - \text{ctg}\alpha} \right] \quad \text{При } \alpha \neq 90^\circ$$

предельный угол откоса при заданной его
высоте

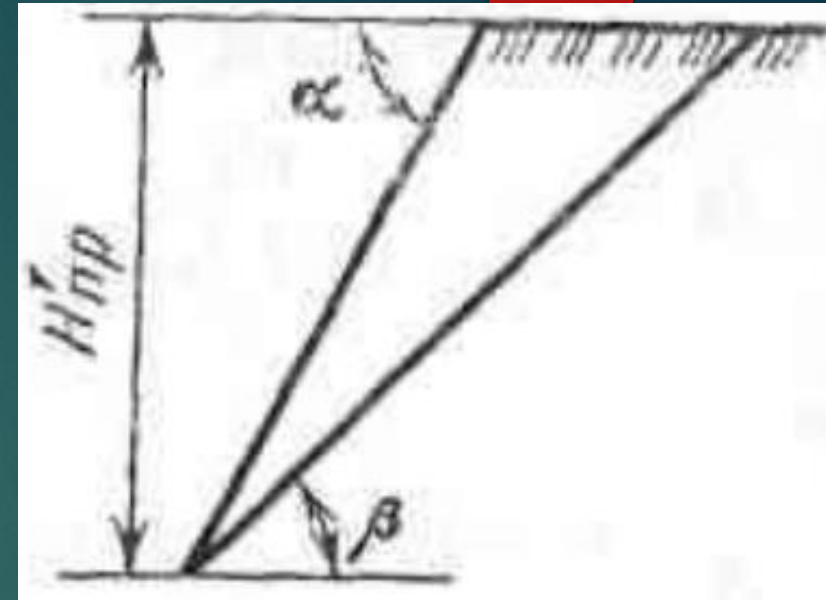
$$\alpha'_{\text{пр}} = \text{arcctg} \left\{ \text{ctg}\beta - \frac{2c'}{g\gamma H} [1 + \text{ctg}\beta \text{ctg}(\beta - \varphi')] \right\}$$

С учетом возможности образования трещины отрыва глубиной H_{90}

$$H'_{\text{пр}} = H_{90} \frac{1}{1 - \sqrt{\text{ctg}\alpha \cdot \text{tg}\beta}}$$

$$\alpha'_{\text{пр}} = \text{arcctg} \left[\text{ctg}\beta \left(1 - \frac{H_{90}}{H} \right)^2 \right]$$

где ρ — угол падения поверхности ослабления.



РАСЧЕТ ПРЕДЕЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ ОТКОСОВ ПО ХАРАКТЕРИСТИКАМ СОПРОТИВЛЕНИЯ ПОРОД СДВИГУ

Известно, что сопротивление однородной среды сдвигу обусловлено внутренним трением и сцеплением между частицами породы. Идеально сыпучая среда характеризуется полным отсутствием сцепления ($c=0$) и образует откос бесконечно большой высоты под углом естественного откоса.

Абсолютно сухая сыпучая среда имеет угол естественного откоса

$$\rho = \varphi$$

где φ – угол внутреннего трения. Это максимальный угол, под которым располагается идеально сыпучая среда.

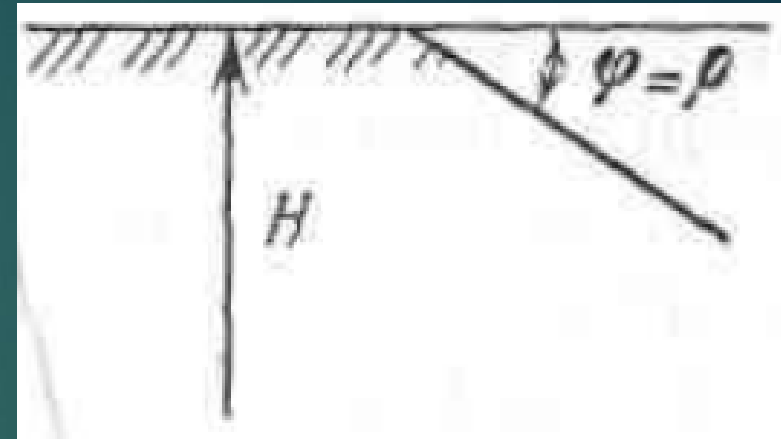
В идеально связной среде отсутствует внутреннее трение ($\varphi = 0$).

Вертикальный откос, образованный идеально связной средой,

имеет высоту

$$H_{90} = \frac{2c}{g\gamma}$$

где γ – плотность среды.



В предельной зоне, расположенной ниже оси x при $\beta = 90^\circ$ (контур откоса имеет в точке O вертикальную касательную) криволинейный контур откоса описывается уравнением

$$x = h_{90} \ln \cos \frac{y}{h_{90}}$$

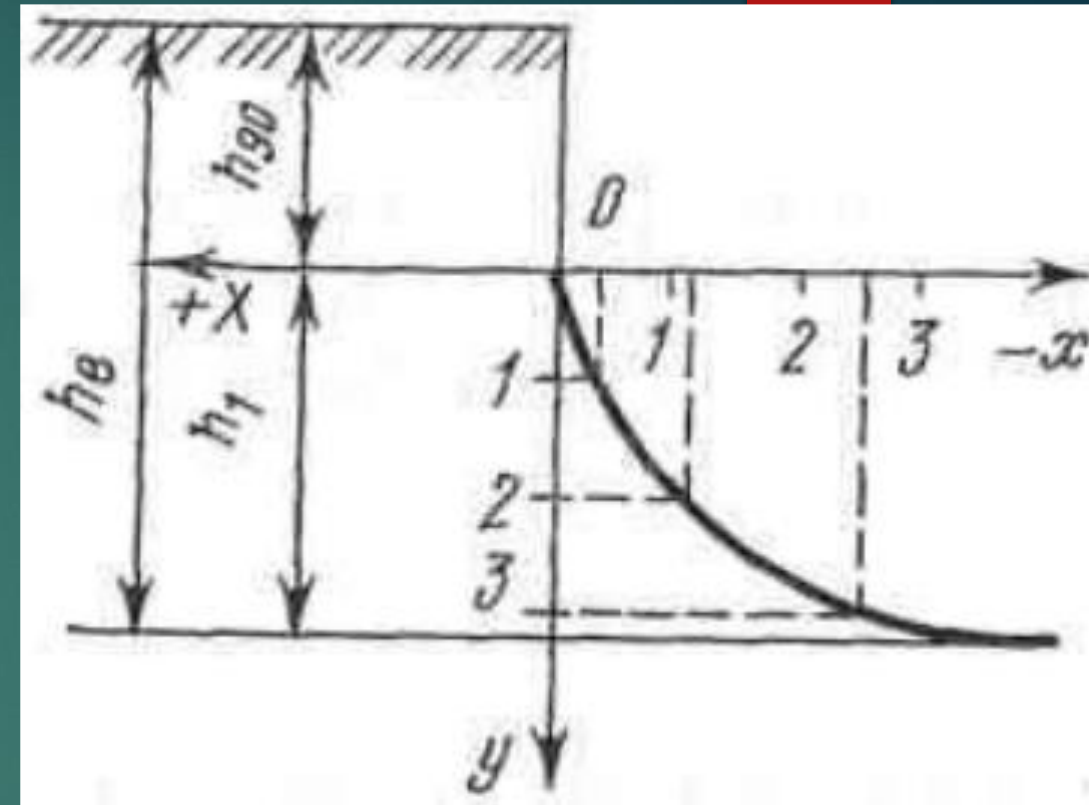
и имеет горизонтальную асимптоту на глубине

$$h_1 = \frac{3,14 \cdot c}{g \cdot \gamma}$$

Деформация сдвига происходит в условиях плоского или объемного напряженного состояния среды. В результате давления, оказываемого упругим слоем породы мощностью h_{90} среда ниже этого слоя переходит в предельное состояние. Ось x делит массив на предельную и неопредельную зоны.

Неопредельная зона расположена выше положительной полуоси x и имеет компоненты напряжений

$$\sigma_1 = 0; \quad \sigma_3 = 2c + g\gamma y; \quad \tau_{xy} = 0$$



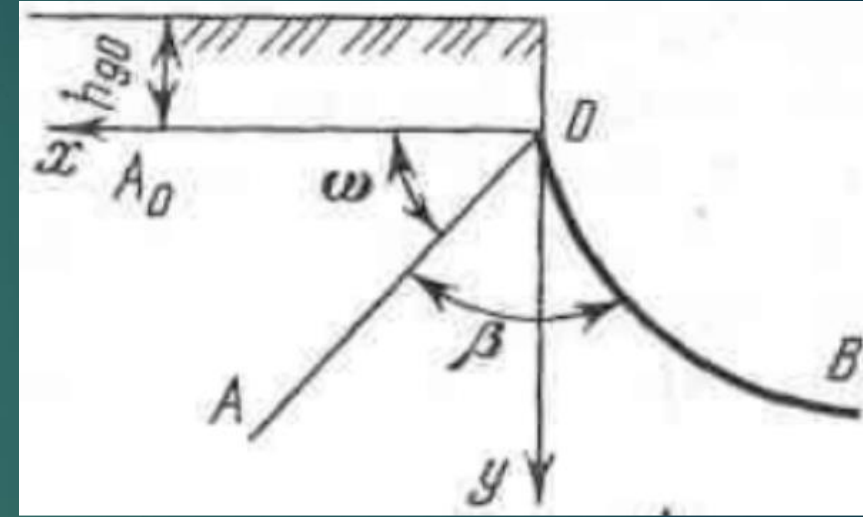
Предельная зона расположена ниже положительном полуоси— область (A_0OA) и имеет компоненты напряжений

$$\sigma_1 = g\gamma y; \quad \sigma_3 = 2c + g\gamma y; \quad \tau_{xy} = 0$$

На границе между этими зонами, включая точку O , все компоненты напряжений непрерывны.

