

Министерство образования и науки Российской Федерации  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего профессионального образования  
«Кузбасский государственный технический университет  
им. Т. Ф. Горбачева»

В. Ф. ВОРОНКОВ

## ***ГЕОМЕХАНИКА ОТКРЫТЫХ ГОРНЫХ РАБОТ***

**Конспект лекций**

Рекомендовано методической комиссией специальности  
130403 «Открытые горные работы»  
в качестве электронного учебного пособия

Кемерово 2011

## Рецензент

Сысоев А.А., д.т.н., профессор кафедры открытых горных работ

**Воронков Владимир Федорович.** Геомеханика открытых горных работ: конспект лекций [Электронный ресурс] / В. Ф. Воронков. – Электрон. дан. – Кемерово : КузГТУ, 2011. – 1 электрон. опт. диск (CD-ROM) ; зв. ; цв.; – Систем. требования : Pentium IV ; ОЗУ 8 Мб ; Windows 95 ; (CD-ROM-дисковод) ; мышь. – Загл. с экрана.

Приведены структурно-текстурные особенности горных пород, рассмотрены виды деформаций открытых горных выработок, напряженное состояние массива горных пород, изложены инженерные методы расчета устойчивости откосных сооружений на открытых горных работах.

Предназначено для студентов горных специальностей.

© КузГТУ, 2011  
© В. Ф. Воронков

## *Содержание*

<i>1. Цель и задачи дисциплины. Горные породы и их структурно-текстурные особенности.</i>	4
<i>2. Деформирование и разрушение горных пород.</i>	6
<i>3. Массив горных пород при ОРМПИ и его структурные характеристики.</i>	9
<i>4. Общая характеристика факторов, обуславливающих поведение массива горных пород при ведении ОГР.</i>	13
<i>5. Виды деформаций массивов горных пород при открытой разработке месторождений.</i>	15
<i>6. Напряженное состояние массивов горных пород. Основные понятия о напряжениях.</i>	24
<i>7. Напряженное состояние массивов горных пород в естественных условиях.</i>	26
<i>8. Изменение напряженного состояния массива горных пород при ведении ОГР.</i>	28
<i>9. Условия предельного равновесия массива горных пород в откосах.</i>	29
<i>10. Призма возможного обрушения, виды поверхностей скольжения. Коэффициент запаса устойчивости.</i>	31
<i>11. Инженерные методы расчета устойчивости откосов.</i>	34
<i>12. Порядок расчета устойчивости откосов, нагруженных весом тяжелого оборудования.</i>	37
<i>13. Учёт взрывных нагрузок при расчетах устойчивости откосов.</i>	39
<i>14. Учёт криволинейности откосов уступов, бортов карьера и отвалов при расчетах их устойчивости.</i>	40
<i>15. Учет обводненности массивов горных пород при расчетах устойчивости откосов.</i>	41
<i>16. Физические свойства, определяющие поведение горных пород в массиве.</i>	42
<i>17. Физико-химические свойства горных пород.</i>	46
<i>18. Физико-механические свойства горных пород.</i>	49
<i>19. Реологические свойства горных пород.</i>	59

## ***1. Цель и задачи дисциплины. Горные породы и их структурно-текстурные особенности***

*Геомеханика* – наука о механическом состоянии массива горных пород, механических процессах и инженерно-геологических явлениях происходящих в них под действием естественных напряжений и напряжений, вызванных горными работами.

Геомеханика является одним из разделов фундаментальной горной науки, на научных положениях и закономерностях которой базируются все решения и проблемы связанные с деятельностью человека в недрах Земли.

Геомеханика сформировалась в самостоятельную дисциплину как систему научных знаний с собственными принципами, методами и проблемами, в последние 10-15 лет отделившись от физики горных пород и механики грунтов.

Объектами изучения геомеханики являются массивы горных пород со всеми элементами геологического строения и нарушенности в недрах Земли и собственно горных пород, составляющих эти массивы.

Основной задачей данной дисциплины является изучение геомеханических процессов происходящих в массивах горных пород под влиянием горных работ, а так же изучение методов оценки, прогнозов и контроля состояния толщи пород в различные периоды преобразования недр.

Эта дисциплина тесно связана с циклом геологических дисциплин, с математикой, теоретической механикой, с экономикой и профилирующими курсами: процессы ОГР, технология и комплексная механизация, проектирование карьеров.

*Горные породы и их структурно-текстурные особенности.*

*Горные породы* – это естественные минеральные агрегаты более или менее постоянного состава сформировавшиеся в результате геологических

процессов и залегающие в земной коре в виде самостоятельных литологических разностей.

*Литологическая разность* – часть земной коры сложенная одноименной горной породой (песчаник, алевролит) и т.д.

Горные породы в зависимости от геологических процессов делят на три генетические группы: магматические, метаморфические и осадочные.

Условия образования и залегания горных пород придают различные структурно-текстурные особенности.

Структура определяется степенью кристалличности и размерами зерен, а также формой и взаимным отношением составных частей пород.

Текстура (сложение) характеризует расположение составных частей породы относительно друг друга в занимаемом ими пространстве.

Основными структурно-текстурными элементами горных пород, влияющими в большей мере на их свойства и геомеханические процессы в массиве горных пород являются: слоистость и трещиноватость.

Помимо трещин и слоев горные породы характеризуются и рядом дефектов строения, т.е. разрозненными включениями инородных веществ, отпечатками растительности и др. Все дефекты строения делят на: макро и микродефекты.

К микродефектам относят дефекты на уровне кристаллической решетки.

К макродефектам относят дефекты от нескольких долей миллиметров до нескольких километров. Геомеханические процессы зависят главным образом от макродефектов.

Структурно-текстурная неоднородность горных пород оценивается различными методами.

Так, например, для количественной оценки степени ослабления пород имеется классификация ВНИМИ.

## ***2. Деформирование и разрушение горных пород.***

*Деформация горных пород.*

*Деформация* – изменение взаимного расположения частиц, составляющих его.

Следствием деформации является изменение линейных размеров, формы, а иногда и объема тела.

Деформация горных пород может быть вызвана внешними механическими силами, а так же изменениями температуры, воздействиями различных полей и т.д.

Деформация горных пород может быть вызвана внешними механическими силами, а так же изменениями температуры, воздействиями различных полей и т.д.

Из физически твёрдого тела известно, что между ионами кристаллической решётки существуют силы взаимного притяжения и отталкивания. Благодаря этому при воздействии на ГП внешних сил, стремящихся сдвинуть с нейтрального положения ионы в решётке вещества в одну или другую сторону, в горной породе возникают внутренние силы, противодействующие внешним силам.

Характер и величина деформации зависит от типа и величины приложенных сил.

Увеличение нагрузок приводит к возрастанию деформации и в пределе к разрушению горной породы. Деформации, приводящие к разрушению, бывают: упругие, упругопластичные и пластичные.

Значительная часть ГП, прежде всего магматические, метаморфические и крепкие осадочные, обладают высокими упругими свойствами. Характерной особенностью упругих свойств этих ГП является способность под воздействием нагрузки почти до разрушения очень мало деформиро-

ваться и хрупко разрушаться. При разгрузке упругих ГП остаточная деформация очень мала.

Пластичность ГП – способность под действием приложенной силы изменять свои размеры и форму без разрыва сплошности и сохранять их после устранения действия этих сил.

Пластичные деформации происходят в следствии внутризёренных и межзёренных скольжений.

Характерной особенностью пластичных ГП является то, что на их разрушение тратится значительно больше энергии, чем на разрушение упругих ГП с тем же пределом прочности.

*Разрушение горных пород, уровни разрушения, механизм разрушения.*

*Разрушение* – разрыв связей между атомами и ионами в кристаллической решётке.

*Прочность* – способность ГП сопротивляться силовым воздействиям, не разрушаясь.

Она определяется величиной критических напряжений, при которой происходит её разрушение. Эти напряжения различны для разных ГП и для разных видов приложения нагрузок, и называются пределами прочности.

Различают пределы прочности на сжатие, растяжение, сдвиг и изгиб.

Прочность обусловлена силой связи между элементарными частицами кристаллической решётки, не имеющей никаких микродефектов строения и называется теоретической прочностью ГП. Реально, т.е. фактическая прочность в десятки, тысячи раз меньше теоретической, что объясняется большой деформируемостью ГП.

Пример: теоретическая прочность при растяжении каменной соли  $\sigma_p=2000$  МПа, а реально  $3\div 5$  МПа.

К оценке прочности ГП следует подходить в зависимости от масштаба разрушения, где преобладающее значение имеют те или иные виды дефектов.

Существует несколько масштабов (уровней) разрушения ГП:

1. Мегаскопический уровень – характерен при взрывании уступов, при ведении горных работ открытым способом, а также при сдвигениях больших породных масс, обрушении, обвалах и т.д. В этом случае наиболее сильно на разрушаемости сказываются крупные трещины, нарушения, большие разрывы и пр.

2. Макроскопический уровень – предопределяет более мелкие трещины, поры, контакты слоёв и другие макродефекты, характерные при взрывании ГП в подземных условиях, при выемке ГП с помощью различных машин и механизмов.

3. Микроскопический уровень – характерен при истирании ГП, происходит разрыв связей кристаллов и зёрен.

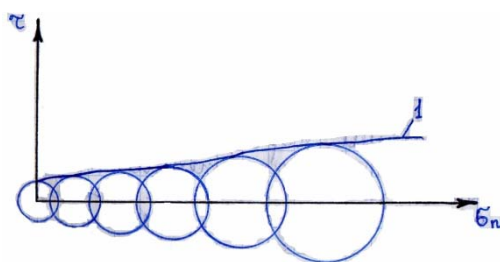
Механические разрушения ГП наиболее часто описываются теориями Мора, Гриффитиса и кинетической теорией прочности.

Применительно к ГП наибольшее распространение получила теория на зависимости между касательными ( $\tau$ ) и нормальными ( $\sigma$ ) напряжениями в каждой точке тела, находящейся в объёмном напряжённом состоянии. Согласно этой теории  $\tau=f(\sigma_n)$  в любой точке тела. По теории Мора разрушение наступает тогда, когда касательное напряжение  $\tau$  превысит определенное предельное значение  $\sigma_n$ , действующее на породу, либо когда нормальное напряжение при  $\tau=0$  превысит определенный предел, равный  $\sigma_p$ , т. е. предел прочности при растяжении.

Связь между  $\sigma_n$  и  $\tau$  обычно представляют графически с помощью кругов напряжений. Каждому частному значению напряжённого состояния соответствует свой круг напряжений. Поскольку этот круг для данного напряжённого состояния является максимальным, его ещё называют предельным.

На графике  $\tau=f(\sigma_n)$  можно построить семейство кругов предельных напряжений.





Огибающая линия 1 называется паспортом прочности.

Любое значение напряжений внутри огибающей не является разрушающим для данной ГП, а за её пределами разрушающей. Значение, непосредственно расположенное на огибающей, т.е. на паспорте прочности, является предельным для данной ГП.

Паспорт прочности позволяет по двум известным параметрам ГП определить другие два параметра её прочности.

Разрушение хрупких ГП, т.е. пород не склонных к проявлению пластичных деформаций обычно описывают теорией прочности Гриффитиса.

### ***3. Массив горных пород при открытой разработке месторождений полезных ископаемых и его структурные характеристики***

*Массив горных пород* – часть земной коры, вмещающую карьер, техногенные насыпи и ограниченную зоной, в которой локализируются инженерно-геологические явления, вызванные процессом добычи полезного ископаемого.

Горные породы в естественном залегании образуют разнообразные геологические тела, свойства которых зависят от геологических особенностей массива.

Одни и те же горные породы, в зависимости от характера условий залегания, могут иметь различные физико-механические свойства.

Кроме этого свойства, определённые стандартными испытаниями образцов горных пород, отличаются от показателей тех же свойств в мас-

сиве. Это объясняется изменениями напряжённого состояния в образце (эффект разгрузки) при его выемке из массива, изменениями температуры, потерей влаги, дегазацией, а также его механическими повреждениями при выемке.

Свойства одной и той же горной породы при неодинаковых по размеру образцах различны. При этом по мере увеличения объёма испытуемых образцов значение определённых параметров прочности снижается.

В последнем случае играет роль масштабный фактор, когда более или менее крупные структурные элементы (большие трещины, нарушения) не могут быть представлены в малых образцах.

Все виды различий в показателях свойств в массиве ГП обусловлены структурными характеристиками: неоднородностью состава и строения, анизотропией и трещиноватостью.

