МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ
КЫРГЫЗСКОЙ РЕСПУБЛИКИ

КЫРГЫЗСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИМЕНИ И.РАЗЗАКОВА

ИНСТИТУТ ГОРНОГО ДЕЛА И ГОРНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ
ИМЕНИ АКАДЕМИКА У. АСАНАЛИЕВА

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН

КАЗАХСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ К.И. САТПАЕВА



25 лет Независимости
Кыргызской Республики



25 лет Независимости
Республики Казахстан

Кожогулов К.Ч., Турсбеков С.В., Никольская О.В.,
Турсбекова Г.Ж., Турсбеков Н.С.

ОСНОВЫ ГЕОМЕХАНИКИ ПРИ ОТКРЫТОЙ РАЗРАБОТКЕ МЕСТОРОЖДЕНИЙ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ

(Учебное пособие)

Кыргызская Республика – Республика Казахстан

Бишкек – Алматы

2016

УДК 6222:531+622.89
ББК 33.3 я73
О-75

Рекомендовано ученым советом института горного дела и горных технологий имени академика У. Асаналиева
(протокол №7 от «11» июля 2016 г.)

Авторы К.Ч. Кожогулов, С.В. Турсбеков, О.В. Никольская, Г.Ж. Турсбекова, Н.С. Турсбеков

Рецензенты:
д.т.н.,проф. К.Ж. Усенов (Жалалабатский государственный университете)
д.т.н.,проф. М.М.Шамсутдинов (Кыргызско-Российский Славянский университет)

Основы геомеханики при открытой разработке месторождений полезных ископаемых: Учебное пособие / К.Ч. Кожогулов, С.В. Турсбеков, О.В. Никольская, и др. – Алматы 2016. - 146 с.

ISBN 978-601-228-869-8

В пособие описаны основные физико-механические свойства горных пород и методы их определения в лабораторных и натурных условиях; структурные особенности прибортового массива горных пород. Приведены сведения об основных деформациях бортов карьера и откосов уступов, природном и техногенном полях напряжений в массиве горных пород и методы его определения в натурных условиях. Детально описаны методы моделирования напряженного состояния прибортового массива, позволяющие на стадии проектирования карьера оценить напряженного состояния прибортового массива. По результатам многолетних исследований авторов приведено описание основных методов оценки устойчивости бортов карьера и отвалов на горных склонах, методы прогнозирования устойчивости бортов карьера и способы управления геомеханическим состоянием прибортового массива.

Для студентов, магистрантов и аспирантов горных специальностей ВУЗов.

ISBN 978-601-228-869-8

УДК 6222:531+622.89
ББК 33.3 я73

**©, К.Ч.Кожогулов, С.В.Турсбеков,
О.В.Никольская, Г.Ж. Турсбекова и Н.С. Турсбеков, 2016**

ПРЕДИСЛОВИЕ

В учебном пособии, подготовленном авторским коллективом с требованиями примерной программы дисциплины «Геомеханика», утвержденной Министерством образования и науки Кыргызской Республики, содержатся результаты обобщения подготовки горных специальностей в ведущих высших учебных заведениях Кыргызской Республики и Республики Казахстан и опыта преподавания этой дисциплины авторами в Институте горного дела и горных технологий им. академика У.Асаналиева, Казахском национальном исследовательском техническом университете им. К.И. Сатпаева, а также материалы исследований геомеханических процессов при открытой разработке месторождений полезных ископаемых, проведенных авторами на различных месторождениях республик.

Гл.1,2 – написаны С.В. Турсбековым, Г.Ж. Турсбековой, Н.С. Турсбековым, гл.3,4,5,7,8,9,10,11 - К.Ч. Кожогуловым, О.В. Никольской, введение и гл.6-всеми авторами.

Авторы выражают искреннюю признательность рецензентам профессорам К.Ж. Усенову и М.М. Шамсутдинову за детальное рассмотрение рукописи и ценных замечаний, которые были учтены авторами.

Авторы

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ 6
Основные понятия и термины 8
Глава 1 Физико-механические свойства горных пород 10
1.1 Методика отбора проб горных пород для лабораторных исследований 10
1.2 Лабораторные исследования физико-механических свойств горных пород 14
1.2.1 Определение прочностных свойств горных пород 15
1.2.2 Определение физических свойств горных пород 18
1.2.3 Определение деформационных характеристик горных пород 20
1.2.4. Определение реологических свойств горных пород 22
1.3 Натурные испытания горных пород 25
Глава 2 Структурные особенности прибортовых массивов карьеров 31
2.1 Общие понятия о массиве горных пород как геологической среды 31
2.2 Структурные нарушения массива горных пород и оценка его трещиноватости. 33
2.3 Методика изучения трещиноватости горных пород 35
2.4 Съемка трещиноватости пород прибортовых массивов с помощью лазерного 3D сканера 38
2.5 Наземная лазерная съемка 42
2.6 Обработка данных замеров трещиноватости пород 46
Глава 3 Деформирование прибортовых массивов карьера 49
3.1 Виды деформаций бортов карьера 49
3.2 Классификация деформаций бортов карьеров и отвалов 50
Глава 4 Природное поле напряжений массива горных пород 56
4.1 Напряженно-деформированное состояние массива горных пород 56
4.1.1 Гравитационное поле напряжений. 57
4.1.2 Тектонические поля напряжений. 58
4.2 Напряженное состояние прибортового массива карьера 61
Глава 5 Методы оценки напряженного состояние прибортового массива карьера 64
5.1 Деформационные способы определения параметров напряженного состояния массива горных пород 65
5.2 Компенсационные способы определения параметров напряженного состояния массива горных пород 67
5.3 Геофизические методы оценки напряженного состояния прибортового массива карьера 69
Глава 6 Физическое и математическое моделирование напряженного состояния прибортового массива карьера 71
6.1 Лабораторные методы моделирования 71

6.1.1 Геомеханическая модель массива горных пород 71
6.1.2 Понятие о теории подобия 73
6.1.3 Метод эквивалентных материалов 75
6.1.4 Поляризационно-оптический метод моделирования напряженного состояния прибортовго массива 82
6.2 Математическое моделирование 85
6.2.1 Метод конечных элементов 89
Глава 7 Методы оценки устойчивости бортов карьеров и откосов уступов 93
7.1 Вычислительные методы оценки устойчивости бортов карьера 93
7.2 Натурные методы расчета устойчивости бортов нагорных карьеров 95
Глава 8 Оценка устойчивости отвалов вскрышных пород 105
8.1 Виды деформаций отвалов 105
8.2 Оценка устойчивости отвалов вскрышных пород 107
8.3 Оценка влияния подземных вод на устойчивость отвала 113
8.4 Основные требования по безопасному размещению отвалов на горных склонах 115
Глава 9 Контроль за геомеханическим состоянием прибортового массива и отвалов 121
9.1 Маркшейдерско-геодезические наблюдения 122
9.2 Инженерно-геофизические методы наблюдения 125
Глава 10 Прогнозирование устойчивости бортов карьера и отвалов 128
10.1Понятие о прогнозе 128
10.2 Методы прогноза устойчивости бортов карьера 128
Глава 11 Способы управления геомеханическим состояниям прибортового массива 132
11.1 Технологические способы управления геомеханическим состоянием прибортового массива 132
11.2 Инженерные способы управления геомеханическим состоянием откосов 133
11.3 Маневрирование горными работами 135
Заключение 136
Список использованной литературы 137
Приложение 139

ВВЕДЕНИЕ

Эффективная и безопасная разработка месторождений полезных ископаемых открытым способом неразрывно связана с повышением технико-экономических показателей и обеспечением безопасности труда. В целях обеспечения этих двух, не редко взаимоисключающих друг друга параметров интенсификации работ на карьере, необходимо детальное изучение геологических и геомеханических особенностей разрабатываемого массива горных пород. Это необходимо для того, чтобы обеспечить устойчивость бортов карьера, уступов, отвалов, или спровоцировать управляемое обрушение пород.

Открытый способ разработки полезных ископаемых в сравнении с подземным, обеспечивает высокую производительность труда, низкую себестоимость, лучшие и сравнительно безопасные условия работы. Увеличение удельного веса добычи полезных ископаемых открытым способом производится за счет ввода новых мощностей, реконструкции существующих горных предприятий, применения более совершенной технологии и систем разработки на базе новой техники, механизации и автоматизации производственных процессов. В настоящее время проектируются карьеры глубиной до 700 м и более. Стремление отработать месторождение открытым способом при минимальных объемах вскрышных работ зачастую приводит к оползням и обрушениям прибортовых горных массивов, а излишний разнос бортов - к большим неоправданным экономическим затратам.

Опыт показывает, что многие открытые горные разработки как в Казахстане и Кыргызстане, так и за рубежом сопровождаются оползневыми явлениями. Наличие оползней и обрушений уступов, и бортов карьеров снижает основные преимущества открытых работ. Оползни наносят горному предприятию значительный материальный ущерб, вызывая потери полезного ископаемого, приводя иногда к остановке всего технологического процесса. В этих условиях, роль горной науки и ее отдельных направлений, например геомеханики резко возрастает.

Одной из наиболее актуальных проблем безопасного ведения работ на карьере является разработка таких технологий ведения работ, при которых деформации массива в приконтурной зоне массива будут минимальными. Данная проблема будет успешно разрешима при условии владения методами управления состояние массива горных пород.

Основной *целью* геомеханики при открытой разработке месторождений полезных ископаемых является изучение физико-механических свойств горных пород, естественного состояния породного массива и его изменение под влиянием техногенного воздействия.

Главными *задачами* являются: - освоение методов количественной оценки устойчивости уступов, бортов карьеров, отвалов с учетом геометрических параметров карьера, инженерно-геологических, геомеханических и горнотехнических условий месторождения; - выбор и

обоснование мероприятий, направленных на обеспечение устойчивости, предельного равновесия или неустойчивости уступов и откосов для повышения эффективности и безопасности открытых горных работ.

Основными принципами управления состоянием массива горных пород при открытой разработке месторождений полезных ископаемых являются:

- принимаемые углы откосов бортов карьеров должны обеспечивать безопасное ведение горных работ и наибольшую экономичность разработки месторождений;
- коэффициент запаса устойчивости бортов карьера следует устанавливать на основании разведочных данных по стадиями: при проектировании, строительстве карьера, в первый период его эксплуатации;
- в сложных условиях, особенно в глубоких карьерах необходимо принимать специальные меры по управлению состоянием пород в бортах карьеров;
- на карьерах должны быть созданы специальные службы по наблюдению за устойчивостью бортов и контролю проводимых инженерных мероприятий.

Оценка геомеханического состояния массива не мыслимо без наблюдения и контроля за деформациями откосов, и изменением инженерно-геологических условий бортов карьера и отвала, без прогноза устойчивости откосов в течение всего срока существования карьера. Оценка степени деформирования откосов или оценка устойчивости производится по двум параметрам: удерживающим и сдвигающим силам, действующих на поверхности скольжения, различать плоские и пространственные задачи, а это возможно только при детальном изучении физико-механических свойств пород, таких как прочностные и деформационные.

Основные понятия и термины

Борт карьера – боковая поверхность, ограничивающая выемку от основного массива.

Профиль борта карьера в вертикальной плоскости может быть плоским, выпуклым, вогнутым и ломаным; в плане –прямолинейным и криволинейным. Различают рабочие и постоянные борта карьера; характеризуется борт карьера высотой и углом наклона. Линии пересечения с земной поверхностью и дном карьера создают соответственно верхний и нижний контуры.

Деформация горных пород – изменение размеров, формы и объема отдельностей или участков массивов горных пород под действием различных сил, (статических или динамических).

Коэффициент запаса устойчивости – 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 расчетов устойчивости откосов переносится на расчетную или потенциальную (наиболее напряженную) поверхность скольжения.

Наиболее напряженная поверхность – поверхность в примыкающем 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. Наступает из-за ослабления сил сцепления между отдельными частями массива горных пород.

Опасные деформации горных пород – деформации отвалов, уступов и бортов карьера, а также прилегающей к карьеру территории, способные вызвать аварии горно-транспортного оборудования и угрожающие безопасности работ на карьерах.

Оползень– медленное смещение масс горных пород, слагающих откос (нередко и его основание), происходящее в виде скользящего движения между смещающимися породами и неподвижным массивом. Оползень 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.

Осыпь – накопление продуктов осыпания горных пород у основания откоса. Осыпи характерны для всех видов горных пород и затрагивают, как правило, приповерхностную часть крутых откосов. Они способствуют выполаживанию общего угла наклона борта разреза за счет уменьшения площадок (берм) уступов.

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.

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.

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

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

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 разреза – угол между условной поверхностью, проходящей через верхний и нижний контуры разреза, и горизонтальной плоскостью. Угол откоса уступа – угол в плоскости, нормальной к простиранию уступа, между линией, соединяющей верхнюю и нижнюю бровки уступа, и горизонтальной плоскостью.

Угол откоса яруса отвала – угол в плоскости, нормальной к простиранию откоса отвала, между линией, соединяющей верхнюю и нижнюю бровки яруса отвала, и горизонтальной плоскостью. В большинстве случаев это угол естественного откоса горных пород.

Ширина призмы возможного обрушения –участок земной поверхности или площадки уступа между верхней бровкой и контуром потенциальной поверхности скольжения.

Глава 1 Физико-механические свойства горных пород

Эффективная и безопасная разработка месторождений полезных ископаемых предполагает полноту извлечения запасов при выполнении минимальных объемов вскрышных работ с правильным геомеханическим обоснованием достаточной степени устойчивости горного массива, при этом главной исходной информацией являются геологическая изученность месторождения, знание величин показателей физико-механических и прочностных свойств горных, а также элементов залегания структурно-тектонических особенностей горного массива и трещин горных пород, что позволяет определить напряженное состояние массива в процессе отработки. Основными показателями прочностных свойств горных пород являются: плотность γ, сопротивление на сжатие $\sigma_{сж}$ и разрыв $\sigma_р$, сцепление С и угол внутреннего трения φ.

При этом обычно, используется лабораторный способ исследований физико-механических свойств горных пород на образцах, изготовленных из кернов геолого-разведочных скважин. В особо ответственных случаях геомеханической оценки состояния горного массива проводятся натурные испытания.

1.1 Методика отбора проб горных пород для лабораторных исследований

Отбор проб горных пород, в том числе и полезного ископаемого, производится с целью лабораторного определения показателей физико-механических свойств, существенно влияющих на инженерно-геологические условия вскрытия и эксплуатации месторождений.

Лабораторные испытания физико-механических свойств горных пород подразделяются:

- на анализы проб с сокращенным комплексом определений, включающем прочность на сжатие и растяжение, объемный вес, влажность, размокание (для глинистых разностей полускальных пород);
- на анализы проб по полному комплексу, в который входят, кроме того, петрографический состав, удельный вес, коэффициент крепости по Протодьяконову М.М., модуль упругости Юнга, коэффициент Пуассона, сцепление и угол внутреннего трения;
- на специальные виды анализов – характеристики ползучести, длительная прочность, удельная теплоемкость, тепло- и температуропроводность, абразивность, сопротивление изгибу, морозостойкость.

При проектировании геологоразведочных работ определяют объемы опробования и комплексы лабораторных исследований, обеспечивающие изучение физико-механических свойств горных пород с детальностью, отвечающей требованиям этапа разведки. При этом учитывают степень изученности горных пород на предыдущих этапах геологической разведки.

На объемы опробования оказывают влияние размеры месторождения, сложность его геологического строения и инженерно-геологических условий,

литолого-петрографический состав пород, а также глубина залегания полезного ископаемого.

При предварительной и детальной разведке месторождения сеть опробования пород на физико-механические свойства должна обеспечить достаточную надежность усреднения определяемых показателей, а также определение вариации и изменчивости этих свойств по площади и на глубину.

Материалы исследований, проведенные при предварительной разведке, служат для технико-экономического обоснования (ТЭО) освоения месторождения и постановки детальных геологоразведочных работ. Полученные при детальной разведке результаты изучения инженерно-геологических условий месторождения являются обоснованием технического проектирования горного предприятия.

При намечаемом открытом способе разработки месторождения керновые пробы отбирают из каждой петрографической разности, включая рудные тела, в количестве 2-3 проб в случае однородных пород и 4-6 проб – неоднородных (по каждой опробуемой скважине).

Ориентировочно число опробовательских скважин на 1км^2 карьерного поля составляет 2-3 при простых и средней сложности инженерно-геологических условиях и 3-5 скважин – при сложных условиях (типизации месторождений по сложности инженерно-геологических условий их разработки принята по «Инструкции по изучению инженерно-геологических условий месторождений твердых полезных ископаемых при их разведке»).

Расположение опробуемых скважин должно быть таково, чтобы изучить физико-механические свойства пород в местах проектируемых бортов карьера и выездных траншей, а также равномерно изучить свойства пород по площади месторождения, особенно при сильной изменчивости петрографического состава.

При разведке месторождения горными выработками (канавами, шурфами, квершлагами, разведочными шахтами) штуфные пробы для изучения физико-механических свойств отбирают примерно в том же количестве и в тех же местах, что и при бурении скважин. При наличии на месторождении скважин и разведочных, или эксплуатационных горных выработок часть представительных проб на физико-механические испытания отбирают в виде монолитов из горных выработок для сопоставления и подтверждения достоверности результатов испытаний по керновым пробам.

При намечаемом подземном способе разработки месторождения пробы на физико-механические испытания отбирают из висячего и лежащего боков рудных залежей, а также из самих рудных тел. Кроме того, отбирают пробы из пород, по которым будут проходиться капитальные и подготовительные горные выработки (стволы, штреки, квершлаги и т.д.)

Особо обращают внимание на отбор проб из зон тектонических нарушений, где породы могут быть ослаблены и неустойчивы в будущих горных выработках. Опробованию подлежат все пересеченные скважиной литологические слои мощностью больше 1м. При наличии мощных однородных слоев пород пробы отбирают с интервалом в 5-10м.

В связи с многообразием геологического строения рудных месторождений и многочисленностью факторов, влияющих на инженерно-геологические условия их разработки, определение необходимого и достаточного объема опробования горных пород на физико-механические свойства является довольно сложной задачей. Согласование объемов и мест опробования при проектировании этапа геологоразведочных работ с лабораторией нерудных полезных ископаемых и инженерно-геологических исследований в какой-то мере будет способствовать успешному решению этой задачи.

Пробы на физико-механические испытания отбирают из буровых кернов и штуфов горной породы одной литологической разности. Недопустимо включать в одну пробу различающиеся по литологическому и петрографическому составу породы (рисунок 1.1).

Для проведения испытаний по ГОСТ 21153-75 в пробу следует отбирать керны диаметров 40-50мм; при наличии кернов большего или меньшего диаметра испытания проводят нестандартными методами.

Длина отдельных кусков керна в пробе должна быть не менее 10-15см, не считая скосов у торцов, а их общая длина должна обеспечить изготовление не менее 10 образцов на каждый вид испытаний. Для сокращенного комплекса физико-механических испытаний проба должна содержать 1,5-1,7м керна, для полного комплекса – не менее 3,0м керна. Недопустимо раскалывать керны вдоль оси, т.к. для физико-механических испытаний обломки кернов совершенно непригодны.

Из рудных интервалов, подлежащих опробованию на химические анализы, сначала отбирают пробы на физико-механические свойства. После проведения испытаний материал проб может быть возвращен заказчику. Возврат рудных проб оговаривается в заказе.

Штуфные пробы из разведочных и эксплуатационных горных выработок отбирают размером не менее 20х20х20см предпочтительно прямоугольной формы. Количество монолитов в пробе 3-4шт. должно обеспечить изготовление из них не менее 10 образцов на каждый вид испытания по ГОСТ 21153.2-75 и ГОСТ 21153.4-75. Монолиты не должны быть очень большими, так как ограниченные размеры камнерезного оборудования вынуждают обкалывать их, что получается иногда не совсем удачно, особенно при наличии скрытой трещиноватости. Обор проб монолитов желательно производить без применения ВВ для того, чтобы исключить появление в породе пробы искусственной трещиноватости или раскрытие залеченных трещин под воздействием взрыва.

а)



б)



в)



Рисунок 1.1– Керны для отбора проб на месторождении Пустынное:

а – керны из скважины №1; б – керны из скважины №2 для лабораторных исследований; в – керны из скважин №5

Керновые и штуфные пробы из рудных месторождений, представленные изверженными или метаморфическими, обычно весьма крепкими горными породами, при хранении на воздухе не изменяют свои физико-механические свойства, а поэтому консервации не подлежат.

Для длительного хранения консервируют пробы осадочных слабо метаморфизованных пород, которые на воздухе изменяют свою механическую прочность и физическое состояние –теряют влагу, растрескиваются и рассыпаются в дресву. Консервация таких проб производится следующим образом: куски керна и штуфы породы заворачивают в плотную бумагу, затем в два слоя марли, после чего их опускают несколько раз в расплавленный (не очень горячий) парафин, причем после каждого раза дают парафину застыть. Парафинирование проб производится сразу после извлечения кернов из скважины.

Для транспортировки проб в лабораторию их помещают либо в мешочки, либо в ящики, при этом керны плотно укладываются и забивают крышками, особенно при перевозках на большие расстояния. Консервированные пробы в ящиках пересыпают опилками.

Документирование, отправляемых проб в лабораторию, следующее:

- ведомость керновых проб с указанием номера скважины, номера проб и кусков керна, глубины и интервала отбора, мощности слоя и его литологического состава, даты отбора пробы. Для штуфных проб дают точную привязку – наименование выработки где отобрана проба, отметка горизонта, расстояние места отбора до рудного горизонта по вертикали и др.;
- этикетки в двух экземпляров для каждого столбика керна или штуфа горной породы, которые при условии консервации помещаются одна под консервирующий слой, другая наклеивается поверх парафина. Для проб, не подлежащих консервации, – одна этикетка в мешке, ящике, другая – снаружи;
- предварительный литологический разрез скважин в выбранном масштабе с указанием мест отбора пробы.

1.2 Лабораторные исследования физико-механических свойств горных пород

Лабораторные испытания физико-механических свойств горных пород производятся в специализированных лабораториях инженерно-геологических исследований. Одной из таких лабораторий является испытательный центр ТОО «Центргеоаналит» (г.Караганда). Испытания породных образцов выполняют для получения следующих показателей свойств горных пород:

- предел прочности при одноосном сжатии в сухом и водонасыщенном состоянии ($\sigma_{сж}$);
- предел прочности при одноосном растяжении в сухом и водонасыщенном состоянии ($\sigma_р$);
- предел прочности при срезе со сжатием под углами 30^0, 45^0 в сухом и водонасыщенном состоянии ($\tau_{ср}$, $\sigma_{ср}$);
- плотность γ средняя объемная и истинная (удельная);
- пористость (n);
- водопоглощение ($W_п$);
- влажность (W);

- коэффициент Пуассона (ν);
- модуль Юнга (E);
- коэффициент анизотропии (*A*);
- модуль сдвига (G);
- модуль объемного сжатия (S);
- акустическая жесткость (Q).

1.2.1 Определение прочностных свойств горных пород

Прочностные (механические) свойства горных пород изучаются посредством испытаний образцов: на временное сопротивление одноосному сжатию и растяжению, на предел прочности на срез.
Отбор проб и общие требования при испытаниях выполняются в соответствии с ГОСТ 21153.0-75.

Определение предела прочности при одноосном сжатии производится по ГОСТ 21153.2-84.Сущность метода заключается в определении максимальной разрушающей силы ($P_{сж}$) , приложенной к торцам образца правильной формы через стальные плоские плиты (рисунок 1.2).

а) б)



Рисунок 1.2– Испытания пород на предел прочности при одноосном сжатии на прессе: а – образец до сжатия; б – образец после разрушения

Предел прочности горной породы при сжатии $\sigma_{сж}$ для каждого испытуемого образца вычисляется по формуле:

$$\sigma_{сж} = k_в \cdot \frac{P_{сж}}{F_0} \cdot 10 \quad \text{,МПа,} \qquad (1.1)$$

где $P_{сж}$ – общая максимальная нагрузка на образец в момент его разрушения, mH;

$F_0 = \frac{\pi}{4} \cdot d^2$ - начальная площадь поперечного сечения образца, м^2;

d – диаметр образца, м;

$k_в$ – безразмерный коэффициент высоты образца, равный 1,00 при отношении высоты образца к его диаметру m= 2±0,5.

Для других значений отношения m коэффициент $k_в$ устанавливался по таблице 1.1.

Таблица 1.1 – Определение безразмерного коэффициента $k_в$

m	0,70	0,80	0,90	1,00	1,20	1,40	1,60	1,80	2,00
$k_в$	0,68	0,72	0,76	0,80	0,86	0,90	0,94	0,97	1,00

Определение предела прочности породы при одноосном растяжении $\sigma_р$ производится по ГОСТ 21153.3 – 85. Сущность метода заключается в определении максимальной разрушающей силы ($P_{рас}$), приложенной перпендикулярно к образующей цилиндрического образца породы, в результате чего в образце возникают растягивающие напряжения, приводящие к его разрушению в плоскости продольного сечения (рисунок 1.3).

Предел прочности горной породы при одноосном растяжении ($\sigma_р$) определяется по формуле:

$$\sigma_р = \frac{P_{рас}}{d \cdot h} \cdot 10 \text{ ,МПа,} \qquad (1.2)$$

где $P_{рас}$ - максимальная нагрузка на образец, при которой произошел разрыв образца, mH;

d -диаметр образца, м;

h - высота образца, м.

Определение предела прочности исследуемых пород при срезе со сжатием производится по ГОСТ 21153.5 - 88. Сущность метода заключается в определении максимального разрушающего касательного напряжения ($P_{ср}$) при действии на образец пород срезающих и нормальных сжимающих нагрузок в матрицах испытательного устройства (рисунок 1.4 – 1.5).

а) б)



Рисунок 1.3- Испытание пород на предел прочности при одноосном растяжении: а – образец до сжатия; б – образец после раскола

а) б)

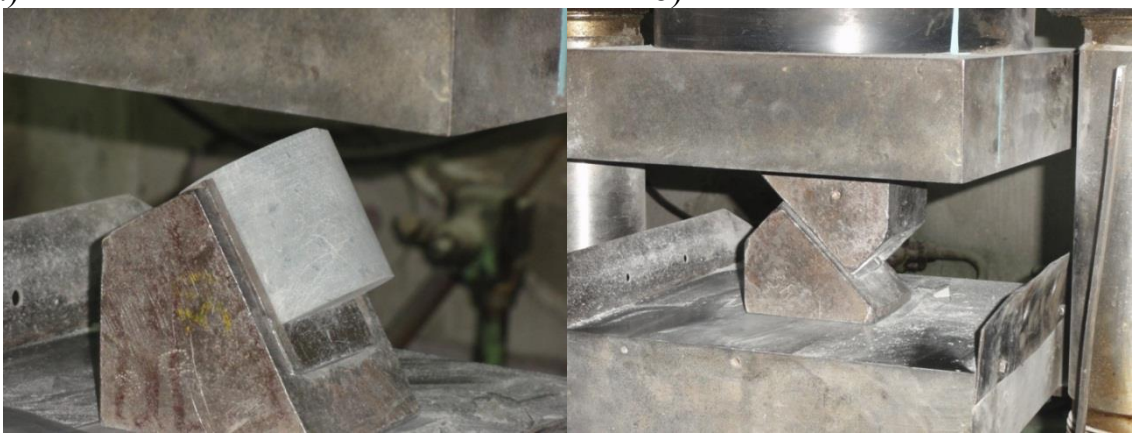


Рисунок 1.4– Подготовка матриц к испытанию пород на предел

прочности при срезе со сжатием с помощью пресса: а – образец в матрице; б – сдвиг образца внутри матрицы



Рисунок 1.5– Результаты испытания пород на предел прочности при срезе со сжатием

При этом, нормальное давление на плоскость среза ($\sigma_{ср}$) и предел прочности горной породы при срезе ($\tau_{ср}$), соответствующий определенному нормальному давлению на плоскость среза, вычисляется по формулам:

$$\sigma_{ср} = \frac{P_{ср} \cdot \cos\alpha}{d \cdot h} \text{,МПа,} \quad (1.3)$$

$$\tau_{ср} = \frac{P_{ср} \cdot \sin\alpha}{d \cdot h} \text{,МПа,} \quad (1.4)$$

где $P_{ср}$– вертикальная, максимальная разрушающая сила, зафиксированная силоизмерителем пресса, кг;

α - угол между плоскостью среза и направлением действия силы, градус;

d - диаметр образца, м;h - высота образца, м.

Испытания горных пород на предел прочности при срезе со сжатием производится при углах наклона матриц - 30^0 и 45^0.

Прочностные свойства пород определяются в двух состояниях: в сухом (естественном) и в водонасыщенном.

Образцы для этого изготавливаются из одного и того же монолита (пробы). Образцы породы, предназначенные для испытаний в сухом (естественном) состоянии, подвергаются испытаниям непосредственно после их изготовления.

Образцы породы, предназначенные для испытаний в водонасыщенном состоянии, увлажняются до полного насыщения водой. Для этого образцы помещаются в чашку с дистиллированной водой так, чтобы они погружались в нее примерно на 1/3 высоты. Через 6 часов образцы заливаются водой до уровня их поверхности (не заливая их сверху). В таком состоянии они оставались до полного их насыщения водой в течение двух-трех суток. После чего их вынимали из воды, обтирали влажным полотенцем и подвергали испытаниям на прочностные свойства.

Для определения прочностных свойств горных пород производится от трех до десяти параллельных испытаний. За окончательный результат испытаний принимается среднее арифметическое значение результатов всех определений.

1.2.2 Определение физических свойств горных пород

Изучение физических свойств горных пород проводится по следующим параметрам: плотность средняя (объемная) и истинная, пористость, водопоглощение, влажность.

Лабораторные испытания определения физико-механических свойств горных пород выполняются по ГОСТ 8269.0-97.

Плотность средняя (объемная) определяется путем измерения массы единицы объема кусков породы с помощью весов для гидростатического взвешивания.

Вычисление средней (объемной) плотности γ испытываемой породы производится по формуле:

$$\gamma = \frac{q}{V}, \text{кг/м}^3, \tag{1.5}$$

где q – масса образца, определяемая на технических весах с точностью до 0,01, кг;

V– объем образца, определяемый методом гидростатического взвешивания, м^3.

Для каждой пробы выполняются по 3-5 параллельных определения объемной плотности. За окончательный результат испытаний принимается среднее арифметическое значение всех определений.

Истинная (удельная) плотность (γ_y) определяется путем измерения массы единицы объема измельченной высушенной породы по формуле:

$$\gamma_y = \frac{q_u}{V_u}, \text{кг/м}^3, \tag{1.6}$$

где q_u – масса измельченного образца (минеральная часть породы), кг;

V_u– объем измельченной породы (минеральная часть породы), м^3.

Для каждой породы производилось по два параллельных определения истинной плотности, затем вычислялось среднее значение с точностью до 0,01.

Пористость горной породы(n) определяется расчетным путем на основании предварительно установленных значений удельной и объемной плотности по формуле:

$$n = 1 - \frac{\gamma}{\gamma_д} \cdot 100\%, \tag{1.7}$$

где γ - объемная плотность породы, кг/м^3;

γ_y - удельная плотность породы, кг/м^3.

Водопоглощение (W_n) определяется методом сравнения массы образца горной породы в насыщенном водой состоянии и после высушивания. Водопоглощение в процентах по массе вычисляется по формуле:

$$W_л = \frac{q_в - q_c}{q_c} 100\%, \tag{1.8}$$

где q_c - масса образца в сухом состоянии, кг;

$q_в$ - масса образца в водонасыщенном состоянии,кг.

Водонасыщение образцов водой осуществляется в течение двух суток при полном их погружении в воду. Уровень воды при этом должен быть выше верха образцов не менее чем на 2см.

Влажность (*W*) горной породы рассчитывается как разность массы породы до высушивания и после, отнесенная к весу абсолютно сухой породы.

Вычисление влажности породы производится по формуле:

$$W = \frac{q_2 - q_3}{q_3 - q_1} \cdot 100\%, \qquad (1.9)$$

где q_1 – масса бюкса с крышкой, г;

q_2 – масса бюкса с крышкой и помещенной в него навеской горной породы (не менее 15г) до высушивания, г;

q_3–масса бюкса с крышкой и помещенной в него навеской горной породы после высушивания, г.

1.2.3 Определение деформационных характеристик горных пород

Используя ультразвуковой метод определения можно найти следующие характеристики горных пород: коэффициент Пуассона, коэффициент анизотропии, модуль Юнга, сдвига, объемного сжатия, акустическая жесткость.

Для проведения испытаний применен прибор УКБ-1М (импульсная ультразвуковая установка). Сущность метода заключается в измерении времени прохождения упругого импульса по образцу горной породы. Данные характеристики определяются методом переворота фаз.

Обработка результатов измерений времени распространения продольных (t_p) и поперечных (t_s) волн выполняется автоматическим способом на ЭВМ.

Определение скорости распространения упругих продольных (V_p) и поперечных (V_s) волн в м/с выполняется по ГОСТ 21153.7:

$$V_p = \frac{l \cdot 10^3}{t_p - t_{pan}}; \qquad (1.10)$$

$$V_s = \frac{l \cdot 10^3}{t_s - t_{san}}, \qquad (1.11)$$

где l -расстояние между пьезодатчиками по оси прозвучивания, мм;

t_p -время пробега упругого импульса продольной волны от получателя до приемника, мкс;

t_{pan} -аппаратурная задержка импульса продольной волны, мкс;

t_s -время пробега упругого импульса поперечной волны от излучателя до приемника, мкс;

t_{san} -аппаратурная задержка импульса поперечной волны, мкс.

Вычисления производятся с точностью до 10м/с.

За окончательный результат испытания образца принимается среднее арифметическое значение скорости распространения продольных или поперечных волн после пяти измерений в одном направлении, указанного в ГОСТ 21153.7.

Коэффициент вариации по пробе вычисляют:

$$V = \frac{\sqrt{\frac{\sum_{1}^{n}\left(V_i - \overline{V}\right)^2}{n-1}}}{\overline{V}} \cdot 100\,,\ \%\,, \qquad (1.12)$$

где V_i -скорость распространения продольных или поперечных колебаний в образце, м/с;

$\overline{V}$ -среднее арифметическое скорости распространения продольных или поперечных волн в пробе, м/с.

Вычисляется три скорости распространения упругих продольных или поперечных волн в трех взаимно перпендикулярных направлениях.

Коэффициентом Пуассона (модулем поперечной упругости) υ называется отношение относительной поперечной деформации к относительной продольной в упругой области:

$$\upsilon = \frac{2 - \left(\frac{\nu_p}{\nu_s}\right)^2}{2 - 2 \cdot \left(\frac{\nu_p}{\nu_s}\right)^2}\,, \qquad (1.13)$$

где ν_p - скорость распространения продольных волн, м/с;

ν_s- скорость распространения поперечных волн, м/с.

Коэффициент анизотропии А определяется по формуле:

$$A = \frac{\nu_p^{\perp}}{\nu_p^{\text{II}}}\,, \qquad (1.14)$$

где ν_p - скорость распространения продольных волн, м/с,

$\nu_p^{\perp}$-перпендикулярно слоистости,

ν_p^{II}-параллельно слоистости.

Модуль Юнга (модуль продольной упругости) *E* характеризует величину напряжения, которое необходимо приложить к деформируемому телу, чтобы

его абсолютная деформация оказалась равной первоначальной длине. Модуль Юнга определяется по формуле:

$$E = \nu_p^{\,2} \frac{(1+\upsilon)\cdot(1-2\upsilon)}{1-\upsilon} \cdot \gamma_k \text{, ГПа,} \qquad (1.15)$$

где ν_p - скорость распространения продольных волн, м/с;

υ- коэффициент Пуассона;

$\gamma_к$– средняя плотность, кг/м^3.

Модуль сдвига G - это отношение приложенного к породе касательного напряжения к углу, на который смещаются частицы:

$$G = \frac{E}{2\cdot(1+\upsilon)} \text{, ГПа,} \qquad (1.16)$$

где *E* - модуль Юнга, ГПа;

υ - коэффициент Пуассона.

Модуль объёмного сжатия S– коэффициент пропорциональности между напряжением объемного сжатия и относительным уменьшением объема образца породы, который определяется по формуле:

$$S = \frac{E}{3\cdot(1-2\upsilon)} \text{, ГПа,} \qquad (1.17)$$

где *E* - модуль Юнга, ГПа;

υ - коэффициент Пуассона.

Акустическая жесткость Q- это способность породы передавать колебательные движения. Величина акустической жесткости зависит от упругих свойств горных пород, их структурных особенностей и минерального состава. Акустическая жесткость *Q* определяется по формуле:

$$Q = \gamma_k \cdot \nu_p^{\,max} \cdot 10^6 \text{, кг/м}^2\text{с,} \qquad (1.18)$$

где $\gamma_к$– средняя плотность, г/см^3,

ν_p^{max}- максимальная скорость распространения продольных волн, м/с.

1.2.4. Определение реологических свойств горных пород

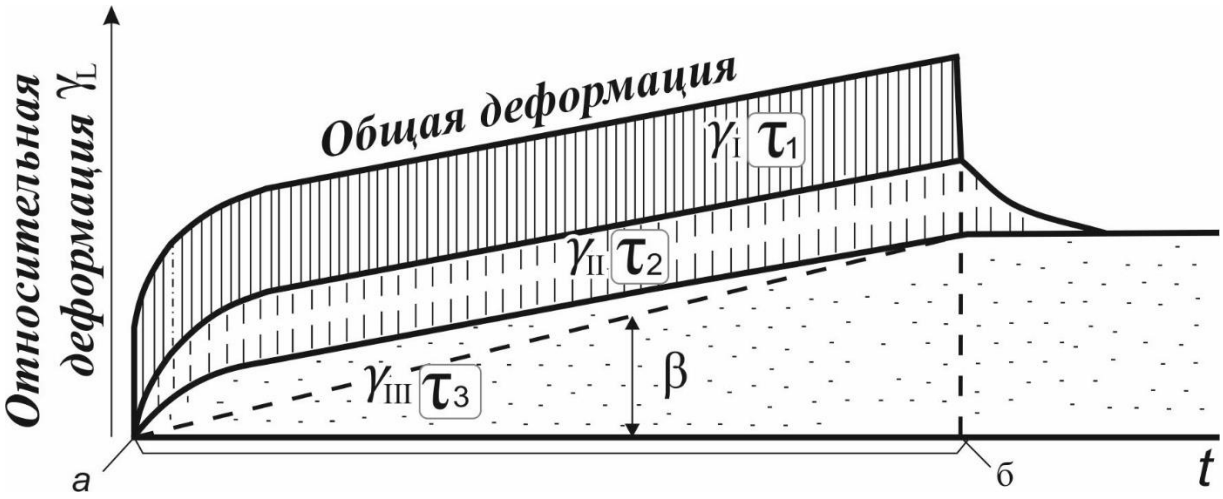
Явления изменения деформаций и напряжений в горных породах под действием нагрузки во времени описываются реологическими свойствами.

Различают следующие реологические свойства горных пород: ползучесть или крип; и длительную прочность.