Таким образом, равноустойчивый откос в условиях идеально связной среды состоит из вертикального участка высотой h_{90} и криволинейного участка, максимальной высотой h_1 . Максимальная высота такого откоса обусловлена исключительно наличием связей между частицами среды. По отношению к плоским откосам ее называют параметр связности пород

$$h_c = h_B = \frac{5,14c}{g\gamma}$$



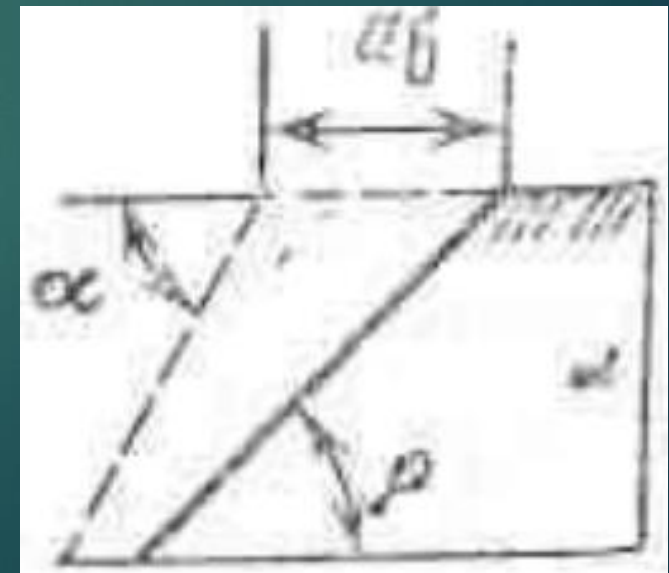
Определение ширины бермы безопасности

Критерием, по которому можно оценить ширину приоткосной полосы, за пределами которой обеспечивается безопасность нахождения людей и механизмов, является ожидаемый тип деформации откоса — осыпание, обрушение, оползание. В связи с тем, что обрушение — наиболее опасный тип деформирования откосов, первую оценку делают по данному критерию.

Потенциальная опасность обрушения существует для откосов, коэффициент запаса устойчивости которых менее нормативного. Для этих откосов ширина бермы безопасности является функцией ширины потенциальной призмы обрушения.

Если фактический коэффициент запаса устойчивости больше или равен нормативному (с учетом срока стояния откоса), то такие откосы не имеют потенциальной призмы обрушения и ширину a_6 должны определять по критерию осыпания пород.

Вторую оценку дают по критерию оползания откоса, также в зависимости от величины коэффициента запаса. Если откос не обрушится и не оползет, проверяют возможность осыпания пород по неравенству $\alpha \leq \rho$; где ρ — угол естественного откоса данной породы в раздробленном состоянии.

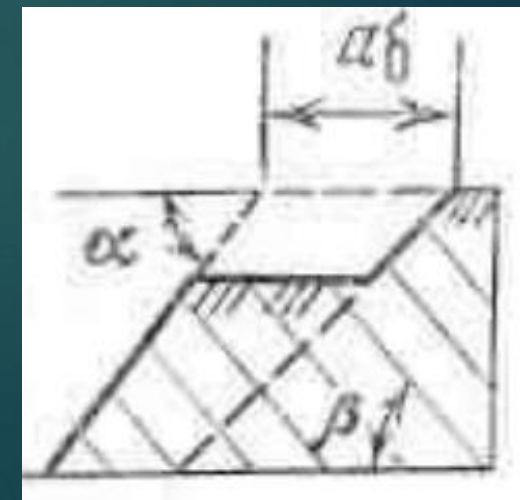
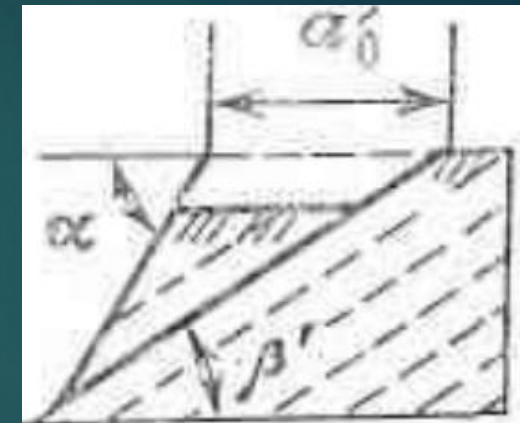


Таким образом, ширина бермы безопасности a_6 у устойчивых откосов зависит, от выветриваемости пород и возможности осыпобразования, а у потенциально неустойчивых откосов – от ширины призмы обрушения или оползания. Следует отметить, что при длительном стоянии откосов, сложенных рыхлыми породами глинистого состава, а также при наличии пологопадающих слабых контактов, должны учитываться реологические свойства пород. Это особенно важно в тех случаях, когда на бортах открытых выработок возводят здания и сооружения или же располагают отвалы.

Устойчивые откосы. Интенсивность осыпания пород зависит от их свойств и способов разработки. Откосы, сложенные породами, склонными к выветриванию, а также разрушенными взрывами, при длительном стоянии могут выположиться под углом ρ .

Потенциально неустойчивые откосы. Возможны следующие случаи:

1. $a_6 = a$. Откос сложен крепкими скальными и полускальными породами, включающими: одиночную поверхность ослабления, подрезаемую откосом. В данном варианте сдвиг происходит по фиксированной поверхности, за которой породы сохраняют длительную устойчивость.



2. $a_6 > a$. Откос сложен рыхлыми, полускальными (средней крепости и слабыми) однородными и квазиоднородными породами: поверхность скольжения круглоцилиндрическая. В слабых породах после первичного сдвига по довольно крутой поверхности, происходят повторные обрушения. По результатам моделирования и натурных наблюдений установлено, что

$$a_6 \approx 1,5 a$$

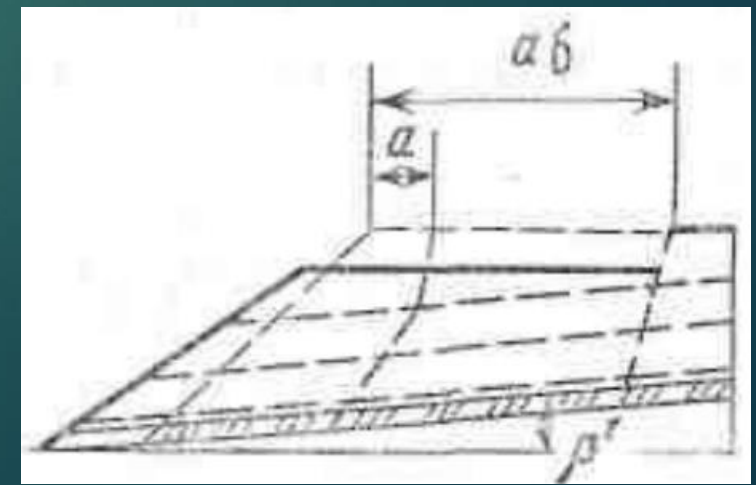
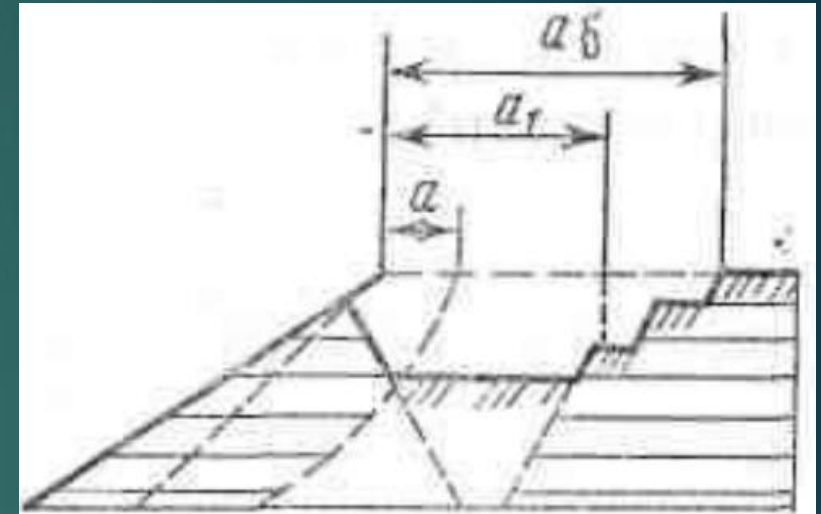
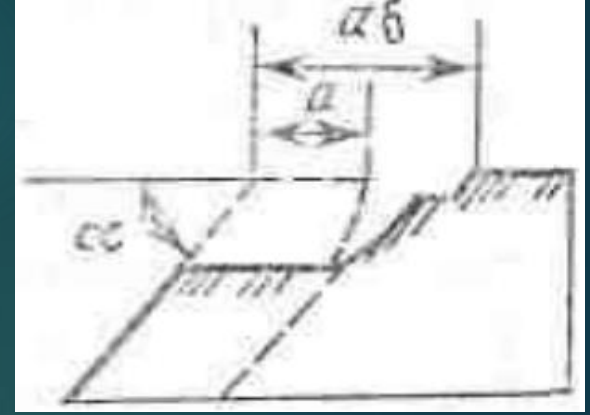
3. $a_6 \gg a$ Откос сложен горизонтально (полого) залегающими слоями глинистых пород, либо в однородном массиве борта (в т. ч. ниже его подошвы) залегает активный контакт (прослой) с низким сопротивлением сдвигу. Ширина полосы первичного обрушения

