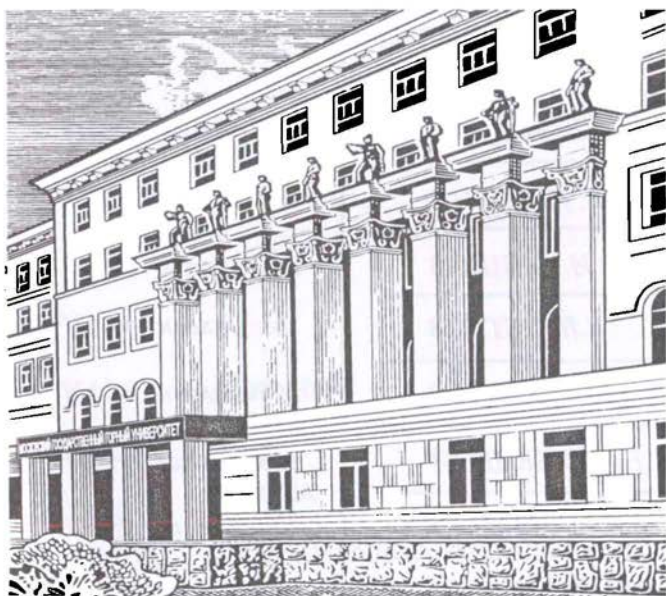


**90-летию
МГА-МГИ-МГГУ
посвящается**



РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ

Председатель

Л.А. ПУЧКОВ

*президент МГГУ,
чл.-корр. РАН*

Зам. председателя

Л.Х. ГИТИС

*директор
Издательства МГГУ*

Члены редсовета

И.В. ДЕМЕНТЬЕВ

академик РАЕН

А.П. ДМИТРИЕВ

академик РАЕН

Б.А. КАРТОЗИЯ

академик РАЕН

А.В. КОРЧАК

академик МАН ВШ

М.В. КУРЛЕНЯ

академик РАН

В.И. ОСИПОВ

академик РАН

В.Л. ПЕТРОВ

академик МАН ВШ

Э.М. СОКОЛОВ

академик МАН ВШ

К.Н. ТРУБЕЦКОЙ

академик РАН

В.А. ЧАНТУРИЯ

академик РАН

Е.И. ШЕМЯКИН

академик РАН

В.Н. Попов
П.С. Шпаков
Ю.Л. Юнаков

УПРАВЛЕНИЕ УСТОЙЧИВОСТЬЮ КАРЬЕРНЫХ ОТКОСОВ

*Допущено Учебно-методическим объединением
вузов Российской Федерации по образованию
в области горного дела в качестве учебника
для студентов вузов, обучающихся
по специальности «Маркшейдерское дело»
направления подготовки «Горное дело»*

**Горное
образование**



МОСКВА

• ИЗДАТЕЛЬСТВО МОСКОВСКОГО
ГОСУДАРСТВЕННОГО ГОРНОГО УНИВЕРСИТЕТА
• ИЗДАТЕЛЬСТВО «ГОРНАЯ КНИГА»
2008

УДК 622.271.3.001
ББК 22.251
Ш 58

Издано при финансовой поддержке Федерального агентства по печати и массовым коммуникациям в рамках Федеральной целевой программы «Культура России»

Книга соответствует «Гигиеническим требованиям к изданиям книжным для взрослых. СанПиН 1.2.1253—03», утвержденным Главным государственным санитарным врачом России 30 марта 2003 г. (ОСТ. 29.124—94). Санитарно-эпидемиологическое заключение Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей № 77.99.60.953.Д.008501.07.07

Экспертиза проведена Учебно-методическим объединением высших учебных заведений Российской Федерации по образованию в области горного дела (письмо № 51-110/6 от 25.10.2006 г.)

Рецензенты:

- кафедра «Проектирование, организация и технология природоохранных работ» Кабардино-Балкарской государственной сельскохозяйственной академии (зав. кафедрой д-р техн. наук, проф. Е.П. Тимофеевко);
- д-р техн. наук, проф. Ю.И. Кутепов (ВНИМИ)

Попов В.Н., Шпаков П.С., Юнаков Ю.Л.

Ш 58 Управление устойчивостью карьерных откосов: Учебник для вузов. — М.: Издательство Московского государственного горного университета, издательство «Горная книга», 2008. — 683 с.: ил.

ISBN 978-5-7418-0506-0 (в пер.)

ISBN 978-5-98672-080-7

Рассмотрено инженерно-геологическое обеспечение работ по расчету максимальных параметров и управлению устойчивостью бортов карьеров и отвалов. Приведены методы лабораторного, натурного определения характеристик прочности и деформируемости глинистых и скальных пород, метод обратных расчетов оползней. Даны инструкции пользования программами по расчету устойчивости карьерных откосов с численными примерами для всех расчетных схем и противодеформационными мероприятиями по обеспечению устойчивости карьерных откосов, а также инструментальным контролем за состоянием устойчивости прибортовых массивов карьеров.

В.Н. Попов — д-р техн. наук, проф. кафедры «Маркшейдерское дело и геодезия» Московского государственного горного университета.

П.С. Шпаков — д-р техн. наук, проф. Муромского института (филиала) Владимирского государственного университета.

Ю.Л. Юнаков — канд. техн. наук, доц. кафедры «Маркшейдерское дело» Государственного университета цветных металлов и золота.

Для студентов вузов, обучающихся по специальности «Маркшейдерское дело» направления подготовки «Горное дело».

УДК 622.271.3.001

ББК 22.251

ISBN 978-5-7418-0506-0
ISBN 978-5-98672-080-7

© В.Н. Попов, П.С. Шпаков, Ю.Л. Юнаков, 2008

© Издательство МГГУ, 2008

© Издательство «Горная книга», 2008

© Дизайн книги. Издательство МГГУ, 2008

1. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Учебник разработан на основе большого объема фактического материала по изучению характера проявлений деформаций прибортовых массивов и отвалов в различных горно-геологических условиях на карьерах России и Казахстана, лабораторных и аналитических исследований процессов деформирования откосов. Алгоритмы и программы расчета устойчивости карьерных откосов апробированы многими научно-исследовательскими, учебными и проектными институтами. Большинство предлагаемых методов расчета устойчивости карьерных откосов включены в нормативные документы [22, 23].

Некоторые материалы, связанные с устойчивостью карьерных откосов, имеющие специфические особенности и выходящие за рамки учебной программы, не рассматриваются или приведены в ограниченном объеме, только с ознакомительной целью. Для более детального ознакомления с ними необходимо изучение дополнительной литературы:

- «Методическое пособие по изучению инженерно-геологических условий угольных месторождений, подлежащих разработке открытым способом» (Л.: Недра, 1986. — 112 с.);
- «Методические указания по наблюдениям за деформациями бортов разрезов и отвалов, интерпретации их результатов и прогнозу устойчивости» (Л.: ВНИМИ, 1987. — 118 с.);
- вопросы, связанные с мерами по предупреждению оползневых явлений и борьбы с ними, обеспечивающие безопасность, экономическую и экологическую целесообразность разработки полезных ископаемых открытым способом, достаточно хорошо изложены в работах [2, 3, 8—10].

1.1. ОБЩИЕ ПОНЯТИЯ ОБ ОТКРЫТЫХ ГОРНЫХ РАБОТАХ

Все определения и применяемая терминология даны в работах [10—17, 70].

Горные работы, производимые непосредственно с земной поверхности, с целью добывания горных пород и создания различных выемок и котлованов, называются открытыми горными работами (ОГР).

Способ разработки месторождений полезных ископаемых с применением ОГР называется открытым.

Горное предприятие, ведущее разработку открытым способом, называется карьером. В практике открытой разработки угольных и россыпных месторождений вместо термина **карьер** применяют названия **разрез** и **прииск**.

При открытой разработке горные работы разделяются на вскрышные (выемка, перемещение и размещение вскрышных горных пород) и добычные (выемка, перемещение и складирование или разгрузка полезного ископаемого).

Месторождение или часть его, разрабатываемую одним карьером, называют **карьерным полем**. Карьерное поле является объемной геометрической фигурой, характеризующейся размерами в плане и глубиной; оно входит в состав земельного отвода карьера, в пределах которого размещаются также удаленные из карьера вскрышные породы, промышленная площадка и другие производственные сооружения.

Уступ — это отдельно разрабатываемая часть слоя горных пород, имеющая форму ступени. Различают рабочие и нерабочие уступы. На рабочих уступах производится выемка вскрышных пород или полезного ископаемого. Если на площадке располагается оборудование, необходимое для разработки уступа, она называется **рабочей площадкой**.