I. *Неоднородность* – изменчивость физических и механических свойств горных пород в различных точках массива.

Различают первичную и вторичную неоднородность.

Первичная неоднородность возникает в процессе образования слогаемых массив горных пород и заключается в неоднородности минералогического и гранулометрического состава, в наличии слоистости и первичной трещиноватости.

Вторичная неоднородность появляется значительно позже, за счёт тектонических процессов, метаморфизма и выветривания.

Отнесение массива к однородному или неоднородному зависит от уровня (масштаба) рассматриваемого явления. В зависимости от решаемой задачи в качестве однородного элемента могут рассматриваться геологические тела различных размеров.

Различают четыре уровня (порядка) неоднородности структуры геологических объектов в зависимости от размеров области воздействия:

4. Отвечает неоднородностью кристаллов минералов, возникающей из-за дефектов кристаллической решётки с размерами области воздействия  $10^{-6} \div 10^{-2}$  см.

3. Соответствует неоднородности в образце (область воздействия  $10^{-2} \div 10$  см).

2. Соответствует неоднородности при натуральных испытаниях ( $10 \div 10^3$  см).

1. Соответствует области воздействия  $10^3 \div 10^6$  см, т.е. равными или превышающими размеры инженерного сооружения.

Наибольшее значение для оценки устойчивости массива горных пород при ОРМПИ имеет неоднородность третьего и второго уровней.

II. *Анизотропия* в массиве горных пород заключается в изменении их свойств в зависимости от избранного направления.

Пример: сланцеватые ГП легче срезаются по направлению сланцеватости, чем поперёк её, а водопроницаемость у лёссовидных суглинков в вертикальном направлении значительно больше, чем в горизонтальном.

По аналогии с вышеперечисленными уровнями неоднородности следует различать и уровни анизотропии, т.е. от анизотропных кристаллов до анизотропии массива.

III. *Трещиноватость*. Из структурных она имеет существенное значение. Практически все массивы трещиноваты, кроме пиков и некоторых высокопластичных ГП.

Особенно значительна роль трещиноватости для скальных ГП. Здесь она главная причина деформируемости, неустойчивости, повышенной водопроницаемости, неоднородности и анизотропии.

*Трещины* – разрывы сплошности ГП независимо от того закрыты они или открыты, какую имеют форму и протяжённость.

Трещины одного и того же происхождения, а следовательно, одинаково ориентированные в пространстве, образуют систему трещин. В мас-

сиве есть не одна, а несколько систем трещин. Все массивы разбиты системами трещин на отдельности (шаровая, блоковая, столбчатая и др.).

По своему генезису трещины могут быть первичные и вторичные.

Первичные включают литологические трещины, т.е. образуются при формировании ГП, главными из которых являются трещины отдельности и трещины напластования.

Вторичные образуются в массивах в результате разрывных и складчатых тектонических движений, процессов выветривания и при искусственном разрушении ГП. Они могут развиваться по первичным или образовывать новые системы, которые на фоне первичной трещиноватости создают локальные участки интенсивно трещиноватых ГП.

Геометрические параметры трещин: густота, протяжённость, угол падения, азимут простираения и ширина раскрытия. Это важные характеристики при оценке прочности и деформируемости массива ГП.

Большое значение имеет состав заполнителя трещин и характер поверхности стенок. Трещины, заполненные кварцем и кальцитом, а также другими образователями гидротермального происхождения, не снижают прочности массива. Глинистые заполнители наоборот резко снижают его прочность.

По гладкой поверхности стенок трещин уменьшается сопротивление сдвигу, шероховатые и бугристые поверхности увеличивают зацепление по трещине.

Изучают трещиноватость как важный фактор устойчивости с целью выявления количества систем трещин, их интенсивности, ориентировки, оценки качественных показателей (заполнитель, обводнённость, шероховатость и т.п.).

#### ***4. Общая характеристика факторов, обуславливающих поведение массива горных пород при открытой разработке месторождений полезных ископаемых***

Поведение массива горных пород при добыче ПИ открытым способом и в частности его устойчивость обусловлена совместным действием большого числа факторов, которые можно объединить в две группы:

Природная группа. Включает такие факторы инженерно-геологического, гидрогеологического и климатического происхождения как строение и свойства массива ГП, его напряжённое состояние, водоносность, температура, атмосферные осадки.

Техногенная группа. Объединяет следующие факторы, определяемые геомеханическими параметрами карьера, системой разработки и структурой горного оборудования: углы наклона и высота уступов (бортов) карьера и отвалов, глубина и форма карьера в плане, направление и скорость подвигания фронта горных работ, разрушение ГП при выемке части массива, воздействие БВР, нагрузки при работе горнотранспортного оборудования и наличие подземных горных выработок.

Каждый из перечисленных факторов в разной степени определяют условия устойчивости массива в зависимости от природы внутренних связей слагаемых ГП. По этому признаку выделяют три основных инженерно-геологических типа ГП в геомеханике:

*С жёсткими связями (скальные и полускальные).*

Объединяют магматические, метаморфические и осадочные ГП с жёсткими кристаллизационными связями между отдельными частицами. Они обладают высокой прочностью, которая мало изменяется под влиянием воды. Для них определяющее значение с позиции устойчивости имеет наличие ослабленных поверхностей, трещиноватость и нарушенность.

### *Мягкие связные.*

Включают тонкодисперсные осадочные образования, содержащие не менее 5% глинистых частиц. По составу они разделяются на: глины, суглинки, супеси. Для этих пород свойственна зависимость прочности от наличия воды, которая определяет водно-коллоидный характер связей между частицами.

В сухом состоянии они имеют относительно высокую прочность, а с ростом влажности их прочность уменьшается. Многие ГП набухают, а при высушивании дают усадку до 25÷35 % объёма.

### *Несвязные (раздельнозернистые, сыпучие).*

Объединяют обломочные осадочные ГП. Отдельные зёрна и агрегаты, связаны между собой преимущественно силами трения. Они имеют значительную прочность при преобладании крупных пор, что обуславливает большую водопроницаемость и водоотдачу. Устойчивость этих ГП в массивах характеризуется углом внутреннего трения. Эти ГП подвергаются различного рода фильтрационным деформациям, а также способны проявлять пльвунные свойства.

Месторождения могут объединять ГП разных инженерно-геологических типов, которые во время разработки могут оказываться в пределах одного массива. В этом случае условия устойчивости отдельных уступов и набор факторов, определяющих устойчивость массива в целом, будут различными. Поэтому с позиции геомеханики целесообразно выделять в пределах массива инженерно-геологические комплексы ГП.

Так, Г.Л. Фисенко рассматривает три группы комплексов ГП:

- крепкие скальные (прочность в образце  $\sigma_{сж} > 80$  МПа)
- изменённые скальные и полускальные ( $\sigma_{сж} = 8 \div 80$  МПа)
- слабые ( $\sigma_{сж}$  менее 8 МПа)

В пределах каждой группы по условиям сложности залегания ГП выделяют три подгруппы:

*простые условия сложности* – характеризуются горизонтальным и пологим залеганием ГП, их малой изменчивостью и тектонической нарушенностью;

*условия средней сложности* – характерно наклонное и крутое залегание со сложным характером тектонических нарушений и трещин;

*сложные условия* – характеризуются развитием интенсивной складчатости, трещиноватости и тектонической нарушенности, а также сильной изменчивостью свойств.

### ***5. Виды деформаций массивов горных пород при открытой разработке месторождений***

При проведении ОГР нарушается природная обстановка в массиве и изменяется естественное состояние, обусловленное действием гравитационных сил. Это во всех случаях сопровождается развитием деформаций в прибортовой зоне карьера.

Деформации в массивах ГП представляют собой сложные инженерно-геологические явления, приводящие к изменению формы контура горных выработок и отвалов. Величина, характер, время развития деформаций, объёмы деформируемых ГП различны и зависят от количества одновременно влияющих факторов в конкретных горно-геологических условиях.

Все явления деформаций при ОРМПИ в массивах ГП разделяют на следующие виды: осыпи, обрушения, оползни и группа фильтрационных деформаций, куда входит механическая и химическая суффозии, оплывание, фильтрационный выпор, просадки и эрозия откосов.

Осыпи образуются в результате выветривания ГП на поверхности откосов. Проявляются в виде отрыва отдельных частиц, кусков от массива и скалывания их к подошве откосов. Они образуются при углах откосов,

превышающих углы естественного откоса (350÷370). Тогда частица, потерявшая связь с массивом, не может удерживаться на поверхности откосов силами трения.

Обрушение отличается от осыпей тем, что захватывают более значительные массивы ГП. Поверхность отрыва совпадает с трещинами и наклонена под углом больше угла внутреннего трения, поэтому после преодоления сил сцепления оторвавшийся массив не может удерживаться по этой поверхности силами трения, и скатывается вниз к подошве откоса в течение нескольких секунд.

Оползни характеризуются медленным смещением породных масс по поверхности скольжения, которая залегает в массиве в среднем под углом меньшим угла внутреннего трения, пересекаемых этой поверхностью. При этом величины напряжений по поверхности скольжения или на значительной её части находятся за пределом текучести. Вследствие этого и происходит пластическая деформация ГП – оползень, продолжающийся от десятков минут до нескольких месяцев. А при вовлечении новых массивов и до нескольких лет.

Чёткой границы между отдельными видами вышеназванных деформаций не существует. Осыпи и обрушения различаются по относительной величине деформирующихся массивов, а обрушения и оползни по скорости деформации, зависящей от наклона поверхности скольжения и от характера напряжённого состояния ГП.

Однако, оползень – это вид деформаций, являющийся наиболее крупным по размерам захватываемых участков, наиболее опасным и приводящий к тяжёлым последствиям.

По объёму оползни различают:

- мелкие (с объёмом оползневого тела сотни – тысячи м<sup>3</sup>)
- средние (десятки – сотни тыс. м<sup>3</sup>)
- крупные (млн. м<sup>3</sup>)



В плане оползни могут иметь различные очертания, что связано с условиями их образования и геологическими параметрами откосов. Наиболее часто встречаются оползни округлой формы (длина по фронту приблизительно равна ширине) – циркообразные. Широкое распространение имеют и фронтальные оползни (длина по фронту больше ширины). Менее распространены вытянутые оползни – потоки (длина намного больше ширины).

В динамике развития каждого оползня выделяют три этапа:

- I подготовки
- II фактического образования
- III стабилизации

Первый этап может продолжаться месяцами и годами, а при интенсивном воздействии на массив (взрывы, динамические нагрузки, при работе горно-транспортного оборудования и др.) сокращается до минимума. Во время этого этапа постоянно снижается устойчивость массива. Коэффициент запаса устойчивости постоянно или скачкообразно уменьшается, и массив переходит в состояние предельного равновесия. Здесь характерно появление трещин на верхней площадке (заколы), микроподвижки, а для мягких связных – пластических деформаций. Только на этом этапе возможно затухание оползневых деформаций при устранении причин их вызвавших.

Второй этап также может продолжаться от нескольких минут до многих месяцев. Характерным является быстрая потеря устойчивости и максимальные скорости смещения оползневого тела или его отдельных частей.

Третий этап наступает после того как оползень полностью сформируется и появляется устойчивое равновесие, но уже при новых геометрических параметрах откоса.

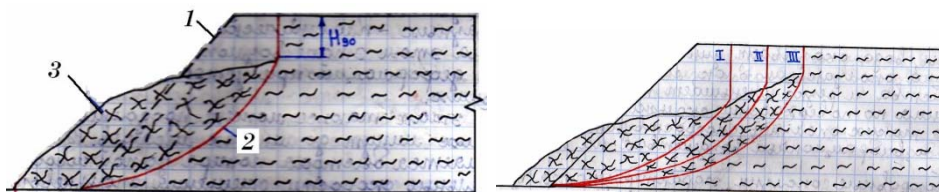
В практике ОРМПИ выделяют следующие виды оползней:

- оползни изотропных массивов
- циклические оползни изотропных массивов
- контактные
- покровные и глубинные оползни слоистых ГП:
- оползни выпирания
- оползни-надвиги

### *Оползни изотропных массивов*

Характерным для них является то, что поверхность скольжения не связана с какими-либо зонами, плоскостями ослабления и имеет вогнутую круглоцилиндрическую форму. Такие оползни развиваются чаще всего в пределах одного уступа, сложенного однородными мягкими связными ГП, а иногда слабыми полускальными.