$$a_6 \approx 1,5 H$$

При залегании слабого контакта (прослоя) уа глубине m

$$a_6 \approx 1,5 (H + m)$$

Более надежный критерий оценки ширины бермы безопасности можно получить на действующем карьере путем паспортизации деформаций уступов и бортов и статистической обработки полученных данных.



ОБЕСПЕЧЕНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ НЕРАБОЧИХ БОРТОВ И УСТУПОВ

В глубоких карьерах, борта которых сложены крепкими скальными и полускальными породами, основные охраняемые горнотехнические сооружения — нерабочие борта.

Предельные их параметры обуславливают параметры нерабочих уступов, на которые существенно влияют:

- ✓ сейсмическое и дробящее действие массовых взрывов в карьере;
- ✓ способ отработки приконтурных заходок и заоткоски уступов;
- ✓ наличие нарушенных зон.

Различают три основных профиля бортов карьеров: плоский, выпуклый, вогнутый. При сочетании этих профилей образуются комбинированные профили бортов: плоско-выпуклый, плоско-вогнутый, выпукло-вогнутый и т. п.

На придание борту того или иного профиля влияет и время стояния в предельном положении. При длительных сроках стояния нерабочих бортов, нерабочие уступы в пределах зоны выветривания и в нарушенных зонах должны иметь минимальные углы (в рыхлых породах $-30...32^\circ$, в разрушенных скальных и полускальных породах $35...40^\circ$). Если нижняя половина борта сложена крепкими породами, а интенсивность сработки берм по времени незначительна, то при соответствующих горнотехнических условиях можно придать борту выпуклый профиль.

Таким образом, для придания нерабочему борту с заданной высотой предельного угла наклона, необходимо:

- ✓ принять минимально допустимую нормами проектирования и ЕПБ ширину предохранительных берм и берм другого назначения и максимальное расстояние между ними по вертикали;
- ✓ районировать борта с выделением участков, на которых параметры бортов должны определять расчетом;
- ✓ определить предельные углы откосов на ослабленных участках;
- ✓ принять углы откосов на участках с крепкими породами в зависимости от технологии производства горных работ в приконтурной зоне;
- ✓ построить профиль борта по параметрам уступов и берм и определить конструктивный угол $\alpha_{\text{к}}$ его наклона;
- ✓ рассчитать предельный угол $\alpha_{\text{пр}}$ наклона борта по характеристикам сопротивления пород сдвигу.

Если $\alpha_{\text{к}} < \alpha_{\text{пр}}$, то необходимо принять специальные меры по увеличению углов откосов уступов (улучшить качество защиты массива от взрывов, укрепить неустойчивые участки уступов) с тем, чтобы принять в проекте предельный угол наклона.

КОНСТРУИРОВАНИЕ НЕРАБОЧИХ БОРТОВ ГЛУБОКИХ КАРЬЕРОВ

Нерабочие борта карьера проектируют в два этапа:

1. Определяют предельные параметры бортов — высоту $H_{\text{пр}}$ и угол наклона $\alpha_{\text{пр}}$, выполняя геомеханические расчеты.
2. Конструируют борт по параметрам нерабочих уступов и берм всех назначений.

Для обеспечения устойчивости борта заданной высоты достаточно выполнения условия: $\alpha_{\text{к}} \leq \alpha_{\text{пр}}$. Однако даже равенство углов — не признак оптимальности параметров борта, так как еще не известно, отвечают ли они критерию минимальности объемов вскрышных пород в конечных контурах карьера которые обуславливаются профилем нерабочих бортов.

Если $\alpha_{\text{к}} > \alpha_{\text{пр}}$, то проектным будет предельный угол наклона борта и чтобы в него вписаться, необходимо изменить параметры уступов (целесообразно углы оставить крутыми, а ширину предохранительных берм увеличить).

Это достигается следующими способами:

- ✓ применение в приконтурной зоне технологии работ при которой обеспечивается полная защита законтурного массива от дробящего и сейсмического действия взрывов;
- ✓ качественная заоткоска уступов под крутыми углами (70—75°);
- ✓ укрепление нарушенных участков уступов.

Увеличение угла наклона борта при его высоте 500 м только на 1°, например с 30 до 31°, позволяет сократить объем вскрышных пород в контурах карьера на 8,7 млн. м³ на 1 км протяженности борта.

РАЦИОНАЛЬНЫЕ ПРОФИЛИ НЕРАБОЧИХ БОРТОВ В РАЗЛИЧНЫХ ГЕОЛОГИЧЕСКИХ УСЛОВИЯХ

Профиль нерабочего борта карьера зависит, в первую очередь, от геологического строения массива и формы залежи. Если же залежь не влияет — от параметров уступов и берм всех назначений, а также ширины технологических площадок, предназначенных для размещения перегрузочных пунктов, дробилок и др.

Согласно рекомендациям ВНИМИ, трехгранный профиль борта строят в следующей последовательности :

- ✓ делят борт по высоте на три равные части;
- ✓ в нижней части борту придают максимально возможный по горнотехническим условиям угол наклона;
- ✓ в средней — профиль отстраивают параллельно общему профилю плоского борта с углом α ;
- ✓ в верхней части профиль борта замыкают на верхней бровке;
- ✓ проводят серию потенциальных поверхностей скольжения;
- ✓ методом алгебраического сложения сил проверяют устойчивость борта в целом и отдельных его участков, начиная с нижней части.

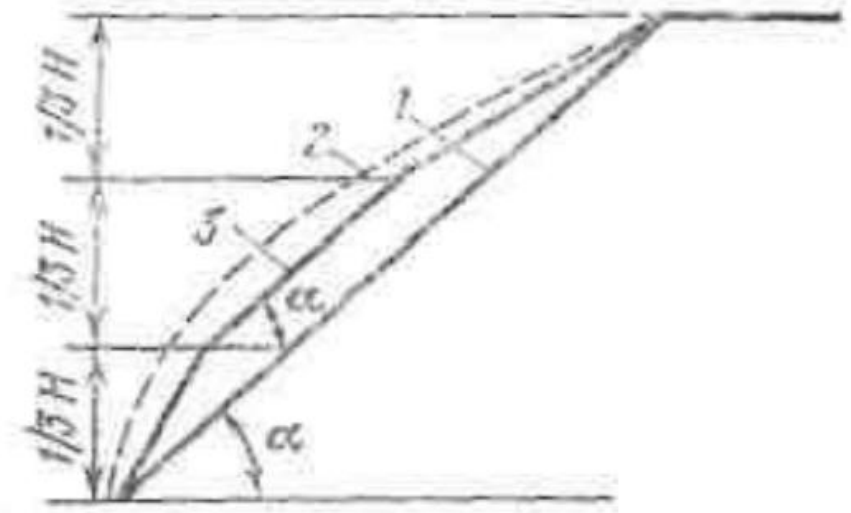


Схема профилей борта карьера:

1 — плоского; 2 — вышуклого криволинейного; 3 — то же, трехгранного; H — общая высота борта

Для бортов карьеров, сложенных в основном крепкими скальными и полускальными породами по всей высоте, наиболее экономичный — борт с двугранным профилем, призма упора которого по всей своей высоте имеет максимально возможный в данных горнотехнических условиях угол наклона.

Следовательно, чтобы сконструировать борт с оптимальными параметрами необходимо, прежде всего, определить положение границы раздела между призмами упора и активного давления.