Горизонтальные или наклонные поверхности уступа, ограничивающие его по высоте, называют **нижней** и **верхней площадками**, а наклонную поверхность, ограничивающую уступ со стороны выработанного пространства, — **откосом уступа**. Уг-

лом откоса уступа называется угол, образованный поверхностью откоса уступа и горизонтальной плоскостью, а линии пересечения откоса с верхней и нижней площадками — соответственно **верхней и нижней бровками**.

Часть уступа по его длине, подготовленная для разработки, называется **фронтом работ уступа**, который измеряется его протяженностью.

Ступенчатые боковые поверхности, образованные откосами и площадками уступов и ограничивающие выработанное пространство, называются **бортами карьера**.

Борт, представленный рабочими уступами, называют рабочим бортом карьера. Линия, ограничивающая карьер на уровне земной поверхности, является верхним контуром карьера, а линия, ограничивающая дно (подошву) карьера, — его нижним контуром. При производстве горных работ положение рабочего борта, верхнего и нижнего контуров карьера меняется в пространстве. Постепенно отдельные уступы, начиная сверху, достигают конечных контуров (границ) карьера. К моменту погашения (окончания) открытых работ им соответствуют конечная глубина и конечные размеры карьера в плане. Откосы уступа нерабочих бортов карьера, на которых горные работы не проводятся, разделяются бермами (площадками): транспортными и предохранительными.

Угол между линией, нормальной к простиранию борта и соединяющей верхний и нижний контуры, и горизонталью называется **углом откоса борта карьера** (рабочего или нерабочего). Величина его зависит от высоты уступов и ширины их площадок.

Для расположения транспортных коммуникаций, по которым будет осуществляться транспортирование горной массы нового уступа на поверхность или вышележащие уступы, необходимо вскрыть уступ, то есть провести с поверхности или вышележащего уступа специальные (вскрывающие) горные выработки. Эти выработки в большинстве случаев соединяют пункты, расположенные на разных высотных отметках (если вскрывают один уступ, то разница высотных отметок равна высоте уступа), и поэтому имеют определенный уклон. При со-

оружии вскрывающие выработки обычно имеют близкое к трапециевидному или треугольному сечению и называются соответственно капитальными траншеями и полутраншеями.

Для создания начального фронта работ на вскрытом уступе необходимо провести от вскрывающей выработки горизонтальную горную выработку значительной протяженности по сравнению с размерами поперечного сечения — разрезную траншею, полутраншею или котлован.

Главные параметры карьера

Конечная глубина при разработке наклонных и крутых залежей определяет возможную производственную мощность карьера, размеры его по поверхности, общий объем извлекаемой горной массы. Для горизонтальных и пологих залежей конечная глубина определяется природными условиями и изменяется незначительно за весь период разработки. Конечная глубина устанавливается при проектировании карьера. Проектами предусматривается возможность открытой разработки до глубины 700—900 м.

Размеры карьера на поверхности по простиранию и вкрест простирания определяются размерами залежи, дна карьера, глубины и углов откосов его бортов. Они устанавливаются графически или аналитически. Форма дна карьера в плане обычно близка к овальной. Длина карьера изменяется от сотен метров до 8 км, а ширина — до 4 км.

Размеры дна карьера устанавливаются оконтуриванием разрабатываемой части залежи на отметке конечной глубины карьера. Минимальные размеры дна карьера определяются условиями безопасной выемки и погрузки пород на нижнем уступе (ширина не менее 20 м, длина не менее 50—100 м.)

Углы откосов бортов карьера определяются условиями устойчивости пород прибортового массива и размещения транспортных коммуникаций. Их принимают более крутыми для уменьшения объема вскрышных работ.

Общий объём горной массы в контурах карьера является важнейшим показателем, определяющим производственную мощность предприятия, срок его существования и др.

Площадь, форма контура и периметр дна карьера в первую очередь зависят от размеров и конфигурации залежи. Дну карьера придается по возможности округленная форма с целью повышения устойчивости бортов и уменьшения объема извлекаемых вскрышных горных пород.

Запасы полезного ископаемого в контурах карьера — важнейший показатель, определяющий возможный масштаб добычи, срок существования карьера и экономические результаты разработки. Запасы в пределах каждого уступа (горизонта) и карьерного поля в целом устанавливаются при разведке месторождения, а затем уточняются и пересчитываются в контурах карьера при проектировании и эксплуатации его в соответствии с установленными и периодически изменяющимися кондициями на полезное ископаемое.

1.2. ЭЛЕМЕНТЫ И ТЕРМИНОЛОГИЯ

Анизотропная горная порода — горная порода, свойства которой в различных направлениях неодинаковы; ярко выраженной механической анизотропией обладают многие осадочные породы (сланцы, глины), прочность которых вкрест наслоения в несколько раз выше, чем по наслоению.

Борт разреза (карьера) — боковая поверхность, ограничивающая разрез. Профиль борта разреза в вертикальной плоскости может быть плоским, выпуклым, вогнутым и ломаным; в плане — прямолинейным и криволинейным. Различают рабочие и постоянные (нерабочие); характеризуется борт разреза высотой и углом наклона.

Бровка уступа — линия пересечения поверхности откоса уступа (яруса отвала) с поверхностью верхней или нижней площадки, ограничивающей уступ по высоте, соответственно называемая верхней и нижней бровкой.

Вероятность — числовая характеристика степени возможности появления какого-либо определенного события в тех или иных

определенных условиях, которые могут повторяться неограниченное число раз, выражается в долях единицы или процентах.

Вероятности, с которыми характеристики грунтов, трактуемые как случайные величины, принимают те или иные значения, образуют распределение вероятностей, для установления которого по выборочным данным оценивают один или несколько параметров распределения.

Гидродинамическая сила — объемная сила, направление которой совпадает с направлением потока, а величина равна градиенту потока, умноженному на объем потока в пределах рассматриваемого массива.

График (паспорт) прочности горной породы — график зависимости разрушающих касательных напряжений от нормальных, характеризующий сопротивление сдвигу, сцепление, угол внутреннего трения и сопротивление отрыву горной породы.

Деформация горных пород — изменение формы и объема горных пород под действием различных сил.

Доверительный интервал — интервал, вычисленный по выборочным данным, который с заданной вероятностью (доверительной) накрывает неизвестное истинное значение оцениваемого параметра распределения.

Доверительная вероятность — вероятность того, что доверительный интервал накроет неизвестное истинное значение параметра, оцениваемого по выборочным данным.

Закол — визуально прослеживаемая трещина в откосе, на верхней площадке уступа или земной поверхности, образовавшаяся в результате развития деформаций откоса.

Инженерно-геологический элемент (ИГЭ) — основная грунтовая единица при инженерно-геологической схематизации грунтового объекта.

Изотропная горная порода — горная порода, механические свойства которой в различных направлениях одинаковы.

Интенсивность трещиноватости — величина, обратная среднему размеру (в метрах) элементарного блока породы, ограниченно-го смежными трещинами трех наиболее интенсивных систем.

Коэффициент запаса устойчивости определяется как отношение среднего сопротивления пород сдвигу, рассчитанного с использованием нормативных прочностных характеристик пород по потенциальной поверхности скольжения в откосе, приведенном в предельное состояние, к среднему касательному напряжению, действующему по той же поверхности скольжения. Численное значение этого показателя определяется как отношение расчетных прочностных характеристик пород к предельным их значениям (по П.С. Шпакову); отношение суммы всех сил, удерживающих откос в равновесии, к сумме всех сдвигающих сил, стремящихся вывести его из равновесия; действие этих сил во всех инженерных методах расчета устойчивости откосов переносится на расчетную или потенциальную (наиболее напряженную) поверхность скольжения (по ВНИМИ).

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

Коэффициент вариации — мера отклонения опытных данных от выборочного среднего значения, выражаемая в долях единицы или процентах.

Метод наименьших квадратов — метод статистической оценки функциональной зависимости путем установления таких ее параметров, при которых сумма квадратов отклонений опытных данных от этой зависимости является минимальной.

Надподошвенные оползни отвалов — смещение песчано-глинистых пород, размещаемых на устойчивом основании; поверхность скольжения полностью формируется в насыпном массиве.

Наиболее напряженная поверхность — поверхность в прилегающем к борту (откосу уступа или отвала) массиве, верхней своей частью выходящая на земную поверхность (верхнюю площадку уступа или отвала), а нижней — в подошву (нижнюю бровку) борта (откоса уступа или отвала), по которой коэффициент запаса устойчивости борта (откоса уступа или отвала) является минимальной величиной из всех вычисленных по ряду расчетных поверхностей коэффициентов запаса устойчивости.

Обрушение — отрыв и быстрое смещение вниз горных пород (блоков и пачек пород), слагающих откос, сопровождающееся дроблением смещающегося массива по поверхности, совпадающей с различного рода нарушениями сплошности массива.

Односторонняя доверительная вероятность — вероятность того, что неизвестное истинное значение параметра не выйдет за пределы нижней (или верхней) границы доверительного интервала.

