

Нормативные документы в сфере деятельности
Федеральной службы по экологическому,
технологическому и атомному надзору

**МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ
ПО ОПРЕДЕЛЕНИЮ ПАРАМЕТРОВ БОРТОВ
И УСТУПОВ КАРЬЕРОВ,
РАЗРЕЗОВ И ОТКОСОВ ОТВАЛОВ**



2022

Методические указания по определению параметров бортов и уступов карьеров, разрезов и откосов отвалов. – М.: ИПКОН РАН, 2022. – 80 с.

Настоящие методические указания разработаны в соответствии с действующими нормативными документами, содержат предложения и рекомендации к определению параметров бортов и уступов карьеров, разрезов и откосов отвалов.

В методических указаниях приведены пояснения к Федеральным нормам и правилам в области промышленной безопасности «Правила обеспечения устойчивости бортов и уступов карьеров, разрезов и откосов отвалов», утвержденным приказом Ростехнадзора N 439 от 13.11.2020, а также приведены рекомендации по их применению.

Подготовлено под научно-методическим руководством Института проблем комплексного освоения недр им. академика Н.В. Мельникова Российской академии наук. Рекомендовано Ростехнадзором (письмо №07-00-04/245 от 03.03.2022).

В разработке методических указаний участвовали: Рыльникова М.В. (руководитель проекта, ИПКОН РАН), Алексеев А.Б., Есина Е.Н., Зотеев О.В., Ливинский И.С., Макаров А.Б., Павлович А.А., Перепелицын А.И., Спирин В.И., Трубецкой Н.К., Харитонов А.А., Яницкий Е.Б.

ISBN 978-5-6041085-8-1

Оглавление

Введение	5
1 Общие положения, термины и определения	6
1.1 Термины и определения	6
1.2 Принятые обозначения	9
1.3 Общие положения	11
2 Принципы выбора месторождения-аналога	12
3 Физико-механические свойства массива горных пород	14
3.1 Анализ, обобщение результатов испытаний горных пород и поверхностей ослабления	14
3.2 Критерии разрушения горных пород	15
3.3 Определение физико-механических свойств массива горных пород	18
4 Обоснование величины коэффициента запаса устойчивости и вероятности обрушения бортов и уступов карьеров и откосов отвалов	25
5 Районирование прибортовых массивов	29
6 Методы расчета устойчивости бортов и уступов карьеров и отвалов	32
6.1 Общие требования к выполнению расчетов	32
6.2 Метод предельного равновесия	34
6.3 Методы численного моделирования	53
6.4 Методы физического моделирования	55
6.5 Вероятностный метод	57
7 Особенности оценки устойчивости бортов карьеров, откосов уступов и отвалов	62
7.1 Оценка устойчивости откосов с учетом их криволинейности в плане	62
7.2 Оценка устойчивости откосов, с учетом воздействия статических сил от технологического оборудования и объектов инфраструктуры	64
7.3 Оценка устойчивости обводненных откосов	68
7.4 Оценка устойчивости откосов при сейсмических воздействиях землетрясений ...	69
7.5 Оценка устойчивости бортов карьеров при комбинированной разработке месторождений	70
7.6 Обоснование минимальной ширины предохранительных берм	72
7.7 Оценка устойчивости откосов отвалов	74
Список использованных источников	76
Приложение А – Справочные физико-механические свойства горных пород и поверхностей ослабления	77
Приложение Б – Физико-механические свойства ЭМ и пример физического моделирования	80

Введение

Настоящие Методические указания по определению параметров бортов и уступов карьеров, разрезов и откосов отвалов (далее Указания) разработаны в соответствии с действующими нормативными документами, содержат предложения и рекомендации к определению параметров бортов и уступов карьеров, разрезов и откосов отвалов.

Целью выполнения расчетов устойчивости бортов и уступов карьеров, разрезов и отвалов является обоснование надежных параметров откосов, обеспечивающих устойчивость на протяжении всего срока их службы для конкретных инженерно-геологических и гидрогеологических условий месторождения.

В Указаниях приводятся пояснения к федеральным нормам и правилам в области промышленной безопасности «Правила обеспечения устойчивости бортов и уступов карьеров, разрезов и откосов отвалов» (далее ФНП) и рекомендации по их применению.

1 Общие положения, термины и определения

1.1 Термины и определения

Борт карьера, разреза — боковая ограничивающая поверхность карьера, разреза, образованная совокупностью откосов уступов и берм.

Бровка уступа — линия пересечения откоса с верхней и нижней бермами. Соответственно различают верхнюю и нижнюю бровки уступа.

Вероятность обрушения (деформации) — качественная или количественная оценка возможности обрушения (деформации) или показатель частоты его проявления.

Геомеханическая информационная модель — представляет собой двух или трехмерную, бумажную или цифровую модель пространственно-атрибутивных данных, которые в комплексе характеризуют особенности геологического и структурно-тектонического строения месторождения, в том числе вмещающих пород, гидрогеологические условия и физико-механические свойства массива горных пород. Состав и наполнение геомеханической информационной модели определяется специализированной организацией в зависимости от решаемых задач.

Геомеханическая расчетная модель — это физическая или математическая модель участка недр, описывающая наиболее существенные связи параметров и процессы нагружения и деформирования массива горных пород в соответствии с геомеханической информационной моделью.

Гидростатическое давление — давление в жидкости, которое определяется суммой давления столба жидкости над точкой и внешнего давления, оказываемого на жидкость (за исключением атмосферного давления).

Домены (участки) — области, в пределах которых массив горных пород по комплексу каких-либо свойств или показателей, определяемых целями районирования, могут быть признаны однородными.

Заоткоска уступа — цикл технологических операций по постановке уступов в конечное положение для придания откосу уступа карьера, разреза заданного угла, обеспечивающего его длительную устойчивость.

Карьер (разрез) — совокупность горных выработок, образованных при добыче полезных ископаемых открытым способом.

Кинематический анализ — анализ расположения поверхностей ослабления в пространстве относительно откоса с целью определения наиболее вероятных схем его деформирования.

Комбинированная разработка месторождений — разработка месторождения полезных ископаемых с одновременным или последовательным ведением открытых и подземных горных работ.

Контур карьера, разреза — поверхность, образованная откосами уступов и берм.

Коэффициент запаса устойчивости — отношение сумм удерживающих и сдвигающих сил, действующих в откосе.

Коэффициент структурного ослабления — соотношение прочности горных пород в массиве и в образце.

Критерии безопасности — значения количественных и качественных показателей состояния сооружения (объекта) и условий его эксплуатации, соответствующие работоспособному и предаварийному состоянию сооружения (объекта).

Критическая деформация — деформация массива горных пород, приводящая к аварийному состоянию сооружения (объекта).

Месторождение-аналог — месторождение, которое используется для прогноза горнотехнических условий неизученного месторождения.

Напор гидростатический — давление столба жидкости над условным уровнем.

Нарушение устойчивости борта (уступа, группы уступов) — разрушение прибортового массива горных пород, захватившее борт (уступ и/или их группу) и проявляющееся в одном из видов деформаций.

Обрушение — отрыв и скоротечное смещение горных пород (блоков, пачек пород), слагающих откос, сопровождающегося дроблением смещающейся части массива.

Оплывание — перемещение поверхностных слоев дисперсных пород, находящихся в текучем состоянии в результате увлажнения и насыщения водой, или при оттаивании мерзлых, со склонов и откосов

Оползень — относительно медленное деформирование (смещение) прибортового массива карьера или откосов отвала под действием силы тяжести и/или дополнительных внешних факторов.

Осыпь — разрушение и смещение приповерхностной части откосов.

Отвал — искусственная насыпь из покрывающих и вмещающих пород, некондиционного и техногенного сырья.

Откос уступа — наклонная поверхность уступа.

Поверхность ослабления — естественная геологическая поверхность в массиве горных пород, характеризующаяся пониженными механическими свойствами.

Поверхность скольжения — поверхность в массиве борта и уступов карьера разреза и отвала, являющаяся геометрическим местом точек максимальных относительных сдвигов горных пород.

Предохранительная берма — площадка, разделяющая смежные по высоте уступы на бортах карьеров, разрезов и служит для улавливания падающих кусков породы с верхних уступов на нижние.

Призма возможного обрушения — часть массива горных пород или отвальных масс, заключенная между откосом борта карьера, разреза или отвала и наиболее напряженной поверхностью скольжения.

Приконтурная зона — область массива, определяющая устойчивость борта карьера, разреза. Размер и положение границы приконтурной зоны определяется для каждого месторождения (участка недр) при разработке программы инженерно-геологического изучения массива.

Просадки — вертикальное смещение массива горных пород в результате сжатия, уплотнения или иных видоизменений горных пород, слагающих борт или уступ карьера, разреза и отвала или их основание.

Разрез — см. карьер

Районирование — это определение и геометризация тех или иных доменов в пределах месторождения.

Режим управляемых деформаций — технология отработки уступов или формирования отвалов, допускающая деформации заданных размеров.

Специализированная организация — юридическое лицо, имеющее опыт и квалифицированных специалистов в области решения поставленной задачи горного дела.

Талик — участок незамерзающей породы среди многолетней мерзлоты, распространяющийся ниже земной поверхности или от слоя сезонного промерзания.

Трехмерная цифровая модель — триангулированное облако точек рассматриваемого объекта.

Углы сдвижения — внешние относительно выработанного пространства углы наклона линий сдвижения, соединяющих нижнюю границу выработанного пространства с границей зоны опасного влияния горных работ на земной поверхности.

Управление устойчивостью уступов и бортов карьеров, разрезов и отвалов — комплекс мероприятий, направленных на достижение такого состояния пород, при котором обеспечивается безопасное ведение горных работ.

Уровень подземных вод — верхняя граница массива, насыщенного подземными водами, на которой полное гидростатическое давление равно атмосферному.

Устойчивость горной выработки — способность выработки в течение заданного срока эксплуатации сохранять размеры и форму.

Фильтрационная деформация — деформация массива горных пород, вызываемая воздействием подземных и поверхностных вод. Разделяют на оплывание, выпор, механическую суффозию и фильтрационный вынос вдоль трещин.

Эквивалентные свойства — механические свойства массива горных пород в направлениях поверхностей ослабления с учетом их прерывистости, определенные путем вычисления средневзвешенных свойств между поверхностями ослабления и массивом горных пород.

Эксплуатирующая организация — юридическое лицо, созданное в соответствии с законодательством Российской Федерации, либо его представитель, на правах собственника или по поручению собственника осуществляет строительство и техническую эксплуатацию горного объекта и несет ответственность за обеспечение безопасности работ.

1.2 Принятые обозначения

H – высота откоса, м;

h – высота уступа, м;

$H_{уч}$ – высота участка борта (группы уступов), м;

$H_{г}$ – высота борта, м;

α – угол откоса, град.;

$\alpha_{уч}$ – угол наклона участка борта (группы уступов), град.;

$\alpha_{к.уч}$ – угол наклона конструктивного участка борта, град.;

$\alpha_{г}$ – угол наклона борта, град.;

$B_{пр}$ – ширина предохранительной бермы, м;

$B_{тр}$ – ширина транспортной бермы, м;

P – вес блока, МН;

l – средний размер элементарного структурного блока массива, ограниченного трещинами, м;

μ_i – угол наклона основания блока, град.;

P_i^g – вес «свободной» (находящейся выше линии откоса) воды в пределах блока, МН;

D_i – сила гидростатического давления, действующая на грань рассматриваемого расчетного блока, МН;

$H_{i,i+1}, H_{i,i-1}$ – гидростатическое давление на гранях блоков в метрах водяного столба;

l_i – длина основания блока, м;

γ – удельный вес породы, МН/м³;

γ_w – удельный вес воды, МН/м³;
 ΔP – удельная нагрузка от оборудования, МПа;
 $P_{об}$ – общий вес оборудования/сооружения, МН;
 a – среднее расстояние между опорами, м;
 b – расстояние от края оборудования/сооружения до верхней бровки, м;
 Q_i – сейсмическая сила, МН;
 ζ_i – угол между поверхностью скольжения и направлением сейсмической силы, измеренный в вертикальной плоскости, град.;
 K_0 – коэффициент, учитывающий назначение сооружения и его ответственность;
 K_I – коэффициент, учитывающий допускаемые повреждения зданий и сооружений;
 k_c – коэффициент сейсмичности, который представляет собой значения ускорения колебаний в долях g ;
 I – интенсивность землетрясения, баллы;
 A – дополнительные удерживающие силы, МН;
 B – дополнительные сдвигающие силы, МН.
 ν – коэффициент вариации;
 $X_{ср}$ – среднее значение;
 τ – сдвигающее напряжение, МПа;
 σ – нормальное напряжение, МПа;
 $\varphi, \varphi_m, \varphi_\varepsilon, \varphi'$ – угол внутреннего трения образца горных пород, угол внутреннего трения массива, эквивалентный угол внутреннего трения, угол трения по поверхности ослабления, град.;
 $C, C_m, C_\varepsilon, C'$ – сцепление в образце горных пород, сцепление в массиве горных пород, эквивалентное сцепление, сцепление по поверхности ослабления, МПа;
 E_0 – модуль деформации в массиве, МПа;
 GSI (geological strength index) – геологический индекс прочности;
 D (disturbance factor) – фактор нарушенности;
 $k_{раз}$ – коэффициент размягчаемости;
 n – коэффициент запаса устойчивости;
 λ – коэффициент структурного ослабления;
 λ_I – понижающий коэффициент в зависимости от условий взрывания;
 H_{90} – высота вертикальной трещины отрыва, м;
 ε – угол между направлением наибольшего главного напряжения и площадкой скольжения ($45-\varphi/2$), град.;
 BO – вероятность обрушения.

1.3 Общие положения

1.3.1 В настоящих Указаниях приведены методы и способы оценки устойчивости бортов и уступов карьеров, разрезов (далее карьеров) и откосов отвалов на всех этапах освоения месторождений.

1.3.2 Приведенные в Указаниях методики и способы расчета носят рекомендательный характер. Состав и виды работ, выполняемых по геомеханическому обоснованию параметров бортов и уступов карьеров и отвалов в соответствии с требованиями федеральных норм и правил в области промышленной безопасности «Правила обеспечения устойчивости бортов и уступов карьеров и откосов отвалов» (далее ФНП), согласовываются недропользователем.

1.3.3 Структура и этапы работ по обеспечению устойчивости бортов и уступов карьеров представлены на рисунке ниже (Рисунок 1.1). В настоящих Указаниях рассматриваются вопросы анализа устойчивости откосов.

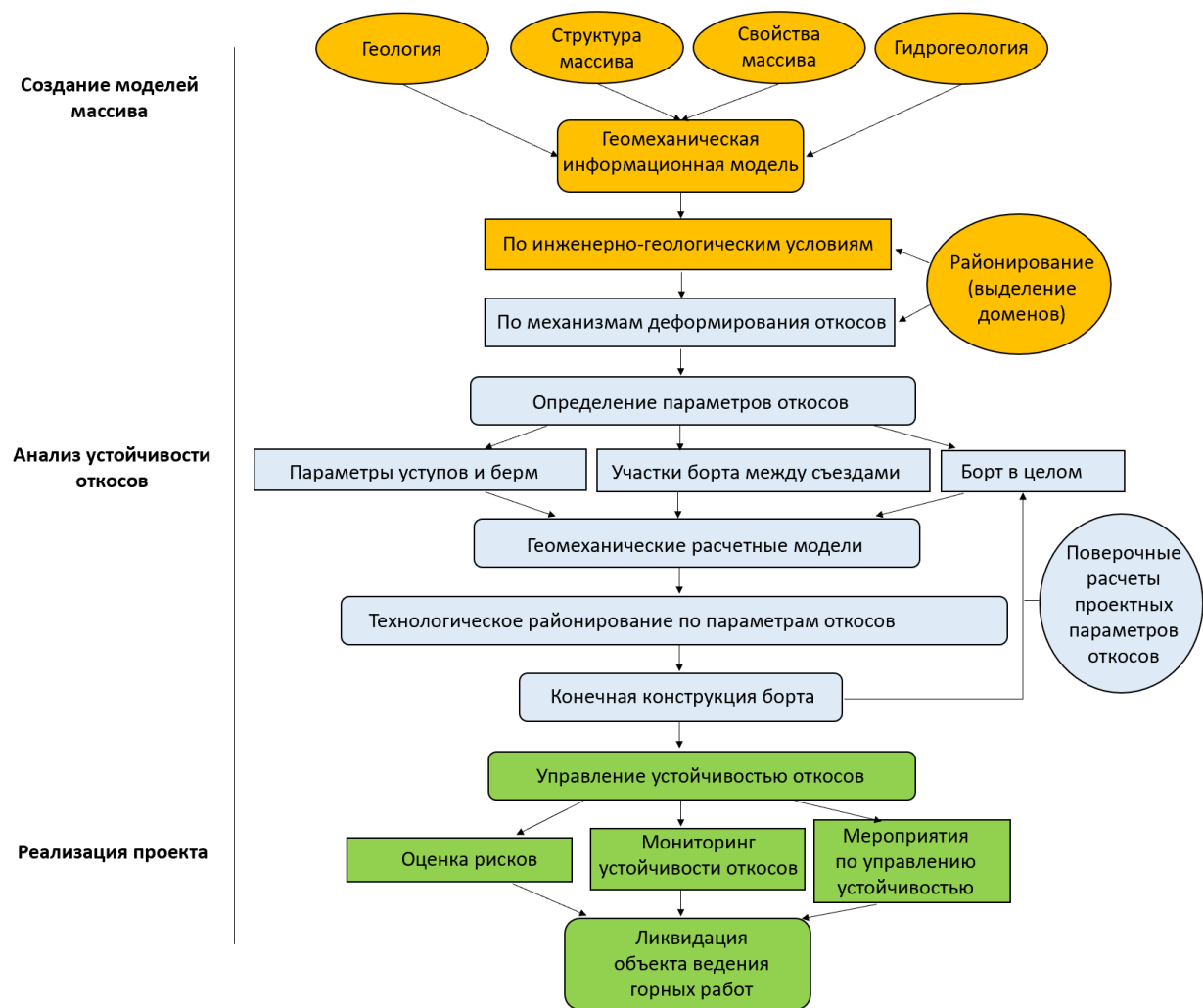


Рисунок 1.1 – Структура геомеханического обеспечения устойчивости бортов и уступов

2 Принципы выбора месторождения-аналога

2.1 На ранних стадиях освоения месторождений или новых участков (горизонтов) разрабатываемых месторождений при отсутствии достоверных данных о массиве горных пород допускается определять параметры бортов и уступов карьеров и откосов отвалов методом аналогий.

2.2 Методом аналогий могут быть определены физико-механические свойства массива горных пород, пород основания отвалов, отвальной массы или параметры бортов и уступов карьеров и откосов отвалов.

2.3 Основные требования к аналогии:

а) аналогия может проводиться как по одному, так и по ряду признаков. Чем больше признаков, тем достовернее аналогия;

б) аналогия должна выполняться по существу, а не по формальному признаку;

в) необходимо разделять признаки по значимости (по весу). Различия в наиболее значимых признаках, но сходимость в признаках с малым весом может указывать на некорректность аналогии;

г) признаки должны быть наиболее разнообразными и разносторонними;

д) сопоставляться должны одни и те же признаки;

е) при переносе того или иного параметра с изученного месторождения на изучаемое следует оценивать общую его связь с рядом основных признаков.

2.4 Для аналогии могут использоваться следующие признаки:

а) региональное положение: древняя или молодая платформа, активные складчатые пояса или пассивные окраины;

б) условия образования месторождения: эндогенные, экзогенные и метаморфогенные;

в) тип полезного ископаемого: рудные (руды чёрных, цветных и благородных металлов), нерудные (месторождения алмазов, строительные материалы и камни и др.), горючие (уголь, торф, сланцы и др.) полезные ископаемые, горно-химическое сырьё (апатит, фосфаты и др.);

г) описание пород: тип и прочность горных пород, включения и примеси, контрастность (разнородность/разнообразие) видов горных пород в прибортовом массиве;

д) строение месторождения: наличие структурных этажей, форма (моноклиальная, складчатая, блочная) и залегание (пологое, наклонное, крутое) толщи горных пород;

е) интенсивность проявления процессов разуплотнения и выветривания горных пород;

ж) гидрогеологические условия: условия формирования подземных вод, число и мощность водоносных горизонтов, граничные условия;

з) климатические условия: арктический, субарктический, резко континентальный и прочие;

и) распространение многолетнемерзлых пород (островное, прерывистое, сплошное), температура толщи, наличие таликов.

При выборе аналогии могут быть использованы с различной детальностью иные признаки, не приведенные выше.

3 Физико-механические свойства массива горных пород

3.1 Анализ, обобщение результатов испытаний горных пород и поверхностей ослабления

3.1.1 Анализ, обобщение физико-механических свойств горных пород и поверхностей ослабления осуществляются по мере освоения месторождения.

Анализу и обобщению подлежат все данные и исследования, полученные в результате лабораторных и полевых испытаний, выполненных на месторождении.

При определении физико-механических свойств горных пород следует руководствоваться действующими на момент выполнения лабораторных или натурных испытаний нормативными документами Российской Федерации, при их отсутствии – международными стандартами.

При необходимости уточнения оценки устойчивости откосов допускается использовать специальные геомеханические расчетные модели (пластическая, реологическая и т.д.) для применения которых требуется проведение специальных видов испытаний в соответствии с разработанной программой работ.

3.1.2 Наибольшее внимание уделяется показателям горных пород, которые используются непосредственно в расчетах: плотность, прочность на одноосное сжатие и растяжение, трехосное сжатие, сцепление, угол внутреннего трения, характеристики сопротивления сдвигу по поверхностям ослабления.

3.1.3 Каждый из лабораторных и полевых методов определения физико-механических свойств горных пород обладает своими преимуществами и недостатками. Предпочтение отдается результатам, которые являются наиболее представительными и наиболее полно учитывающими особенности поведения горных пород.

3.1.4 При одновременном наличии результатов лабораторных и полевых испытаний должен производиться совместный их анализ. Для оперативного получения физико-механических свойств горных пород допускается использовать экспресс-методы и методы неразрушающего контроля.

При использовании методов неразрушающего контроля необходимо производить калибровку измеряемых показателей относительно изучаемого параметра.

3.1.5 Анализ свойств горных пород и поверхностей ослабления производится методами математической статистики.

3.1.6 При наличии прочностных свойств горных пород или поверхностей ослабления, полученных различными методами как для одного типа горной породы, так и объединенных в единый расчетный элемент, допускается строить обобщенный паспорт прочности и, исходя из него, принимать необходимые свойства.

3.1.7 Сцепление и угол внутреннего трения горных пород в образце могут быть определены исходя из предельной огибающей паспорта прочности горных пород (или обобщенного паспорта прочности), представленной линейной или кусочно-линейной функцией:

- методом среза со сжатием или методом одноплоскостного среза;
- путем пересчета через одноосное сжатие и растяжение;
- из обобщенного паспорта прочности, основанного на результатах испытаний на одноосное сжатие, растяжение, и трехосное сжатие.

Для расчетов допускается использовать нелинейный паспорт прочности без определения значений сцепления и угла внутреннего трения.

3.1.8 Предельное состояние по поверхностям ослабления горных пород допускается характеризовать на паспорте прочности линейной аппроксимацией.

3.2 Критерии разрушения горных пород

3.2.1 При расчетах устойчивости бортов и уступов карьеров и откосов отвалов для описания предельного состояния горных пород используются критерии разрушения. Основным критерием разрушения является линейный критерий Кулон-Мора:

$$\begin{aligned} \tau &= \sigma \operatorname{tg} \varphi + C \\ \tau &= \sigma \operatorname{tg} \varphi' + C' \end{aligned} \quad (3.1)$$

где τ – касательное напряжение, МПа; σ – нормальное напряжение, МПа; φ , C – угол внутреннего трения и сцепление в горной породе; φ' – угол трения по поверхности ослабления, град.; C' – сцепление по поверхности ослабления, МПа.

3.2.2 Критерий разрушения Кулон-Мора предполагает использование линейной аппроксимации предельной огибающей паспорта прочности горных пород (Рисунок 3.1).

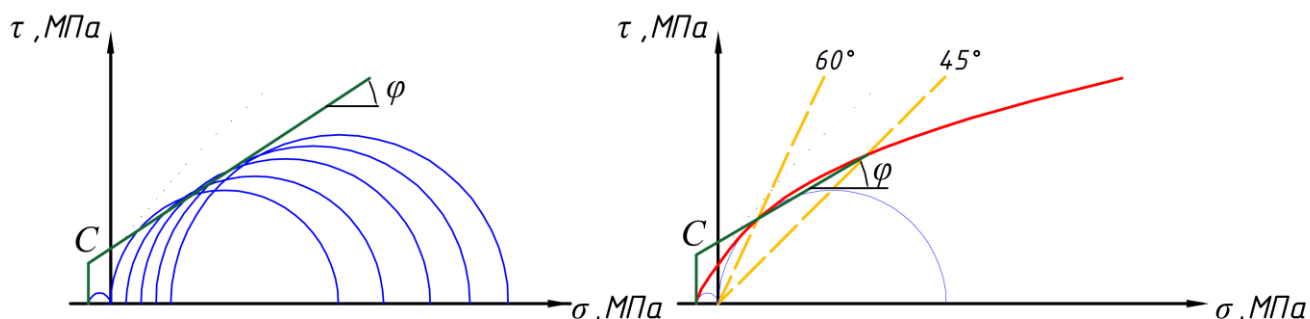
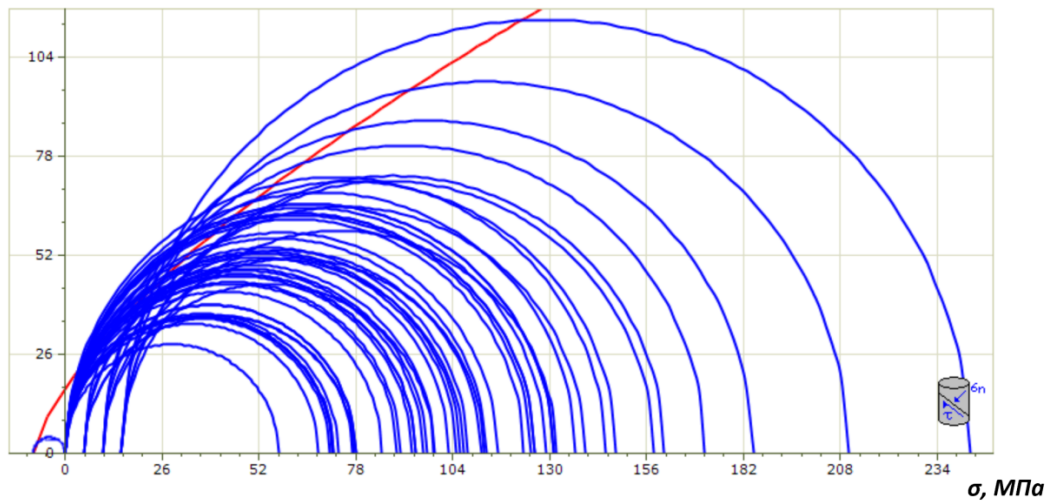


Рисунок 3.1 – Линейная аппроксимация результатов лабораторных испытаний горных пород (критерий Кулона-Мора)

3.2.3 Нелинейные критерии прочности массива применяются по решению специализированной организации.