В связи с тем, что поверхность скольжения в верхней части борта имеет максимальный угол наклона к горизонту, в призме активного давления преобладают сдвигающие силы. В нижней части борта поверхность скольжения выполаживается, поэтому в призме упора преобладают удерживающие силы. Если потенциальную призму обрушения разделить на отдельные блоки, то блок, ось которого — граница раздела, в силовом отношении будет нейтрален, так как его масса не влияет на соотношение сдвигающих и удерживающих гравитационных сил. В пределах всей призмы обрушения эту границу можно рассматривать как нейтральную ось. Таким образом, для построения борта двугранного профиля с оптимальными параметрами следует найти положение нейтрального блока и его ось.

Касательная к поверхности скольжения, проходящая через точку пересечения ее с нейтральной осью, имеет угол наклона $\beta_i = \varphi$. Гравитационные сдвигающие и удерживающие силы, приложенные к нейтральному блоку и действующие на площадке скольжения в основании этого блока, полностью взаимно скомпенсированы

$$Q = \frac{P_i \cdot \cos \beta_i \cdot \operatorname{tg} \varphi_i}{P_i \cdot \sin \beta_i} = 1$$

При этом для призмы активного давления в целом $Q_1 < 1$, а призмы упора - $Q_2 > 1$ (Q_1, Q_2 — средние значения отношений сдвигающих гравитационных сил к удерживающим в указанных призмах).

Положение нейтральной оси в поперечном сечении борта можно определять следующим образом:

- ✓ по предельным параметрам борта построить его профиль;
- ✓ найти положение круглоцилиндрической поверхности скольжения в нижней части борта;
- ✓ рассчитать расстояние $r = R / \sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \varphi}$ и отложить его от центра круглоцилиндрической поверхности по вертикали вниз от точки O ;
- ✓ провести горизонтальную прямую от конца отрезка r до пересечения ее с поверхностью скольжения и в точке E пересечения восстановить перпендикуляр, который и является нейтральной осью.

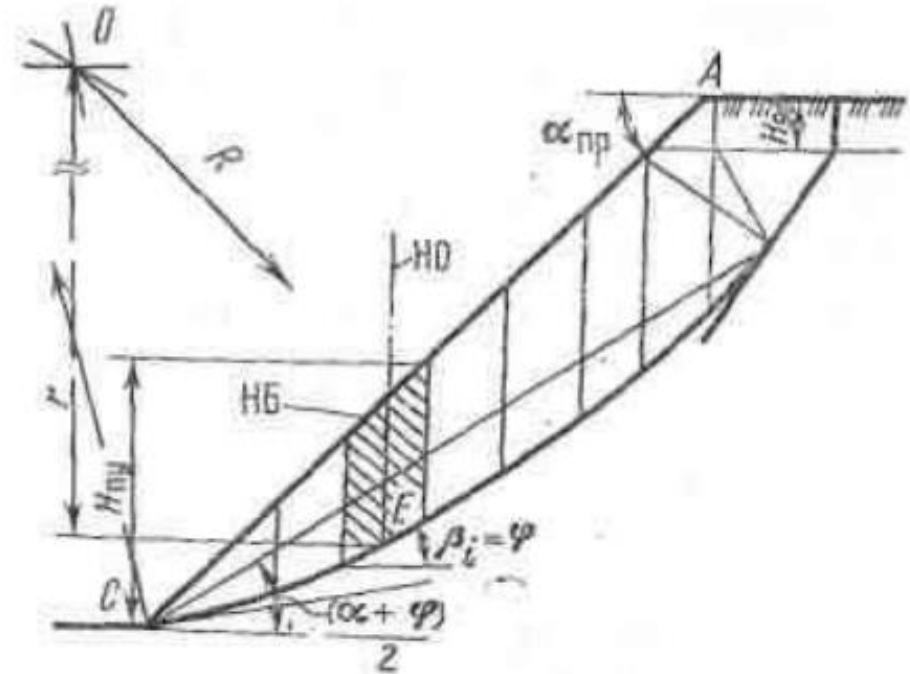


Схема к определению положения нейтрального блока (НБ) в поперечном сечении борта с плоским профилем и углом наклона $\alpha_{пр}$:

НО — нейтральная ось; R — радиус кривизны поверхности скольжения; $H_{пр}$ — высота призмы упора

По приведенной методике строят контур борта плоского профиля, разделенный на призмы упора и активного давления.

На этой основе конструируют рациональный профиль борта с соблюдением следующих принципов:

1. В пределах призмы упора борту придают максимально возможный по геологическим и горнотехническим условиям угол наклона. В пределах призмы активного давления наклон борта обуславливается его устойчивостью в целом (сбалансированный по массам обеих призм борт).
2. Коэффициент устойчивости как борта в целом, так и любой его части по высоте, с учетом возможного изменения положения потенциальной поверхности скольжения, должен быть не менее нормативного.
3. При равной устойчивости с бортом плоского профиля должно обеспечиваться существенное сокращение объемов вскрыши.

Этим требованиям отвечают профили реальных бортов: двугранный, многогранный, ступенчатый с одной или несколькими ступенями, соответствующие геологическим условиям месторождения.

УКРЕПЛЕНИЕ ОТКОСОВ

Укрепление откосов в глубоких карьерах осуществляют с целью поддержания транспортной связи между отдельными участками нерабочего борта карьера и увеличения общего угла наклона борта, преимущественно в пределах призмы упора.

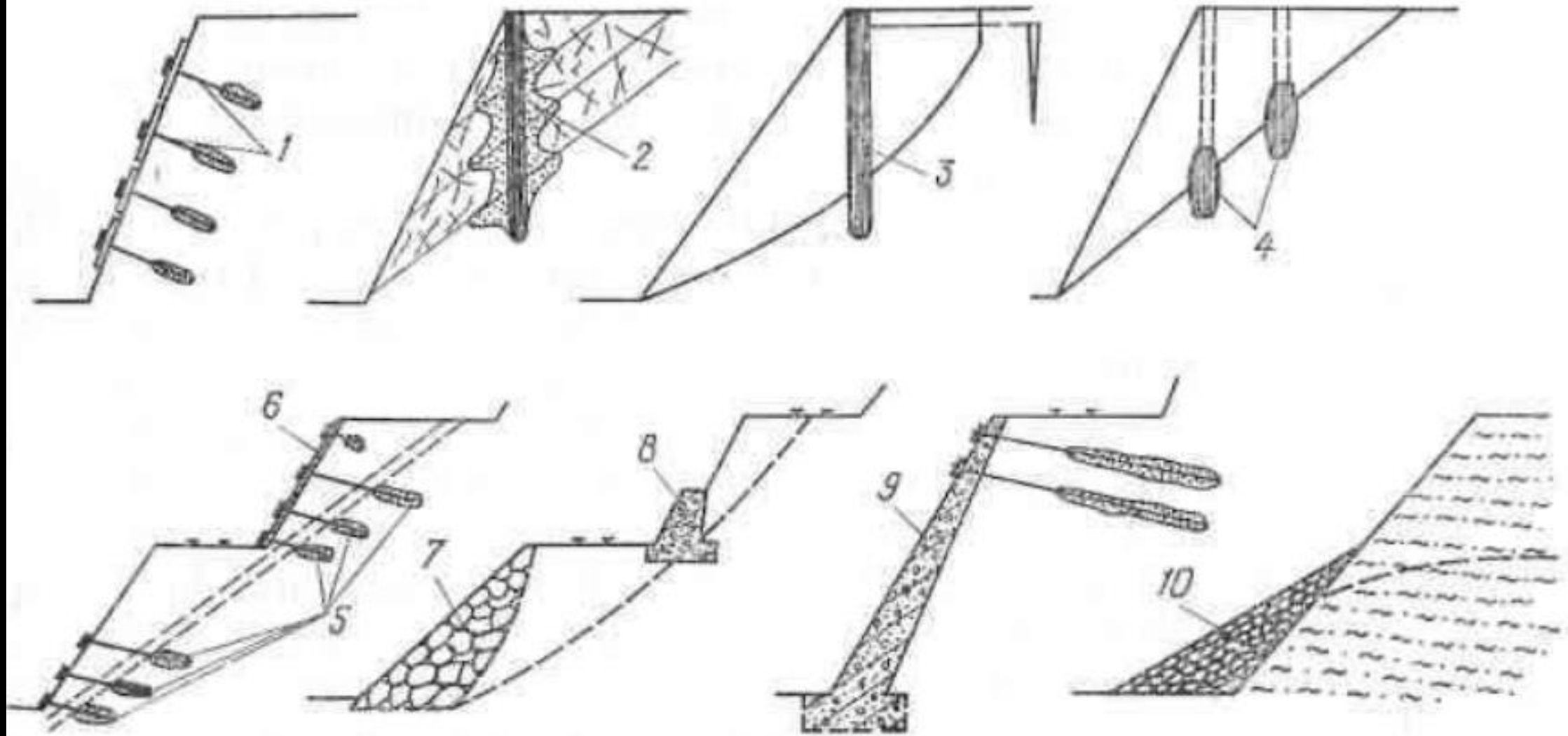
В результате значительно сокращается объем вскрышных пород в конечных контурах карьера, которые подлежали бы включению в границы карьера при разносе бортов на участках с неблагоприятными геологическими и инженерно-геологическими условиями.