Опасные деформации горных пород — деформации отвалов, уступов и бортов разрезов, а также прилегающей к разрезу территории, способные вызвать аварии горно-транспортного оборудования и угрожающие безопасности работ на разрезах.

Оплывание — процесс переноса и переотложения грунтовых частиц подземными водами, вытекающими на откос в песчаных отложениях в пределах промежутка высачивания; формируются языки оплывания в основании фильтрующих откосов.

Оползень — медленное смещение масс горных пород, слагающих откос (нередко и его основание), происходящее в виде скользящего движения между смещающимися породами и неподвижным массивом. Является наиболее крупным по размерам видом нарушения устойчивости откосов. Оползень связан, главным образом, с наличием в толще горных пород слабых увлажненных слоев, контактов, даек, тектонических нарушений.

Откос — наклонная или вертикальная поверхность открытой горной выработки или искусственной насыпи (отвала).

Поверхность скольжения — поверхность в массиве борта разреза (откоса уступа или отвала), являющаяся геометрическим местом точек максимальных относительных сдвигов горных пород и отделяющая смещающуюся часть от основной неподвижной части массива горных пород.

Подошвенные (контактные) оползни — оползни отвалов, возникающие при размещении отвальных пород на горизонтальном или наклонном слоистом основании с падением слоев согласно откосу и низким сопротивлением сдвигу по контактам слоев; поверхность скольжения в призме упора проходит по ослабленному контакту.

Подподошвенные оползни отвалов возникают при размещении отвалов на слабом основании (заболоченных участках или обводненных пластичных породах лежачего бока). Основным внешним признаком этих оползней, по которому они отличаются от надподошвенных и подошвенных оползней, является наличие вала выпирания пород оползня, возникающего перед откосом отвала.

Подтопленный откос — откос открытой горной выработки, нижняя часть которого находится в зоне затопления.

Потенциальная (расчетная) поверхность скольжения — поверхность в массиве, примыкающем к борту разреза (откосу уступа или отвала), по которой производится оценка (прогноз) устойчивости откосов.

Предельная высота вертикального откоса — максимальная высота откоса, при которой вертикальное обнажение устойчиво.

Прибортовой массив — часть массива горных пород, заключенная между бортом разреза и поверхностью, ограничивающей область возможных микроподвижек в массиве в период скрытой стадии развития оползня (обрушения). Параметры прибортового массива зависят от прочностных и структурных характеристик горного массива.

Пригрузка откоса — отсыпка упорной призмы вдоль фронта откоса с целью предотвращения его деформаций.

Призма активного давления — верхняя часть призмы возможного обрушения, оконтуренная крутым участком наиболее напряженной поверхности со значениями углов наклона, превышающими величину угла внутреннего трения массива; на этом участке внешние сдвигающие призму силы превышают внутренние силы сопротивления смещению.

Призма возможного обрушения борта разреза (откоса уступа, отвала) — часть массива горных пород (отвалных масс), заключенная между бортом разреза (откосом уступа или отвала) и наиболее напряженной поверхностью в массиве.

Призма упора — нижняя часть призмы возможного обрушения, оконтуренная пологим участком наиболее напряженной

поверхности со значениями углов наклона, меньшими величины угла внутреннего трения массива; на этом участке внутренние силы сопротивления смещению призмы превышают внешние сдвигающие силы.

Проба — определенное количество материала, отобранное для испытаний от партии горной породы.

Расчетные характеристики — показатели физико-механических свойств горных пород, используемые при расчете устойчивости.

Сила гидростатического давления — совместное действие гидростатического взвешивания и гидродинамической силы, распределенное по вероятной поверхности скольжения и направленное по нормали к ней.

Репер — закрепленная в натуре (на земной поверхности, в массиве горных пород или в горной выработке) маркшейдерская точка с известными координатами. Различают глубинные, исходные, опорные и рабочие реперы.

Среднее значение (выборочное) — среднеарифметическое из частных значений, образующих выборку независимых друг от друга и от пространственных координат величин.

Среднеквадратическое отклонение — мера отклонения опытных данных от выборочного среднего значения или от функциональной зависимости, выражаемая в абсолютных единицах.

Трещина отрыва — верхняя вертикальная часть поверхности скольжения.

Угол внутреннего трения горных пород — угол, тангенс которого равен коэффициенту внутреннего трения породы (угол наклона прямолинейной части графика сдвига горной породы к оси нормальных напряжений).

Угол естественного откоса — наибольший угол, который может быть образован откосом свободно насыпанной горной массы в состоянии равновесия с горизонтальной плоскостью; зависит от крупности и формы частиц породы, шероховатости их поверхности, а также от плотности и влажности породы.

Угол наклона борта карьера (разреза) — угол в плоскости, нормальной к простираению борта разреза, образованный горизонтом с условной поверхностью, проходящей через верхнюю и нижнюю бровки разреза.

Угол откоса уступа — угол в плоскости, нормальной к простираению уступа, между линией, соединяющей верхнюю и нижнюю бровки уступа, и ее проекцией на горизонтальную плоскость.

Угол откоса яруса отвала — угол в плоскости, нормальной к простираению откоса отвала, между линией, соединяющей верхнюю и нижнюю бровки яруса отвала, и ее проекцией на горизонтальную плоскость. В большинстве случаев это угол естественного откоса горных пород.

Число степеней свободы — число независимых наблюдений, равное числу определений n характеристики минус число оцениваемых статистических параметров.

Ширина зоны деформирования земной поверхности — расстояние от верхнего контура разреза до границы, за которой микродеформации не проявляются.

Ширина зоны заколов — расстояние от верхнего контура (бровки) разреза (уступа) до наиболее удаленного от него закола или трещины.

Эквивалентный угол наклона бортов выпуклого и вогнутого профилей — фиктивный угол наклона борта разреза плоского профиля той же высоты, при котором объем вскрыши, необходимый для его оформления, эквивалентен объемам вскрыши при оформлении бортов выпуклого и вогнутого профилей.

2. СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ИЗУЧЕННОСТИ ВОПРОСОВ ОЦЕНКИ УСТОЙЧИВОСТИ ОТКОСОВ КАРЬЕРОВ И ОТВАЛОВ

Изучение вопросов, связанных с обеспечением устойчивости породных массивов, имеет почти двухсотлетнюю историю и начинается, по всей видимости, с Кулона, предложившего в 1773 г. специальный метод для расчета подпорных стенок и стабильности откосов грунтовых масс. Определенными вехами в становлении данного направления исследований можно считать работы де Сазийи (1851), Винклера (1872), Кульмана (1886) и, в особенности, Ренкина (1857), Кеттера (1903), Петтерсона и Хольтина (1916). Начало систематического изучения устойчивости карьерных откосов в странах СНГ связано с интенсивным развитием открытых разработок в послевоенный период. В различных регионах стран СНГ, где открытые разработки приобрели особенно большой размах, при институтах горного дела и ведущих вузах (ВНИМИ, Екатеринбургский филиал ВНИМИ, Унипромедь, ИГД МЧМ, ВИОГЕМ, ГИГХС, ВНИПИгорцветмет (с 1988 г. Гипроцветмет), Якутнипроалмаз, МГГУ, КарГТУ, УГГГА, МГМА и др.) создаются специализированные отделы, лаборатории, секторы и группы, к работе в которых привлекаются многие видные ученые. Именно в это время закладывается фундамент отечественной школы исследования устойчивости бортов карьеров и отвалов, созданию и развитию которой во многом способствовали труды В.В. Соколовского, Н.Н. Мельникова, В.В. Ржевского, К.Н. Трубецкого, Г.Л. Фисенко, С.И. Попова, Ю.Н. Малюшицкого, И.И. Попова, П.Н. Панюкова, М.А. Ревазова, М.Е. Певзнера, А.Б. Фадеева, В.Т. Сапожникова, Ю.И. Туринцева, А.М. Демина, В.Н. Попова, Р.П. Окатова, А.М. Гальперина, А.И. Ильина, Э.Л. Галустьяна, В.И. Стрельцова, В.Г. Зотеева, В.И. Пушкарева, Б.Д. Полового, П.С. Шпакова, А.Г. Афанасьева, В.А. Гордеева, Ф.К. Низаметдинова,

Н. Н. Куваева, И.И. Ермакова, Г.Г. Поклада, Т.К. Пустовойтой, А.М. Мочалова, Ю.С. Козлова, Л.В. Савкова, В.П. Улыбина, Г.Р. Глозмана, В.П. Будкова, В.Д. Морозова, В.И. Зобнина, Б.П. Голубко, Ю.М. Николашина, О.Т. Токмурзина и многих других. Однако, несмотря на достигнутые при выполнении многочисленных исследований успехи и предпринимаемые при этом значительные усилия, проблема обеспечения устойчивости карьерных откосов, и особенно отвальных откосов, изучена еще далеко не достаточно и требует дальнейшей разработки и совершенствования многих входящих в нее вопросов. Об этом свидетельствуют и результаты выполненных при участии авторов в 1987—2003 гг. обследования фактического состояния устойчивости отвалов и бортов карьеров. В частности, было установлено: на всех без исключения карьерах имеются различного вида и объема деформации отвалов и бортов карьеров (уступов) и это несмотря на то, что многие отвалы и карьеры еще не достигли проектной высоты и имеют фактические углы наклона откосов меньше проектных, в то время как и те, и другие, в большинстве случаев, существенно ниже предельных, т. е. определяемых по фактору устойчивости. Такое положение дел, как показал анализ результатов обследования фактического состояния устойчивости карьерных откосов, прежде всего связано с низкой достоверностью исходных данных о состоянии и свойствах карьерных массивов, отсутствием простых и эффективных способов и средств контроля состояния массивов и их оснований, недостаточной изученностью вопросов учета отдельных природных и технологических факторов при определении параметров конструктивных элементов профиля карьерных откосов как в плане, так и по высоте, несовершенством методов и средств расчета параметров предельных откосов.