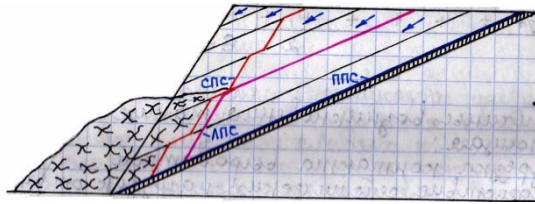
Основная причина: снижение прочности ГП, под влиянием различных сил. Дополнительной причиной является снижение прочности ГП под влиянием воды. В результате чего возникают циклические оползни изотропных массивов.



- 1 – первоначальный профиль уступа    I, II, III – циклы развития оползня  
 2 – поверхность скольжения  
 3 – тело оползня

Ширина блока I цикла оползня измеряется от нескольких см до 5÷8 м. После сползания I блока возникает аналогичное условие нового цикла. Интенсивность развития таких оползней достаточно высокая, а скорость продвижения вершины составляет 10÷40 м/год при  $H_y=10\div 15$  м.

Контактные оползни характеризуются явно выраженной плоской, ломанной или ступенчатой поверхностью скольжения.

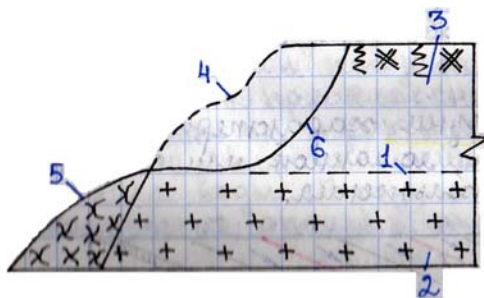


Поверхностью скольжения наиболее часто являются маломощные глинистые прослойки или плоскости напластования тектонических нарушений, трещин и др., падающие в сторону выемки.

Решающее значение при образовании таких оползней имеет вода. Попадая в ослабленные зоны, вода оказывает динамическое воздействие на оползающий блок, снижая прочностные свойства и резко уменьшая коэффициент трения по поверхности скольжения. Образованию таких оползней способствуют сейсмические и вибрационные воздействия на массив.

Покровные оползни характеризуются тем, что оползневое тело формируется из покровных образований, а поверхностью скольжения является кровля коренных ГП. Встречаются они двух типов:

*слабые покровные отложения на естественных склонах, подсечённых карьером*



- 1 – кровля коренных ГП
- 2 – коренные ГП
- 3 – покровные отложения
- 4 – первоначальный контур
- 5 – тело оползня
- 6 – поверхность скольжения

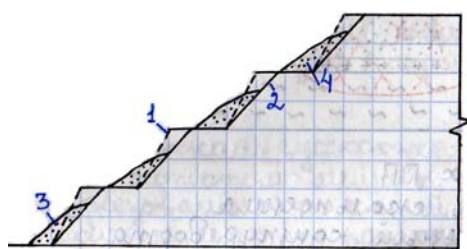
Причины возникновения таких оползней следующие:

- подрезка контакта выработкой
- воздействие сейсмических нагрузок от взрывов
- при работе оборудования
- устройства временных насыпей и отвалов

- нарушение естественного режима подземных вод

Такие оползни могут захватывать значительные по мощности покровные отложения. Образуются на нерабочих бортах карьера и представляют собой сползание продуктов выветривания (вторичных покровных образований) по откосу борта.

- продукты выветривания на бортах карьера



- 1 – первоначальный контур борта
- 2 – контур борта после оползня
- 3 – тело оползня
- 4 – вторичные покровные образования (осыпи)

Причины:

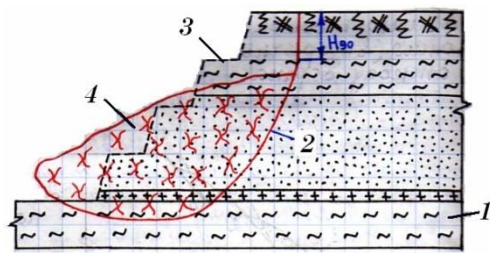
- увлажнение массива продуктов выветривания подземными и поверхностными водами;
- подпор подземных вод в результате перекрытия путей дренирования;
- сейсмические воздействия.

*Глубинные оползни*

*Оползни выпирания* возникают при наличии на вскрытых карьером выработках слабых пластичных глин или слабых контактов между слоями, прочностные характеристики которых значительно меньше, чем у вышележащих ГП.

Причины: обводнение ГП или завышение угла наклона борта или уступа.

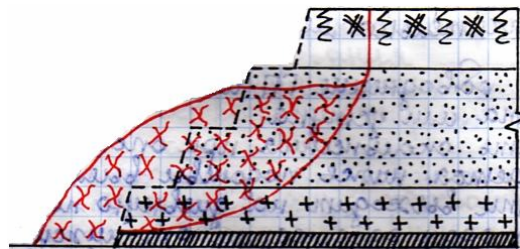
Поверхность скольжения при оползнях выпирания опускается ниже подошвы выемки и в нижней части выходит на дневную поверхность на некотором расстоянии от нижней бровки откоса, а перед откосом образуется вал выпирания.



- 1 – слой слабых ГП
- 2 – поверхность скольжения
- 3 – первоначальный контур борта
- 4 – тело оползня

Для оползней выпирания характерно вертикальное смещение в верхней части оползня, а в средней и нижней части наблюдается перемещение в сторону выработанного пространства наряду с вертикальным смещением.

*Оползни-надвиги* характеризуются тем, что в нижней части оползня поверхность скольжения проходит либо по ослабленному контакту между слоями, либо по слабому пластичному прослойку полностью пересечённому бортом, а средняя и верхняя части поверхности скольжения пересекают слои.



### *Фильтрационные деформации*

Основным фактором, определяющим их характер и вид, являются подземные и поверхностные воды.

*Механическая суффозия* – вынос фильтрационным потоком мелких частиц из массива ГП с образованием полостей (каналы, пещеры). В дальнейшем это приводит к возникновению на бортах и уступах воронок, провалов, а в нижней части конусов выноса из мелкозернистых материалов.

Важным условием проявления суффозных процессов является неоднородный гранулометрический состав и большой градиент напора подземных вод.

*Оплывание* – перенос и переотложение частиц ГП подземными водами, вытекающими на откосы в пределах промежутка высачивания.

Различают следующие формы оплывания:

1. Локальная в откосах песчаных ГП;
2. Локальная в откосах глинистых ГП;
3. Массовая в откосах, вскрывающих пльвуны;
4. Массовая в откосах песчаных ГП при динамическом воздействии.

1. На рабочих бортах вызывает затруднение в работе оборудования, т.к. зона оплывающего песка может захватывать широкую полосу при длине языков оплывания до 25 м.

2. Связана с резким переувлажнением глинистых откосов. Возможность их оплывания возникает при влажности, превосходящей верхний предел пластичности (границу текучести).

3. Наиболее опасный вид оплывания – это массовое оплывание откосов, вскрывающих пльвуны.

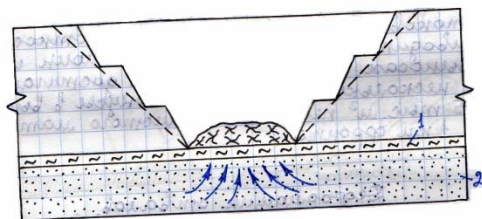
Пльвуны – водонасыщенные дисперсные ГП, которые при вскрытии горными выработками текут, т.е. ведут себя подобно тяжёлым вязким жидкостям. Оплывание таких ГП может происходить как медленно толстым слоем, так и катастрофически быстро в виде прорыва.

Характерная особенность пльвунов – их склонность к тиксотропным превращениям, т.е. способность разжижаться при сотрясении и вибрации, а после прекращения механических воздействий быстро восстанавливать своё первоначальное состояние. Так они быстро переходят в неустойчивое жидкое состояние в зоне работы экскаватора, транспорта и представляют определённую опасность.

4. Характерно для водонасыщенных высокопористых их разностей. Обычно с коэффициентом пористости более 42%. Оплывание связано с потерей прочности и переходом в разжиженное состояние под влиянием сотрясения.

**Фильтрационный выпор** – прорыв слабосцементированных песчано-глинистых ГП с водой через слой водоупорных ГП.

Наиболее опасный вид выпора – прорыв напорных вод через водоупорные слои на дне карьера. Условие возникновения – величина напора на подошву карьера превышает величину сопротивления сдвигу этого слоя с учётом массы его в пределах дна карьера.



В результате прорыва вместе с водой возможно движение ГП и водоносного слоя, которые через разрушенный водоупорный слой будут вытеснены в карьер. Это приводит чаще всего к образованию оползней в бортах карьера.

*Химическая суффозия (карст)* – процесс растворения и выщелачивания ГП подземными и поверхностными водами с образованием воронок и провалов в прибортовой зоне карьера. Эти процессы характерны для ГП, содержащих более или менее растворимые минералы.

*Просадки* – вертикальное опускание прибортовых участков высокопористых породных масс без образования поверхностей разрыва.

Чаще всего просадки не нарушают общей устойчивости борта (уступа). Однако, в силу скоротечности этого вида деформации, просадки являются опасными для машин и механизмов.

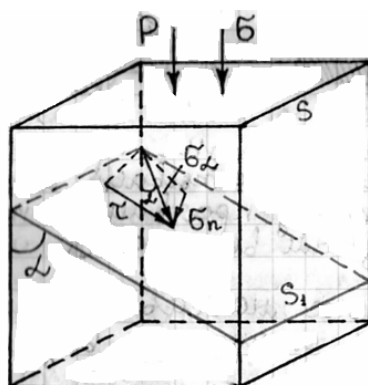
*Эрозия откосов* – размывание откосов, сложенных чаще всего песчано-глинистыми ГП. Происходит под влиянием ливневых потоков воды, стекающих по откосам, и приводит к образованию промоин и конусов в выносах. Промоины могут достигать глубины нескольких метров, а конусы в выносах до 3÷5 тыс. м<sup>3</sup> песчано-глинистого материала на 1 км фронта.

## 6. Напряженное состояние массивов горных пород.

### Основные понятия о напряжениях

Массивы ГП в естественном состоянии находятся под воздействием двух силовых полей: гравитационного и тектонического. Кроме этого массивы, вмещающие открытые горные выработки, подвергаются дополнительному воздействию сил, возникающих в результате деятельности человека при добыче ПИ.

Все эти внешние силы в анализируемой области массива могут быть объёмными и поверхностными, и могут вызывать внутренние силы взаимодействия между отдельными составными массива. Мерой этих внутренних сил являются напряжения, характеризующиеся величиной и направлением (векторная величина).



На поверхности блока и в любом поперечном сечении напряжения определяют как

$$\sigma = \frac{P}{S},$$

а в любом другом случае, когда поперечное сечение наклонено под углом  $\alpha$  к оси блока, напряжение будет равно

$$\sigma = \frac{P}{S} * \sin \alpha = \tau * \sin \alpha = \frac{P}{S_1},$$

и меньше за счёт большей площади  $S_1$ .



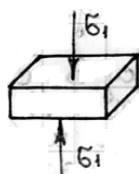
Напряжение  $\sigma_\alpha$  может быть разложено на нормальную  $\sigma_n$  и касательную  $\tau$  составляющие:

$$\sigma_n = \sigma * \sin^2 \alpha ,$$

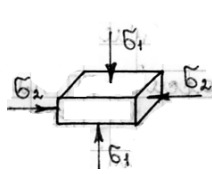
$$\tau = \sigma * \sin \alpha * \cos \alpha = \frac{1}{2} \sigma * \sin 2\alpha ,$$

Различают три вида напряжённого состояния массива:

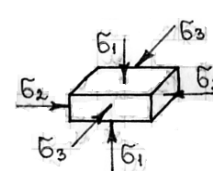
линейное



плоское



объёмное



При линейном напряжённом состоянии на элементарный блок действуют силы по одной вертикальной оси. Максимальное  $\sigma_n$  создаётся на площадках перпендикулярных направлению действия силы, а в любой точке может быть определена только одна такая площадка, на которой  $\tau=0$ .

Плоское напряжённое состояние в элементарном блоке, если силы действуют по двум взаимно перпендикулярным направлениям. При этом через каждую точку можно провести две площадки, на которых  $\sigma_1$  и  $\sigma_2$  будут максимальны, а  $\tau_1$  и  $\tau_2$  равны нулю.

При объёмном напряжённом состоянии таких площадок будет уже три. Выделенные площадки, на которых  $\sigma_n$  будут максимальны, а  $\tau=0$ , называются главными площадками, а  $\tau_1$ ,  $\tau_2$  и  $\tau_3$  называются главными напряжениями.