Ползучестью называют явление нарастания деформаций горных пород во времени при постоянном напряжении. Явление ползучести – это то же

пластическое деформирование горной породы, только происходящее во времени. Ползучесть может проявляться и при напряжениях, не превышающих предела упругости.

Закономерности ползучести изучают путем экспериментального определения при постоянном напряжении. Закономерности ползучести изучаются путем экспериментального определения зависимости деформации сдвига при данном касательном напряжении во времени либо зависимости скорости сдвига от напряжения.



Время действия постоянных напряжений(τ_i=const)

Рисунок 1.6 -Схема кинетики деформации горной породы при постоянных напряжениях

τ_1— первая часть упругой деформации (условно-мгновенная); τ_2— вторая часть упругой деформации (упругое последействие);τ_3— пластическая деформация; γ_{II} — время, при котором достигается 0,63 предельной величины τ; β — угол, величина которого приближенно характеризует скорость пластической деформации; а, б — момент начала и момент прекращения действия постоянных напряжений

Кривая ползучести состоит из трех отрезков, соответствующим трем стадиям деформации: 1- неустановившаяся ползучесть породы; 2- установившееся пластическое течение при постоянной нагрузке; 3 – возрастание скорости деформации и наступление момента разрушения породы.

При напряжениях τ_1 развиваются медленные деформации, имеющие затухающий характер (первичную фаза ползучести). Напряжения τ_2 вызывают вторичную фазу ползучести, не затухающую во времени и имеющую постоянную скорость. При τ_3 имеют место не затухающие во времени и растущие по величине деформации, которые приводят к разрушению породы. При оценке состояния массива, когда их устойчивость сохраняется длительное время, напряжения не должны превышать величин τ_2, определяющих вторичную фазу ползучести для данных горных пород.

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

Длительная прочность горных пород определяется по графику, который строится на основании кривых ползучести. Для этого на каждой кривой ползучести приопределенном значении τ выделяется точка, соответствующая моменту разрушения. Для каждой точки находится величина t и переносится на график длительной прочности, где по координатам t и τ наносятся точки разрушения. На этом графике τ_0 – мгновенная (стандартная прочность), τ_{t1}- τ_{t2} – длительная прочность, а τ_∞ - предельная длительная прочность.

Длительное действие нагрузок на породы приводит к изменению его состояния, если при этом возможно свободное перемещение части породы, наблюдается непрерывное деформирование её. При ограниченной величине деформации породы в ней происходит снижение напряжений, несмотря на постоянные внешние нагрузки.

Скорость деформации породы является суммой скоростей упругой εE и пластической деформаций $\varepsilon_{пл}$

$$d\varepsilon/dt = d\varepsilon_E/dt + d\varepsilon_n/dt \qquad (1.19)$$

Так как εE =σ/E, а скорость пластического течения dεп/dt прямо пропорциональна величине приложенных нагрузок

$$\sigma = \eta d\varepsilon_n/dt\,, \qquad (1.20)$$

где η – коэффициент вязкости η = E/t0; t0– постоянная выраженная в единицах времени,

$$d\varepsilon/dt = d\sigma/(Edt) + \sigma/\eta \qquad (1.21)$$

Уравнение 1.21.называется уравнением ползучести. Если dσ/dt = 0, т.е. не происходит изменения напряжений во времени, то

$$d\varepsilon/dt = \sigma/\eta \qquad (1.22)$$

Следовательно, в этих условиях происходит непрерывное деформирование породы с определенной скоростью, зависящей от прикладываемой нагрузки.

Деформации ползучести горных пород в любой момент времени зависит от предыстории нагружения. Это свойство пород называется наследственностью. Согласно теории наследственности, если в момент времени t_1 приложено напряжений $\sigma(t)$, действующее в течении времени dt_1, то деформация $d\varepsilon_n$ к моменту времени будет зависеть от $\sigma(t_1)$ и разности $(t- t_1)$.

Напряжения при постоянной деформации не остается постоянным. Постепенное снижение напряжений в породе при постоянной деформации называется релаксацией напряжений. Установлено, что связь между напряжением и временем его снижения носит экспоненциальный характер

$$\sigma = \sigma_0 e^{-t/t'}, \qquad (1.23)$$

t' - период релаксации, время в течение которого убывают напряжения.
Период релаксации большинства горных пород имеет значения до 100лет. Поэтому в горной практике используют относительный показатель падения напряжений в породе за определенный промежуток времени (неделю, месяц, год и т.д.)

$$R' = \left[\frac{\sigma_0 - \sigma_t}{\sigma_t} \right] * 100\% \qquad (1.24)$$

1.3 Натурные испытания горных пород

Прочностные характеристики глинистых и полускальных пород можно определить в натурных условиях путем проведении испытаний породных призм, нарезанных непосредственно в массиве.

На практике могут быть использованы различные схемы натурных испытаний породных призм на срез с использованием систем гидродомкратов (гидроподушек). Процесс нарезки призм осуществляется с помощью штыковых лопат, долотьев, перфораторов и зависит от типа испытываемых пород. Сдвиг подготовленной породной призмы производится от тарированными гидродомкратами. При сдвиге породной призмы по манометру гидродомкрата фиксируют максимальное усилие Q_{max}, возникающее при срезе, и минимальное Q_{min}, при её перемещении поповерхности сдвига. Замер линейных и угловых параметров призмы производится рулеткой и горным компасом.

При обработке результатов испытаний породных призм вычисляется площадь поверхности среза S, фактическое сдвигающее усилие Q_{max} и Q_{min} через коэффициент тарировки гидродомкрата и массу срезанной породной призмы P. Используя полученные данные полевых измерений и вычислений, находят касательные τ и нормальные σ_N напряжения и производят построение паспорта прочности пород, откуда графически определяют сцепление k и угол внутреннего трения ρ. В отдельных случаях значения k и ρ вычисляют непосредственно по данным натурных испытаний по формулам.

На основе проведённого анализа существующих схем среза породных призм на карьерах выбраны наиболее распространенные схемы, приведенные ниже.

Схема испытаний породных призм путем плоского среза (рисунок 1.7) используется при нарезке призм на берме или земной поверхности с оконтуриванием её с четырёх сторон. При этом происходит плоский срез породной призмы, а возникающие напряжения вычисляются по формулам:

$$\sigma_N = \frac{P}{S}; \tau = \frac{Q_{\max}}{S} \quad , \tag{1.25}$$

где P – вес призмы, кг;
S – площадь поверхности сдвига, м^2;
Q_{max} – максимальное сдвигающее усилие, Н.

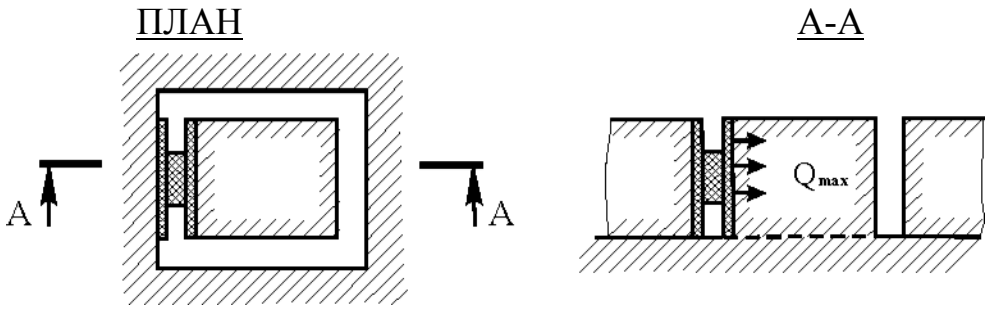


Рисунок 1.7–Схема натурных испытаний горных пород путем плоского среза

Недостаток данной схемы – неизменность нормальных напряжений по поверхности сдвига. Определяется лишь коэффициент сцепления породы через известную величину угла внутреннего трения по формуле:

$$k = \frac{Q_{\max} - P \cdot tg\rho}{S}, \text{ МПа} . \tag{1.26}$$

Схема испытаний путем косого среза (рисунок 1.8) применяется при нарезке породной призмы на дне шурфа или в основании откоса. При сдвиге происходит косой срез, а напряжения по поверхности сдвига вычисляются по формулам:

$$\sigma_N = \frac{\left(Q_{\max} \cdot \cos\beta + P \cdot \cos\delta\right)}{S}; \tau = \frac{\left(Q_{\max} \cdot \sin\beta - P \cdot \sin\delta\right)}{S}. \tag{1.27}$$

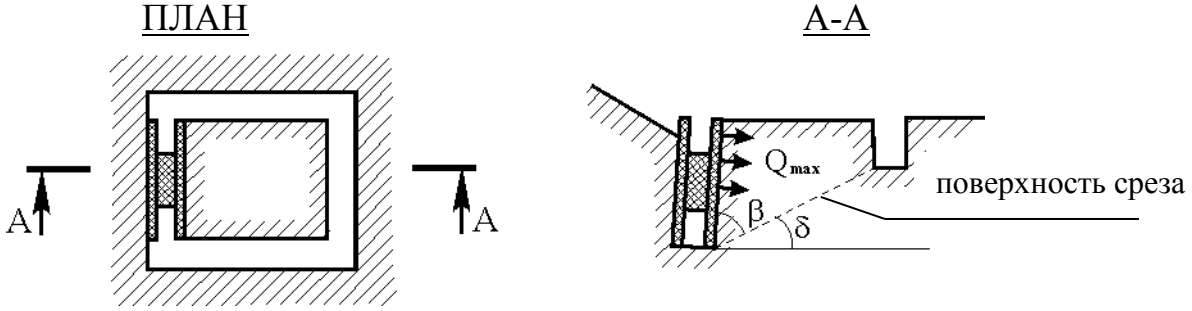


Рисунок 1.8–Схема косого среза породной призмы

Для данной схемы при известной величине угла внутреннего трения породы значение сцепления находится по формуле:

$$k = \frac{Q_{\max} \cdot \sin\beta - P \cdot \sin\delta}{S} - \left[\frac{\left(Q_{\max} \cdot \cos\beta + P \cdot \cos\delta\right)}{S} \right] \cdot tg\rho \text{, МПа.} \quad (1.28)$$

Косой срез породной призмы в основании откоса (рисунок 1.9) чаще всего реализуется в основании откоса уступа. Напряжения в сдвигаемой призме определяются с учетом веса гидродомкрата с металлическими плитами q по формулам

$$\sigma_N = \frac{\left(Q_{\max} \cdot \cos\beta + (P+q) \cdot \sin(\alpha+\beta)\right)}{S};$$
$$\tau = \frac{\left(Q_{\max} \cdot \sin\beta - (P+q) \cdot \cos(\alpha+\beta)\right)}{S}. \quad (1.29)$$

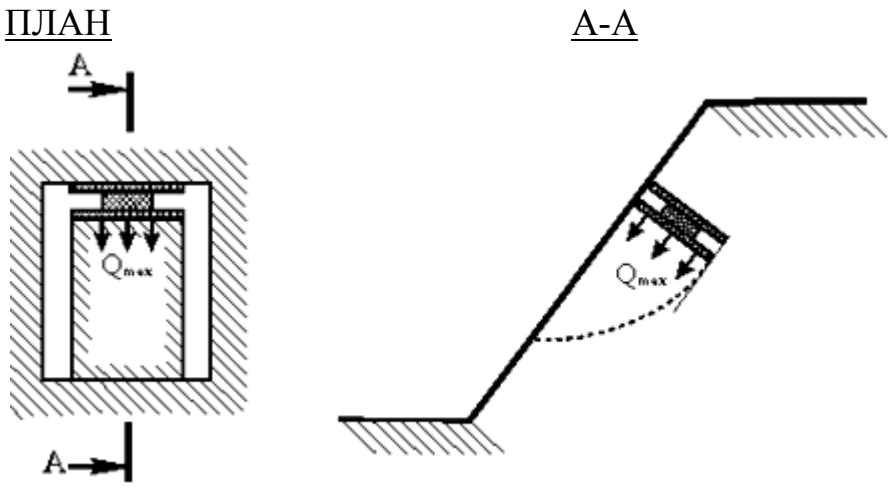


Рисунок 1.9–Схема косого среза в основании откоса

Данная схема проведения испытаний является более удобной и по возможности рекомендуется к широкому её использованию на карьерах. Величину сцепления пород по аналогии можно вычислить из выражения:

$$k = \frac{Q_{\max} \cdot \sin\beta - (P+q) \cdot \cos(\alpha+\beta)}{S} -$$
$$- \frac{Q_{\max} \cdot \cos\beta + (P+q) \cdot \sin(\alpha+\beta)}{S} tg\rho \cdot \quad (1.30)$$

Схема испытаний с дополнительной нормальной нагрузкой на плоскость среза (рисунок 1.10), создаваемой вторым гидродомкратом, либо грузом,

позволяет строить паспорта прочности пород и определять из них значения k и ρ. Напряжения по плоскости среза определяются по формулам:

$$\sigma_N = \frac{P + Q_N}{S}; \tau = \frac{Q_{\max}}{S} \quad . \tag{1.31}$$

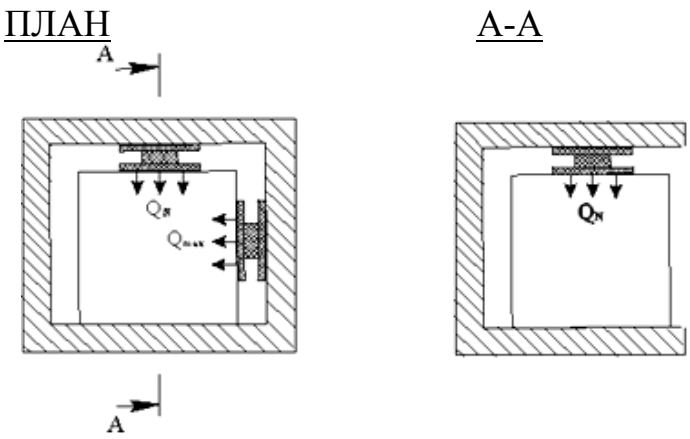


Рисунок 1.10 – Схема сдвига породной призмы с дополнительной нормальной нагрузкой

При проведении испытаний с выпором породного блока (рисунок 1.11) регистрируют два значения сдвигающего усилия – максимальное Q_{max}, при котором начинается сдвиг, и минимальное Q_{min}, при котором происходит пластическое течение в области поверхности сдвига, приводящее к выпиранию блока.

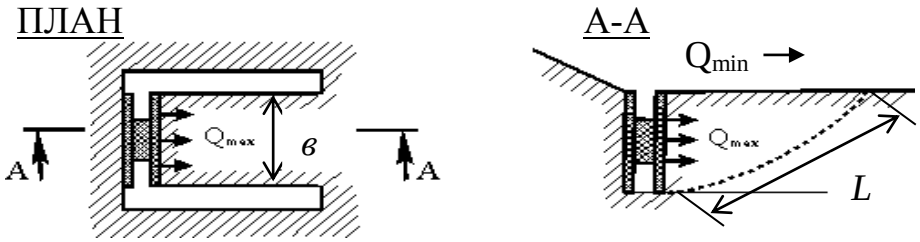


Рисунок 1.11 – Схема выпора породного блока

Проведение натурных испытаний по схеме выпора плоской породной призмы позволяет определить из одного опыта значения коэффициента сцепления k и угла внутреннего трения ρ породы по формулам

$$k = \frac{Q_{\max} - Q_{\min}}{b \cdot L};$$

$$tg\rho = \frac{\frac{Q_{\max}}{P}\sum p_i \cdot \cos\delta_i - \sum p_i \cdot \sin\delta_i - (Q_{\max} - Q_{\min})}{\frac{Q_{\max}}{P}\sum p_i \cdot \sin\delta_i + \sum p_i \cdot \cos\delta_i}, \qquad (1.32)$$

где $L = \sum \ell_i$ - общая длина поверхности среза, м;

ℓ_i - длина дуги поверхности среза в пределах блока, м;

p_i– вес блока, Н;

δ_i– угол наклона поверхности среза в пределах блока, градус.

в – ширина сдвигаемой призмы, м.

Схема испытаний с одной прорезной щелью (рисунок 1.12) реализуется при подготовке породной призмы в откосе уступа или на берме. При создании гидродомкратом горизонтального давления в массиве образуется напряженная область, которую по форме можно принять за эллипсоид деформации. Деформирование рассматриваемой области аналогично процессам, происходящим при вывалах части массива горных пород на откосах от действия внешней нагрузки. При достижении максимального сдвигающего усилия Q_{max} происходит выпирание объемной породной призмы с максимальными размерами по высоте c_{max}, ширине $2b_{max}$ и длине a_{max}. Значения c_{max} и $2b_{max}$ обусловлены размерами прорезной щели, а длина a_{max} определяется в процессе испытаний. Названные параметры призмы можно в первом приближении принять за полуоси трехосного эллипсоида.

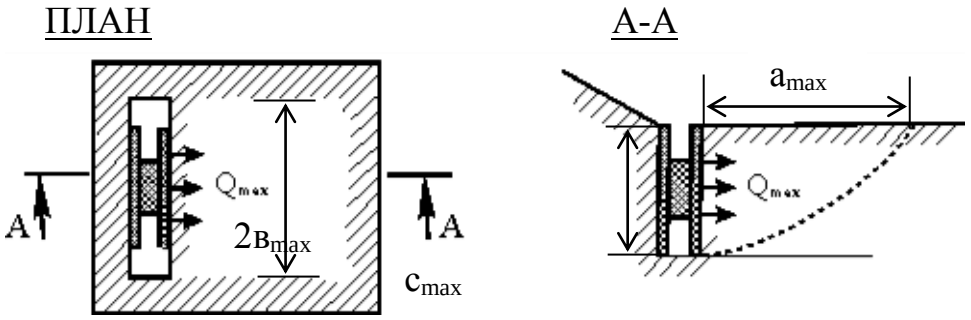


Рисунок 1.12 - Выпор породного блока с одной прорезной щелью

По результатам испытаний сцепление *k* с достаточной точностью может быть определено по формуле:

$$k = \frac{Q_{\max} - Q_{\min}}{S}, \qquad (1.33)$$

а угол внутреннего трения определяется аналогично схеме выпора породного блока с тремя прорезными щелями по формуле (1.32).

В ГОСТ 21153.0-7-75 приведены следующие выражения для определения прочностных характеристик пород при сдвиге призмы с одной щелью:

$$k = \frac{1}{S}\left[\left(\frac{Q_{\max}}{b \cdot f} - \gamma \cdot tg\rho\right)m - \left(\frac{Q_{\max}}{b \cdot f}tg\rho + \gamma\right)n\right];$$

$$tg\rho = \frac{\left[Q_{\max} \cdot (\frac{m}{f} - 1) + Q_{\min} - \gamma \cdot b \cdot n\right]}{\left(\frac{Q_{\max} \cdot n}{f} + \gamma \cdot b \cdot m\right)}, \qquad (1.34)$$

где *a*,*b*,*c* - параметры сдвинутой призмы;

f,*m*,*n* - коэффициенты, определяемые по номограмме.

Глава 2 Структурные особенности прибортовых массивов карьеров

2.1 Общие понятия о массиве горных пород как геологической среды

Термин «геологическая среда» получил распространение сравнительно недавно и пока не имеет строго установившегося определения. Однако он широко используется в инженерной геологии и горном деле. За свою историю геологическая среда претерпела локальные и глобальные кризисы, проявлявшихся как медленно протекающими так и скачкообразными процессами нарушения устойчивости под действием природных и техногенных факторов. С эволюционной точки зрения геологическая среда рассматривается как сложная самоорганизующаяся нелинейная система, в которой физические процессы в земной коре имеют определяющее значение. Массив горных пород- это часть геологической среды, где ведутся горные работы. Горные работы создают аномальные дополнительные концентрации техногенных напряжений в прибортовом массиве, которые приводят к накоплению упругой энергии, изменяя естественное поле напряжений.

В методологическом аспекте эта категория может рассматриваться с двух сторон. Первая базируется на том, что геологическая среда это сложный объект природы, объективно существующий независимо от человека и его деятельности (Голодковская Г.А., Котлов В.Ф., Трофимов В.Т., Шаумян Л.В. и др.). Геологическая среда состоит из отдельных элементов - рельефа, горных пород, подземных вод, многолетней мерзлоты, а также природных процессов и т.д. Ломтадзе В.Д. дает такую трактовку этому термину *"Каждая территория на Земле с ее рельефом, процессами и явлениями представляет собой геологическую среду жизни и деятельности человека. Геологическая среда - это окружающие нас геологические условия. Геологическая среда возникает и меняется во взаимодействии с атмосферой, гидросферой, биосферой и внутренними сферами Земли"*. В этом взгляде интересным является то, что геологическая среда привязывается к определенной территории и то, что она взаимодействует с внешними природные силами, постоянно изменяя свое термодинамическое состояние.

Второй взгляд (Л. Мюллер, М.В. Рац, Е.М. Сергееев, В.Т. Трофимов и др.) заключается в том, что под геологической рассматривается среда взаимосвязанная с каким-то конкретным объектом. Это может быть любой искусственный инженерный объект или объект живой природы. *"Геологическая среда это комплекс геоморфологических, геофизических и геохимических условий, в которых существует организм (в том числе человек и его хозяйство)"*. В данном случае под геологической средой понимается верхняя часть литосферы, включающая горные породы, почвы, флюиды подвергающиеся воздействию человека. Такое определение с одной стороны искусственно сужает границы геологической среды до глубины освоения литосферы человеком, а с другой расширяет, дополняя категорию новыми элементами - результатами жизнедеятельности человека, например, сточные воды, отвалы горных предприятий и т.п.

Наиболее известным считается определение данного понятия у Е.М. Сергеева, "геологической средой называют верхнюю часть литосферы, рассматриваемую как многокомпонентную систему, находящуюся под воздействием инженерно-хозяйственной деятельности человека, в результате чего происходит изменение природных геологических процессов и возникновение новых антропогенных явлений, что в свою очередь вызывает изменение инженерно-геологических условий строительства объектов на определенной территории. Основные элементы геологической среды - горные породы, подземные воды, формы рельефа, геологические процессы и явления и их инженерно-геологические аналоги". В данном случае термин связывается с техногенной деятельностью человека, которая направлена с одной стороны на разрушение существующей природной геологической среды, а с другой - на ее преобразование с целью строительства новых хозяйственных объектов.

При освоении нагорных месторождений такой геологической средой являются:

- непосредственно склоны, на которых развиваются гравитационные склоновые процессы;
- геологическое строение породного массива, залегание рудных тел;
- тектоника и тектонические нарушения как разрывные, так и складчатость;
- физико-механические свойства вмещающих пород и руды;
- естественное напряженное состояние породного массива;
- уровень подземных вод;

Геологическая среда, в которой ведутся горные работы, представляет собой неоднородный по составу, сложению и структуре массив горных пород. Глубина современных крупных карьеров составляет от 300 до 800 м, а иногда до 1000 м в вечномерзлых породах. Следовательно, выбор мероприятий по управлению состоянием массива будет определяться в первую очередь прочностными и деформационными свойствами горных пород. На эти свойства влияют: геологическое строение массива пород, тектоника региона и карьерного поля, генезис пород, литологический и минеральный состав, пористость, влажность. Особенностью горных пород, отличающих их от других материалов, является их незначительное сопротивление растягивающим напряжениям при высоких показателях сопротивлению сжатию и сдвигу. Характер, интенсивность и скорость этих изменений зависят от геологического строения среды, развитых в ней процессов, типа сооружения, способов производства строительных работ, длительности строительства и особенностей эксплуатации сооружения.

Четкое представление о форме и границах области взаимодействия сооружений и геологической среды необходимо для решения следующих задач:

а) уточнение общих закономерностей, характера и масштабов изменений геологической среды под воздействием сооружений и строительных выемок;

б) выбор методики и определение минимально необходимого объема инженерно-геологических исследований на конкретных объектах;

в) прогнозирование физико-геологических и инженерно-геологических процессов в период строительства и во время эксплуатации сооружений;

г) составление инженерно-геологических моделей массива горных пород.

Кроме того, представления о форме и границах области взаимодействия полезны проектировщикам для составления расчетных схем «разработать научно обоснованные принципы изучения формы и границ области взаимодействия сооружений и окружающей геологической среды, а также характера развивающихся инженерно-геологических процессов в ней на различных стадиях строительства и эксплуатации сооружений».

Под «областью взаимодействия сооружения и массива горных пород» понимается та часть массива, в пределах которой в процессе строительства и эксплуатации сооружения происходят существенные изменения состава, состояния или свойств горных пород или развиваются инженерно-геологические процессы. За границы этой области принимаются пределы, за которыми отмеченные выше изменения не имеют практического значения.

2.2 Структурные нарушения массива горных пород и оценка его трещиноватости

Горные породы характеризуются более или менее однородным петрографическим составом или состоянием, состоят из одинаковых групп минералов, а массив горных пород, как правило, представлен совокупностью нескольких видов горных пород, залегающих рядом или вмещающих друг в друга. Поэтому по механическим свойствам породный массив можно представить как неоднородную анизотропную среду.

Учитывая наличие трещин и геологических нарушений, для изучения массива выделяют элементарные объемы, обладающие всеми его свойствами. Все структурные нарушения массива разделяются: на кливажи, трещины, геологические разрывы и смещения.

Кливажи (расслойка расщепление) представляют собой систему частых параллельных поверхностей скольжения, по которым породы легко разделяются . Они бывают представлены слоистостью или сланцеватостью.

Слоистость (напластование) характеризуется чередованием пород, различающихся по минералогическому составу, структуре, крупности зерен или физическим признаком (твердости, цвету) при одинаковом минералогическом составе.

Сланцеватость - это ярко выраженная текстура столбчатых и пластинчатых минералов. Расположение зерен в сланцеватых породах всегда упорядочено и поэтому четко проявляются анизотропия свойств. **Трещины** - это разрывы сплошности пород без смещения отдельных частей (или смещения весьма незначительных) различают трещины эндогенные и экзогенные (тектонические) трещины, трещины горного давления, выветривания. В зависимости от размеров, геологической структуры, нарушения массива пород классифицируются следующим образом.

Микротрещины. Разрывы сплошности в кристаллах шириной 1 мкм и менее, обнаруживаемые под микроскопом в пределах одного кристалла, влияют на механические свойства.

Тонкие трещины имеют ширину 0,1 мм и менее, могут быть замечены не вооруженным глазом.

Макротрещины имеют ширину более 0,1 мм и длину до нескольких метров. Макротрещины различимы простым глазом. Они оказывают существенное влияние на свойства массива.

Разломы – это крупные разрывные нарушения с заметной амплитудой смещения.

Упорядоченные трещины, повторяющиеся через определенные расстояния и имеющие одинаковою ориентировку, обычно называют системой трещин. В массиве различают главную и подчиненную системы трещин. Учитывая вышеуказанное, массив горных пород можно рассматривать « как прерывистую среду » анизотропия свойств которых зависит от связей между отдельными (элементарными) блоками, исключающими геологические разрывы и имеющими только микро нарушения, структурная нарушенность массива пород оказывают большое влияние на напряженное деформирование его состояние, условия проведения горных работ, выбор способа управления горным давлением. В зависимости от характера проводимых горных работ свойства массива и его геомеханическую неоднородность необходимо оценивать на различных масштабных уровнях.

Структурно-тектонические особенности горного массива, характеризующиеся дизъюнктивной и пликативной нарушенностью пород, степенью и характером их трещиноватости, слоистостью и сланцеватостью, являются одним из основных факторов, которые следует учитывать при решении проблемы обеспечения устойчивости карьерных откосов уступах и бортов на открытых разработках.

Наличие в прибортовом массиве поверхностей ослаблений в виде трещин отдельности большого протяжения, поверхностей сместителей тектонических нарушений, контактов слоистости пород резко ухудшает устойчивое состояние откосов. Это связано с тем, что при значительной прочности куска скальной породы сдвиговые характеристики трещиноватого массива всегда в несколько раз меньше, и ещё ниже сопротивляемость сдвигу по поверхностям ослаблений. Поэтому управление устойчивостью карьерных откосов в трещиноватых массивах - задача, требующая своего решения в каждом конкретном случае. От ориентировки поверхностей ослаблений в массиве относительно поверхности откоса зависят положение и форма поверхностей скольжения, следовательно, и выбор схемы расчёта. Кроме того, данные о трещиноватости породного массива позволяют правильно решать вопросы о выборе параметров буровзрывных работ в приконтурной зоне при заоткоске стационарных уступов.

Появление в последнее время в маркшейдерско-геодезической практике современных приборов, в виде 3D сканеров, позволяет достаточно подробно

изучить элементы залегания поверхностей ослаблений и в недоступных местах расположения.

2.3 Методика изучения трещиноватости горных пород

Вследствие большого разнообразия вмещающих горных пород (осадочные, изверженные, метаморфические) и заключенных в них различных залежей полезных ископаемых не представляется возможным рекомендовать единую методику изучения трещиноватости горного массива для всех месторождений. Методика должна учитывать условия и конкретную геологическую обстановку исследуемого района или отдельного месторождения, а также вопросы, для решения которых используются данные трещиноватости пород.

В комплекс изучения трещинной тектоники месторождения, разрабатываемого открытым способом, должна входить:

- полевые работы, состоящие из разбивки поверхности откоса уступа на замерные станции; замеров элементов залегания трещин и линейных размеров структурных блоков, образуемых трещинами; описания характера поверхности трещин, их раскрытости, заполнения, водоносности, следов скольжения по ним;
- составление и обработка точечных и других диаграмм на основе данных полевых измерений для выявления систем трещин;
- построение участковых стереограмм систем трещин с помощью стереографических сеток для выявления угловых соотношений между системами трещин;
- обработка данных трещиноватости методом математической статистики для выявления пространственной ориентировки основных систем трещин;
- составление карты трещиноватости и построение структурных разрезов по уступам и бортам карьера для выявления систем трещин наиболее неблагоприятно ориентированных относительно карьерных откосов, трещины которых могут служить поверхностями скольжения.

Оценку влияния трещиноватости горных пород на прочностные свойства горных массивов и устойчивость откосов уступов и бортов карьеров можно считать предметной лишь тогда, когда создаётся возможность прогнозирования и учёта пространственной ориентировки трещин, интенсивности трещиноватости и сдвиговой прочности по поверхностям трещин. Трещины, развитые в горных породах, можно классифицировать либо по условиям их образования, либо по ряду геометрических признаков. В первом случае классификация называется *генетической*, во втором - *геометрической*.

Согласно *генетической классификации трещиноватости горных пород* большинство исследователей различают четыре вида трещин, соответствующих их генезису: *эндогенные, экзогенные, выветривания* и *давления.*

Эндогенные трещины в осадочных породах (первичные трещины) возникают преимущественно в стадии превращения осадков в горную породу (диагенез). Наиболее важным физическим изменением при диагенезе является

потеря воды и уплотнение отложений путём уменьшения их влажности и пористости (происходит усыхание пород).

Эндогенные трещины образуют обычно две взаимно перпендикулярные, хорошо прослеживающиеся на больших участках, системы: основную, параллельную простиранию пластовой залежи, и торцевую параллельную падению.

Основная трещиноватость эндогенного происхождения образуется в результате скалывания, торцевая - в результате отрыва. Основные трещины имеют гладкие поверхности, торцевые - шероховатые. Так как трещины этого вида располагаются почти перпендикулярно пласту, то они также получили название прямоколющих. Протяженность первичных трещин нормально напластованию ограничивается контактами литологических разностей. Элементы залегания трещин хорошо выдерживаются при постоянных элементах залегания пластов. Изменение последних вызывает изменение элементов залегания первичных трещин. Таким образом, зная строение пластового месторождения, можно предсказывать ориентировку в пространстве трещин этой группы, а следовательно и ориентировку трещин в деформирующемся массиве.

Экзогенные трещины (вторичные, тектонические) - результат более поздних воздействий тектонических сил на уже сформировавшийся массив горных пород, разбитый первичной трещиноватостью. Трещины данного вида рассекают массив пород вкрест простирания слоёв на большие и разнообразные по форме блоки. Они не ограничены контактами литологических разностей пород и часто имеют зеркала скольжения. По отношению к пласту такие трещины большей частью располагаются косо, поэтому получили название кососекущих. Постоянство ориентировки тектонических трещин прослеживается от слоя к слою. Экзогенные трещины широко распространены на участках, нарушенных взбросами и сдвигами, и являются их оперяющими разрывами. Зная элементы залегания крупных тектонических нарушений, можно с небольшой погрешностью предсказать ориентировку мелкой трещиноватости в массиве.

Разновидностью экзогенных трещин является кливаж, под которым понимается способность горных пород делиться по параллельным или почти параллельным поверхностям слоёв на тонкие пластинки.

Это свойство пород в механическом смысле выражается как образование поверхностей скольжения, по которым частицы породы смещаются относительно друг друга в процессе пластической деформации.

Кливаж не нарушает сплошности пород, что отличает его от тектонических трещин, рассмотренных выше. Место образования кливажа соответствует последней стадии развития пластической деформации, характеризующейся потерей прочности пород перед разрывом.

Трещины выветривания образуются в результате длительного воздействия на поверхностные зоны земной коры (коры выветривания) атмосферных реагентов (холод, тепло, вода, и др.). Кора выветривания может иметь мощность от нескольких метров до десятков метров.

В результате выветривания появляется дополнительная сеть трещин, вызывающая распадение крупных породных блоков на отдельные мелкие куски. При этом полно используются все, вплоть до скрытых, трещин эндогенного и экзогенного происхождения.

Трещины давления обусловлены технологической деятельностью человека в недрах земной коры и вызваны нарушениями равновесного состояния массива в областях, где широко ведутся горные работы. Эти трещины обычно являются трещинами отрыва. Поверхности их весьма неровны, извилисты, как правило, они не распространяются далеко в толщу и сосредоточены вблизи забоев. Они образуют систему параллельных трещин.

Согласно *геометрической классификации трещиноватости горных пород* все выявленные трещины и поверхности ослабления независимо от их генезиса делятся на *продольные, диагональные* и *поперечные.*

Продольные трещины - это трещины, направление простирания которых отличается от направления простирания плоскости откоса не более чем на 20^0. К *диагональным* - относятся трещины, простирание которых отличается от направления простирания откоса в пределах 21^0—70^0. Все остальные трещины - *поперечные*. К тому же, трещины разделяются на *согласно* - и *несогласно падающие* с откосом (рисунок 2.1).

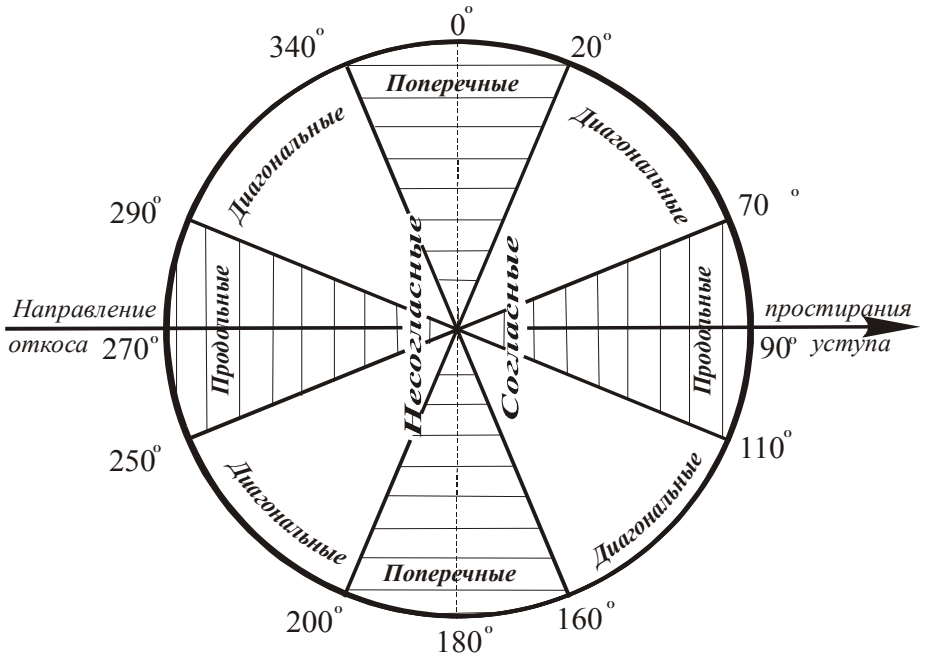


Рисунок 2.1– Классификационная круговая диаграмма трещиноватости

По углу падения трещины делятся на пологие, у которых угол падения не более 30^0, наклонные - от 30^0 до 60^0 и крутые - от 60^0 до 90^0.

Измерив азимут простирания откоса уступа какого-либо участка борта карьера непосредственно компасом или на плане горных работ и используя классификационную диаграмму, очень легко и быстро можно сориентировать любую трещину по её измеренному азимуту простирания относительно откоса.

Сориентировав, таким образом, все выявленные на участке откоса трещины или их системы, предварительно можно сказать, какие из них являются наиболее опасными с точки зрения устойчивости откосов. Без сомнения, в первую очередь, к ним относятся продольные согласно падающие с откосом трещины. Поперечные же согласно падающие трещины могут не влиять на устойчивое состояние откоса.

И тем более, все несогласно падающие с откосом трещины можно не принимать во внимание в расчётах устойчивости откосов.

Аналогичный предварительный анализ производится и при сопоставлении угла наклона откоса на каком- либо участке уступа с углами падения выявленных на этом участке трещин, чтобы оценить наиболее опасные из них.

2.4 Съемка трещиноватости пород прибортовых массивов с помощью лазерного 3D сканера

В практике производства маркшейдерско-геодезических работ появились современные электронные приборы, например 3D сканер, тахеометр и другие. Эти приборы при съемках позволяют получить объект в электронном виде. Лазерное сканирование – технология, позволяющая создать цифровую трехмерную модель объекта, представив его набором точек с пространственными координатами. Технология основана на использовании новых геодезических приборов – лазерных сканеров, измеряющих координаты точек поверхности объекта с высокой скоростью порядка нескольких десятков тысяч точек в секунду (рисунок 2.2). Полученный набор точек называется «облаком точек» и впоследствии может быть представлен в виде трехмерной модели объекта, плоского чертежа, набора сечений, поверхности и т.д.

Метод наземного лазерного сканирования широко применяется для получения данных о геометрических параметрах карьеров, элементах залегания трещин и разрывных нарушений, породных отвалов, хвостохранилищ и других объектов, расположенных на поверхности.

Точность получения параметров съемки определяется расстоянием между прибором и снимаемым объектом.