Осуществление транспортной связи между отдельными участками предохранительных берм необходимо для их периодической зачистки от осипей в течение всего срока существования карьера. При длительном стоянии нерабочих уступов в предельном положении неизбежны локальные обрушения берм, так как борта карьера обычно пересекают различно ориентированные тектонические нарушения и разломы мощностью от нескольких сантиметров до нескольких метров.

На карьерах применяют **механические способы укрепления уступов, иногда в сочетании с цементацией пород**. Обычно укрепляют объединенные уступы. При этом важно предотвратить осыпание пород с поверхности укрепленного механическим способом откоса, нанесением защитных покрытий, с целью недопущения обтекания породой элементов крепи.

На участках бортов карьеров ослабленных тектоническими разломами и крупными трещинами, уступы, заоткошенные под углами (50—70°) обычно обрушаются. Если прогнозирование деформаций не позволило выявить неустойчивые участки уступов и они обрушились, то этот факт следует рассматривать как сигнал о возможности повторных обрушений на нижних горизонтах

С целью их предупреждения применяют **профилактическое укрепление откосов** с каждого погашаемого горизонта.



Способы укрепления карьерных уступов:

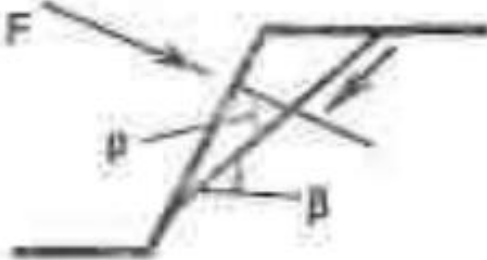


1 — анкерами; 2 — железобетонными сваями с цементацией пород вокруг свай; 3 — сваями большого диаметра, работающими на изгиб; 4 — железобетонными шпонами; 5 — анкерными тяжами; 6 — железобетонными плитами; 7 — контрфорсом; 8 — подпорной гравитационной стенкой; 9 — подпорно-защитной заанкеренной стенкой; 10 — пригрузкой из фильтрующего материала

Виды деформаций конструкций и сооружений и соответствующие им направления реакции крепи

Способ укрепления	Деформация конструкции	Направление реакции крепи	Угол наклона вектора силы F (ρ)
Штанги, тросовые тяжи	Растяжение	По оси конструкции	$30-60^\circ$
Железобетонные сваи	Срез	Параллельно поверхности сдвига	0°
Подпорные стены (контрформы)	Сдвиг по основанию или срез	Под углом трения к поверхности сооружения	$90^\circ - \alpha + \beta - \rho_0$

Примечание: α , β — углы соответственно откоса и поверхности сдвига; ρ , ρ_0 — углы соответственно наклона вектора силы F к поверхности скольжения и поддерживающего сооружения.

Ожидаемое давление горных пород на крепь

Характеристика пород	Способ укрепления	Расчетная формула	Расчетная схема
Крепкие, крупноблочные, контакты крутые	Апшеры	$F = \frac{P_g - c'L}{\omega}$	
То же, контакты наклонные или пологие	Сваи	$F = P_0 - c'L$	
То же, контакты крутые и наклонные	Апшеры	$F = \frac{P_g - c'L - qf}{\omega}$	

<p>Крепкие, мелкоблочные, контакты крутые и пологие</p>	<p>Связи, анкеры, защитные стенки</p>	<p>Многоугольник сил $F = l(c', c''L, \varphi, \varphi')$</p>	
<p>Средней и малой крепости, слоистые, однородные</p>	<p>Связи, защитные стенки</p>	<p>$F = \frac{\sum P_i g_i - c' \sum L_i}{\omega}$</p>	
<p>Рыхлые, связные, однородные или слоистые</p>	<p>Подперные стенки, контрфорсы</p>	<p>Многоугольник сил</p>	

Условные обозначения: F – величина оползневой нагрузки; β – угол падения поверхности ослабления; c', φ', φ – характеристики пород; P – масса призмы обрушения; $c'l, c'l$ – силы сцепления; ql – сила сопротивления отрыву; $g = \sin\beta - \cos\beta \operatorname{tg}\varphi'$; $\omega = \cos\beta + \sin\beta \operatorname{tg}\varphi'$

УПРОЧНЕНИЕ ПРИБОРТОВЫХ МАССИВОВ

Упрочнение массива горных пород на ослабленных участках достигается введением в трещины массива веществ, которые после схватывания с породой значительно повышают ее характеристики сопротивления сдвигу. Введение упрочнителя в массив осуществляется под давлением, а в качестве упрочняющего материала применяются цементные растворы, силикаты и полимерные смолы.

Цементация горных пород производится при проведении выработок в водоносных породах, укреплении неустойчивых и нарушенных массивов и может эффективно применяться при наличии в породах трещин шириной не менее 0,15—0,20 мм. При нагнетании цементного раствора частицы цемента с большим диаметром будут отфильтровываться у входа в трещины и не смогут проникнуть внутрь. Кроме того, они будут частично засорять собой входы в трещины с большей толщиной. Цементные растворы нагнетаются в массив через скважины и должны иметь сроки застывания, обеспечивающие его проникновение по трещинам на проектное расстояние. Время схватывания цемента с породой регулируют путем добавления в раствор соды, хлористого кальция и других веществ. Одним из условий, препятствующих цементации, является слабая сопротивляемость действию агрессивных вод. Некоторые подземные воды содержат растворимые минеральные соли и кислоты, которые вызывают коррозию цемента и бетона.

Глинизация применяется для заполнения пустот в карстовых породах и в породах с крупной трещиноватостью. К недостаткам этого способа можно отнести большой расход тампонажного материала, значительную продолжительность процесса, слабую сопротивляемость глинистого тампонажного камня внешнему давлению, нецелесообразность тампонажа тонких трещин. Достоинство способа: возможность использования местного тампонажного материала (глины), способность противостоять действию агрессивных вод, разъедающих даже специальные бетоны.

Для укрепления массива применяют также способ **силикатизации** — введение в массив силиката натрия и хлористого кальция. Так как проницаемость пород слишком мала, введение силикатов в массив может производиться электрохимическим методом. В этом случае внедрение растворов производится не за счет нагнетания их в скважины, а за счет создания разности электрических потенциалов между соседними скважинами.

Битумизация — заполнение пустот и трещин путем нагнетания в них расплавленного битума. В жидком состоянии битум проникает в трещины с раскрытием более 0,2 мм. Однако даже в твердом состоянии битум сохраняет пластичность и при определенном давлении начинает течь и выделяться из трещин.

Искусственное **замораживание** горных пород применяется при проходке шахтных стволов и других горных выработок в водоносных породах. Технологический процесс очень дорогостоящий и требует длительного времени.

Для упрочнения слабых обводненных песчано-глинистых пород применяют электрофизический метод — **электроосмос**, т.е. воздействие на породу постоянного тока, в результате чего происходит осушение массива, что повышает его прочностные характеристики.

Искусственное укрепление трещиноватых горных пород с помощью **синтетических смол**. В этом случае полимерные смолы играют роль синтетического клея, скрепляющего блоки горных пород, разбитых трещинами. Укрепляющие составы — это сложные смеси, включающие синтетическую смолу, отвердитель, ускорители схватывания, стабилизаторы, растворители, другие специальные добавки. Для приготовления растворов используют различные смолы — фенолоальдигидные, аминоальдигидные, полиэфирные, эпоксидные, кремнийорганические, полиуретановые смеси и др.

Наилучшие показатели в качестве материала для упрочнения массива горных пород имеют полиуретановые смолы. Полиуретановые смолы представляют собой материал, образующимся в результате реакции полиизоциантов с полиольными смолами. До смешивания компоненты представляют собой жидкости со сравнительно низкой вязкостью; при соединении компоненты некоторое время сохраняют свойства текучести, затем состав твердеет с увеличением в объеме.