- при линейном напряжённом состоянии  $\sigma_1 \neq 0$  и  $\sigma_2 = \sigma_3 = 0$
- при плоском  $\sigma_1 \geq \sigma_2 \neq 0$  и  $\sigma_3 = 0$
- при объёмном  $\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3 \neq 0$

## 7. Напряженное состояние массива в естественных условиях

Элементарный блок горных пород в ненарушенном горными работами массиве пребывает в объёмном напряжённом состоянии под действием главных напряжений  $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$  и  $\sigma_3$ .

Если элементарный блок находится на некоторой глубине  $h$ , то на его горизонтальной поверхности возникает вертикальное напряжение  $\sigma_1$ , зависящее от плотности горных пород, ускорения силы тяжести и глубины:

$$\sigma_1 = g * \delta * h = \gamma * h ,$$

где  $g * \delta$  – удельный вес природной горной породы

$\delta$  – плотность горных пород.

Под влиянием  $\sigma_1$  на вертикальных гранях элементарного блока по двум взаимно перпендикулярным направлениям возникают напряжения  $\sigma_2$  и  $\sigma_3$  бокового отпора. В крепких однородных ГП до глубины 1000 м (в пределах существующих глубин карьера) величины горизонтальных напряжений  $\sigma_2$  и  $\sigma_3$  равны между собой и зависят от модуля Юнга  $E$ , коэффициента Пуассона  $m$  и главного наибольшего напряжения  $\sigma_1$ .

При  $\sigma_1 < \sigma_{сж}$  указанные показатели, согласно закону Гука, связаны между собой уравнениями:

$$l_1 = \frac{1}{E} [\sigma_1 - m(\sigma_2 + \sigma_3)] ,$$

$$l_2 = \frac{1}{E} [\sigma_2 - m(\sigma_1 + \sigma_3)] ,$$

$$l_3 = \frac{1}{E} [\sigma_3 - m(\sigma_1 + \sigma_2)] ,$$

где  $l_1$ ,  $l_2$ ,  $l_3$  – величины относительной деформации по направлению действия главных напряжений

т. к.  $\sigma_2 = \sigma_3$ , а  $l_2 = l_3 = 0$ , то  $\sigma_2 = \sigma_3 = \frac{m}{1-m} * \sigma_1$

Модель такого массива можно представить в виде системы плотно пригнанных друг к другу столбов ГП. Высота столбов ограничивается прочностью ГП при одноосном сжатии  $\sigma_{сж}$ . Реальность модели подтверждается наличием в природе вертикальных откосов высотой в тысячи и более метров (водопад Анхель в Венесуэле (1054 м)).

Таким образом, поскольку коэффициент Пуассона для скальных ГП  $0 < m < 0,5$ , то  $\sigma_1 > \sigma_2 = \sigma_3$ . В слабых ГП, обладающих пластичными свойствами, с предельным значением  $m \approx 0,5$  главные напряжения  $\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3$ . В этом случае происходит гидростатическое распределение в массиве напряжений. Этому состоянию соответствует модель вязкой жидкости. Пример наличия гидростатического распределения напряжений: выдавливание ГП на горизонтальных площадках от дополнительной нагрузки на естественный массив в виде отвалов. При этом выпирание часто происходит на значительных расстояниях (до 500 м от основания отвала).

В реальных условиях массивы ГП весьма неоднородны по структуре и свойствам и, как правило, не соответствуют ни одной из приведённых выше моделей. Это подтверждается некоторыми отклонениями ожидаемых величин главных напряжений рассчитанных по формулам от действительных, замеренных непосредственно в ГП.

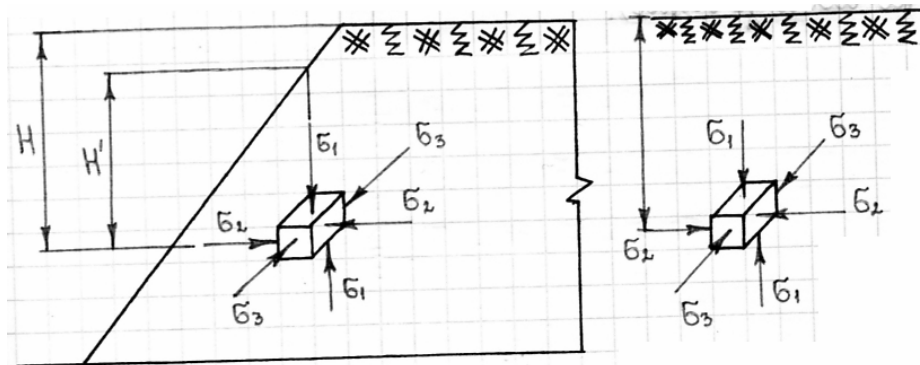
Значительно сложнее становится напряжённое состояние массива под действием тектонических сил. Под влиянием этих сил направление и величина главных напряжений могут изменяться в больших пределах. Иногда возникают аномально высокие горизонтальные напряжения, превышающие вертикальные. Причиной такого состояния может быть только тектонические силы, сжимающие массив.

Условия и закономерности проявления в массивах тектонического силового поля весьма разнообразны и ещё недостаточно изучены. Наличие

такого поля и его параметры можно обнаружить и учесть пока только путём измерения напряжений и анализа структуры массива в натуральных условиях.

### **8. Изменение напряженного состояния массива горных пород при ведении открытых горных работ**

Выемка горных пород резко нарушает установившийся природный режим горного массива и изменяет поле напряжений. В некоторой области вокруг карьера изменяется первоначальное напряжённое состояние массива и возникает новое поле напряжений. В первую очередь это связано с уменьшением мощности отрабатываемого слоя ( $H^1 < H$ ) и возможности деформации в сторону выработанного пространства.



Состояние горных пород (в пределах упругих деформаций) при плоском в плане откосе характеризуется следующими значениями:

$$\sigma_1' = \gamma * H'$$

$$\sigma_2' = \frac{E * \varepsilon_2}{1 - m} + \frac{m}{1 - m} * \gamma * H'$$

$$\sigma_3' = \frac{m}{1 - m} * \gamma * H'$$

где  $E$  – модуль Юнга

$\varepsilon_2$  – относительная деформация в сторону откоса

$m$  – коэффициент Пуассона

При изогнутом в плане откосе изменяется не только  $\sigma_2$ , но и  $\sigma_3$ . При вогнутой форме появляется дополнительное горизонтальное напряжение сжатия, а при выпуклой – дополнительное растягивающее напряжение.

По высоте откоса наблюдается концентрация напряжений в основании откоса. Как правило, вертикальные и горизонтальные напряжения возрастают от верхней площадки уступа к нижней. Вблизи верхней площадки уступа есть области, где преобладают горизонтальные растягивающие напряжения. Здесь могут развиваться трещины отрыва. Поле напряжений зависит и от множества других факторов связанных с изменением природной обстановки.

### ***9. Условия предельного равновесия массивов горных пород в откосах***

Основное условие предельного равновесия массива – это соотношение Морра-Кулона.

$$\tau = \sigma_n * \operatorname{tg} \rho + K,$$

где  $\rho$  – угол внутреннего трения;

$K$  – сцепление породы в массиве;

$K$  и  $\rho$  являются преобладающими характеристиками прочности ГП в массиве.

В теории предельного равновесия рассматривается два случая предельного напряжённого состояния:

1. Когда предельное напряжённое состояние выполняется в любой точке массива.
2. Когда это условие справедливо лишь по внутренней его границе, являющейся поверхностью скольжения.

В первом случае задачу решают аналитически, т.е. определяют критические нагрузки на массив и характер поверхности, вдоль которой возможно его разрушение.

Во втором случае применяется поверхность скольжения, для которой рассматривается равновесие возможной призмы обрушения с использованием соотношения Морра-Кулона. Этот метод разработал Кулон в 1776 году и получил дальнейшее развитие.

Метод решения задач для первого случая называется методом предельного напряжённого состояния сыпучей среды, а для второго случая – методом предельного равновесия сыпучей среды.

Чтобы определить устойчивость необходимо отыскать наиболее слабые поверхности внутри откоса и сравнить действующие по ним удерживающие и сдвигающие силы.

Наиболее слабой для данного откоса будет та поверхность, где отношение

$$\frac{\sum F_{y\partial.}}{\sum F_{c\partial.}} = \min ,$$

Если это отношение будет равно 1, то поверхность предельно напряжённая, а угол откоса  $\alpha$  предельный.

Отношение удерживающих сил к силам, стремящимся сдвинуть призму возможного обрушения по поверхности скольжения, является мерой устойчивости откоса. Если  $n=1$ , то откос будет находиться в предельном равновесии.

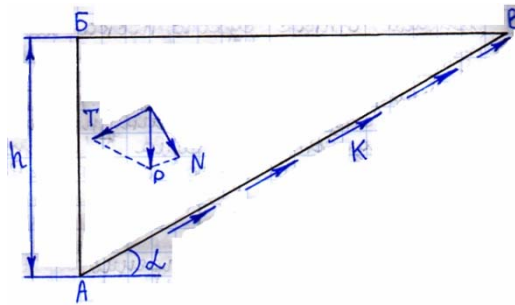
$$n = \frac{tg \rho * \sum N_i + K * \sum l_i}{\sum T_i} .$$

## 10. Призма возможного обрушения откосов, виды поверхностей скольжения. Коэффициент запаса устойчивости

### Призма возможного обрушения откосов

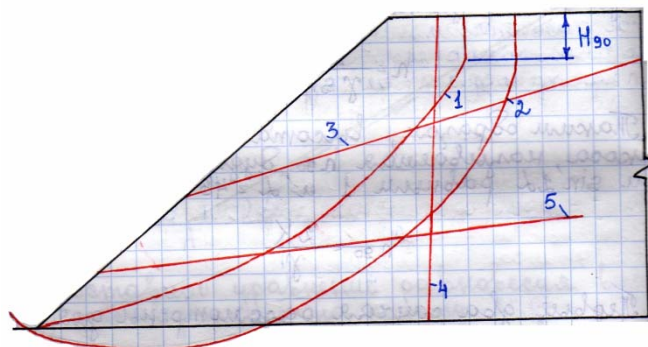
Это массив, ограниченный плоскостью откоса и поверхностью скольжения.

Если разделить призму возможного обрушения на вертикальные блоки I, II, III... и сравнить сдвигающие и удерживающие силы в каждом из них вдоль поверхности скольжения, то в верхней части откоса будут преобладать сдвигающие силы, а в нижней удерживающие.



### Виды поверхностей скольжения

Формы поверхностей скольжения и их положение в массиве зависит от строения его строения, высоты и угла откоса, а также от наличия трещин, ослабленных контактов и др.



1 и 2 – поверхности скольжения в неослабленном массиве

3 – поверхность скольжения полностью проходит по поверхности ослабления

4 и 1 – поверхность скольжения проходит частично по поверхности ослабления и частично по неослабленному массиву (2 и 5).

При отсутствии в откосе неблагоприятно расположенных поверхностей ослабления, поверхность скольжения является монотонной, близкой по форме к круглоцилиндрической.

Характерным для такого вида поверхности скольжения является наличие в верхней её части вертикального участка (элемент отрыва) –  $H_{90}$ .

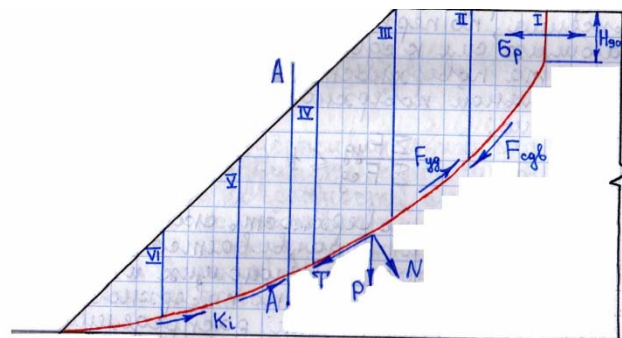
$$H_{90} = \frac{2K}{\gamma} \operatorname{ctg} \left( 45^\circ - \frac{\rho}{2} \right),$$

где  $K$  – сцепление породы в массиве;

$\rho$  – угол внутреннего трения;

$\gamma$  – удельный вес пород.

Участок возникает под действием растущих напряжений при стремлении оползающего массива сохранить в начальный период развития оползня внутреннюю связность, повернуться вокруг нижней бровки откоса.