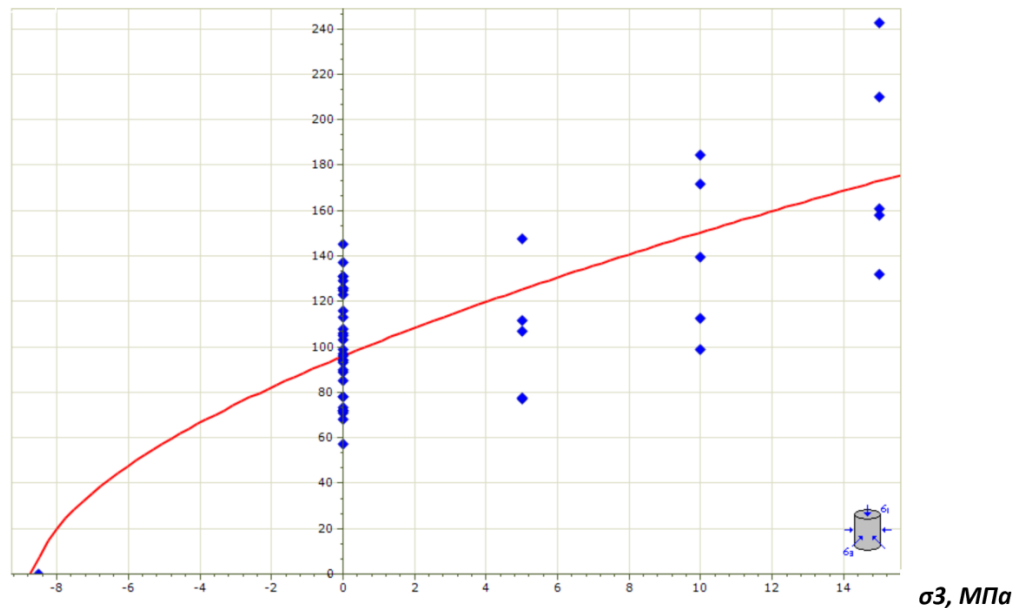
3.2.4 Для оценки устойчивости откосов в скальных массивах используется нелинейный критерий разрушения Хука-Брауна [1, 2] (Рисунок 3.2). Применение данного критерия разрушения для дисперсных пород не допустимо.

τ , МПа



а) паспорт прочности в координатах нормальных и касательных напряжений (σ , τ),

σ_1 , МПа



б) паспорт прочности в координатах главных напряжений (σ_1 , σ_3)

Рисунок 3.2 – Нелинейная аппроксимация результатов лабораторных испытаний горных пород (критерий Хука-Брауна)

3.2.5 Обобщенный критерий разрушения Хука-Брауна:

$$\sigma'_1 = \sigma'_3 + \sigma_{ci} \left(m_b \frac{\sigma'_3}{\sigma_{ci}} + s \right)^a \quad (3.2)$$

где σ_{ci} – прочность на одноосное сжатие в образце в критерии Хука-Брауна; m_b – константа массива пород, которая определяется по формуле:

$$m_b = m_i \cdot \exp\left(\frac{GSI-100}{28-14D}\right) \quad (3.3)$$

m_i – константа ненарушенных пород;

s и a – константы пород, вычисляемые следующими выражениями:

$$s = \exp\left(\frac{GSI - 100}{9 - 3D}\right) \quad a = \frac{1}{2} + \frac{1}{6} \left(e^{\frac{-GSI}{15}} - e^{\frac{-20I}{3}} \right) \quad (3.4)$$

где GSI (geological strength index) – геологический индекс прочности; D (disturbance factor) – фактор нарушенности пород взрывными работами. Фактор D изменяется от 0 – ненарушенные взрывными работами породы, до 1 – очень сильно нарушенные взрывными работами.

Для выбора фактора D используются значения, приведенные в таблице ниже (Таблица 3-1) [1, 2]

Таблица 3-1. Определение фактора нарушенности D взрывными работами

Внешний вид массива	Описание воздействия на массив	Предлагаемое значение D
	Взрывание с применением щадящих технологий, обеспечивающих минимальное нарушение законтурного массива.	$D = 0,7$
	Взрывание без применения щадящих технологий	$D = 1,0$

3.2.6 Индекс геологической прочности GSI используется только для скальных и полускальных трещиноватых пород, учитывает структурное строение массива и характеристики контактов. Также, применение GSI ограничивается масштабным эффектом (Рисунок 3.3), когда на определенном масштабном уровне может наблюдаться высокий уровень анизотропии. В таких случаях вдоль направления анизотропии задаются свойства Кулона-Мора (сцепление и угол трения по контактам).

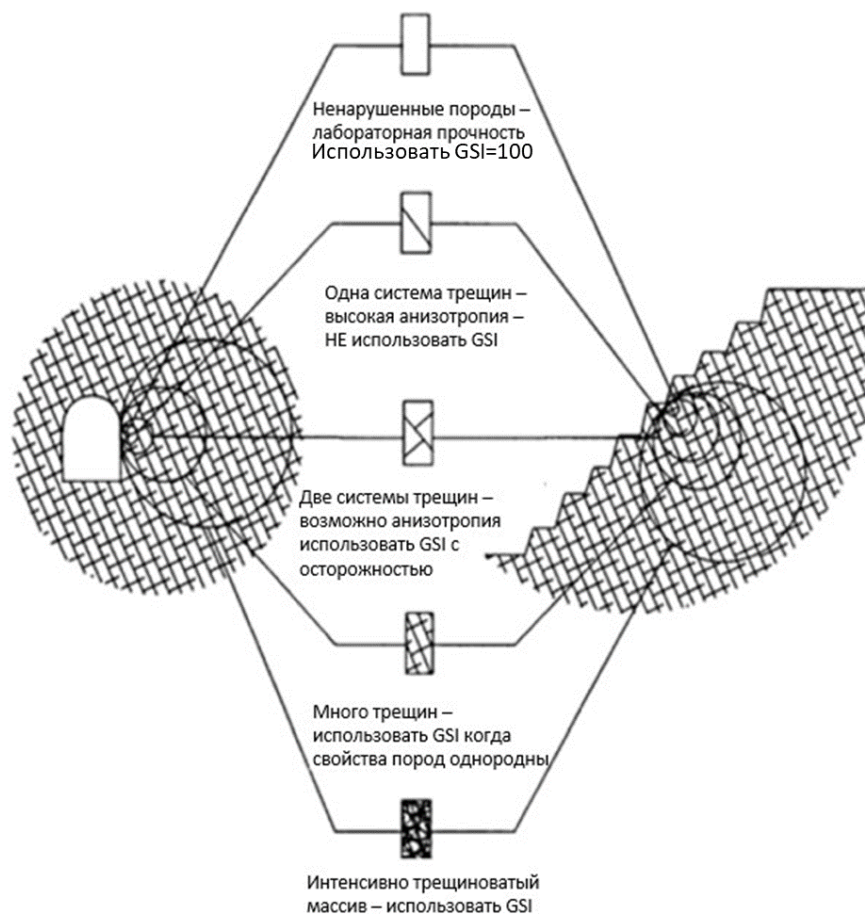


Рисунок 3.3 – Границы применения параметра *GSI*

3.3 Определение физико-механических свойств массива горных пород

3.3.1 Для расчетов устойчивости бортов и групп уступов карьеров в качестве исходных данных должны использоваться физико-механические свойства горных пород, характеризующие массив горных пород.

3.3.2 Определение свойств массива горных пород и поверхностей ослабления выполняется лабораторными или натурными испытаниями, обратными расчетами, с использованием эмпирических формул, по аналогии и/или с использованием справочных данных. Для расчетов устойчивости бортов и уступов в качестве исходных данных принимаются значения, полученные на основе статистической обработки результатов испытаний.

3.3.3 При оценке устойчивости бортов и уступов карьеров методами предельного равновесия с использованием критерия разрушения Кулона-Мора применяются свойства: плотность ρ , сцепление C_m и угол внутреннего трения φ массива, а также сцепление и угол трения по поверхностям ослабления C' , φ' . Параметры нелинейных критериев разрушения определяются паспортом прочности, представленным графиком зависимости нормальных и касательных напряжений в плоском или объемном напряженно-деформированном

состоянии. При численном моделировании дополнительно используются деформационные характеристики.

3.3.4 Для пород со сцеплением в образце более 0,4 МПа (прочность на сжатие приблизительно более 1 МПа) необходим переход от свойств образца к свойствам массива горных пород.

3.3.5 При использовании критерия разрушения Кулон-Мора допускается, что угол внутреннего трения (или угол трения для поверхностей ослабления), а также коэффициент Пуассона (поперечной деформации), полученные в лабораторных условиях, могут характеризовать массив горных пород. Такие показатели как сцепление, прочность на одноосное сжатие и растяжение, а также модуль упругости (деформации) характеризуют свойства в породном образце и для описания массива они должны быть скорректированы путем введения коэффициентов структурного ослабления или использования рейтинговых классификаций.

Величину структурного ослабления допускается определять для уступов, участков бортов (групп уступов) и бортов карьеров.

3.3.6 Величина сцепления в массиве трещиноватых горных пород определяется по формуле:

$$C_m = \frac{C_o - C'}{1 + a \ln\left(\frac{H}{l}\right)} + C \quad (3.5)$$

где C_o – сцепление в образце, МПа; C' – сцепление по контактам, определяемое по результатам лабораторных и/или натуральных испытаний, обратных расчетов, МПа; H – высота прибортового массива, м; l – средний размер элементарного структурного блока массива, ограниченного трещинами, м; a – коэффициент, зависящий от прочности породы в монолитном образце и степени и характера трещиноватости (Таблица 3-2).

Таблица 3-2. Значения коэффициента «а» для различных пород

Породы и характер трещиноватости	Сцепление в монолите, МПа	a
Слабоуплотненные и слаботрещиноватые песчано-глинистые отложения; сильновыветрелые, полностью каолинизированные изверженные породы	0,4 – 0,9	0,5
Уплотненные песчано-глинистые породы, в основном нормальносекущей трещиноватости	1 - 2	2
Сильно каолинизированные изверженные породы	3 - 8	2
Уплотненные песчано-глинистые породы с развитой косесекущей трещиноватостью, каолинизированные изверженные породы	3 - 8	3
Средней прочности слоистые породы, преимущественно нормальносекущей трещиноватости	10 - 15	3
	15 - 17	4
	17 - 20	5
Прочные породы, преимущественно нормальносекущей трещиноватости	20 - 30	6
	> 30	7
Прочные изверженные породы с развитой косесекущей трещиноватостью	> 20	10

Примечание: при выборе коэффициента «а» допускается интерполяция и экстраполяция значений в зависимости от величины сцепления.

3.3.7 Для размягчаемых пород (коэффициент размягчаемости $\kappa_{раз} < 0,75$): на этапах проектирования, эксплуатации и реконструкции необходимо дополнительно определять прочностные свойства горных пород в водонасыщенном состоянии.

3.3.8 Сцепление C и угол внутреннего трения φ в массиве горных пород могут быть получены с использованием критерия разрушения Хука-Брауна:

$$\varphi = \sin^{-1} \left[\frac{6am_b(s + m_b\sigma'_{3n})^{a-1}}{2(1+a)(2+a) + 6am_b(s + m_b\sigma'_{3n})^{a-1}} \right] \quad (3.6)$$

$$C = \frac{\sigma_{ci}[(1+2a)s + (1-a)m_b\sigma'_{3n}](s + m_b\sigma'_{3n})}{(1+a)(2+a)\sqrt{1 + (6am_b(s + m_b\sigma'_{3n})^{a-1})/((1+a)(2+a))}}$$

$$\sigma_{3n} = \sigma'_{3max} / \sigma_{ci} \quad (3.7)$$

$$\frac{\sigma'_{3max}}{\sigma'_{ст}} = 0,72 \left(\frac{\sigma'_{ст}}{\gamma H} \right)^{-0,91} \quad (3.8)$$

$$\sigma'_{ст} = \sigma_{ci} \frac{(m_b + 4s - a(m_b - 8s)) \left(\frac{m_b}{4} + s \right)^{a-1}}{2(1+a)(2+a)} \quad (3.9)$$

где H – высота откоса, м,

3.3.9 Прочностные и деформационные свойства горных пород могут быть определены на основании обратных расчетов. Под обратными расчетами понимается моделирование условий, соответствующих фактическому состоянию откосов. Обратные расчеты могут выполняться с использованием детерминированных и вероятностных способов методами предельного равновесия и численного моделирования следующим образом:

- определение прочностных и деформационных свойств горных пород и поверхностей ослабления на момент возникновения обрушения или оползня;
- калибровка прочностных и деформационных свойств горных пород и поверхностей ослабления по фактическим обнажениям.

3.3.10 Методы предельного равновесия наиболее часто используются для определения прочностных свойств горных пород и поверхностей ослабления, численное моделирование – для уточнения прочностных, деформационных свойств горных пород и поверхностей ослабления.

3.3.11 Для определения прочностных свойств горных пород и поверхностей ослабления на момент возникновения обрушения или оползня применяются следующие подходы:

Первый подход. На основании результатов лабораторных определений плотности и угла внутреннего трения горных пород (или угла трения по поверхности ослабления) определяется значение сцепления при коэффициенте запаса равном единице, что характеризует откос в предельном состоянии.

Второй подход. Данный подход используется при наличии нескольких деформаций. Из результатов лабораторных испытаний принимается плотность, а прочностные свойства определяются путем нахождения сочетания углов внутреннего трения (угол трения по контактам горных пород) и сцепления, при которых откос перейдет в предельное состояние и коэффициент запаса будет равен единице. Пересечение линий сочетаний прочностных свойств горных пород (поверхностей ослабления) характеризуют наиболее вероятный диапазон их значений. Пример приведен на рисунке ниже (Рисунок 3.4).

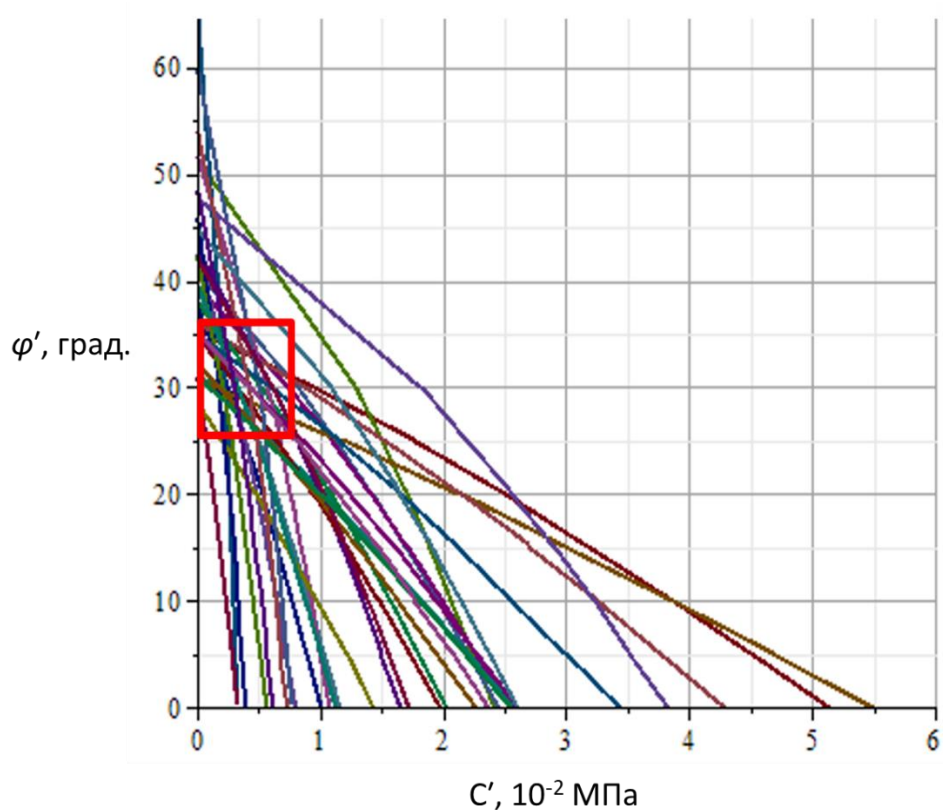


Рисунок 3.4 – Определение прочностных свойств поверхностей ослабления горных пород путем выполнения обратного расчета на примере нескольких деформаций

3.3.12 Калибровка исходных данных осуществляется по результатам:

- проверки соответствия принятых свойств наблюдаемым в природе параметрам откосов (угол и высота);
- визуальных обследований или инструментальных измерений состояния фактических обнажений на предмет раскрытия трещин и просадок, сработки берм вывалами;

- наблюдаемых деформаций с выполнением обратных расчетов. Калибруемыми параметрами являются свойства и/или параметры трещиноватого массива.

3.3.13 Проведение обратных расчетов для уточнения деформационных свойств горных пород может быть выполнено с допущениями:

- коэффициент Пуассона/коэффициент поперечной деформации принимается на основании лабораторных испытаний, а прочностные свойства определяются любым способом;
- калибруемым показателем является модуль упругости/ модуль деформации, который определяется по результатам наблюдений.

3.3.14 Прочностные и деформационные свойства горных пород допускается определять на основании физического моделирования на эквивалентных материалах с привлечением специализированных организаций. Полученные таким образом свойства необходимо сопоставлять с эмпирическими методами.

3.3.15 При наличии в прибортовом массиве петрографических разностей допускается использовать средневзвешенные физико-механические свойства горных пород по наиболее напряженной поверхности скольжения, не совпадающей с поверхностью ослабления массива:

$$C_{\text{ср. взв}} = \frac{C_1 l_1 + C_2 l_2 + \dots + C_n l_n}{l_1 + l_2 + \dots + l_n}$$

$$tg\varphi_{\text{ср. взв}} = \frac{tg\varphi_1 l_1 + tg\varphi_2 l_2 + \dots + tg\varphi_n l_n}{l_1 + l_2 + \dots + l_n} \quad (3.10)$$

$$\gamma_{\text{ср. взв}} = \frac{\gamma_1 S_1 + \gamma_2 S_2 + \dots + \gamma_n S_n}{S_1 + S_2 + \dots + S_n}$$

где C_i – сцепление конкретного вида горной породы, МПа; $tg\varphi_i$ – угол внутреннего трения конкретного вида горной пород, град.; γ_i – плотность конкретного вида горной пород, $МН/м^3$; l_i – длина участка наиболее напряженной поверхности скольжения в пределах каждой разновидности пород, имеющей соответствующие C , φ , м; S_i – объем пород различных петрографических разностей по вертикали на рассматриваемом участке наиболее напряженной поверхности, $м^3$.

3.3.16 Модуль деформации массива (E_m) горных пород определяется по формуле [2]:

$$E_m = E \left\{ 0,02 + \frac{1 - 0,5D}{1 + \exp[(60 + 15D - GSI)/11]} \right\} \quad (3.11)$$

где E – модуль деформации в образце, МПа.

При отсутствии результатов лабораторных испытаний для приближенной оценки модуль деформации допускается определять по формуле:

$$E_m = 10^5 + \frac{1 - 0,5D}{1 + \exp[(75 + 25D - GSI)/11]} \quad (3.12)$$

3.3.17 При расчетах устойчивости бортов и уступов карьеров сцепление и угол трения по поверхностям ослабления принимаются исходя из совокупного анализа испытаний по естественным поверхностям ослабления (с заполнителем или без заполнителя) и по распилу, обратных расчетов, натуральных испытаний и справочных данных. Справочные данные по прочностным свойствам поверхностей ослабления приведены в приложении А. Допускается использование и других справочных материалов.

3.3.18 Для учета влияния взрывных работ при расчетах устойчивости уступов в значение сцепления по трещинам вводится коэффициент λ_1 , определяемый в соответствии с таблицей ниже (Таблица 3-3):

$$C'_{вз} = C' \lambda_1 \quad (3.13)$$

Таблица 3-3. Значения коэффициента λ_1 в зависимости от условий взрывания

Количество рядов скважин в технологическом блоке и схема коммутации зарядов	λ_1
при взрывании 5 и более рядов скважин и параллельной коммутации зарядов (фронт детонационной волны параллелен формируемому откосу уступа)	0,4
при взрывании 3 – 4 рядов скважин и параллельной коммутации зарядов	0,6
при 5-рядном и более взрывании скважин и диагональной коммутации зарядов (фронт детонационной волны ориентирован по 45° к формируемому откосу уступа)	
при взрывании 3 – 4 рядов скважин и диагональной коммутации зарядов	0,7
при взрывании 2 рядов скважин и параллельной коммутации зарядов	0,8
при взрывании 2 рядов скважин и диагональной коммутации зарядов	0,9
при взрывании 1 ряда скважин (при использовании методов щадящего взрывания)	1,0

Степень повреждения законтурного массива взрывными работами и, соответственно, величина понижающего коэффициента λ_1 могут быть уточнены в ходе опытных работ, а также по результатам обратных расчетов.

3.3.19 При расчетах устойчивости бортов и уступов карьеров допускается использование эквивалентных прочностных свойств, учитывающих протяженность трещин (Рисунок 3.5), и определяемых по формулам:

$$C_3 = (1-k)C_m + kC' \quad (3.14)$$

$$\operatorname{tg}(\varphi_3) = (1-k) \operatorname{tg}(\varphi) + k \operatorname{tg}(\varphi')$$

где C_3, C_m, C' – эквивалентное сцепление, сцепление массива горных пород и по поверхностям ослабления (трещинам), МПа; и $\varphi_3, \varphi, \varphi'$ – эквивалентный угол внутреннего трения, угол внутреннего трения массива горных пород и угол трения по поверхности

ослабления (трещинам), град.; k – коэффициент сплошности вдоль плоскости разрушения, определяемый формулой:

$$k = \frac{\sum l'}{\sum l' + \sum l} \quad (3.15)$$

где l' и l – протяженность поверхности ослабления и массива горных пород, м.

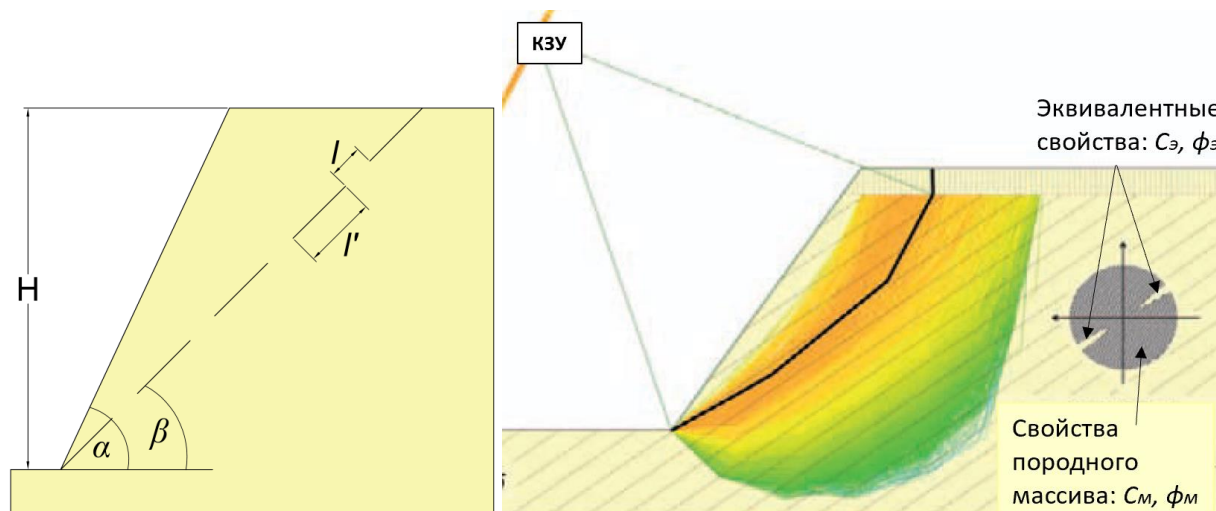


Рисунок 3.5 – Схема задания эквивалентных свойств массива горных пород [3]

Коэффициент сплошности k изменяется в диапазоне от 0 до 1. Единица принимается для полностью слоистого массива, ноль принимается для изотропного откоса. Наиболее часто встречаемый диапазон $k=0,5 \div 0,9$. Данный коэффициент следует уточнять по результатам обследования вскрытых выработок и/или по результатам калибровки.

3.3.20 При расчетах устойчивости уступов для учета длительности их эксплуатации, сезонных процессов замерзаний/оттаиваний, сейсмического воздействия взрывных работ допустимо снижать сцепление по поверхностям ослабления до нуля.

3.3.21 При расчетах устойчивости бортов и уступов карьеров величины сцепления и углов трения в зонах разломов принимаются на основании справочных данных, либо метода аналогий или обратных расчетов.

3.3.22 Для месторождений, расположенных в криолитозоне, перечень дополнительных физико-механических свойств горных пород определяется специализированной организацией.

4 Обоснование величины коэффициента запаса устойчивости и вероятности обрушения бортов и уступов карьеров и откосов отвалов

4.1 При детерминированном подходе критерием устойчивости является коэффициент запаса устойчивости, который должен быть не меньше нормативного. При вероятностном подходе критерием устойчивости является коэффициент запаса устойчивости и допустимая вероятность развития деформаций, которые определяются проектной документацией с учётом размещения элементов инфраструктуры объекта пользования недрами (ведения горных работ).

4.2 Величина коэффициента запаса устойчивости n устанавливается в зависимости от достоверности исходных данных, используемых в расчетах, их изменения во времени, технологии разработки месторождения, динамических воздействий в процессе строительства и эксплуатации, категории охраняемых объектов в непосредственной близости от борта карьера. Коэффициент запаса устойчивости позволяет учесть неявные и неоднозначные факторы.

4.3 Нормативный коэффициент запаса определяется на основании детального анализа и оценки всех показателей, которые оказывают влияние на устойчивость бортов и уступов карьеров и откосов отвалов. Для практических целей рекомендуется руководствоваться таблицами ниже (Таблица 4-1 и Таблица 4-2)

Таблица 4-1. Нормативные коэффициенты запаса устойчивости бортов и уступов карьеров

Характеристика откоса	Стадии до начала эксплуатации	Эксплуатация и реконструкция	Проектирование доработки карьера (менее 3 лет), лет***	Для ответственных сооружений в чаше карьера	При безлюдной выемке
1	2	3	4	5	6
Полускальные и скальные породы					
Уступ*	1,50 (2,00)**	1,50	1,30	2,00	1,20
Участок борта, борт	1,30 (1,50)**	1,30	1,20	1,50	1,20
Песчаные и гравелистые породы					
Уступ, участок борта, борт	1,30	1,20	1,15	1,30	1,10
Глинистые породы					
Уступ	1,50	1,30	1,20	2,00	1,20
Участок борта, борт	1,40	1,30	1,20	1,50	1,20

Примечания:

* для рабочих уступов промежуточного контура карьера во всех типах пород и сроком их стояния до 1 года при высоте не более 20 м допустимо использовать нормативный коэффициент запаса 1,2, при высоте более 20 м – 1,5.

** в скобках указано значение коэффициента запаса при использовании метода аналогий

*** при использовании данных значений обязателен инструментальный мониторинг в режиме реального времени с покрытием рабочей зоны.