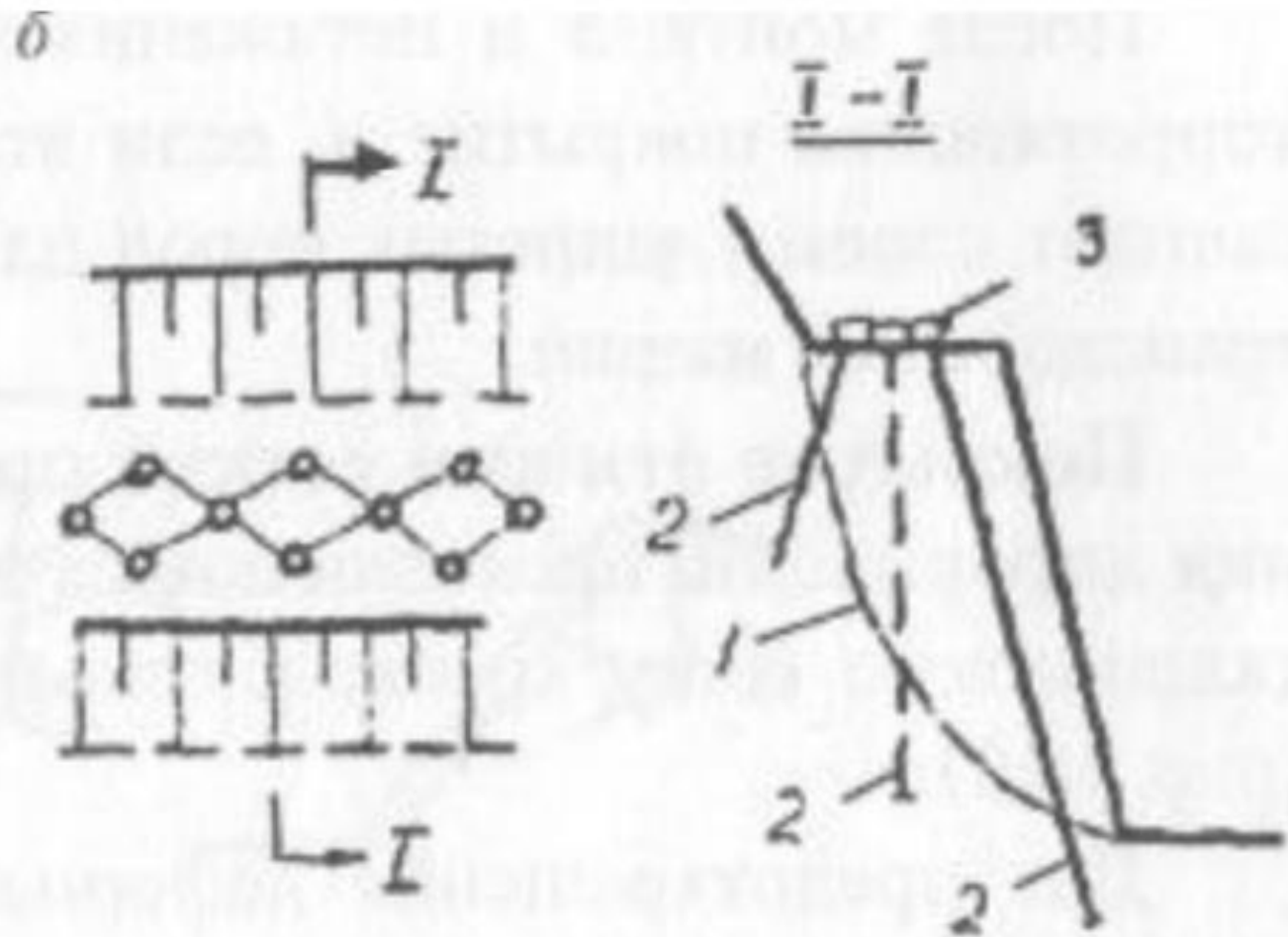
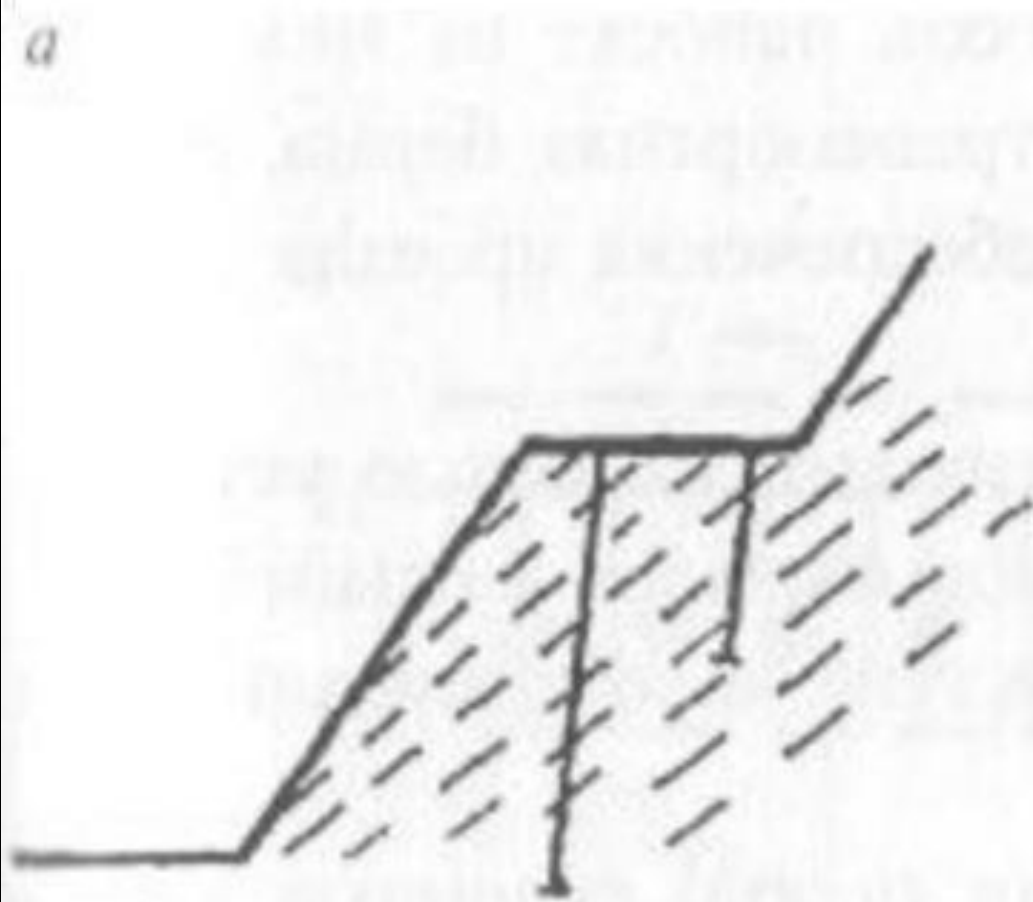
Обладая высокой проникающей способностью, упрочняющий состав, при нагнетании его под высоким давлением, заполняет 90—95 % всех имеющихся в массиве трещин. Затвердевший полиуретан обладает остаточной пластичностью, что дает возможность упрочняемому массиву деформироваться без разрушения и выдерживать сейсмические нагрузки. Вспениваясь, полиуретан создает дополнительный распорный эффект, что повышает связи между блоками массива и улучшает его прочностные свойства.

УКРЕПЛЕНИЕ ОТКОСОВ УСТУПОВ

Укрепление откосов выполняется в соответствии с разрабатываемыми паспортами, в которых указаны последовательность работ, используемое оборудование и механизмы, схемы их размещения на уступах, способы выполнения отдельных операций по возведению крепи, ее конструкции, а также параметры в пределах укрепляемого участка.

Противодеформационные работы могут выполняться как до постановки или в период постановки в проектный контур, так и в процессе эксплуатационных работ после постановки уступов в предельное положение.

Железобетонные сваи используются в породах со слаборазвитой трещиноватостью, плоскости которых расположены под углами до 45° в сторону выработанного пространства, или для укрепления уступов, сложенных полускальными и скальными породами с углом откоса $35\text{—}80^\circ$ при высоте уступа $24\text{—}45$ м. Диаметр скважин — не менее 243 мм, угол их наклона $75\text{—}90^\circ$, расстояние между рядами скважин $0,5\text{—}1,5$ м, а между скважинами $0,5\text{—}10$ м. В качестве арматуры железобетонных свай используют рельсы, стальные канаты, трубы. Для заливки скважин со вставленной арматурой применяют бетон. Верхние концы арматуры соединяются между собой рельсами (сталь различного профиля или канаты).



Схемы укрепления уступов железобетонными сваями:

a — при трещиноватости пород в сторону выемки; *б* — общий случай; *1* — поверхность скольжения; *2* — скважины; *3* — ригель

Анкерная крепь предназначена для укрепления уступов с углом их откоса $35-80^\circ$ и высотой $12-45$ м. Диаметр скважин не менее 100 мм, их количество на 1 м откоса — от одной до трех, а глубина от 5 до 30 м в зависимости от высоты уступа. Расстояние между скважинами по простиранию составляет $1-3$ м.

Анкером служит сталь диаметром до 50 мм или стальной трос диаметром $40-60$ мм. Замки анкеров бетонируются. Скважины под анкера бурят станками со специально сооруженных платформ или делают подсыпку к откосу пород на нулевую высоту и с этого временного отвала производят все работы.