Использование результатов съемки лазерным сканером для получения элементов залегания трещин и размеров структурных блоков возможно при нахождения прибора от прибортового массива до 800 метров. При этом появляется уникальная возможность получения информации о положении прибортового массива без непосредственного контакта исполнителя. Предлагаемая методика изучения элементов залегания трещин пород с использованием лазерного сканера следующая:

- на карьере выбирается точка съемки трещин прибортового массива, где устанавливается штатив сначала с электронным тахеометром со спутниковым приемником для определения координаты точки стояния, затем снимается тахеометр и устанавливается лазерный сканер, с помощью которого производится съемка прибортового массива (рисунок 2.3) Следует отметить,

что точка, с которой производится съемка выбирается таким образом, чтобы можно было максимально снять обнаженную часть структур прибортового массива. Расстояние до снимаемого массива в этом случае не должно превышать 800 метров;



Leica HDS4400 технические характеристики	
Основные	
Тип инструмента	Компактный, импульсный, со встроенным двухосевым компенсатором, высокоскоростной сканер для горных работ с большим диапазоном измерения расстояний и широким углом поля зрения.
Интерфейс	Защищенный планшетный компьютер
Двигатель	Сервопривод
Накопитель данных	Защищенный планшетный компьютер
Камера	Встроенная цифровая камера 37 Mpix
Лазерная сканирующая система	
Тип	Импульсный 905 nm
Класс лазера	IR при выполнении измер. (IEC 60825-1)
Диапазон измерения расстояний	от 5 м до 700 м 600 м при 40 % альбедо (скала) 150 м при 5 % альбедо (уголь)
Скорость	4 400 точек в секунду
Расх. лазерн. луча	1.4 mrad
Угловое разрешение	0.108 °
Точность	
Изм. расстояния	20 мм на расстоянии до 50 м 50 мм при максимальной дальности
Угловая	+/- 0.04 °
Повторяемость	10 мм на расстоянии до 50 м
Поле зрения	
По горизонтали	360 °
По вертикали	80 °
Визирование	Встроенная, оптическая труба (16x) дополнительный красный лазерный указатель (pointer) 670 nm, класс лазера 3R

Рисунок 2.2– Техническая характеристика лазерного 3Dсканера



Рисунок 2.3– Съемка элементов залегания трещин на карьере «Васильковский» с помощью сканера (сентябрь, 2011)

- включается сканер и осуществляется съемка поверхности откоса структурных особенностей прибортового массива через установленный шаг сканирования;

- после этого на компьютере с помощью программы «MaptekI-SiteStudio» создаются облако точек с наложением фотографии;

- обрабатывается полученная объемная электронная версия прибортового массива на компьютере (рисунок 2.4) с целью получения параметров залегания трещин и разрывных нарушений: углов падения и простирания, размеров структурных блоков, образованных трещинами (рисунок 2.5.)

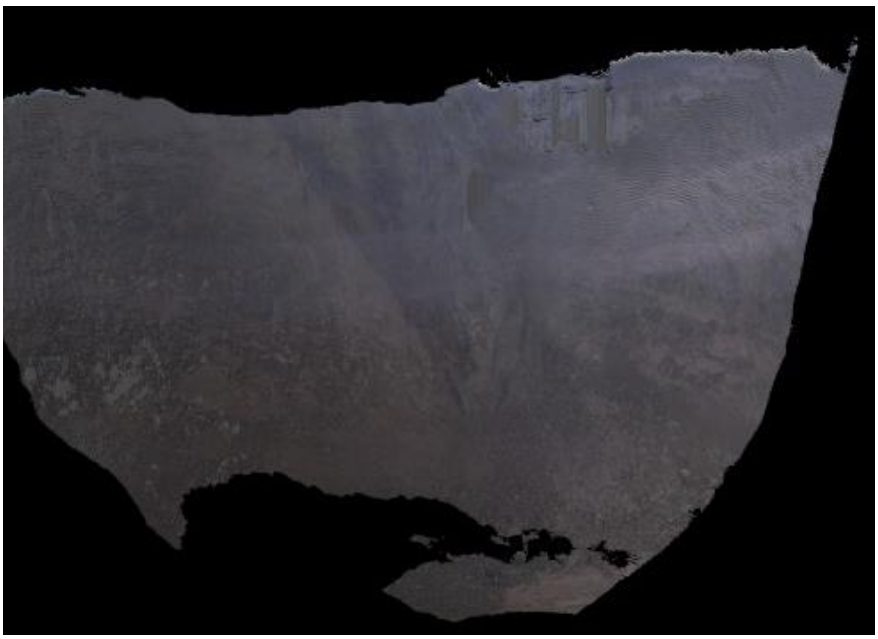


Рисунок 2.4– Цифровая модель участка карьерного поля

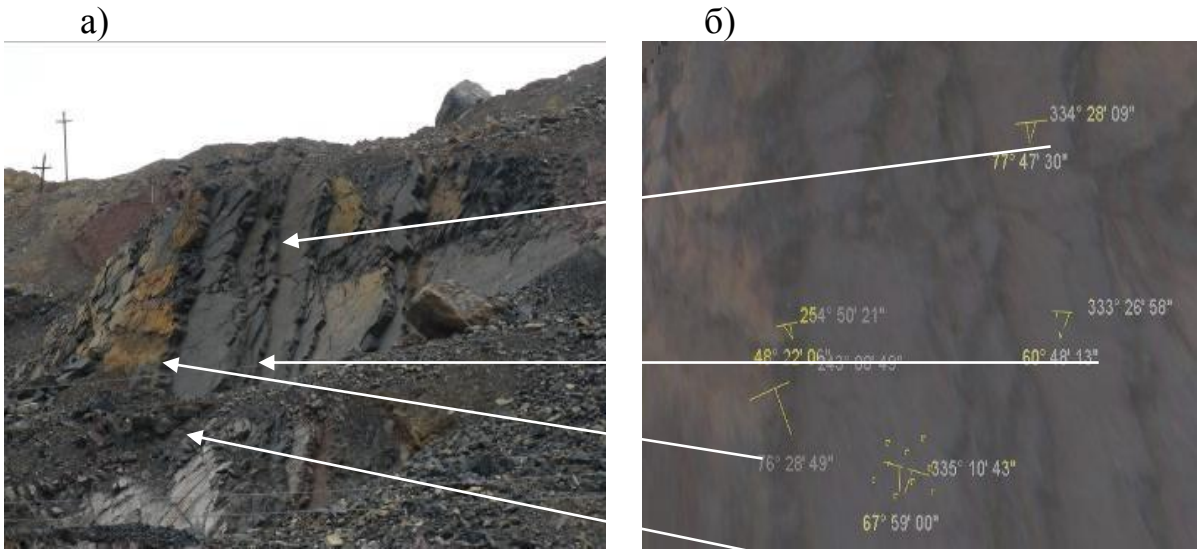


Рисунок 2.5- Изучение трещиноватости пород на карьере «Ушкатын-3»:
а-трещины в откосе уступа; б- элементы залегания трещин

При этом размеры породных блоков между трещинами вычисляются по разности координат точек, взятой по нормам между трещинами, а элементы залегания трещины угол простирания и угол наклона находятся в результате построения поверхности трещины.

Величины дирекционных углов и углов наклона поверхностей ослаблений могут быть вычислены через координаты точек, взятых на поверхности трещины рисунке 2.6.

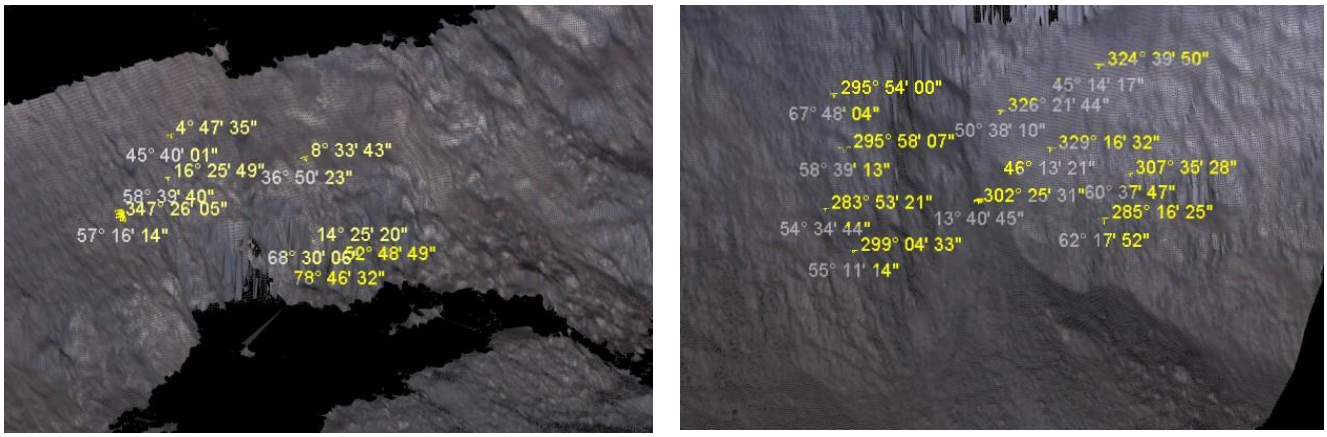


Рисунок 2.6- Определение элементов залегания трещин

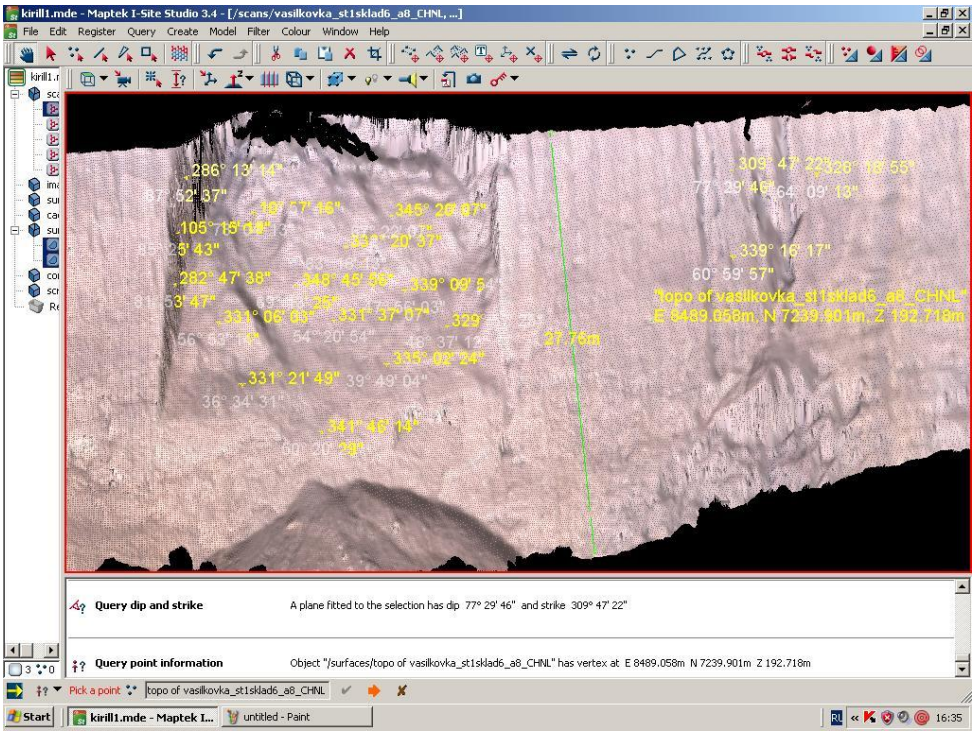


Рисунок 2.7– Определение элементов залегания трещин на станции с помощью программы «MaptekI-SiteStudio»

Получение цифровой модели прибортовых массивов карьера возможна благодаря использованию программного комплекса «MaptekI-SiteStudio»

(рисунок 2.7), где вычисляются значения элементы залегания трещин: азимута простирания, углов падения и размеров породных блоков. При этом цифровая модель содержит полную информацию о прибортовом массиве горных пород. Используя программу по обработке данных трещиноватости пород, выделяются системы трещин, размеры блоков для использования их в паспорте прочности применительно к массиву. Результаты обработки трещиноватости горных пород наблюдательным станциям и их сравнение между замерами горным компасом и лазерным сканером дали расхождение в 3-4 %, что является допустимым.

2.5 Наземная лазерная съемка

Современный уровень развития науки и техники предполагает применение в горнодобывающей области современных методов исследования, основанных на применении компьютерных технологий. Совершенствование методов исследований заключается в учёте всё большего количества необходимых параметров, усложнении исследуемых моделей и приближении их к фактической горно-геологической ситуации исследуемого месторождения. Кардинальным шагом в этом направлении является переход на трёхмерное моделирование месторождений. Работа с такими моделями позволяет не только оперативно решать горнотехнические задачи, но и открывает широкие перспективы перед исследователями для применения современных аналитических и численных методов.

В настоящее время известен опыт применения 3D моделей месторождений в специализированных коммерческих программных комплексах для решения различных горнотехнических задач на горнодобывающих предприятиях (рисунок 2.8). Но они, как правило, ограничиваются определением запасов полезного ископаемого и планированием их извлечения.

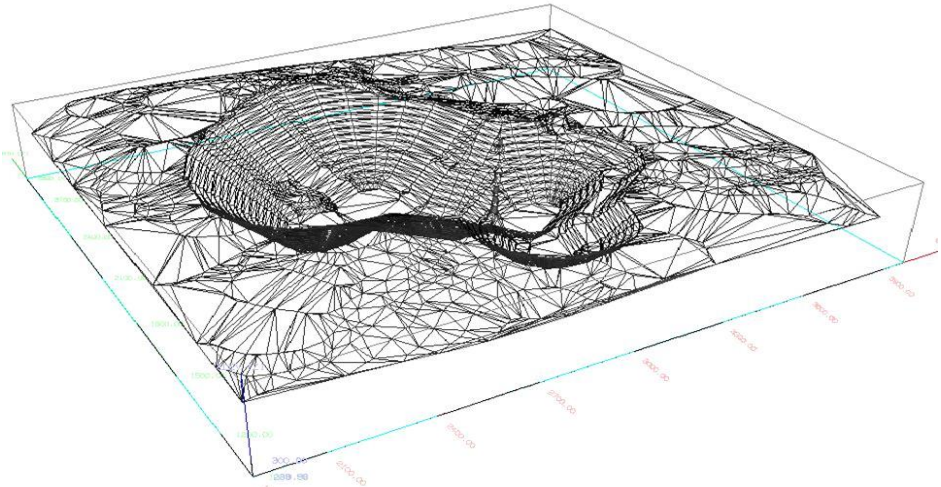


Рисунок 2.8– 3D модель карьера в сиземе GEMCOM

Трёхмерное моделирование несёт существенные преимущества для исследований в области геомеханики и геометризации месторождений:

- полнота анализируемых данных наиболее приближена к фактической горно-геологической ситуации;

- есть возможность оценить взаимное влияние пространственных элементов модели;

- возможна разработка и применение геомеханических методов, учитывающих объёмное распределение нагрузок;

- наглядность и информативность модели позволяет выявить скрытые проблемные участки и определить их параметры.

Исходными данными для моделирования являются результаты геологоразведки, первичная и эксплуатационная геолого-графическая информация. Это могут быть стратиграфические разрезы, данные по скважинам, результаты опробования, геологические разрезы и погоризонтные планы.

Трехмерное моделирование рудных тел для исследования геомеханической ситуации было выполнено на месторождении «Акжал» (рисунок 2.9). Ввиду сложности решаемого вопроса и вышеуказанных преимуществ было решено создать цифровую трёхмерную модель геологической ситуации месторождения.

Первым этапом моделирования является классификация и первичная обработка исходных данных, заключающаяся в выборе необходимого и достаточного объёма геолого-графических данных (рисунок 2.10) и приведение их к единому формату, допускающему корректное совмещение.

В процессе моделирования было подготовлено 6 погоризонтных планов с 185м по 305м горизонт и 45 геологических разрезов.

В процессе моделирования было произведено ориентирование и пространственная привязка структурных элементов будущей модели.



Рисунок 2.9– Трехмерная модель карьера «Восточный» месторождения Акжал

Каждый погоризонтный план, согласно сетке координат был расположен на соответствующей высотной отметке (рисунок 2.11а), а геологические разрезы совмещены с вертикальными плоскостями, проходящими через соответствующие разведочные линии (рисунок 2.11б).

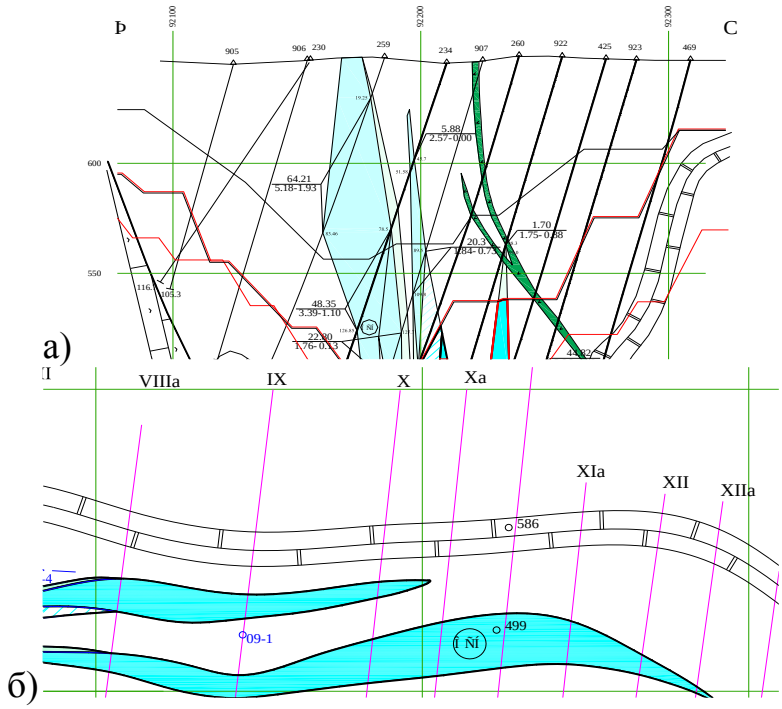


Рисунок 2.10– Исходные геологические данные:

а – геологический разрез (профиль); б – фрагмент погоризонтного плана

а б

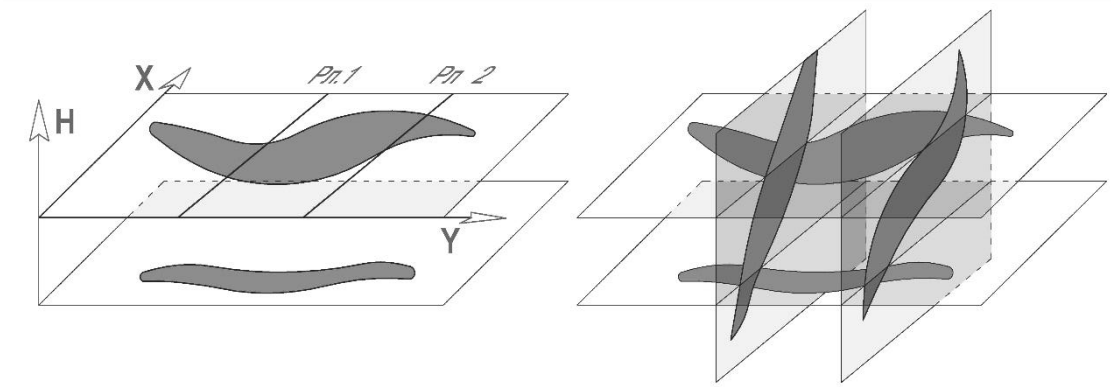


Рисунок 2.11– Схема ориентирования и привязки структурных элементов модели

Завершающим этапом моделирования явилась трёхмерная аппроксимация геометрических параметров структурных элементов модели. При этом произведен анализ их взаимного положения и интерполяция контурных образующих, по которым создаётся каркасная модель рудных тел (рисунок 2.12). На основе каркасной модели выполняется пространственная

триангуляция, в результате которой получаем трёхмерную поверхность рудных тел (рисунок 2.13).

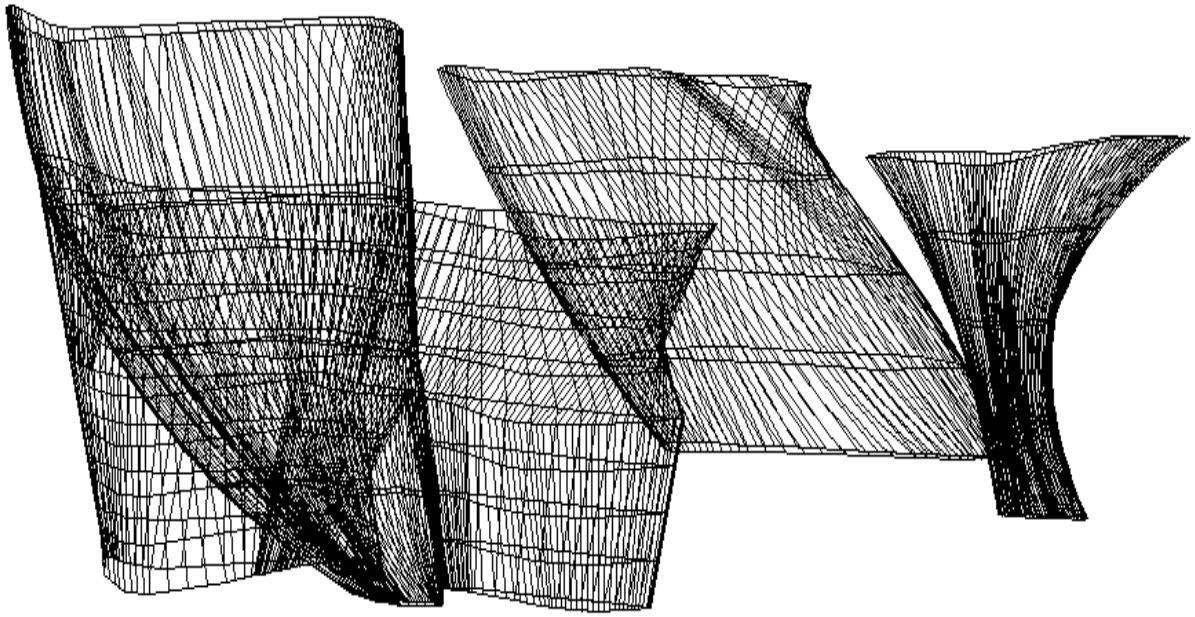


Рисунок 2.12– Каркасная модель рудных тел Центрального участка месторождения Акжал

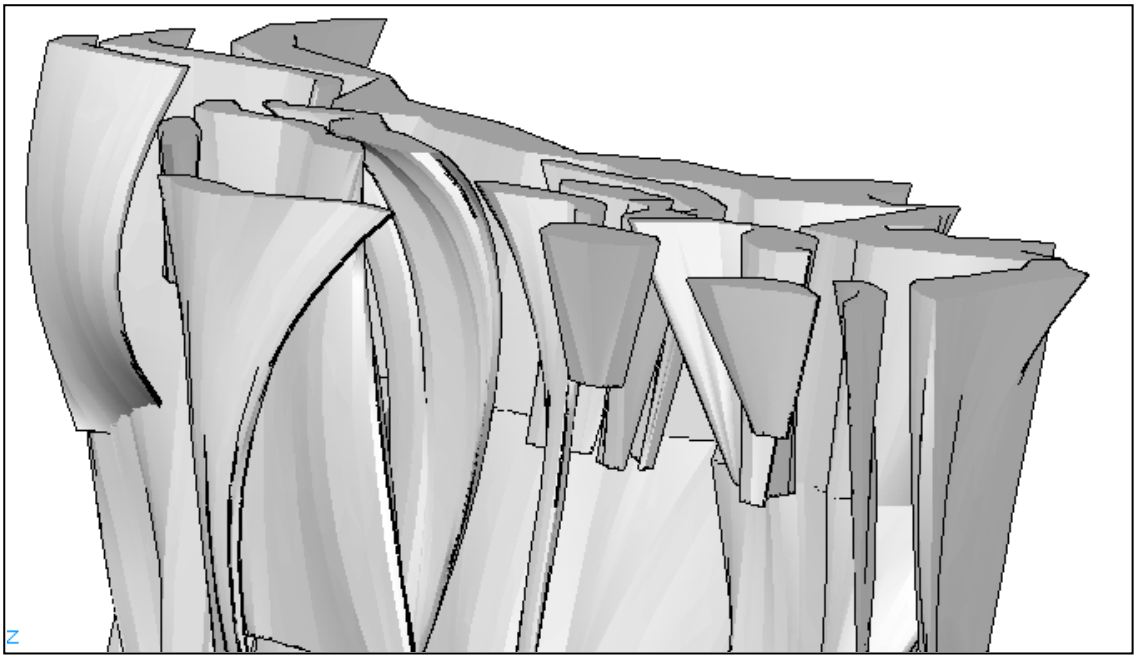


Рисунок 2.13– 3D модель поверхности рудных тел Центрального участка месторождения Акжал

Разработка 3D моделей месторождений является весьма актуальной научной и практической задачей, от успешного решения которой зависит эффективность работы горнодобывающих предприятий на основе широкого

внедрения и использования современных компьютерных технологий при решении горно-геометрических и горнотехнических задач.

В результате выполненных исследований получены цифровые 3D модели рудных тел и основных геологических элементов Акжальского месторождения, которые позволяют интегрировать их в современные аппаратно-программные комплексы по решению актуальных задач горного дела.

2.6 Обработка данных замеров трещиноватости пород

При изучении трещиноватости пород накапливается большое количество измерений. Обработку и обобщение этих измерений производят с использованием круговых, прямоугольных диаграмм и стереограмм трещиноватости, на основании которых строят структурные разрезы и карты трещиноватости.

Круговые и прямоугольные диаграммы позволяют определить количество систем трещин как на замерной станции, так и по карьеру в целом, преобладание тех или иных систем трещин, их элементы залегания. Стереографические сетки Вульфа, Каврайского и другие позволяют определять угловые соотношения между трещинами, выявлять положение трещин по отношению к откосу.

На карьере «Васильковский» обработка и обобщение результатов съемок трещиноватости пород производилась с использованием прямоугольных диаграмм. По четырем замерным станциям были выделены системы трещин и с помощью стереографических сеток выявленны угловые соотношения между системами трещин и их ориентировка относительно карьерных откосов (таблица 2.1)

В результате съёмки подтверждено наличие Васильковского геологического разлома. Этот разлом был обнаружен в настоящем карьере, также он был исследован австралийскими учеными и подсечен в керне, полученном из буровых скважин. Из анализа выявлено, что разлом имеет падение 71º и простирание 47º.

Таблица 2.1 - Результаты обработки трещиноватости горных пород по карьеру «Васильковский»

№№ станций	Азимут простир. откоса $\alpha_{отк}$, градус	Угол падения откоса, градус	Элементы залегания систем трещин на станции			Геометрическая классификация систем трещин	Возможные расчетные схемы
			№№	α_i, градус	λ_i, градус		
1	2	3	4	5	6	7	8
Северный борт	90	50 60 75	1	281	04	Продольная согласная пологая	Не реализуются
			2	162	89	Поперечная согласная	Не реализуются
			3	171	48	Поперечная наклонная	Не реализуются
			4	106	85	Продольная согласная	Не реализуются
			5	206	37	Диагональная согласная пологая	Не реализуются
			6	68	29	Продольная согласная пологая	Не реализуются
			7	335	88	Диагональная согласная крутая	Схема V
Восточный Борт	180	60	1	281	04	Поперечная согласная	Не реализуются
			2	162	89	Продольная согласная	Не реализуются
			3	171	48	Продольная согласная	Не реализуются
			4	106	85	Поперечная согласная	Не влияет
			5	206	37	Диагональная согласная	Схема III
			6	68	29	Диагональная не согласная	Не реализуются
			7	335	88	Диагональная согласная крутая	Не реализуются

Продолжение таблицы 2.1

1	2	3	4	5	6	7	8
Южный борт	270	60	1	281	04	Поперечная согласная	Не реализуются
			2	162	89	Продольная согласная	Не реализуются
			3	171	48	Продольная согласная	Не реализуются
			4	106	85	Поперечная согласная	Не влияет
			5	206	37	Диагональная не согласная	Схема III
			6	68	29	Диагональная согласная	Не реализуются
			7	335	88	Диагональная не согласная	Не реализуются
Западный борт	360	60	1	281	04	Поперечная согласная	Не реализуются
			2	162	89	Диагональная согласная	Не реализуются
			3	171	48	Продольная несогласная	Не реализуются
			4	106	85	Поперечная несогласная	Не реализуются
			5	206	37	Диагональная несогласная	Не реализуются
			6	68	29	Поперечная не согласная	Не реализуются
			7	335	88	Диагональная согласная крутая	Не реализуются

Глава 3 Деформирование прибортовых массивов карьера

Эксплуатация нагорных карьеров неизбежно сопровождается деформациями бортов, нередко переходящими к обрушению пород или их сползанию. Деформации массивов горных пород представляют собой сложные инженерно-геологические явления, приводящие к изменению контура карьера. До настоящего времени научные, научно-практические знания в области открытой разработки месторождений, расположенных в условиях средне- и высокогорья остаются недостаточными.

Выемка значительных объемов горных пород приводит к нарушению сложившегося равновесия в массиве горных пород, которое в свою очередь вызывает деформирование горных пород в откосах и обнажениях карьера. В тех случаях, когда величины деформаций достигают и превышают предельно допустимые, происходит разрушение структурных связей в горных породах, и развитию смещений в сторону выработанного пространства и деформированию откосов.

Деформации массивов горных пород представляют собой сложный инженерно-геологический процесс, приводящий с течением времени к изменению контура борта карьера, отвала, под влиянием природных и техногенных факторов. Форма и интенсивность проявления деформаций зависит от геологических и гидрогеологических особенностей массива горных пород и от вида техногенного вмешательства.

Деформирование откосов бортов карьеров обусловлено действием природных и техногенных факторов. Формы и интенсивность проявления деформаций зависят от геодинамики региона и тектоники месторождения, геологических и гидрогеологических факторов, а также вида техногенных воздействий.

3.1 Виды деформаций бортов карьера

Основные виды деформаций бортов карьера можно разделить на две группы: 1 - деформации вызванные гравитационными силами и 2- деформации борта карьера, вызванных фильтрацией воды. К первой группе деформаций относятся осыпи, обрушения, оползни. Ко второй группе деформаций относятся: суффозия, оплывины, просадка, эрозия, фильтрационный выпор. Выявить четкую границу между отдельными видами деформаций весьма затруднительно. Осыпи и обрушения различаются в основном объемом перемещающихся масс горных пород. Обрушения и оползни, в свою очередь, отличаются в основном скоростью перемещения, которая зависит от угла наклона поверхности скольжения. При высоком содержании глинистых пород и увеличении их влажности оползни переходят в оплывины. В результате просадки пород в откосах может начаться формирование поверхность скольжения и процесс просадки может перейти в оползень или обрушение.

Различают следующие основные виды деформаций массивов горных пород:

- осыпи (в скальных и полускальных породах);
- обрушения;
- оползни;
- фильтрационные деформации (суффозия, оплывины, фильтрационный выпор, просадка, эрозия).

3.2 Классификация деформаций бортов карьеров и отвалов

Причинами формирования и развития деформаций для нагорных карьеров имеют ряд специфических особенностей, обусловленные тем, что разработке подлежат массиве пород склонов, имеющие сложную историю формирования и геологическое строение. Запас устойчивости непосредственно склона постоянно меняется, а при строительстве и эксплуатации нагорного карьера изменяется и геомеханическое состояние. Характерной особенностью нагорных карьеров является наличие развитой сети крупных тектонических нарушений. Деформирование бортов карьеров не всегда сопровождается катастрофическими нарушениями устойчивости. В связи с этим рассмотрим различные виды деформаций прибортового массива горных склонов, характерные при открытых горных работах.

Деформации, не выходящие за пределы упругих (не вызывающие разрушения массива) характерны для изотропных скальных массивов. Могут быть результатом разгрузки или действия активной нагрузки. Однако в первом случае возможно образование трещин с последующей стабилизацией процесса. Во втором случае состояние массива будет обусловлено его реологическими свойствами, а также величиной нагрузки и продолжительностью ее приложения. Если разгрузка происходит в зоне влияния тектонических разломов, протяженных трещин и других подобных поверхностей ослабления массива, то наблюдениями можно зафиксировать значительные остаточные (неупругие) смещения пород, контактирующих с нарушением.

Деформации с медленно нарастающей скоростью смещения массива характерны для оползневых процессов в пластичной среде при постоянном преобладании сдвигающих сил над удерживающими. Завершаются в конечном счете разрушением откоса (оползни в лежачем боку угольных месторождений, вызванные подрезкой контактов между слоями).

Деформации с затухающей скоростью смещения пород характерны для оползневых процессов в пластичной среде при меняющихся внешних условиях (сезонные изменения температуры или количества осадков, пригрузка призмы упора или разгрузка призмы активного давления).

Деформации с постоянной скоростью смещения пород (установившаяся ползучесть) характерны для оползней откосов, включающих глинистые породы

с постоянной влажностью и постоянной разностью между сдвигающими и удерживающими силами.

Деформации с быстрым, прогрессирующим смещением пород, завершающиеся обрушением.

В условиях квазиоднородных скальных и полускальных пород обычно происходят после появления трещины отрыва, при переходе медленных, часто непрогнозируемых смещений в активную стадию. При наличии в основании борта слабых глинистых контактов или слоев с горизонтальным или пологим залеганием также возможны обрушения катастрофического характера. Вначале наблюдаются медленные подвижки с оседанием верхней площадки, подобно тому, как это происходит при зарождении оползней. Поэтому деформации иногда относят к оползням-обрушениям.

В настоящее время средняя глубина крупных карьеров стран СНГ достигла 250-300м. Но трудно назвать карьер, на котором не было бы случаев обрушения или оползания участков бортов в промежуточных их положениях. Анализ причин разрушений бортов показал, что были вскрыты не выявленные ранее поверхности ослабления массива – одиночные, ориентированные параллельно борту, либо сопряжённые, образующие желобчатые поверхности сдвига.

Наиболее полные данные о таких деформациях на карьерах приведены в таблице 3.1.

Таблица 3.1 -Деформации бортов карьера

Вид и характеристика деформаций	Форма проявления деформаций	Причина и условия возникновения деформаций	
		Природные	Техногенные
1	2	3	4
Осыпание, отрыв, скатывание и скопление на откосах и их основаниях кусков и глыб горных пород	Контрфорсные осыпи откосов мягких связных пород	Выветривание	Массовые технологические взрывы. Отсутствие заоткоски уступов
	Контрфорсные и висячие осыпи откосов трещиноватых пород		
Обрушение - быстрое смещение породных масс по крутой поверхности скольжения	Обрушения по подрезанным контактам слоев, тектоническим нарушениям и сланцеватости.	Падение слоев и тектонических нарушений в сторону выемки под углом более $25\text{-}30^0$	Неблагоприятная ориентировка фронта горных работ по отношению к поверхностям ослабления. Подрезка поверхностей ослабления забоем выработки.
	Обрушения по поверхностям ослабленных трещин	Падение слоев и тектонических нарушений в сторону выемки под углом более $35\text{-}40^0$	
	Обрушения по сложным поверхностям ослабления	Наличие поверхностей ослабления	
	Обрушения по криволинейным поверхностям	Однородная порода без поверхностей ослабления	Завышенные углы и высота откоса, статические и динамические нагрузки на верхнюю площадку откоса
	Обрушение козырьков на откосах	Слабые песчано-глинистые породы	Превышение высоты забоя при работе экскаватора типа прямая лопата

Продолжение таблицы 3.1

1	2	3	4
Оползни – медленное смещение породных масс по пологой поверхности смещения	Оползни изотропных массивов	Грунтовые воды в откосе или скопление поверхностных вод на уступах	Отсутствие или недостаточная эффективность дренажа и регулирования поверхностного стока
	Фильтрационные оползни	Подкапывание откоса вследствие выноса фильтрующимся потоком слабосвязанных частиц горных пород	То же. Подтопление откоса при вскрытии карьера землеснарядом
	Покровные оползни	Наличие рыхлых отложений на склоне коренных пород	Отсутствие дренажа и регулирования поверхностного стока, отсутствие работ по уборке осыпей и специальной заоткоски уступа
	Контактные оползни слоистых пород лежачего бока	Прослои пластичных глин. Напорный водоносный горизонт	Неблагоприятное направление фронта горных работ по отношению к поверхностям ослабления и слоям пластичных глин. Отсутствие регулирования поверхностного стока в карьере
	Оползни – надвиги	Слабые контакты горных пород. Вскрытые слои пластичных глин	
	Оползни выпирания	Невскрытые слои пластичных глин; обводнение площадок уступов и прибортовой полосы	

Продолжение таблицы 3.1

1	2	3	4
Оползни техногенных массивов (отвалов)	Надподошвенные	Прочное основание и слабые породы отвала; увлажнение отвальных пород	Отсутствие регулирование поверхностного стока на отвалах. Отставание планировки отвала от отсыпки. Отсутствие селективной выемки отвальных пород.
	Подподошвенные (контактные)	Наклонное основание отвалов	Неблагоприятный рельеф территории отвалов
	Подподошвенные (выпирания)	Слабое основание, напорные воды в основании отвала, прочные породы отвала	Превышение высоты отвала. Отсутствие дренажа в основании отвала.
Оплывание – течение насыщенных водой рыхлых пород нарушенной структуры	Консистентные оплывины глинистых пород	Насыщение водой рыхлых пород и высокопористых отложений до текущей консистенции	Отсутствие дренажа и регулирования поверхностного стока
Механическая суффозия	Воронки, провалы, фильтрационные оплывины	Вынос мелких частиц фильтрующимся потоком	Недостаточная эффективность дренажных работ
Фильтрационный выпор	Прорыв напорных вод на фильтрующих откосах	Пригрузка фильтрующего откоса слабоводопроницаемыми породами	Использование для пригрузки фильтрующего материала с низким коэффициентом фильтрации

Продолжение таблицы 3.1

1	2	3	4
Фильтрационный выпор	Прорыв напорных вод в подошве карьера	Наличие в подошве карьера водопроницаемого слоя горных пород, большие напоры подрудного водоносного горизонта	Недостаточно снижен напор подземных вод в подошве карьера
Просадка – вертикальное опускание прибортовых участков рыхлых породных масс без образования сплошной поверхности скольжения	Просадка пород естественной структуры	Замачивание просадочных горных пород	Отсутствие регулирования поверхностного стока
	Уплотнение, консолидация пород нарушенной структуры в отвалах	Фильтрационная консолидация при уплотнении рыхлых горных пород	Отсутствие специальных горных работ по укатке, утрамбовке отвальных масс в процессе отсыпки отвалов
Химическая суффозия (растворение и выщелачивание горных пород)	Оседание поверхности прибортовых участков, воронки, провалы	Наличие растворимых минералов в горных породах. Карстовые пустоты	Отсутствие или слабая эффективность дренажа
Эрозия – размывание пород на откосах по влиянием поверхностного стока	Промоины (рытвины) на откосах однородных массивов ненарушенной структуры	Низкая водопрочность пород	Отсутствие регулирования поверхностного стока
	Промоины (рытвины) на откосах породных массивовнарушен-ной структуры (отвалов)	Физико-механические свойства массива в целике и отвале. Атмосферные осадки	

Деформации бортов карьеров в их промежуточном положении связаны с наличием не выявленных ранее нарушений сплошности массива.