Таблица 4-2. Нормативные коэффициенты запаса устойчивости для откосов отвалов при детерминированном подходе

Тип отвальной массы	Тип основания*		
	Прочное основание	Слабый контакт	Слабое основание
Скальная отвальная масса	1,15	1,20	1,30
Песчано-глинистые породы, смесь песчано-глинистых и скальных пород,	1,20	1,20	1,30
<i>При безлюдной технологии отсыпки отвалов</i>			
Для всех типов	1,10	1,10	1,15
<i>При расположении на отвале или в непосредственной близости от него ответственного сооружения, вне зависимости от технологии отсыпки</i>			
Для всех типов	1,30	1,30	1,40

Примечания:

* *Прочное основание* – основание, представленное скальными, полускальными и песчано-гравийными породами, сопротивление сдвигу которых не ниже, чем у отвальной массы;

Слабый контакт – слой, мощностью не более 2 метров, представленный глинисто-суглинистыми породами, сопротивление сдвигу которых ниже, чем у отвальной массы;

Слабое основание – слой, мощностью более 2 метров, представленный глинисто-суглинистыми породами, сопротивление сдвигу которых ниже, чем у отвальной массы.

4.4 Нормативный коэффициент запаса устойчивости для откосов отвалов, формируемых в режиме управляемых деформаций, не регламентируется. Выполнение отвальных работ осуществляется на основании заключения специализированной организации, при обеспечении мониторинга состояния площадок разгрузки:

- образования и раскрытия трещин;
- повышения скорости оседания;
- изменения наклона.

Размещение горного оборудования должно производиться за пределами зоны активной деформации.

Переходу на формирование откоса отвала в режиме управляемых деформаций должно предшествовать проведение опытно-промышленных испытаний с определением критериев безопасного состояния разгрузочных площадок и порядка действий, в случае их превышения.

4.5 В сейсмически активных районах (сейсмичность 7 и более баллов по шкале MSK-64) устойчивость бортов и уступов карьеров и откосов отвалов должна обеспечиваться дополнительно и при сейсмическом воздействии от землетрясений.

4.6 Учет воздействия землетрясений для практических задач осуществляется одним из следующих способов:

- расчет устойчивости бортов и уступов карьера выполняется как для сейсмически спокойных районов, но в качестве нормативного коэффициента запаса используются

повышенные значения: коэффициенты запаса, приведенные в таблице выше (Таблица 4-1), должны быть увеличены на 0,05 для 7-балльной зоны, 0,1 – для 8-балльной зоны и 0,15 – для 9-балльной зоны. Данный подход наиболее удобен при определении максимальных параметров откосов для различных условий;

- расчет устойчивости бортов и уступов карьеров и откосов отвалов выполняется с учетом дополнительной сейсмической силы: в момент возникновения сейсмического воздействия коэффициент запаса должен быть не ниже значений, приведенных в таблице ниже (Таблица 4-3).

Таблица 4-3. Нормативные коэффициенты запаса устойчивости бортов и уступов карьеров и откосов отвалов с учетом дополнительной сейсмической силы от землетрясений

Характеристика откоса	Наличие ответственных сооружений	
	Отсутствуют	Присутствуют
Рабочий уступ	1,00	–
Уступ в конечном положении	1,10	1,15
Борт, участок борта, временно-нерабочий борт	1,05	1,10
Отвал (ярус)	1,05	1,10

4.8 Нормативные критерии устойчивости уступов, бортов карьеров при вероятностном подходе выбираются в соответствии с таблицей ниже (Таблица 4-4).

Данные нормативные критерии могут применяться как альтернативные вместо рассмотренных в таблице выше (Таблица 4-1) для каждого из масштабных уровней: уступы, группы уступов, борта.

При вероятностном подходе для группы уступов и борта должны выполняться оба критерия (коэффициент запаса устойчивости и допустимая вероятность обрушения).

Для уступов в скальных и полускальных породах при определении вероятности через отношение протяженности обрушенных участков к общей длине бермы допустимо использовать единственный критерий вероятности обрушения.

Если вероятность обрушения уступов определяется через коэффициент запаса $VO=[KЗУ \leq 1]$, то критерии приемлемости для уступов, в том числе сложенных из дисперсных пород, следует использовать как для группы уступов между транспортными съездами.

Таблица 4-4. Нормативные коэффициента запаса устойчивости при вероятностном подходе

Масштаб	Область применения	Коэффициент запаса устойчивости	Допустимая вероятность обрушения, $[n \leq 1]$, %
Уступы (скальные, полускальные породы) *	Рабочий до 1 года. Доработка карьера. Безлюдная технология.	Не учитывается	40%
	Эксплуатация и реконструкция. Проектирование до начала эксплуатации при условии достаточной геомеханической изученности месторождения по данным бурения скважин		30%
	Проектирование до начала эксплуатации. Наличие ответственных сооружений.		20%
Уступы, группы уступов между транспортными съездами **	Доработка карьера. Безлюдная технология.	1,20	20%
	Эксплуатация и реконструкция Проектирование до начала эксплуатации при условии достаточной геомеханической изученности месторождения по данным бурения скважин	1,25	15%
	Проектирование до начала эксплуатации. Наличие ответственных сооружений.	1,30	10%
Борт карьера в целом**	Доработка карьера. Безлюдная технология.	1,20	15%
	Эксплуатация и реконструкция Проектирование до начала эксплуатации при условии достаточной геомеханической изученности месторождения по данным бурения скважин	1,30	10%
	Проектирование до начала эксплуатации. Наличие ответственных сооружений.	1,50	5%

Примечания:

* расчет вероятности через отношение протяженности обрушенных участков к общей длине бермы;

** расчет вероятности через коэффициент запаса устойчивости.

4.9 Нормативные коэффициенты запаса устойчивости и вероятности обрушения, приведенные в таблицах выше, могут быть скорректированы для конкретных условий на основании заключения специализированной организации. Методика и способ расчета также определяется специализированной организацией.

Коэффициент запаса в общем виде допускается определять по формуле:

$$n = n_1 n_2 n_3 \dots n_i \quad (4.2)$$

где n_i – частные коэффициенты запаса.

5 Районирование прибортовых массивов

5.1 Районирование по возможным механизмам деформирования прибортового массива (кинематический анализ) выполняется на основе доменов, выделенных по природным факторам с учетом расположения карьера, отвала. Один и тот же район, выделенный по природным факторам, для откосов с разным простираем может деформироваться по различным схемам. В связи с этим природный домен разделяется на расчетные области, в которых предполагаются разные механизмы деформирования откосов. Районирование по возможным механизмам деформирования откосов может выполняться как в графическом, так и в текстовом виде. Пример районирования в графическом виде представлен на рисунке ниже (Рисунок 5.1).

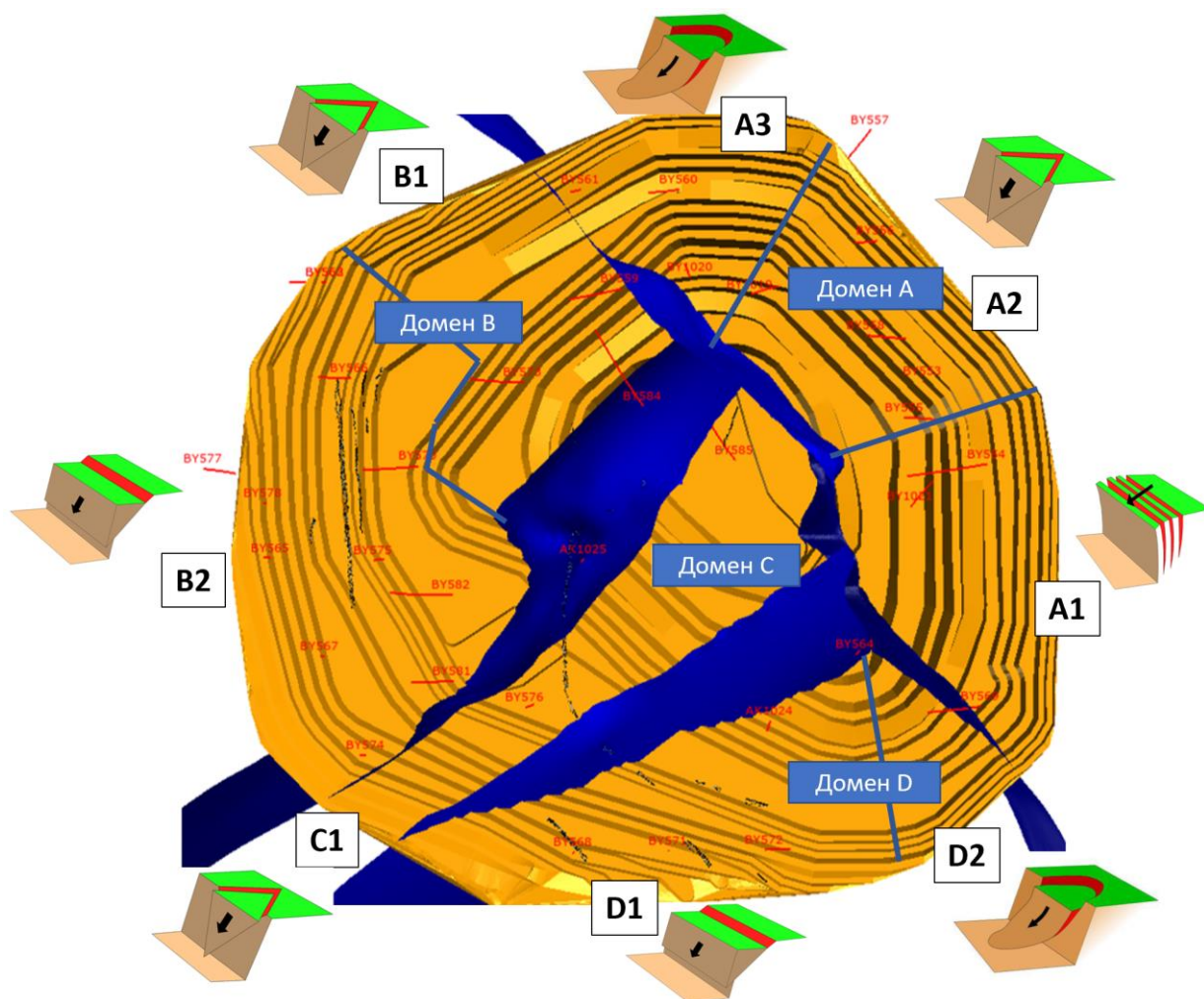


Рисунок 5.1 – Выделение расчетных областей и определение механизмов деформирования прибортового массива

Выбор расчетных областей производится с учетом масштаба и следует разделять следующие иерархические уровни:

- масштаб уступа (поверхности ослабления представлены структурами мелкого порядка – системами трещин, слоистостью);

- масштаб участка борта (поверхности ослабления представлены структурами большего порядка – протяженными системами трещин, слоистостью, разломами);
- масштаб борта (поверхности ослабления представлены структурами высокого порядка – крупными разломами. Также принципиальное значение имеют прочность массива, направление слоистости, обводненность борта).

5.2 Для проектирования контура карьеров и отвалов допускается выполнять районирование:

- по конструкции бортов карьера (по параметрам уступов и берм);
- по параметрам бортов карьера (в том числе группа уступов).

Для проведения районирования по конструктивным параметрам карьеров необходимо использовать районы, выделенные по механизмам разрушения откосов в соответствующем масштабе.

Границы районирования по природным факторам и по механизмам разрушения прибортового массива не всегда совпадают с границами районирования по конструктивным параметрам карьера. В одном и том же домене при разных азимутах простирания уступов и бортов могут быть получены различные конструктивные параметры откосов.

После проведения расчетов по всем данным районам осуществляется выбор и разграничения по параметрам откосов для всего карьерного поля.

При выделении областей по параметрам бортов может оказать влияние рельеф и глубина отработки месторождения.

В прочных скальных породах для районирования по параметрам бортов карьера допускается использовать конструктивный генеральный угол борта карьера, рассчитанный по параметрам уступов и берм.

Конструктивный генеральный угол борта карьера определяется по формуле:

$$\alpha_r = \operatorname{arctg} \frac{H}{\sum B_i + \sum h_i \operatorname{ctg} \alpha} \quad (5.1)$$

где $\sum B_i$ – сумма длин всех горизонтальных берм (предохранительные и транспортные бермы), м, $\sum h_i \operatorname{ctg} \alpha$ – сумма длин всех заложений откосов уступов в горизонтальной проекции, м.

Данная формула применяется для расчета технически допустимых углов, когда они меньше обоснованных расчетами устойчивости генеральных углов наклона бортов.

Основными результатами районирования по конструктивным параметрам карьеров является выделение секторов карьерного поля с одинаковыми параметрами откосов. Примеры районирования представлены на рисунках ниже (Рисунок 5.2 и Рисунок 5.3).

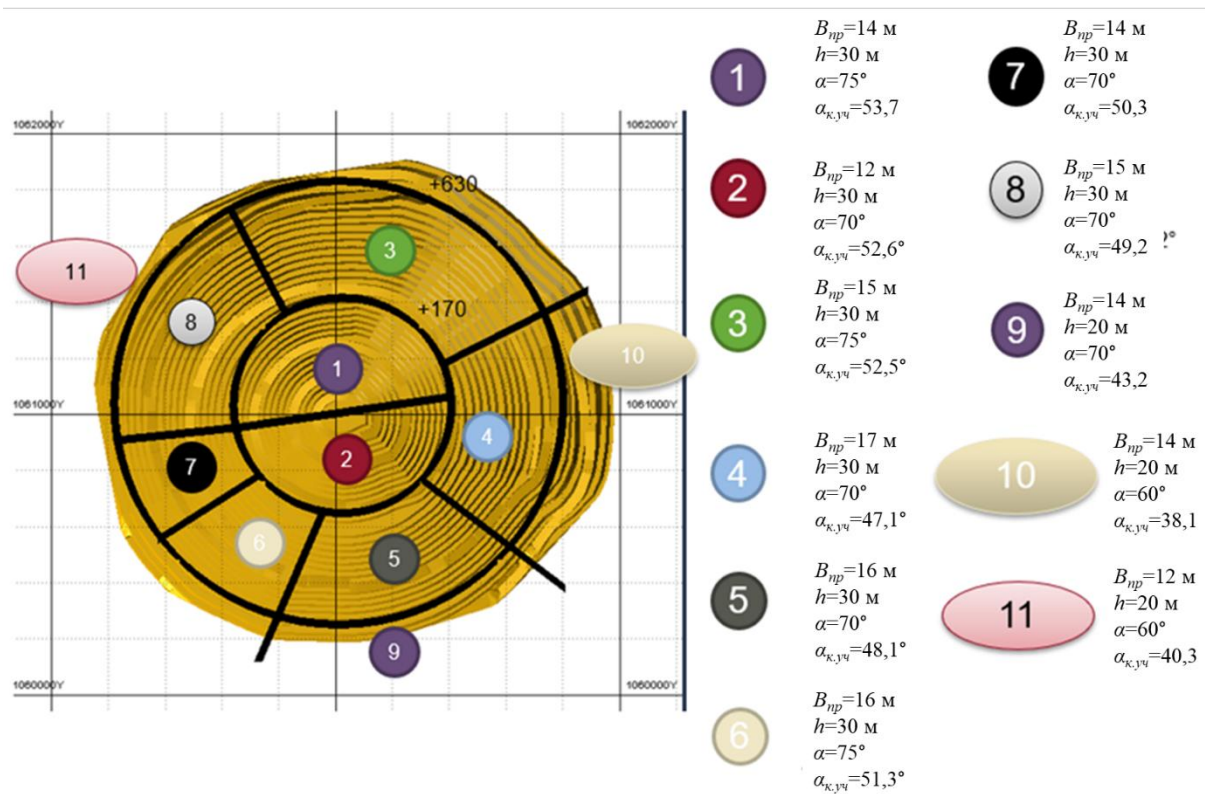


Рисунок 5.2 – Пример районирования по параметрам уступов и берм

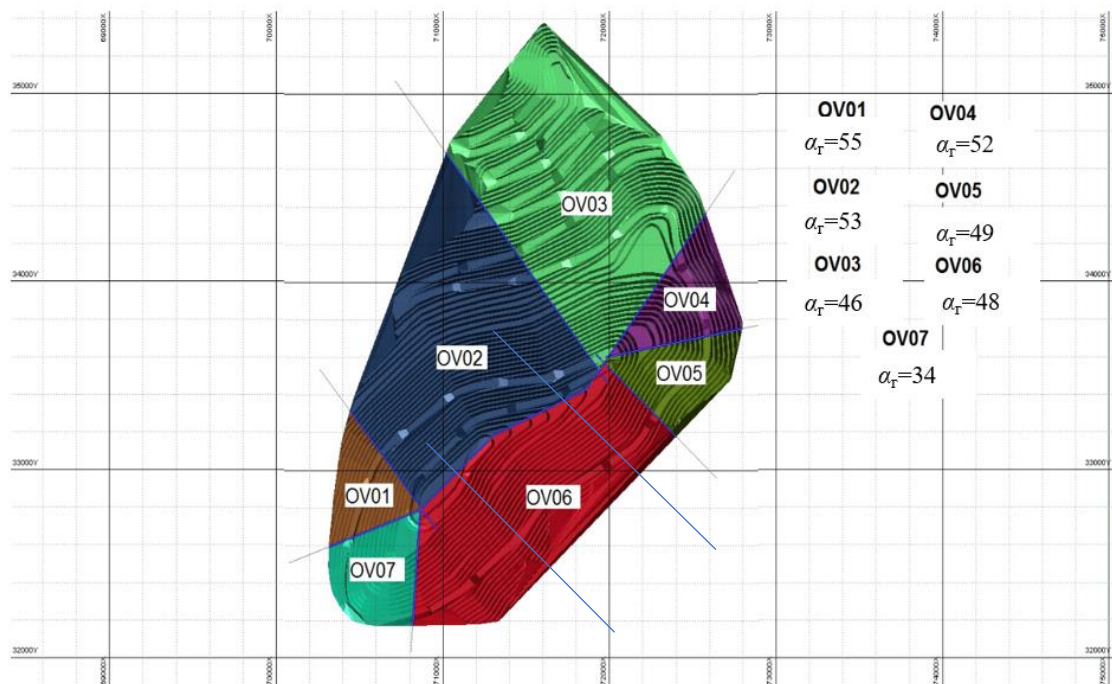


Рисунок 5.3 – Пример районирования по параметрам бортов карьера

5.6 Районирование отвалов осуществляется аналогично районированию проводимого для карьеров: по природным и горнотехническим факторам.

5.7 Результаты районирования представляются в виде графических материалов и/или пояснительной записки.

6 Методы расчета устойчивости бортов и уступов карьеров и отвалов

6.1 Общие требования к выполнению расчетов

6.1.1 Оценка устойчивости бортов и уступов карьеров в зависимости от этапа проектирования и отработки открытым способом должна выполняться методами, основанными на теории предельного равновесия, численным и физическим моделированием в соответствии с таблицей ниже (Таблица 6-1). Метод предельного равновесия является обязательным на каждом этапе проектирование месторождения, за исключением предпроектных работ.

Таблица 6-1. Методы оценки устойчивости бортов карьеров на различных этапах их проектирования и отработки

Этап проектирования и отработки карьера	Метод аналогий	Методы, основанные на теории предельного равновесия	Численные и вариационный методы	Методы физического моделирования и специальные исследования
Предпроектные работы	●	○	○	○
ТЭО	○	●	○	○
Проектирование	○	●	○	○
Проявление критических деформаций при эксплуатации	○	●	◆	○
Техническое перевооружение карьера	○	●	○	○

«●» – для всех объектов ведения горных работ;

«◆» – для объектов ведения горных работ II класса опасности и при комбинированной разработке месторождения;

«○» – как дополнительный метод (по решению специализированной организации)

6.1.2 Расчет устойчивости бортов и уступов карьеров и откосов отвалов выполняется графоаналитическими методами или с использованием программного обеспечения. Выбор программного обеспечения для расчетов осуществляется специализированной организацией.

6.1.3 Параметры бортов и уступов карьеров определяются в соответствии со схемой, приведенной на рисунке ниже (Рисунок 6.1).

6.1.4 При оценке устойчивости бортов и уступов карьеров исходные данные выбираются в соответствии с выбранной моделью деформирования и критерием разрушения прибортовых массивов, определенных на основе инженерно-геологического изучения и районирования месторождения.

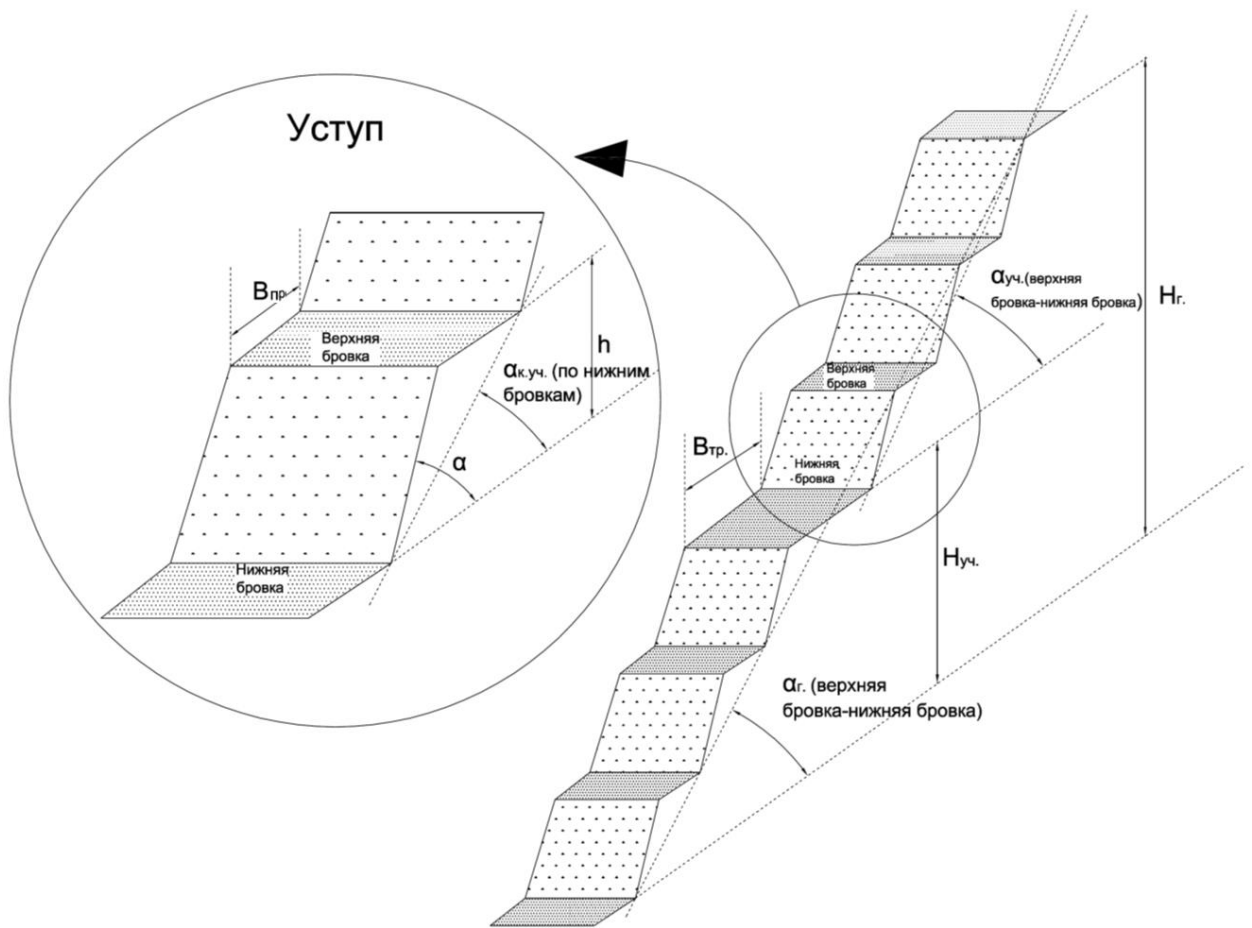


Рисунок 6.1 – Схема конструкции бортов и уступов: h , $H_{уч}$, $H_{г}$ – соответственно высота уступа, групп уступов, борта; α , $\alpha_{уч}$, $\alpha_{к.уч}$, $\alpha_{г}$ – соответственно, угол откоса уступа, угол откоса группы уступов, конструктивный угол откоса группы уступов и угол откоса борта карьера; $B_{пр}$, $B_{тр}$ – соответственно, ширина предохранительной и транспортной бермы

6.1.5 В качестве исходных данных используются физико-механические свойства массива горных пород и поверхностей ослабления, гидрогеологические и геолого-структурные условия месторождения. В случае прерывистости поверхностей ослабления для расчетов допускается применять эквивалентные свойства.

6.1.6 Для выбора алгоритма по определению оптимальной конструкции бортов карьера следует руководствоваться таблицей ниже (Таблица 6-2).

В крепких скальных и полускальных породах следует проводить расчеты устойчивости от уступов к бортам. По обоснованным параметрам уступов и берм по выделенным доменам в поле карьера строятся конструктивные борта карьера с учетом количества и размеров берм.

В слабых породах расчеты могут выполняться в обоих направлениях, как от бортов к уступам, так и от уступов к бортам.

При необходимости угол наклона и форма борта, а также уступов и берм корректируются до достижения заданной величины коэффициента запаса устойчивости.

Таблица 6-2. Подход к определению оптимальной конструкции бортов карьера

Элемент откоса	Прочность горных пород		
	Слабые	Средней прочности	Прочные
Геометрия уступа	Прочность (структура)	Структура	Структура
Угол откоса между съездами	Прочность	Структура (прочность)	Структура
Генеральный угол наклона борта	Прочность	Структура (прочность)	Структура (прочность)
Проектный подход	Общий Результирующий ↑↓ Угол между съездами ↑↓ Уступ	По секторам Уступ ↓ Угол между съездами ↓ Результирующий угол	По секторам Уступ ↓ Угол между съездами ↓ Результирующий угол

6.1.7 На этапе проектирования должны выполняться поверочные расчеты устойчивости бортов карьеров и отвалов для конкретного контура.

6.1.8 При получении разными методами и способами коэффициентов запаса выше нормативных допускается расхождение между их значениями.

При получении разными методами и способами коэффициентов запаса ниже нормативных, выбор применяемого метода и способа расчета определяется специализированной организацией.

6.1.9 Используемые для расчетов устойчивости бортов и уступов карьеров и откосов отвалов методы и способы применимы и для месторождений, разрабатываемых в условиях криолитозоны.

6.1.10 В многолетнемерзлых породах при обосновании конструктивных параметров бортов и уступов карьеров и откосов отвалов необходимо учитывать влияние таликов на их устойчивость.

6.2 Метод предельного равновесия

6.2.1 Исходные положения теории предельного равновесия, на которых построены методы расчета, следующие:

а) нарушение устойчивости борта (уступа или откоса отвала) происходит в виде оползня или обрушения по поверхности скольжения;

б) при отсутствии в откосе неблагоприятно расположенных поверхностей ослабления массива поверхность скольжения является монотонной, близкой по форме к круглоцилиндрической поверхности, и имеет на разрезе вид плавной дуги;

в) при наличии в откосе неблагоприятно ориентированных поверхностей ослабления поверхность скольжения полностью или частично совпадает с ними и на разрезе имеет вид ломаной линии.