2.1. КРАТКИЙ ОБЗОР МЕТОДОВ ОЦЕНКИ УСТОЙЧИВОСТИ КАРЬЕРНЫХ ОТКОСОВ

Для современного этапа развития открытых разработок месторождений полезных ископаемых характерны следующие особенности: рост экономически выгодной глубины, увеличение

сроков службы откосов уступов и бортов карьеров, возрастание объемов вскрыши, интенсификация и концентрация горных работ, сложность инженерных, геологических и гидрогеологических условий разработки месторождений, низкое содержание полезных компонентов в руде. Карьеры и отвалы функционируют круглый год (рис. 2.1, 2.2). С целью повышения эффективности и полноты отработки месторождения, улучшения технико-экономических показателей работы предприятия при безопасном ведении горных работ в карьере требуется надежное обеспечение устойчивости карьерных откосов. При этом основной задачей является определение оптимальных параметров откосов с учетом их длительной устойчивости при минимальных объемах вскрышных работ. Завышенные углы откосов приводят к развитию оползневых явлений, причиняющих большой материальный ущерб горным предприятиям: нарушается технологический процесс, под оползнем оказываются подготовленные к выемке запасы, требуется перезакавка оползневых масс, нарушаются безопасные условия труда. С другой стороны, заниженные углы откосов вызывают резкое увеличение объемов вскрышных работ.

Для обоснования параметров устойчивых откосов требуется детальное изучение всех факторов, влияющих на процесс сдвижения горных пород в карьере, при этом решающее значение имеет выбор способа расчета, который отвечал бы конкретным горно-геологическим условиям и физико-механическим свойствам пород, слагающих прибортовой массив карьера.

Устойчивость откосов открытых горных выработок определяется двумя основными факторами: напряженным состоянием прибортового массива и физико-механическими свойствами горных пород. В соответствии с теорией академика В.В. Ржевского [17] напряженное состояние определяет действующие нагрузки, а физико-механические свойства – прочность пород по наиболее слабой поверхности (потенциальной поверхности скольжения).

При исследовании напряженно-деформированного состояния прибортового массива используются две модели — линейно-дефор-

a



б



в



Рис. 2.1. Общий вид карьера:
a, б — летом; *в* — зимой

мируемой и предельно-напряженной среды. К настоящему времени найдено большое число частных решений для модели линейно-деформируемой среды. Например, применение этой модели к расчету устойчивости откосов разработано В.К. Цветковым в работе [71]. Однако, применение модели линейно-деформируемой среды дает явно завышенные (в 2—3 раза) значения предельных параметров откоса. Расчетные параметры, определенные с помощью данного способа, не подтверждаются практическими данными. Это связано с тем, что горные породы для описания напряженно-деформированного состояния требуют применения более сложных моделей — вязко-упругих, упруго-пластичных, реологических моделей и их сочетаний. Построение строгих математических решений на их основе является весьма сложной задачей, связанной с решением большого числа дифференциальных и интегральных уравнений, выполнении граничных условий, налагаемых постановкой исходной задачи. Поэтому к настоящему времени не существует законченных решений задачи устойчивости карьерных откосов, основанных на исследовании напряженно-деформированного состояния нелинейной среды. Однако развитие компьютерных технологий в последние годы дает все основания для успехов исследований в данной области.

Все современные методы расчета устойчивости откосов основываются на более простой модели предельно-напряженной среды, в которой не рассматривается деформированное состояние массива. Расчеты без учета деформаций, рассматривающие равновесие жестких элементов, при предположении о достижении предельного напряженного состояния по потенциальной поверхности обрушения, позволяют получать относительно простые инженерные решения для различных расчетных схем, которые получили хорошее практическое подтверждение.

Сложность и разнообразие горно-геологических и горно-технических условий открытых разработок обусловили создание многочисленных способов и методов расчета устойчивости откосов, их насчитывается к настоящему времени около 150 [3]. Многообразие методов, способов и приемов расчета устойчиво-

сти откосов привело к необходимости их классификации по тем или иным признакам.

В классификациях М.Е. Певзнера [18], И.В. Федорова [72] и Г.Л. Фисенко [10] в качестве основного признака для отнесения способа расчета к определенному классу принимается форма поверхности скольжения. В классификации А.М. Демина [19] методы расчета подразделяются по нескольким определяющим признакам: по подходу к решению задачи (теоретические и эмпирические методы); по используемым в расчетах характеристикам (методы, учитывающие нагрузки, силы, напряжения и деформации); по способу решения (аналитические, численно-аналитические, графические, графоаналитические); по способу определения поверхности возможного разрушения (методы, в которых поверхность задается либо отыскивается).

А.И. Ильин и др. [76] рекомендуют обобщенную классификацию, включающую 16 частных классификаций, всесторонне характеризующих деформационный процесс. Им предлагается методика паспортизации нарушений откосов, позволяющая наиболее полно, на единой геолого-маркшейдерской основе документировать происшедшие нарушения устойчивости. На основе классификации нарушений устойчивости и их паспортизации создана фактографическая информационно-поисковая система «Нарушения устойчивости откосов на карьерах», которая в настоящее время насчитывает более 600 единиц и систематически пополняется. Система служит для выбора аналогов, для разработки противооползневых мер и своевременного прогноза нарушений устойчивости на основе анализа закономерностей инженерно-геологических процессов и явлений, происходящих в бортах карьеров.

Оценка случаев деформаций откосов на карьерах обычно выполняется по трем основным признакам: частоте возникновения нарушений устойчивости откосов, типам пород и причинам развития деформаций.

По данным А.И. Ильина [76] среди случаев деформаций откосов на карьерах черной металлургии оползни составляют 42,7 %, обрушения — 20,6 %, осыпи — 14,7 %, оплывины и просадки —

по 10 %. При этом 75 % деформаций откосов происходит в слабых песчано-глинистых породах, 25 % — в скальных и полускальных выветрелых и трещиноватых породах. На устойчивость откосов наибольшее влияние оказывают подземные и поверхностные воды — 49,8 %, недостаточная геологическая изученность и, как следствие, неверно выбранные параметры откосов — 15,4 %, отсутствие заоткоски уступов — 10 %, отклонение от проектных параметров — 8%, процессы выветривания и климатические условия — 7,7 %, прочие причины — 3,8 %. А.М. Демин [2] утверждает, что 59 % случаев деформаций откосов связано с увлажнением пород и наличием поверхностей ослабления в массиве, 19 % — с неправильным назначением параметров откосов; с атмосферными осадками связано более 25 % случаев нарушений устойчивости откосов на карьерах.

Наиболее полной, на наш взгляд, является классификация М.Е. Певзнера [18], в которой выделено четыре класса методов по принципу определения параметров устойчивого откоса.

Класс А — построение контура откоса, во всех точках которого удовлетворяется условие предельного равновесия. Методы расчета класса А основаны на решении дифференциальных уравнений равновесия сыпучей среды совместно с условием предельного состояния. Основы методов расчета этого класса заложены в работах В.В. Соколовского [20].

Класс Б — построение контура откоса, вдоль которого удовлетворяется условие равенства угла наклона касательной углу сопротивления сдвигу. К данному классу относятся методы расчета Н.Н. Маслова (метод F_p) и М.Н. Троицкой.

Класс В — построение в массиве откоса поверхности скольжения, вдоль которой удовлетворяется условие предельного равновесия. Методы этого класса наиболее многочисленны и основаны на принятии в расчетных схемах той или иной формы поверхности скольжения (плоской, круглоцилиндрической, в виде логарифмической спирали, сложной криволинейной, ломаной).