Глава 4 Природное поле напряжений массива горных пород

4.1 Напряженно-деформированное состояние массива горных пород

Изучение напряженно-деформированного состояния массива горных пород в крупнейших горнодобывающих регионах направлено на то, чтобы понять, что представляет собой поле напряжений, как оно формируется вследствие эволюционного пути в природных условиях и в результате техногенных процессов. Исторически недра Земли в своем развитии претерпевают разрушение и преобразование геологической среды одной дискретной структуры в другую с соответствующим изменением геодинамического режима. Кроме того, среда с дискретной структурой вследствие горных работ приобретает дополнительные свойства неравновесности системы, которые способствуют развитию негативных техногенных процессов при освоении месторождений полезных ископаемых.

Природные поля напряжений в земной коре – следствие гравитации и тектонических процессов. В отличие от них техногенные поля возникают в результате ведения горных работ. Параметры полей обусловлены эволюцией Земли и в первую очередь физическими и физико-химическими процессами. Они зависят от широкого спектра свойств массива горных пород, рельефа, способов разработки месторождений полезных ископаемых. Строение земной коры неоднородно, отдельным областям её присущи неравномерные движения и деформации, способствующие образованию аномальных полей напряжений.

Современные исследования геологической среды методами экспериментальной геомеханики распространяются в пределах ведения горных работ, включая добычу полезных ископаемых, проведение разведочных и эксплуатационных скважин, и строительства различных инженерных сооружений.

Характерной особенностью механического состояния массива горных пород является естественное напряженное состояние, которое массив имеет до начала ведения горных работ. Именно это естественное напряженное состояние и определяет характер геомеханических процессов при ведении горных работ.

Породный массив до начала ведения горных работ находится под действием внешних и внутренних сил. Внутренние силы – это межатомные и межмолекулярные взаимодействия между структурными элементами горной породы, которые определяют способность породы воспринимать внешние силы, сопротивляться разрушению, изменению формы и размеров. Внешние силы – это результат взаимодействия объектов друг с другом. Внешние силы в свою очередь подразделяются на объемные и поверхностные. К поверхностным силам относятся силы, взаимодействующие в массиве в результате внешних нагрузок. К объемным силам относятся силы, действующие на все частицы массива горных пород.

Формирование естественных напряжений в массиве происходит под воздействием гравитационных, тектонических и гидростатических сил. Таким

образом, естественное поле напряжений является результатом взаимодействие гравитационных, тектонических и гидростатических полей напряжений. Рассмотрим каждое поле напряжений более подробно.

4.1.1 Гравитационное поле напряжений

Долгое время считали, что поле напряжений в массиве горных пород формируется исключительно под воздействием гравитационных сил. До недавнего времени естественное поле напряжений оценивалось на разных этапах научного развития геомеханики на основании гипотезы А.Н.Динника и А.Гейма.

По своей природе гравитационные поля напряжений обусловлены действием сил тяжести на все частицы массива пород и являются объемными силами, т.е. силами, действующими равномерно внутри всего исследуемого массива.

Согласно гипотезы швейцарского ученого А.Гейма (1878г) в течение геологических периодов на больших глубинах, в условиях всестороннего сжатия, где под влиянием повышенных значений температуры и давления в породах преобладают пластические свойства, напряжения в массиве, действующие в вертикальном и горизонтальном направлениях равны между собой, т.е.

$$\sigma_{вер} = \sigma_{гор1} = \sigma_{гор2}\,, \tag{4.1}$$

при этом коэффициент бокового распора $\lambda = 1$, а коэффициент Пуассона $\upsilon = 0{,}5$.

Величина полного гравитационного напряжения, согласно гипотезы российского академика А.Н.Динника (1925г), равна величине вертикальной составляющей гравитационного поля и определяется по формуле:

$$\sigma_z^g = \rho g H = \gamma H\,, \tag{4.2}$$

где ρ – усредненная плотность горных пород, слагающих массива; g – ускорение свободного падения; γ – усредненный объемный вес горных пород в массиве; H – глубина от рассматриваемой точки от дневной поверхности.

Под воздействием вертикальных гравитационных усилий в массиве пород возникают деформации и соответствующие им горизонтальные реакции бокового распора, которые являются горизонтальной составляющей гравитационного поля напряжений.

Величины горизонтальных гравитационных напряжений зависят не только от величины вертикальных составляющих напряжений, но и от механических характеристик горных пород, в частности от величины бокового распора:

$$\sigma_{x,z}^{г} = \lambda \sigma_z^{г}\,. \tag{4.3}$$

Точное определение величины коэффициента бокового распора массива горных пород в условиях объемного напряженного состояния весьма сложно. Поэтому пользуются приближенными эмпирическими зависимостями для определения коэффициента бокового распора:

в упругих породах по гипотезе А.Н.Динника

$$\lambda = \frac{\upsilon}{1-\upsilon}, \tag{4.4}$$

где υ – коэффициент поперечных деформаций (Пуассона);

в пластически деформируемых породах:

$$\lambda = tg^2(45^0 - \frac{\varphi}{2}), \tag{4.5}$$

где φ – угол внутреннего трения.

Наблюдениями установлено, что на величину и направление гравитационных напряжений оказывает влияние рельеф земной поверхности. Под возвышенными участками рельефа в массиве пород наблюдаются максимумы нормальных напряжений; под понижениями рельефа – минимумы.

Если массив имеет слоистое строение, причем горизонтальные слои имеют различный удельный вес, то вертикальные напряжения на глубине H определяются по формуле:

$$\sigma_в^г = \sum_{i=1}^{n} \gamma_i H_i , \tag{4.6}$$

где H_i- - мощность каждого отдельного слоя.

4.1.2 Тектонические поля напряжений

Земная кора имеет длительную историю формирования и характеризуется сложным составом, строением, геолого-физическими процессами и явлениями. В обобщенной формулировке тектонические поля напряжений в массивах горных пород можно определять как результат тектонических процессов в земной коре или более глубоких слоях Земли.

Все тектонические движения сопровождаются различными деформациями земной коры. Причинами тектонических процессов, а следовательно и тектонических полей напряжений могут быть:

- силы, обусловленные вращением Земли;
- горизонтальные силы, связанные с глубинными процессами;
- силы, обусловленные лунными и солнечными приливами в земной коре;
- дрейф континентов;
- силы, обусловленные сейсмическими явлениями.

Характер и интенсивность напряжений, возникающих в земной коре зависит от механизма тектонических процессов, обусловленных перечисленными причинами.

Следовательно, тектоническими напряжениями называются напряжения в земной коре, возникающие в массиве в результате приложением внешних усилий к земной коре или её участку. Тектонические силы могут быть как постоянными, так и переменными по глубине; могут быть как сжимающими, так и растягивающими.

Многочисленные исследования напряженно-деформированного состояния массива пород при разработке месторождений полезных ископаемых показали, что наиболее высокие горизонтальные напряжения, превосходящие по своей величине вертикальные напряжения, превосходящие по своей величине вертикальные, характерные для регионов, где наблюдается поднятие земной коры или горизонтальное сжатие.

Наиболее высокие величины горизонтальных напряжений получены экспериментальными исследованиями в пределах Балтийского щита шведским ученым Н. Хастом в Скандинавии. Установлено, что сумма горизонтальных главных напряжений у дневной поверхности достигает 18020 МПа и с увеличением глубины изменяется по зависимости:

$$\begin{aligned} &\sigma_x + \sigma_y = a + H(0{,}099 + 0{,}003), МПа; \\ &a = (1{,}01 \pm 0{,}1), МПа; \end{aligned} \qquad (4.7)$$

где a – сумма главных горизонтальных напряжений у дневной поверхности;

H – глубина точки измерений от дневной поверхности, м.

По данным экспериментальных измерений и оценки поля напряжений на рудниках Кольского полуострова, горизонтальные напряжения в 10-20 раз превышают гравитационные, на рудниках Урала – в 1,5-5 раз, горизонтальные напряжения на Джезказганском месторождении в 2-7 раз выше вертикальных, причем максимальные значения напряжений зарегистрированы в купольных частях антиклинальных складок, а наименьшие – к флексурам.

На определенных этапах развития земной коры в результате тектонических процессов в ней возникали периодически все новые тектонические поля напряжений, которые вступали во взаимодействие с ранее существовавшими. В одних случаях это приводило к новым, более сложным полям напряжений, в других – новые поля полностью заменяли существующие. Такие периоды повторялись многократно, они продолжаются и в наши дни, в результате чего современное напряженное состояние Земной коры представляет пространственную и временную интегральную картину.

Установлено, что значительная часть избыточных горизонтальных напряжений имеет тектоническую природу.

Гидростатические напряжения. Массивы горных пород на горизонтах, где ведутся горные работы, часто обводнены. Жидкость в горных породах существует как в виде свободной и связанной (трещинной), так и поровой. В

обоих случаях в массиве возникают дополнительные напряжений, обусловленные весом столба жидкости, взвешивающим эффектом жидкости, поровым давлением (давлением внутри поровой жидкости на стенки пор).

Многочисленные исследования напряженно-деформированного состояния массива пород при разведке и разработке месторождении показали, что наиболее высокие горизонтальные напряжения, превосходящие вертикальные, характерные для регионов, где наблюдается поднятие земной коры (Кольский полуостров, Средняя Азия, Урал, и др). В регионах, где происходило опускание земной коры вертикальные напряжения, как правило, выше горизонтальных. Данные результатов измерений методами разгрузки гидроразрыва, дискования керна, разрушения стенок при бурении глубоких скважин свидетельствуют, что превышения горизонтальных напряжении под вертикальным наиболее часто наблюдается в изверженных породах (примерно на 60 % рудников) и в осадочных в метоморфизированных –в три раза реже (около 20 %).

Измерения на подземных рудниках Хибинского и Ловозерского месторождения показаны, что горизонтальные напряжения в 5 – 10 раз больше на глубине 100 - 150 м и в 2 –3 раза на глубине 500м.

На Урале горизонтальные напряжения превышают 1,5 –50 раза вертикальные. На Джезказганском месторождении горизонтальные напряжения в 2 – 7развыше вертикальных, на рудниках Горной Шории в Хакасии - в 1,5–3 раза.

На рудниках Центральной Азии и Казахстана многочисленных измерения напряжении проводят в сложных горно-геологических условиях где скорость региональных подъемов поверхности достигают 5-10 мм в год, наблюдается преимущественно превышение меридиональных горизонтальных напряжений над вертикальными. Практически величины горизонтальных напряжений σ_x и σ_y определяли путем статистической обработки данных многочисленных натурных измерений. В результате выполнения таких работ в Институте геомеханики и освоения недр НАН КР были получены эмпирические зависимости изменения горизонтальных напряжений.

Для определения наряженного состояния массива пород в условиях действия тектонических сил в горно-складчатых областях академиком И.Т. Айтматовым установлены зависимости:

а- если модуль упругости пород изменяется в пределах:

E=(5-6)10⁴ – (10-11)10⁴ Mna;

$$\begin{aligned} \sigma_x + \sigma_y &= 9{,}5 + 0{,}075H; \\ \sigma_x &= 4{,}5 + 0{,}045H; \\ \sigma_y &= 5{,}0 + 0{,}030H; \end{aligned} \qquad (4.8)$$

б - если модуль упругости пород изменяется в пределах:

E=(2-3)10⁴ – (5-6)10⁴ Mna;

$$\sigma_x + \sigma_y = 5 + 0{,}058H;$$
$$\sigma_x = 3 + 0{,}03H;$$
$$\sigma_y 2 + 0{,}028H. \quad (4.9)$$

При этом удельный вес γ обычно равняется 2700кг/м^3. Аналогичные исследования проводилась в зарубежных странах, они как правило показывают, что горизонтальные напряжения не равны между собой. Имеются эмпирические зависимости для определения повышенного горизонтальных напряжении $\sigma_г$ в зависимости от глубины (до 100м) для отдельных территорий: Северной Америки (Хеймсон) *$\sigma_г$ = 0,0196H + 5,0Mna*; Канадского щита (Г. Хергет) *$\sigma_г$ =0,04H +8,139Mna*; Австралия (Г. Веротницкии, Д. Денхам) *$\sigma_г$= 0,0215H + 7,26 МПа*. Следовательно, для определения полного тензора напряжения нетронутого массива требуется проведение комплексных исследований на различных участках месторождений.

4.2 Напряженное состояние прибортового массива карьера

Распределение нормальных напряжений в массиве соответствует гипотезе А.Н. Динника (Рис. 4.1)

$$\sigma_{z=\gamma H};$$
$$\sigma_x = \sigma_y = \left[\frac{\nu}{(1-\nu)}\right] \times \gamma H; \quad (4.10)$$

где σ_z, вертикальные напряжения, МПа; $_x$, σ_y – горизонтальные напряжения МПа; ν – коэффициент Пуассона; H – глубина залегания, м.

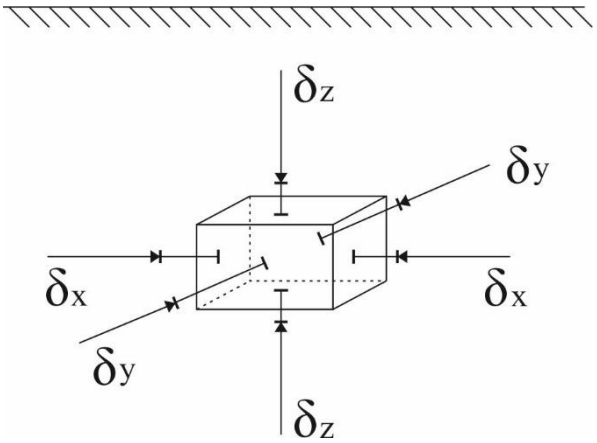


Рисунок 4.1 - Распределение вертикальных и горизонтальных напряжений в массиве горных пород

В прибортовой части массива эти напряжений принимают вид (рис.4.2):

$$\sigma_z^I = \gamma H^I;$$

$$\sigma_x^I = \frac{E\varepsilon_x}{(1-\nu)+\left[\frac{\upsilon}{(1-\upsilon)}\right]} * yH^I; \qquad (4.11)$$

$$\sigma_y^I = \left[\frac{\upsilon}{(1-\upsilon)}\right] * yH^I;$$

где Е – модуль Юнга, МПа;ε_x – относительная деформация в сторону откоса;

$H' < H$ – глубина отрабатываемого горизонта в прибортовой части массива, м.

В прибортовой части массива формируется область повышенных значений напряжений, вызванных ведением горных работ (техногенные напряжения). Параметры техногенного поля напряжений зависят от геометрических параметров карьера (высота и крутизна борта, высота и угол откоса уступа, ширина рабочей площадки,); скорости подвигания фронта работ; маневрирования горными работами, параметры буровзрывных работ; деформационными характеристиками пород в прибортовой части массива, так как именно эта часть массива воспринимает дополнительные нагрузки; особенностями естественного поля напряжений в нетронутом массиве до проведения выработок, т.е. в его естественном состоянии.

По мере удаления от поверхности борта в глубь массива все действующие напряжения относятся к нормальным напряжениям, так как на поверхностях элементарных объемов отсутствуют касательные напряжения.

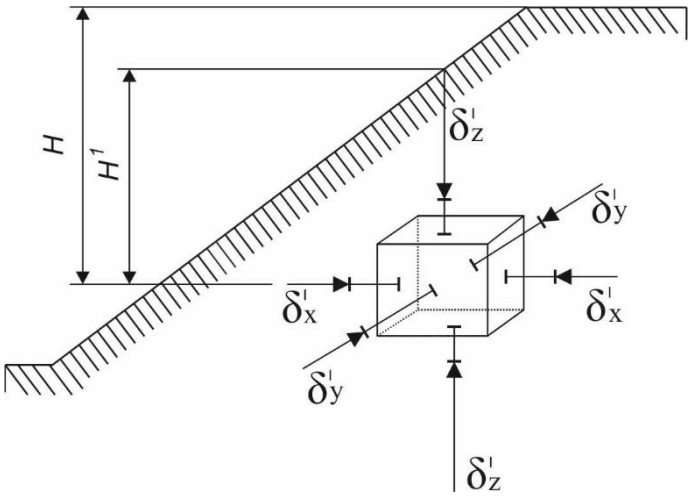


Рисунок 4.2 - Распределение напряжений в прибортовой части массиве

По мере понижения фронта открытых горных работ вертикальные и горизонтальные напряжения возрастают от верхней части уступа к нижней.

В пределах верхней границы карьера на уровне верхней площадки формируются области, где преобладают горизонтальные растягивающие напряжения, которые являются причиной развитие трещин отрыва на уровне земной поверхности. В основании борта или уступа часть горных пород массива деформируется в сторону выработки.

Концентрация нормальных напряжений σ_x и касательных τ_{xy} наблюдается в зонах, примыкающих к основанию борта.

Нормальные горизонтальные напряжения σx в верхней части борта в больше, чем в нижней его части, а вертикальные напряжения σ_y в его основании превышают вертикальные в верхней части борта, отношение σ_x / σ_y возрастает с увеличением глубины карьера H (Рис. 4.2).

Глава 5 Методы оценки напряженного состояние прибортового массива карьера

Характерной особенностью механического состояния массива горных пород является естественное напряженное состояние, которое массив имеет до начала ведения горных работ. Именно это естественное напряженное состояние и определяет характер геомеханических процессов при ведении горных работ. Природные поля напряжений в земной коре – следствие гравитации и тектонических процессов. Параметры природных полей напряжений обусловлены эволюцией Земли и в первую очередь физическими, и физико-химическими процессами. Они зависят от свойств массива горных пород, рельефа, способа разработки месторождений полезных ископаемых.

Строение земной коры неоднородно, отдельным областям её присущи неравномерные движения и деформации, способствующие образованию аномальных полей напряжений.

Современные исследований геологической среды методами экспериментальной геомеханики производят в пределах ведения горных работ, включая добычу полезных ископаемых, проведение разведочных и эксплуатационных скважин, и строительства различных инженерных сооружений.

Оценку напряженного состояния породного массива необходимо проводить на всем протяжении эксплуатации месторождения. Основная задача контроля напряженного состояния заключается в том, чтобы выяснить механизм процессов, протекающих в массиве, выявить доминирующие факторы, установить наиболее важные параметры изучаемого явления. Это позволяет на ранних стадиях выявить зоны возможного обрушения и принять меры по предупреждению внезапного обрушения.

Методы определения напряжений в массиве условно можно разделить на три группы.

Первая группа основана на измерении деформаций пород и последующим расчете по ним напряжений. Эта группа охватывает методы разгрузки, буровых скважин, прессиометрический, гидроразрыва массива горных пород, способ основанный на использовании оптических датчиков и др., эти методы обусловили создание нового класса унифицированных комплексов аппаратуры «УК-Тензор», «Эпсилон», «Гидрозонд», «Оптика» и др., которые предназначены определять первоначальные напряжения и их изменения в процессе горных, и строительных работ.

Вторая группа методов – это так называемые компенсационные способы, основанные на первоначальном снятии и последующим восстановлением напряжений на изучаемом участке массива.

Третья группа методов построена на оценке природных физических полей или искусственно создаваемых в массиве и их взаимосвязи с напряженным состоянием земной коры. В процессе экспериментальных работ наибольшее развитие получили сейсмический, - ультразвуковой, электромагнитной эмиссии и электрометрический каротаж и др. Данная группа методов в настоящее время составляет основу системы мониторинга недр Земли при разработке полезных ископаемых.

5.1 Деформационные способы определения параметров напряженного состояния массива горных пород

Наиболее широко распространенным из деформационных способов определения напряжений в массиве получил метод разгрузки, заключающийся в измерении деформаций упругого восстановления торца скважины при выбуривании керна. Этот способ основан на измерении упругих деформаций восстановления при отделении керна от породного массива и разгрузке его от действующих в нем напряжений, т.е. на зависимости деформаций упругого восстановления элемента породы при разгрузке от действующих в нем напряжений. По замеренным деформациям, определив заранее упругие характеристики горной породы, слагаемый массив, такие как модуль упругости и коэффициент Пуассона вычисляют действовавшие в массиве напряжения.

Этот метод применяют в двух вариантах: торцевых измерений и соосных скважин.

Методика измерений напряжений способом разгрузки торца скважины включает в себя:

- бурение скважины диаметром 76-80 мм в заданном направлении;
- подготовку торца скважины (бурение скважины на определенную глубину, зачистка и шлифовка торца специальными коронками, обезжиривание и просушивание);
- наклейка тензодатчиков на торец скважины и снятие их начальных показаний;
- выбуривание керна алмазной или победитовой коронкой и снятие показаний электротензодатчиков в результате его разгрузки;
- определение модуля упругости E и коэффициента Пуассона υ путем испытаний извлеченного из скважины керна;
- вычисление величин и направления главных напряжений на забое скважины и в массиве.

Электротензодатчики перед наклейкой на торец скважины собираются в розетки при этом, наиболее широкое распространение получили

прямоугольные трехдатчиковые розетки. В этой розетке два взаимно перпендикулярных датчика направлены вдоль осей координат, а третий под углом 45^0 к ним. Для определения показаний проволочных тензодатчиков при измерении деформаций разгрузки используются различные тензостанции: ИСД-3, ИД-61М, ИД-62М, АИ-1 и др. точность измерений относительных деформаций этими приборами $\pm 1*10^{-5}$. Вычисление напряжений на торце скважин по измеренным деформациям выполняется по известным формулам теории упругости.

Способ оценки напряжений в массиве методом соосных скважин отличается от метода торцевых измерений тем, что бурят опережающую центральную скважину малого диаметра (около 40 мм). В ней устанавливают деформометры (схема Н. Хаста) либо на ее стенки с помощью специальных приспособлений наклеивают тензодатчики (схема Е. Лимана, рис. 5.1).

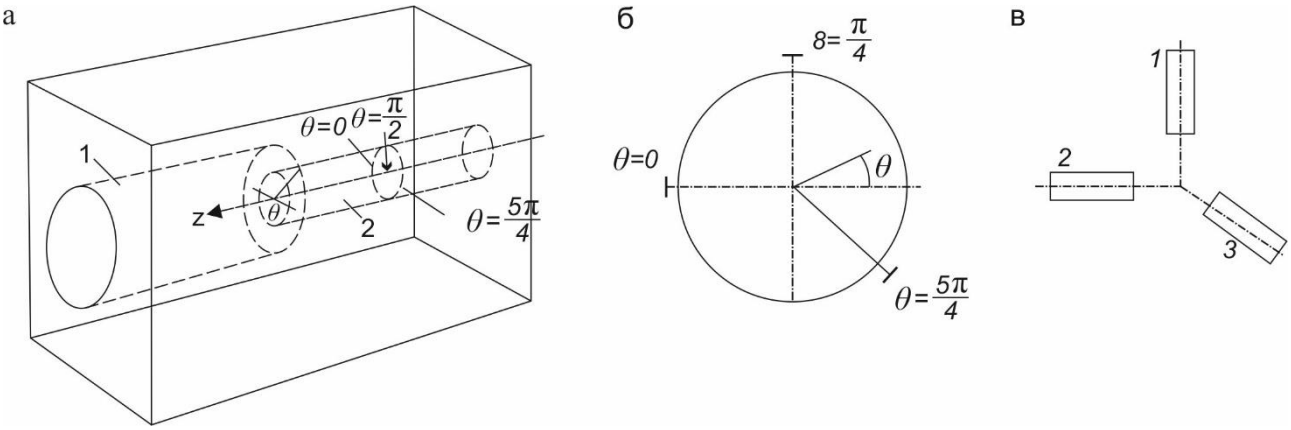


Рисунок 5.1- Схема наклейки электротензометрических датчиков на стенки скважины малого диаметра при измерениях напряжений в массиве пород методом разгрузки в варианте соосных скважин (схема Е. Лимана)

а - расположение измерительной и разгрузочной скважин, б - размещение тензодатчиков на стенках скважины малого диаметра, в - расположение датчиков в розетке: 1 - скважина диаметром 110-120 мм или больше, 2 - измерительная скважина диаметром 40 мм.

Напряжения, действующие в массиве вычисляют по результатам измерения деформаций $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3$ по датчикам 1, 2, 3 по формулам:

$$\sigma_\theta = \frac{E}{(1-\nu^2)}(\varepsilon_1 + \nu\varepsilon_2);$$

$$\sigma_z = \frac{E}{(1-\nu^2)}(\varepsilon_1 + \nu\varepsilon_2); \qquad (5.1)$$

$$\tau = G(\varepsilon_1 + \varepsilon_2 - 2\varepsilon_3);$$

где E – модуль упругости; G – модуль сдвига, ν – коэффициент Пуассона.

5.2 Компенсационные способы определения параметров напряженного состояния массива горных пород

Одним из универсальных методов определения напряженного состояния породного массива компенсационным способом является метод гидроразрыва скважин. С одной стороны он эффективен при детальном изучении локальных полей напряжений вблизи обнажений горных пород, с другой – в числе немногих данный метод может использоваться для контроля наряженного состояния горных пород на большом расстоянии от борта карьера или стенки выработки. Суть метода сводится к следующему. Из горной выработки в направлении действия одного из главных напряжений бурится измерительная скважина, в которой на определенной глубине устанавливаются два пакера.

Через отверстие в одном из них в скважину с помощью насоса нагнетается жидкость. При достижении в замкнутом объеме участка скважины определенного значения давления жидкости, по площадке в массиве с наибольшим растягивающим тангенциальным напряжением инициируется трещина разрыва. Направление развития трещины в этом случае будет совпадать с направлением действия максимального сжимающего напряжения, находящегося в плоскости, ортогональной оси скважины.

Техника измерительного гидроразрыва, состоит в том, что участок скважины перекрывают с помощью двупакерного зонда и нагружают путем нагнетания в него жидкости вплоть до достижения критических растягивающих напряжений на стенках скважины, приводящих к разрыву пород. (Рисунок 5.2) Причем, управляя режимом нагнетания, а также осуществляя повторные нагружения в выбранном интервале, можно выделить на диаграммах «давление - время» характерные значения этих параметров, которые затем интерпретируют в терминах напряжений, действующих в породном массиве.

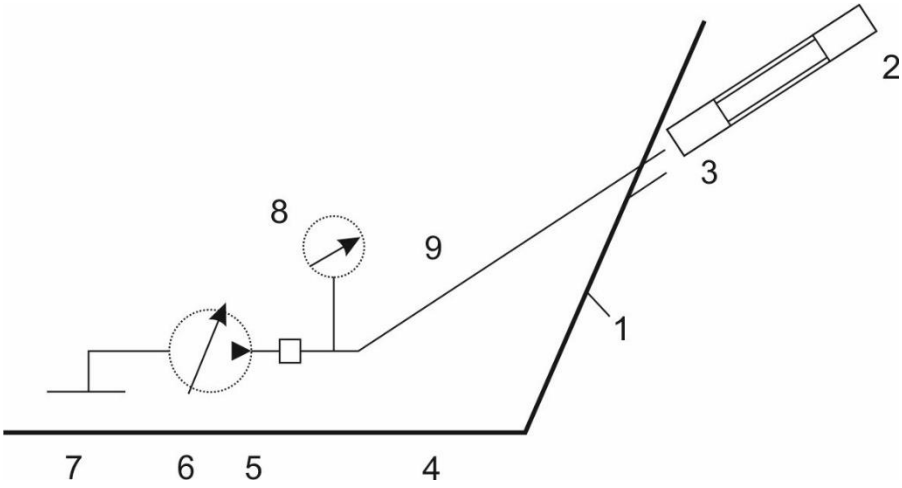


Рисунок 5.2 - Схема эксперимента при определении напряжений в массиве горных пород способом гидроразрыва скважины:

1 – контур откоса; 2 – измерительная скважина; 3 – двупакерный зонд; 4 – регистратор давления; 5 – датчик давления; 6 – нагнетательная установка; 7 – резервуар с рабочей жидкостью; 8 – манометр; 9 – трубопровод.

К таким значениям относятся: P1 – давление разрыва пород при первом нагружении; P2 – давление раскрытия трещины при повторных нагружениях; P3 – давление запирания (Рисунок 5.3)

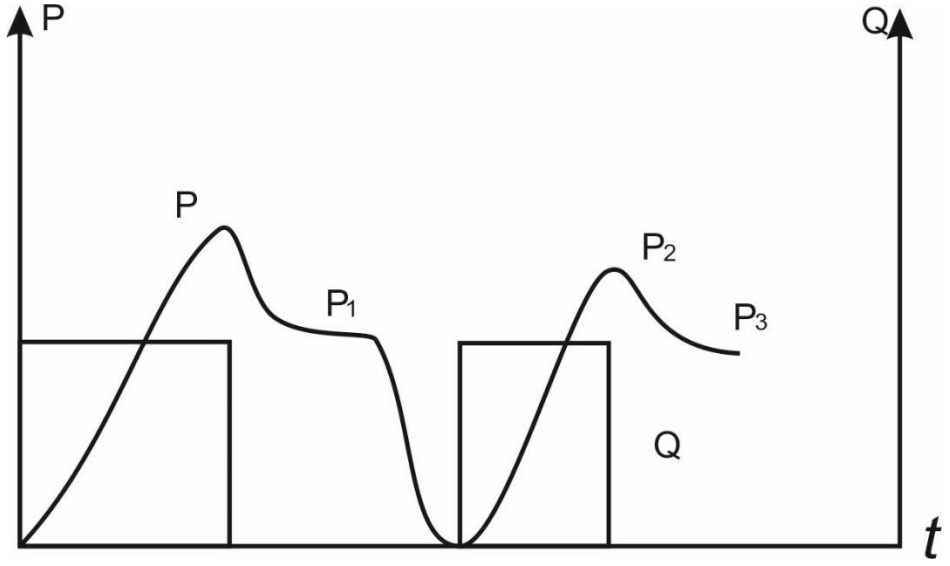


Рисунок 5.3. Идеализированная кривая «давление P – время t» при гидроразрыве слабосцементированных пород (Q – расход жидкости)

Поскольку давление и напряжение имеют одинаковую размерность, для оценки исходных напряжений нет необходимости знать фактические значения деформационных параметров пород, что выгодно отличает метод гидроразрыва от большинства механических способов измерения напряжений.

Пересчет характерных давлений гидроразрыва в напряжения осуществляют исходя из следующих соотношений:

$$\begin{aligned} P_c &= 3\sigma_{\min} - \sigma_{\max} + T \ ; \\ P_r &= 3\sigma_{\min} - \sigma_{\max} \ ; \\ P_s &= \sigma_{\min} \ ; \end{aligned} \qquad (5.2)$$

где – σ_{min}, σ_{max} -соответственно наименьшая и наибольшая компоненты главных напряжений в плоскости, ортогональной оси скважины; T – сопротивление разрыву (здесь и далее сжимающие напряжения считаются положительными).

Отсюда сразу получаются искомые оценки напряжений.

5.3 Геофизические методы оценки напряженного состояния прибортового массива карьера

Параметры напряженного состояния, получаемые этими методами, позволяют охватить большие объемы породного массива. Эти методы отличаются высокой мобильностью и производительностью.

Наиболее часто применяют эффективно разработанный импульсный сейсмический (ультразвуковой) метод определения напряжений. Он основан на взаимосвязи с напряженным состоянием горных пород акустических (сейсмических) характеристик - скорости и затухания упругих волн, возбуждаемых в массиве. Сущность этого метода состоит в том, что для многих пород с возрастанием давления увеличивается скорость продольных упругих волн. При этом рост скорости происходит по тому же направлению, что и увеличение нагрузки, тогда как в других направлениях эти изменения незначительны.

Для различных пород рост скоростей продольных волн с увеличением давления неодинаков. Рост скоростей начинается сразу же с увеличением давления и прекращается при напряжениях, составляющих для различных пород 30 - 70% разрушающего напряжения при сжатии.

В натурных условиях измерения проводят по схеме прозвучивания в трех параллельных шпурах или скважинах, пробуриваемых в вершинах прямоугольного треугольника с длиной катетов около 50 см. Для измерений применяют те же самые серийные переносные ультразвуковые дефектоскопы и ультразвуковые шахтные датчики, что и для определения упругих характеристик в массиве пород.

В случаях, когда при нагружении образцов пород до разрушающих напряжений скорость ультразвуковых волн не возрастает или прирост скорости колеблется в незначительных пределах, сейсмоакустические измерения для оценки напряжений в массиве пород неприменимы.

Менее разработан и реже применяется радиометрический метод определения напряжений, связанный с наведением в исследуемом участке массива радиационного поля. Метод основан на эффекте различного поглощения радиоактивных излучений породами в зависимости от их плотности. С ростом сжимающих напряжений плотность пород, особенно сравнительно малоплотных, существенно возрастает. Этот эффект используют для оценки напряжений в угольном массиве и породах угленосных толщ. Но он может дать достаточно надежные результаты и для весьма плотных скальных пород, таких как граниты, диабазы и др., для которых абсолютные изменения плотности с ростом всестороннего давления обычно не превышают 1%.

Электрометрический метод определения напряжений принципиально осуществим в двух модификациях: на постоянном и переменном токе. Метод основан на эффекте изменения удельного электрического сопротивления пород с изменением их напряженного состояния.

Характерно, что в зависимости от состава и структуры пород знак изменения сопротивления с ростом давления может быть различным. Для пород с высокой пористостью и большим содержанием влаги вследствие уменьшения сечения токопроводящих каналов и частичного закрытия пор сопротивление с ростом давления увеличивается. Для плотных изверженных и других пород с низким содержанием влаги, проводимость которых определяется в основном наличием токопроводящих компонентов, вследствие их уплотнения под действием сжимающих напряжений и уменьшения расстояний между проводящими компонентами сопротивление понижается.

Удельное электрическое сопротивление весьма чувствительно к изменению напряжений. Но в то же время оно еще чувствительнее к изменениям влажности пород. Наряду с влажностью существенную роль играет степень минерализации подземных вод. Вследствие отмеченных обстоятельств применение электрометрического метода, по-видимому, ограничивается условиями рудников, где полностью отсутствуют водопритоки и нет колебаний влажности пород.

Возможен и принципиально другой подход к оценке напряженного состояния пород на основе электрометрических измерений. Он базируется на измерении параметров естественного геоэлектрического поля в массиве пород и изменений этих параметров с изменением напряженного состояния.

Магнитный метод определения напряжений базируется на слабых ферромагнитных свойствах и положительной магнитострикции ряда горных пород. В таких породах с изменением напряжений меняется магнитная восприимчивость. Эти изменения и подлежат измерению для оценки изменений напряженного состояния.

Широкое применение для оценки напряженного состояния горных пород и прогнозирования опасных ситуаций, связанных с внезапными обрушениями пород, горными ударами, внезапными породными выбросами, получил сейсмоакустический (звукометрический) метод. Он основан на использовании естественных акустических (звуковых) импульсов, возникающих в массиве пород вследствие микроразрушений, обусловленных общим или локальным ростом напряжений. Регистрацию импульсов ведут с помощью специальных датчиков - геофонов, устанавливаемых в скважины и воспринимающих звуковые колебания, возникающие в окружающем массиве при микроразрушениях.

Звуковые импульсы, воспринимаемые геофоном, могут непосредственно прослушиваться наблюдателем, либо регистрироваться на ленте самописца. Возможна высокочастотная проводная, либо беспроводная дистанционная.

Глава 6 Физическое и математическое моделирование напряженного состояния прибортового массива карьера

При разработке открытым способом месторождений со сложно структурными особенностями горного массива оползни и обрушения откосов происходят в основном по естественным поверхностям ослаблений, подрезанных снизу горными работами. Известно, что если эти поверхности будут иметь не гладкую, а извилистую форму, то сдвиговые характеристики пород по ним будут увеличиваться, соответственно этому и углы откосов уступов и бортов карьеров могут быть приняты на таких участках более крутыми. Если качественная сторона решаемой задачи понятна, то в каких пределах количественно изменяются прочностные свойства пород и параметры горных работ в этих условиях изучено слабо.

В производственных условиях путем натурных наблюдений на карьерах эту задачу решить не представляется возможным. Поэтому для установления механизма деформирования карьерных откосов с пликативными нарушениями и определения степени влияния изменчивости поверхностей ослаблений на их предельное состояние нами было проведено моделирование на эквивалентных материалах.

6.1 Лабораторные методы моделирования

6.1.1 Геомеханическая модель массива горных пород

Массив горных пород является сложной физической средой и обладает рядом структурно-механических особенностей, которые и определяют его напряженное состояние.

Массив горных пород – это дискретная, неоднородная анизотропная среда с естественным (начальным) напряженным состоянием.

Факторы, влияющие на формирование в породном массиве структурно-механических особенностей условно можно разделить на геологические и инженерно-технические.

Геологические факторы:

- условия залегания;
- степень нарушенности и блочность массива;
- физико-механические свойства пород;
- гидрогеологические условия;
- начальной напряженное состояние.

Инженерно-технические факторы:

- форма и размеры выработки;
- расположение выработки в массиве относительно главных нормальных напряжений;
- способ проходки и поддержания выработки;

- место и время установки крепи относительно проходческого забоя;
- качество проходческих работ.

Решение задачи об оценке напряженного состояния массива аналитическими методам является очень сложной задачей. Учесть вышеназванные факторы в математической модели практически не возможно. Поэтому при решении задачи о начальном поле напряжений и изменении этого поля под воздействием выработок и других конструктивных элементов системы разработки рассматривают: идеализированный массив – математическое отражение реального – геомеханическую модель.

Геомеханическая модель с достаточной степенью точности отображает механические свойства реального массива горных пород в пространстве и во времени. На основе геомеханических моделей составляют расчетные схемы, позволяющие исследовать закономерности механических процессов деформирования в зависимости от конкретных условий ведения горных работ.

Два основных положения, которые необходимо учитывать при разработке геомеханической модели:

1. *При переходе от массива горных пород к его геомеханической модели ряд структурно-механических особенностей учитываются косвенно*. Например, массив горных пород с системной трещиноватостью естественного происхождения может быть представлен моделью не трещиноватой, анизотропной среды с эквивалентными характеристиками. В этом случае исследование влияния трещиноватости на механические процессы деформирования сводится к изучению влияния анизотропии деформационных свойств геомеханической модели.
2. *В конкретной горно-геологический и горнотехнической обстановке, степень проявления различных структурно-механических особенностей может быть такой, что их учет не внесет принципиальных качественных и количественных изменений в оценку изучаемых процессов.*

   В зависимости от характера связи между напряжениями и деформациями геомеханические модели сплошной среды подразделяют на линейно деформируемые и не линейно деформируемые. При моделировании силовых молей следует различать внешние силы и внутренние силы, действующие в моделируемом массиве горных пород. Внешние силы – приложение к объекту силы, вызываемой действием других сил и внутренние силы – это силы между отдельными физическими частицами вещества.

   Под воздействием внешних сил изменяется положение отдельных точек в теле, расстояние между ними, рассматриваемый объем тела деформируется. Внутренние силы под воздействием сил изменяются, это изменение внутренних сил под воздействием внешних сил и является основной задачей при изучении на моделях напряженного состояния массива горных пород.

   Определить напряженно-деформированное состояние какого-либо тела под влиянием приложенных внешних сил – это определить в каждой его точке значение приращения внутренних сил и перемещение его точек в пространстве.