6.2.2 Устойчивость бортов и уступов карьеров и откосов отвалов обеспечивается при условиях, когда отношение удерживающих сил, действующих по наиболее напряженной (наиболее слабой) поверхности в прибортовом массиве, к сдвигающим силам по этой поверхности составляет не менее величины нормативного коэффициента запаса устойчивости n , то есть выполняется условие:

$$n = \frac{tg\phi \sum N + CL + A}{\sum T + B} \quad (6.1)$$

где $(tg\phi \sum N + CL)$ – силы трения и сцепления по поверхности ослабления; A – другие удерживающие силы; $\sum T$ – сумма сдвигающих сил; B – другие сдвигающие силы.

6.2.3 Определение наиболее напряженной поверхности скольжения производится на основе аналитических расчетов или путем выбора из множества поверхностей ослабления поверхности с минимальным коэффициентом запаса устойчивости.

6.2.4 При построении поверхности скольжения определяют положение трещины отрыва, уходящей в массив на глубину H_{90} :

$$H_{90} = \frac{\sigma_0}{\gamma} = \frac{2C_n}{\gamma} ctg(45 - 0,5\varphi_n) \quad (6.2)$$

где σ_0 – прочность пород на одноосное сжатие, МПа; C_n – сцепление в массиве, МПа; φ_n – угол внутреннего трения, град.; γ – плотность горной породы, МН/м³.

6.2.5 При расчете устойчивости бортов и уступов карьеров и откосов отвалов, в том числе с учётом воздействия сейсмических сил и нагрузок от горного оборудования, с использованием теории предельного равновесия, применяют методы алгебраического или векторного сложения сил (многоугольника сил), а также методы, удовлетворяющие трем уравнениям равновесия (сил и моментов).

6.2.6 Метод алгебраического сложения сил основан на алгебраическом сложении удерживающих и сдвигающих сил по потенциальной поверхности скольжения (Рисунок 6.2). При этом расчет коэффициента запаса устойчивости с учетом различных неблагоприятных факторов определяется следующей формулой

$$n = \frac{\sum \left[\left(P_i \cos \mu_i + P_i^B \frac{\cos(\alpha - \mu_i)}{\cos \alpha} - D_i + \Delta P \cos(45 + 0,5\phi_n) - Q_i \sin \xi_i \right) \operatorname{tg} \phi_i + c_i l_i + A \right]}{\sum \left[P_i \sin \mu_i - P_i^B \frac{\sin(\alpha - \mu_i)}{\cos \alpha} + \Delta P \sin(45 + 0,5\phi_n) + Q_i \cos \xi_i + B \right]} \quad (6.3)$$

$$D_i = \frac{H_{i,i-1} + H_{i,i+1}}{2} \gamma_w l_i \quad (6.4)$$

$$\Delta P = \frac{P_{об}}{a + 2 \cdot \frac{1}{3} \left[\frac{b}{\operatorname{tg}(45 - 0,5\phi)} \right]} \quad (6.5)$$

$$Q_c = K_0 \cdot K_1 \cdot P \cdot k_c \quad (6.6)$$

где P – вес блока, МН; α – угол откоса, град.; μ_i – угол наклона основания блока, град.; P_i^B – вес «свободной» (находящейся выше линии откоса) воды в пределах блока, МН; D_i – сила гидростатического давления, действующая на грань расчетного блока, МН; $H_{i,i+1}$, $H_{i,i-1}$ – гидростатическое давление на гранях блоков в метрах водяного столба; l_i – длина основания блока, м; γ_w – удельный вес воды, МН/м³; ΔP – удельная нагрузка от оборудования, МПа; $P_{об}$ – общий вес оборудования/сооружения, МН; a – среднее расстояние между опорами, м; b – расстояние от края оборудования/сооружения до верхней бровки, м; Q_i – сейсмическая сила, МН; ξ_i – угол между поверхностью скольжения и направлением сейсмической силы, измеренный в вертикальной плоскости, град.; K_0 – коэффициент, учитывающий назначение сооружения и его ответственность (т.е. для карьеров принимают 1,5, для отвалов – 1,0); K_1 – коэффициент, учитывающий допускаемые повреждения зданий и сооружений ($K_1=0,25$ для бортов и $K_1=0,12$ для уступов и откосов отвалов); k_c – коэффициент сейсмичности, который представляет собой значения ускорения колебаний в долях g ; A – дополнительные удерживающие силы, МН; B – дополнительные сдвигающие силы, МН.

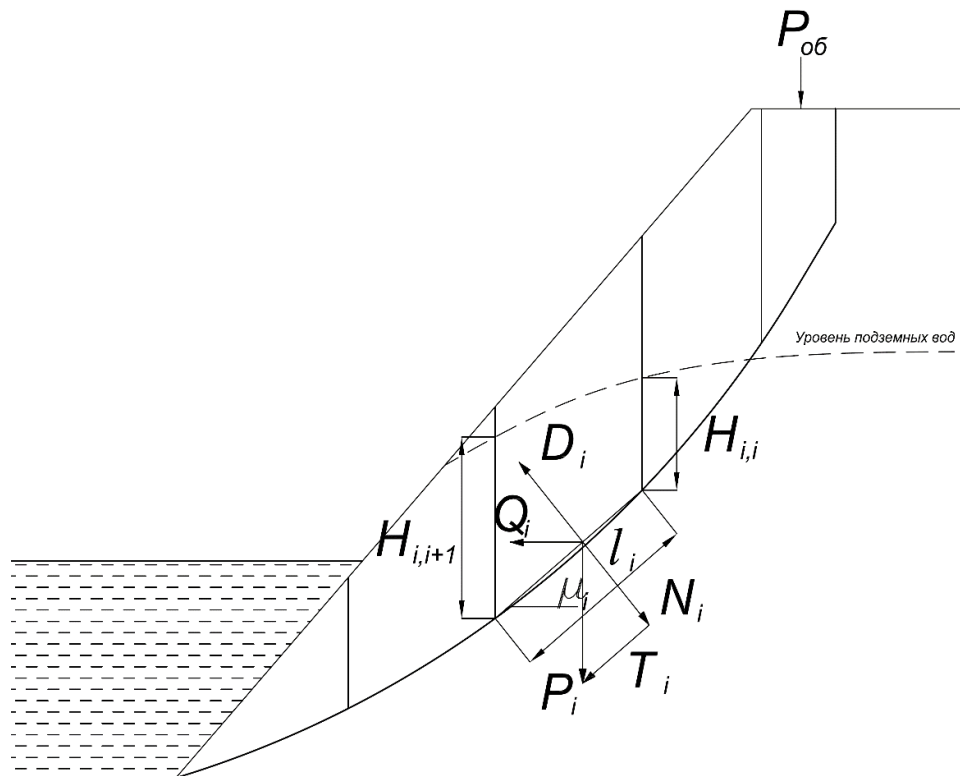


Рисунок 6.2 – Расчет устойчивости обводненного изотропного откоса с учетом воздействия сейсмических сил методом алгебраического сложения сил

6.2.7 Метод алгебраического сложения сил может приводить к занижению коэффициента запаса.

6.2.8 Метод алгебраического сложения сил также может быть использован для оценки устойчивости откосов по общему сопротивлению горных пород сдвигу без разделения его на сцепления и угол трения (по касательным напряжениям). Данный подход допускается применять для водонасыщенных горных пород и отвальных смесей глинистого и песчано-глинистого состава.

Суть подхода заключается в сопоставлении сопротивления сдвигу, полученному при испытании горных пород, с касательным напряжением, действующим по поверхности скольжения при заданном нормальном напряжении (Рисунок 6.3).

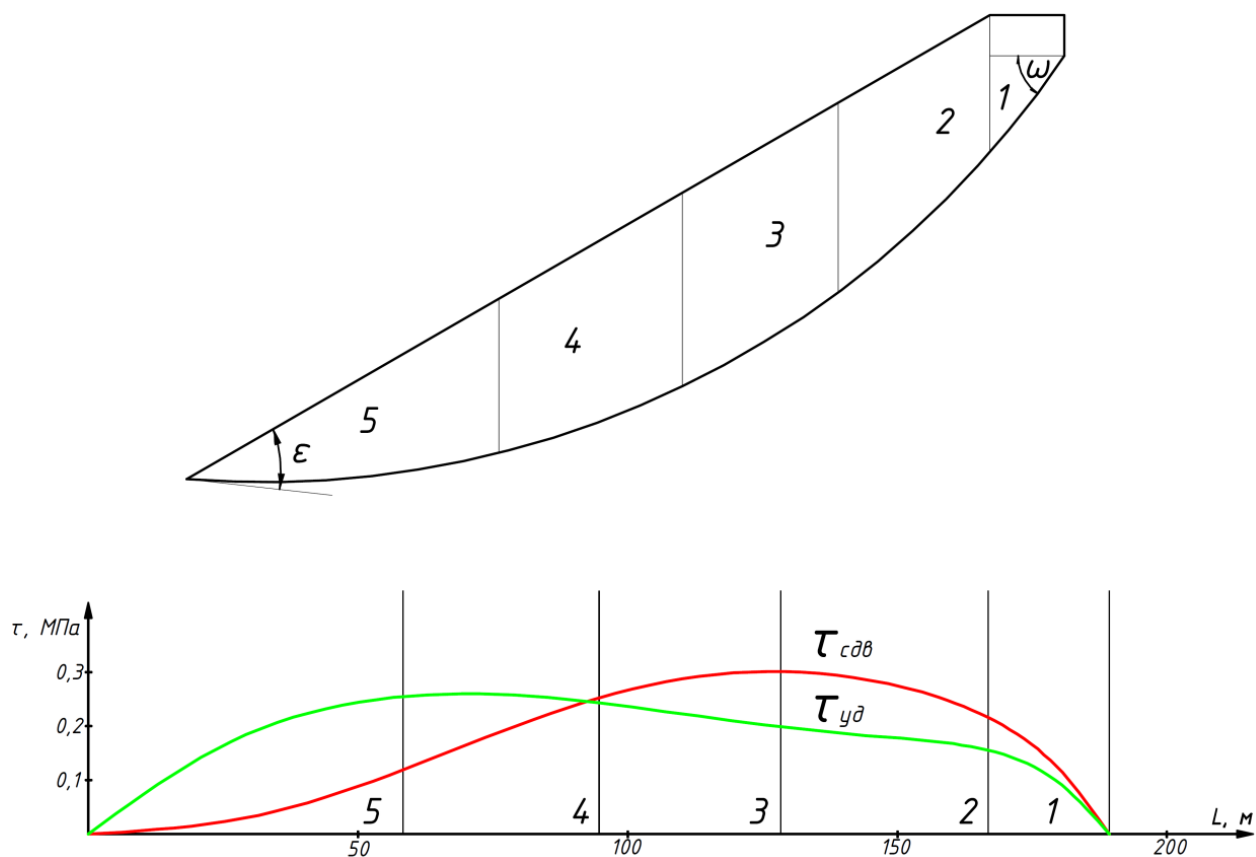


Рисунок 6.3 – Пример расчета коэффициента запаса устойчивости откосов по общему сопротивлению пород сдвигу

В серединах оснований столбиков, на которые разбивается призма, ограниченная расчетной поверхностью скольжения, определяются нормальные и касательные напряжения:

$$\begin{aligned} \sigma_n &= h_i \gamma \cos^2 \mu_i \\ \tau_{сдв} &= 0,5 h_i \gamma \sin 2\mu_i \end{aligned} \quad (6.7)$$

где h_i – высота расчетного блока, на которые разбита призма, оконтуренная наиболее напряженной поверхностью скольжения, м; μ_i – угол наклона основания расчетного блока, град.; l_i – длина основания расчетного блока.

Расчетная поверхность с отмеченными серединами оснований столбиков разворачивается в горизонтальную прямую, и в каждой отмеченной точке по оси ординат откладываются отрезки, соответствующие касательным напряжениям $\tau_{сдв}$, концы которых соединяются плавной кривой (красная линия на рисунке выше). Площадь, ограниченная осью абсцисс и этой кривой, выражает сумму сдвигающих сил, действующих по расчетной поверхности скольжения

По паспортам прочности пород при соответствующих нормальных напряжениях определяются сопротивления сдвигу $\tau_{уд}$, величина которой также откладывается по оси ординат и соединяется плавной кривой (зеленая линия на рисунке выше). Площадь этой эпюры будет являться суммой удерживающих сил

Коэффициент запаса устойчивости в этом случае производится сравнением эпюры (площади) предельно допустимых касательных напряжений и эпюры касательных напряжений в рассматриваемом откосе по формуле:

$$n = \frac{\sum \tau_{уд}}{\sum \tau_{сдв}} \quad (6.8)$$

где $\sum \tau_{уд}$ – сумма касательных напряжений, определенных по графикам сопротивлению сдвигу горной породы при соответствующих нормальных напряжениях; $\sum \tau_{сдв}$ – сумма сдвигающих напряжений, возникающих по наиболее слабой поверхности, являющихся касательными составляющими веса пород по этой поверхности.

6.2.9 Метод векторного сложения сил (многоугольника сил) является наиболее надежным методом и может быть представлен в аналитической или графической форме. Схема расчета методом векторного сложения сил приведена на рисунке ниже (Рисунок 6.4).

6.2.10 При расчете методом многоугольника сил точность расчета зависит от расположения границ между смежными блоками и направлениями реакций между ними.

Предельное равновесие откоса соответствует условию полной мобилизации внутренних сил сопротивления массива горных пород (сцепления и внутреннего трения), поэтому для условия предельного равновесия реакции R отклоняются от нормали к поверхности скольжения на угол внутреннего трения φ .

В откосе, находящемся в допредельном состоянии, реакции отклоняются от нормалей к границам между блоками и к наиболее напряженной поверхности на угол φ_n .

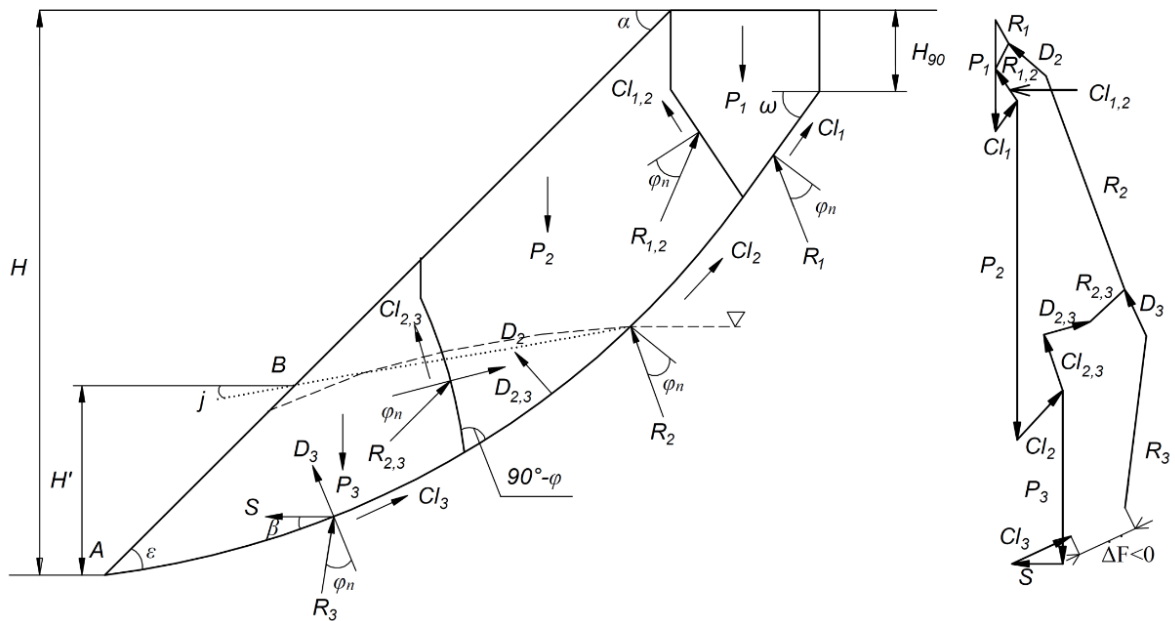


Рисунок 6.4 – Схема расчёта устойчивости обводнённого изотропного откоса с учётом воздействия сейсмических сил методом векторного сложения сил: P_i – вес рассматриваемого блока, мН; $Cl_{i,i+1}$, $Cl_{i,i-1}$, Cl_i – силы сцепления, направленные параллельно соответствующим границам блоков, мН; $D_{i,i+1}$, $D_{i,i-1}$, D_i – силы гидростатического давления по границам блоков, мН; $R_{i,i+1}$, $R_{i,i-1}$, R_i – реакции по границам блоков, мН; S – сейсмическая сила, мН; β – угол наклона сейсмической силы, град.

Построение многоугольника сил производится в следующем порядке:

- а) в определенном масштабе вертикально откладывается вес первого блока P_1 ;
- б) из конца вектора P_1 строятся последовательно векторы Cl_1 и $Cl_{1,2}$, соответственно параллельные боковым поверхностям блока (Рисунок 6.4);
- в) из начала вектора P_1 , проводится отрезок прямой, параллельный R_1 , до пересечения с отрезком прямой, проведённым из конца Cl_2 параллельно $R_{1,2}$;
- г) из конца вектора Cl_1 откладывается вес второго блока P_2 ;
- д) из конца вектора P_2 строятся последовательно векторы Cl_2 и $Cl_{2,3}$;
- е) при обводнении прибортового массива в многоугольник сил вводится гидростатическая сила, которая в рассматриваемом случае действует как по поверхности скольжения – вектор D_2 , который откладывается из точки пересечения векторов R_1 и $R_{1,2}$, так и на границу между блоками 2 и 3 – $D_{2,3}$, и откладывается из конца вектора $Cl_{2,3}$;
- ж) из конца вектора $D_{2,3}$ проводится отрезок прямой, параллельный $R_{2,3}$, а из начала D_2 – отрезок прямой, параллельный R_2 , до их взаимного пересечения и т.д.
- з) сейсмическая сила S прикладывается горизонтально к основанию последнего блока и соответствует по величине сейсмической силе, действующей по всей поверхности скольжения.

Для откоса, находящегося в предельном устойчивом состоянии с заданным коэффициентом запаса, многоугольник сил, построенный по наиболее напряженной поверхности скольжения для всей призмы возможного обрушения, должен замыкаться. Это означает, что его устойчивость обеспечивается с коэффициентом запаса, близким к введенному в прочностные характеристики пород.

Если при расчете многоугольник сил не замыкается, т.е. существует невязка сил ΔF , то устойчивость откоса не соответствует принятому коэффициенту запаса. Для определения коэффициента запаса устойчивости откоса в этом случае необходимо повторить расчет по наиболее напряженной поверхности скольжения при других значениях коэффициентов запаса, введенных в прочностные характеристики. Это позволит построить график зависимости невязок ΔF от коэффициентов запаса n и получить искомый коэффициент запаса n (Рисунок 6.5).

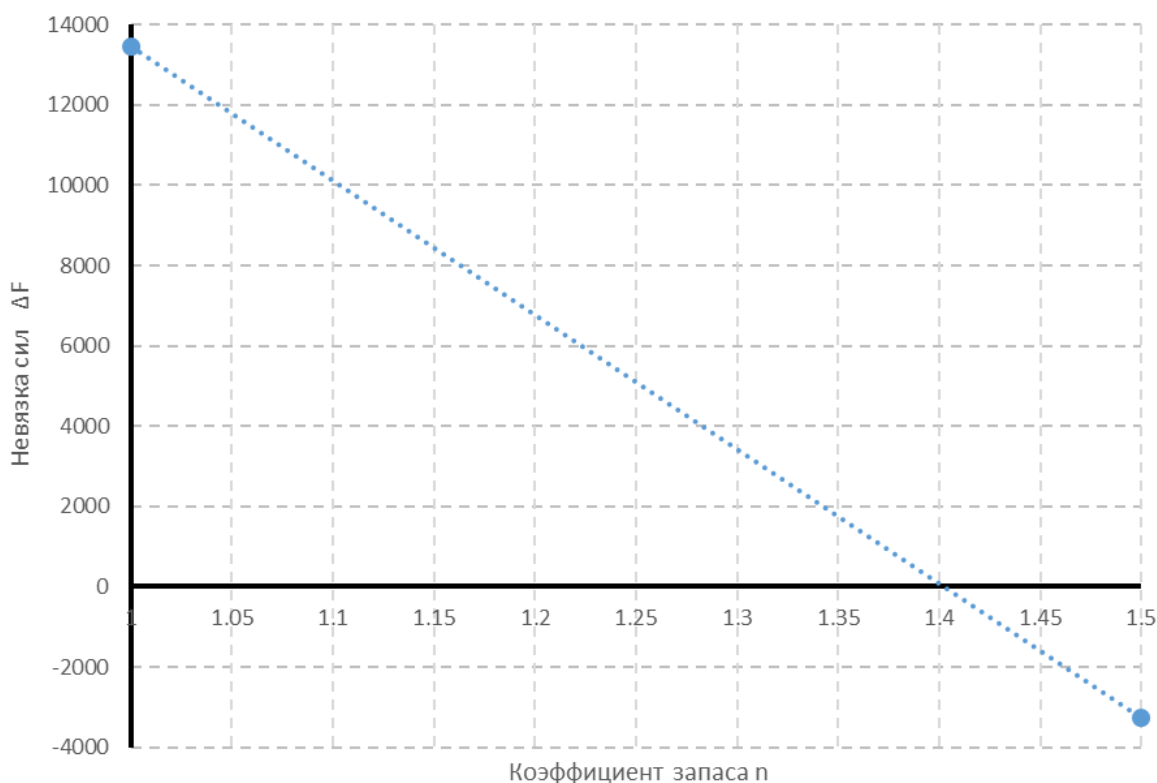


Рисунок 6.5 – График зависимости $\Delta F=f(n)$

6.2.11 К наиболее известным, удовлетворяющим трем уравнениям равновесия, относят способы Спенсера, Моргенштерна-Прайса, Сарма. По усмотрению технического специалиста при соблюдении границ и условий их применения могут использоваться и другие способы расчета.

6.2.12 Выбор расчётных схем определяется на основе анализа инженерно-геологического и структурного строения прибортового массива с учётом принятого масштаба: уступ, группа уступов, борт. Ниже представлены расчетные схемы.

Схема 1. Расчет устойчивости откосов при отсутствии неблагоприятных поверхностей ослабления, либо поверхности ослабления направлены под углами: $-5^\circ < \beta < -60$ (Рисунок 6.6). Знак минус при углах падения поверхностей ослабления (β) означает направление в сторону массива, без знака минус – в сторону выработанного пространства.

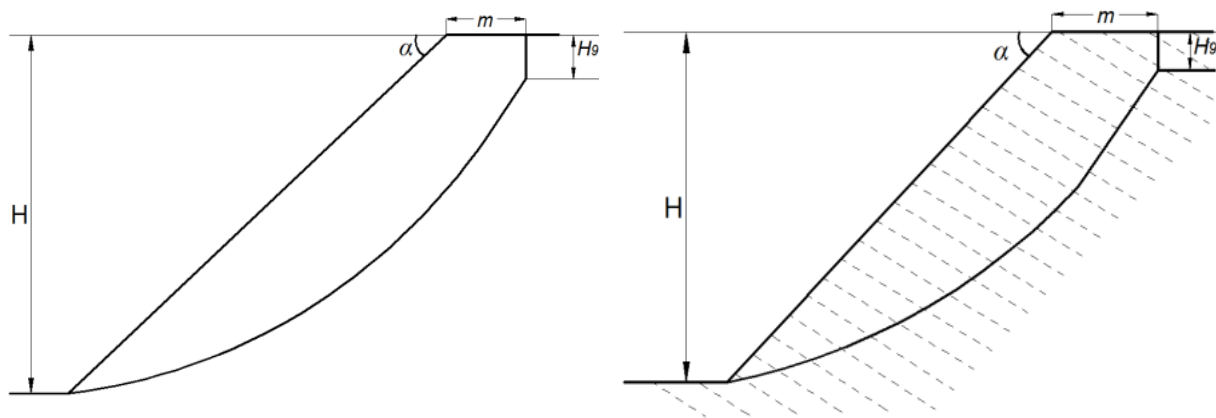


Рисунок 6.6 – Схема расчета устойчивости откосов при отсутствии неблагоприятно направленных поверхностей ослабления

В однородном откосе в общем случае форму поверхности скольжения, по которой производится сравнение сдвигающих и удерживающих сил, принимают плавной криволинейной, близкой к круглоцилиндрической.

Наиболее напряженная поверхность скольжения формируется на расстоянии m (ширина призмы) от верхней бровки откоса, которое определяется по формуле:

$$m = \frac{2H \left[1 - \operatorname{ctg} \alpha \cdot \operatorname{tg} \left(\frac{\alpha + \varphi_n}{2} \right) \right] - 2H_{90}}{\operatorname{ctg} \left(45 - \frac{\varphi_n}{2} \right) + \operatorname{tg} \left(\frac{\alpha + \varphi_n}{2} \right)} \quad (6.9)$$

где: α – угол откоса, град., H – высота откоса, м; H_{90} – вертикальная трещина отрыва, м, φ_n – угол внутреннего трения с введенным коэффициентом запаса, град.

Площадки скольжения возникают на глубине H_{90} , величина которой определяется по формуле (6.2) и наклонены при этом под углом $(45^\circ + \varphi/2)$ к горизонту; на свободную поверхность откоса поверхность скольжения выходит под углом $(45^\circ - \varphi/2)$. Перпендикулярно к линиям, проведенным под углами $(45^\circ \pm \varphi/2)$, проводятся лучи R до их пересечения, как показано на рисунке ниже (Рисунок 6.7). Данная точка является радиусом окружности.

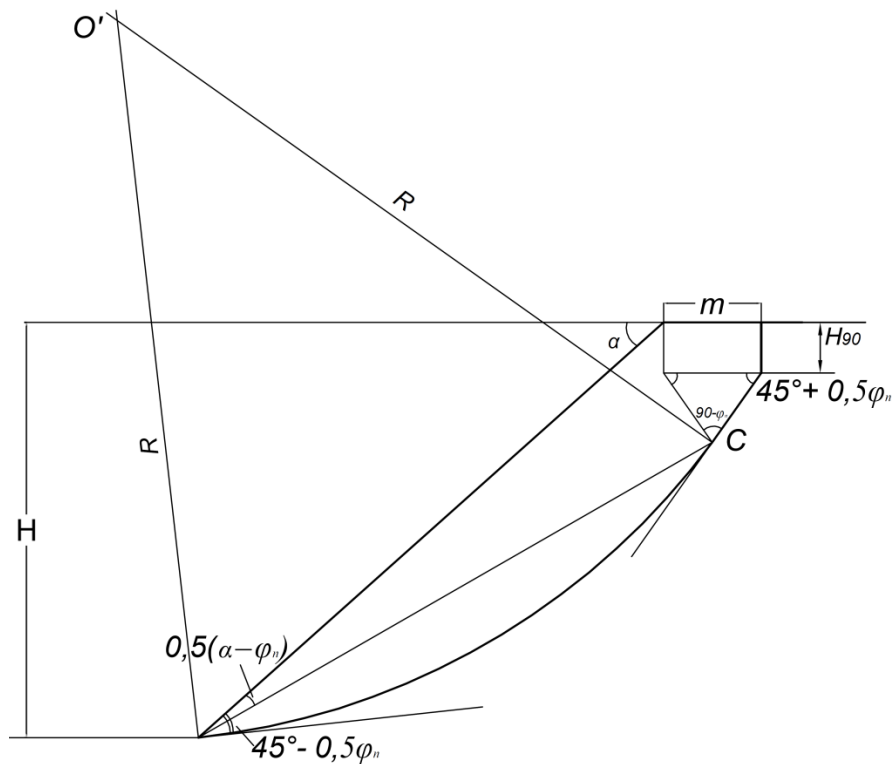


Рисунок 6.7 – Схема построения плавной криволинейной поверхности скольжения

При построении поверхности скольжения в качестве расчетных данных используются средние (для однородной среды) или средневзвешенные (для многослойной среды) прочностные свойства горных пород и их контактов (слоистости, сланцеватости и др.) с введенным коэффициентом запаса.

$$C_n = \frac{C_{cp}}{n} \quad \varphi_n = \arctg \frac{\text{tg } \varphi_{cp}}{n} \quad (6.10)$$

В качестве приближенной оценки предельную высоту откоса допускается определять при заданном угле погашения α по формуле:

$$H \leq \frac{H_{90}}{1 - \sqrt{\text{tg} \left(\frac{\alpha + \varphi}{2} \right) \text{ctg } \alpha}} \quad (6.11)$$

Для реального откоса расчет должен выполняться путем последовательных приближений с использованием методов, приведенных в пунктах 6.2.8, 6.2.10, 6.2.12.