Методы расчета откосов, основанные на гипотезе плоской либо ломаной поверхности скольжения, разрабатывались в разное время Г. Франсе, Л.Н. Бернацким, П.М. Цымбаревичем,

Н.В. Орнатским, Ю.Н. Малюшицким, В.Н. Поповым, Р.П. Ока-
товым, П.С. Шпаковым и др. и связаны с наличием в приборто-
вом массиве поверхностей ослабления в виде трещин, слабых
слоев либо контактов горных пород.

Группа методов расчета, основанных на принятии кругло-
цилиндрической поверхности скольжения, подразделяется на
две подгруппы. В первой отсек обрушения рассматривается как
единое монолитное тело. В такой постановке вопрос впервые
был рассмотрен А.И.Ивановым в 1936 г. и Д.Тейлором в 1937 г.,
который предложил расчетную схему с указанием системы сил,
действующих на отсек обрушения. Дальнейшее развитие вопро-
сы устойчивости монолитного отсека получили в работах
О. Фрейлиха, Р.Р. Чугаева, У.А. Тер-Аракеляна, Н.В. Гольд-
штейна, И.В. Федорова. Во второй группе отсек обрушения раз-
бивается на отдельные вертикальные «столбики», на которые в
момент предельного равновесия действуют: собственный вес P ,
неизвестные по величине и направлению силы взаимодействия
между «столбиками» E' и E'' , опорная реакция массива R , дей-
ствующая на основание «столбика» и являющаяся равнодейст-
вующей нормальной реакции N и предельной силы трения T .
Для решения задачи в такой постановке необходимо в расчет-
ную схему внести допущение о направлении действия сил взаи-
модействия между блоками (угол δ). В способе Г. Крея принято
горизонтальное направление действия сил взаимодействия ($\delta =$
 $= 0$), причем рассмотрен сыпучий грунт. В дальнейшем О.В. Вяз-
емским и Г.Н. Ягодиным в расчетную схему Г. Крея были вве-
дены силы сцепления. В методе К. Терцаги направление сил
взаимодействия между блоками принимается по касательной к
линии скольжения в данной точке. Р.Р. Чугаев разработал метод
«весового давления», в котором в отличие от метода К. Терцаги
в уравнениях равновесия сила нормальной реакции принимается
равной весу грунта. Данный метод является основой метода ал-
гебраического сложения сил.

Метод расчета коэффициента устойчивости откоса, осно-
ванный на принятии поверхности скольжения в виде логариф-
мической спирали, впервые был предложен в 1935 г. М. Ренду-

ликом. Вычисления по этому методу ведутся путем подбора наиболее слабой поверхности в массиве. Н.П. Пузыревский вывел уравнение кривой скольжения для сыпучего грунта, однако не определено положение наиболее слабой поверхности. Наиболее обоснованным является метод КарПТИ [3], в котором центр логарифмической спирали принят в точке пересечения линии откоса и отвесной линии, проходящей через середину призмы возможного обрушения, так же как и у многих других исследователей, но метод расчета доведен до логического завершения. Данный метод дает возможность аналитически рассчитывать предельную высоту откоса и ширину призмы обрушения, а также оценивать коэффициент устойчивости откоса или определить параметры предельного откоса по графикам [3].

К группе методов, основанных на принятии поверхности скольжения сложной криволинейной формы, относятся методы Г.Л. Фисенко, С.Н. Никитина, Л.В. Савкова. Способы С.Н. Никитина и Л.В. Савкова дают результаты, близкие к методу Г.Л. Фисенко, но не нашли широкого применения из-за трудоемкости расчетов и графических построений. Попытка устранить недостаток метода Г.Л. Фисенко, в части определения ширины призмы возможного обрушения, была предпринята А.М. Мочаловым [21], который предложил аналитический способ расчета устойчивости откосов. В этом способе поверхность скольжения отстраивается по Г.Л. Фисенко и для нее на основе метода многоугольника сил определяется предельная высота откоса. Ширина призмы возможного обрушения принимается в 1,5 раза больше соответствующей величины по Г.Л. Фисенко.

Класс Г — построение в массиве откоса поверхности скольжения, вдоль которой удовлетворяется условие специального предельного равновесия. В этот класс включены методы Н.Н. Куваева, П.Н. Панюкова, Г.Л. Фисенко, Р.П. Окатова. Н.Н. Куваев предложил методы расчета откосов скальных трещиноватых пород, П.Н. Панюков решает пространственную задачу устойчивости массива при сложной поверхности ослабления. Метод Г.Л. Фисенко позволяет найти параметры устойчивых откосов при подрезке согласно падающих слоев и заоткоски по

наслоению. Р.П. Окатов и В.Н. Попов систематизировали и разработали расчетные схемы устойчивости откосов в анизотропном массиве и обосновали их устойчивые параметры [24, 25].

На практике широкое применение получил метод Г.Л. Фисенко [8,10], основанный на теории предельного равновесия сыпучей среды, предполагающей выполнение условия предельного равновесия по внутренней границе некоторой области прибортового массива. Предложенные им расчетные схемы получили широкое распространение и применение на практике.

Фундаментальное уравнение предельного равновесия Кулона имеет вид

$$\tau = \sigma \operatorname{tg} \rho + k, \quad (2.1)$$

где σ , τ — нормальное и касательное напряжения, действующие вдоль линии скольжения, МПа; k — сцепление горных пород, МПа; ρ — угол внутреннего трения, градус.

Исходные положения, на которых базируются методы расчета, сводятся к следующему:

- деформирование карьерных откосов происходит в форме оползания или обрушения по поверхности скольжения в приконтурном горном массиве;
- при отсутствии в откосе неблагоприятного расположения поверхностей ослабления массива поверхность скольжения близка по форме к круглоцилиндрической;
- при наличии в откосе неблагоприятно ориентированных поверхностей ослабления поверхность скольжения совпадает с ними.

В однородном массиве горных пород элементарные площадки скольжения возникают при главном напряжении σ_1 не менее

$$\sigma_1 = 2k \operatorname{ctg} \left(45^\circ - \frac{\rho}{2} \right), \quad (2.2)$$

где k — сцепление породы, МПа; ρ — угол внутреннего трения породы, градус.

Площадки скольжения возникают с глубины

$$H_{90} = \frac{\sigma_1}{\gamma} = \frac{2k}{\gamma} \operatorname{ctg}(45^\circ - \frac{\rho}{2}), \quad (2.3)$$

где γ — плотность пород, т/м³.

Угол между направлением главных напряжений и элементарными площадками скольжения $\mu = 45^\circ - \rho/2$.

В массиве горных пород на удалении от откоса наибольшее главное напряжение σ_1 совпадает с вертикалью, по мере приближения к поверхности откоса оно отклоняется от вертикали в сторону откоса и при выходе к откосу совпадает с ним.

В однородном массиве наклон отдельных участков поверхности скольжения призмы возможного обрушения плавно изменяется от направления μ к вертикали в верхней части поверхности скольжения до направления под углом μ к поверхности откоса в нижней части, образуя круглоцилиндрическую поверхность скольжения. Схема построения поверхности скольжения в однородном массиве по Г.Л. Фисенко [10] показана на рис. 2.2.

1) На чертеже откоса проводят линию BD , отстоящую от поверхности откоса на расстоянии H_{90} , и линию AB .

2) На линии BD выбирают произвольную точку D и через неё проводят линию DC под углом $45^\circ + \rho/2$ к линии BD . Под этим же углом из точки B проводят линию BC .

3) Из нижней точки откоса M под углом $45^\circ - \rho/2$ к линии откоса строят линию MK .

4) На линии MK от точки M откладывают равные отрезки MP , PP' , $P'P''$, а на линии DC от точки C вниз — отрезки CC' , $C'C''$ и $C''C_0$.

5) Из точек P , P' , P'' проводят прямые линии, параллельные линии откоса MA , а из точек C' , C'' и C_0 — линии, параллельные BC . Пересечение этих линий даст точки F , F_1 , F_2 , F_3 . Через полученные точки проводится прямая FO до пересечения с линией MK .

6) Из точки O проводят прямую, параллельную DC , до пересечения с линией BD в точке E .

7) Из точки N восстанавливают перпендикуляр к линии OE , а из точки M — перпендикуляр к линии MK . Пересечение перпендикуляров даст положение центра окружности, проходящей через точки M и E .

После проделанных операций производят проверку устойчивости откоса.

Для этого в крупном масштабе строят оползневой клин и вертикальными линиями разбивают его на ряд призм (рис. 2.3). Измеряют площадь каждого блока s_i , определяют массу породы в каждой призме на 1 м фронта карьера по формуле

$$Q_i = s_i \gamma L, \text{ где } L = 1 \text{ м.}$$

Вертикальные линии, являющиеся границами призм, продолжают вниз на расстояния, соответствующие в выбранном масштабе массе призм.