6.1.2 Понятие о теории подобия

Изучение напряженного состояния породного массива наиболее доступно на физических моделях. Физическая модель массива горных пород представляет собой отображение реального массива на заменяющих его специальных материалах, которые позволял получать деформации под действием собственного веса. В основе физической модели лежит подобие свойств массива и протекающих в нем процессов, в частности смещений и деформаций. При установлении подобия процессов, протекающих в массиве важно установить определяющие критерии. При моделировании необходимо выполнять условия однозначности, которое определяется признаками:

1. Подобием геометрических свойств системы, в которой происходит изучаемый процесс;
2. Пропорциональностью физических постоянных, имеющих существенное значение в изучаемом вопросе;
3. Начальным состоянием системы;
4. Подобием на границах системы в течение периода исследования процесса.

Механически подобные системы – это такие системы, у которых все параметры характеризующие механические процессы, происходящие в одной системе, могут быть получены простым умножением соответствующих параметров другой системы на постоянные множители. При этом для параметров различной физической природы множители различны, но для однотипных параметров этот множитель имеет одно неизменное значение.

Моделирование геомеханических процессов на физической модели будет достоверным, если будут соблюдены условия геометрического, кинематического динамического подобия.

Геометрическое подобие – все размеры в натурном объекте изменены в определенное число раз по сравнению с размерами в модели:

$$\frac{L}{l} = \alpha_l , \qquad (6.1)$$

где α_l – коэффициент геометрического подобия; L– размеры в натурном объекте; l– размеры в модели.

Кинематическое подобие или подобие во времени, считается выполненным, если сходственные частицы в натуре и в модели, двигаясь по геометрически подобным траекториям, проходят геометрические подобные пути в промежутки времени, отличающиеся постоянным множителем:

$$\frac{T}{t} = \alpha_t , \tag{6.2}$$

где α_l – коэффициент кинематического подобия; T– время протекания процесса в натурном объекте; t– время протекания процесса в модели.

Динамическое подобие будет обеспечено при условии, если массы двух любых сходственных частиц, т.е. частиц соответственным образом расположенных в пространстве и времени, отличаются друг от друга постоянным множителем:

$$\frac{M}{m} = \alpha_m . \tag{6.3}$$

Учитывая, что масса – это произведение объемы частиц на её плотность, (6.3) перепишем в виде:

$$\alpha_m = \frac{M}{m} = \frac{\rho_n L^3}{\rho_m l^3} = \frac{\rho_n}{\rho_m}\alpha_l^3 \tag{6.4}$$

где α_l – коэффициент динамического подобия; M– масса частиц в натурном объекте; m– масса частиц в модели, L –линейные размеры натурного объекта, l – линейные размеры модели.

Условие динамического подобия с учетом (6.4) будет иметь вид:

$$\frac{\rho_n}{\rho_m} = \alpha_\rho . \tag{6.1}$$

После подстановок и не сложных преобразований получим первую теорему подобия:

$$\frac{P_n}{\rho_n L^2 V^2} = \frac{P_m}{\rho_m l^2 v^2} = Ne = idem , \tag{6.2}$$

где P_n и P_m – силы действующие в натуре и модели соответственно.

Первая теорема подобия называется критерием подобия или числом Ньютона.

Физические модели изготавливают из материалов заменяющих горную породу, но при этом его свойства подбираются согласно установленным критериями подобия. Физическое моделирование на моделях из эквивалентных материалов называется метод эквивалентных материалов. Этом метод основан на измерении смещений в модели как в сплошной, так и вокруг выработки.

Физическое моделирование на моделях из оптически активных материалов называется поляризационно-оптическим или методом фотоупругости. В этом методе измеряется разность хода между поляризованным и неполяризованными лучами и по полученной картине оценивают величину максимальных касательных напряжений.

6.1.3 Метод эквивалентных материалов

Подбор эквивалентных материалов для моделирования производился по методике. Определяющими физико-тектоническими параметрами при моделировании карьерных откосов являются сцепление C и угол внутреннего трения ρ, принимаемые из соотношений:

$$C_м = (e/L) \cdot (\gamma_м/\gamma_н) \cdot C_н , \qquad (6.7)$$

где $C_м$, $C_н$ – соответственно сцепление материалов модели и натуры, МПа; e/L- линейный масштаб модели; $\gamma_м / \gamma_н$ – соответственно плотность материалов модели и натуры, кг/м^3; $\varphi_м$, $\varphi_н$ – соответственно углы внутреннего трения модели и натуры, град.

Для создания предельного равновесия без помощи внешних нагрузок при сравнительно небольшой высоте моделей, согласно исследованиям ВНИМИ , использовалась тяжелая смесь, для которой характерны большая плотность и малая величина сцепления.

Подбор эквивалентных материалов, имитирующих слабый слой, производился в соответствии с рекомендациями, указанными в работе Ю.С. Козлова. В качестве слабого слоя служила лавсановая пленка, нарезанная полосками размерами 54х4 см. Полосы смазывались веретенным маслом и укладывались внахлест с перекрытием от 0,5 до 1,0 см, причем нижний слой укладывался от основания откоса к задней стенке модели, а верхний- в обратном порядке. Такой порядок укладки слабого слоя подсказан природными факторами оползнепроявления, когда происходят частичное смятие

антиклиналей и выполаживание синклиналей (сглаживание поверхностей ослабления).

Перед началом моделирования и в процессе его определялись физико-тектонические параметры K и ρ смеси и поверхностей ослаблений, в укатанном массиве с заложенными поверхностями ослаблений, в укатанном массиве с заложенными поверхностями ослабления призмой размерами 26х18х6 см.

Сдвиг призм при различных нормальных нагрузках по фиксированным направлениям производится с помощью фанерного каркаса, одеваемого на призму. Сдвигающие усилия определялись по динамометру. По значениям нормальных и касательных напряжений, возникающих при сдвиге призм, строились паспорта прочности (рисунок 6.1), и по ним определялись значения K, K' и ρ, ρ' соответственно для смеси и поверхности ослабления. Колебания значений вышеназванных показателей в процессе моделирования оказались незначительными, средние их значения составили: для смеси– $K=11{,}0\cdot10^{-4}$МПа;ρ=32°, для поверхности ослабления –$K'=2{,}4\cdot10^{-4}$МПа; ρ' =19°.

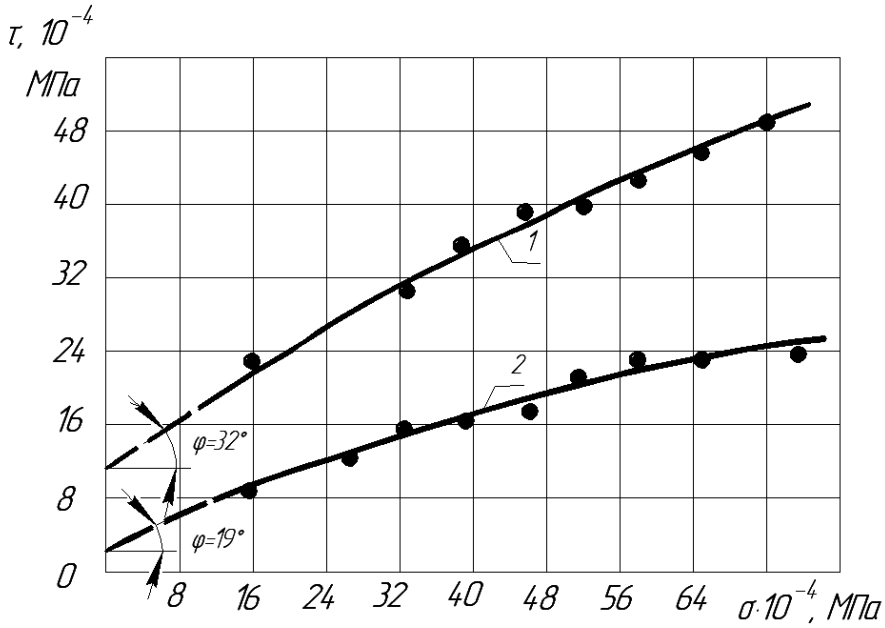


Рисунок 6. 1– Паспорт прочности: 1- моделируемая смесь; 2- контакт

Моделирование откосов производилось на стационарном разборном стенде. Сначала формировалась модель с углом откоса δ, равным среднему углу падения плоскости ослабления. На откосе и на боковых стенках опалубки отмечались границы антиклиналей и синклиналей, тем самым, определяя ширину складок a.

После этого на участках синклиналей складок производились, выемка смеси и ее укладка с последующей укаткой на участки антиклиналей по принципу равенства объемов. Амплитуда складок измерялась миллиметровой линейкой. На оформленную таким образом поверхность ослабления.

Дальнейшее оформление модели осуществлялось в обычной последовательности – послойно, с укаткой слоев. Общий вид оформленной модели показан на рисунке 6.2.

Величина смещения массива модели при подработках определялась оптическими тензометрами, разработанными В.Н. Земисовым. Для этого в боковой стенке модели устанавливались датчики, представляющие собой миниатюрные лампочки, припаянные к металлическим стержням длиной 20см и диаметром 1,5 мм. Точность определения смещений точек модели составляет 0,02-0,03 мм.

Против каждой лампочки на раме стенда устанавливались линзы, проектирующие изображения нитей лампочек-реперов производилась к задней торцевой стенке и нижней плоскости стенда. Питание лампочек осуществлялось от осветительной сети через трансформатор.

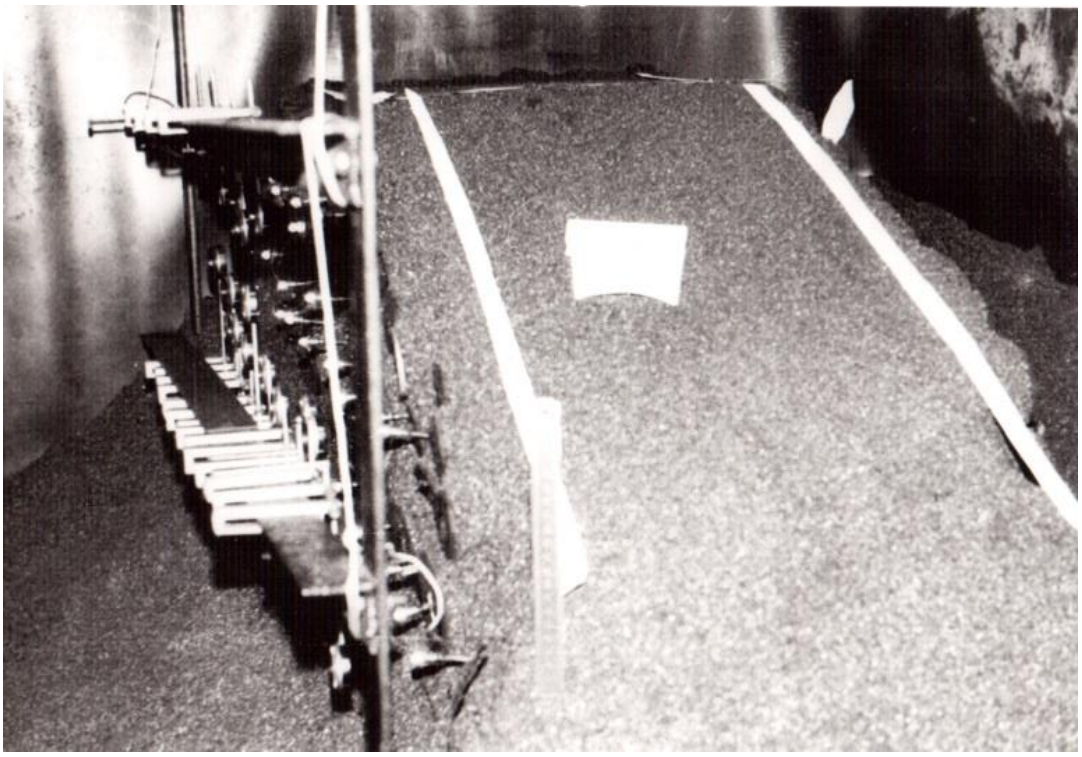


Рисунок 6.2– Общий вид оформленной модели

После установки реперов производился замер параметров модели. Оптические тензометры устанавливались таким образом, чтобы изображение

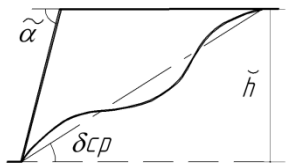
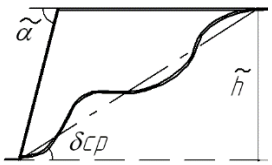
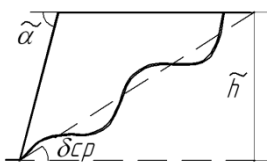
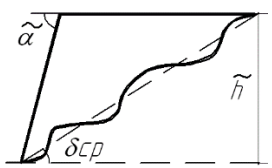
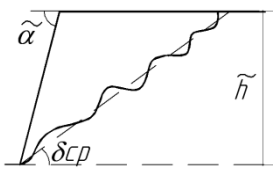
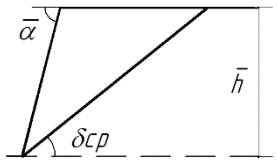
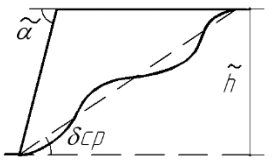
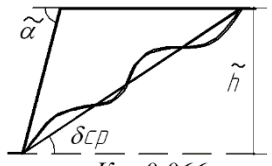
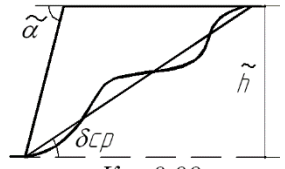
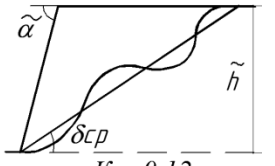
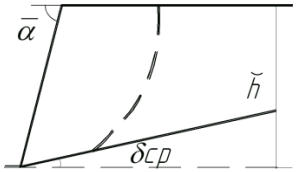
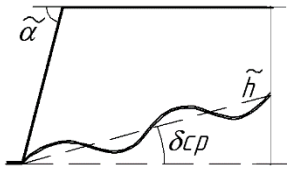
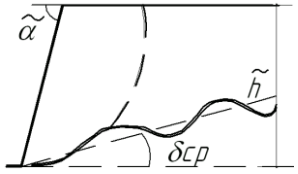
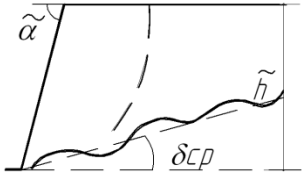
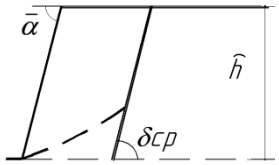
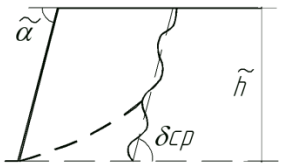
лампочек на экране выстраивались в ряды той же последовательности, как были установлены репера на модели. На экране отмечалось начальное положение реперов.

Увеличение угла откоса модели с целью ее обрушения под действием гравитационных сил осуществлялось ступенями на 1-3°, при этом подработка модели велась сверху вниз слоями с возрастанием их мощности к основанию откоса. После каждой ступени подработки модели на экране фиксировалось смещение реперов, проводились замеры параметров и наблюдения за характером деформирования модели. После обрушения модели документировались поверхности скольжения и параметры обрушенной массы модели, а также замерялись конечные положения лампочек-реперов.

Результаты моделирования обрабатывались в следующей последовательности. На листах миллиметровки экрана графически определялись координаты положения реперов, зафиксированные после каждой подработки модели. Данные заносились в журнал измерения смещений реперов, а затем известным законам оптики производился пересчет для определения фактических смещений реперов. Профили откосов вычерчивались на миллиметровой бумаге в масштабе 1:4 по обеим стенкам модели, на них наносились фактические поверхности скольжения и параметры обрушенных откосов. В соответствии с выбранным масштабом отстраивались векторы смещения реперов. Векторы смещения дают представление о характере деформирования моделей откосов карьеров при увеличении их углов посредством подработки. По приведенной методике моделирования было отработано 82 модели откосов, из них 5- с изотропным массивом, 11- с плоскими поверхностями ослаблений и 66 – с пликативными нарушениями. Последние разделены на три группы (таблица 6.1).

Установлено, что механизм деформирования приоткосного массива является сложным процессом и зависит от расположения поверхностей ослабления. В схемах группы 1 в начальный период в призме возникают напряжения, которые при своем предельном состоянии разрушают ее на отдельные блоки, выделяя призмы упора и активного давления.

Таблица 6.1 – Схемы моделирования откосов с пликативными нарушениями

№	Схемы моделей					Параметры моделей
1	1  i=3	2  i=4	3  i=5	4  i=6	5  i=10	При $\tilde{h}$=40 см, $\delta_{ср}$=20º, $К_К$=0,066 изменяется i
	6 	7  Кк=0,03	8  Кк=0,066	9  Кк=0,09	10  Кк=0,12	При $\tilde{h}$=40 см, $\delta_{ср}$=20º, i =4 изменяется $К_К$
2	1 	2  i=4, Кк=0,09	3  i=4, Кк=0,16	4  i=6, Кк=0,66		При $\tilde{h}$=50 см, $\delta_{ср}$=11ºизменяются i и $К_К$
3	1 	2  i=6, Кк=0,09	3  i=6, Кк=0,09			При $\tilde{h}$=55 см, $\delta_{ср}$=50ºизменяются i и $К_К$

В схемах группы 2 при деформировании откосов изменяется направление векторов смещений, образуются заколы и трещины на оползневом теле. Здесь четко прослеживается разделение оползающего массива на две части – призму активного давления и призму упора (рисунке 6.3), причем последняя вследствие влияния складчатости структуры пликативной нарушенности разделяется в свою очередь на отдельные блоки активного давления и пассивного упора.

Призма активного давления реализуется по криволинейной поверхности, весьма близкой к круглоцилиндрической с явно выраженной в верхней своей части вертикальной стенкой отрыва. Эта поверхность, как правило, выходит на падающее в сторону откоса крыло антиклинали и имеет зону выхода с центром, приходящимся на середину указанного крыла складки. За криволинейной поверхностью, непосредственно вблизи ее, образуется зона деформаций, имеющая ширину у поверхности откоса, равную 0,2÷0,8 r (r – ширина призмы обрушения). С глубиной ширина зоны ослабления уменьшается и приближается к криволинейной поверхности обрушения в области ее соприкосновения с криволинейной поверхностью ослабления.

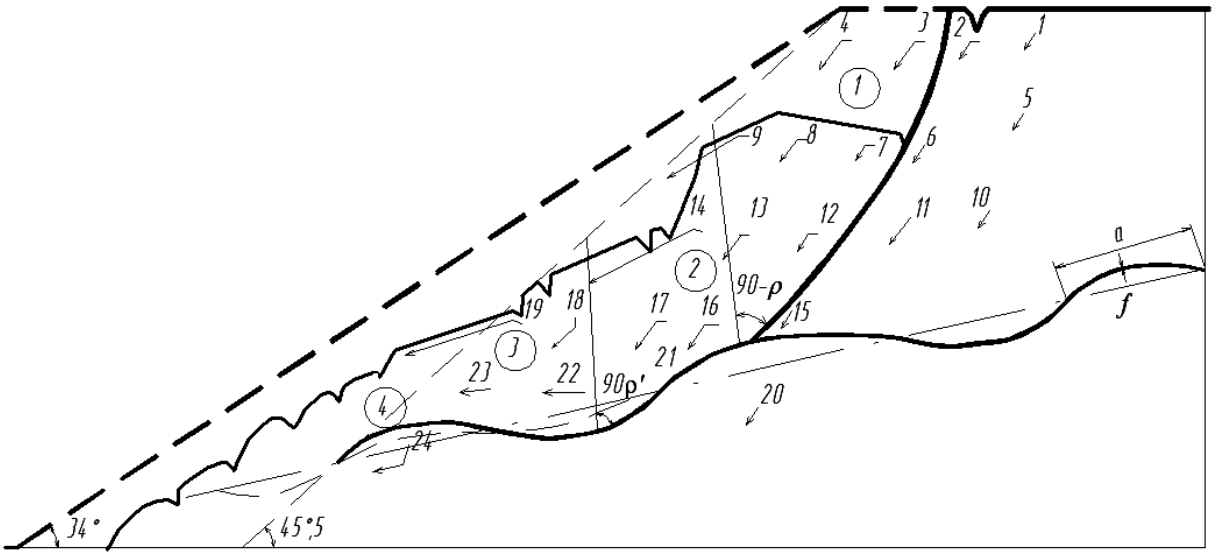


Рисунок 6.3– Механизм деформирования откоса с пологопадающей пликативной нарушенностью

В процессе обрушения массива призма активного давления и призма упора разделяются поверхностью скольжения второго семейства, направленной под углом 90° - φ к круглоцилиндрической.

Угол излома криволинейной поверхности скольжения относительно касательной к пликативной нарушенности близок к углу, определяемому по формуле:

$$\theta = 45° \pm 0{,}5(\varphi - \varphi') - 0{,}5\arcsin\{\sin\varphi'/\sin\varphi[1-(K\cdot ctg\varphi - K'\cdot ctg\varphi') / (C\cdot(ctg\varphi - tg\mu) +$$

$$+ 0{,}5\gamma\cdot H' \cdot (1+tg^2\mu))]\},$$

где H' – высота откоса над точкой входа криволинейной поверхности скольжения в складчатую: $\mu=45°-0{,}5\varphi$.

Разделение призмы упора на блоки происходит по поверхностям скольжения второго семейства, направленными под углом $90-\rho'$ или углами, весьма близкими к нему, к поверхности, падающей от вершины антиклинали - для блоков активного давления, а для блоков упора – к поверхности, восстающей от ядра синклинали к вершине последующей антиклинали. Таким образом, в процессе деформации откосов блоки активного давления образуются на крутых участках поверхностей ослабления, а блоки пассивного упора – на пологих (рисунке 6.3).

Изменение направлений векторов смещений точек массива свидетельствует о том, что в первоначальный момент оползневого процесса при опускании призмы активного давления первый блок призмы упора, являясь по природе своей активным, выполняет пассивную роль, совместно с призмой упора, т.е. играет роль «буфера». При дальнейшем развитии деформаций в массиве вследствие влияния складчатой структуры поверхности ослабления происходит перераспределение напряжений, и буферный блок становится активным; опускаясь, он сдвигает последующий блок пассивного упора призмы упора. Далее, в соответствии с формой поверхности ослабления, участвующие в процессе сдвижения блоки чередуются.

Съемка поверхностей ослабления после обрушения моделей, как и предполагалось ранее, свидетельствует об их деформировании. Антиклинальные складки частично снимаются, а синклинальные – выполаживаются.

Вышеприведенное свидетельствует о том, что скольжение оползневого тела происходит не по чистому контакту, а в зоне сдвижение (смятия), с

участием массива пород. Чем выше коэффициент кривизны складок $K_к$, тем сильнее деформируются складки и тем самым значительнее участие массива в процессе сдвижения. Результаты обратных расчетов обрушенных моделей подтверждают этот факт. Прочностные свойства пликативных поверхностей ослабления изменятся за счет вовлечения в процесс сдвижения массива пород от $\rho'=19°$ и $K'=2{,}4\cdot10^{-4}МПа$ при $K_к=0$ до$\rho'=23°$ и $K'=4\cdot10^{-4}МПа$ при $K_к=0{,}20$.

Статистическая обработка на ЭВМ данных обратных расчетов обрушенных моделей позволила установить зависимости показателей прочностных свойств по пликативным поверхностям ослабления от коэффициента кривизны складок $K_к$:

$$\rho'_{пр} = \rho' + 0{,}35\ arctgK_k \pm 0{,}30;$$
$$K'_{пр} = K' + 8{,}0K_k \pm 0{,}04, \qquad (6.8)$$

где $\rho'_{пр}$ $K'_{пр}$ – соответственно приведенные значения угла внутреннего трения и сцепления по пликативной поверхности ослабления; ρ', K' - соответственно значения угла внутреннего трения и сцепления по плоской поверхности ослабления.

Моделирование откосов по схемам группы 3 (см. таблицу 6.1.) показывает, что напряженное состояние откосов изменяется в момент их обрушения. Из наблюдений за смещениями точек моделей видно, что весь массив модели при наличии плоской поверхности ослабления смещение начинается с нижней части откоса. Кроме того, при обрушении откосов с крутыми волнообразными поверхностями ослаблений на их поверхности появляются сначала трещины, а затем выпуклости и вогнутости, характеризующие нарушение массива. С увеличением кривизны поверхности ослабления и количества изгибов углы наклона устойчивых откосов имеют тенденции возрастания.

6.1.4 Поляризационно-оптический метод моделирования напряженного состояния прибортовго массива

При воздействии нагрузки многие прозрачные материалы, получившие название оптически чувствительных, приобретают свойства, присущие двулучепреломляющим оптически анизотропным кристаллам (эффект Брюстера). Однако в отличие от кристаллов, такие материалы при прекращении механического воздействия вновь становятся оптически изотропными. Поэтому обнаруженный факт был назван явлением временного двойного лучепреломления. Именно это явление лежит в основе поляризационно-

оптического метода исследования напряжений. В тех случаях, когда речь идет об упругих моделях, может быть применен термин «метод фотоупругости».

В основе поляризационно-оптического метода лежат такие оптические явления, как поляризация света и эффект двойного лучепреломления. Обычно в поляризационных приборах для получения плоскополяризованного света используют поляроиды из исландского шпата или кальцита, пропускающих световые колебания только в одной плоскости. Источником поляризованного света являются также лазеры.

Второе явление, лежащее в основе поляризационно-оптического метода - искусственное двойное лучепреломление под воздействием внешних нагрузок. Этим свойством обладают все прозрачные материалы. Если прозрачный материал не нагружен, он изотропен к световой волне и пропускает ее в любом направлении.

Простейший полярископ состоит из источника света 1, поляризатора 2, прозрачной модели 3 и второго поляризатора (анализатора) 4.Свет от источника 1, проходя через поляризатор 2, становится плоскополяризованным (обычно в вертикальной плоскости), проходит через прозрачную модель 3. Если модель не нагружена, плоскость поляризации света не нарушается, а если нагружена - то из-за явления двойного лучепреломления световая волна расщепляется на две с взаимно перпендикулярными направлениями (направления главных напряжений), которые распространяются с различными скоростями.

Если вдоль одного и того же направления распространяются две монохроматические волны, поляризованные в двух взаимно перпендикулярных плоскостях, то в результате их сложения в общем случае возникает ***эллиптически поляризованная волна.***

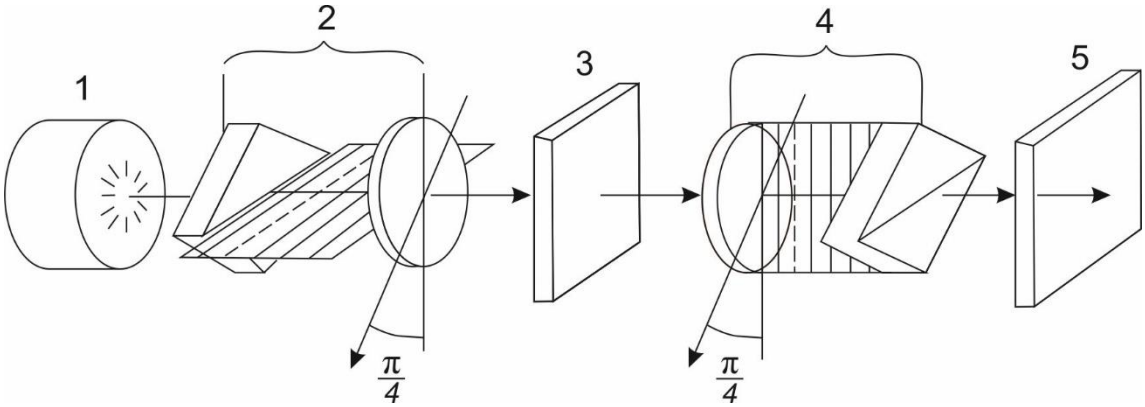


Рисунок 6.4 - Схема полярископа

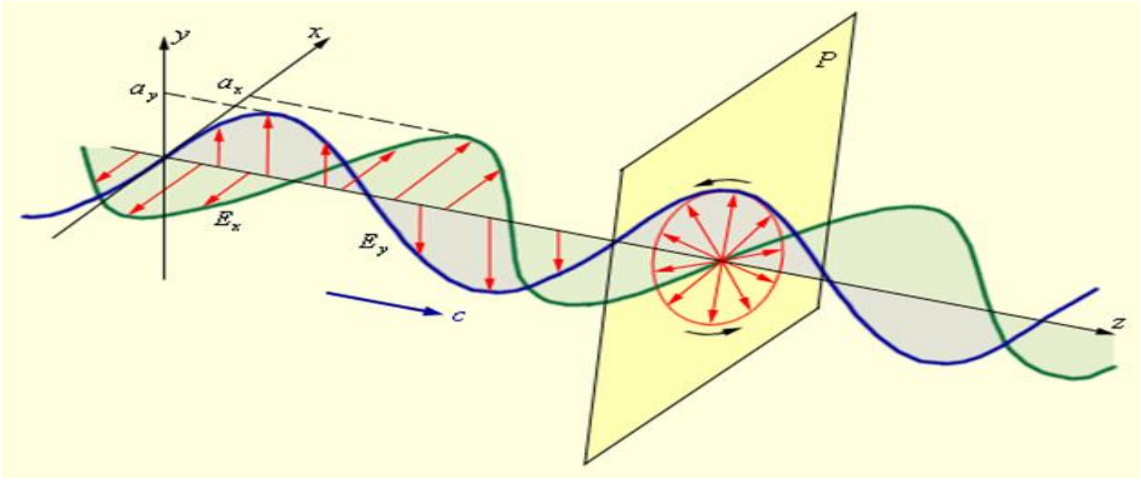


Рисунок 6.5 - Схема распространения волн в полярископе

Если две световые волны E_1 и E_2 распространяются с различными скоростями, то после прохождения через модель Р они имеют разность хода δ, которому соответствует разность фаз этих волн:

$$\delta = \frac{2\pi}{\lambda} t(n_1 - n_2), \tag{6.9}$$

где λ - длина световой волны; t - толщина модели; n1, n2 - коэффициенты преломления света вдоль главных осей (направлений главных напряжений).

Существует связь между оптическими и механическими характеристиками прозрачного материала модели (то есть между скоростями распространения света в теле и напряжениями в нем) в виде уравнений Неймана:

$$\begin{aligned} V_1 &= V_0 + C_1\sigma_1 + C_2(\sigma_1 + \sigma_2), \\ V_2 &= V_0 + C_1\sigma_2 + C_2(\sigma_1 + \sigma_2), \end{aligned} \tag{6.10}$$

где V_1, V_2 - скорость света после деформации тела по направлениям главных напряжений соответственно; V_0 - скорость распространения света в теле в недеформированном состоянии; C_1, C_2 -оптико-механические константы материала и длины волны света соответственно.

Из уравнений Неймана(6.10) с учетом зависимости для определения разности хода можно вывести основной закон фотоупругости, в котором линейно связаны оптический эффект и разность главных напряжений:

$$\delta = C_\sigma t(\sigma_1 - \sigma_2), \tag{6.11}$$

где $C\sigma$ - коэффициент оптической чувствительности по напряжениям; σ_1, σ_2 - главные напряжения в плоскости модели.

На рисунке 6.6 показано распределение линий равных значений максимальных касательных напряжений (изохром) в бортах карьера

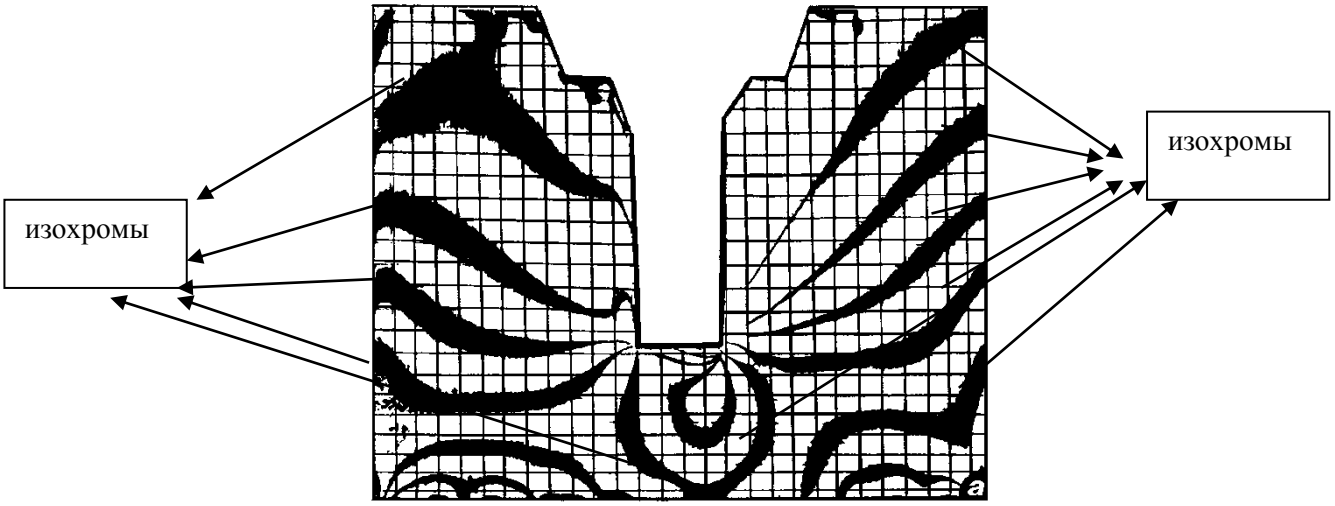


Рисунок 6.6 - Распределение максимальных касательных напряжений в прибортовом массиве

6.2 Математическое моделирование

Математические методы моделирования основаны на представлении массива горных пород как сплошной среды. В основе механики сплошной среды положено представление о материальном теле непрерывно заполняющий объем геометрического пространства. Это материальное тело наделено определенными физическими свойствами, отражающими статические закономерности для реальных физических тел.

Напряжения при математическом моделировании задают как производную на площади поперечного сечения:

$$\sigma = \frac{dP}{dS.} \tag{6.12}$$

Деформации в данной точке характеризуют относительное изменение расстояния между точками тела в результате приложенных внешних сил, и определяется как производная перемещения точек на расстояние между ними:

$$\varepsilon = \frac{dU}{dL.} \tag{6.13}$$

Напряжения и деформации являются функциями координат ориентации бесконечно малого элемента длины деформируемого тела в пространстве и времени. Деформированное состояние выделенного объема тела может быть охарактеризовано девятью компонентами:

$$T_d = \begin{vmatrix} \varepsilon_{xx} & \frac{1}{2}\gamma_{xy} & \frac{1}{2}\gamma_{xz} \\ \frac{1}{2}\gamma_{yx} & \varepsilon_{yy} & \frac{1}{2}\gamma_{yz} \\ \frac{1}{2}\gamma_{zx} & \frac{1}{2}\gamma_{zy} & \gamma_{zz} \end{vmatrix}. \tag{6.14}$$

Деформации сдвига, также как и касательные напряжения, симметричны:

$$\begin{aligned} \gamma_{xy} &= \gamma_{yx}; \\ \gamma_{yz} &= \gamma_{zy}; \\ \gamma_{zx} &= \gamma_{xz}. \end{aligned} \tag{6.15}$$

Компоненты смещения вдоль осей X,У,Z обозначаются u, v и w.

Деформации в теле под действием нагрузок имеют вид:

$$\begin{aligned} \varepsilon_{xx} &= \frac{du}{dx}; \gamma_{xy} = \frac{du}{dy} + \frac{du}{dx}; \\ \varepsilon_{yy} &= \frac{dv}{dy}; \gamma_{yz} = \frac{dv}{dz} + \frac{dw}{dy}; \\ \varepsilon_{zz} &= \frac{dw}{dz}; \gamma_{zx} = \frac{dw}{dx} + \frac{du}{dz}. \end{aligned} \tag{6.16}$$

Обобщенный закон упругости:

$$\begin{aligned} \varepsilon_x &= \frac{1}{E}\left[\sigma_x - \nu(\sigma_y + \sigma_z)\right]; \gamma_{xy} = \frac{1}{G}\tau_{xy}; \\ \varepsilon_y &= \frac{1}{E}\left[\sigma_y - \nu(\sigma_z + \sigma_x)\right]; \gamma_{yx} = \frac{1}{G}\tau_{yx}; \\ \sigma_z &= \frac{1}{E}\left[\sigma_z - \nu(\sigma_x + \sigma_y)\right]; \gamma_{zx} = \frac{1}{G}\tau_{zx}, \end{aligned} \tag{6.17}$$

E – модуль упругости; *G*- модуль сдвига; *v* – коэффициент Пуассона.

Математическая модель прибортового массива должна наиболее полно отражать его поведение, структуру и свойства. Под адекватностью математической модели изучаемому объекту понимается правильное качественное и количественное описание объекта по выбранным характеристикам. С этой точки зрения сложные модели предпочтительнее простых, ибо учитывают большое число факторов, которые могут, так или иначе, повлиять на изучаемые характеристики. Однако это может привести к громоздким системам уравнений, не поддающимся решению. Следовательно, адекватность должна сочетаться с достаточной простотой модели по отношению к выбранной системе ее характеристик, что повысит универсальность её применения.

Прибортовой горный массив можно представить как систему, состоящую из элементов одного иерархического уровня – инженерно-геологических тел, которые отделяются друг от друга установленными или заданными поверхностями раздела. К числу таких поверхностей относятся: земная поверхность, подошва и кровля каждого инженерно-геологического элемента, уровни грунтовых вод, поверхность и подошва оползня, пликативные и дизъюнктивные нарушения, подземные пустоты и другие поверхности раздела.

Моделирование инженерно-геологических границ сводится к тому, чтобы по имеющимся сведениям о положении границы в исходной дискретной нерегулярной модели получить непрерывную интерполяционную модель в виде аналитической зависимости, которая позволит определить граничную поверхность в нужной точке, заданной координатами. Геометрическая модель инженерно-геологического пространства образуется совокупностью непрерывных моделей всех искомых границ, которыми может быть описан прибортовой массив.

Практическая реализация большинства методов определения поверхностей геологических объектов. связана с решением системы линейных уравнений с плотно заполненными матрицами по каждой поверхности, требующего большого объема вычислений. Для получения непрерывной модели следует иметь регулярную или полурегулярную сеть исходных дискретных точек. Эти методы не терпят разрыва сплошности поверхности. При исследовании горного массива можно встретиться с периодическим выклиниванием геологических тел, появлением среди них цепи линзовидных форм залегания и других тел со сложной конфигурацией. В таких случаях сложную область определения разбивают на отдельные части, создавая так называемые кусочно-непрерывные модели. Поэтому для описания границ инженерно-геологических элементов не рекомендуется применять единые алгебраические полиномы высоких порядков. Опыт моделирования свидетельствует, что большинство элементарных моделей различных геолого-структурных параметров с успехом может быть представлено алгебраическими полиномами 1 и 2 порядка, реже 3-го и 4-го порядков. Математическое описание с помощью аналитических формул, действующих на различных интервалах или на различных участках изучаемой области, оказывается весьма удобным и для гладких поверхностей. В таких случаях нашли применение сплайны и кусочно-полиномиальные функции.