Схема 2. Расчет устойчивости откосов, представленных породами с низкой несущей способностью ($\varphi < 13^\circ$, $\alpha < (45 - 0,5\varphi)$) при отсутствии неблагоприятно направленных поверхностей ослабления (Рисунок 6.8).

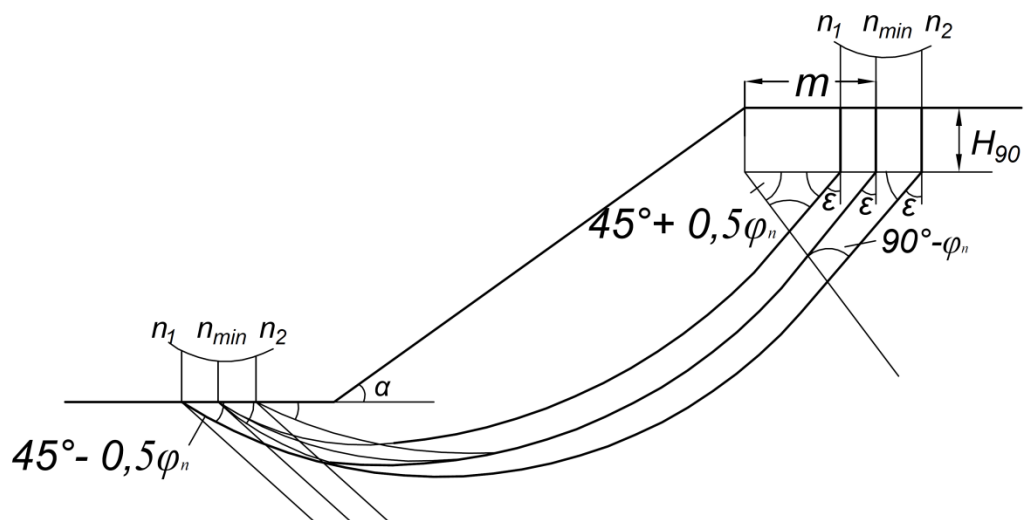


Рисунок 6.8 – Схема расчета устойчивости откосов, представленных породами с низкой несущей способностью $\varphi < 13^\circ$, при отсутствии в массиве неблагоприятно направленных поверхностей ослабления

Построение поверхности скольжения по схеме деформирования откоса со слабым основанием, в нижней и верхней частях близко к построению, приведенному в схеме 1.

Расчет выполняется путем последовательных приближений с использованием методов, приведенных в пункте 6.2.5.

Для данной расчетной схемы наиболее практично использовать специализированное программное обеспечение с целью более достоверного способа определения расположения наиболее напряженной поверхности скольжения.

Схема 3. Расчет устойчивости вертикального откоса при отсутствии в массиве неблагоприятно ориентированных поверхностей ослабления, либо поверхности ослабления направлены под углами: $-5^\circ < \beta < -60^\circ$ (Рисунок 6.9).

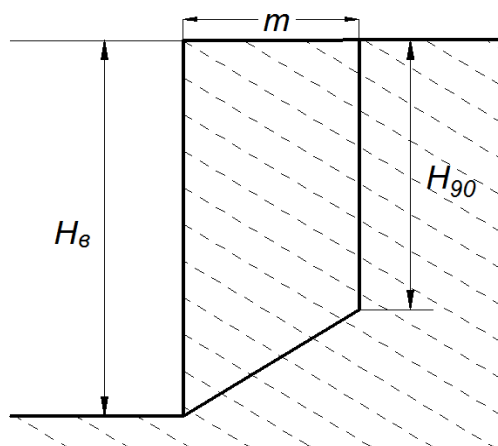


Рисунок 6.9 – Схема расчета устойчивости вертикального откоса при отсутствии в массиве неблагоприятно направленных поверхностей ослабления

Высота вертикального откоса:

$$H_{\epsilon} = H_{90} \left(1 + \sqrt{\frac{\sigma_p}{C} \operatorname{tg}(45 - 0,5\varphi)} \right), \quad (6.12)$$

где σ_p – прочность на одноосное растяжение.

Ширина призмы возможного обрушения:

$$m = H_{90} \sqrt{\frac{\sigma_p}{C} \operatorname{tg}(45 - 0,5\varphi)}. \quad (6.13)$$

Схема 4. Расчет устойчивости вертикального откоса при наличии в массиве поверхностей ослабления с неблагоприятным залеганием, направленным в сторону выработанного пространства при $\beta > \varphi'$ (Рисунок 6.10). Схема применяется при условии $h' \leq H_{90}$ и $H'_{\epsilon} \leq H_{\epsilon}$.

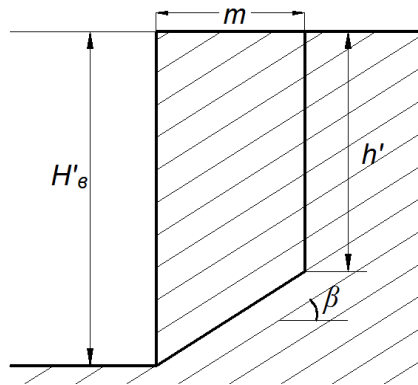


Рисунок 6.10 – Схема расчета устойчивости вертикального откоса при наличии в массиве поверхностей ослабления с неблагоприятным залеганием, направленных в сторону выработанного пространства

Высота вертикального откоса:

$$H'_B = h' + \sqrt{\frac{2\sigma_p h'}{\gamma} \operatorname{tg}(\beta) \operatorname{ctg}(\beta - \varphi')} \quad (6.14)$$

$$h' = \frac{C' \cos \varphi'_n}{\gamma \cos(\beta) \sin(\beta - \varphi')}$$

где β – угол наклона поверхности ослабления, град, h' – глубина, при которой возникают площадки скольжения на контакте (глубина трещины отрыва), м.

Ширина призмы возможного обрушения:

$$m = (H'_{\epsilon} - h') \operatorname{ctg} \beta \quad (6.15)$$

Развитие вертикальной трещины глубиной h' не произойдет, если сопротивление отрыву по этой трещине будет больше сопротивления сдвигу по поверхности ослабления в пределах призмы, оконтуренной наиболее напряженной поверхностью скольжения.

Схема 5. Расчет устойчивости откоса при наличии в массиве поверхностей ослабления с неблагоприятным залеганием, направленных в сторону выработанного пространства при $\beta > \varphi'$, и угле откоса $\alpha > \beta$ (Рисунок 6.11).

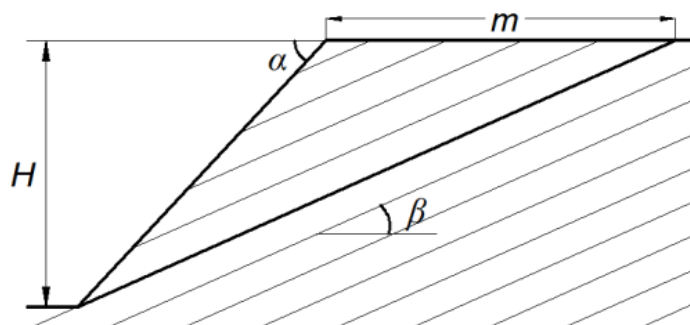


Рисунок 6.11 – Схема расчета устойчивости откоса при наличии в массиве поверхностей ослабления с неблагоприятным залеганием, направленным в сторону выработанного пространства

Высота откоса

$$H = \frac{2C'}{\gamma} \frac{\sin \alpha \cos \varphi'}{\sin(\alpha - \beta) \sin(\beta - \varphi')}; \quad (6.16)$$

Ширина призмы возможного обрушения

$$m = H(\operatorname{ctg} \beta - \operatorname{ctg} \alpha) \quad (6.17)$$

Высота откоса, вычисленная по формуле (6.16), не должна превышать высоты откоса, установленной по формуле (6.23).

Схема 6. Расчет устойчивости откоса, представленного сильнотрещиноватыми породами, при наличии в массиве поверхностей ослабления с неблагоприятным залеганием, направленным в сторону выработанного пространства при $\beta > \varphi'$, и угле откоса $\alpha > \beta$ (Рисунок 6.12).

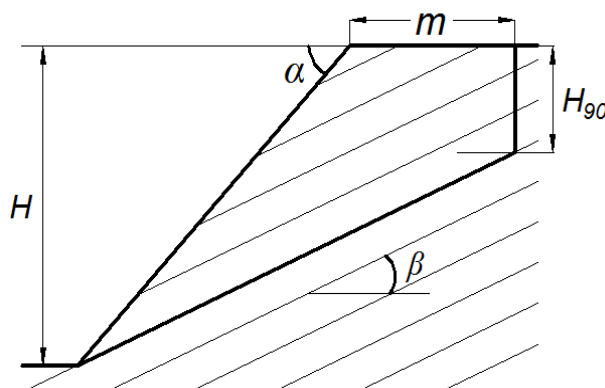


Рисунок 6.12 – Схема расчета устойчивости откоса, представленного сильнотрещиноватыми породами, при наличии в массиве поверхностей ослабления с неблагоприятным залеганием, направленным в сторону выработанного пространства

Высота откоса:

$$H = \frac{C' \cos \varphi'}{\gamma \cos \beta \sin (\beta - \varphi') (1 - \sqrt{\operatorname{ctg}(\alpha) \operatorname{tg}(\beta)})} \quad (6.18)$$

Ширина призмы возможного обрушения

$$m = (H - H_0) \operatorname{ctg} \beta - H \operatorname{ctg} \alpha \quad (6.19)$$

Схема 7. Расчет устойчивости откоса, подсеченного двумя поверхностями ослабления (Рисунок 6.13).

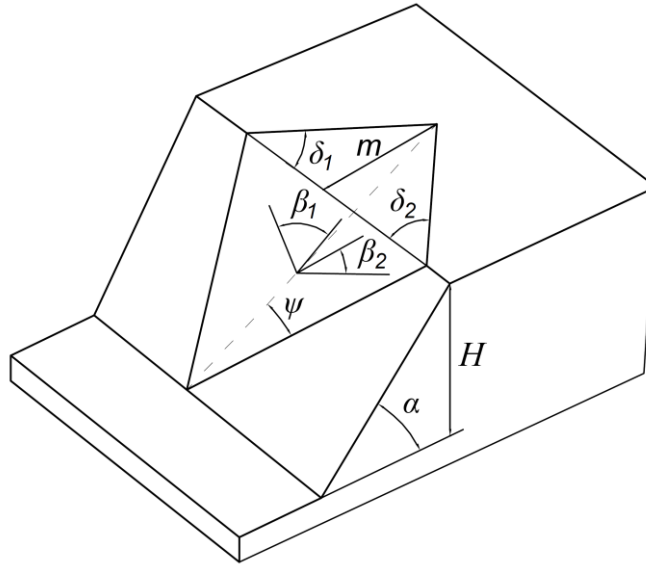


Рисунок 6.13 – Расчет устойчивости откоса, подсеченного двумя поверхностями ослабления

Высота откоса:

$$H = \frac{3\sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \psi}}{\gamma \sin(\delta_1 + \delta_2) (\operatorname{ctg} \psi' - \operatorname{ctg} \alpha)} \cdot \left[\frac{C_1 \sin \delta_2}{\sin \beta_1 (\operatorname{tg} \psi - \operatorname{tg} \varphi_1')} + \frac{C_2 \sin \delta_1}{\sin \beta_2 (\operatorname{tg} \psi - \operatorname{tg} \varphi_2')} \right] \quad (6.20)$$

$$\operatorname{tg} \psi = \frac{\sin(\delta_1 + \delta_2)}{\sqrt{\operatorname{ctg}^2 \beta_1 + \operatorname{ctg}^2 \beta_2 - 2 \operatorname{ctg} \beta_1 \operatorname{ctg} \beta_2 \cos(\delta_1 + \delta_2)}} \quad \operatorname{ctg} \psi' = \frac{\sin \delta_1 \operatorname{ctg} \beta_2 + \sin \delta_2 \operatorname{ctg} \beta_1}{\sin(\delta_1 + \delta_2)}$$

где δ_1 и δ_2 – углы между простираем уступа и поверхностью ослабления, град.; ψ – угол наклона линии скрещивания поверхностей ослабления, град., ψ' – угол наклона линии скрещения поверхностей ослабления в плоскости, перпендикулярной плоскости откоса, град.

Ширина призмы возможного обрушения:

$$m = \frac{3\sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \psi}}{\gamma \sin(\delta_1 + \delta_2)} \cdot \left[\frac{C_1 \sin \delta_2}{\sin \beta_1 (\operatorname{tg} \psi - \operatorname{tg} \varphi_1')} + \frac{C_2 \sin \delta_1}{\sin \beta_2 (\operatorname{tg} \psi - \operatorname{tg} \varphi_2')} \right] \quad (6.21)$$

Схема 8. Заоткоска по наслоению (Рисунок 6.14). Частный случай схемы 9. Расчет устойчивости откоса с неблагоприятным залеганием поверхностей ослабления, направленных в сторону выработанного пространства при $\beta > \varphi'$ и угле откоса $\alpha = \beta$

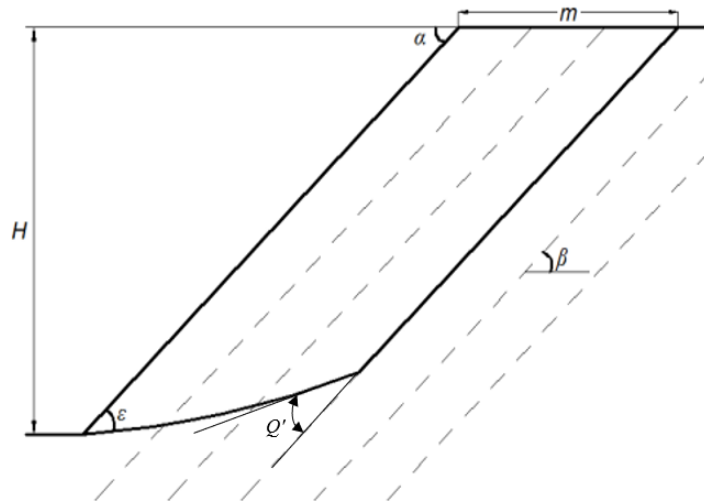


Рисунок 6.14 – Заоткоска по наслоению

При заоткоске уступов по наслоению их устойчивость определяется не только углом падения слоев и сопротивлением сдвигу по поверхностям ослабления, но и сопротивлением срезу пород в нижней части уступа. Верхняя часть поверхности скольжения формируется вдоль поверхности ослабления (слоистость, сланцеватость и др. контактов), форма нижней части поверхности скольжения на участке среза пород близка к круглоцилиндрической, а ориентировка в пространстве определяется углами ε и θ' . Значения этих углов в соответствии с теорией предельного равновесия в сыпучей среде вычисляются следующим образом:

$$Q = 45 + 0,5(\varphi_1 - \varphi_2) - 0,5 \arcsin \left(\frac{\sin \varphi_2}{\sin \varphi_1} \right) \quad (6.22)$$

$$\varepsilon = 45^\circ + \varphi/2$$

В сильно трещиноватых породах и в породах с четко выраженным отличием прочностных свойств горных пород и поверхностей ослабления, поверхность скольжения в нижней части может также совпадать с ослабленными контактами.

Высота откоса, сложенного слабо трещиноватыми породами:

$$H = (b + 2ac) + \sqrt{(b + 2ac)^2 - b^2}$$

$$a = \frac{\sin \alpha}{\sin(\alpha - \varphi')} \left[0,5(3ctg\varepsilon - ctg\alpha) \sin(\alpha - \varphi') + \frac{ctg\varepsilon \cos(\alpha + \varepsilon) \cos(\varepsilon - \varphi')}{\cos \varphi} \right] \quad (6.23)$$

$$b = \frac{\sin \alpha}{\sin(\alpha - \varphi')} \left[\frac{2C}{\gamma} \cos \varphi' ctg\varepsilon - \frac{C'}{\gamma} (ctg\varepsilon - ctg\alpha) \cos \varphi' \right] \quad c = \frac{C' \cos \varphi'}{\gamma \sin(\alpha - \varphi')}$$

Ширина призмы возможного обрушения:

$$m = \frac{H - b}{2a \sin \beta} \quad (6.24)$$

Высота откоса, представленного сильно трещиноватыми породами:

$$H = \frac{H_{90}}{1 - \operatorname{ctg} \alpha \operatorname{tg} \psi'} \quad \psi'_{\text{сдв}} = \operatorname{arctg} \left(\operatorname{tg} \phi' + \frac{C'}{\sigma_{\text{ср}}} \right) \quad (6.25)$$

где $\psi'_{\text{сдв}}$ – угол сдвига по контакту слоев, град., $\sigma_{\text{ср}}$ – средняя интенсивность нормального напряжения по наиболее напряженному контакту.

При средней интенсивности нормального напряжения более 0,1 МПа допускается пренебрегать отношением $C'/\sigma_{\text{ср}}$.

Угол откоса при заданной его высоте для сильно трещиноватых пород определяется по формуле:

$$\operatorname{ctg} \alpha = \operatorname{ctg} \psi \left(1 - \frac{H_{90}}{H} \right) \quad (6.26)$$

Схема 9. Расчет устойчивости откоса при наклонном и крутом залегании поверхностей ослабления с падением в сторону выработанного пространства при $\alpha < \beta < 90$ и $\beta > \phi'$ (Рисунок 6.15). Поверхность скольжения формируется аналогично описанию, приведенному в пункте 6.2.20.

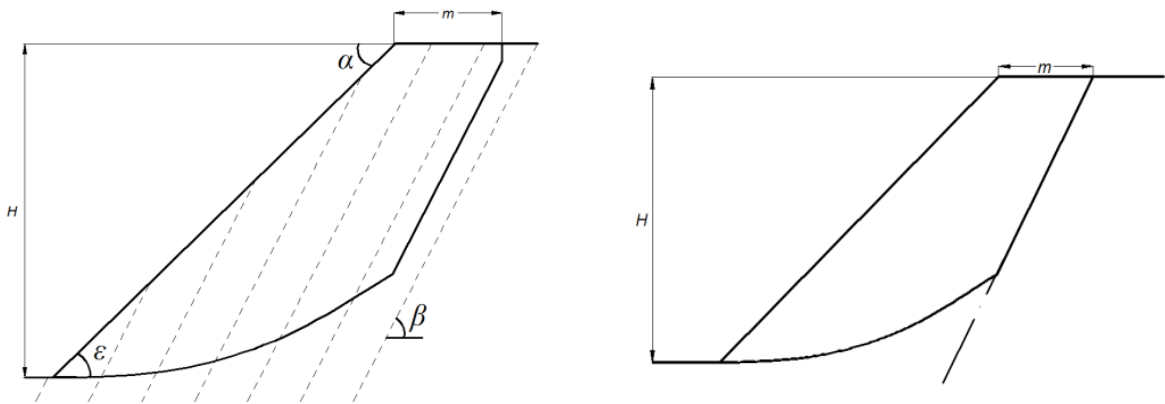


Рисунок 6.15 – Схема расчета устойчивости откоса при наклонном и крутом залегании поверхностей ослабления с падением в сторону выработанного пространства

Расчет выполняется путем последовательных приближений с использованием методов, приведенных в пункте 6.2.5.

Частным случаем является откос, подсеченный нарушением. В этом случае поверхность скольжения в верхней части совпадает с нарушением.

Схема 10. Расчет устойчивости откоса при пологом залегании поверхностей ослабления при $\beta < \phi'$, $-5 < \beta < 25^\circ$ (Рисунок 6.16).

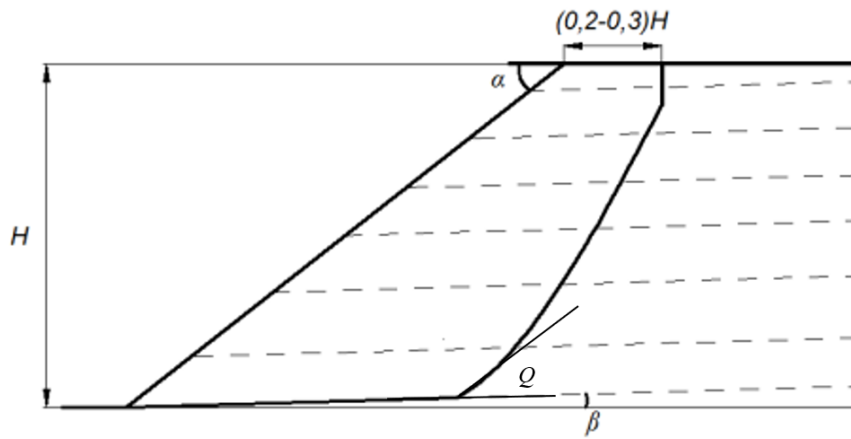


Рисунок 6.16 – Схема расчета устойчивости откоса при пологом залегании поверхностей ослабления

В предельном состоянии откоса формируется поверхность скольжения, которая в нижней части массива совпадает с поверхностью ослабления, а в верхней части - имеет форму монотонной криволинейной поверхности, близкой к круглоцилиндрической.

Расчет выполняется путем последовательных приближений с использованием методов, приведенных в пункте 6.2.5.

Схема 11. Расчет устойчивости откоса при наличии слабого слоя, общее сопротивление сдвигу которого ниже, чем у вышезалегающих пород (Рисунок 6.17).

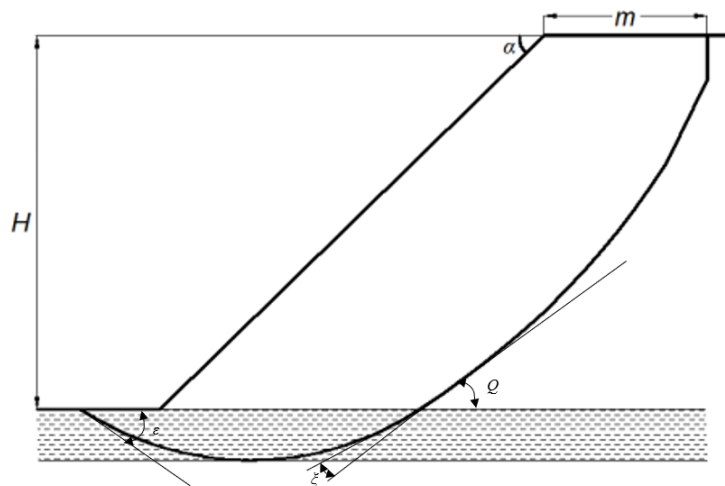


Рисунок 6.17 – Схема расчет устойчивости откоса при наличии слабого слоя

Построение поверхности скольжения по схеме деформирования откоса со слабым основанием, в нижней и верхней частях близко к построению, приведенному в схеме 1. На границе слоев поверхность скольжения имеет излом под углами:

$$Q = 45 + 0,5(\varphi_1 - \varphi_2) - 0,5\arcsin\left(\frac{\sin\varphi_2}{\sin\varphi_1}\right) \quad (6.27)$$

$$\xi = \frac{\varphi_1 - \varphi_2}{2}$$

где φ_1, φ_2 – угол внутреннего трения пород, залегающих выше и ниже нижней бровки откоса соответственно.

Степень заглубления поверхности скольжения зависит от мощности и физико-механических характеристик слабого слоя.

Расчет выполняется путем последовательных приближений с использованием методов, приведенных в пункте 6.2.5.

Схема 12. Расчет устойчивости откоса при мульдообразном залегании пород (Рисунок 6.18).

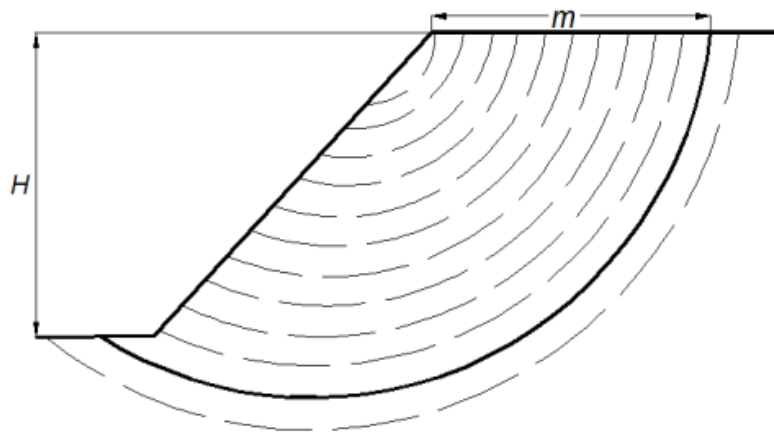


Рисунок 6.18 – Схема расчет устойчивости откоса при мульдообразном залеганием пород

В зависимости от рассматриваемого масштаба «откос-залегание горных пород» в расчетах могут использоваться схемы 8-10.

Расчет выполняется путем последовательных приближений с использованием методов, приведенных в пункте 6.2.5.

Схема 13. Определение параметров откоса при его деформировании путем изгиба слоев (Рисунок 6.19). Данная схема применима при наличии крутопадающих поверхностей ослабления, направленных в массив (обратное падение) при $60 \leq \beta \leq 90$.

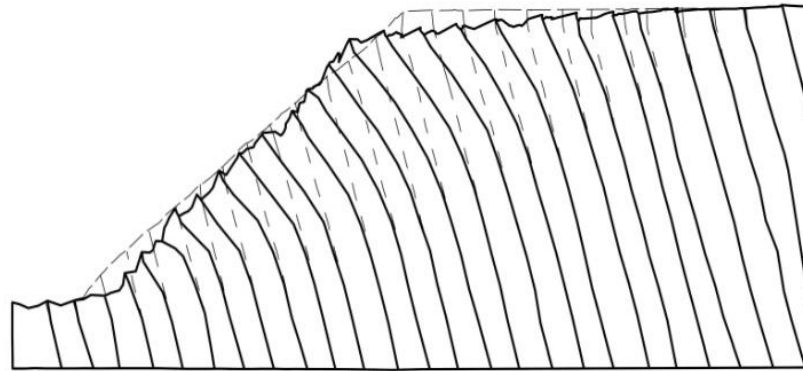


Рисунок 6.19 – Схема деформирования откоса путем изгиба слоев

В качестве приближенного и грубого подхода допустимо введение в угол изотропного откоса ($\alpha_{из}$) поправок ($\Delta\alpha$) на основании графика ниже (Рисунок 6.20):

$$\alpha_{сл} = \alpha_{из} - \Delta\alpha \quad (6.28)$$

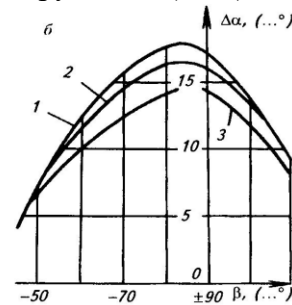
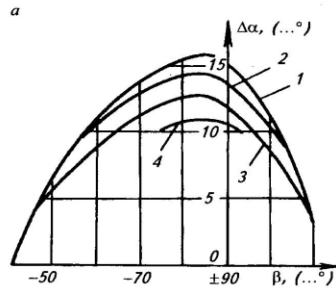
При углах изотропного откоса менее 42 град, определение поправки $\Delta\alpha$ по графикам, приведенным на рисунке ниже (Рисунок 6.20), приводит к некоторому увеличению запаса устойчивости.