Из точек пересечения этих линий с поверхностью скольжения восстанавливают перпендикуляры. Для каждой призмы определяют Q_i и N_i , между которыми измеряют угол θ_i . Определяют N_i и T_i по формулам:

$$N_i = Q_i \cos \theta_i, T_i = Q_i \sin \theta_i.$$

Значения N_i и T_i помещены в табл. 2.1. Находят длину поверхности скольжения L , после чего определяют коэффициент устойчивости по формуле

$$n = \frac{\operatorname{tg} \rho \sum N_i + kL}{\sum T_i}, \quad (2.4)$$

где ρ — угол внутреннего трения, градус; k — коэффициент сцепления породы, МПа; L — длина поверхности скольжения, м.

Если полученный коэффициент устойчивости больше или равен заданному, то построенный борт считается устойчивым, если меньше — неустойчивым, в этом случае необходимо или его выполаживание, или проведение искусственных мероприятий по увеличенной устойчивости горных пород.

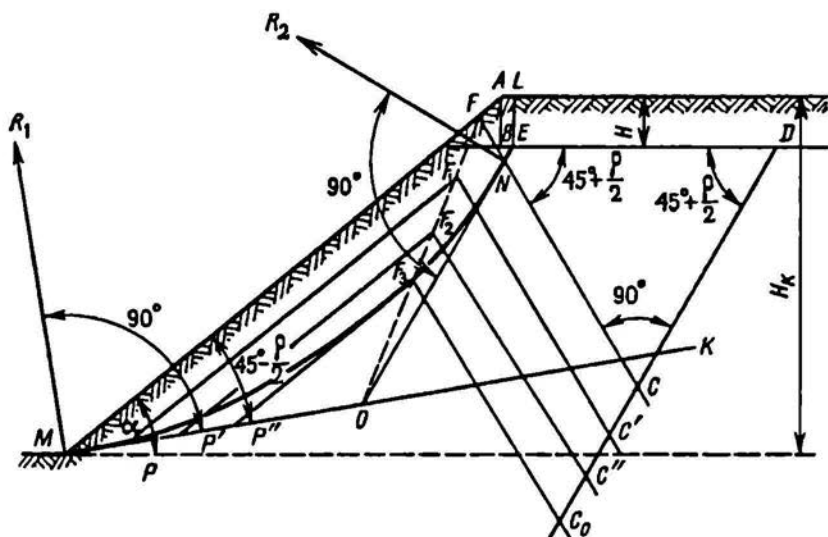


Рис. 2.2. Построение поверхности скольжения в однородном массиве (по Г. Л. Фисенко)

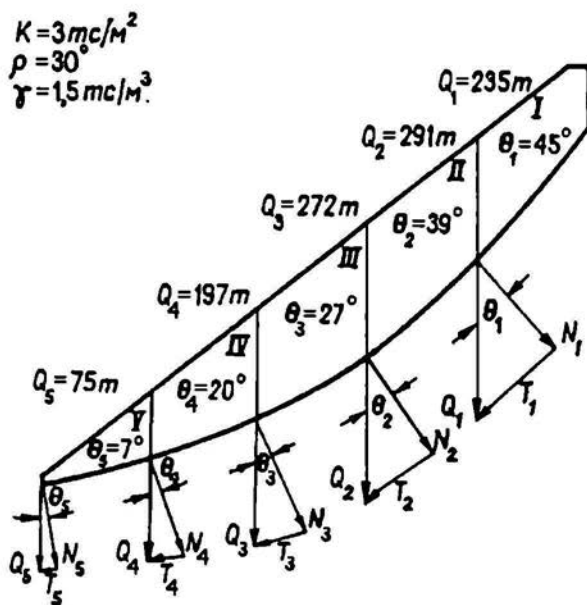


Рис. 2.3. Схема оползневого клина к расчёту устойчивости борта карьера

Значения параметров Q_i , θ_i , N_i , T_i

№ блока	Q_i	θ_i	N_i	T_i
I	233	45°	165	165
II	291	39°	226	183
III	272	27°	243	124
IV	197	20°	185	67
V	75	7°	74	9
Σ	—	—	893	548

Параметры предельного откоса высоту H (или угол откоса α) и ширину призмы возможного обрушения r можно определить по графикам [10] или «Методических указаний ...» [8,9]. Для этого с учетом заданного коэффициента устойчивости n_y определяют расчетные характеристики прочностных свойств пород: сцепление k_p , угол внутреннего трения ρ_p , а затем по графикам $H' = f(\alpha)$ (рис. 2.4) или $r' = f(\alpha)$ находят параметры предельного откоса в следующем порядке [10].

По графику $H' = f(\alpha)$ при заданном угле наклона α и известном ρ_p определяют условную высоту H' . Истинное значение высоты откоса вычисляют по формуле

$$H = H' \frac{k_p}{\gamma}. \quad (2.5)$$

Если требуется найти предельный угол откоса α по заданной высоте H , то вначале определяют

$$H' = H \frac{\gamma}{k_p}, \quad (2.6)$$

а затем по графику, зная H' и ρ_p , находят значение α . Аналогично вышеизложенному вычисляют истинную ширину призмы возможного обрушения.

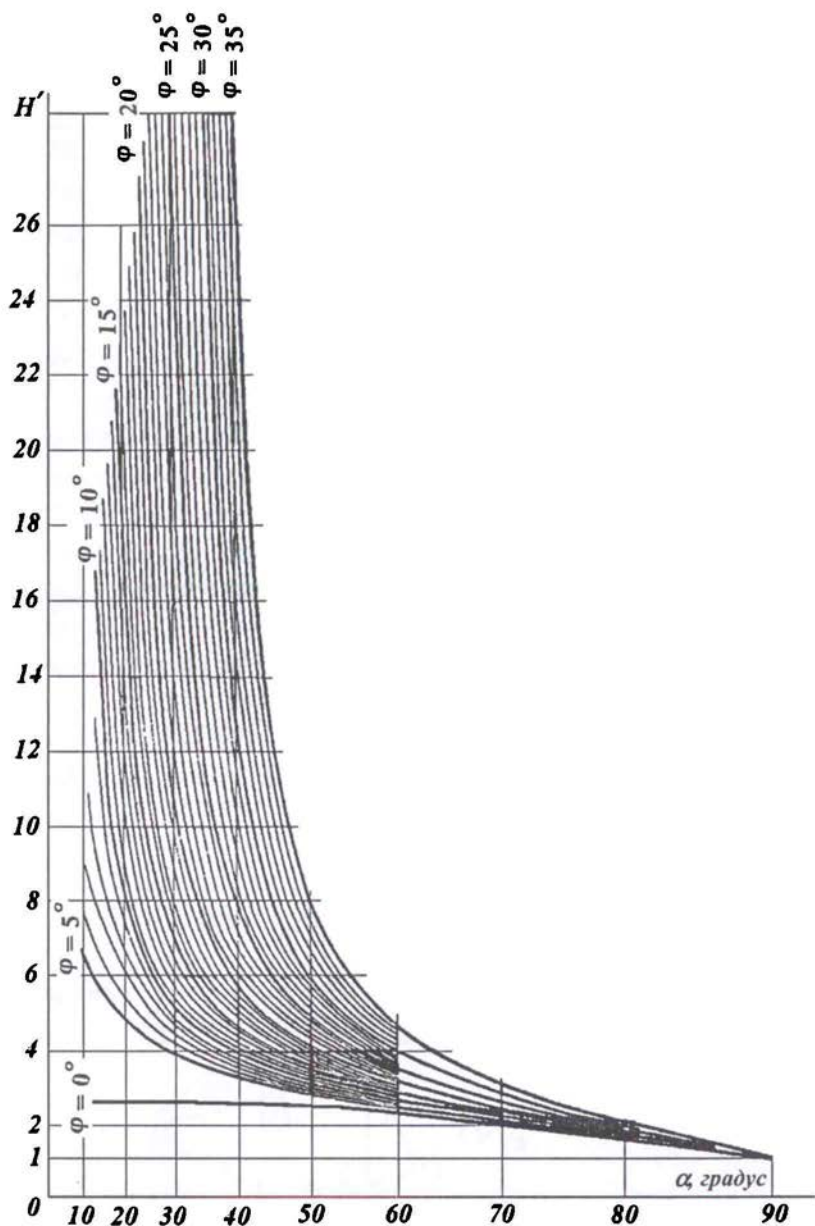


Рис. 2.4. Зависимость высоты откоса от угла наклона (по Г. Л. Фисенко)

$$r = r' \cdot \frac{k_p}{\gamma}. \quad (2.7)$$

Или аналитически по формуле

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

На практике широкое распространение получила упрощенная схема построения круглоцилиндрической поверхности скольжения (без «клина»), представленная на рис. 2.5.

Прибортовой массив пород карьера в ряде случаев значительно отличается по прочностным характеристикам от средневзвешенных характеристик, по которым определяют параметры предельного откоса.