Была поставлена и решена задача по разработке алгоритма непрерывной и адекватной математической модели инженерно-геологической границы. Алгоритм основан на использовании алгебраических интерполяционных многочленов малой степени. Он обеспечивает возможность математического описания практически любой геологической ситуации, контуров борта карьера, поверхности скольжения, уровня грунтовых вод, тектонических нарушений, отраженных на геологическом разрезе в крест простирания борта карьера. Для математического описания инженерно-геологических и горнотехнических контуров можно использовать интерполяционный многочлен типа:

$$\mathrm{F(x)} = y_0 \frac{(x-x_1)(x-x_2)\ldots(x-x_n)}{(x_0-x_1)(x_0-x_2)\ldots(x_0-x_n)} + y_1 \frac{(x-x_0)(x-x_2)\ldots(x-x_n)}{(x_1-x_0)(x_1-x_2)\ldots(x_1-x_n)} + \cdots + y_n \frac{(x-x_0)(x-x_1)\ldots(x-x_{n-1})}{(x_n-x_0)(x_n-x_1)\ldots(x_n-x_{x-1})}, \quad (6.18)$$

где $x,\ y$ – координаты расчетной точки;

$x_i, y_i;\ x_j, y_j$ - координаты узлов интерполяции.

Выбор класса интерполяции производится исследователем в зависимости от формы описываемой поверхности. В связи с этим, нами выбрана кусочно-непрерывная интерполяция алгебраическими полиномами малой степени. Использование их позволяет обеспечить адекватность непрерывной интерполяционной математической модели, первичной дискретной нерегулярной модели, полученной с геологического разреза.

Положение любой точки контура в первичной модели можно определить в прямоугольной системе координат X, Y, где X и Y координаты узловой точки, указывающие ее положение. Установление функциональной связи между узловыми точками позволяет восстановить моделируемый контур. По дискретной нерегулярной модели контура получают, таким образом, непрерывную интерполяционную математическую модель в виде аналитической зависимости, которая позволяет определить граничный контур в любой расчетной точке, заданной координатами X и Y. Для избежания ошибок на границе разреза вследствие экстраполяции, необходимо в дискретную первичную модель вставить граничные узловые точки. Одним из наиболее существенных факторов, влияющих на результаты моделирования, является неравномерность расположения узловых точек. Расстояния между точками наблюдения должны быть согласованы со сложностью изменчивости признака. Следовательно, моделируемый контакт должен задаваться координатами своего начала, конца, всех точек перегиба и излома, например, точек выклинивания или вырождения инженерно-геологического тела.

Кроме значений координат X и Y каждая узловая точка дискретной модели несет в себе информацию о степени интерполяционного полинома для определения расчетных точек в окрестности данной узловой точки. Степень

полинома может быть явно указана согласно форме контура в районе узловой точки. Для определения значения интерполяционной функции в определенной расчетной точке производится определение интервала между узловыми точками путем перебора. Координаты ближайших узловых точек позволяют определить коэффициенты полинома, а степень интерполяционного полинома для каждой расчетной точки определяется информацией от ближайшей узловой точки с меньшей абсциссой. Это позволяет описывать не только гладкие поверхности, но и более изменчивые поверхности. Достоинства данного алгоритма определяются использованием интерполяционного многочлена Лагранжа, что позволяет использовать для интерполяции нерегулярную дискретную первичную модель. Данный алгоритм адаптирован в современный программный комплекс с помощью пакета Delphi на базе объектно-ориентированных технологий.

Для контроля правильности интерполяции на печать выводится графическая и табличная информация, что позволяет производить оперативное сравнение с исходной информацией.

6.2.1 Метод конечных элементов

Численные методы позволяют построить модель напряженно-деформированного состояния горного массива и выбрать рациональный порядок ведения работ на стадии долгосрочного и перспективного планирования. Адекватность разрабатываемой модели может быть определена сравнением полученных при моделировании результатов и натурных экспериментальных данных. При этом, одним из основных критериев адекватности является учет параметров неоднородности и трещиноватости прибортового массива.

При решении задач горного дела важным преимуществом этого метода является также возможность учета сложной геометрии склона и борта карьера, структурных неоднородностей массива горных пород. Метод позволяет осуществить постановку серии последовательных расчетов с целью моделирования истории нагружения горного массива и процесса горнопроходческих работ. Еще одним важным фактором является достижимость требуемой точности в определении деформаций и напряжений в рассматриваемых точках расчетной области. Разбиение или дискретизации изучаемой области на элементы является составляющей частью решения задачи, которая заменяет собой аппарат интегрально- дифференциального исчисления и представляется возможным решение методом конечных элементов сложных дифференциальных уравнений. Фактически МКЭ позволяет решать сложные дифференциальные уравнения, заменяя их системой линейных алгебраических уравнений, что облегчает нахождение решения и

позволяет решать задачи практически любой сложности. Применение метода конечных элементов для решения практических задач предполагает создание модели объекта, его дискретизацию (разбивку, или расчленение на элементы), решение больших систем уравнений, подготовку исходных данных, интерпретацию результатов моделирования и их наглядное представление.

Разбиение области на элементы - важный этап в МКЭ. От качества разбиения во многом зависит точность получаемых результатов. Например, разбиение на двухмерные элементы, близкие по форме к равносторонним треугольникам, обеспечивает лучшие результаты по сравнению с разбиением на вытянутые по форме треугольные элементы. Возможность легко варьировать размерами элементов - важное свойство МКЭ.

Разбиение области на элементы начинают от ее внешней границы с целью наиболее точной аппроксимации формы границы, затем производится разбиение внутренних областей. Часто разбиение области на элементы производят в несколько этапов. Сначала область разбивают на достаточно крупные подобласти (под конструкции), границы между которыми проходят там, где изменяются свойства материала, геометрия, приложенная нагрузка и пр. Затем каждая подобласть взбивается на элементы. Резкого изменения размеров конечных элементов на границах подобластей стараются избегать. На рис. 6.7. приведен пример разбиения двухмерной области произвольной формы на треугольные конечные элементы с криволинейными границами.

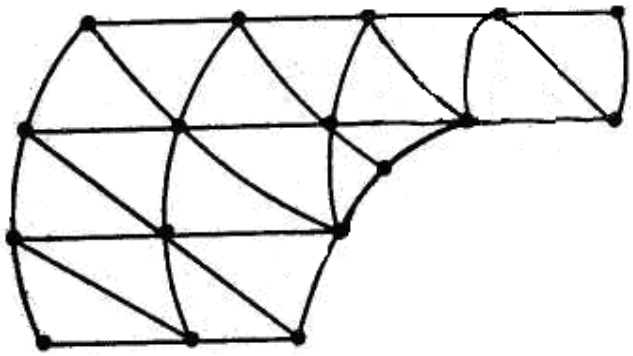


Рисунок 6.7 - Разбиение двухмерной области произвольной формы на треугольные конечные элементы с криволинейными границами

Нумерация узлов элементов (глобальная нумерация узлов) - следующая процедура этапа выделения конечных элементов. Порядок нумерации имеет в данном случае существенное значение, так как влияет на эффективность последующих вычислений.

Распределенная нагрузка, действующая на одну из граней элемента должна быть заменена сосредоточенными узловыми силами F. Объемные силы P, вызываемые весом горной породы также приводятся к сосредоточенным силам а узловых точках и составляют 1/3 величины объемной силы P (рис.6.8)

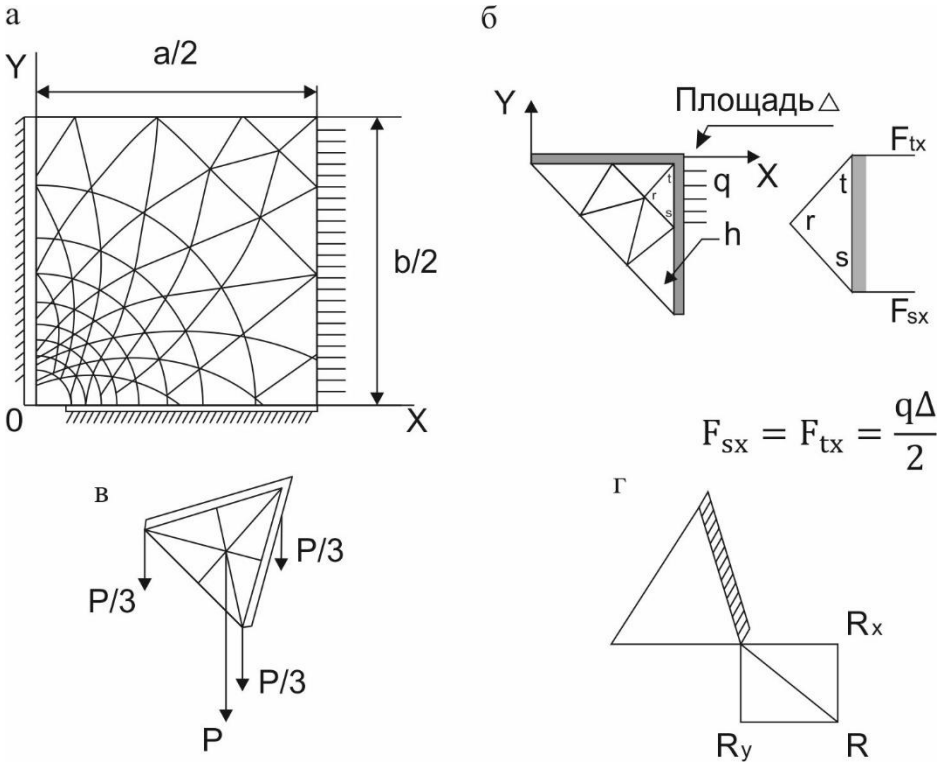


Рисунок 6.8 - Пример приведения нагрузок к статистически эквивалентной системе узловых сил:

а - распределенная нагрузка, действующая на исследуемую область; б - замена распределенной нагрузки q условными силами F_{ix}и F_{sx}; в – разложение силы тяжести P на систему узловых сил; г – разложение узловой силы R на составляющие R_x и R_y.

Для оценки напряженно-деформированного состояния прибортового массива необходимо знание таких физико-механических свойств горных пород как: предел прочности на сжатие, предел прочности на растяжение, модуль деформации, угол внутреннего трения, коэффициент сцепления, объемный вес пород.

На рис.6.9 показана последовательность применения метода конечных элементов для оценки напряженного состояния прибортового массива.

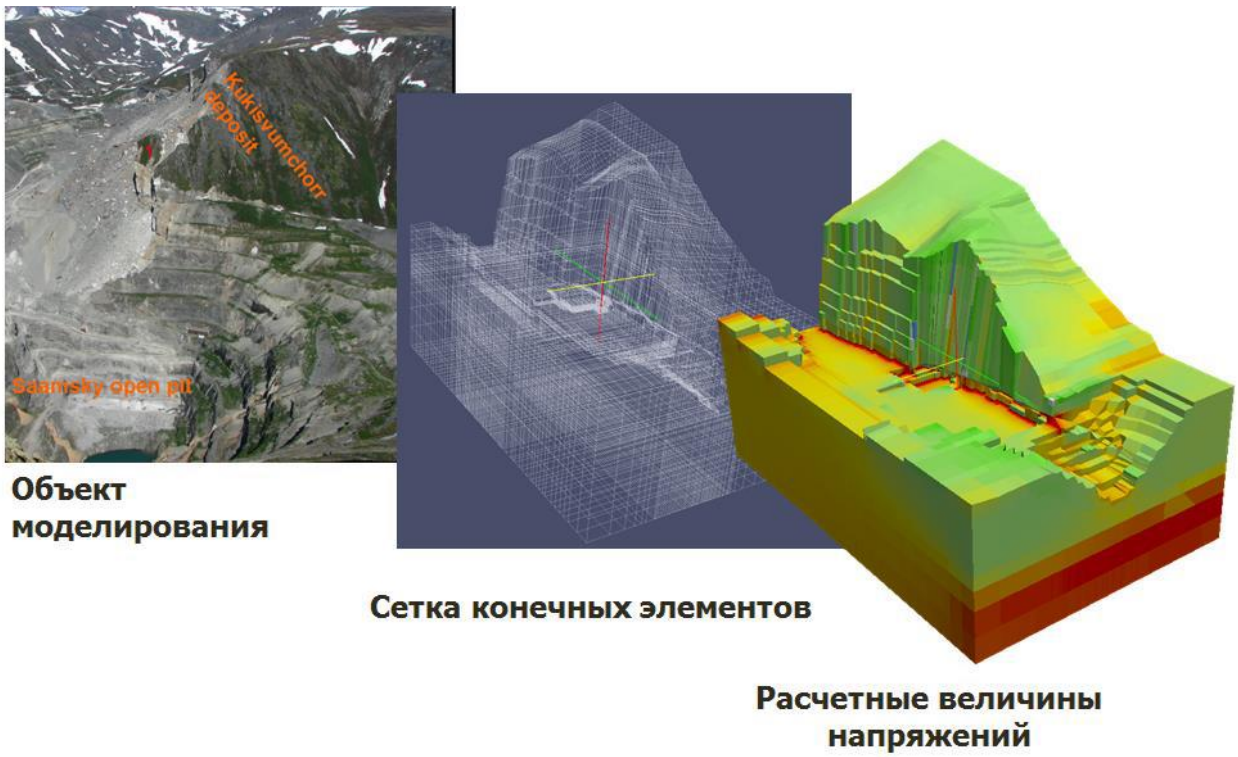


Рисунок 6.9-Применение метода конечных элементов для расчета напряжений в прибортовом массиве

Глава 7 Методы оценки устойчивости бортов карьеров и откосов уступов

В настоящее время разработаны большое количество разнообразных методов оценки устойчивости бортов карьеров и отдельных уступов. Все эти методы можно разделить на две группы:

- вычислительные методы, основанные на результатах математического расчета;
- натурные методы, основанные на данных постоянного мониторинга смещений горного массива и отдельных структур.
-

7.1 Вычислительные методы оценки устойчивости бортов карьера

Вычислительные методы оценки устойчивости бортов карьера можно разделить на: 1-аналитические методы, основанные на теории предельного равновесия; 2- численные методы, основанные на моделировании напряженно-деформированного состояния горного массива.

На основе теории предельного равновесия в прибортовом массива можно определить вероятную поверхность скольжения, по которой произойдет смещение неустойчивого объема пород и оценить запас устойчивости прибортового массива вдоль этой поверхности скольжения.

Если прибортовой массив имеет слоистое строение или поверхности ослабления в виде трещин, тектонических нарушений, поверхности контакта литологических разностей пород, эти поверхности являются фиксированными поверхностями скольжений. Пользуясь теорией предельного равновесия, оценивают устойчивости прибортового массива по этим поверхностям (Рис.7.1).

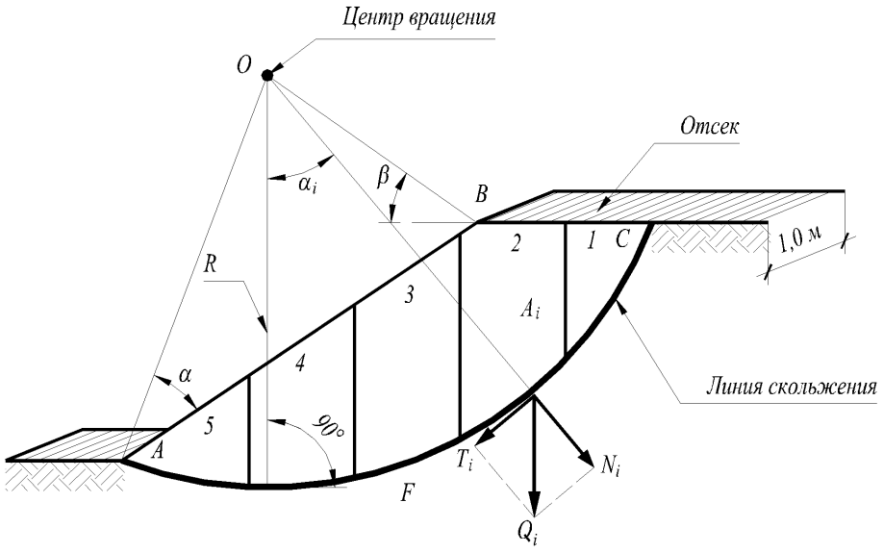


Рисунок 7. 1- Силы, действующие на прибортовой массив

В настоящее время применяют программное реализованные на компьютере аналитические методы.

Простой метод блоков, применяется для однородных склонов простой конфигурации. Запас устойчивости определяется по формуле:

$$K = \frac{\sum CL + \sum Ntg\varphi}{Wsin\alpha}, \quad (7.1)$$

C-сцепление пород, МПа; *L*-длина расчетного блока, м; *N*-нормальная составляющая силы тяжести, МПа; *W*-вес расчетного блока, кг; φ-угол внутреннего трения, град; α-угол наклона расчетного блока к поверхности скольжения.

Недостаток этого метода заключается в том, не учитываются взаимодействие сил между блоками и внешней нагрузки.

Расчет и оценка устойчивости бортов карьера и уступов *по методу Бишопа* позволяет учитывать силы взаимодействия между блоками.

$$F = \frac{\sum\left[(c'b + W(1 - r_u)tg\varphi')\frac{sec\alpha}{1 + \frac{tg\varphi' tg\alpha}{F}}\right]}{\sum Wsin\alpha}, \quad (7.2)$$

где *C* – сцепление пород;

L– длина блока;

N – вертикальная нагрузка;

W – вес блока;

φ – угол внутреннего трения;

α – наклон блока к поверхности скольжения.

Значение коэффициента устойчивости присутствует в обоих частях уравнения.

7.2 Натурные методы расчета устойчивости бортов нагорных карьеров

Месторождения, разрабатываемые нагорными карьерами, характеризуются сложными горно-геологическими, тектоническими, гидрогеологическими условиями. Вмещающие породы представлены, как правило, интрузивными и эффузивными породами, подвергнутыми гидротермально-метасоматическим изменениям. Породы сильно трещиноватые, причем интенсивность трещиноватости возрастает на контактах разновидностей пород и тектонических нарушений. Характерной особенностью породных массивов нагорных карьеров является то, что сами породы могут быть достаточно прочными, но массив, ослабленный из-за интенсивной трещиноватости, обусловленной тектоникой и выветриванием, включая мороз.

На устойчивость бортов карьеров существенное влияние оказывают такие природные факторы как инженерно-геологические; гидрогеологические; физико-географические; свойства пород и напряженное состояние массива.

К наиболее важным инженерно-геологическим факторам относятся:

1. *Структурно-тектоническое строение массива*. Условия залегания рудных тел и вмещающих пород, наличие в массиве тектонических нарушений, трещин большого протяжения. От пространственной ориентировки крупных поверхностей ослабления в массиве горных пород (слоистости, сланцеватости, разрывных тектонических нарушений) в значительной степени зависят положение и форма поверхностей скольжения, что в свою очередь определяет схему расчета устойчивости бортов.
2. *Прочность горных пород в прибортовом массиве.* Основными характеристиками прочности пород в массиве при оценке устойчивости откосов являются показатели сопротивления сдвигу или срезу (сцепление и коэффициент внутреннего трения) которые определяются генезисом пород, степенью литификации осадочных пород, их литолого-петрографическими особенностями; сцепление в массиве трещиноватых пород зависит от прочности (сцепления) пород в образце, интенсивности и характера трещиноватости пород (формы и размера структурных блоков), а также сцепления пород по контактам слоёв и другим поверхностям ослабления.
3. *Характеристики сопротивления сдвигу* по контактам пород и другим поверхностям ослабления, которые зависят от характера контакта и контактирующих поверхностей (контакты открытые, закрытые, с заполнителем; поверхности ровные, неровные, гладкие, шероховатые).
4. *Деформационные характеристики пород, длительная прочность пород. Склонность пород в откосах к изменению свойств во времени (набухание, разуплотнение, выветривание, выщелачивание).*

Влияние гидрогеологических факторов сводится к следующим трём аспектам: изменение напряженного состояния прибортового массива

горных пород под влиянием сил гидродинамического давления и гидростатического взвешивания.

Суммарное влияние гидростатического взвешивания и гидродинамического давления проявляется как гидростатическое давление, действующее по поверхности скольжения и направленное по нормали к ней; гидростатическое давление снижает эффективные напряжения в массивах горных пород и способствует уменьшению сил, удерживающих массив в устойчивом состоянии; гидростатическое взвешивание и гидродинамическое давление оказывают существенное воздействие на устойчивость борта в целом при условии, что значительная часть призмы возможного обрушения находится ниже депрессионной (пьезометрической) кривой, или же при больших перепадах напоров в прибортовой зоне вблизи откоса; кроме силового воздействия гидростатические и гидродинамические силы способствуют набуханию и снижению прочности глинистых пород, вскрываемых горными работами.

Снижение прочности пород, склонных к набуханию. Значительное влияние на снижение прочности пород в процессе разработки полезного ископаемого оказывают поверхностные и подземные воды; под влиянием поверхностных вод (в основном дождевых и талых, а также подземных, стекающих по поверхности откосов при отсутствии организованного их отвода) песчано-глинистые породы разуплотняются, увлажняются и набухают, что может приводить к оползанию слагаемых ими уступов.

Механический вынос и снос - поверхностная эрозия, оплывание, суффозия и другие фильтрационные деформации.

К группе физико-географических факторов относятся климатические условия, орогидрография участка карьера и прилегающей к нему территории, сейсмичность района, наличие и характер распространения многолетнемерзлых пород.

К основным горнотехническим факторам относятся: способы ведения буровзрывных работ, форма выемки в плане, высота и профиль борта, параметры элементов уступов, подработка прибортового массива пород подземными горными выработками при комбинированном способе отработки месторождения.

При развитии необратимых деформаций бортов карьера в процесс смещения вовлекаются породы непосредственно склона и объемы смещенных пород достигают миллионов метров кубических. Борт карьера на склоне в условиях высокогорья расположен в породном массиве с низкими прочностными характеристиками. При вскрытии породного массива склона обнажаются и раскрываются естественные трещины напластования, тектонические трещины или трещины отдельностей, что способствует интенсивному проникновению воды по трещинам вглубь этого массива. В процессе физического и химического выветривания трещины раскрываются, образуется новая сеть мелких трещин, трещиноватость массива в приконтурной зоне увеличивается, а это в свою очередь приводит к ослаблению и разрушению приконтурной зоны массива.

Подработка склона карьером нарушает и естественное напряженное состояние. На контуре борта начинают интенсивно развиваться растягивающие напряжения, увеличиваются касательные и как следствие снижается и устойчивость прибортового массива.

На основании анализа методов расчета устойчивости бортов карьеров выявлено, что расчет и оценку устойчивости наиболее эффективно и достоверно проводить по предельному равновесию пород, слагаемых борта карьеров. При этом необходимо в расчетную схему ввести параметры, позволяющие учитывать крутизну склона, на котором строится карьер.

В зависимости от геологического строения скальных массивов используют в основном две схемы расчета**:**

1- Скальные массивы не являются монолитными телами, а состоят из блоков. Взаимодействие между этими блоками при смещении определяет процесс и механизм обрушения.

2- Устойчивость массива определяется взаимодействием участков, потерявших устойчивость и участков прибортового массива склона не потерявших устойчивость.

Как правило, в трещиноватом блочном массиве потенциальная поверхность скольжения, вдоль которой происходит смещение неустойчивой части прибортового массива, совпадает с естественной поверхностью ослабления. В тех случаях, когда смещение по этим поверхностям кинематически невозможно или связано с разрушением скального массива, поверхность обрушения может представлять собой новую поверхность в виде трещины отрыва, совпадающую или несовпадающую с существующей поверхностью ослабления.

Критерий устойчивости для скальных массивов согласно СНиП 11-16-76имеет вид:

$$S = n_c F - \frac{m}{K_n R} \le 0, \qquad (7.1)$$

где F- расчетное значение обобщенной активной сдвигающей силы, МПа;

R –обобщенная сила предельного сопротивления сдвигу, МПа;

Kn – коэффициент надежности, учитывающий степень ответственности и срок эксплуатации карьера;

n_c- коэффициент сочетания нагрузок;

m – коэффициент условий работы.

В расчетную схему устойчивости бортов нагорных карьеров необходимо ввести следующие параметры:

- высота и крутизна склона;

- деформационные и прочностные свойства пород прибортового массива склона, включая морозостойкость пород;
- характеристики трещиноватости пород прибортового массива;
- прочностные характеристики заполнителя по трещинам;
- коэффициент сейсмичности для региона, в котором расположен карьер;
- при наличии подземных вод – форма и положение депрессионной кривой в массиве.

Единичные трещины и их системы, поверхности напластования и другие нарушения, не участвующие в формировании общей для потенциальной призмы обрушения поверхности сдвига реализуются в поверхность сдвига при её формировании и однородной части потенциальной призмы обрушения.

Протяженные одиночные или сопряженные поверхности нарушения сплошности массива, подрезаемой горной выработкой (угол падения контакта больше или равен углу внутреннего трения породы) приводят к формированию в поверхности сдвига при её формировании и однородной части потенциальной призмы обрушения.

Характеристики трещиноватости, такие как класс трещиноватости, протяженность, азимут и угол падения трещин, их ориентация относительно борта карьера, зона интенсивной трещиноватости, заполнитель по трещинам определяются по штольням и скважинам. Трещины любого генезиса и ориентации способствуют интенсивному проникновению воды вглубь массива.

Подработка склона карьером нарушает естественное напряженное состояние склона и его устойчивость. Устойчивость бортов карьеров определяется в первую очередь сопротивлением пород сдвигу в образце и массиве, по контактам слоев и трещинам.

Трещины, падающие в сторону откоса, являются потенциально опасными плоскостями скольжения. Как показали натурные наблюдения, значения угла падения напластований могут составлять от 5^0. Основное влияние на устойчивость по контактам напластований имеют условия на контакте этих трещин. Устойчивость по таким трещинам будет определяться свойствами заполнителя. Прочность на сдвиг по трещине напластований определяется по результатам специальных полевых и лабораторных испытаний. Подготовка и проведение полевых опытов должна проводиться в соответствии с «Руководством по полевым исследованиям сопротивления скальных оснований».

В результате испытаний пород на сдвиг строится паспорт прочности пород и устанавливается зависимость между пределом прочности пород на сдвиг и нормальными напряжениями, действующими на поверхности, т.е. $[\tau] = f(\sigma_n)$. Аналитически прочность пород при сдвиге определится по формуле:

$$[\tau] = \sigma tg\left[i_0 \left(1 - - \frac{\sigma}{R_{tc}} \right)^{10} + \varphi_0 \right], \qquad (7.2)$$

где φ_0- угол внутреннего трения заполнителя трещины.

$$\varphi_0 = arctg\left(\frac{\tau_o}{\sigma}\right), \tag{7.3}$$

τ_0 – остаточная прочность на сдвиг по трещине.

$$i_0 = \frac{i}{\left(1 - \sigma / R_{tc}\right)^{10}}, \tag{7.4}$$

где $$i = arctg\left(\frac{[\tau]}{\sigma}\right) - \varphi; \tag{7.5}$$

$$R_{tc} = \frac{\sigma_2 - \sigma_1 \sqrt[10]{i_2 / i_1}}{1 - \sqrt[10]{i_2 / i_1}} \quad ; \tag{7.6}$$

$$i_1 = arctg\,\frac{[\tau]_1}{\sigma_1} - \varphi_0; i_2 = arctg\,\frac{[\tau]_2}{\sigma_2} - \varphi_0 \quad ; \tag{7.7}$$

($\sigma_1; [\tau]_1; \sigma_2 [\tau]_2$**)** –горизонтальные составляющие нормальных и касательных напряжений по поверхности скольжения, по которым из (7.3) обратными расчетами получаются выражения (7.5) и (7.7) для параметров τ_0 и R_{tc}. Параметр R_{tc} определяют по результатам испытаний горных пород, полученных при различных значениях нормальных напряжений. Далее методом наименьших квадратов устанавливаются значения параметров R_{tc}, i_0, φ_0, наиболее точно аппроксимирующие экспериментальные точки.

В расчетах используются усредненные данные физико-механических свойств комплекса пород, слагаемого данный массив. Так в расчетных схемах используют следующие усредненные характеристики массива – объемный вес, сцепление пород, сопротивление пород сдвигу по потенциальной поверхности скольжения:

объемный вес $$\gamma_{ch} = \frac{\sum \gamma_i m_i}{\sum m_i}; \tag{7.8}$$

сцепление $$c_{cp} = \frac{\sum c_i l_i}{\sum l_i}; \tag{7.9}$$

сопротивление сдвигу $tg\varphi_{ср} = \dfrac{\sum tg\varphi_i \sigma_i l_i}{\sum \sigma_i l_i}$; (7.10)

где γ_i – объемный вес пород i-го слоя; m_i – мощность i-го слоя; c_i – сцепление i-го слоя; l_i – длина участка поверхности скольжения в пределах i-го слоя; φ_I – угол внутреннего трения *i*-го слоя; σ_i –нормальные напряжения в пределах участка поверхности скольжения проходящей в пределах *i*-го слоя.

Величина сцепления в массиве пород при наличии развитой трещиноватости определяется по зависимости:

$$c_M = \frac{c_i - c_i'}{1 + c \ln m_i W_i} + c_i', \quad (7.11)$$

где c_i'- сцепление по трещинам в породах i-го слоя, c - коэффициент, зависящий от степени трещиноватости и сцепления в образце, изменяется в пределах 0,5-10;

W_i - средняя интенсивность трещиноватости (среднее количество трещин, приходящееся на 1 м) в пределах i-го слоя.

Следует обратить особое внимание на оценку устойчивости бортов при крутом залегании слоев в массиве. Опыт отработки месторождений с крутым залеганием слоев, свидетельствует о характерных особенностях проявления деформаций в этих условиях, заключающихся в том, что даже при пологих углах наклона борта возникают значительные деформации верхней части прибортового массива без нарушения его общей устойчивости (т.е. до достижения им предельного состояния). При крутых углах падения естественной поверхности ослабления, если этот угол много больше угла внутреннего трения, коэффициент устойчивости определяется по известной формуле, предложенной Иофиным С.Л.:

$$Ky = \frac{P\cos\alpha tg\varphi' + C'S}{P\sin\alpha}, \quad (7.12)$$

где P – масса всей призмы возможного обрушения; S – площадь потенциальной поверхности обрушения; C', и φ' – расчетное сцепление и расчетный угол внутреннего трения по потенциальной поверхности скольжения; α – угол наклона поверхности ослабления, по которой возможно обрушение.

Расчетные значения сцепления C' и угла внутреннего φ' трения определяются по данным определяемых на образцах в пересчете на массив и с

введением в последние минимального значения коэффициента устойчивости Ку = 1,2.

Расчетное сцепление пород определяется по формуле:

$$C' = \frac{C_o}{k_y}. \tag{7.13}$$

Расчетный угол внутреннего трения:

$$\varphi'_p = \frac{arctg\varphi}{k_y}, \tag{7.14}$$

здесь k_y – расчетное значение коэффициенты устойчивости; C_o – сцепление пород; φ – угол внутреннего трения пород, определенные на образцах соответственно.

Сущность методики изложенной заключается в том, что оценивается не устойчивость прибортового массива, а прочность массива в наиболее слабых зонах в прибортовой части массива и степень устойчивости борта нагорного карьера оценивается по прочности массива.

На основании натурных наблюдений авторами установлено, что обрушение уступов и бортов карьеров происходит в результате лавинообразного слияния малых трещин в области перегибов, которые являются наиболее напряженными зонами в прибортовом массиве (верхняя бровка борта, основание выемки) в одну макротрещину, вдоль которой формируется поверхность скольжения. За критерий устойчивости борта карьера принимается равенство угла откоса β и угла сопротивления сдвигу ψ на данном горизонте.

Коэффициент сопротивления сдвигу τ_p зависит от сопротивления пород сдвигу $\sigma_p = Ptg\psi$ и прилагаемой нагрузки Р, т.е. :

$$\tau_p = \frac{S_p}{P}, \tag{7.15}$$

где: $S_p = \sigma_p = Ptg\psi_p$.

Из (7.15) следует, что:

$$tg\psi_p = S_p/P, \tag{7.16}$$

сравнивая (7.15) и (7.16), очевидно, что:

$$\tau_p = tg\psi_p. \tag{7.17}$$

Известно, что сопротивление пород сдвигу подчиняется закону Кулона-Мора, т.е. $\tau_{сд} = \sigma tg\varphi + C$.

Тогда

$$\tau = tg\varphi + C'/P, \tag{7.18}$$

где φ – угол внутреннего трения, $C' = C/K_y$ C – сцепление пород, K_y – коэффициент устойчивости.

Предельно допустимые значения угла наклона борта нагорного карьера в каждой его точке с координатами X и Z согласно, определяется условием равенства угла борта карьера и угла сопротивления сдвигу, т.е.:

$$\beta_z = \psi P_z . \tag{7.19}$$

Из (7.17) и (7.19), опуская индекс «z» получим:

$$tg\beta = \tau . \tag{7.20}$$

Для решения этого уравнения относительно угла наклона борта β необходимо установить зависимость сопротивления пород сдвигу τ от координат (X,У) в любой точке борта карьера. Из (7.16) и (7.18) получим условие:

$$tg\beta = tg\varphi + \frac{C'}{P}, \tag{7.21}$$

где P – естественная нагрузка на прибортовой массив от вышележащих пород склона.

Эту нагрузку можно представить в виде:

$$P = \gamma Z + P_0(x), \tag{7.22}$$

где$P_0(x)$ – нагрузка на прибортовой массив от вышележащих пород склона,

γ - объемный вес налегающих пород.

Устойчивость бортов определяется сопротивлением пород сдвигу в образце и в массиве, по контактам слоев и трещинам, трещиноватостью, выветриваемостью, склонностью к разуплотнению и набуханию, ползучестью.

В зависимости от свойств, определяющих устойчивость пород в откосах, все горные породы делятся на пять групп.

В зависимости от того, какими породами сложены борта все месторождения могут быть разделены наследующие группы (табл. 7.1):

1. Месторождения, сложенные скальными породами группы 1, поскольку породы не склонны к набуханию и разупрочнению, а сдвиговые характеристики позволяют выдерживать углы откоса больше технически необходимых (больше $55\text{-}65^0$), то основное влияние на устойчивость оказывают структурные ослабления, что заставляет уменьшить углы откоса борта.

Основные виды деформаций –обрушения и осыпи. Поскольку при разведке месторождения выявить все нарушения невозможно, большое значение имеет доразведка при строительстве и в первый период эксплатации.

2.Месторождения, сложенные полускальными (выветрелыми, а также глинистыми, не склонными к набуханию) породами. За перемычками глинистых пород могут сохраняться высокие напоры. Устойчивость откосов определяется сопротивлением сдвигу породы и поверхностями ослабления, а при наличии карбонатных пород и гидрогеологическими факторами. Характерные деформации: осыпи, обрушения по подсеченным поверхностям ослабления, оползни. Для глубоких карьеров устойчивые углы откосов борта $30\text{-}40^0$.

3.Месторождения, сложенные породами группы 3, отчасти породами групп 4 и 5.

Породы склонны к набуханию и разупрочнению. Обычно к группе 3 относятся осадочные месторождения. Устойчивость определяется сопротивлением сдвигу, значительную роль играют структурные ослабления и гидрогеологические факторы. На месторождениях этой группы наблюдаются все виды деформаций, но основное место занимают оползни.

Таблица 7.1 Классификация горных пород и месторождений по условиям устойчивости бортов карьеров

Номер группы	Название группы	Общая характеристика	Основные типы пород	Характеристика, определяющая устойчивость
1	Скальные (крепкие)	$\sigma_{сж}$ =8000Н, слабо трещиноватые, слабовыветрелые, не набухают, не подвергаются пластическим деформациям	Магматические и метаморфические породы, невывертерлые, слабовыветрелые	Угол внутреннего трения и сцепление по поверхностям ослабления и элементы залегания поверхностей ослабления
2	Полускальные (средней крепости)	$\sigma_{сж}$=800-8000Н, трещиноватые, интенсивно выветриваются, не набухают, не пластичны	Выветрелые разности магматических и метаморфических пород, глинистые и песчано-глинистые сланцы, песчаники, аргиллиты, алевролиты, мергели, известковистые конгломераты.	Сцепление и угол внутреннего трения в образце и по поверхностям ослабления, элементы залегания поверхностей ослабления, характер трещиноватости
3	Слабые (глинистые) связные	$\sigma_{сж}$ = 800Н, размокают, интенсивно выветриваются, набухают, пластичны	Все разновидности глин, суглинков, супесей, лессы, делювиальные и моренные отложения, сильно выветрелые разности пород групп 1 и 2	Сцепление и угол внутреннего трения в образце и по поверхностям ослабления, элементы залегания поверхностей ослабления, характер трещиноватости, обводноенность, наличие напорных вод
4	Несвязные (сыпучие)	Сцепление отсутствует. Углы внутреннего трения и естественного откос изменяются в пределах 28-38^0, не размокают, пластически не деформируются	Полностью дезинтегрированные породы групп 1 и 2, пески, галечники	Угол внутреннего трения (угол естественного откоса), зависящий от коэффициента трения по поверхности частиц
5	Илы и плывуны	Сцепление ≤ 0,2кг/см^2, в водонасыщенном состоянии угол внутреннего трения равен нулю	Современные глинистые осадки, рыхлые водонасыщенные пылеватые пески и суглинки, торфы	

Глава 8 Оценка устойчивости отвалов вскрышных пород

Отвалы это техногенные массивы, представляющие собой инженерные сооружения на специально отведенных территориях, предназначенные для временного или постоянного складирования вскрышных пород. По месторасположению отвалы подразделяются на внешние и внутренние, по способу механизации отвальных работ – на экскаваторные, бульдозерные, гидромеханизированные. В зависимости от числа ярусов отвалы подразделяются на одноярусные, двухъярусные и многоярусные. По рельефу основания отвалы различают равнинные и нагорные; по высоте – на низкие (до 20 метров, для гидроотвалов – до 10 м), средние (от 20 до 50 м, для гидроотвалов – до 30 м). высокие (более 50 м., для гидроотвалов более 30 м), Гидроотвалы в отличие от сухих – более ответственные сооружения и состоят из ограждающих дамб, пруда отстойника, сооружений для осветленной воды, пропуска паводковых и ливневых вод, пульпопроводов.

Факторы, определяющие устойчивость отвалов подразделяются на природные: геологические, инженерно-геологические, гидрогеологические и физико-географические; и техногенные, к которым относятся дифференциация пород в процессе их размещения в отвал; применение горно-транспортного оборудование; интенсивность ведения отвальных работ, динамические и статические нагрузки.

Геологические – строение основания (наклонное, слоистое, наличие наносов и т.п.).

Инженерно-геологические – физико-механические свойства отвальной массы и основания, сопротивление пород сдвигу - условие предельного равновесия отвалов, в глинистых породах угол внутреннего трения величина непостоянная и зависит от влажности пород в отвале. Прочность пород основания - просадка отвалов. Деформации отвалов на основаниях с малой несущей способностью проявляются в виде их оседания или их частей с выдавливанием пород основания либо в виде оползней, которые захватывают нижележащие породы.