*Коэффициент запаса устойчивости*



Различают расчётный и фактический коэффициенты запаса устойчивости. Расчётный совокупно учитывает необходимость запасов устойчивости для обеспечения работы откоса как инженерного сооружения и возможную погрешность при расчётах.

Рассмотрим некоторые причины, оказывающие влияние на выбор расчётного коэффициента запаса устойчивости:

1. Исходные характеристики прочности пород определяются с погрешностью до  $\pm 7\%$ .

2. Изменяемость пород – их свойств – во времени приводит к снижению сопротивления сдвигу до  $20\div 30\%$ .

3. Неточность учёта трещиноватости массива так же приводит к существенной погрешности.

4. Неточность определения динамических нагрузок при взрывных работах, при работе тяжёлого оборудования достигает  $\pm 15\div 20\%$ .

5. Ошибки (неточности) самих методов расчёта могут достигать  $\pm 5\div 6\%$ .

Возможно влияние и ряда других факторов, поэтому значение расчётного коэффициента запаса устойчивости для данного откоса принимается исходя из наличия тех или иных факторов, т.е.  $n$  есть функция от  $n$ -го количества факторов:

$$n_p = f(n_1, n_2, n_3, \dots, n_i),$$
$$n = \frac{\text{tg} \rho * \sum N_i + K * \sum l_i}{\sum T_i}$$

До настоящего времени выбор величины расчётного коэффициента запаса устойчивости оставался эмпирическим.

Для большинства откосов на ОГР он применяется не менее 1,2.

В большинстве расчётных методах для определения параметров откоса, обеспечивающих заданную степень устойчивости, вводят в прочно-

стные характеристики массива пород. Эти характеристики получили название расчётных:

$$K_n = \frac{K_{\text{взв.}}}{n}, \quad \rho_n = \frac{\rho_{\text{ср.взв.}}}{n}, \quad \text{tg} \rho_n = \frac{\text{tg} \rho_{\text{ср.взв.}}}{n}$$

И по ним определяют параметры откоса методами предельного равновесия.

Иногда вместо коэффициента запаса устойчивости предлагают применять оценку устойчивости откоса по уровню риска нарушения устойчивости.

### ***11. Инженерные методы расчета устойчивости откосов***

*Теоретическая основа расчёта* – это теория предельного равновесия сыпучей среды, в которой наибольшее применение нашло решение задач, предусматривающих наличие предельного равновесия откосов по внутренней его границе или поверхности скольжения.

Сюда относятся следующие инженерные методы:

- метод алгебраического сложения сил по круглоцилиндрической поверхности скольжения;
- метод с использованием алгебраического сложения сил по плавной криволинейной поверхности ГП сдвигу на силы сцепления и трения (метод касательных напряжений);
- метод многоугольника сил;
- комбинированный метод, основанный на применении нескольких методов.

Метод алгебраического сложения сил предусматривает оценку устойчивости откоса на основе допущения, что поверхность скольжения круглоцилиндрическая или плавная криволинейная, а массив сдвигается

жѐстким клином. Метод реализуется в однородных массивах, а также при горизонтальном залегании слоѐв пород или при падении слоѐв в сторону выработанного пространства.

Ожидаемое смещение массива рассматривается как вращение жѐсткого клина вокруг оси параллельной откосу по простиранию и служащей осью кругового цилиндра, поверхностью которого является поверхность скольжения.

Метод заключается в следующем: призма возможного обрушения разбивается вертикальными линиями на ряд блоков. По фронту толщина блоков принимается равной 1 м. В каждом блоке вычисляют удерживающие и сдвигающие силы, действующие по поверхности скольжения.

$$P_i = b_i * h_i * \gamma_{\text{ср.взв.}}, \quad T_i = P_i * \sin \varphi_i, \quad N_i = P_i * \cos \varphi_i,$$

где  $b_i$  – ширина блока, м;

$h_i$  – высота блока, м;

$\varphi_i$  – угол наклона основания вертикального блока, градус;

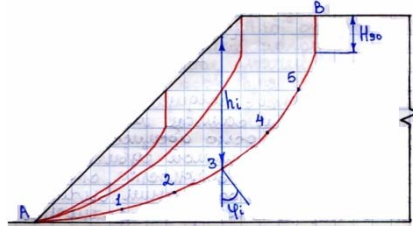
$\gamma_{\text{ср.взв.}}$  – удельный вес пород

Определяем коэффициент запаса устойчивости:

$$n = \frac{\text{tg} \rho * \sum N_i + K * \sum l_i}{\sum T_i}$$

Если в результате расчѐта  $n$  отличается от единицы более чем на 2 %, то необходимо произвести корректировку параметров откоса с последующим перерасчѐтом.

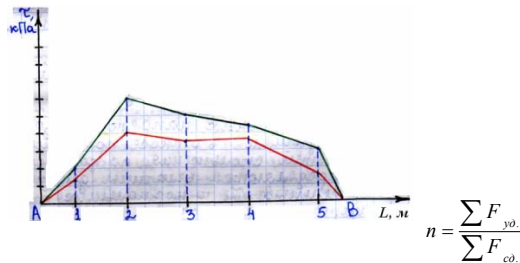
*Метод касательных напряжений* заключается в следующем: в откосе проводится ряд поверхностей скольжения, по каждой из которых определяются величины действующих касательных  $t_i$  и нормальных  $\sigma_i$  напряжений, начиная с точки 1 и т. д.



В точках А и В  $\tau=0$  и  $\sigma_n=0$ . В общем виде эти напряжения определяются как

$$\sigma_{ni} = h_i * \cos^2 \varphi_i * \gamma_{ср.взв.}, \quad \tau_i = \frac{1}{2} h_i * \sin 2\varphi_i * \gamma_{ср.взв.}$$

После этого поверхность скольжения АВ с отмеченными точками (середины блоков) разворачивают в прямую линию



$$n = \frac{\sum F_{уд.}}{\sum F_{сд.}}$$

Концы отрезков соединяют прямыми линиями, получая тем самым ломанную линию 1. Площадь между осью абсцисс и этой линией будет являться суммой сдвигающих сил, действующих по поверхности скольжения  $\sum F_{сд.}$ . Затем на основании вычисленных значений  $\sigma_{ni}$  и паспорта прочности пород определяют допускаемые величины сопротивления сдвигу в этих же точках. Их также откладывают на развёрнутую поверхность скольжения, а концы соединяют прямыми линиями, получая ломаную линию 2. Площадь между осью абсцисс и линией 2 равна  $\sum F_{уд.}$ . Считают коэффициент запаса устойчивости.

Если значение  $n$  отличается от 1 больше чем на 2 %, параметры откоса корректируют, изменяя высоту или угол.

Метод многоугольника сил применяется для расчёта устойчивости откосов сложенных сильнотрещиноватыми породами, имеющих поверхности ослабления большой протяжённости.

## **12. Порядок расчёта устойчивости откосов, нагруженных весом тяжелого оборудования**

1. В массиве уступа проводится ряд расчётных поверхностей скольжения, которые в верхней части наклонены к вертикали под углом  $45^\circ - \frac{\rho_n}{2}$ . Далее рассчитывают величину  $\sigma_o$ .

$$\sigma_o = 2K_n * ctg\left(45^\circ - \frac{\rho_n}{2}\right),$$

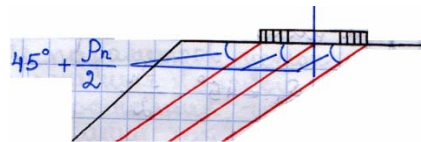
или величину удельного давления на грунт от оборудования

$$\frac{P}{S} \text{ или } \frac{P}{a*b},$$

где  $S$  – площадь опорной части,

$a$  и  $b$  – длина и ширина опорной части.

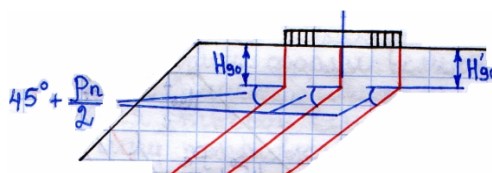
Если  $\frac{P}{S} > \sigma_o$ , то наклонные участки поверхности скольжения будут начинаться непосредственно на верхней площадке уступа под опорной базой оборудования.



Если  $\frac{P}{S} < \sigma_o$ , то в наклонной части расчётной поверхности скольжения будут начинаться с величины

$$H'_{90} = \frac{\sigma_o - \frac{P}{S}}{\gamma},$$

а выше будет образовываться вертикальная площадка отрыва.



В средней и нижней частях поверхность скольжения имеет вид круглоцилиндрической или плавной криволинейной.

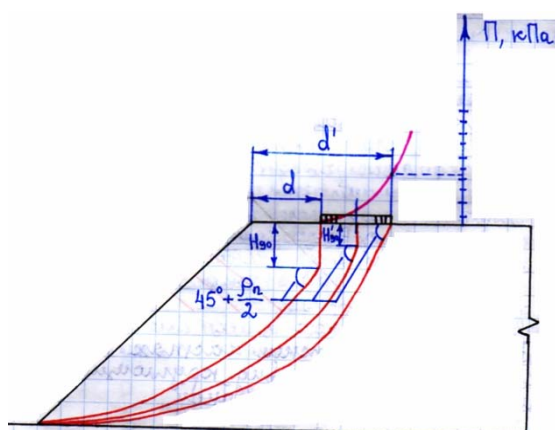
2. Для каждой ПС определяется дополнительная нагрузка, при которой обеспечивается заданный  $n$ .

$$P_{\text{од.}} = \frac{\text{tg} \rho_n * \sum N_i + K_n * \sum l_i - \sum T_i}{\cos \omega_n * (\text{tg} \omega_n - \text{tg} \rho_n)},$$

где  $\omega_n$  – угол наклона ПС в верхней части

$$\omega_n = 45^\circ + \frac{\rho_n}{2}$$

3. После расчёта величины  $P$  для заданных ПС строится кривая в зависимости от дополнительных нагрузок, от расстояния до верхней бровки уступа.



Для определения расстояния от верхней бровки до оборудования на уступе, при котором сохраняется заданный  $n$ , необходимо на построенной кривой найти точку, соответствующую нагрузке, приходящейся на  $1 \text{ м}^2$  опорной части оборудования, и из неё опустить перпендикуляр на ось абсцисс.

### 13. Учёт взрывных нагрузок при расчетах устойчивости откосов

Их влияние на устойчивость, несмотря на кратковременность действия, значительно более существенное влияния других воздействий.

Так как нет полной ясности в вопросе, «каким образом действует в массиве волна напряжений?», учёт взрывных нагрузок на устойчивость ведётся с большим запасом.

Максимальное давление  $P_c$ , воздействующее на массив, может быть определено по формуле динамики взрыва (по методу академика Садовского):

$$R_c = 0,36 \frac{\sqrt{Q}}{\sqrt{R^3}} * \sqrt{\frac{U_1 * E_1^5}{\gamma}},$$

где  $Q$  – масса одновременно взрываемого заряда ВВ, кг

$R$  – расстояние от центра взрыва до рассматриваемой точки массива, м;

$U_1$  – удельная энергия взрыва, Дж/кг;

$E_1$  – модуль Юнга, Па;

$\gamma$  – плотность природных горных пород, т/м<sup>3</sup>.

Тогда дополнительная сила в пределах элементарного блока составит

$$F_i = P_c * l_i,$$

отсюда дополнительная сила взрыва, действующая на всю призму возможного обрушения:

$$\sum F_i = P_c * \sum l_i,$$

Считается, что дополнительная сила действует по поверхности скольжения и по касательной к ней, и увеличивает сумму сдвигающих сил.

$$n = \frac{tg \rho * \sum N_i + K * \sum l_i}{\sum T_i + P_c * \sum l_i}.$$

#### 14. Учёт криволинейности откосов уступов, бортов карьера и отвалов при расчетах их устойчивости

Определение параметров устойчивости откосов основано на решении плоской задачи объёмного напряжённого состояния, что справедливо, когда откос в направлении простирания прямолинейный.

При криволинейной форме борта по боковым граням элементарных призм обрушения действует дополнительное напряжение, возникающее за счёт распора при сдвигении со стороны соседних участков.

При вогнутой форме это будут сжимающие напряжения, при выпуклой – растягивающие, ослабляющие устойчивость массива.

Очевидно чем меньше кривизна борта  $R$ , тем больше влияние зажима или растяжения на степень устойчивости.