Схема анкерного крепления уступа:

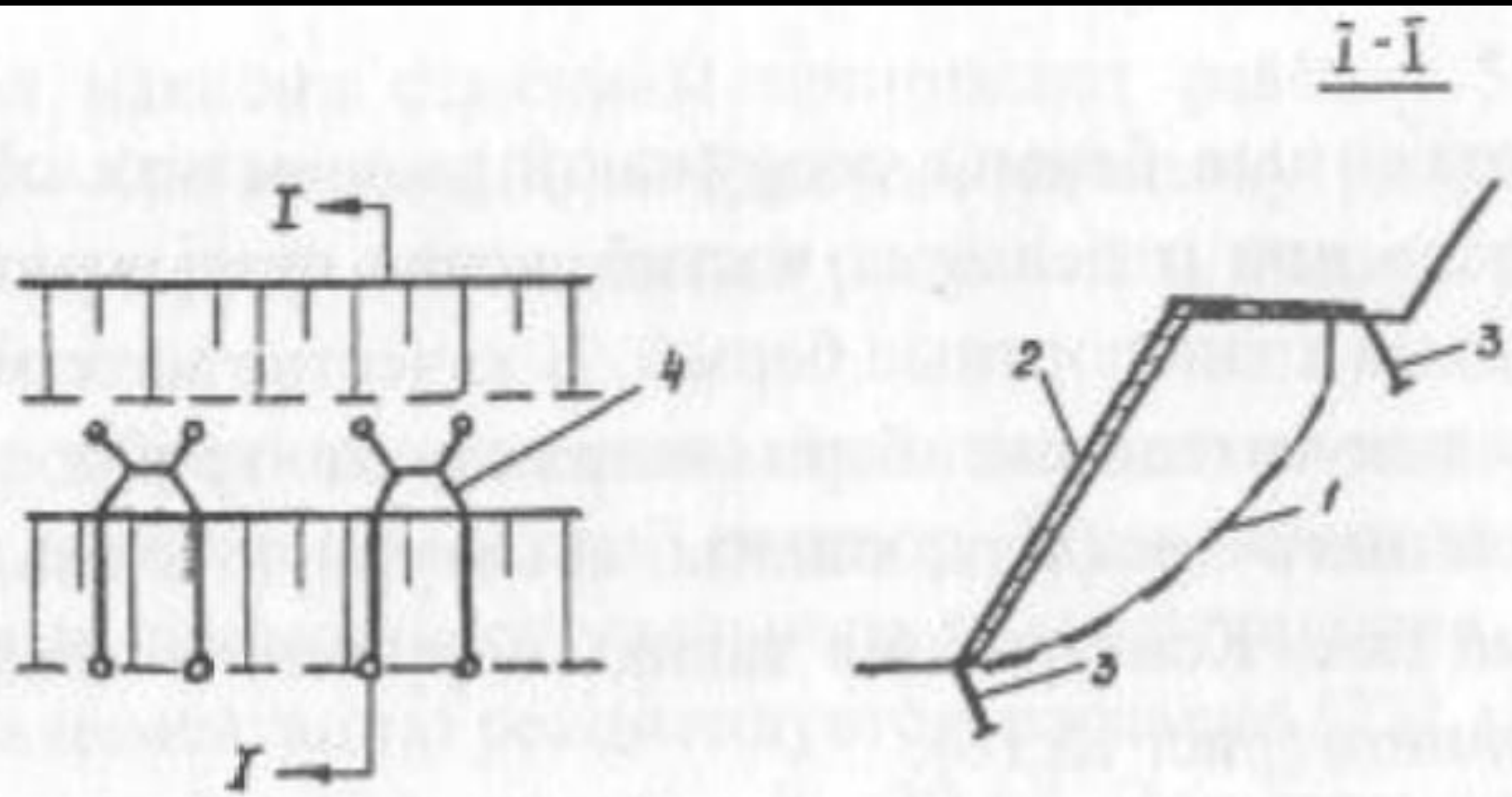
1 — поверхность скольжения; 2 — анкера; 3 — опорные плиты





ПСР 
СТРОИТЕЛЬ
195-234-25-02

Тросовые тяжи используют для крепления уступов при крупнообломочных породах с углом залегания откоса $35—80^\circ$ и высотой уступов 24—45 м. При креплении уступа принимают расстояние между тросовыми тяжами стальными канатами в зависимости от размеров структурных блоков от 0,5 до 5,0 м, замковые скважины диаметром не менее 100 м проходят под углами $45—90^\circ$ к горизонту на глубину 5—8 м у нижних бровок верхнего и нижнего уступов. Замковые скважины с канатами заливают бетоном. После монтажа и натяжения тросов наносят на них антикоррозионное покрытие и, если это транспортная берма, то засыпают слоем глинистых пород для обеспечения проезда горнотранспортных машин.



Укрепление уступа тросовыми тяжами:

1 — поверхность скольжения; 2 — тросовый тяж; 3 — верхний и нижний замки; 4 — стягивающий трос

Покрытие откосов сеткой производится с целью устранения деформаций, проявляющихся в виде вывалов и осыпей. Металлическую сетку крепят к откосу уступа короткими анкерами.

Для предотвращения деформации пород, склонных к выветриванию, применяют бетон, представляющий собой смесь цемента и мелкого заполнителя. Толщина покрытия зависит от срока службы и высоты уступа.

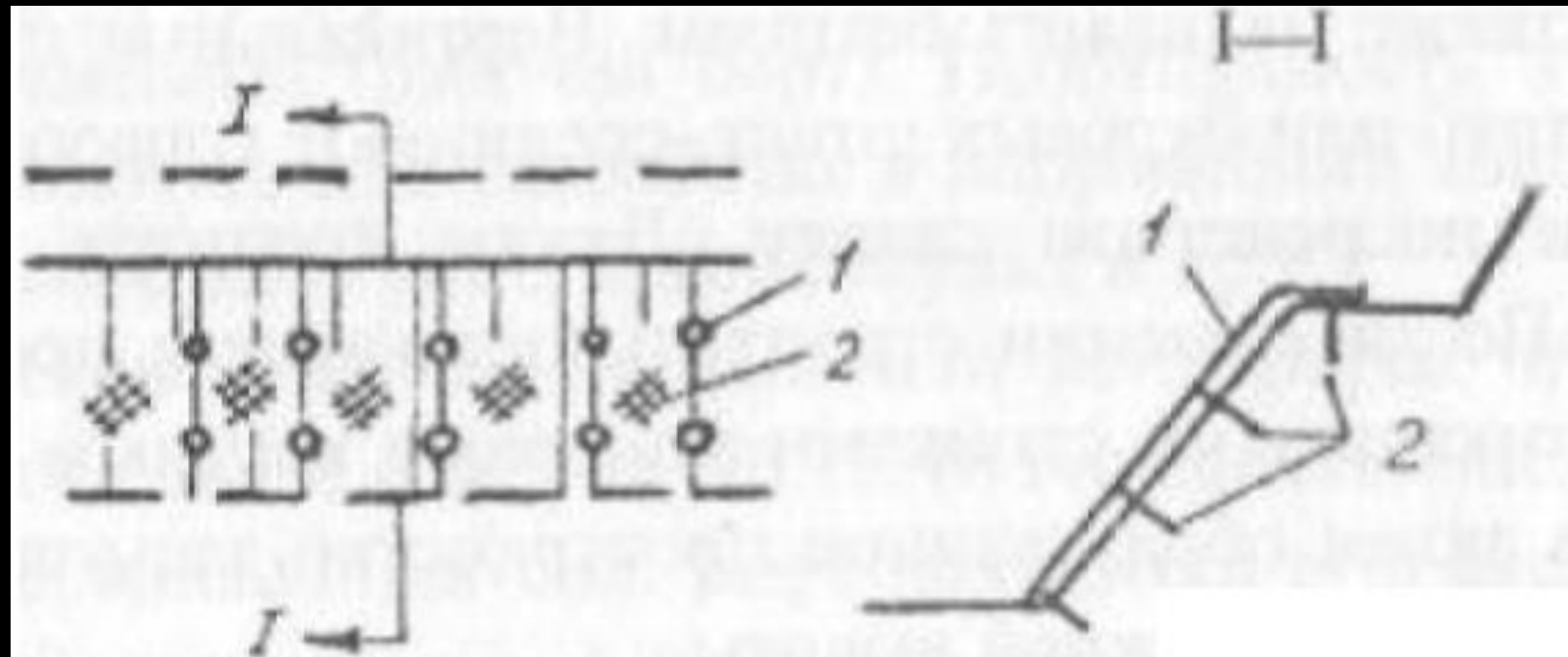
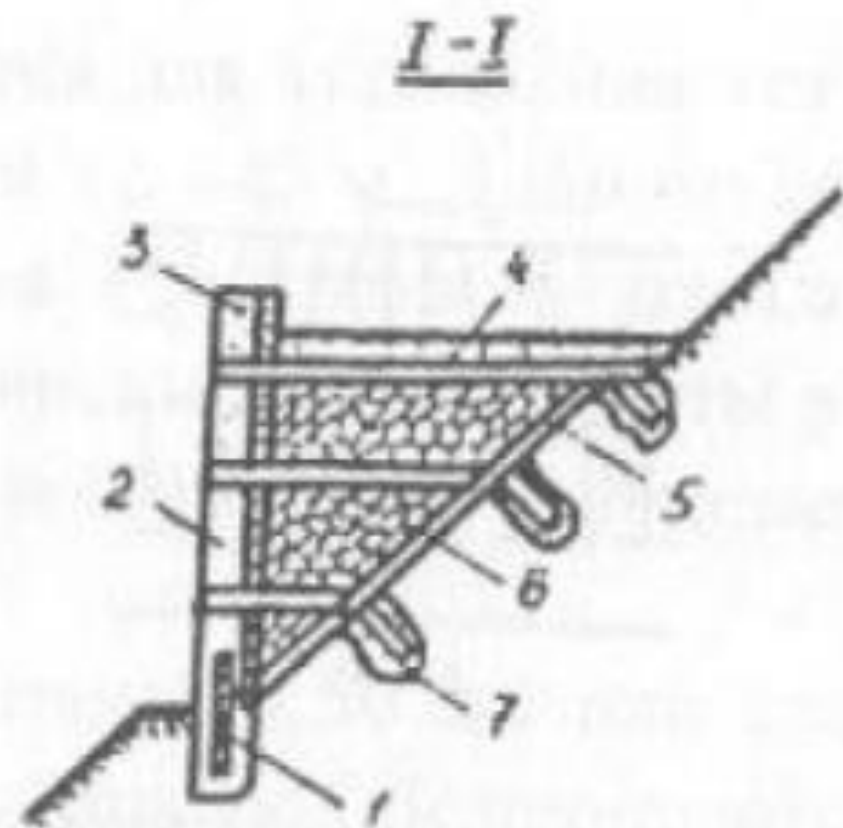
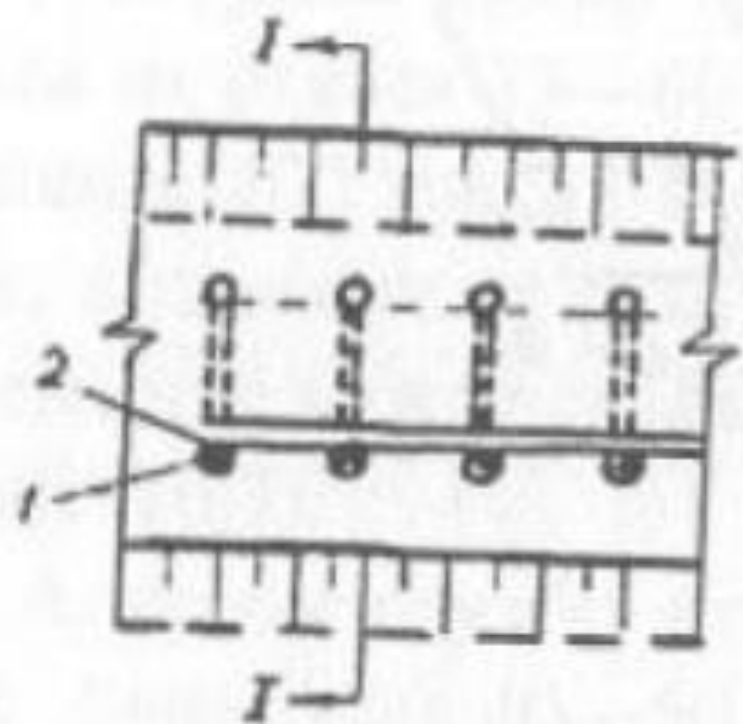