В этой ситуации требуется провести поверочные расчеты по наиболее слабой поверхности, положение которой в горном массиве определяется по методике Г.Л. Фисенко [8,10]. Поверочный расчет осуществлялся методом алгебраического сложения сил [8], пример приведен на рис. 2.3 и в табл. 2.1.

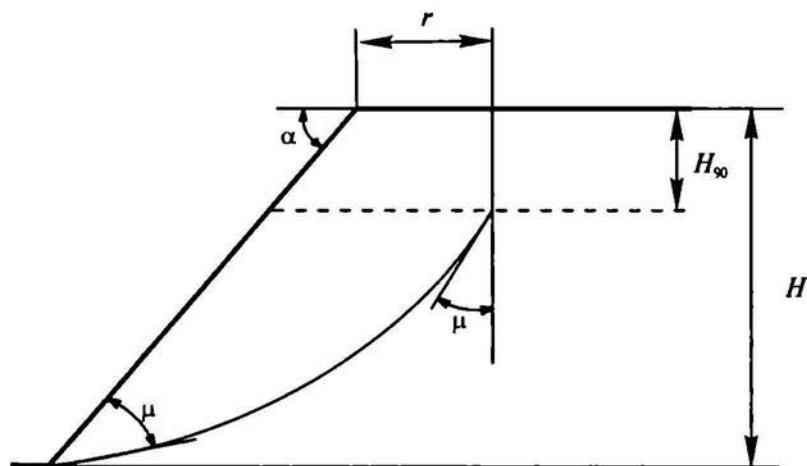


Рис. 2.5. Построение поверхности скольжения в однородном массиве

Использование в расчетах графических построений, применение графиков и диаграмм было достаточно удобным и удовлетворяло требованиям, предъявляемым к инженерным расчетам. Этот метод является графоаналитическим, выполненные расчеты ограничены по точности и не позволяют выполнить более тонкие вычисления. Развитие вычислительной техники в 80-х годах создало условия для разработки теоретически обоснованных численно-аналитических способов расчета, устраняющих вышеперечисленные недостатки. Такие способы разработаны сотрудниками кафедры маркшейдерского дела и геодезии КарПТИ (ныне КарГТУ) под руководством профессора П.С. Шпакова [3].

Методика расчета устойчивости откосов в однородном массиве проф. П.С. Шпакова основана на принципе интегрирования сил по наиболее напряженной поверхности с применением ПЭВМ; теоретические основы способа подробно изложены в работах [2—4]. Аналитическое описание контуров откоса, поверхности скольжения, границ литологических разностей горных пород, слагающих прибортовой массив, а также замена суммирования численным интегрированием привело к предельно возможному повышению точности расчетов. Алгоритмизация вычислительного процесса дала возможность выполнения и анализа большого количества расчетов в короткий промежуток времени, что открыло новые возможности для исследований.

В способе проф. П.С. Шпакова используется модель «расчлененного» отсека обрушения, разложение сил производится по схемам К. Терцаги; в качестве поверхности скольжения принимается поверхность, построение которой отвечает основным положениям теории предельного равновесия сыпучей среды. Основной недостаток разложения сил по схеме К. Терцаги (неучет сил взаимодействия между блоками) устраняется применением интегрирования по поверхности скольжения. Положение этой поверхности в массиве устанавливается на основе результатов расчета на ПЭВМ коэффициента запаса устойчивости по ряду потенциальных поверхностей скольжения с использованием метода последовательных приближений.

Расчет ведется с построения поверхности скольжения, которая начинается с глубины H_{90} , отстоящей от верхней бровки откоса на расстоянии r_i ; ниже она располагается под углом $\mu = 45^\circ - \rho/2$ к вертикали и представляет собой дугу окружности R ; затем круговая кривая переходит в прямолинейный участок и выходит в откос под углом μ .

Для решения конкретной задачи задаются шириной призмы возможного обрушения от $r_{\min}$ до $r_{\max}$ с шагом $\Delta r = (r_{\max} - r_{\min})/N$. Затем для каждого значения r_i строится ряд поверхностей скольжения с радиусом R_i , изменяющимся в зависимости от геометрии откоса от $R_{\min} = H_{90}/\sin \mu$ до $R_{\max} = (H_{90} \cos \alpha + r \sin \alpha)/[\sin(\alpha + \mu) - \cos \mu]$ с шагом Δr .

Для каждой поверхности скольжения вычисляется коэффициент устойчивости как отношение сумм удерживающих и сдвигающих сил, которые находятся интегрированием элементарных сил, действующих по поверхности скольжения, и определяется наиболее слабая поверхность. Далее, если вычисленный коэффициент запаса отличен от 1, то полученная поверхность не является предельной и откос приводится в предельное состояние при помощи искусственного приема – деления прочностных характеристик массива на рассчитанный коэффициент устойчивости

$$k_p = \frac{k}{n}, \quad \operatorname{tg} \rho_p = \frac{\operatorname{tg} \rho}{n}. \quad (2.8)$$

Для решения задач на ПЭВМ под руководством проф. П.С. Шпакова разработан обширный пакет программ для различных расчетных схем устойчивости откосов [28, 57]. В зависимости от поставленной цели, при помощи указанного программного продукта можно решать следующие задачи:

1. По заданным физико-механическим характеристикам пород массива k , ρ , γ и углу откоса α определить предельную высоту откоса H и ширину призмы возможного обрушения r .

2. По заданным физико-механическим характеристикам массива k , ρ , γ и проектной высоте откоса H вычислить угол на-

клона α и ширину призмы возможного обрушения r , отвечающую этой высоте.

3. Оценить устойчивость реального откоса, то есть определить минимальный коэффициент устойчивости откоса заданного профиля с известными параметрами H , α и физико-механическими характеристиками пород массива k , ρ и γ .

2.2. ОСНОВНЫЕ ВИДЫ И ХАРАКТЕР ДЕФОРМАЦИЙ ОТКОСОВ ПОРОДНЫХ ОТВАЛОВ

Нарушения устойчивости отвалов образуют самостоятельную группу деформаций откосов при открытых разработках месторождений. Под нарушением устойчивости отвала следует понимать невозможность его нормальной эксплуатации, когда деформации превышают допустимые значения. Для породных отвалов характерны различные виды деформаций откосов, относящиеся, по классификации Г. Л. Фисенко [10], к осыпям, оплывинам, просадкам и оползням. Возникновение и развитие указанных деформаций обусловлено совокупным влиянием природных и горно-технических факторов.

Осыпи — один из самых распространенных видов деформаций откосов отвалов, они проявляются в виде отрыва отдельных частиц и кусков от отвального массива и скатывания их к подошве откоса. Осыпи происходят в результате физического и химического выветривания горных пород под воздействием природных факторов. В особой мере это относится к отвалам песчано-глинистых пород, отличающихся малой стойкостью против выветривания. Деформации осыпания откосов, имея сравнительно небольшой объем, сами по себе непосредственно не влияют на общую устойчивость откосов, однако, при расположении отвала в непосредственной близости от карьера, осыпи выветрелых пород создают дополнительную нагрузку на борт, и осыпавшиеся в карьер породы могут засыпать транспортные бермы, что приводит к выполнению дополнительного объема работ по их очистке.

При складировании в отвалы переувлажненных пород возникают **оплывины**, характеризующиеся смещением к основанию отвалов водонасыщенных песчано-глинистых пород. Интенсивному развитию оплывин предшествуют, как правило, весенние паводки и дождливые периоды, а также таяние снега, попавшего в отвал в зимний период. Оплывины отличаются от оползней отсутствием поверхностей скольжения и небольшим объемом, в то время как остальная часть массива находится в устойчивом состоянии.

Просадки отвалов характеризуются вертикальным смещением приоткосных участков отвальных масс без образования поверхностей скольжения. Они возникают в результате уплотнения отвальных пород под действием собственного веса или веса горно-транспортного оборудования, наличия в основании отвала слабых пластичных пород. Просадки отвалов обычно сопровождаются развитием трещин и заколов вдоль верхней бровки и являются начальной стадией развития оползней.

Оползни на отвалах характеризуются смещением значительного объема породных масс по поверхности скольжения, которая образовалась в массиве, приведенном в предельное состояние в результате совокупного воздействия внешних и внутренних факторов. К внешним относятся природные и техногенные факторы, а к внутренним — интенсивные изменения физико-механических (особенно прочностных) характеристик отвального массива в период после отсыпки в процессе уплотнения горной массы, разрушения кусков породы крупной фракции от действия веса вышележащих пород, отжим излишней влаги из водонасыщенных пород и перераспределение порового давления, реологические процессы. В зависимости от положения поверхности скольжения относительно основания отвала оползни подразделяются на надподошвенные, подошвенные и подподошвенные. Оползни первого типа характерны для отвалов слабых песчано-глинистых пород, а двух других — для всех типов пород.