Для откосов вогнутой формы величина  $\alpha$  устойчивого откоса будет больше, чем для прямолинейного. Для откосов выпуклой формы наоборот. Величину поправки  $\delta_\alpha$  определяют следующим образом:

На основании плана горных работ определяют радиус кривизны откоса по подошве  $R_n$ .

Рассчитывают условную величину радиуса закругления  $R$ .

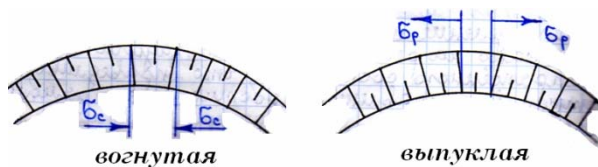
$$R' = \frac{R_n}{H_{90}},$$

По графику зависимости угла откоса и  $R_n$  определяют поправку  $\delta_\alpha$ .

Таким образом, искомый угол составит

$$\alpha - \alpha_{np} \pm \Delta\alpha,$$

где  $\alpha_{np}$  – угол откоса для прямолинейного участка





## ***15. Учёт обводненности массивов горных пород при расчётах их устойчивости***

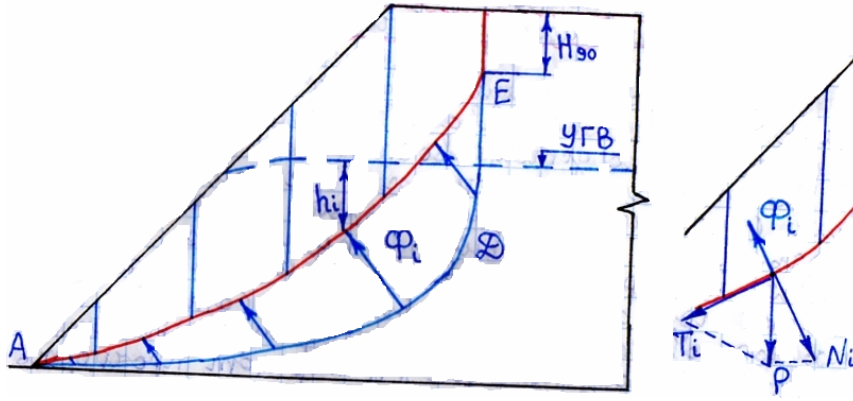
Наличие воды существенно влияет на физико-механические свойства ГП, слагающих массивы, и условия их устойчивости.

В откосах сложенных ГП с жёсткими связями (скальные и полускальные) влияние воды проявляется в основном в процессах выветривания, которые сказываются на их устойчивости только при длительном влиянии (откосы нерабочих бортов, траншей, законсервированных откосов). Некоторые полускальные ГП теряют прочность в результате процессов размокания и растворения. В этом случае воды будет определяющим фактором для пород.

Несвязные раздельнозернистые ГП практически не изменяют свои прочностные свойства под влиянием воды. Деформации откосов в них объясняются в основном наличием гидростатических и гидродинамических сил. Особенно существенное влияние оказывают подземные воды на прочностные характеристики мягких связных глинистых ГП.

В обводнённых массивах напряжённое состояние изменяется под воздействием гидростатических и гидродинамических сил. Гидростатическое давление проявляется архимедовыми силами взвешивания, которые уменьшают давление столба ГП над потенциальной поверхностью скольжения и тем самым уменьшают силы трения.

Рассмотрим пример обводнённого фильтрационного откоса сложенного обводнёнными ГП с  $K$  и  $\rho$ . В откосе содержится водоносный горизонт грунтовых вод (УГВ – уровень грунтовых вод), имеющий выходящую на откос свободную поверхность. В основании залегают водопроницаемые ГП.



Разобьем поверхность возможного обрушения на вертикальные блоки и рассмотрим удерживающие и сдвигающие силы. Гидростатическое взвешивание будет действовать на поверхность скольжения и определяться в каждой точке как вектор силы направленный перпендикулярно к ней. Его величина зависит от удельного веса и высоты столба воды над поверхностью скольжения:

$$\Phi_i = \gamma * h_i * l_i,$$

Линия АДЕ, проведённая через начало векторов и поверхность скольжения, образует эпюру распределения гидростатического давления на призме возможного обрушения.

Записав уравнение равновесия для каждого блока и просуммировав правые и левые части, получим уравнение равновесия для всего откоса:

$$\sum T_i = tg\rho * (\sum N_i - \sum \Phi_i) + K * \sum l_i.$$

### ***16. Физические свойства, определяющие поведение горных пород в массиве***

Влажность  $W$  – отношение заключённой в породе массы воды к массе сухой породы (при температуре  $105^{\circ}\div 107^{\circ}\text{C}$ ).

Если влажность определяется в естественных условиях залегания горных пород, то она соответствует естественной (природной). Влажность

весьма важный показатель, характеризующий прочность мягких связных пород, их поведение в откосах карьеров и отвалов.

Сухие глинистые породы ведут себя как твёрдые тела. С увеличением влажности они постепенно снижают прочность, переходят в мягкое состояние, а при сильном увлажнении – в текучее, т. е. полностью её теряют.

В песчаных породах влажность влияет на прочность и устойчивость только мелкозернистых и глинистых их разновидностей. Прочность средне- и крупнозернистых песков от влажности практически не зависит.

Плотность – величина отношения массы горной породы к занимаемому объёму.

Так как любая порода состоит из твёрдых минеральных частиц и расположенных между ними пустот (пор), которые могут быть заполнены воздухом (газами) или водой, то различают плотности: твёрдых частиц, природной горной породы (с естественной влажностью), сухой породы (скелета).

Плотность твёрдых частиц  $\delta_s$  зависит только от минералогического состава породы и возрастает с увеличением содержания тяжёлых минералов. Плотность твёрдых частиц породы, состоящей из одних и тех же минералов, одинакова независимо от пористости и влажности. Этот показатель для большинства горных пород измеряется в пределах  $2500 \div 2800 \text{ кг/м}^3$ , а для отдельных типов является достаточно постоянным: пески – 2660, супеси – 2700, суглинки – 2710 и глины –  $2740 \text{ кг/м}^3$ .

Плотность природной горной породы  $\delta$  – масса единицы объёма породы с естественной влажностью и природным (ненарушенным) сложением.

Это величина переменная и зависит от минералогического состава, влажности и пористости. С повышением содержания тяжёлых минералов и влажности при данной пористости она увеличивается, с увеличением пористости – уменьшается.

Плотность сухой породы  $\delta_{cn}$  – масса твёрдой компоненты (скелета) в единице объёма породы при естественной (ненарушенной) структуре. Плотность сухой породы зависит от минералогического состава и её пористости и определяется по формуле

$$\delta_{cn} = \frac{\delta}{1} - W$$

Величины  $\delta_s$  и  $\delta_{cn}$  используются для расчета пористости горных пород  $n$ , представляющей собой отношение объема пор к объему всей породы

$$n = 1 - \frac{\delta_{cn}}{\delta_s},$$

а также коэффициента пористости  $e$ , который выражается как отношение объёма пор к объёму, занимаемому минеральными частицами:

$$e = \frac{\delta_s}{\delta_{cn}} - 1,$$

С помощью этих характеристик можно определить объём пор  $V_n$  и скелета  $V_{ск}$  в единице объёма данной породы:

$$V_n = \frac{e}{(1+e)},$$

$$V_{ск} = \frac{1}{(1+e)},$$

а также степень влажности  $G$ , характеризующую долю заполнения пор водой

$$G = \frac{W_p (1-n)}{n},$$

*Водопроницаемость* – способность горных пород пропускать воду при наличии перепада давления. Вода в горных породах движется в режиме ламинарного течения и подчиняется линейному закону фильтрации – закону Дарси. Её скорость течения определяется по формуле

$$v = k * I,$$

где  $v$  – скорость фильтрации;

$k$  – коэффициент фильтрации;

$I$  – градиент напора (равный отношению разности напоров  $\Delta H = H_1 - H_2$  между двумя точками по направлению движения потока к длине пути

фильтрации  $L$ , т. е.  $I = \frac{\Delta H}{L}$  ).

Из этого выражения следует, что коэффициент фильтрации  $k$ , характеризующий водопроницаемость, равен скорости фильтрации при градиенте напора  $I=1$  и имеет размерность скорости, чаще всего метров в сутки. Величина коэффициента фильтрации зависит от геометрических параметров порового пространства и возрастает с увеличением размеров пор.

*Морозостойкость* – способность горных пород сопротивляться воздействию отрицательных температур. Количественно она оценивается изменением прочности горных пород после определенного числа циклов замораживания и оттаивания. Обычно выполняется 25 циклов; при специальных исследованиях количество доводится до 50-10 и более, после чего образцы испытывают на одноосное сжатие. Отношение прочности при одноосном сжатии образцов, подвергаемых замораживанию, к прочности сухих называют коэффициентом морозостойкости  $K_m$ .

Прочность горных пород при воздействии на них низких температур уменьшается под влиянием двух причин: первая обусловлена внутренними напряжениями, возникающими за счёт разности коэффициентов объемного расширения слагающих минералов; вторая – разрушающим воздействием замерзающей воды, находящейся в порах горных пород.

Высокой морозостойкостью характеризуются плотные породы с жесткими связями, сложенные мелкими зернами; более низкой – крупнозернистые породы с открытой пористостью со степенью влажности

$G > 0,8$ . При всех прочих равных условиях морозостойкость горных пород резко снижается с возрастанием скорости изменения температуры.

### ***17. Физико-химические свойства, определяющие поведение горных пород в массиве***

Главные из них, определяющие поведение горных пород в массивах, следующие: растворимость, пластичность, консистенция, набухаемость и водопрочность.

Растворимостью горных пород называется их способность растворяться под действием подземных или поверхностных вод. В процессе растворения молекулы воды разрушают решетку минералов, ионы из решетки переходят в воду с образованием водных растворов, в результате чего в породе образуются пустоты различного размера. В конечном итоге растворение части минералов приводит к уменьшению прочности породы и увеличению водопроницаемости.

Растворимость пород определяется химическим составом и структурными особенностями минералов (формой, размером зерен и типом связей между ними), растворяющей способностью воды, определяемой ее химическим составом, а также термодинамическими условиями – температурой и давлением.

Горные породы всех типов обладают растворимостью, однако практическое значение на геомеханические процессы в массивах имеет только растворимость пород, содержащих галоидные (галит, сильвин, карнолит), сульфатные (гипс, ангидрит) и карбонатные (кальцит, доломит) минералы. Растворимость таких пород возрастает с увеличением температуры, давления и с уменьшением размеров слагающих их минеральных частиц. Растворимость карбонатных пород резко увеличивается при наличии в подземных водах углекислого газа.

*Пластичность* – это способность породы под воздействием внешних усилий изменять форму без нарушения или разрыва и сохранять ее после устранения действия внешней силы. Такое свойство наблюдается в породах, содержащих определенное количество глинистых частиц при различных пределах влажности. Эти пределы называются пределами пластичности. Верхний предел пластичности  $W_L$  представляет собой влажность, при которой порода теряет свои пластические свойства и переходит в текучее состояние (граница текучести). Нижний предел пластичности  $W_P$  характеризует минимальную влажность, при которой порода может деформироваться без нарушения сплошности (граница раскатывания). Разность между пределами влажности на границах текучести и раскатывания называется числом (показателем) пластичности, определяемым по формуле

$$I_p = W_L - W_P.$$

*Число пластичности* – важный классификационный показатель, с увеличением числа пластичности горные породы хуже уплотняются в основании сооружений и в отвалах, при уменьшении они уплотняются легче, но подвержены разжижению и становятся грязеобразными, например, на автомобильных дорогах в карьере.

*Консистенция* глинистых пород определяется степенью подвижности их частиц под влиянием внешнего механического воздействия или собственной силы тяжести. Приняты три основные формы консистенции: твердая, пластичная и текучая, а также ряд промежуточных.

Для оценки консистенции связных пород принят показатель консистенции  $I_L$  определяемый по формуле

$$I_L = \frac{(W - W_P)}{I_p}$$

При  $I_L < 0$  породы относятся к твёрдым, при  $0 < I_L < 1$  – к пластичным, а при  $I_L > 1$  – к текучим.

*Набухаемость* – свойство глинистых горных пород увеличивать объем при насыщении их водой. Оно связано с присутствием гидрофильных минералов, имеющих большую удельную поверхность, и обусловлено образованием в горной породе слабосвязанной воды.