Гидрогеологические факторы: гидродинамическое давление, гидростатическое взвешивание, поровое давление, влажность пород, высачивание воды на откос.

Физико-географические атмосферные осадки, промерзание откосов отвалов и поверхности гидроотвалов, рельеф местности.

8.1 Виды деформаций отвалов

Оползни - наиболее распространенный вид деформации отвалов. В зависимости от положения поверхности скольжения относительно основания отвала оползни подразделяют на надподошвенный, подошвенные и подподошвенные.

Надподошвенные оползни возникают в отвалах песчано-глинистых пород, размещенных на прочном основании. Плоскость скольжения таких оползней полностью формируется в насыпанного или намытого массива вскрышных пород. Эти оползни возникают при превышении расчетной высоты отвала. Механизм формирования таких оползней следующий. В начальный период формирования отвала до высоты 10 м, массив имеет рыхлое строение, и породы отвала включают куски породы, воздух и вода между этими кусками. В таком состоянии породы отвала устойчивы при углах откоса отвала равным естественному углу откоса. С увеличением высоты и времени стояния отвала происходит уплотнение пород в отвале за счет вытеснения воздуха и породы в отвале постепенно переходят в двухфазное состояние: порода-вода.

С образованием на некоторой глубине от поверхности отвала зоны повышенной влажности за счет отжатия воды снизу вверх из области более высоких напряжений, вызванных уплотнением пород, и сверху вниз за счет инфильтрации. Глубины развития зоны повешенной влажности зависит от высоты отвала и физико-механических свойств исходной породы.

Подошвенные оползни возникают в тех случаях, когда отвалы размещаются на наклонном основании, сложенном слоистыми горными породами. Плоскость скольжения проходит по контакту отвальных пород с основанием. Основные причины этого типа оползней на отвале – это неучтенные параметры устойчивости самого основания и условий на контакте (глинистые или трещиноватые породы, покровные образования, древние осыпи и т.п.)

Под подошвенные оползни характерны для отвалов любых пород на слабом основании по характеру проявления и причинам возникновения эти оползни сходны с оползнями выпирания слоистых пород висячего бока. При сползании пород отвала происходит захват пород основания, т.к. поверхность скольжения лежит ниже контакта пород отвала и основания.

Оползни отвалов характеризуются тремя стадиями развития деформаций: скрытой – от начала макроподвижек в массиве до появления видимых признаков формирования оползня; активной – с момента появления видимых признаков разрушения массива до затухания деформаций и затухающей – период смещения оползня с уменьшающейся скоростью до полной стабилизации.

Активная стадия для надподошвенных и подподошвенных оползней имеет вид быстрого смещения породных масс и представляет определенную опасность для людей и оборудования, находящихся на отвале и прилегающих к отвалу территориях. Подошвенные оползни развиваются медленнее и представляют меньшую опасность, однако они захватывают большие объемы массива горных пород, что требует значительных работ по переэкскавации.

Оплывы откосов. Распространены на отвалах песчано-глинистых пород с большим содержанием пылевидных частиц. Они характеризуются смещением водонасыщенных масс пород вниз по откосу с различной скоростью. Скорость смещения зависит от консистенции пород и угла наклона откоса. Деформации оплывания наблюдаются при выклинивании воды из отвала на откос. Механизм

формирования оплывин следующий. При отсыпке в отвал неводонасыщенных пылеватых песков и глин отвалы имеют рыхлое сложение, и располагаются под углом естественного откоса. Постепенное насыщение их водой приводит к формированию депрессионной кривой, выходящей в основание отвала. В нижней части отвала возникают небольшие оплывы на участках высачивания. При длительных атмосферных осадках уровень воды в отвалах быстро повышается, и фильтрационные деформации охватывают все большую высоту откоса. Условия для внезапного массового оплыва возникают, когда средняя влажность пород достигает предела текучести, что происходит при подъеме уровня воды в отвале до 50% его высоты. Массовому оплыванию способствует и тиксотропное разжижение отвальных водонасыщенных масс горных пород при вибрации, и сейсмическом воздействии.

Просадка - вид деформаций наблюдающиеся на всех отвалах. Она заключается в вертикальном опускании отвального массива в результате уплотнения пород как самого отвала, так и его основания без образования сплошной поверхности скольжения и продолжается длительное время. Отвалы на прочном скальном основании деформируются незначительно, их оседание зависит от физико-механических свойства складируемых в отвал пород и способа отвалообразования, поэтому отвалы скальной вскрыши на скальном основании практически не деформируются. При складировании пород на основание, сложенных слабыми глинистыми породами большой мощности, деформации просадки максимальные. В этом случае породы выдавливаются у основания отвала. Просадки в приоткосной части отвального массива могут переходить в подошвенные оползни и четкой границы между этими видами деформации трудно провести.

Эрозия характерна для откосов отвалов при длительном их стоянии без обновления.

8.2 Оценка устойчивости отвалов вскрышных пород

Откосы искусственных насыпей находятся в устойчивом состоянии (не оползают и не обрушиваются) до тех пор, пока в образующей их среде существует достаточная для этого внутренняя связь. Способность сыпучей среды сохранять устойчивыми склоны определяется суммарным сопротивлением сдвигу.

В расчетах устойчивости сыпучих масс разработаны методы определения сопротивления сдвигу как меры, характеризующие возможность сдвиговых деформаций. В основном эти методы сводятся к сопоставлению всех сил, стремящихся вызвать движение, и сил, препятствующих этому. Основное условие для успешного решения задачи об устойчивости насыпей (отвалов) заключается в отчетливом понимании физической сущности сопротивления сдвигу, которое является следствием трения между отдельными частицами сыпучего материала и между частицами и твердым основанием насыпи (отвала).

При контактировании сыпучего материала с твердой поверхностью каждая частица, примыкающая к ней, в зависимости от различных условий имеет возможность перемещаться со скольжением, качением и вращением. Общая площадь трения состоит из множества отдельных элементов, которое обусловлено дискретным характером контакта сыпучей среды с опорой. Деформации сдвига сыпучего материала по поверхности распространяются на значительную глубину за счет передачи движения от одного слоя к другому. Движение отдельных частиц в приконтактной зоне происходит как по вектору относительной скорости, так и под различными углами к нему, что приводит к относительному перемещению и перемешиванию частиц. При этом смещение части носит скачкообразный характер.

Подвижность частиц сыпучего материала определяется плотностью их упаковки, наименьшее значение которой отмечает на границе между твердой поверхностью и сыпучим материалом. С удалением от поверхности плотность упаковки постепенно повышается, достигая постоянного значения на некотором расстоянии от нее.

Частицы сыпучего материала в пограничной области образуют некоторые структурные образования, в которых они находятся в определенном равновесном состоянии. Для перевода этих частиц в другое положение требуется приложить дополнительное усилие. Пока суммарная величина сдвигающего усилия остается меньше силы сопротивления, никаких относительных перемещений частиц внутри данного структурного образования происходить не будет.

При росте сдвигающих усилий наступает момент, когда силы трения не могут противостоять переходу частиц в новое равновесное состояние, соответствующее более высокому уровню действующих сил. Возникают новые, более устойчивые структурные образования, характеризующиеся высокой плотностью, увеличенным числом контактов и большим сцеплением между частицами.

Во время структурных перестроек определенное число частиц под действием тангенциальных сил получает возможность совершать вращательной движение. Так как трение качения намного меньше трения скольжения, то возникновение вращательного движения приводит к резкому уменьшению общей силы сопротивления, в результате чего увеличивается смещение сыпучей материала относительно твердой поверхности (скачок смещения). При этом разрушается все большее количество пограничных структурных образований на фоне нарастания сдвигающих усилия.

Таким образом, скачок смещения влечет за собой структурную перестройку в приконтактной зоне, увеличивая плотность упаковки сыпучего материала и уменьшая соответственно возможность частиц совершать вращательное движение, которое сменяется скольжением. Структура сыпучего материала при этом приобретает большую прочность и большую сопротивляемость сдвигающим усилиям, что происходит за счет увеличения фактической площади контакта материала и поверхности. Сопротивление возрастает настолько, что движение материала по поверхности прекращается.

Дальнейшее увеличение сдвигающих усилий (что характерно при эксплуатации отвалов) приводит к повторению цикла. Вначале происходит плавное смещение, которое носит упругий характер, затем - срыв и скачок смещения, в ходе которого продолжается перестройка структуры в приконтактных зонах с увеличением плотности упаковки и сил сопротивления. Неоднократное повторение процесса приводит к предельному состоянию, когда завершается перестройка структуры и остается возможность только скользящего движения сыпучего материала по поверхности.

При увеличении сдвигающих усилий (тангенциальных напряжений) до предельного значения сил сопротивления наступает следующая фаза — фаза безостановочного движения (скольжения) по склону при постоянном сдвигающем усилии. В начальный момент скольжения сдвигающее усилие равняется максимальному значению сопротивления для данных условий, данного сыпучего материала и подстилающей поверхности. При этом возможны следующие виды относительного движения сыпучего материала по склону:

1) без каких-либо визуальных изменений структуры приконтактной зоны, которая образовалась в ходе первой фазы;
2) с образованием пограничного слоя сыпучего материала с некоторым градиентом относительной скорости по глубине;
3) с образованием вблизи твердой поверхности слоя материала с нулевой относительной скоростью.

Наиболее распространенным является второй вид движения, и возникает он при нормальных давлениях и шероховатостях подстилающей поверхности, колеблющихся в довольно широких пределах. При этом относительная скорость частиц, примыкающих к подстилающей поверхности меньше, чем скорость частиц, удаленных от нее. С удалением от поверхности скорость частиц постепенно увеличивается до некоторого постоянного значения, а градиент скорости между отдельными слоями уменьшается от некоторого максимального значения на границе раздела до нуля. Оценка устойчивости отвала представляет собой задачу о равновесии тела на наклонной поверхности под действием силы тяжести и сопротивления (рисунок 8.1а). Устойчивость отвала определяется силами в направлении линии *00'*. Материал в пределах треугольника *AOO'* будет находиться в равновесии (покое), если силы сопротивления на границе раздела сыпучего материала достаточны для нейтрализации сдвигающих усилий:

$$\tau_n = \tau_0 + P_n tg\varphi, \qquad (8.1)$$

где τ_n- эффективная сила сцепления, φ — угол внутреннего рения, P_n — эффективное нормальное давление.

Из физических свойств сыпучих материалов сопротивление сдвигу является наиболее сложным и зависит от многих факторов. Формула (8.1) является приближенной, но для практических целей имеется достаточную

степень точности. Величины τ_n и φ в рассматриваемом случае зависят от плотности, заснеженности и увлажненности сыпучего материала и могут изменяться в весьма широких пределах даже для одного и того же материала.

Тело отвала слагается из ряда слоев; для каждого слоя может быть построена предельная линия, на которой справедлива формула (8.1).

Силы сопротивления по всему отвалу рассчитываются с использованием нескольких таких предельных линий. Совмещение их на одной шкале позволяет выявить возможность построения осредненной предельной линии для всего отвала. При этом точность расчета устойчивости отвала в значительной степени зависит от точности определения сопротивления сдвигу сыпучего материала, слагающего тело отвала.

Сдвигающие усилия в отвале на горном склоне и движение отвальной массы обусловливаются силой тяжести, давлением воды, фильтрующейся сквозь отвал, а также периодическими сотрясениями при проведении взрывных работ в карьере, когда сопротивление сдвигу в любой плоскости отвала оказывается достаточным для нейтрализации этих сил. В условиях Заполярья величина сопротивления сдвигу в течение года испытывает значительные сезонные колебания. Оттаивание и увлажнение сыпучего материала в весенне-летний период существенно уменьшают величину сопротивления сдвигу, изучение сезонных колебаний которой в теле отвала весьма затруднительно, но крайне необходимо для решения задачи об устойчивости. Очевидно, при расчетах следует пользоваться предельной величиной сопротивления сдвигу, которая соответствует наименьшей прочности отвальной массы, возникающей в весенне-летний период.

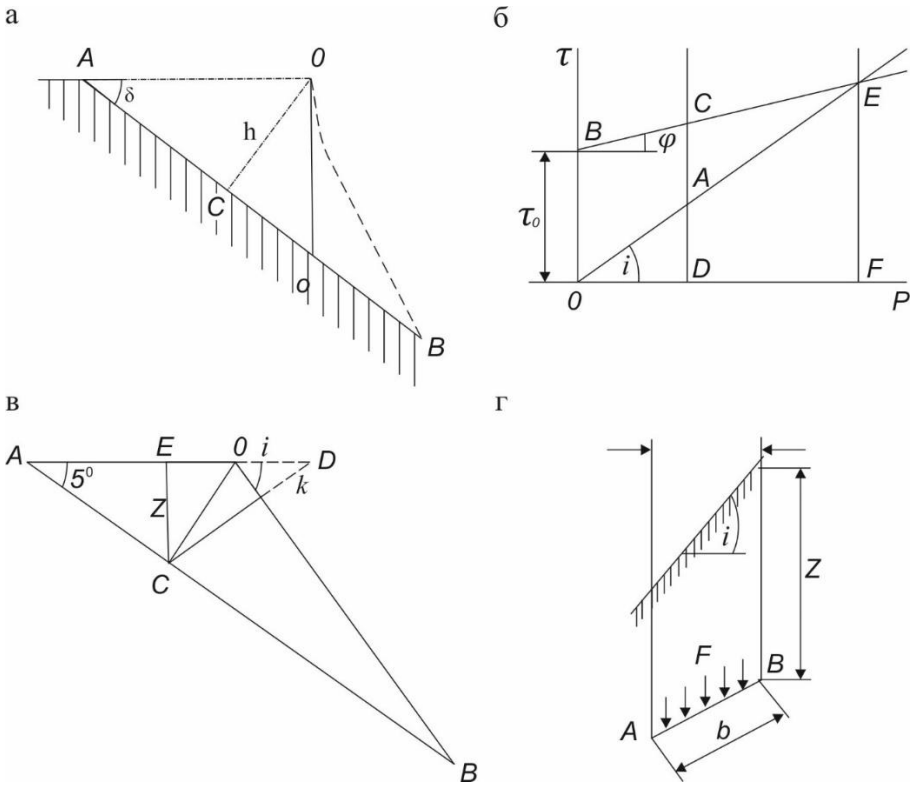


Рисунок 8.1 Схемы к расчету предельной ширины отвала

а — продольного разреза отвала; *б*— соотношение вертикальных и касательных напряжении в сыпучей среде; в — распределения вертикальных напряжений; г — вывод расчетной формулы.

Материал тела отвала подвергается периодически то усадке, то расширению. Интенсивность этих процессов определяется колебаниями температуры, увлажненности и заснеженности, которые обеспечивают постепенное сползание отвала вниз по склону. Мощность сползающего слоя колеблется от нескольких сантиметров до нескольких метров. Деформация сползания наиболее ярко проявляется в материалах, способных разбухать и обладающих значительной сжимаемостью и водопроницаемостью. Устойчивость отвала определяется по величине сопротивления сдвигу, которая для сыпучей среды характеризуется многими переменными факторами. Поэтому при расчете устойчивости пользуются либо осредненными характеристиками, либо их предельными значениями. Основное условие устойчивости отвала заключается в том, что результирующее сопротивление сдвигу в любом сечении должно быть более результирующего сдвигающего усилия, которое возникает от давления сыпучего материала, расположенного выше. Сечение отвала, наиболее вероятное для движения материала по нему, может стать поверхностью скольжения. На ней сопротивление сдвигу должно равняться сдвигающим усилиям, что соответствует критическому состоянию.

Для расчета устойчивости отвала вначале определяется равнодействующая всех сил, направленных на массу отвала, которая находится над критической поверхностью. Для устойчивого положения отвала эта сила должна уравновешиваться результирующим сопротивлением, которое складывается из сил сцепления τ_0 по поверхности скольжения и сил трения, создаваемых за счет давления вышележащей массы. Предельное сопротивление сдвигу можно выразить в аналитическом (8.1) и графическом (*BC* на рис. 8.1,*б)* видах. При нормальном давлении *OD* величина сопротивления сдвигу определяется отрезком DC.

Если $i < \varphi$, то линии *BC* и *OA* не пересекутся, и следовательно, в плоскости, параллельной поверхности отвала, сдвига не произойдет.

Если $i < \varphi$, то сдвигающие напряжения в плоскости параллельной поверхности отвала, меньше сопротивления сдвигу на некоторой глубине, где нормальное давление характеризуется отрезком превышающим *OF*. В этом случае сдвига отвала не произойдет, так как сопротивление сдвигу *DC* больше сдвигающего усилия *DA*. Однако на некоторой критической глубине (точка *E)* величина сдвигающего усилия равняется силе сопротивления и при дальнейшем углублении в тело отвала (область *FP* на рис. 8.1, б) состояние равновесия нарушается. Поэтому угол откоса отвала *i* может быть больше эффективного угла трения лишь при мощности слоя сыпучего материала меньше критической и при наличии подстилающего слоя, обладающего большой величиной сопротивления сдвигу.

Условия устойчивости слоя сыпучего материала мощностью h для случая $i > \varphi$, определяются следующим образом. В элементарном объеме плоскости действия вертикальных напряжений и напряжений, действующих на эти плоскости, параллельны между собой и являются сопряженными. Те и другие имеют угол отклонения, равный углу i, а также угол между плоскостью действия вертикальных напряжений и плоскостью отвала, равный 90^0 (рис. 8.1, *в).* Давление на единицу площади на глубине z равной:

$$F = \gamma z cos i. \tag{8.2}$$

Составляющие этого давления на глубине h:

$$P_n = \gamma h cos^2 i, \tag{8.3}$$

$$\tau_n = \gamma h sin i cos i. \tag{8.4}$$

Подставив (8.3) и (8.4) в (8.1), можно выразить допустимую мощность слоя сыпучего материала:

$$h = \frac{\tau_0 cos\varphi}{\gamma cos i sin\,(i-\varphi)}. \tag{8.5}$$

Из формул (8.2) и (8.3) видно, что

$$z = h cos i, \tag{8.6}$$

где h представлена отрезком CD (рис. 8.1, *г).*
Чтобы найти предельную ширину отвала r = AO, необходимо h заменить на h_1= OC, тогда:

$$r = \frac{h}{sin\delta}. \tag{8.7}$$

Зная, что $OC \perp AB$ *и* $CD \perp OB$ (рис. 8.1, г), находим:

$$h = h_1 \frac{cos\delta}{cos i}. \tag{8.8}$$

Из (8.5), (8.7) и (8.8) после несложных преобразований получим

$$r = \frac{2\tau_0 cos\varphi}{\gamma sin 2\delta \sin_{(i-\varphi)}}. \tag{8.9}$$

Таким образом, предельная ширина устойчивого отвала r прямо пропорциональна силам сцепления в отвальной массе, обратно пропорциональна ее объемному весу и зависит от углов внутреннего трения, подстилающего склона и откоса отвала. Эти величины определяются в

результате лабораторных испытаний и натурных наблюдений. Поэтому расчет по формуле (8.9) особой сложности не представляет.

Предельная ширина устойчивого отвала является новым критерием, более удобным для оперативного контроля за состоянием отвалов на горных склонах. Существовавший ранее критерий (высота устойчивого отвала) удобен только в случае нахождения отвала на горизонтальном основании. При отсыпке отвалов на наклонное основание, каковыми являются горные склоны, оценка и контроль величины этого критерия становится весьма затруднительными. Использование нового критерия (предельной ширины устойчивого отвала) этих трудностей не имеет, при этом значительно упрощается оперативный контроль за реальной шириной отвала. Предельная ширина устойчивого отвала может быть оценена на основе предельных значений величин, входящих аргументами в функциональную зависимость (8.9). К ним относятся силы сцепления, внутреннее трение и объемный вес породной массы при различных значениях заснеженности и увлажненности; в связи с этим проведено большое количество испытаний по определению прочностных характеристик отвальной породы.

8.3 Оценка влияния подземных вод на устойчивость отвала

После отсыпки вскрыши, породы отвала интенсивно уплотняются в первый период под действием собственного веса за счет заполнения воздушных пустот. Эти пустоты заполняются как более мелкой породой, так и выклинивающейся водой и в нижней части отвала развивается поровое давление. В результате более интенсивного оттока воды из приоткосной зоны верхняя бровка отвала имеет большую осадку. Наличие в основании водонасыщенных слабоструктурных связных пород также провоцирует возникновение в них порового давления, которое возникает практически сразу после приложения нагрузки от отвального массива *P*. При этом внешняя нагрузка частично воспринимается поровой водой, а частично – минеральным скелетом:

$$P=Pэ+Pp, \qquad (8.10)$$

где *Pэ* – давление в скелете грунта или эффективное давление, действующее на минеральные частицы, уплотняя и упрочняя породу; P_p – поровое или нейтральное давление, которое создает напор в воде, вызывающий ее фильтрацию.

В нестабилизированном состоянии порода плохо сопротивляется сдвигу, но по мере уплотнения и оттока поровой воды к зонам с пониженным давлением или дренажем сопротивление сдвигу возрастает. Сопротивление сдвигу τ по любой площадке может быть принято равным (рис. 8.2):

$$\tau = (\sigma_n - P_p)tg\varphi + C, \quad (8.11)$$

где σ_n– полное нормальное напряжение; P_p – поровое давление; φ и C’ – угол внутреннего трения и сцепление. Деформации отвалов будут свидетельствовать о том, что поровое давление является одной из основных причин возникновения оползней различных типов.

В процессе отсыпки рыхлых пород на основание с близким расположением подземных вод, происходит переувлажнение тела отвала за счет капиллярного поднятия воды, что также приводит к снижению прочности отвальных масс и образованию просадок и оползней.

По различным данным до 15% оползней на отвалах вызвано возникновением порового давления в основании техногенного массива.

Схема водонасыщения пород отвала подземными водами за счет капиллярного поднятия (Рис.8.2). Данная схема условная и требует уточнения после проведения соответствующих работ по инженерно-гидрогеологическим изысканиям.

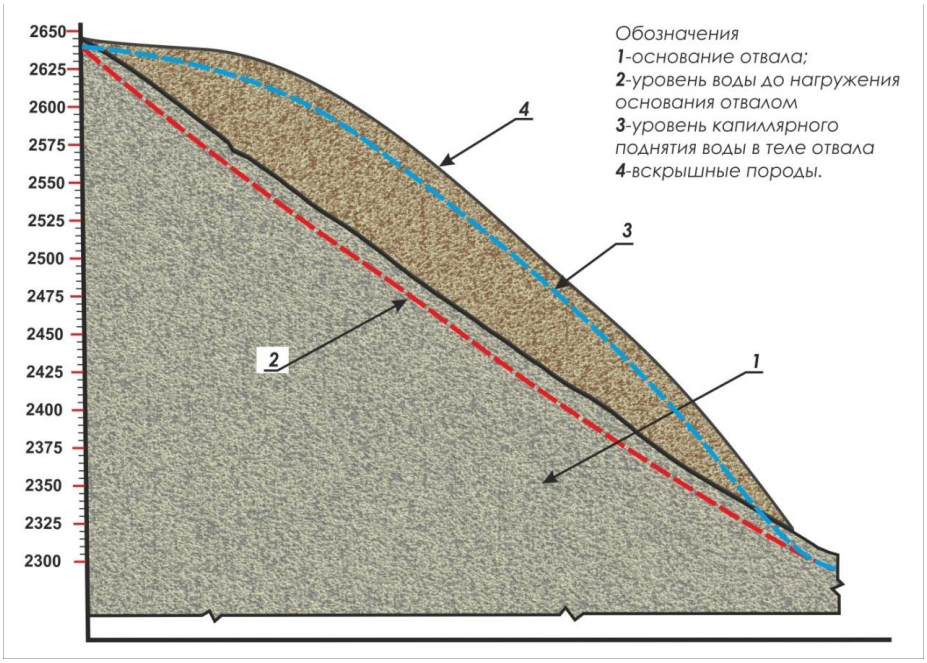


Рисунок 8. 2 Условная схема возможного уровня подземных вод

Для исключения капиллярного поднятия в теле отвала необходимо изолировать контакт обводненного основания с укладываемыми в отвал породами.

8.4 Основные требования по безопасному размещению отвалов на горных склонах

Отвалообразования при открытой разработке нагорных месторождений является одной из сложных проблем при складировании отвалов вскрышных пород на горных склонах.

Основными требованиями, предъявляемыми к отвалам, являются: достаточная вместимость при незначительных размерах занимаемых земельных площадей, минимальное расстояние от мест погрузки породы (вскрышных забоев), расположение на площадях, где отсутствуют полезные ископаемые в промышленных масштабах, отсутствие ограничений развития горных работ. Обязательным условием отвалообразования является обеспечение производственной и экологической безопасности.

Отвалообразование сопровождается деформациями отвалов, которая зависят от свойств пород вскрыши, в частности кусковатости.

В целях обеспечения безопасности работ на отвале, отвальные работы условно можно разделить на отвалообразование с обеспечением устойчивости отвальных ярусов на всех этапах формирования массива и отвалообразование в условиях управляемого деформирования.

В последнем случае оборудование должно располагаться вне призмы возможного обрушения или обладать достаточной мобильностью для вывода его за пределы призмы до начала деформаций, допускаемая скорость протекания которых не превышает 250 мм/сут. В общем случае на отвальных массивах различают два основных вида деформации: затухающее во времени оседание (за счет уплотнения пород) и возрастающее, часто переходящее в обрушение, сдвижение.

Деформации в отвале зависят от инженерно-геологических особенностей пород отвалов и их оснований, таких как:

- степень дробления пород;
- естественное разделение пород на фракции и самовыполаживание отвальных откосов;
- изменение прочностных характеристик пород в отвале во времени (сопротивление сдвигу увеличивается в связи с уплотнением или снижается при увлажнении пород насыпи и основания);
- возникновение в водонасыщенных породах отвалов и их оснований порового давления, являющегося существенным фактором развития оползней различных типов.

Важным фактором, определяющим параметры отвалов, является рельеф основания и тип породы, залегающей в подошве отвального массива. Устойчивость отвалов, размещаемых на прочном основании, определяется прежде всего сопротивлением сдвигу слагающих их пород.

Рельефом местности определяется также характер поверхностного стока. В случае скопления атмосферных вод у нижней бровки отвалов, подтапливания дождевыми и паводковыми водами или размещения отвалов во впадинах, не

имеющих стока, происходит увлажнение пород отвалов и их оснований, снижение сопротивления пород сдвигу, уменьшение высоты и угла откоса устойчивых отвальных откосов.

На устойчивость отвалов наибольшее влияние оказывают атмосферные осадки и колебания температуры воздуха.

Гидрогеологические условия непосредственно склона определяют развитие деформаций отвалов и его основания за счет гидродинамического или гидростатического давления подземных вод. Эти воды могут вызвать гидростатическое взвешивание пород или создание в них ослабленных поверхностей. Давление подземных вод на породы основания отвалов уменьшает эффективные напряжения в них или может вызвать гидравлический разрыв слоя пород покровных образований с прорывами напорных вод или плывунов.

Из технологических факторов, влияющих на устойчивость отвалов важнейшими являются высота и конфигурация отвальных откосов, длина и скорость подвигания отвального фронта, темп отсыпки отвала. Схемами отсыпки (фронтальной или блоковой) предопределяется характер процессов уплотнения породных масс отвалов и их прочностные свойства.

Выбор и обоснование места для размещения отвалов вскрышных пород на склоне.

Известно, что на устойчивость отвала оказывают влияние:

- Рельеф поверхности, на которую отсыпаются вскрышные породы;
- Атмосферные осадки и высота снежного покрова;
- Сезонные колебания температуры;
- Физико-механические свойства пород основания отвалов ;
- Состав и свойства, в том числе влажность, складируемых в отвал пород;
- Геометрические параметры отвала.

Рельеф поверхности, на которую отсыпаются вскрышные породы.

В качестве примера рассмотрим следующую инженерную задачу. Отвал планируется разместить на склоне в непосредственной близости от карьера в сухом сае в пределах высотных отметок склоне 2750-2450м. Поверхность склонов имеет наклон $25\text{-}30^0$. Протяженность сая составляет 450м. Угол наклона поверхности составляет $25\text{-}31^0$. Общий вид склона, на котором планируется разместить отвал, показан на рис.8.3.

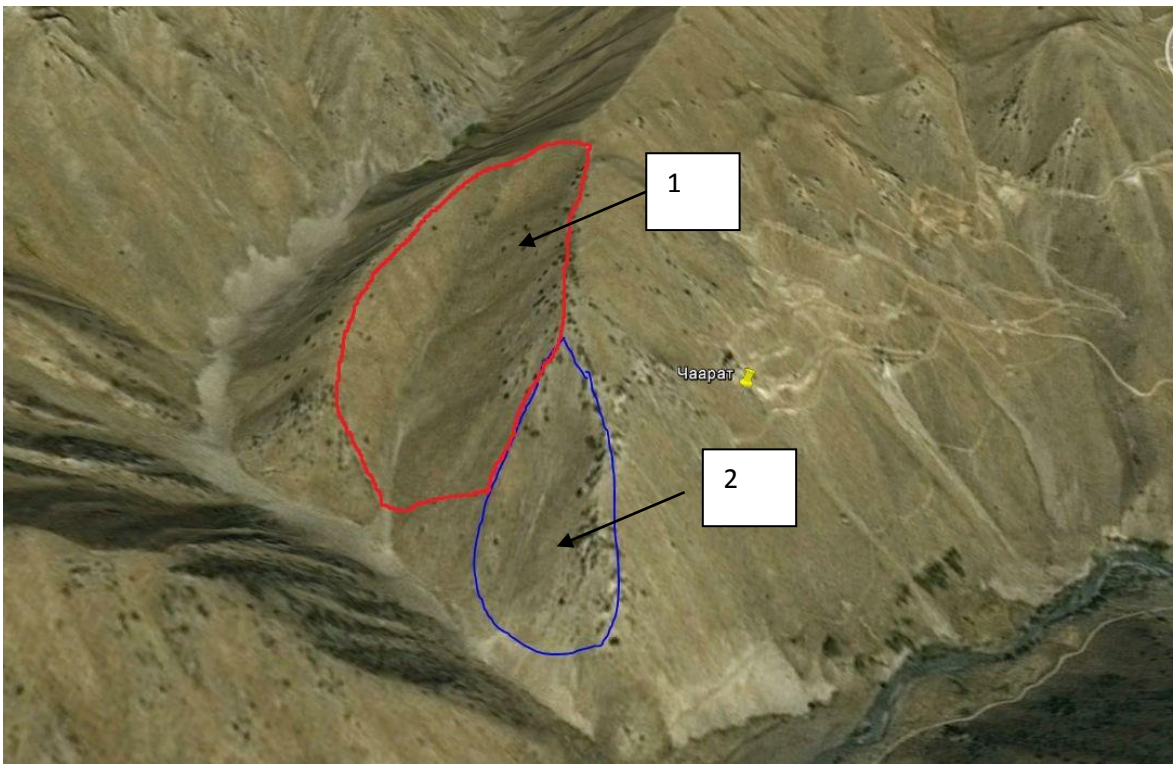


Рисунок 8.3 Местоположение складирования вскрышных пород

1-основной отвал; 2- дополнительный

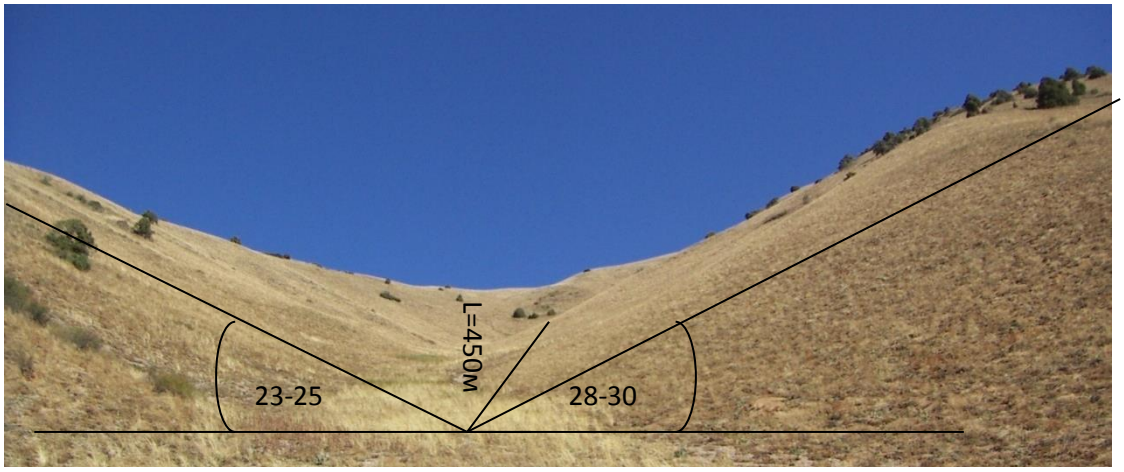


Рисунок 8.4 Общий вид основания основного отвала для размещения вскрышных пород

Физико-механические свойства пород основания отвалов. Основными коренными породами основания отвала являются диориты, сильно трещиноватые породы коренной основы покрывают наносы мощностью 2-3 м.

Согласно предварительному обследованию пород коренной основы в пределах первых 5-15 метров это сильнотрещиноватые диориты, качество

массива не превышает 20%. Покровные образования – делювиальные суглинки с включением обломков коренной породы. Уровень подземных вод зарегистрирован на расстоянии 8-9м от поверхности склона (эти данные требуют уточнения).

Учитывая близкое расположение уровня подземных вод, не исключено при загрузке склона отвалом поднятие уровня воды и замачивания основания отвала.

Состав и свойства, в том числе влажность, складируемых в отвал пород

Основными породами отвала являются раздробленные окварцованные песчаники. Не исключено наличие глинистых пород. Влажность этих пород будет зависеть от времени года и наличия осадков.

Расчетные геометрические параметры отвала, при которых обеспечивается его устойчивость на склоне

Важным параметром отвала, при котором обеспечивается безопасность отвалообразования, является его высота. Достоверность расчета высоты отвала на склоне определяется такими параметрами как объемный вес пород в отвале угол внутреннего трения этих пород, угол откоса отвала. Так как складирование пород планируется производить не на горизонтальной площадке, а на склоне в расчет введены такие параметры как угол наклона основания. Для определения высоты отвала приняты следующие наиболее неблагоприятные исходные параметры пород отвала (табл.8.1).

Таблица 8.1- Расчетные данные для определения геометрических параметров основного отвала

Расчетные данные	**Значения**
Объемный вес пород, кг/м^3	2100
Насыпной вес, кг/м^3	1170,00
Плотность, кг/м^3	2140
Сцепление, МПа	0,04
Угол внутреннего трения	38
Коэффициент трения	0,78

Параметры отвала определяли в пределах выбранной территории по 6 расчетным сечениям. Исходные геометрические параметры для расчета объема отвала приведены в таблице 8.2

Таблица 8.2 – Исходные данные для расчета параметров основного отвала

Исходные параметры	**значения**
объем вскрышных пород, $м^3$	20000000
коэффициент разрыхления	1,8
планируемый вес вскрышных пород, т	27000000
длина сечения по падению, м	442,5
Крутизна склона п простиранию	
сечение А-А	24
сечение В-В	31
сечение С-С	23
сечение Д-Д	28
сечение Е-Е	28
Длина сечения по простиранию	
сечение А-А	87,5709
сечение В-В	93,33067
сечение С-С	76,04523
сечение Д-Д	101,9313
сечение Е-Е	54,36336

Согласно принятым параметрам пород и геометрии склона рассчитаны основные параметры отвала.

Таблица 8.3 - Геометрические параметры отвала

№ п.п	Параметры отвала	Расчетные значения
1	Насыпной объем отвала	12,4 млн м куб
2	Предельная высота отвала	80м
3	Глубина, на которой может произойти смещение отвала	5м
4	Ширина возможной призмы сползания	11м
5	Предельный угол отвала	22^0
6	Давление пород отвала на основание с учетом давления от снежного покрова	58МПа
8	Сопротивление пород отвала сдвигу по склону	18МП
9	Коэффициент устойчивости отвала при заданных расчетных параметрах	1,5

Учитывая, что на отведенной площади необходимо разместить не менее 20млн.м куб вскрышных пород были проведены несложные эксперименты по

уплотнению раздробленных пород. В результате было установлено, что объем отвала после уплотнения можно увеличить до 40% и разместить до 5 млн м куб.

Общий объем отвала увеличится до 17,4 млн.т. м куб. кроме этого после уплотнения пород увеличивается и их сопротивление сдвигу (рис. 8.5).

Расчетный коэффициент устойчивости отвала должен быть не меньше 1,5. Такой коэффициент устойчивости отвала необходим для предотвращения аварий или создания угрозы для обслуживающего отвалы персонала.

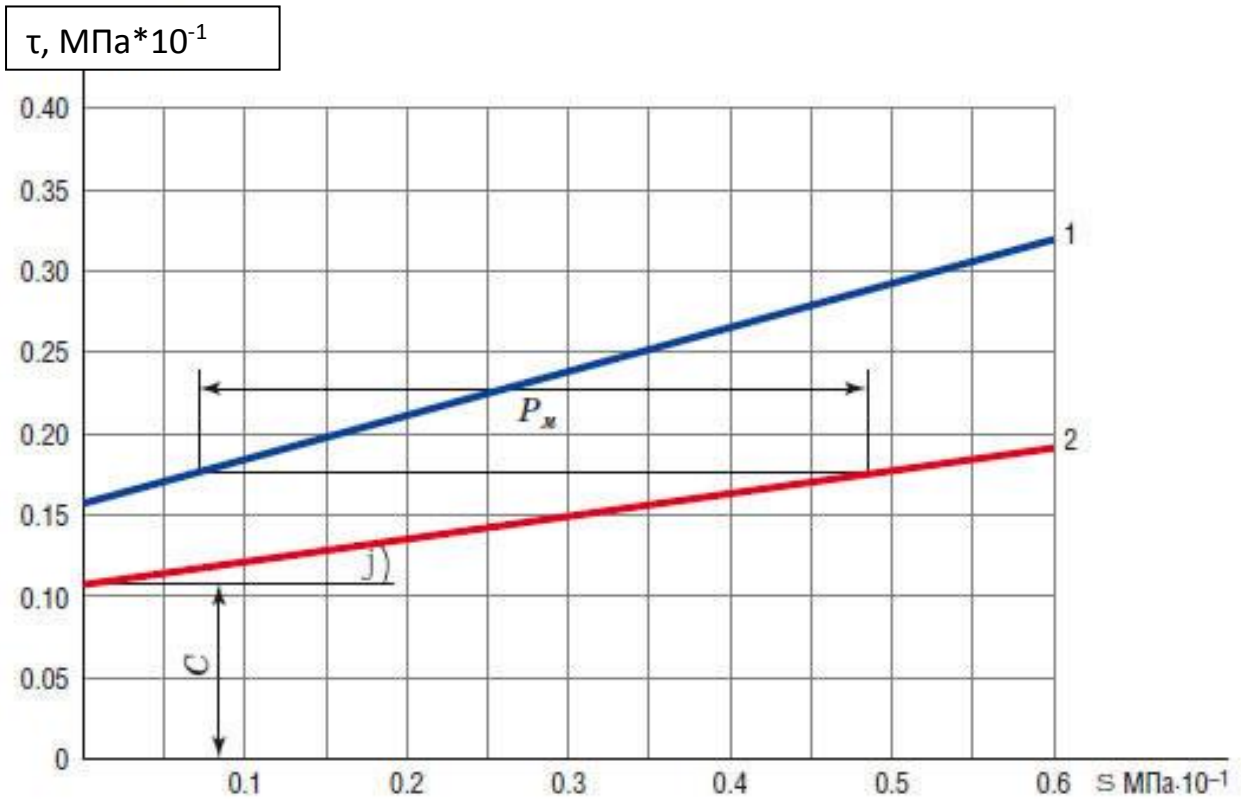


Рисунок 8.5 - График сопротивление сдвигу пород отвала при различной степени уплотнения:

1- степень уплотнения 0,4; 2 – без уплотнения.