При анализе оползневых явлений прежде всего необходимо установить причины, вызывающие образование оползней, и оп-

ределить условия, способствующие их развитию. Для отвалов песчано-глинистых пород основными причинами образования оползней могут являться: большая высота отвалов при их отсыпке под углом естественного откоса, превышающая предельное значение, обусловленное прочностными характеристиками отвального массива; снижение прочности отвальных пород вследствие изменения их физического состояния при увлажнении, выветривании, развитии порового давления и деформаций ползучести; наличие в основании отвалов слоя слабых пластичных пород либо скапливание у их подошвы талых и дождевых вод; дополнительная нагрузка участков, прилегающих к верхним бровкам откоса, горно-транспортным оборудованием [3].

При отсыпке пород естественной влажности на устойчивое горизонтальное основание деформация откосов начинается после превышения отвалом предельной высоты, соответствующей прочностным свойствам отсыпаемых пород.

Процесс деформирования сформированных отвалов песчано-глинистых пород протекает в течение длительного периода (от 3—5 до 10—15 лет) и может завершиться активным развитием либо затуханием деформаций. По мере отсыпки в результате естественной гравитационной сортировки в нижней зоне отвала формируется слой, состоящий из крупных кусков глины, который разрушается под действием веса вышележащих пород и динамических нагрузок от горно-транспортного оборудования. Крупные куски породы разрушаются и заполняют пустоты, приводя к уплотнению отвальных пород и их осадкам, которые могут достигать 15—20 % от общей высоты отвала. Оседание и уплотнение пород отвала с затухающей скоростью происходят до тех пор, пока не образуется глинистый массив отвала с частично восстановленными связями и установится равновесное состояние «порода—вода» на микроуровне. Дальнейшее уплотнение пород возможно лишь путем отжима воды из пор в областях высокого давления. Это приводит к выделению дополнительной (избыточной) влаги в нагруженных областях, утрате несущей способности материала и возникновению поверхности разрушения.

Особенности оценки устойчивости откосов отвалов

При уплотнении пород возникает отвальный массив глинистых пород с новыми прочностными характеристиками. Следует отметить, что при длительном уплотнении глинистых пород отвала их объемный вес приближается к соответствующему значению в массиве.

На устойчивость породных отвалов сильно влияет обводненность основания, связанная со скоплением талых либо дождевых вод у подошвы откоса, что приводит к ослаблению прочностных характеристик пород основания и снижению их несущей способности.

Расчет устойчивости откосов породных отвалов осуществляется при помощи методов расчета карьерных откосов, основанных на теории предельного равновесия. Однако определение устойчивых параметров откосов отвалов имеет свои особенности, которые связаны с тем, что отвалы формируются из разрушенных горных пород с большим различием в свойствах и granulометрическом составе. Укладываемые в отвал горные породы образуют в течение времени породный массив с принципиально иными прочностными характеристиками, отличными от характеристик слагающих его нарушенных горных пород. Поэтому успешное решение задачи обеспечения устойчивости отвальных откосов в первую очередь зависит от правильного и надежного определения физико-механических и прочностных характеристик породного массива. Отсыпка пород осуществляется под углом естественного откоса, который составляет 34—37°, в процессе отсыпки происходит гравитационная сортировка пород: более крупные куски оказываются в нижней части, а более мелкие – заполняют пустоты между ними и оказываются в средней и верхней частях отвала. Очень важное значение при решении вопросов обеспечения устойчивости отвалов имеют рельеф и прочностные характеристики пород основания, на которые производится отсыпка отвала. Отсыпка пород отвала на слабое, особенно наклонное основание, приводит к деформациям и выпору пород основания.

Проблема устойчивости откосов породных отвалов включает в себя решение следующих основных задач [3]:

- определение предельной высоты отвала H и ширины призмы возможного обрушения r устойчивого предельного откоса (коэффициент запаса устойчивости которого $n = 1$) при заданных физико-механических характеристиках пород отвала и значении угла естественного откоса α ;
- определение коэффициента запаса устойчивости реального откоса отвала с известными его параметрами (H и α) и физико-механическими характеристиками пород отвала и грунтов основания;
- построение по известным физико-механическим характеристикам пород тела отвала и основания профиля предельно устойчивого отвала по всей высоте;
- оценка степени устойчивости нагруженного откоса отвала при известных его параметрах и физико-механических характеристиках пород, заданном расстоянии приложения внешней нагрузки от верхней бровки откоса и законе ее распределения.

2.3. ВЕРОЯТНОСТНЫЕ МЕТОДЫ ОЦЕНКИ УСТОЙЧИВОСТИ ОТКОСОВ

Расчет устойчивости откосов породных отвалов классическими методами осуществляется на основе детерминированных прочностных показателей горных пород, составляющих прибортовой массив. Однако такой подход к определению параметров карьерных откосов уже несет в себе некоторую ошибку, связанную с тем, что установленные при помощи опытов и испытаний физико-механические характеристики пород носят статистический характер и являются оценками искомых параметров с вычисленной вероятностью. Их надежность обуславливает и точность расчета, так как прочностные характеристики являются входными параметрами для любого метода расчета. Расчетные характеристики берутся на основании статистической обработки результатов испытаний. Вопросами статистической обработки результатов ис-

пытаний прочностных характеристик горных пород занимались Г.К. Бондарик, И.С. Комаров, Н.Н. Маслов, А.Д. Коган и др. Анализ этих работ показывает, что при обработке результатов испытаний с целью получения их расчетных показателей последние рассматриваются как детерминированные величины, хотя их распределение носит случайный характер. В лучшем случае между отдельными показателями определяются корреляционные связи, когда при известных одних показателях, используя графики и эмпирические зависимости, определяются другие.

Физико-механические свойства пород изменчивы, зависят от большого количества различных факторов, среди которых трудно выделить доминирующий, поэтому для их оценки можно использовать нормальный закон распределения. Изменчивость сцепления и угла внутреннего трения обычно учитывают с помощью коэффициентов запаса, вводимых в определенные из испытаний показатели либо в общий коэффициент запаса устойчивости борта. Полученные таким образом значения называются расчетными характеристиками. Использование методов теории вероятностей и математической статистики дает возможность более строго и научно обоснованно определить расчетные характеристики прибортового массива.

Интервальная оценка статистических характеристик делает возможным оценку надежности их определения. Так как речь идет о прочностных характеристиках, участвующих в расчетах устойчивости прибортового массива, то в качестве расчетных должны приниматься характеристики, соответствующие нижней границе доверительного интервала, построенного с заданным уровнем вероятности.

$$k_p = k(1 - \varepsilon) = k - \frac{t\sigma_k}{\sqrt{n}}; \quad (2.9)$$

$$\operatorname{tg} \rho_p = \operatorname{tg} \rho (1 - \varepsilon) = \operatorname{tg} \rho - \frac{t\sigma_{\operatorname{tg} \rho}}{\sqrt{n}}, \quad (2.10)$$

где ε — точность оценки; t — число, определяемое по таблице функции Лапласа по заданному уровню надежности p , из условия $\Phi(t) = p/2$ [16]; n — объем выборки (количество испытаний).

Статистико-вероятностное определение прочностных характеристик пород является не только важной самостоятельной задачей, но и основой для вероятностного способа расчета устойчивости откосов. Использование расчетных показателей характеристик, вычисленных с определенной надежностью, еще не означает, что и конечный результат, т.е. коэффициент запаса устойчивости или параметры устойчивых откосов, будет найден с той же надежностью. Возникает задача: определить надежность получаемого коэффициента запаса устойчивости или параметров устойчивого откоса (построить границы доверительного интервала с заданной вероятностью) на основе статистических характеристик распределения прочностных параметров массива, рассматривая коэффициент запаса устойчивости (параметры устойчивого откоса) как функцию случайных коррелированных аргументов.

А.И. Арсентьев отмечал [52], что к настоящему времени разработаны достаточно надежные методы расчета устойчивости карьерных откосов, однако в расчетах плохо учитывается вероятностный характер информации о свойствах горного массива и тот факт, что борт карьера формируется в течение длительного промежутка времени. Незнученные факторы стараются учесть введением в расчеты коэффициента запаса, значение которого принимается ориентировочно на основе умозрительных заключений и практических наблюдений.

Определению уровня риска при решении задач устойчивости карьерных откосов посвящен ряд работ Б.Д. Половова [74, 75], который отмечает, что расчетные схемы устойчивости откосов рассматриваются при детерминированных входных параметрах. Природные, горно-технические, временные факторы, обуславливающие устойчивость карьерных откосов, носят вероятностный характер, что вызывает необходимость перехода к вероятностным методам расчета. Вероятностные методы расчета по сравнению с детерминированным подходом обладают следующими преимуществами: объективностью решения, возможностью оценки точности получаемых результатов, оценки уровня значимости исходных параметров и необходимости их уточнения.