Способность горных пород к набуханию характеризуется следующими показателями:

- деформацией набухания  $E_n$ , определяемой по изменению высоты образца без возможности его бокового расширения:

$$E_n = \frac{(h_n - h_o)}{h_o},$$

где  $h_o$ ,  $h_n$  – высота образца соответственно до набухания и после, мм;

- влажностью набухания  $W_n$ , при которой прекращается процесс поглощения воды:

$$W_n = \frac{(q_n - q_c)}{q_c},$$

где  $q_c$ ,  $q_n$  – масса соответственно сухого образца и после набухания, г;

- давлением набухания  $P_n$ , МПа, которое развивается при невозможности объёмных деформаций в процессе набухания породы.

*Набухаемость* – важное свойство, которое необходимо учитывать при анализе устойчивости откосов в карьерах, сложенных мягкими связными горными породами.

*Водопрочность* – способность горных пород сохранять механическую прочность и устойчивость при взаимодействии с водой. Водопрочность характеризуется размокаемостью, размягчаемостью и размываемостью.

*Размокаемость* – способность горных пород терять связность и превращаться в рыхлую массу при взаимодействии со спокойной водой. Этой способностью обладают мягкие связные, а также слабосцементированные



(полускальные) осадочные горные породы с растворимым или глинистым цементом. Количественно размокаемость оценивается временем размокания, и течение которого образец горной породы, помещенный в воду, теряет связность и распадается на структурные элементы. Время размокания значительно уменьшается, если образцы находятся под давлением.

*Размягчаемость* – способность скальных горных пород снижать прочность при насыщении водой. Она характеризуется коэффициентом размягчаемости  $K_p$ , представляющим собой отношение временного сопротивления породы одноосному сжатию в водонасыщенном  $\delta_{сж.в.}$  и воздушно-сухом состоянии  $\delta_{сж.с.}$ , т. е.

$$K_p = \frac{\delta_{сж.в.}}{\delta_{сж.с.}},$$

По этому признаку скальные горные породы подразделяются на размягчаемые ( $K_p < 0,75$ ) и неразмягчаемые ( $K_p \geq 0,75$ ).

*Размываемость* – способность горных пород отдавать агрегаты или элементарные минеральные частицы движущейся по их поверхности воде. Для характеристики этого свойства используются два показателя: размывающая (критическая) скорость водного потока  $v_p$  и интенсивность размыва (отношение средней толщины размывого слоя при данной скорости размыва к длительности размыва  $T_p$ ).

Наиболее интенсивно размываются размокаемые связные и раздельнозернистые мелко- и тонкозернистые горные породы.

### ***18. Физико-механические деформационные свойства, определяющие поведение горных пород в массиве***

Физико-механические свойства горных пород это способность их сопротивляться внешним механическим воздействиям (нагрузкам). Внешние нагрузки могут быть статическими, не меняющимися или медленно ме-

няющимися во времени (например, масса толщи пород, отвалов), и динамическими, меняющимися во времени с различными скоростями, например, колебания земной коры при взрывах на карьерах или сотрясение пород при движении горно-транспортного оборудования и т. п.

Физико-механические свойства характеризуются показателями, которые необходимы для расчетов прочности и деформируемости горных пород, слагающих массивы. Величины этих показателей зависят, с одной стороны, от свойств самих горных пород, с другой – от характера внешней нагрузки (ее величины, скорости приложения, продолжительности действий и др.).

В общем случае реакция горных пород на действие возрастающей нагрузки возникает в виде трех процессов: упругого деформирования, пластического деформирования и разрушения. Первые два характеризуют деформационные свойства горных пород, т. е. свойства, объясняющие их поведение под нагрузками, не приводящими к разрушению, а лишь изменяющими форму и объем образцов горных пород; третий характеризует прочностные свойства, определяющие способность горных пород сопротивляться разрушению под воздействием внешних усилий.

*Деформационные свойства* определяются при статическом нагружении и характеризуют зависимость между деформациями и напряжениями.

Деформации пород с жесткими связями сходны с деформациями твердых тел и подчиняются закону Гука

$$\sigma = E * e,$$

где  $\sigma$  – напряжение, МПа;

$E$  – модуль упругости или модуль Юнга, МПа;

$e$  – относительная деформация тела.

Модуль упругости равен напряжению в МПа, вызвавшему относительную деформацию, равную единице. Этот показатель является основной характеристикой деформационных свойств тел, у которых де-

формации носят упругий характер, т. е. исчезают после снятия вызвавшей их нагрузки.

В горных породах строго упругих деформаций практически не наблюдается, для них кроме упругих характерны остаточные или пластические деформации.

Рассмотрим поведение образца скальной горной породы высотой  $l_1$  и шириной  $d_1$  при одноосном сжатии  $\sigma$ . В результате сжатия образца высота его уменьшилась до величины  $l_2$ , а поперечные размеры увеличились до  $d_2$ . Разность  $l_1 - l_2 = \Delta l$  называют абсолютной продольной деформацией, а разность  $d_1 - d_2 = \Delta d$  – абсолютной поперечной деформацией. Отношения  $\Delta l/l_1 = e$  и  $\Delta d/d_1 = e'$  называют соответственно относительными продольной и поперечной деформациями, а отношение между ними – коэффициентом

Пуассона  $\mu = \frac{e'}{e}$ . Последний представляет собой коэффициент пропорциональности между поперечными и продольными "относительными деформациями. Чем больше значение  $\mu$ , тем больше может деформироваться порода.

При снятии нагрузки образец способен частично или полностью восстановить свою первоначальную форму и размеры. Часть исчезнувших деформаций называются упругими, а сохранившиеся – остаточными.

Модуль деформации, рассчитанный с учетом остаточных деформаций, называют модулем общей деформации  $E_o$ . Он аналогичен модулю Юнга, с той лишь разницей, что характеризует общие деформации породы – упругие и остаточные.

Деформационные свойства мягких связных и раздельнозернистых горных пород определяют при сжатии образца, помещенного в жесткое кольцо, не позволяющее породе расширяться в поперечном направлении.

Сжатие породы без бокового расширения называется компрессией. Испытание на компрессию производят в лабораторных условиях на ком-

прессионных приборах или одометрах (рис. 18.1, а). Образец породы помещают в металлическую обойму между двумя пористыми прокладками. При нагружении образца с помощью поршня он уплотняется за счет уменьшения пористости и отжатия воды через пористые прокладки за пределы прибора. В этом случае каждой ступени нагрузки будут соответствовать определенные пористость и влажность.

Зависимость пористости от давления можно изобразить графически. На оси абсцисс отложим значения  $\sigma$ , а по оси ординат – соответствующие им значения коэффициента пористости. Через точки с указанными координатами проводится кривая, которая называется компрессионной или кривой уплотнения (рис. 18.1, б).

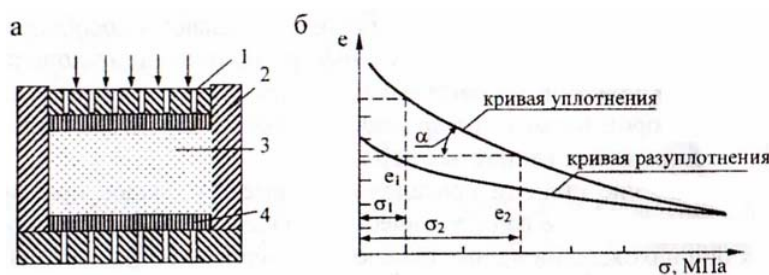


Рис. 18.1. Компрессионные испытания мягких связных горных пород:

а – схема прибора; б – компрессионные кривые;

1 – поршень; 2 – цилиндр с жесткими стенками; 3 – образец породы;

4 – водопроницаемые прокладки

Если первоначально нагруженную породу постепенно разгружать, то её объём, а, следовательно, и пористость будут увеличиваться. Это явление *декомпрессии*, а кривая, соответствующая ей, называется декомпрессионной кривой или кривой разуплотнения.

Сжимаемость пород характеризуется наклоном кривой в некотором выбранном диапазоне нагрузок (на этом участке декомпрессионная кривая аппроксимируется прямой линией). Тангенс угла  $\alpha$  называется коэффици-

ентом компрессии или коэффициентом уплотнения  $a$  и определяется по формуле

$$\alpha = \frac{(e_1 - e_2)}{(\sigma_2 - \sigma_1)},$$

где  $e_1$  и  $e_2$  – коэффициенты соответственно пористости при давлениях  $\sigma_1$  и  $\sigma_2$ .

Большое значение процесс уплотнения пород имеет при оценке устойчивости отвалов глинистых вскрышных пород и отвалов скальных пород на глинистых основаниях.

Процесс уплотнения глинистых пород при постоянной нагрузке во времени носит название консолидации. Различают два типа консолидации: первый обусловлен водопроницаемостью пород и называется фильтрационной консолидацией; второй характеризуется тем, что сжатие пород происходит за счёт отжатия не только воды, но и сжатия минерального скелета самой горной породы. Как правило, первый тип консолидации со временем переходит во второй.

Некоторые мягкие связные породы обладают способностью давать значительные и сравнительно быстро протекающие дополнительные осадки при той же нагрузке после замачивания их водой. Такое свойство пород называется просадочностью и характерно для лессовых и лессовидных глинистых пород.

Выявление степени просадочности имеет большое практическое значение при оценке геомеханических процессов в откосных сооружениях при нахождении на них тяжелого карьерного оборудования.

Сжимаемость песчаных (сыпучих) пород значительно меньше, чем глинистых, так как давление в них передается непосредственно от частицы к частице через площадки их контактов. Сжатие этих пород связано с временным перемещением отдельных зерен относительно друг друга с более

компактной их укладкой или, при больших нагрузках, за счет дробления зерен. Сжимаемость песчаных пород практически не оказывает влияния на геомеханические процессы в их откосах.

*Прочностные свойства* характеризуют поведение горной породы под нагрузками, равными или превышающими критические, и определяются при ее разрушении.

Твердые породы с жесткими связями между зернами (скальные) являются наиболее прочными. Их высокая прочность обуславливается в основном силами сцепления между отдельными зернами и агрегатами минералов.

Различают следующие виды прочности: на сжатие ( $\sigma_{сж}$ ), на растяжение ( $\sigma_p$ ), на сдвиг ( $\sigma_{сдв}$ ) и на изгиб ( $\sigma_{изг}$ ). Показатели прочности зависят от вида напряжения: наибольшую величину имеет прочность на сжатие, наименьшую – на растяжение.

Прочность на сжатие характеризуется пределом прочности при одноосном сжатии и представляет собой предельную нагрузку, отнесенную к единице площади поперечного сечения образца, при которой он разрушится. Предел прочности на сжатие определяется на образцах правильной формы в виде куба или цилиндра с высотой, равной диаметру. Верхнюю и нижнюю поверхности образца шлифуют. Образец помещают под пресс и фиксируют разрушающее усилие.

В практике оценки устойчивости откосов в массивах прочность горных пород характеризуют паспортом прочности, который строится в соответствии с теорией прочности Мора-Кулона. Согласно этой теории породы разрушаются тогда, когда касательное напряжение в плоскости разрушения достигнет определенной величины, зависящей только от величины нормального напряжения, действующего на той же плоскости. Величины касательного  $\tau$  и нормального  $\delta_n$  напряжений связаны известным уравнением Кулона

$$\tau = \sigma_n * \operatorname{tg} \rho + K,$$

где  $\operatorname{tg} \rho$  – коэффициент внутреннего трения

$K$  – сцепление, выражающее наибольшее касательное напряжение при нормальном напряжении  $\sigma_n = 0$ .

Уравнение Кулона представляет собой прямую линию, смещенную от начала координат на величину  $K$  и расположенную под углом  $\rho$  к горизонтальной оси.

Рассмотрим опыт разрушения образца горной породы при одноосном сжатии (рис. 18.2, а). Создадим на поверхности цилиндрического образца нагрузку  $\sigma_1$ , при которой он разрушится; замерим угол  $\alpha$  наклона поверхности разрушения к направлению действия напряжения  $\sigma_1$ . По данным опыта построим график с использованием кругов Мора. От начала координат проведем полукруг диаметром  $\sigma_1$ ; из точки Б проведем линию под углом  $\alpha$  до пересечения с кругом и получим точку М, координаты которой будут соответствовать нормальному  $\sigma_n$  и касательному  $\tau$  напряжениям на плоскости разрушения. Касательная, проведенная через точку М, характеризует предельные напряжения для данной породы. Отрезок, отсекаемый на вертикальной оси ОА равный  $K$ , численно равен сцеплению и соответствует максимальному касательному напряжению при нормальном напряжении  $\sigma_n = 0$ . Угол наклона касательной АМ к горизонтальной оси  $\rho$  соответствует углу внутреннего трения, а  $\operatorname{tg} \rho$  коэффициенту внутреннего трения, связывающему приращение нормальных и касательных напряжений по поверхности разрушения.