Для более точной оценки необходимо проводить физическое или численное моделирование.

При проведении численного моделирования необходимо оценивать не только несущую способность откоса, но и возможные величины наблюдаемых деформаций. В качестве допустимых деформаций следует принимать значения, которые наблюдаются у откосов при коэффициенте запаса устойчивости 1,3. В случае принятия решения о возможности проявления больших значений деформаций, эксплуатация борта карьера на верхних горизонтах будет затруднена в виду раскрытия трещин и образования провалов.

а - при полном опрокидывании слоев

б - на момент скачка деформации (смещения 0,5-2 м и ширина заколов 0,3-0,6 м при $H=100$ м; смещения 1,0-4,0 м и ширина заколов 0,5-1,0 м при $H=200$ м; относительные деформации за призмой обрушения $(5-10) \cdot 10^{-3}$)



в - при появлении видимых трещин (смещения 0,1-0,2 м при $H=100$ м; смещения 0,2-0,4 м при $H=200$ м; относительные деформации в призме обрушения $(2-6) \cdot 10^{-3}$)

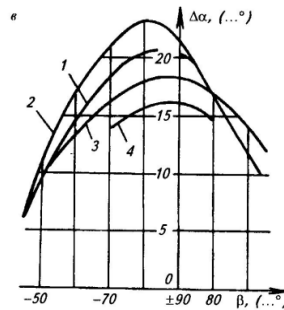


Рисунок 6.20 – Графики поправок к углам погашения изотропных откосов $\alpha_{из}$ при определении предельных углов наклона бортов в слоистых массивах по схеме 13: 1 – $\alpha_{из} = 57^\circ, \varphi' = 17^\circ$; 2 – $\alpha_{из} = 52^\circ, \varphi' = 17^\circ$; 3 – $\alpha_{из} = 52^\circ, \varphi' = 24^\circ$; 4 – $\alpha_{из} = 52^\circ, \varphi' = 30^\circ$.

Схема 14. Расчет устойчивости откосов при различной комбинации видов деформирования (Рисунок 6.21). Геолого-структурное строение отличается от схем 1-13 или представляет их комбинацию.



Рисунок 6.21 – Схема деформирования откоса, в котором может наблюдаться различная комбинация механизмов разрушения

Расчет выполняется путем последовательных приближений с использованием методов, приведенных в пункте 6.2.5 и/или с применением физического или численного моделирования.

6.2.13 Схемы 4-6, 8-9, 13 применимы при условии, если простираемость поверхностей ослабления отличается от простираемости поверхностей бортов и уступов карьеров не более чем на 20 град.

6.2.14 Построение выпуклого профиля борта карьера осуществляется путем установления максимального угла наклона для каждого его элемента, обеспечивающего его устойчивость и устойчивость всех групп элементов борта, начиная с нижнего элемента на уровне дна карьера.

Допускается построение уступов сложного (полигональной и другие) профиля.

6.2.15 Параметры уступов определяются структурным строением и физико-механическими свойствами горных пород и их контактов.

6.2.16 Углы откосов несвязных горных пород (песков, галечников, гравия) принимают равными углам их естественного откоса – 35-38 градусов.

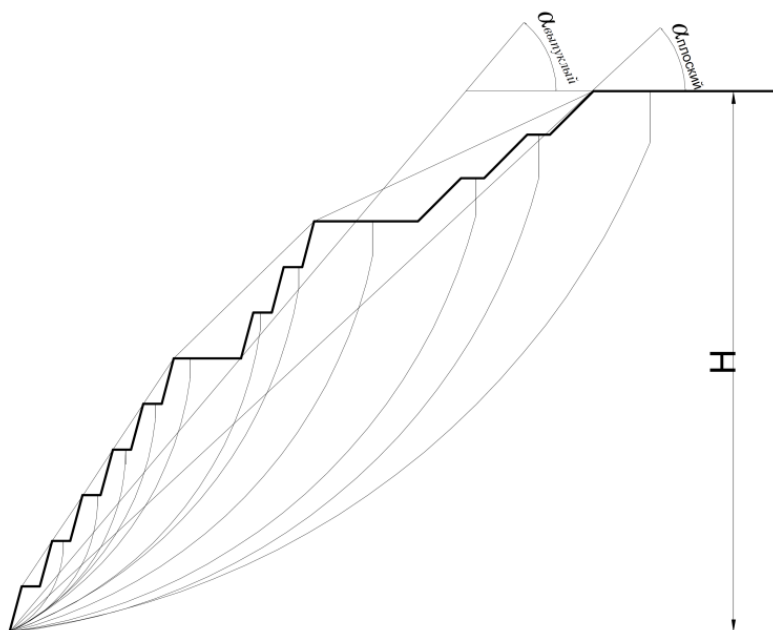


Рисунок 6.22 – Схема построения откоса с предельными параметрами

6.3 Методы численного моделирования

6.3.1 Методы численного моделирования расширяют возможности оценки устойчивости откосов и наиболее часто применяются:

- для заверки результатов расчетов методом предельного равновесия;

- при оценке устойчивости откосов при различной комбинации видов деформирования;
- для прогноза деформаций и напряжений при комбинированной разработке месторождений;
- при учете нелинейного поведения горных пород в различных напряженных состояниях;
- оценка влияния динамического воздействия от оборудования или землетрясений;
- прогноз теплофизических процессов в откосах.

6.3.2 Для численного моделирования и оценки устойчивости откосов могут применяться методы механики сплошной среды (методы конечных элементов, конечных разностей, граничных элементов и др.), дискретных сред (метод дискретных элементов или его аналоги), переходные задачи дискретно-сплошной среды (метод конечно-дискретных элементов).

Для моделирования могут использоваться различные модели деформирования массива (упругая, упругопластическая, с упрочнением, с разупрочнением и др.) с применением различных критериев прочности массива (Кулона-Мора, Хука-Брауна и др.).

6.3.3 При численном моделировании расчет коэффициента запаса устойчивости бортов и уступов карьеров осуществляется путем поэтапного снижения прочности на сдвиг до появления в расчете пластических деформаций.

6.3.4 Границы численных моделей по высоте и в плане должны быть удалены за границы возможной зоны деформирования массива (Рисунок 6.23). Сами границы должны быть закреплены и/или нагружены, исходя из заданных смещений или напряжений.

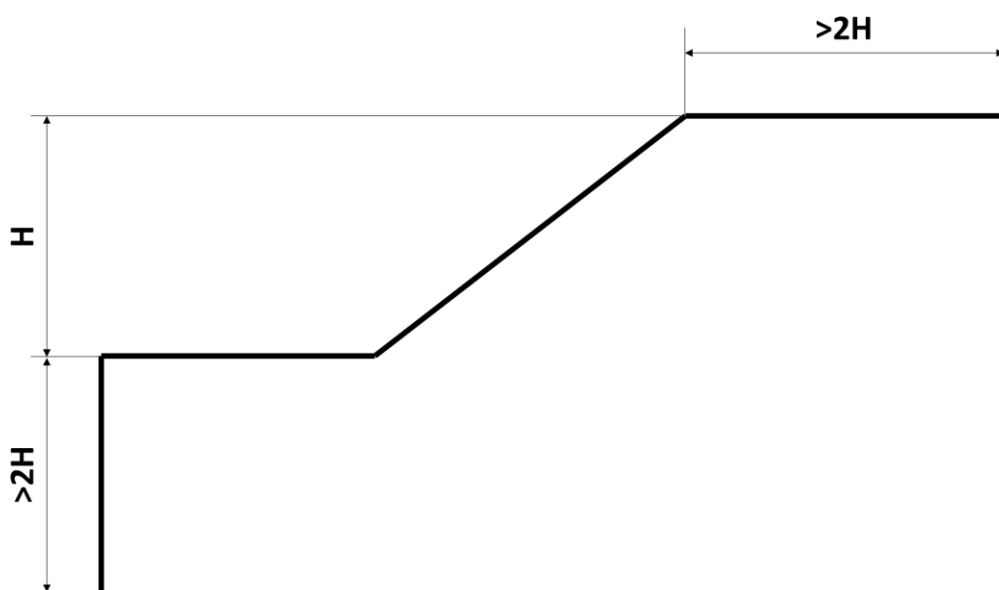


Рисунок 6.23 – Рекомендуемые границы модели для численного моделирования

6.3.5 При моделировании массивов скальных и полускальных пород необходимо учитывать структурное строение. Все разломы учитываются только в явном виде с учетом фактического их расположения. Поверхности ослабления в зависимости от степени изученности строения прибортового массива могут быть заданы в явном и неявном виде.

6.3.6 В неявном виде подразумевается введение коэффициентов структурного ослабления в прочностные и деформационные свойства горных пород, полученных в лабораторных условиях или использование эквивалентных свойств.

6.3.7 При подробном изучении массива при численном моделировании допускается задавать трещиноватость в явном виде: указать элементы залегания, длину поверхности ослабления и породных перемычек.

6.3.8 При численном моделировании действие давления воды в прибортовом массиве необходимо учитывать сеткой порового давления, либо заданием уровня(ей) подземных вод.

6.3.9 Возможное сейсмическое воздействие учитывается одним из следующих способов: псевдостатический способ, метод Ньюмарка, решение динамической задачи путем задания полной или синтезированной акселерограммы.

6.3.10 При численном моделировании для корректного определения смещений необходимо использовать поэтапную выемку, где первым этапом воссоздаются условия до ведения горных работ с учетом природного поля напряжений и гидрогеологических условий. При интерпретации результатов моделирования смещений необходимо обнулить все смещения первого этапа. Количество моделируемых этапов определяется специализированной организацией в зависимости от решаемой задачи.

6.4 Методы физического моделирования

6.4.1 Методы физического моделирования используются для особо сложных горно-геологических условий при оценке несущей способности прибортовых массивов и их деформаций на различных этапах отработки месторождения при разной степени устойчивости откосов.

6.4.2 Основным методом физического моделирования прибортовых массивов в различных горно-геологических условиях является моделирование на эквивалентных материалах (ЭМ).

6.4.3 Метод моделирования ЭМ базируется на теории подобия и заключается в воспроизведении в определенном масштабе структуры и физико-механических характеристик массива, процесса добычи полезного ископаемого, определении

качественных и количественных характеристик напряжений, деформаций и акустической эмиссии в массиве.

6.4.4 При физическом моделировании следует соблюдать следующие критерии подобия:

– геометрическое подобие

$$\alpha_l = \frac{l}{L} \quad (6.29)$$

где l, L – размеры в модели и в натуре;

– динамическое подобие:

$$\alpha_\gamma = \frac{\gamma_m}{\gamma_n} \quad (6.30)$$

где γ_m, γ_n – плотность в модели и в натуре;

– кинематическое подобие

$$\alpha_t = \frac{t}{T} \quad (6.31)$$

где t, T – время протекания процессов в модели и в натуре.

Полнота соблюдения критериев подобия определяется решаемой геомеханической задачей.

6.4.5 При моделировании процессов деформирования и разрушения горных пород необходимо соблюдение следующих условий:

$$N_m = \alpha_l \alpha_\gamma N_n, \quad \operatorname{tg} \varphi_m = \operatorname{tg} \varphi_n, \quad \nu_m = \nu_n \quad (6.32)$$

где N_m, N_n – физико-механические характеристики модели и природы, имеющие размерность сила/ площадь; ν_m, ν_n – коэффициент Пуассона в модели и в натуре.

6.4.6 При моделировании геомеханических процессов должны соблюдаться начальные и граничные условия, соответствующие воспроизводимой области массива.

6.4.7 Для обеспечения критериев подобия необходимо обеспечить подбор ЭМ, соответствующих этим критериям.

В качестве ЭМ применяются материалы с наполнителями из мелкодисперсного кварцевого песка, чугушной буровой дроби, слюды со связующими из солидола, машинного масла, парафина, вазелина. Перемешивание компонентов для создания смесей ЭМ осуществляется в специальных смесителях. Для воспроизведения поверхностей ослабления используется тонкие слои слюды, графита, талька или солидола. Для моделирования могут

использоваться и другие материалы, позволяющие соблюсти критерии подобия. Примеры рецептур и параметров ЭМ приведены в приложении Б.

6.4.8 При изготовлении моделей эквивалентные материалы послойно укладываются в специальную опалубку на стенде и уплотняются с помощью металлических катков при определенном количестве циклов «укатки».

6.4.9 Для создания объемного напряженного состояния допускается использовать боковые стенки, либо стяжки, устанавливаемые в модель в ходе ее изготовления.

Для уменьшения влияния трения между боковыми стенками и моделью, препятствующего развитию исследуемых процессов деформаций, применяются различного рода смазки, пластичные волокна и др. Стяжки устанавливаются в модель с определенной частотой, они не создают дополнительного трения и представляют собой парные шайбы различного диаметра и толщины, соединенные между собой металлическими стержнями.

6.4.10 Для исследования геомеханических процессов в «теле» модели в процессе ее изготовления устанавливаются датчики (вид датчиков определяется программой исследования), а на ее поверхности, либо на стяжках – марки для определения деформаций модели.

6.4.11 Степень подробности и этапность физического моделирования зависит от сложности и детальности моделируемых геомеханических процессов.

Отработка модели (приведение модели от исходного положения к моменту предельного равновесия) проводится путем постепенного увеличения высоты и угла откоса модели:

Одновременно с отработкой ведется наблюдение за характером развития деформаций и разрушений в модели. Допускается выполнять фото и видео фиксацию происходящих процессов и запись сигналов с датчиков, подключенных к информационно-измерительной системе. После отработки модели производится обработка всех полученных данных. Примеры параметров ЭМ и моделирования борта карьера представлен в приложении Б.

6.5 Вероятностный метод

6.5.1 Вероятностный метод используется как дополнительный к детерминированному способу для учета влияния изменчивости факторов на любом этапе проектирования карьера.

6.5.2 Оценка вероятности обрушения откоса основана на многовариантных расчетах его коэффициентов запаса устойчивости при различных сочетаниях исходных

данных (например, прочностные характеристики массива горных пород, параметры трещиноватости и т.д.) в пределах их изменчивости. При расчетах вероятности обрушения допускается учитывать только наиболее значимые показатели.

Вероятность обрушения определяется как отношение количества вариантов с коэффициентом запаса менее единицы ($N_{[n<1]}$) к общему количеству вариантов расчетов (N) (Рисунок 6.24).

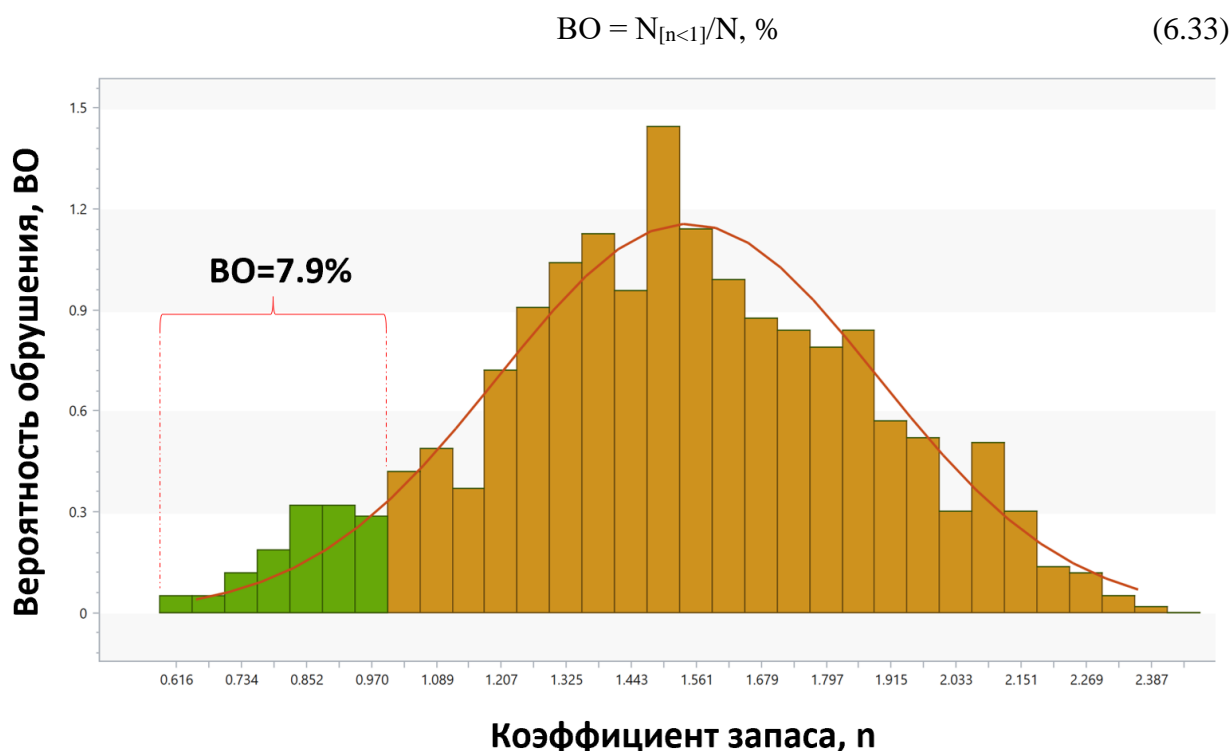


Рисунок 6.24– Вероятность обрушения по результатам многовариантных расчетов коэффициентов запаса

6.5.3 В скальных трещиноватых породах вероятностному анализу предшествует выбор возможных схем деформирования откосов (кинематический анализ).

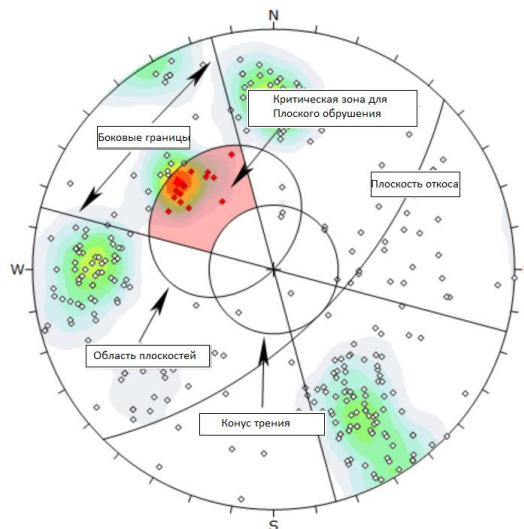
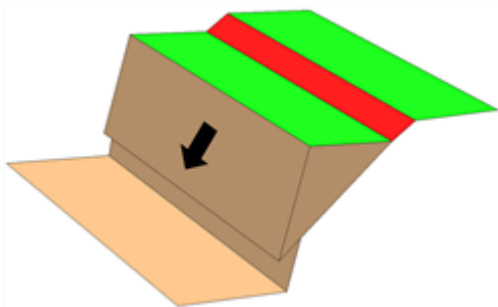
Кинематический анализ определяет неблагоприятные системы трещин при разных направлениях падения откосов.

Основными схемами деформирования уступов в скальных трещиноватых породах являются: плоская, клиновидная, опрокидывания. Пример кинематического анализа по стереографическим проекциям приведен на рисунках ниже (Рисунок 6.25).

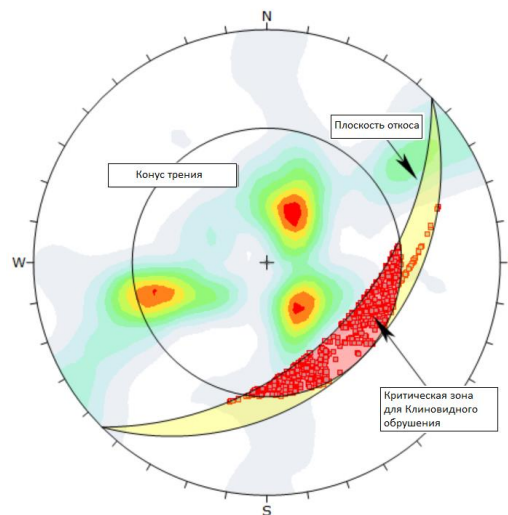
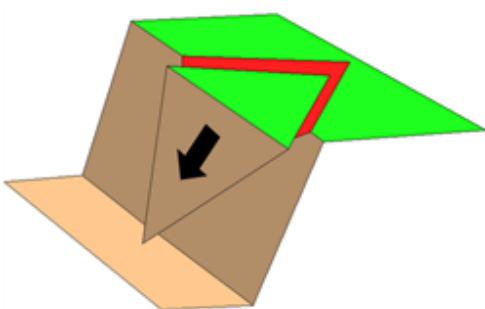
Схема обрушения

Стереограмма трещиноватости

а)



б)



в)

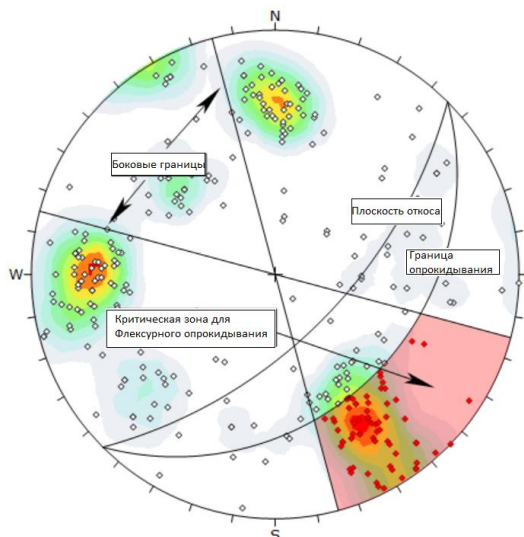
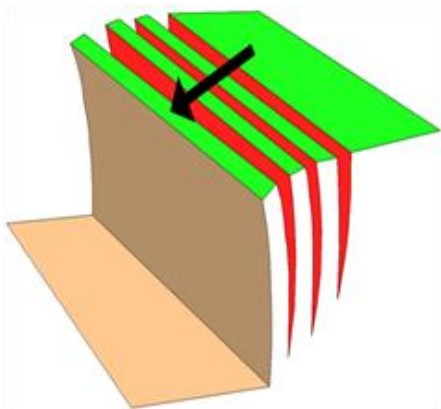


Рисунок 6.25 – Пример кинематического анализа: а) плоская деформация, б) клиновидная деформация, в) деформация опрокидывания

6.5.4 Оценку вероятности обрушения в скальных трещиноватых породах допускается проводить по методу ключевых блоков [4] путем отнесения длины обрушенной верхней бровки уступа ($L_{об}$) к анализируемой длине уступа (L), выраженной в процентах:

$$BO = \frac{L_{об}}{L} \times 100, \% \quad (6.34)$$

В данном методе моделируемый блок оценивается на предмет его подвижности в окружающем массиве (ключевой блок – блок, ограниченный сплошными трещинами и способный беспрепятственно обрушиться в выработку), Рисунок 6.26. Силы сцепления по контактам поверхностей ослабления принимаются равными нулю, углы трения принимаются по результатам лабораторных испытаний, обратных расчетов или по методу аналогий. Варьируемыми параметрами являются элементы залегания поверхностей ослабления, расстояние между системами трещин, протяженность поверхностей ослабления, также необходимо знать минимальные и максимальные значения данных параметров.

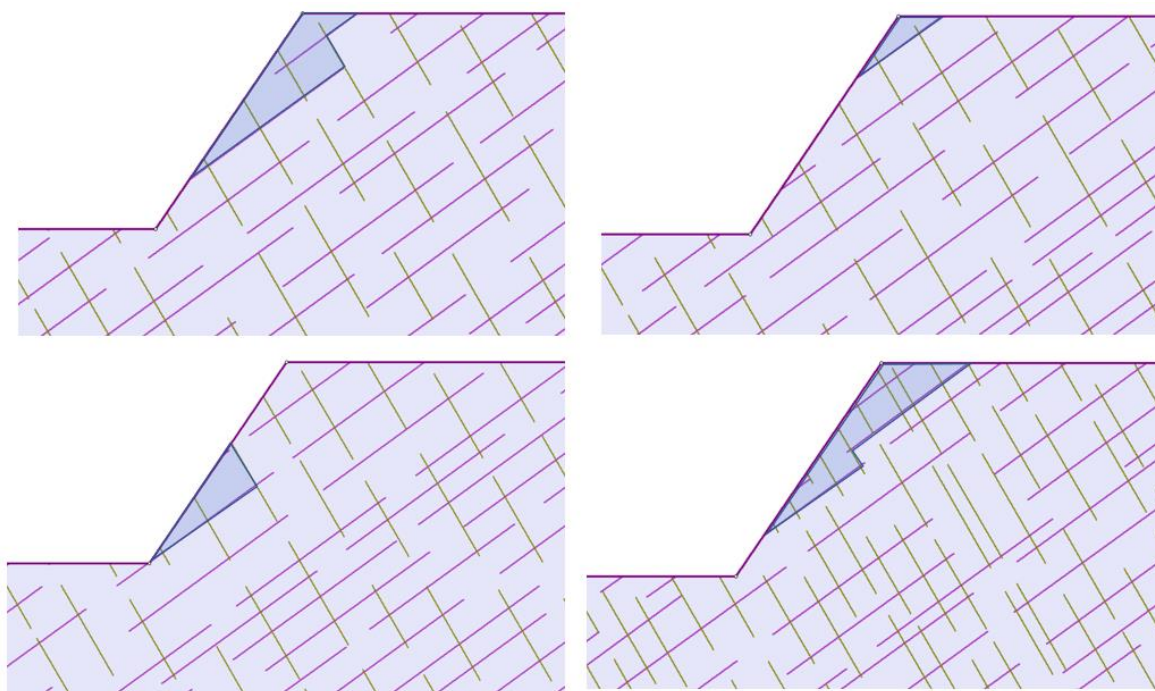


Рисунок 6.26 – Ключевые блоки в прибортовом массиве

После выявления ключевого блока производится оценка его устойчивости методом предельного равновесия.

6.5.5 Для проведения таких расчетов выбирается прямолинейный протяженный участок, на котором в условиях статистического разброса параметров трещиноватости по протяженности уступа выявляются ключевые блоки (рис. 6-27) и определяется их

устойчивость (рис 6-28). По результатам расчетов протяженность бермы с неустойчивыми блоками соотносится с общей протяженностью бермы и вычисляется вероятность обрушения по формуле выше (6.34).