Схема укрепления откоса металлической сеткой:
1 — сетка; 2 — анкеры



Искусственные бермы сооружают на участках обрушившихся откосов или отдельных частей, когда оказываются ликвидированными транспортные бермы. В качестве материала для возведения искусственных берм используют трубы, рельсы прокат различного профиля, канаты, арматурную сталь, шпалы. Практически работу по возведению искусственной бермы выполняют в следующем порядке. Для установки вертикальных стоек расчищается площадка для станка и бурения скважин. В пробуренные скважины устанавливают анкеры и бетонируют. После затвердевания бетона на анкеры одевают трубы заданной высоты и также заливают бетоном. Вертикальные стойки, созданные из труб или буровых штанг, соединяют горизонтальными растяжками посредством сварки. Лезен крепится к массиву штангами. По завершении строительного каркаса пространство между вертикальными стойками зашивают круглым лесом или шпалами, а затем образованное пространство засыпается породой или щебнем до нужной высоты.

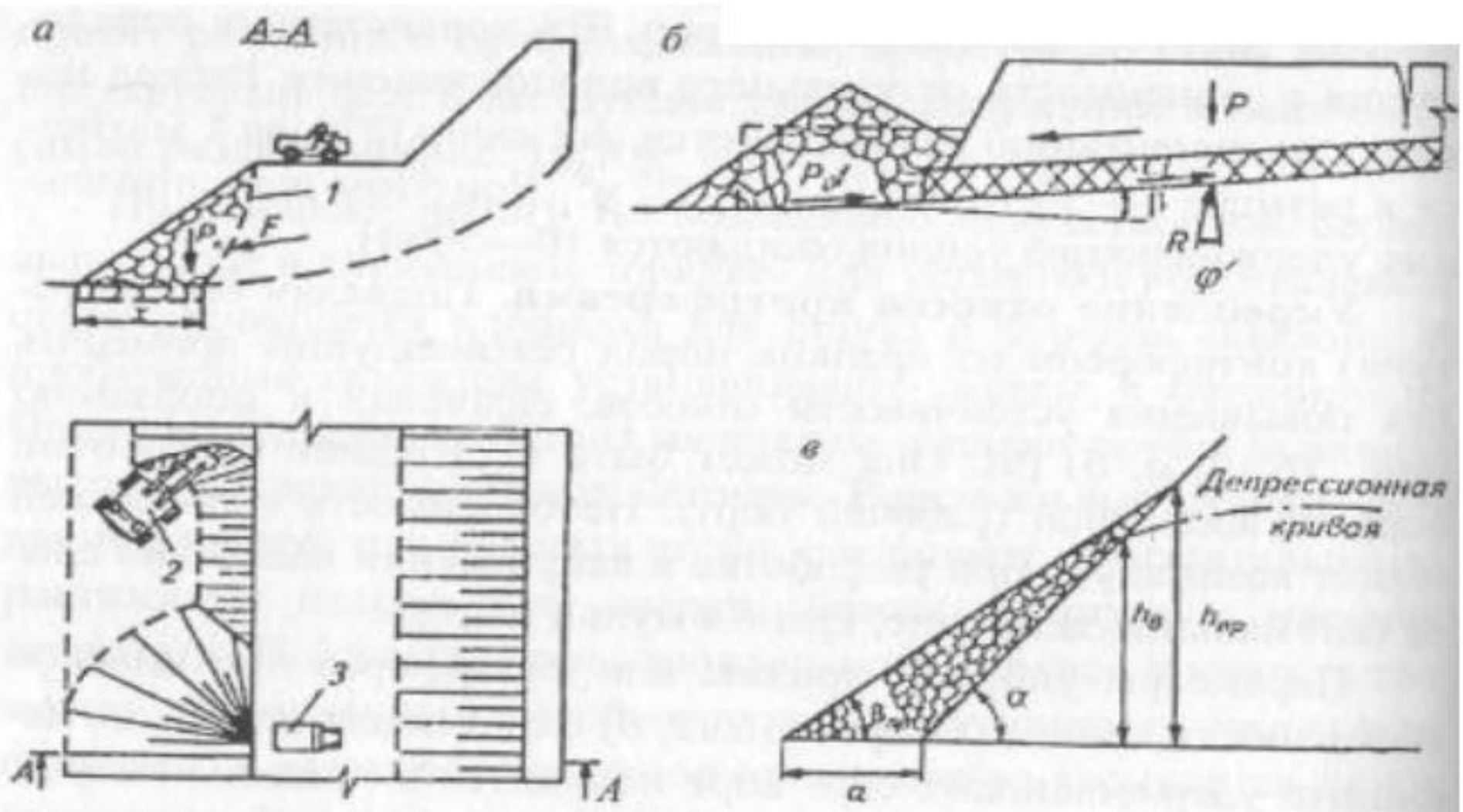


Конструкция искусственной бермы:

1 — стойки; 2 — трубы; 3 — затяжки из шпал; 4 — ригель; 5 — лежан; 6 — засыпка породой; 7 — анкеры

Укрепление откосов контрфорсами. Подвалку борта (уступа) контрфорсом из крепких пород рекомендуется применять для повышения устойчивости откосов, склонных к оползанию. Она может быть постоянной (нерабочий борт) и временной (рабочий борт). Необходимость в последней может возникнуть при разработке в направлении восстания слоев (аномальное залегание, крылья мульд и др.).

В тех случаях, когда сдвиг предполагается по гипотетической криволинейной поверхности скольжения контрфорс рассматривается как призма упора в типичной призме возможного обрушения. Для предотвращения выноса и переотложения фильтрующим потоком мелких частиц рыхлых песчаных отложений и обеспечения устойчивости откосов в границах промежутка высачивания рекомендуется пригружать откос гравийно-щебеночным материалом в виде призмы.



. Схемы повышения устойчивости откосов путем их пригрузки:
a — последовательность отсыпки контрфорса (1) автосамосвалом (3) в забое экскаватора (2); *б* — временная пригрузка рабочего борта; *в* — пригрузка фильтрующим материалом обводненного уступа