Значения  $K$  и  $\rho$  могут быть получены из геометрических зависимостей по диаграмме прочности (рис. 18.2, б). Значения  $\rho$  и  $K$  находим по формулам:

$$\rho = 90^\circ - 2\alpha,$$

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

Эти формулы являются расчетными для получения основных характеристик прочности горных пород в образцах при испытании их на одноосное сжатие.

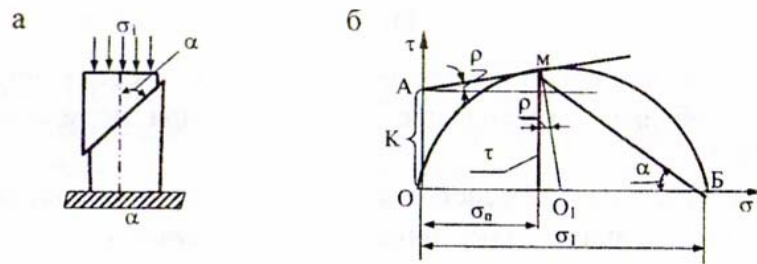


Рис. 18.2. Определение прочности горных пород с жесткими связями при испытании на одноосное сжатие:  
а – схема опыта; б – диаграмма прочности

Более точные значения  $K$  и  $\rho$  могут быть получены при срезе образцов горных пород по фиксированным плоскостям (рис. 18.3, а). Для испытания изготавливают три-четыре образца одной и той же породы в виде цилиндров (обычно используют керн буровых скважин) диаметром  $40 \div 70$  мм и высотой, равной диаметру. Образцы помещают в специальные обоймы и срезают под углом  $\alpha$  (угол между направлениями напряжения  $\sigma_1$  и нормального напряжения  $\sigma_n$  в плоскости среза).

При срезе образца измеряется площадь среза  $F_c$ , а по манометру пресса берется нагрузка  $P_c$ , при которой произошел срез. Нормальное  $\sigma_n$  и касательное  $\tau$  напряжения на плоскости среза вычисляются по формулам

$$\sigma_1 = \frac{P_c}{F_c},$$

$$\sigma_n = \sigma_1 * \cos \alpha,$$

$$\tau = \sigma_1 * \sin \alpha,$$



Произведем срез образцов при  $\alpha$ , равном  $30, 45$  и  $60^\circ$ , получим соответственно по три значения  $\sigma_1, \sigma_n$  и  $\tau$ . По найденным данным построим график зависимости между  $\sigma_n$  и  $\tau$  (рис. 18.3, б). Линия, построенная по координатам  $\sigma_n$  и  $\tau$ , характеризует предельные напряжения для данной породы, а график является паспортом ее прочности.

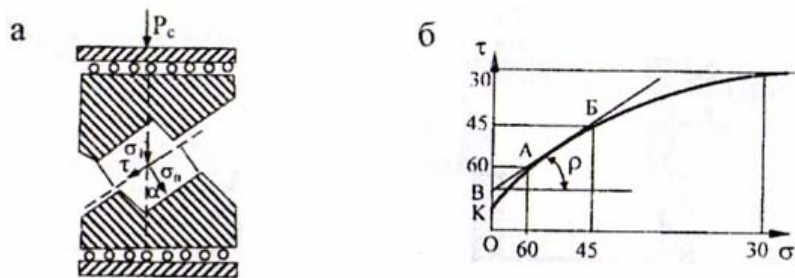


Рис. 18.3. Определение прочности горных пород с жесткими связями при испытании на срез по фиксированным плоскостям:  
а – схема опыта; б – паспорт прочности.

Для определения значений характеристик прочности проведем через точки А и Б, соответствующие углам среза  $\alpha = 60^\circ$  и  $45^\circ$ , прямую. На оси  $\tau$  она отсечет отрезок ОВ, равный значению  $K$ , а её угол с горизонтальной плоскостью составит угол  $\rho$ .

Прочностные характеристики для мягких связных и раздельнозернистых пород получают при испытании на сдвиг.

Сдвигом называется процесс смещения одной части породы относительно другой. Он выполняется на специальном срезном приборе (рис. 18.4, а). Испытания производятся в условиях предельного напряженного состояния, когда возникают незатухающие во времени скользящие (сдвиг) одной части образца по другой. Образцы предварительно уплотняют различной по величине нагрузкой  $\sigma$ . Если проделать испытания с несколькими образцами одной и той же породы при различных нормальных давлениях  $\sigma_1, \sigma_2$  и  $\sigma_3$ , то получим соответствующие им сдвигающие силы  $\tau_1, \tau_2$  и  $\tau_3$  отнесенные к единице поперечного сечения образца.

По данным опыта построим график зависимости  $\tau$  от  $\sigma$ , называемый диаграммой сдвига или паспортом прочности (рис. 18.4, б). Зависимость  $\tau$  от  $\sigma$  выражается практически прямой линией, отклонение от которой наблюдается лишь при малых и весьма больших значениях  $\sigma$ . Прямая линия отсекает на оси ординат отрезок  $K$ , характеризующий значение  $\tau$  при  $\sigma = 0$  и называющийся сцеплением. Угол  $\rho$  является углом внутреннего трения, а его тангенс – коэффициентом внутреннего трения.

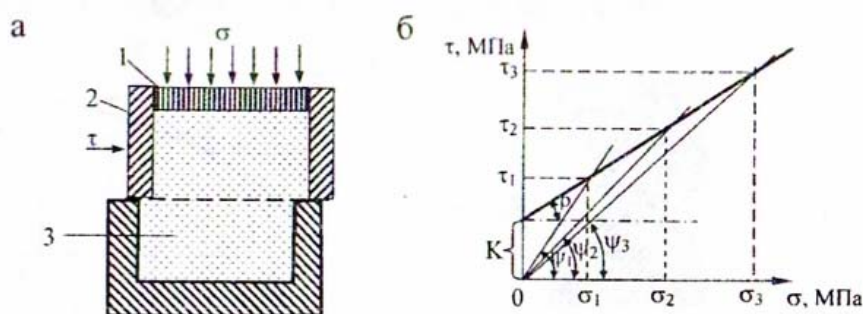


Рис. 18.4. Определение прочности дисперсных горных пород при испытании на сдвиг: а – схема опыта; б – паспорт прочности;  
1 – пористый поршень; 2 – цилиндры с жесткими стенками;  
3 – образец горной породы

Если каждую экспериментальную точку на диаграмме сдвига соединить с началом координат, то угол наклона между полученной прямой и осью абсцисс будет углом сдвига  $\psi$ , а тангенс этого угла – коэффициентом сдвига.

Сцепление  $K$ , коэффициенты внутреннего трения  $tg\rho$  и сдвига  $tg\psi$  характеризуют общее сопротивление сдвигу глинистой породы при данном физическом состоянии.

Сопротивление сдвигу для песчаных пород – их основная прочностная характеристика. Диаграмма сдвига этих пород характеризуется

прямой, проходящей через начало координат (т. е. сцепление  $K=0$ ), а ее уравнение будет иметь вид  $\tau = \sigma * \text{tg} \rho$ .

### 19. Реологические свойства, определяющие поведение горных пород в массиве

Реологические свойства – способность горных пород деформироваться под постоянной нагрузкой во времени или при разной скорости приложения сил.

Различают следующие реологические свойства пород: ползучесть (крип) и длительную прочность.

Ползучестью называют явление нарастания деформаций горных пород во времени при постоянном напряжении. Закономерности ползучести изучаются путём экспериментального определения зависимости деформации сдвига при данном касательном напряжении во времени, либо зависимости скорости сдвига от напряжения.

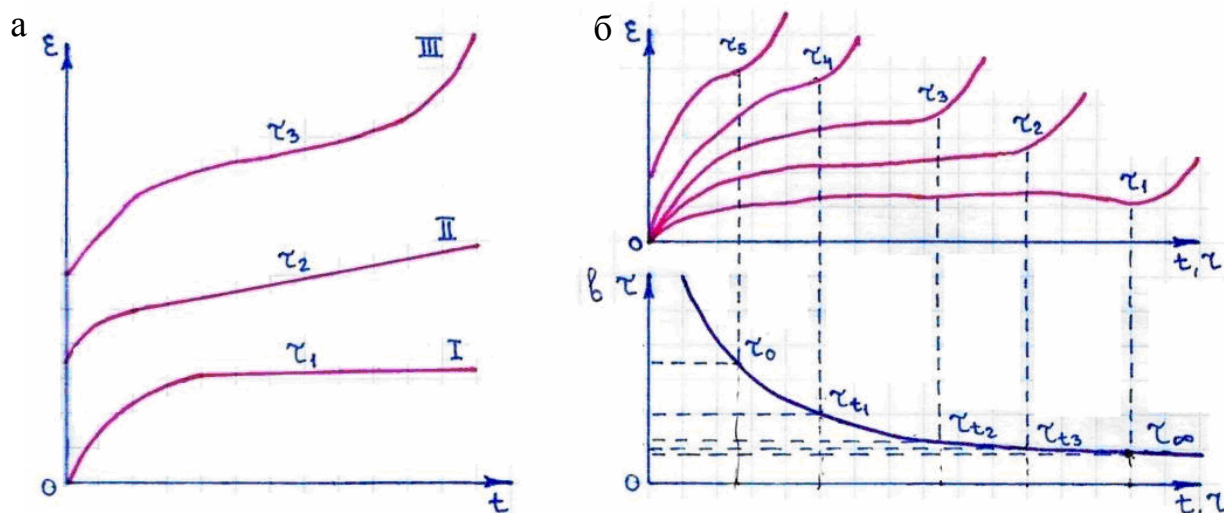


Рис. 19.1. Кривые ползучести и длительной прочности горных пород

- |                                 |                               |
|---------------------------------|-------------------------------|
| а – фазы ползучести:            | I – первичная или затухающая  |
| б – кривые ползучести           | II – вторичная или постоянная |
| в – кривая длительной прочности | III – третичная или растущая  |

На рис. 19.1, *a* показаны кривые нарастания деформаций сдвига при трёх значениях  $\tau$ , которые характеризуют фазы ползучести. При  $\tau_1$  развиваются медленные деформации, имеющие затухающий характер (первичная фаза ползучести). Напряжение  $\tau_2$  вызывает вторичную фазу ползучести, не затухающую во времени и имеющую постоянную скорость. При  $\tau_3$  имеют место не затухающие во времени и растущие по величине деформации, которые приводят к разрушению породы.

При оценке массивов, когда их устойчивость сохраняется длительное время, напряжения не должны превышать величин  $\tau_2$ , определяющих вторичную фазу ползучести для данных горных пород.

Ползучесть различных пород проявляется при разных значениях касательного напряжения. Так, если пластичные глинистые грунты проявляют свойства ползучести при значениях  $\tau$ , измеряемых сотыми и десятными долями МПа, то для проявления ползучести скальных горных пород необходимы напряжения в десятки МПа.

С ползучестью ГП связана их длительная прочность  $\tau_\infty$  – максимальная величина касательного напряжения, при которой скорость деформации стремится к нулю, а её величина (при  $t \rightarrow \infty$ ) – к конечному значению. Если действующее в массиве касательное напряжение меньше  $\tau_\infty$ , то ползучесть затухнет без разрушения, в противном случае она приведёт к разрушению массива тем быстрее, чем больше действующее напряжение  $\tau$ .

Длительная прочность ГП определяется по графику (рис. 19.1, *в*), который строится на основании кривых ползучести (рис. 19.1, *б*). Для этого на каждой кривой ползучести при определённом значении  $\tau$  выделяется точка, соответствующая моменту разрушения. Для каждой точки находится величина  $t$  и переносится на график длительной прочности, где по координатам  $t$  и  $\tau$  наносятся точки разрушения. На этом графике:  $\tau_0$  – мгновенная (стандартная),  $\tau_{t1}$ ,  $\tau_{t2}$  и  $\tau_{t3}$  – длительная;  $\tau_\infty$  – предельная длительная прочность.

Предельная длительная прочность ниже стандартной для глинистых пород на 30÷60 %, а для мёрзлых горных пород – в пять раз и более.

Снижение прочности горных пород во времени должно учитываться при оценке устойчивости постоянных откосов.