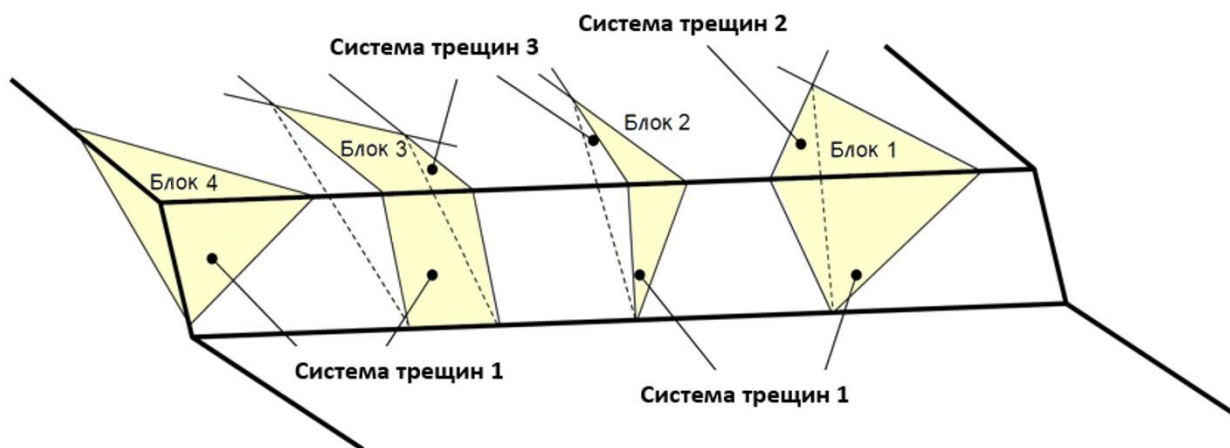


Рисунок 6.27 – Образование ключевых блоков по протяженности уступа

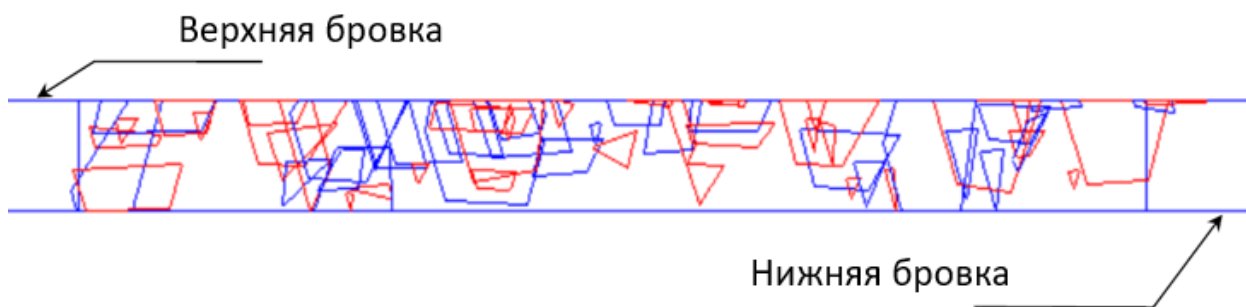


Рисунок 6.28 – Расчет устойчивости ключевых блоков в массиве (красные неустойчивые $n < 1$, синие - устойчивые $n \geq 1$).

7 Особенности оценки устойчивости бортов карьеров, откосов уступов и отвалов

7.1 Оценка устойчивости откосов с учетом их криволинейности в плане

7.1.1 При оценке устойчивости криволинейных в плане откосов необходимо учитывать наличие бокового распора. К криволинейным следует относить откосы протяженностью (l) не более $3H$ (высота откоса).

7.1.2 Учет криволинейности контура карьера в плане осуществляется графоаналитическими методами и трехмерным моделированием.

7.1.3 Выполнение расчетов для криволинейных в плане откосов допускается осуществлять в плоской постановке. В этом случае коэффициенты запаса могут иметь значения ниже, чем при учете криволинейности в плане.

На прямолинейных участках бортов, где установлены поверхности ослабления, секущие борт, приближенный коэффициент запаса данного участка может быть определен как средневзвешенный коэффициент запаса по ряду профилей, параллельных направлению возможного сдвижения (Рисунок 7.1):

$$n_{\text{ср.взв}} = \frac{n_1 P_1 + n_2 P_2 + \dots + n_n P_n}{P_1 + P_2 + \dots + P_n} \quad (7.1)$$

где n_n – коэффициент запаса, полученный в плоской постановке по n -ому расчетному профилю; P_n – вес призмы возможного обрушения по n -ому расчетному профилю.

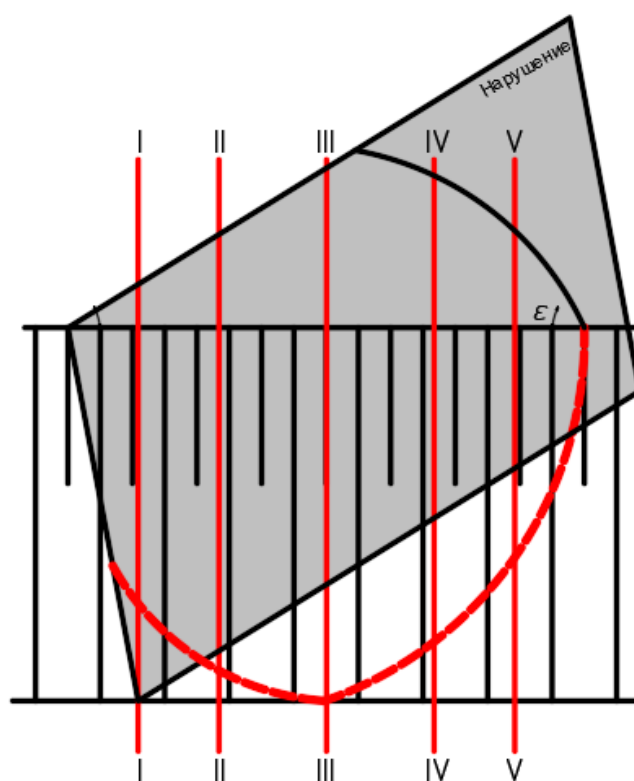


Рисунок 7.1 – Пример расчет устойчивости откоса по ряду профилей

7.1.4 Графоаналитические методы применяются для изотропных откосов путем внесения соответствующей поправки к углу наклона борта. Введение поправки осуществляется следующим образом:

- в соответствии с инженерно-геологическими условиями и схемой деформирования прибортового массива производится расчет в плоской постановке и по расчетным исходным данным (C_n, φ_n) определяется величина H_{90} , а также угол наклона α_{nl} и высота откоса H при заданном нормативном коэффициенте запаса;
- для определения поправки $\Delta\alpha$ для вогнутых в плане откосов определяется радиус кривизны нижней бровки R_n и рассчитывается условная величина $R' = R_n/H_{90}$;
- из графика ниже (Рисунок 7.2) определяется поправка $\Delta\alpha$ для вогнутого в плане откоса; для случаев, не предусмотренных данным графиком, рекомендуется проводить трехмерное моделирование;
- угол откоса, вогнутого в плане, определяется по формуле:

$$\alpha = \alpha_{nl} + \Delta\alpha. \quad (7.2)$$

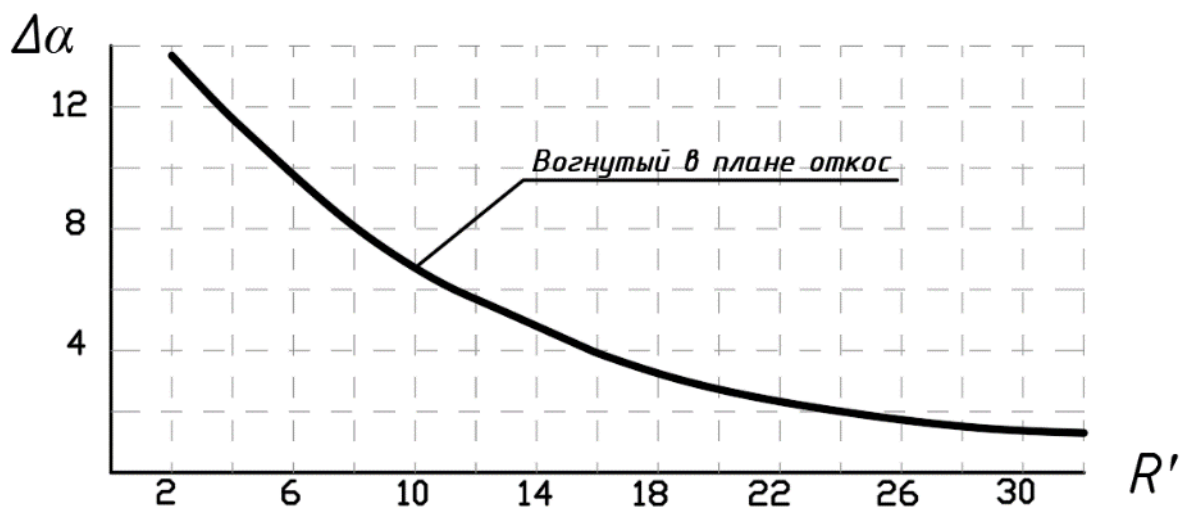


Рисунок 7.2 – График зависимости поправки к углу наклона борта от радиуса кривизны нижней бровки выемки

7.1.5 Оценка устойчивости бортов карьеров в объемной постановке со сложными горнотехническими, инженерно-геологическими и гидрогеологическими условиями осуществляется с применением программных продуктов, основанных на методах предельного равновесия и численного моделирования.

7.2 Оценка устойчивости откосов, с учетом воздействия статических сил от технологического оборудования и объектов инфраструктуры

7.2.1 Влияние нагрузок от стационарно размещаемого оборудования, зданий или сооружений должно учитываться при расчёте устойчивости уступов карьера. Кратковременные нагрузки, возникающие при передвижении оборудования и выполнении ими технологических операций не рассматриваются.

В дисперсных породах допускается размещение на рабочих площадках уступов карьера горнотранспортного и/или иного технологического оборудования и его ремонт за пределами призмы возможного обрушения (в скальных и полускальных породах на расстоянии не менее 5 м от бровки откоса) без дополнительных расчетов устойчивости уступов. При необходимости временного размещения данного оборудования в пределах призмы возможного обрушения (в скальных и полускальных породах на расстоянии менее 5 м от бровки откоса) производится расчет устойчивости откоса с учетом дополнительных нагрузок и разработкой мероприятий по обеспечению безопасной эксплуатации.

При складировании дисперсных пород (глинистые, суглинистые, супесчаные обводненные породы) в отвалы должны учитываться нагрузки от размещаемого на ярусе оборудования.

При складировании скальных пород или смесей с долей слабых не более 20%, в отвалы на прочное основание, выполнение дополнительных расчетов устойчивости нагруженных оборудованием ярусов, не требуются.

Ширина призмы возможного обрушения откосов отвалов дисперсных пород определяется расчетом. Для откосов отвалов, сложенных из скальной отвальной массы, содержащей не более 20 % глинистых и суглинистых пород, допускается ширину призмы возможного обрушения принимать равной не менее 5 м без проведения расчетов.

7.2.2 Нагрузки, действующие на массив горных пород или на тело отвала, разделяется на два типа: сосредоточенная и распределенная нагрузка (Таблица 7-1).

7.2.3 Учет нагрузок от горного оборудования, зданий или сооружений при их расположении на бермах может осуществляться двумя способами:

- увеличением высоты уступа на мощность эквивалентного слоя h_3 ;
- учетом нагрузки в уравнении баланса сил.

7.2.4 Ориентировочная величина угла нагруженного откоса при заданной высоте или его высоту при заданном угле определяется путем выполнения расчета, заменив предварительный удельный вес оборудования или здания эквивалентным слоем породы. В этом случае условная расчетная высота откоса будет складываться из действующей высоты откоса H и величины эквивалентного слоя h_3 :

$$h_3 = \frac{P}{a \cdot b \cdot \gamma} = \frac{P_{об}}{\gamma} \quad (7.3)$$

где P – вес оборудования (сооружения), МН; $P_{об}$ – давление, создаваемое оборудованием, МПа; γ – удельный вес породы, МН/м³, a , b – линейные размеры оборудования, здания или сооружения в плане, м.

Таблица 7-1. Виды нагрузок на откосы уступов и ярусов отвалов от технологического оборудования и объектов инфраструктуры

Вид нагрузки	Описание	Схема распределения нагрузки
Сосредоточенная нагрузка	Нагрузка передаёт свое действие на площадку уступа (яруса отвала), через очень малые площади (давление колес автотранспорта, опор строительной техники)	
Распределённая нагрузка	Действует на большой площади соприкосновения оборудования с массивом уступа или яруса отвала (фундаменты опор конвейеров, зданий и сооружений, отвалы)	

В пределах мощности эквивалентного слоя сдвиговые характеристики массива принимаются равными нулю.

7.2.5 Оценка устойчивости нагруженных откосов осуществляется путем прибавления к весу призмы P , о контуренной наиболее напряжённой поверхностью скольжения, дополнительного веса от технологического оборудования или объектов инфраструктуры, приходящегося на 1 погонный метр протяженности уступа – ΔP (Рисунок 7.3).

Вес от технологического оборудования и объектов инфраструктуры ΔP , приходящийся на 1 п.м. протяженности уступа (вдоль бровки откоса), определяется по формуле (6.5) и учитывается в уравнении баланса сил (6.1).

В качестве расчётных характеристик используются физико-механические свойства массива горных пород рассчитываемого откоса (угол внутреннего трения φ ; сцепление C ; плотность пород ρ), а также параметры оборудования (размеры опорных частей оборудования, вес оборудования), здания.

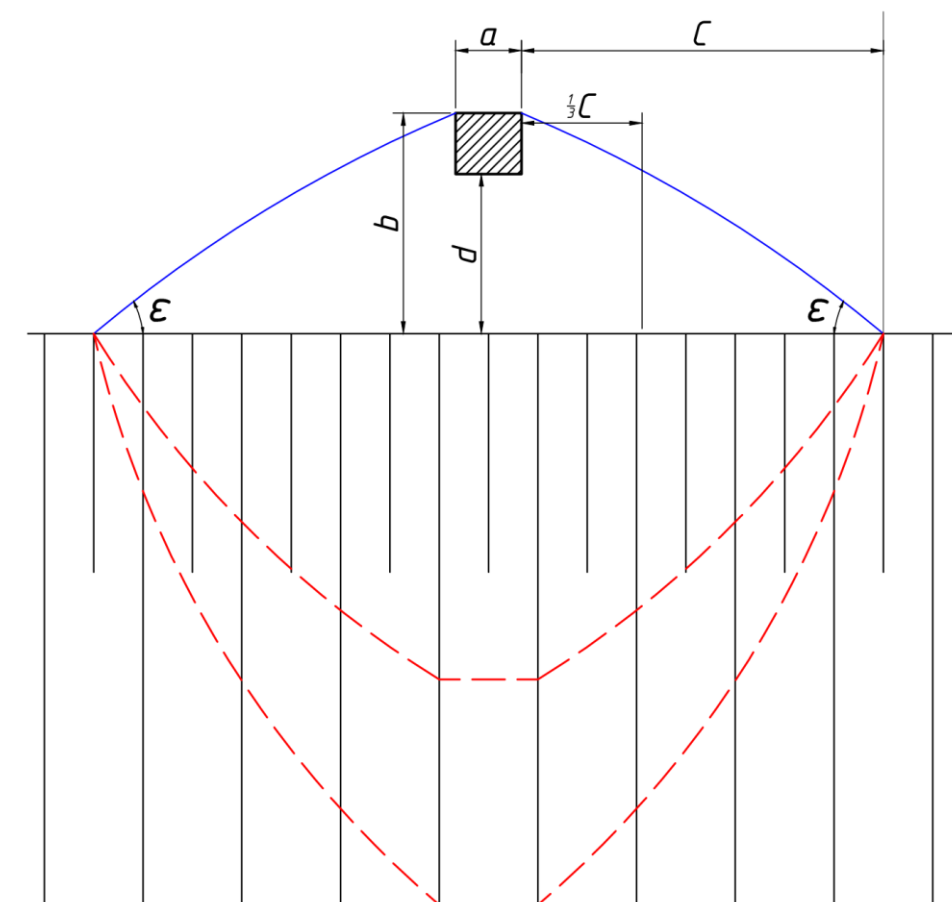


Рисунок 7.3 – Форма вероятной призмы обрушения, оконтуренной напряженной поверхностью скольжения в плане, в пределах размещения нагрузки

7.2.6 Для определения наиболее напряжённой поверхности скольжения с учётом веса горного оборудования или объектов инфраструктуры, расположенных на откосе, расчёт выполняется по ряду потенциальных поверхностей скольжения с учётом дополнительной нагрузки ΔP от веса оборудования (Рисунок 7.4).

7.2.7 Нагрузка от оборудования или объектов инфраструктуры, расположенных вблизи верхней бровки откоса, чаще всего распространяется на призмы, ограниченные малыми поверхностями скольжения, которые по своему весу соизмеримы с весом оборудования. В связи с этим расчет устойчивости уступов карьеров и ярусов отвалов должен выполняться для верхней части уступа (первые метры от верхней бровки) и на всю высоту (Рисунок 7.4). Выбор схемы деформирования уступов осуществляется в соответствии с разделом 6.2.

7.2.8 Построение поверхности скольжения осуществляется следующим образом:

- в верхней части поверхности скольжения наклонены к верхней площадке под углом $\omega = 45^\circ + \frac{\varphi_n}{2}$, при условии, что удельное давление оборудования на 1 м^2 опорной части больше величины напряжения σ_0 , рассчитываемой по формуле (7.4), то наклонные

участки расчётных поверхностей будут начинаться непосредственно под опорной частью оборудования;

$$\sigma_0 = 2C_n \operatorname{ctg} \left(45^\circ - \frac{\varphi_n}{2} \right) \quad (7.4)$$

- если удельная нагрузка опорной части оборудования на 1 м^2 меньше σ_0 , то наклонные участки расчётных профилей скольжения начинаются с глубины H'_{90} :

$$H'_{90} = \frac{\sigma_0 - \frac{P}{ab}}{\gamma} \quad (7.5)$$

- в средней и нижней части расчётные поверхности имеют вид плавных криволинейных поверхностей, которые выходят на поверхность откоса под углом ε

$$\varepsilon = 45^\circ - \frac{\varphi_n}{2} \quad (7.6)$$

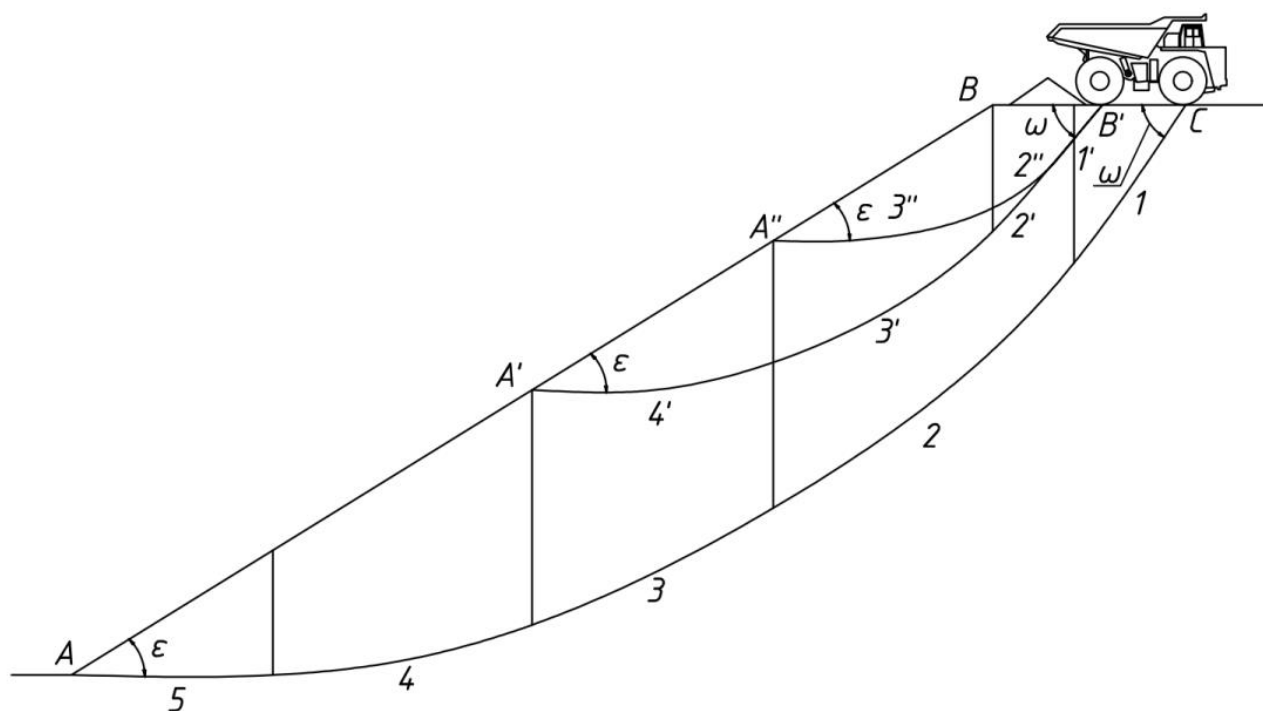


Рисунок 7.4 – Пример схемы расчёта устойчивости откоса, нагруженного автосамосвалом

7.2.9 Расчет коэффициента запаса устойчивости нагруженного откоса с учётом бокового защемления допускается выполнять по нескольким поперечным профилям по формуле (7.1). Пример профильных линий показан на рисунке ниже (Рисунок 7.5).

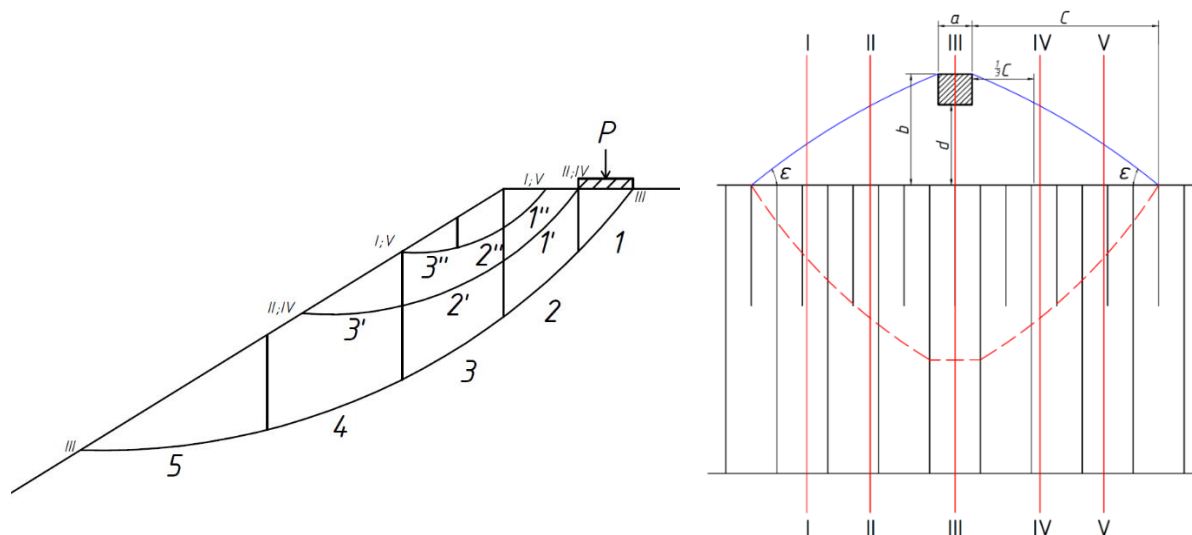


Рисунок 7.5 – Схема к расчёту устойчивости откоса с учётом бокового защемления призмы, околнуренной наиболее напряжённой поверхностью скольжения

7.2.10 Допускается проведение расчетов устойчивости нагруженных откосов только по центральному сечению (Рисунок 7.5) без учета бокового защемления.

7.2.11 При решении общих задач устойчивости откосов динамическое воздействие от горного оборудования и от сооружений инфраструктуры не учитывается.

7.3 Оценка устойчивости обводненных откосов

7.3.1 Неблагоприятное влияние подземных вод на устойчивость откосов проявляется в:

- снижению эффективных напряжений и уменьшении сил, удерживающих массивы в устойчивом состоянии за счет влияния гидростатического взвешивания и гидродинамического давления, которое суммарно учитываются как гидростатическое давление;
- снижению прочности пород, склонных к набуханию; под влиянием воды песчано-глинистые породы разуплотняются, увлажняются и набухают, что может приводить к оползанию слагаемых ими уступов;

7.3.2 При расчетах устойчивости откосов влияние воды учитывается в уравнении баланса сил по формуле (6.3).

7.3.3 Силы гидростатического давления необходимо учитывать как в хорошо проницаемых, так и в слабопроницаемых дисперсных и скальных породах, в связи с тем, что в них могут наблюдаться высокие напоры. При относительно малых величинах гидростатического давления на потенциальной поверхности скольжения допустимо пренебрегать его воздействием на устойчивость откосов.

7.3.4 Прогноз распределения уровней подземных вод, гидростатического давления вблизи откоса в простых условиях может осуществляться с использованием аналитических методов, для всех остальных случаев с использованием численного геофильтрационного моделирования в двумерной или трехмерной постановке.

7.3.5 Для обводненных уступов в дисперсных и слабосцементированных породах необходимо учитывать возможность возникновения фильтрационных деформаций и при необходимости предусмотреть мероприятия, ограничивающие их развитие.

7.3.6 Влияние подземных вод на устойчивость откосов допускается не учитывать в многолетнемерзлых породах, содержащих воду только в твердом агрегатном состоянии.

7.3.7 При необходимости для обеспечения безопасности ведения горных работ разрабатываются мероприятия по осуществлению дренажа и остановке развития фильтрационных деформаций.

7.4 Оценка устойчивости откосов при сейсмических воздействиях землетрясений

7.4.1 Влияние землетрясений на устойчивость бортов и уступов карьеров и откосов отвалов учитывается в сейсмически активных районах (7 и более баллов по шкале MSK-64)

Балльность территории определяется вероятностью возможного превышения интенсивности землетрясений в течение 50 лет – 10 % (карта А), которая может быть уточнена по результатам микросейсмического районирования.

7.4.2 Для массивов дисперсных пород со степенью водонасыщения менее 0,9 или с коэффициентом фильтрации более 100 м/сут и прочных скальных массивов (более 50 МПа в образце) влияние землетрясений допускается не учитывать.

7.4.3 При расчетах устойчивости откосов учет сейсмического воздействия землетрясений осуществляется псевдостатическим способом путем введения дополнительной горизонтальной сейсмической силы. Величина сейсмической силы Q_c определяется по формуле (6.6). Величины коэффициентов сейсмичности представлены в таблице 7-2. Альтернативным способом учета воздействия сейсмических сил является увеличение нормативного коэффициента запаса (см. раздел 4).

Другие методы учета сейсмического воздействия землетрясений в расчетах устойчивости откосов применяются по решению специализированной организации.

7.4.4 При расчетах устойчивости откосов, критерии приемлемости при сейсмическом воздействии от землетрясения приведены в разделе 4.

Таблица 7-2. Коэффициент сейсмичности, зависящий от балльности района

Интенсивность колебаний, баллы	Коэффициент сейсмичности в долях g
7	0,1
8	0,2
9	0,4

7.5 Оценка устойчивости бортов карьеров при комбинированной разработке месторождений

7.5.1 Комбинированная разработка месторождений представляет собой все разновидности сочетания открытых и подземных работ по взаимосвязанным технологическим схемам в пространстве и во времени при отработке запасов в пределах одного месторождения.

7.5.2 Условия применения и выбор основных вариантов комбинированной разработки карьерных и шахтных полей определяются проектом.

7.5.3 Наибольшая степень взаимного влияния и технологической взаимосвязи происходит при одновременном ведении открытых и подземных работ, совмещенных в одной вертикальной плоскости; наименьшая степень – при последовательной и раздельной отработке карьерного и шахтного полей, совмещенных в горизонтальной плоскости.

7.5.4 Горные работы при комбинированной разработке месторождения должны вестись согласовано, в соответствии с проектами и годовыми планами их развития.

Отрабатываемые блоки при комбинированной разработке месторождения должны быть смещены в целях исключения их негативного взаимного влияния.

Отработка предохранительного целика осуществляется по специальному проекту при выполнении мер, исключающих обрушение целика и бортов карьера и обеспечивающих безопасность работ. Работы проводятся только после отвода воды из карьерного пространства.

7.5.5 При комбинированной разработке месторождений не допускается добыча подземным способом из проектных контуров карьера. Отработка запасов в бортах карьеров выполняется после постановки бортов в предельное положение.

7.5.6 При одновременном ведении открытых и подземных горных работ в одной вертикальной плоскости должны соблюдаться следующие условия:

- наличие предохранительного целика, обеспечивающего устойчивость массива и бортов карьера;
- применение систем подземной разработки, исключающих сдвигание (разрушение) массива предохранительного целика;

- ограничение сейсмического воздействия от массовых взрывов на целики, потолочины и уступы бортов.

7.5.7 Производство открытых горных работ в зонах ранее выполненных подземных работ и имеющих пустоты (незаложенные камеры и др.), а также в зонах обрушения должно осуществляться по специальному проекту.

7.5.8 При комбинированной разработке месторождений влияние подземных горных работ на устойчивость бортов и уступов карьеров определяется способом управления горным давлением (Таблица 7.3).

Таблица 7-3. Факторы, учитываемые в расчете устойчивости бортов при комбинированной разработке месторождений

Способ управления горным давлением	Сопутствующие геомеханические процессы в массиве	Факторы
Поддержание выработанного пространства целиками	Процесс сдвижения в пределах упругих деформаций. Прочностные свойства массива не снижаются	Параметры разделительного целика
		Состояние целиков с учетом влияния карьера
Закладка выработанного пространства	Процесс сдвижения с формированием зон трещин и плавных смещений. Прочностные свойства массива снижаются в зонах сдвижения	Свойства закладочного массива. Возможное наличие недозакладки выработанного пространства
Обрушение руды и вмещающих пород	Процесс сдвижения с формированием зон обрушения, трещин и плавных смещений. Прочностные свойства массива снижаются в зонах сдвижения	Свойства нарушенного массива горных пород в соответствии с различными зонами сдвижения При параллельной открыто-подземной разработке – параметры разделительного целика

7.5.9 При расчетах устойчивости бортов карьеров в зонах сдвижений от подземной разработки, свойства подработанного массива определяются в соответствии с таблицей ниже (Таблица 7-4). Границы зон сдвижений определяются величиной деформаций растяжения.

Таблица 7-4. Изменение сцепления в подработанном массиве

Зоны сдвижения		Сцепление в подработанном массиве $C_{л,м}$, МПа
Наименование	Деформации растяжения, ε	
Обрушения	более $30,0 \cdot 10^{-3}$	0,02
Сдвигения с разрывом сплошности (трещин)	$(6,0-30,0) \cdot 10^{-3}$	$0,3C_m$
Плавные сдвигения без разрыва сплошности	$(0,5-6,0) \cdot 10^{-3}$	$0,7C_m$

C_m – сцепление в неподроботанном массиве

7.5.10 Уточнение прочностных свойств нарушенного массива в зоне подработки, приведенных в таблице выше (Таблица 7-4), осуществляется специализированной организацией.

Плотность и угол внутреннего трения подработанного массива принимаются равными плотности и углу внутреннего трения неподроботанного массива соответственно.

7.5.11 Влияние капитальных подземных горных выработок, в т.ч. вскрывающих, при расчётах устойчивости бортов карьеров и уступов не учитывается.

7.5.12 Границы зон сдвижения определяются по результатам наблюдений за сдвижением. При определении границ допускается использовать расчетные углы сдвижений или результаты численного и физического моделирования.

7.5.13 При комбинированной разработке месторождений влияние подземных горных работ на устойчивость бортов карьеров допустимо оценивать по результатам численного моделирования.

7.6 Обоснование минимальной ширины предохранительных берм

7.6.1 Ширина предохранительной бермы определяется исходя из ее улавливающей способности камнепада, вывалов и возможности передвижения горного оборудования.

7.6.2 Ширина предохранительной бермы при детерминированном способе расчетов устойчивости уступов определяется исходя из следующего условия:

$$B_{\text{пр}} = \max \begin{cases} B_o + B_{\text{п}} \\ B_o + B_{\text{об}} \end{cases} \quad (7.7)$$

где B_o – ширина срабатывания бермы, м; $B_{\text{п}}$ – ширина бермы для задерживания падающих камней, м; $B_{\text{об}}$ – минимальная ширина рабочей части бермы, достаточная для безопасного размещения и работы оборудования по очистке берм от осыпей, м.

7.6.3 Величина срабатывания бермы (B_o) и ширина бермы для задерживания падающих камней ($B_{\text{п}}$) определяются по результатам наблюдений (экспериментальных данных), месторождений аналогов, моделирования и использовании эмпирических формул.

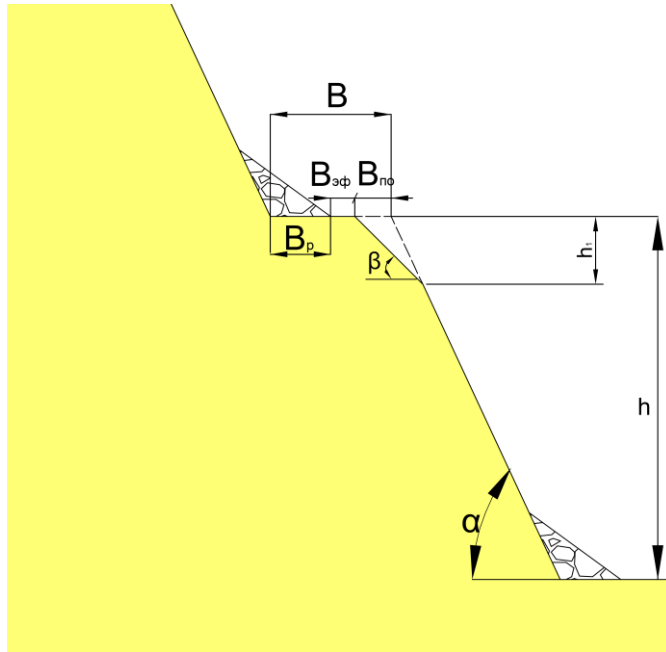
7.6.4 При вероятностной оценке устойчивости уступов (раздел 6.5) ширина предохранительной бермы ((Рисунок 7.6 а) определяется по формуле:

$$B = B_{\text{но}} + B_{\text{р}} + B_{\text{эф}}, \quad (7.8)$$

где: $B_{\text{но}}$ – ширина призмы возможного обрушения (в данном случае ширина сработки бермы за счет влияния трещиноватости), м; $B_{\text{р}}$ – ширина развала после деформации с вышележащего уступа, м (Рисунок 7.6); $B_{\text{эф}}$ – эффективная ширина бермы (оставшаяся часть бермы после осыпи и развала вышележащего уступа), которая принимается:

- не менее 2 м для любых уступов карьера;
- 0 м для нижних уступов при доработке карьера при условии инструментального мониторинга в режиме реального времени со сплошной зоной покрытия рабочей зоны или при безлюдной выемке.

а) Плоская схема деформирования

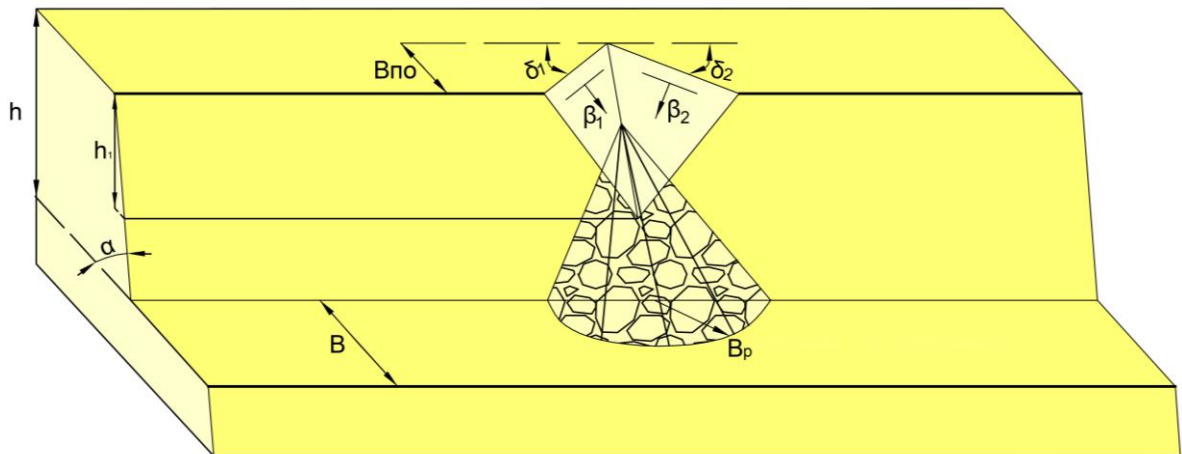


$$V = \frac{h_1^2}{2} \left(\frac{1}{\operatorname{tg}\beta} - \frac{1}{\operatorname{tg}\alpha} \right)$$

$$B_{no} = h_1 \left(\frac{1}{\operatorname{tg}\beta} - \frac{1}{\operatorname{tg}\alpha} \right)$$

$$B_p = \left(2Vk_p \left(\frac{1}{\operatorname{tg}\alpha_{e.o.}} - \frac{1}{\operatorname{tg}\alpha} \right) \right)^{1/2}$$

б) Клиновидная схема деформирования



$$V = \frac{h_1^3}{6} (\operatorname{ctg}\psi' - \operatorname{ctg}\alpha)^2 (\operatorname{ctg}\delta_1 + \operatorname{ctg}\delta_2)^2 \quad \operatorname{ctg}\psi' = \frac{\sin \delta_1 \operatorname{ctg}\beta_2 + \sin \delta_2 \operatorname{ctg}\beta_1}{\sin(\delta_1 + \delta_2)}$$

$$B_{no} = h_1 \left(\frac{1}{\operatorname{tg}\psi'} - \frac{1}{\operatorname{tg}\alpha} \right)$$

$$B_p = \left(\frac{6Vk_p}{\pi} \left(\frac{1}{\operatorname{tg}\alpha_{e.o.}} - \frac{1}{\operatorname{tg}\alpha} \right) \right)^{1/3}$$

Рисунок 7.6 – Схема определения ширины предохранительной бермы и ширины развала возможного обрушения при вероятностной оценке устойчивости уступов: $V(S)$, м^3 - объем дезинтегрированного породного блока; k_p – коэффициент разрыхления, д.ед.; β_i – угол падения i -ой поверхности ослабления массива, град.; $\alpha_{e.o.}$ – угол естественного откоса дезинтегрированного материала, град.

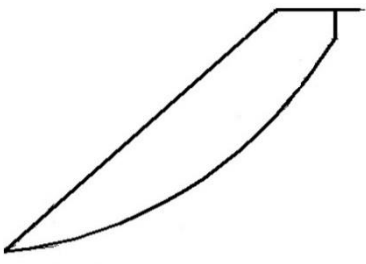
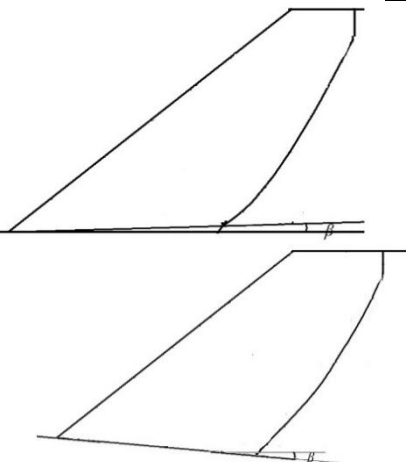
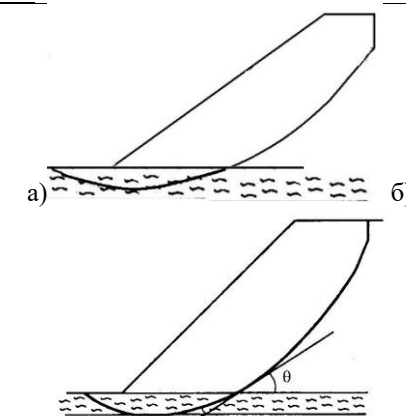
7.6.5 При определении ширины предохранительной бермы вероятностным подходом ширина бермы должна обеспечивать улавливание не менее 80% потенциальных вывалов.

7.7 Оценка устойчивости откосов отвалов

7.7.1 Устойчивость откосов отвалов определяется инженерно-геологическими и гидрогеологическими особенностями основания предполагаемого участка складирования пород, типом складированных пород и технологией отвалообразования.

7.7.2 При отсыпке отвалов возможны три схемы нарушения их устойчивости (Таблица 7-5).

Таблица 7-5. Схемы деформирования откосов отвалов

№	Расчетная схема	Краткое описание	Условия применения
1		Надподошвенный оползень, характеризующийся плавной криволинейной поверхностью скольжения, реализующейся в теле отвала и выходящей в его нижнюю бровку	Количество прочных скальных пород в отвальной смеси не менее 80%.
2		Контактный (подошвенный) оползень, характеризующийся поверхностью скольжения, которая частично реализуется в теле отвала и по контакту отвальных пород и пород основания	При наличии на поверхности основания прослойки талых песчано-глинистых отложений мощностью не менее 0,1 м, а также при «раздавливании» весом отвала слабых складированных пород
3		Подподошвенный оползень, сопровождающийся вылавливанием слабых пород основания. Реализуется в двух формах: а) наиболее напряженная поверхность проходит по телу отвала и слабым породам основания; б) наиболее напряженная поверхность проходит через тело отвала, слабые породы основания и по контакту подстилающими прочными породами.	В слабых породах основания, при наличии напоров воды в породах основания, при раздавливании весом отвала слабых складированных пород, а также развиваться при отсыпке ярусов отвала на слабые породы нижнего яруса

Примечание: H – высота отвала (яруса), α – генеральный угол откоса отвала (угол яруса), β – угол наклона основания, h – мощность слабого слоя в основании борта или величина заглупления поверхности скольжения в породы основания

7.7.3 Для расчетов устойчивости отвалов используются те же методы и расчетные схемы, что и для бортов и уступов карьеров и приведены в главе 6.

7.7.4 Параметры отвалов, расположенных на прочном основании, определяются физико-механическими свойствами отвальной массы.

7.7.5 При наличии в основании отвалов слабых пластичных горных пород параметры их откосов определяются не только физико-механическими свойствами отвальных смесей, но свойствами пород, залегающих в основании отвала.

7.7.6 Предельно допустимая высота яруса отвала определяется расчетом. При складировании отвальной массы, состоящей из прочных скальных пород на прочное основание (I категории сложности) и отсутствии на отвале в непосредственной близости от него ответственного сооружения (объекта), высота яруса не ограничена и проведение расчетов устойчивости не требуются.

7.7.7 Для отвалов прочных скальных пород на прочном основании размер опасной зоны принимается в соответствии с таблицей ниже (Таблица 7-6). В этих условиях допускается разгрузка автосамосвалов непосредственно под откос при наличии предохранительного вала, высотой не менее 0,5 диаметра колеса автомобиля максимальной грузоподъемности, применяемого в данных условиях.

Таблица 7-6. Размер опасной зоны на откосах отвалов из прочных скальных пород*

Скорость подвигания фронта отвала, м/сутки	Размер опасной зоны от верхней бровки отвала, м
0,5	1,4
1,0	2,0
1,5	2,5
2,0	3,0

*К прочным породам относятся также многолетнемерзлые породы при условии сохранения их теплового режима за счет скорости отсыпки или реализации специальных мероприятий.

7.7.8 Расчет устойчивости откосов отвалов, сложенных связными дисперсными породами или скальными породами с содержанием глинистого заполнителя 30% и более, производится с учетом порового давления вод или уровня водоносного горизонта.

7.7.9 В случае сложности обеспечения нормативного коэффициента запаса при отсыпке первого яруса разрабатываются специальные мероприятия. Одним из таких мероприятий является формирование опережающего отвала (предотвала). Устойчивость предотвала определяется отдельным расчетом.

7.7.10 В случае отсыпки отвалов на многолетнемерзлое основание с сохранением его температурного режима, мощность предотвала, отсыпаемого в летнее время, должна превышать толщину слоя сезонного оттаивания.

Список использованных источников

1. Hoek E., Carranza-Torres C., Corkum B. Hoek-Brown failure criterion // Toronto: Proc. NARMS-TAC Conference, 200, 1. 2002. Pp. 267-273.
2. Hoek E., Brown E.T. The Hoek-Brown failure criterion and GSI // Journal of rock mechanics and geotechnical engineering. 2018.
3. Руководство по проектированию бортов карьера [Текст] / [Питер Стейси и др.] ; под ред.: Джон Рид, Питер Стейси ; [пер. с англ.: А. С. Бентхен] // Екатеринбург: Правовед: Полиметалл, сор. 2015. 527 с.
4. Richard E. Goodman, Genhua Shi. Block Theory and Its Application to Rock Engineering // 1985. P. 352.
5. Правила обеспечения устойчивости откосов на разрезах // СПб: ВНИМИ. 1998. 208 с.

Приложение А – Справочные физико-механические свойства горных пород и поверхностей ослабления

Таблица А1. Значения углов трения по поверхностям ослабления массива [5]

Породы	Углы трения в зависимости от характера поверхностей ослабления φ' , (... °)			
	Ровные гладкие	Неровные гладкие	Ровные шероховатые	Неровные шероховатые
Песчаники	15-20	20-26	24-29	28-36
Алевролиты	14-18	18-23	22-26	25-33
Аргиллиты	12-17	17-21	20-24	23-30
Уголь	14-19	18-25	23-27	25-35
Порфиры, роговики, джеспилиты, песчаники	20 - 26°	22 - 27°	24 - 28°	28 - 31°
Вторичные кварциты, grano-диориты, кварцевые порфиры, гранодиорит-порфиры, скарнированные породы, сиениты, диориты, алевролиты	17 - 20°	20 - 23°	22 - 25°	25 - 28°
Известняки, метаморфическисланцы, магнетиты	16 - 19	20 - 22°	23 - 25°	24 - 27°
Глинистыесланцы, аргиллиты	15 - 18°	18 - 20°	21 - 23°	23 - 25°
Филлиты, талько-кlorитовые и серицитовые сланцы	9 - 12°	13 - 15°	20 - 22°	23 - 25°

Таблица А2. Значения сцепления по поверхностям ослабления массива [5]

Характеристика поверхностей ослабления массива	Характеристика толщи пород	Величина сцепления C' , т/м ²
Поверхности скольжения по контактам слоев (зеркала скольжения), поверхность ровная, гладкая	Дислоцированная осадочная толща	0-5
Контакты слоев, поверхность волнистая со следами скольжения или ровная шероховатая	Метаморфизованная осадочная толща	5-10
Тектонические нарушения и неровные тектонические трещины со следами скольжения	Массивы изверженных и метаморфических пород	5-10
Контакты слоев, поверхность волнистая шероховатая, неровная шероховатая	Уплотненная слабодислоцированная осадочная толща	10-20
Контакты слоев в слабых песчано-глинистых отложениях	Неуплотненная недислоцированная слаборассланцованная осадочная толща	50% от сцепления под углом к наслоению в массиве
Мерзлые контакты слоев	Осадочная толща	1,5 - 3,0

Таблица А3. Прочность на сдвиг по поверхностям ослабления без заполнителя [3]

Наименование породы	Прочность на сдвиг			
	Пиковая величина		Остаточная величина	
	$\varphi_i, ^\circ$	$C_j, \text{кПа}$	$\varphi_{ост}, ^\circ$	$C_{ост}, \text{кПа}$
Мел	—	—	30–41	0
Глинистые сланцы	—	—	22–37	0
Кристаллические сланцы	—	—	32–40	0
Базальт	—	—	40–42	0
Кальцит	—	—	40–42	0
Твердый песчаник	—	—	34–36	0
Доломит	—	—	30–38	0
Кристаллические сланцы	—	—	21–36	0
Гипс	—	—	34–35	0
Слюдистые кварциты	—	—	38–40	0
Гнейс	—	—	39–41	0
Трещина в биотитовом кристаллическом сланце	37–43	0	—	—
Трещина в кварците	34–38	0	—	—

Таблица А4. Прочность на сдвиг раздробленного материала (глина) из разломов [3]

Наименование породы и заполнителя	Прочность на сдвиг			
	Пиковая величина		Остаточная величина	
	$\varphi_i, ^\circ$	$C_j, \text{МПа}$	$\varphi_{\text{res}}, ^\circ$	$C_{\text{res}}, \text{МПа}$
Структуры с мощными глинистыми заполнителями (прочность определяется по глинистому материалу)				
Смектиты	—	—	5–10	0
Каолиниты	—	—	12–15	0
Иллиты	—	—	16–22	0
Хлориты	—	—	16–22	0
Глины с $PI < 20\%$	—	—	12–28	0
Глины с $20\% < PI < 40\%$	—	—	9–16	0
Глины с $40\% < PI < 60\%$	—	—	8–14	0
Глины с $PI > 60\%$	—	—	7–12	0
Бентонит	9–13	0,060–0,100	—	—
Трещина в известняке, заполненная глиной (6 см)	—	—	13	0
Глинистые сланцы с пропластками глины (10–15 см)	32	0,078	—	—
Структуры в кварцитах и кремнистых сланцах, заполненные брекчированной породой и глиной трения (10–15 см)	32	0,029	—	—
Мощная бентонитомонтмориллонитовая жила в меле (8 см)	7–8	0,015	—	—
Разлом с глиной трения (5–10 см)	25	0,075	—	—
Структуры с мощными не глинистыми заполнителями (прочность определяется для глинистого материала)				
Портландцементный раствор	16–22	0	—	—
Кварцполевошпатовый песок	28–40	0	—	—
Гладкая поверхность с заполнением уплотненным алевритом	40	0	—	—
Шероховатая поверхность с заполнением уплотненным алевритом	40	0	—	—
Гладкая поверхность с заполнением плотным песком	44	0	—	—
Шероховатая бетонная поверхности с заполнением плотным песком	44	0	—	—

Таблица А5. Углы трения по плоскости распила $\varphi_{расп}$ для некоторых типов пород [3]

Тип породы	Породы в сухом состоянии	Породы во влажном состоянии
Амфиболит	32°	—
Базальт	35–38°	31–36°
Мел	—	30°
Конгломерат	35°	—
Медный порфир	31°	—
Доломит	31–37°	27–35°
Гнейс сланцеватый	26–29°	23–26°
Гранит, мелкозернистый	31–35°	29–31°
Гранит, крупнозернистый	31–35°	31–33°
Известняк	31–37°	27–35°
Песчаник	26–35°	25–34°
Кристаллический сланец	—	27°
Алевролит	31–33°	27–31°
Шиферный сланец	25–30°	21°

Приложение Б – Физико-механические свойства ЭМ и пример физического моделирования

Таблица Б1. Пример физико-механические свойств некоторых эквивалентных материалов

№	Типа смеси* или поверхности скольжения	Сцепление, г/см ²	Угол внутреннего трения, град.	Сцепление по контакту г/см ²	Угол внутреннего трения по контакту, град.	Предел прочности при растяжении, г/см ²	Объемный вес, г/см ³
1	Кварцевый песок 97%+ техническое масло 3%	8	25	–	–	1,8	1,6
2	Чугунная буровая дробь 60%+кварцевый песок 37%+техническое масло 3%	3,6	35	–	–	0,9	3,6
3	Чугунная буровая дробь 88%+кварцевый песок 10%+техническое масло 2%	1	32	–	–	0,7	4,3
4	Песчано-гипсовая смесь	35-40	25-27	–	–	8-10	1,7
5	Смесь солидола с мелкомолотой слюдой	5-20	0-5	–	–	–	1,0
6	Солидол	4-6	0-2	–	–	–	1,0
7	Чугунная буровая дробь 79%+кварцевый песок 10% + солидол 1% + слюда 10%	7,4	34	–	–	–	–
8	Чугунная буровая дробь 78%+кварцевый песок 10% + солидол 2% + слюда 10%	6,2	36	–	–	–	–
9	Чугунная буровая дробь 60%+кварцевый песок 29% + солидол 1%	11,7	33,5	–	–	–	–
10	Чугунная буровая дробь 60%+кварцевый песок 27% + солидол 3%	10,4	35	–	–	–	–
11	Контакт графита со смесью. Чугунная буровая дробь 60%+кварцевый песок 37%+техническое масло 3%	–	–	1	17	–	–

*Процентное содержание компонентов во всех смесях дано по объему

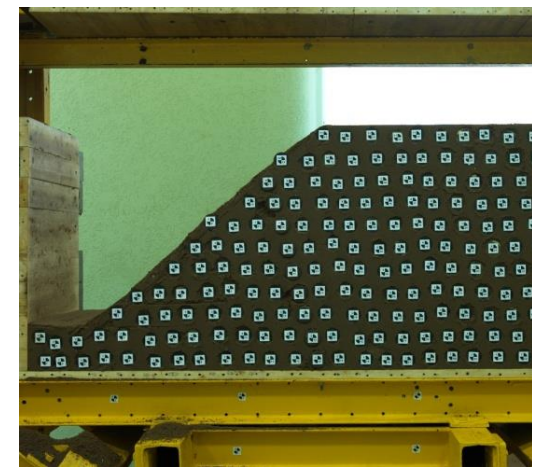
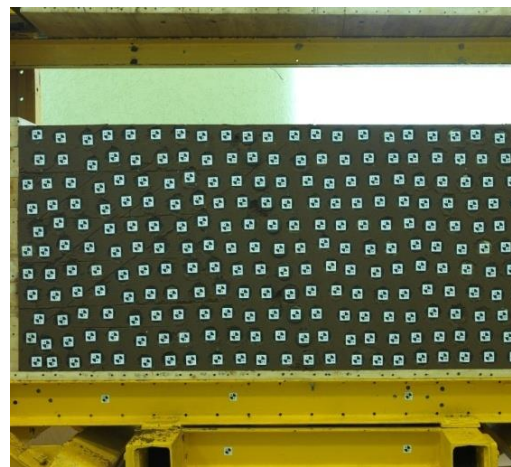
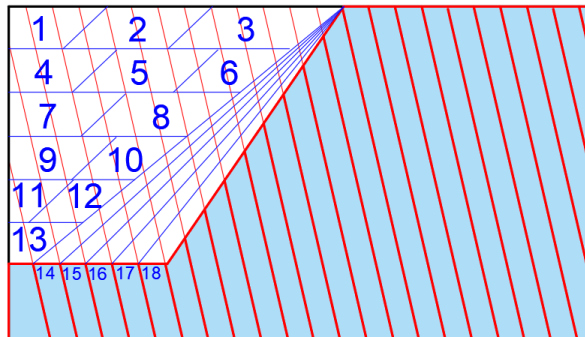


Рисунок Б2 – Пример моделирования борта карьера на ЭМ