Из приведенных расчетов очевидно, что в основном отвале разместить весь планируемый объем вскрыши не представляется возможным. Были проведены аналогичные расчеты для второго отвала (рис.8.5).

Глава 9 Контроль за геомеханическим состоянием прибортового массива и отвалов

Главная цель наблюдений – это выявить механизм оползневого процесса, установить главные причины и параметры деформирования откоса и оценить вклад каждого фактора, а также установить преобладающий из них.

Контроль за состоянием откосов производят при продвигании фронта горных работ на уступе и вскрытии нижележащих горизонтов. Протекающие в массиве горных пород геомеханические процессы, изменения инженерно-геологических и гидрогеологических условий в пределах карьерного поля выявляют на основе натурных наблюдений.

Контроль состояния откосов представляет собой процесс установления соответствия между текущими изменениями геомеханических параметров и заранее установленной нормой. Под нормой понимают заданный коэффициент запаса устойчивости откоса, докритическую скорость деформации или допредельную величину деформации, физические свойства массива до начала развития геомеханических процессов.

Схема контроля состояния откосов следующая: измерение контролируемого геомеханического параметра и сравнение его с нормой, анализ и оценка степени устойчивости откоса.

При наблюдении за состоянием откосов применяют визуальные и инструментальные методы.

Визуальные методы заключаются в обследовании поверхности откосов, выявлении видимых закольных трещин, просадок, смещений, выклинивание подземных вод и последствий буровзрывных работ. По результатам визуальных обследований устанавливаются участки для инструментальных замеров.

Инструментальные методы – это геодезические, геофизические, инженерно-геологические и инженерно- гидрогеологические.

Инструментальные замеры проводят с целью получения количественных закономерностей деформирования откосов на поверхности и в глубине массива по результатам горизонтальных и вертикальных смещений.

Наблюдения за деформациями откосов имеет исключительно важное значение. В результате измерения смещений массива по контрольным точкам, которые устанавливают в приконтурной и рабочей зонах, можно сопоставить их фактические значения с предельными и тем самым составить прогноз возможных обрушений и тем самым предупредить внезапное обрушение породных масс и обеспечить безопасность работ в карьере. Замеры деформаций производят геодезическими и геофизическими методами.

Сущность геофизических методов – это регистрация изменений в распределении физических полей в массиве, связанных с наличием скрытого нарушения приоткосного массива, т.е. формирование зон пластичности, изменение физико-механических и водно-физических свойств массива горных пород. При микроразрушениях изменяются электрические, акустические,

прочностные деформационные свойства горных пород. Геофизические методы позволяют определять в массиве влажность и плотность пород, регистрировать сейсмические колебания, определять напряженное состояние горных пород. Эти методы позволяют оперативно обнаруживать начало формирования очага разрушения.

Наиболее достоверную информацию о развития нарушений в массиве позволяют получить инженерно-геологические методы, которые включают: бурение скважин с отбором кернов для последующего изготовления образцов и определения физико-механических свойств пород, проходка разведочных шурфов и штолен с испытанием прочности пород массива, оценка трещиноватости массива, определение режима подземных вод и обводненности массива в пределах карьерного поля.

Инженерно-геологические методы являются основными при формировании отвалов на слабом основании. Наблюдения за состоянием отвалов проводится по датчикам контроля порового давления, установленных непосредственно в теле отвала.

Основные параметры приоткосного массива, за которыми ведутся наблюдения: структурные особенности массива, трещиноватость, влажность, прочностные характеристики, поровое давление, обводненность, скорость притока подземных вод, интенсивность выветривания, смещение бортов, уступов.

Геомеханический контроль состояния бортовых и отвальных массивов, включает оценку изменения прочностных и деформационных свойств пород, и напряженно состояния приоткосного массива при понижении горных работ.

Рассмотрим подробно методы наблюдения за состоянием породного массива.

9.1 Маркшейдерско-геодезические наблюдения

Основными методами наблюдений являются маркшейдерско-геодезические, основанные на измерении смещений с применением светодальномеров, лазеров и др., наблюдения проводятся систематически с определенной периодичностью, период наблюдений определяется степенью нарушенности массива или его обводненностью. Кроме систематических инструментальных наблюдений за деформациям откосов используют оперативные упрощенные измерения на участках, на которых при визуальном обследовании обнаружены, признаки формирующихся оползневых процессов или существует опасность из внезапного обрушения.

Методами оперативного наблюдения являются:

- Периодическое нивелирование от опорного репера отдельных реперов или их группы, заложенных в прибортовой зоне и на площадках уступов в пределах призмы возможного обрушения;
- Упрощенные измерения образовавшихся трещин с помощью инклинометров на глубине;

- Измерение экстензометрами и тензометрами увеличение или уменьшение длины натянутой проволоки или стержня, соединяющего между собой два репера, закрепленные на определенном расстоянии друг от друга на площадке откоса или в скважине.

Маркшейдерско-геодезические наблюдения производят с целью определения смещения точек массива и их скоростей, величин деформаций сдвига, границ распространения и вида нарушения откосов. Наблюдения за деформациями откосов свидетельствуют, что быстрые смещения никогда не происходят внезапно, им предшествует этап незначительных, нарастающих во времени скоростей деформаций сдвига. Все борта карьеров обладают постоянным смещением в сторону выработанного пространства. Для установления вида деформации откоса необходимо измерить смещения массива в горизонтальной и вертикальной плоскости. Одновременные смещения в горизонтальном и вертикальном направлениях формируют деформации сдвига уступа, борта или отвала. Вертикальное смещение, направленное вниз, называют оседанием, а вверх – выпиранием. Опорные наблюдения за суммарным оседанием и полными деформациями отвалов и бортов карьеров необходимо начинать до формирования отвала и строительства карьера. Для этого закладывают опорные части наблюдательной станции, находящейся вне зоны влияния деформаций отвала, сдвига борта, разуплотнения массива от выемки горной массы в карьере. Рабочие репера располагают на рабочих или нерабочих площадках наблюдения на станциях производится периодически путем нивелирования реперов и измерения расстояния между ними. Перед наблюдениями на станциях задаются точностью измерений и ожидаемыми предельными величинами деформаций откосов. После выполнения нескольких циклов наблюдений устанавливают их периодичность.

Точность измерений смещений и предельные величины деформации откосов бортов карьеров и отвалов задаются техническим заданием научно-исследовательских институтов, систематически оценивающих устойчивость откосов. Периодичность, прекращение и возобновление инструментальных наблюдений зависят от интенсивности ведения горных работ, абсолютного смещения и скорости деформирования отвала или борта карьера. (таблица 9.1).

Оценивают состояние устойчивости откоса по величине деформации сдвига, наблюдаемого по смещению рабочих реперов, заложенных на бермах и площадках бортов или отвалов на определенном расстоянии от опорных. Процесс и вид деформации могут быть представлены как результат изменения пространственного положения рабочих реперов за выбранный интервал времени относительно принятого начального положения и начала отсчета времени.

Таблица 9.1 - Периодичность наблюдений состоянием откосов на карьерах и отвалах

Объект наблюдения	**Вид смещения**	**Скорость смещения, мм/сутки**	**Интервал времени между циклами наблюдений**
Борт карьера в начальный период наблюдения	Полное смещение	Фактическая	Месяц
Борт карьера	Полное смещение	1;	3-4 месяца
		0,5…1	1 –2 месяца
Отвал на прочном основании	Полное смещение	10	Неделя
		>10	Несколько часов
Свежеотсыпанный отвал из песчано-глинистой смеси высотой 20 м	Оседание	5-6	6 месяцев
Свежеотсыпанный отвал из скальных пород смеси высотой 20-40м	Оседание	2-3	Год
Нагорный отвал	Полное смещение	10…50	Неделя
		50…100	Два раза в неделю
		100…200	Через день
		200…300	Ежедневно

Процесс и вид деформации могут быть представлены как результат изменения пространственного положения рабочих реперов за выбранный интервал времени относительно принятого начального положения и начала отсчета времени.

По результатам инструментальных измерений вычисляют высотные отметки и горизонтальное расстояние между реперами профильных линий наблюдательных станций; составляют ведомости вертикальных горизонтальных реперов профильных линий; строят графики горизонтальных деформаций сжатия и растяжения, величин сдвигов, скоростей смещения

реперов по направлению их векторов; составляют и пополняют графики смещений и оседаний и горизонтальных деформаций, скоростей смещений по направлению векторов, плана наблюдательной станции и вертикальных разрезов с уточнением литологии и трещиноватости горных пород, развития трещин, заколов. Деформаций откосов, положения горных работ на периоды закладки станции и наблюдений.

На основе результатов инструментальных наблюдений определяют зоны максимальных сжатий, растяжений, сдвигов, которые соответствуют наиболее вероятному формированию поверхности скольжений, вид оползня или других деформаций откоса, степень опасности деформаций и роль внешних воздействий на устойчивость откосов; разрабатывают мероприятия по стабилизации деформаций и защите откосов от развития опасных смещений.

Светодальномерный способ измерения деформаций откосов применяют при наблюдении за деформациями бортов глубоких карьеров, когда возникает необходимость измерять длину линий между опорными и рабочими реперами, находящимися на значительном расстоянии и противоположных бортах карьера.

Фотограмметррический метод наблюдений – один из наиболее совершенных методов измерения деформаций, позволяющий в любой момент времени определять смещения рабочих реперов по трем координатам. Информация хранится на носителях и может быть воспроизведена в виде объемной модели откоса.

Лазерный метод измерения скорости микродеформаций массива горных пород основан на изучении динамки поля напряжений, характеризующегося частотным спектром микроколебаний, величиной и направлением поступательных перемещений контролируемых точек массива.

Инклинометрические измерения деформаций откосов позволяют измерять наклоны труб, опущенных в буровые скважины на оползнеопасном участке, по которым определяют зону формирования поверхности скольжения, скорость смещения массива и судят об активности оползневого процесса в самых разнообразных и неблагоприятных условиях.

9.2 Инженерно-геофизические методы наблюдения

Для оценки состояния прибортового массива используют геофизические методы, позволяющие получить информацию о напряженно-деформированном состоянии откосов. Это такие методы: электрометрический, звукометрический, электромагнитный, радиоволновой, сейсмоакустическое прозвучивание, наклономерный.

Электрометрический метод наблюдений (ВЭЗ) позволяет контролировать состояние откосов при условии, что приращение электрических сопротивлений горных пород при разрушении массива больше или меньше кажущихся сопротивлений конкретного геоэлектрического разреза. Для определения кажущихся сопротивлений применяется четырех электродная установка, с помощью которой в массиве замеряют разность потенциалов и

силу постоянного тока. Периодичность измерений выбирается в зависимости от опасности участка ведения горных работ и может быть непрерывной. По результатам электрометрических наблюдений строят кривые (ВЭЗ), вертикальные разрезы сопротивлений вкрест и по простиранию борта.

Звукометрический метод наблюдения заключается в измерении частоты сейсмоакустических импульсов, которая позволяет судить о наличии и характере микродеформаций в борту.

Электромагнитный метод наблюдений. Источниками электромагнитного излучения являются массивы, в которых зерна минералов-диэлектриков разрушаются под действием механических нагрузок откоса.

Излучение фиксируют в ближней зоне очага возмущение, где оно проявляется в виде быстро следующих друг за другом серий импульсов электромагнитного поля с длительностью 10^{-7} – 10^{-3} с. Амплитуды импульсов зависят от расстояния точки наблюдения до источника, его форм, интенсивности и кинетики механических нагрузок, вызывающих развитие напряжений и как следствие, геоэлектрических процессов.

Наиболее интенсивно очаг электромагнитных импульсов проявляется при формировании оползневых процессов. Основной метод – это вариационные наблюдения, производимые несколькими станциями. Опорной – расположенной в нормальном геоэлектрическом поле вдали от источника ожидаемого возмущение и индустриальных помех и рабочей станцией, располагаемой вблизи контролируемых участков бортов и уступов. Измеряемая станциями величина – число импульсов электромагнитного поля, превышающих порог чувствительности приборов, которые регистрируются аппаратурой в заданном интервале времени или непрерывно в автоматическом режиме.

Радиоволновой метод наблюдений. Сущность этого метода заключается в регистрации изменения вертикальной составляющей вторичного магнитного поля, напряженность которого зависит от электрических сопротивлений и диэлектрической проницаемости массива горных пород. Измерение электромагнитных волн производится с помощью радиоволнового устройства. Применять радиоволновой метод наблюдений целесообразно для обнаружения в карьерном поле обводненных зон и толщ пород с высоким удельным сопротивлением и низкой диэлектрической проницаемостью выше уровня подземных вод.

Метод сейсмоакустического прозвучивания и продольного профилирования. Применяют для оценки состояния бортов карьера по степени нарушенности скального массива, последняя устанавливается путем сравнения измеренных показателей с эталонными, характеризующими соответствующие уровни развития процесса деформации откоса. Измеряемые показатели – скорость продольной волны в массиве и образце, а производные – изменение коэффициента затухания упругих волн в пределах участка наблюдений за определенный промежуток времени и скорость коэффициента затухания. При наблюдении за состоянием уступов борта карьера по схеме сейсмического прозвучивания источник возбуждения упругих волн

размещается в скважине у подошвы уступа, а приемник последовательно перемещается по простиранию и вкрест простирания откосов уступов или борта.

Наклономерный метод наблюдений– оперативный метод наблюдения за состоянием откосов, при котором применяют наклономеры. Наклономеры – это горизонтальные маятники на земной поверхности и в массиве, с высокой точностью автоматически регистрирующие угловые перемещения измерительных площадок по отношению к вертикали, а методом изолиний на основании наклонограмм, строятся изоповерхности перемещения массива. Для регистрации наклонов борта в штольне по всей длине устанавливают наклономерные станции примерно на равных расстояниях одна от другой. Длина штольни должна быть не меньше половины предельной высоты борта. Каждая станция состоит из двух наклономеров. Один ориентирован в направлении север-юг, другой – восток-запад.

Глава 10 Прогнозирование устойчивости бортов карьера и отвалов

10.1Понятие о прогнозе

Прогноз происходит от греческого слова предвидение, предсказание. Прогноз – это первоначальное научно обоснованное предположение о состоянии любого объекта или явления в будущем.

Под прогнозом устойчивости бортов карьеров и отвалов понимают научно и экспериментально обоснованное поведение прибортового массива и отвалов с течением времени или в измененных природных и техногенных геомеханических условиях. Прогноз выполняется на основе натурных наблюдений за смещениями бортов карьера и отвалов, расчетов и оценки устойчивости прибортового массива и отвалов, выявлении природных факторов, изменяющихся при техногенном воздействии, сопоставлении с подобными явлениями на других карьерах подобного типа. В основе прогноза лежит прогнозирование, т.е. разработка прогноза на основе специальных научных исследований. Прогнозирование производится краткосрочное и долгосрочное. Результатом прогнозирования является разработка прогнозных карт устойчивости бортов, которые позволяют отобразить научное обоснование поведения прибортового массива.

Прогноз устойчивости откосов бортов карьеров осуществляется во времени, т.е. прогнозируется поведение откосов с учетом реологических свойств пород и массива. Промежуток времени, на который разрабатывается прогноз, называется периодом упреждения. Периоды упреждения, в зависимости от значимости прогнозируемого процесса и срока отработки месторождения, бывают *оперативные* – от суток до месяца, *краткосрочные* – от месяца до года, *среднесрочные* – от года до 5 лет, *долгосрочный* – от 5 лет до 15, и *дальнесрочные* – свыше 15 лет.

10.2 Методы прогноза устойчивости бортов карьера

Прогноз играет важную роль в управлении состоянием массива горных пород, так как на его основе принимаются технологические решения, обеспечивающие безопасность геотехнического объекта в период его эксплуатации.

Прогноз устойчивости откосов бортов карьеров осуществляется различными **методами**: эмпирико-статистический и генетический. *Эмпирико-статистический* прогноз предусматривает набор представительного ряда эмпирических данных и с определенной вероятностью установление закономерности развития геомеханического процесса в прошлом для принятия решения на будущее.

Данный метод прогноза строится на результатах проводимых исследований путем аналогии, паспортизации и систематизации нарушения откосов.

При *генетическом прогнозе* выявляют причинно-следственные связи прогнозируемых деформаций уступов, бортов карьеров и отвалов с факторами, влияющими на устойчивость откосов. Этот метод прогноза использует результаты планомерных исследований устойчивости бортов карьера и отвалов конкретного месторождения. Главной задачей генетического метода прогноза устойчивости откосов – это определение критических полных смещений и величин сдвигов бортов и отвалов, после достижения которых начинается быстрое разрушение массива.

В зависимости от объема геоло-горазведочных данных, инженерно-геологической изученности, планов ведения горных работ и технических заданий различают поисковый и нормативный прогноз.

Поисковый прогноз устойчивости – определение возможных состояний массива горных пород в течение всего срока службы карьера или отвала по данным геологоразведочных работ. Разрабатывается этот вид прогноза для стадии проектирования с применением методов инженерно-геологических прогнозов. Эти методы включают: а - сравнительно-геологический метод (метод аналогии), б - моделирования откосов и в - расчетные, учитывающие возможные неблагоприятные условия месторождения и факторы, влияющие на устойчивость откосов. Остановимся на каждом из этих методов.

Метод аналогии – комплекс геологических исследований месторождения и его природного аналога (модели), выполненный в последовательности и объеме, достаточном для перевода полученных выводов с аналога на объект. Этот метод заключается в выявлении сходства разведуемого месторождения с условиями отработанного или разрабатываемого. Сходство устанавливают благодаря геологическому подобию, характеризующемуся соответствующими критериями (геометрический, литологического состава, геодинамический, специальный). Метод аналогий используется для предварительной оценки влияния инженерно-геологических и гидро-геологических условий ведения горных работ, ориентировочного выбора углов наклона бортов, уступов и определения необходимости применения превентивных мероприятий.

Методы моделирования применяют для обоснования схемы расчета устойчивости откосов, ожидаемого механизма их деформирования, рационального профиля борта, учета влияния подземных вод и подработки бортов подземными горными выработками. Моделирование откосов – процесс экспериментирования на геомеханических моделях.

Нормативный прогноз устойчивости заключается в определении путей и сроков достижения допустимы деформаций откосов на различных этапах развития горных работ. Данный вид прогноза используют в период строительства и эксплуатации карьера и отвала. К указанному периоду завершается выполнение основных объемов инженерно-геологических, гидрогеологических, геомеханических и технологических исследований. Главная задача этих исследований заключается в выявлении таких участков бортов, уступов и отвалов, на которых возможны деформации откосов из-за геологических нарушений, изменения гидрогеологических условий и

геомеханических параметров массива. Для этого разрабатываются соответствующие прогнозы.

- **Прогноз геологических нарушений** прибортового массива горных пород, позволяет определить ожидаемые изменения мощности, трещиноватости , углов и азимутов падения пластов и прослоев, тектонические и карстовые нарушения, включения твердых и слабых пород.
- На основании **Гидрогеологического прогноза** устанавливают ожидаемые изменения объемов притоков воды в карьер, уровней и напоров подземных вод, гидравлических градиентов и др.
- Прогноз геомеханических параметров предвидит ожидаемые изменения сопротивления горных пород сдвигу, плотности, влажности, модуля упругости пород массива. Конечная цель прогноза – установление допустимых высот и углов наклона бортов и режима формирования контуров карьера и отвала (интенсивности выемки горной массы и нагружения основания отвала вскрышными породами). Высота уступа, борта карьера, отвала углы их откосов это главные геометрические параметры, которые определяют расчетными методами.

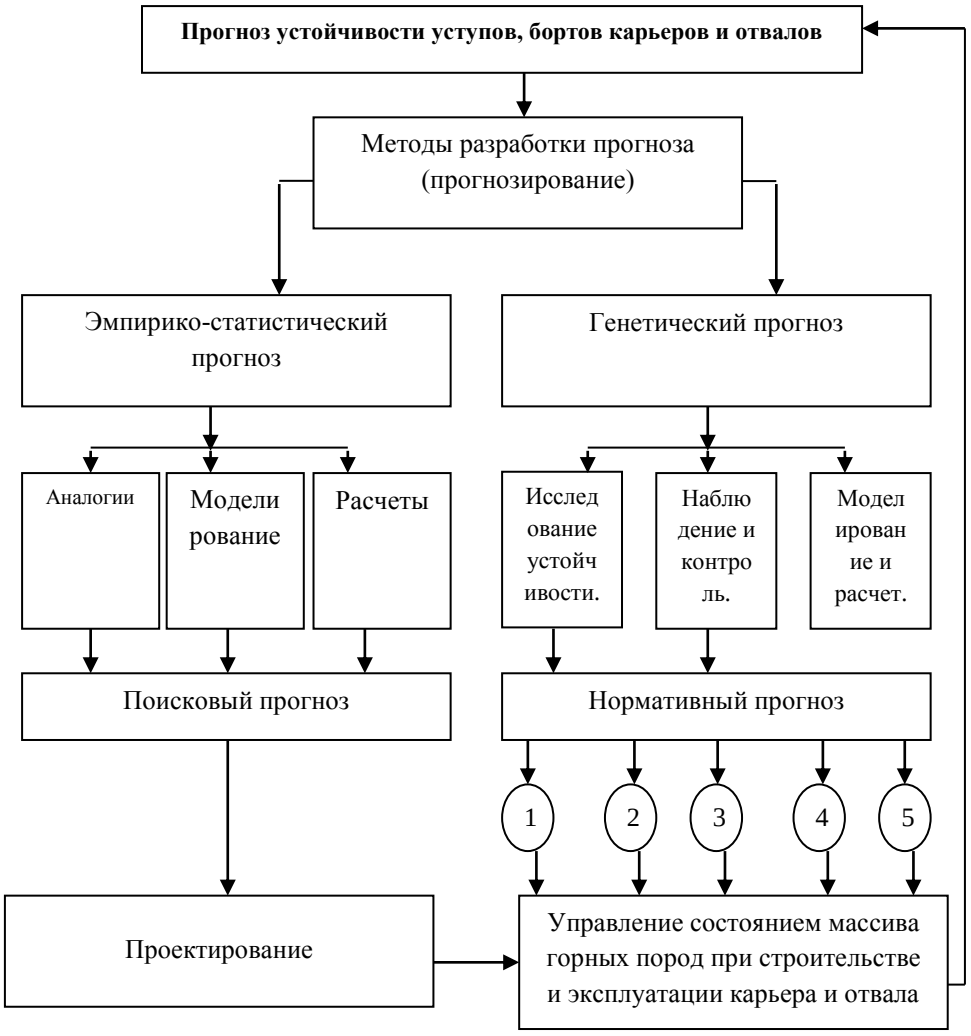


Схема комплексной системы прогнозирования устойчивости откосов

1-оперативный; 2-краткосрочный; 3-среднесрочный; 4-долгосрочный; 5-дальнесрочный.

При выемке горной массы прибортовой массив оказывается в постоянно изменяющемся неравномерном объемном напряженном состоянии.

Состояние массива горных пород, при котором даже незначительное изменение объемным и поверхностных сил приводит к потере равновесия откосов, называется предельным напряженным состоянием (ПНС).

Следует отметить, что области предельно напряженного состояния возникают при определенных условиях и зависят от геометрических параметров борта карьера и геомеханических характеристик породного массива.

При условии, что смещения бортов не превосходит величин упругих деформаций, области ПНС не возникают. ПНС откосов приобретает определяющее значение при переходе на глубины 300 и более метров. На этих глубинах начинают развиваться пластические деформации, зависящие от горнотехнических условий. В основе оценки предельно напряженного состояние лежит теория предельного равновесия Кулона –Мора или Хук-Брауна, последняя позволяет учитывает качество массива.

Глава 11 Способы управления геомеханическим состояниям прибортового массива

Совершенствование технологии открытой разработки месторождений позволяет увеличить глубину карьера до отметок 500-700 м. Для таких карьеров вопросы длительной устойчивости бортов на предельном контуре приобретают важное значение с точки зрения безопасности и экономической эффективности ведения горных работ. Максимально крутые углы наклона бортов карьера, обеспечивающие минимальные объемы вскрышных работ, достигаются конструированием с учетом применяемого горно-транспортного оборудования.

Однако, чисто только конструкторский подход к решению проблемы устойчивости бортов карьера ограничивается инженерно-геологическими условиями массива горных пород. Если конструктивные параметры карьера не обеспечиваются условиями устойчивости отдельных уступов и бортов, то необходимо уменьшать углы откосов или направленно изменять состояние массива путем применения специальных технологических и инженерных методов управления состоянием откосов.

Уменьшение углов откосов приводит к снижению технико-экономических показателей открытого способа разработки. Для примера, уменьшение угла наклона борта карьера глубиной 400 м с 55^0 до 45^0 приводит к увеличению объема вскрыши до 40 млн. $м^3$ на 1 км протяженности борта.

11.1 Технологические способы управления геомеханическим состоянием прибортового массива

Цель технологических приемов управления состоянием откосов – отыскание таких способов вскрытия, систем разработки, типов применяемого горно-транспортного оборудования, способов ведения буровзрывных работ и осушения карьерных полей, которые исключали бы случаи нарушения устойчивости уступов и бортов.

К *основным технологическим способам управления состояния откосов* относят: маневрирование горными работами, рациональное вскрытие и раскройку карьерного поля, изменение параметров уступов и борта, направление и скорость подвигания фронта горных работ, специальную заоткоску уступов.

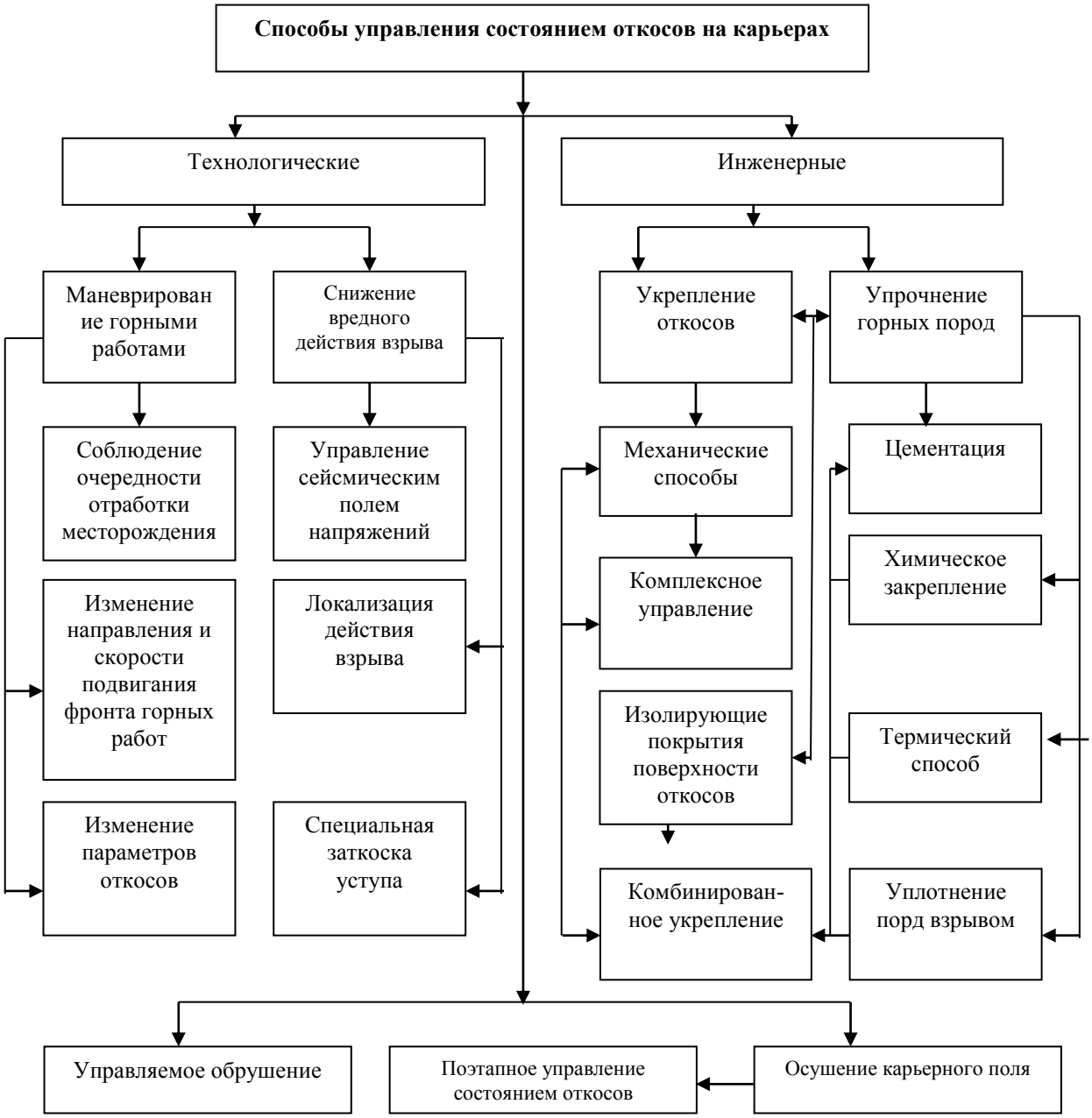


Схема управления геомеханическим состоянием откосов на карьерах

11.2 Инженерные способы управления геомеханическим состоянием откосов

Цель инженерных способов управления состояние откосов – сохранение проектных параметров уступов и бортов карьеров путем механического их укрепления, сохранения или повышения естественной прочности горных пород в массиве. Сущность укрепления деформирующихся откосов механическими способами – это создание в определенной части массива горных пород такого напряженного состояния, которое препятствует развитию в нем разрушающих сдвиговых деформаций. Укрепительные противооползневые конструкции и сооружения, воспринимая давление призмы

обрушения, передают его в область массива, которая находится вне зоны формирования поверхности скольжения.

Механическое укрепление откосов производится при помощи свай, шпон, штанг (анкеров) и гибких тросовых тяжей, защитных покрытий стенок, подпорных стен и контрфорсов.

Упрочнение массива горных пород это искусственное закрепление, улучшение физико-механических свойств и фильтрационных свойств горных пород, слагающих откос. В зависимости от инженерно-геологических условий участка карьера для восстановления нарушенных структурных связей в трещиноватых горных породах или для создания новых дополнительных связей в рыхлых отложениях применяют следующие способы упрочнения: цементацию, силикатизацию или нагнетание в массив других укрепляющих растворов, электросиликатизацию, электрохимическую и термическую обработку, уплотнение пород энергией взрыва.

Целесообразность искусственного поддержания устойчивости уступов определяется технико-экономическими расчетами, основными показателями которых являются объем сокращения вскрыши, её стоимость, стоимость на затрат на противооползневые мероприятия.

Инженерные методы применяют в случае:

- если направление простирания крупных тектонических нарушений, трещин, слоистости массива пересекается под углом менее 45^0 с направлением простирания откосов уступов;
- в зонах интенсивной трещиновтости, склонных к выветриванию горных пород, тектонических разломов и нарушений с большими амплитудами смещения пластов:
- в зонах с неблагоприятно ориентированной слоистостью массива горных пород, падающей в сторону выработанного пространства под углом $20 \div 30^0$;
- когда невозможно осуществить выполаживание борта при работах на глубоких горизонтах.

Состав проекта по укреплению уступов и бортов карьера должен включать:

- исходные данные геологоразведочных работ и инженерно-геологических изысканий;
- расчеты устойчивости борта на участках укрепительных работ;
- способы укрепления, упрочнения и изоляции горных пород в откосах;
- паспорта укрепления откосов;
- технико-экономические расчеты и сравнительные варианты укрепления.

При оценке инженерных способов укрепления откосов важнейшими являются стоимостные показатели и сроки строительных работ, варианты способов укрепления оцениваются:

экономической целесообразностью, затратами на конструкции противооползневого сооружения; расходом материалов; сроком строительства,

зависящего от времени стояния незакрепленного откоса; долговечностью конструкций.

11.3 Маневрирование горными работами

Управление устойчивостью откосов путем маневрирования горными работами применяется в случаях, когда корректировка высоты и угла наклона не дает желаемого результата по предотвращению развития необратимых деформаций откосов, или приводит к разносу бортов карьера, что в свою очередь влечет увеличение объема вскрышных пород.

Маневрирование горными работами включает следующие технологические приемы:

- соблюдение очередности отработки месторождения,
- изменение подвигания фронта работ,
- изменение параметров уступов.

Обоснованием маневрирования горными работами является сложное геологическое строение массива горных пород, на основании которого производят расчет устойчивости бортов и уступов.

Особое внимание уделяется расположению вскрывающих выработок, которые следует располагать в устойчивых породах. Выбор стационарных внутренних съездов осуществляют на участках массива с падением слоев и поверхностей ослабления в сторону массива.

Отработку карьерного поля следует начинать с разработки той его части, где наиболее благоприятные условия, а затем осваивать массив сложенный слабыми литологическими разностями и имеющий структурное ослабление, с тем, чтобы сократить время стояния откосов.

Заключение

Ведение горных работ, извлечение полезного ископаемого из недр оказывает большое влияние на геологическую среду, т.е. естественное состояние земли и создает новую геомеханическую среду с новыми свойствами – техносферу. Знание свойств геологической среды и их изменение при техногенном воздействии, является важнейшим элементом безопасного ведения горных работ. При этом необходимо владеть современными методами исследования массива горных пород.

Борта карьеров необходимо рассматривать как сложные геотехнические объекты, обеспечение устойчивости которых необходимо на всех стадиях: проектировании, строительстве, эксплуатации. Сложность обеспечения устойчивости бортов карьера определяется детальностью изучения инженерно-геологических и геомеханических особенностей прибортового массива, определяющих параметры карьера и порядок ведения работ.

На любой стадии ведения горных работ необходимы обширные знания о физико-механических свойствах пород, слагаемых прибортовой массив, свойства самого массива, его строение, степень нарушенности. Особое внимание на стадии проектирования необходимо уделять изучению естественного поля напряжений в пределах региона и непосредственно месторождения, это позволит оценить его изменение при ведении горных работ и определить параметры борта карьера и уступов, при которых будет обеспечена их устойчивость.

Важно уметь прогнозировать устойчивость бортов карьера и отвала на весь срок отработки месторождения и своевременно разрабатывать способы управления геомеханическими процессами, протекающими в прибортовом массиве.

Список использованной литературы

1. Бондарик Г.К. Системный подход при инженерно-геологических прогнозах. 27 МГК. Инж. геол. секция. Т.17. 1984. С.17.
2. Арманд А.Д. Устойчивость (гомеостатичность) географических систем к различным типам внешних воздействий. Устойчивость геосистем. М.: Недра, 1983. С.14-31.
3. Галустьян Э.Л. Геомеханика открытых горных работ. - М., Недра, 1992,-272с.
4. Галустьян Э.Л. Методы оценки устойчивости откосов нагорных карьеров. //Горный журнал № 11-12, 2002, С. 9-12.
5. Галустьян Э.Л. Типизация геологических условий и оценка устойчивости бортов карьеров.//Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 1999, № 4, С. 48-53.
6. Глазовская М.А. Геохимия природных и техногенных ландшафтов СССР. М. Высш. шк. 1988. 327с.
7. Гурин А.Н., Цевелев П.А. Оценка условий локальных деформаций высоких уступов при крутопадающих поверхностях ослабления массива. "Записки Горного института", том 146, 2001 г.
8. Долгоносов В.Н., Шпаков П.С., Низаметдинов Ф.К., Ожигин С.Г., Ожигина С.Б., Старостина О.В. Аналитические способы расчета устойчивости карьерных откосов. - Караганда: «Санат-Полиграфия», 2009. - 332 с.
9. Епишин В.К., Трофимов В.Т. Геологическая среда и инженерные сооружения - сложные природно-технические системы. Теоретические основы инженерной геологии. Социально экономические аспекты. М., Недра, 1985. С.32-45.
10. Иофин С.Л. Устойчивости бортов карьеров. Металлургиздат М.: 1953. 91с.
11. Клубов С.В., Прозоров Л.Л. Геоэкология: понятия, современное состояние. - М.: ВНИИ зарубежгеология, 1993. 208с.
12. Кожогулов К.Ч., Никольская О.В. Геомеханика: учебник. Б.:КГТУ им.И.Раззакова,2014.-224с.
13. Королев В.А., Николаева С.К. Геоэкологическая оценка зон влияния инженерных сооружений на геологическую среду. М., Геоэкология. 1994. №5. С.25-37.
14. Кузьмин С.Б. Активные разломы как фактор геоморфологического риска и их ландшафтообразующая роль. Геоморфология. №1. М. 1998 с. 3-9.
15. Куприянова Т.П. Обзор представлений об устойчивости физико-географических систем. Устойчивость геосистем. М.: Недра, 1983. С.7-13.
16. Ломтадзе В.Д. Инженерная геология. Инженерная геодинамика. Л. Недра. 1977.
17. Мамаев Ю.В., Куринов М.Б. Вопросы методологии в оценке устойчивости территорий. Геоэкология. №5. 1998. с. 109-126.

18. Молоков Л.А. Опыт изучения области взаимодействия сооружений и геологической среды. Инж. геология 1982. №3. С.14-25.
19. Никонов А.А. Активные разломы: определение и проблемы выделения. Геоэкология. 1995, № 4. С. 16-27.
20. Никонов А.А. Современные движения земной коры на территории СССР // Основные проблемы неотектоники. М., Наука, 1986. С.25-35.
21. Осипов В.И. Геоэкология - междисциплинарная наука об экологических проблемах геосфер. Геоэкология. 1993. № 1. С.4-18.
22. Пузаченко Ю.Г. Инвариантность геосистем и их компонентов. Устойчивость геосистем. М.: Недра, 1983. С.32-41.
23. Котлов Ф.В. Изменение геологической среды под влиянием деятельности человека. М., Недра. 1978. 262с.
24. Пустовойтова Т.К., Гурин А.Н. Обеспечение безопасности работ на бортах глубоких карьеров в сложных горно-геологических условиях. Сб. ”Проблемы геодинамической безопасности”. СПБ, ВНИМИ, 1997.- С.72-76.
25. Рудько Г.И. Инженерно-геологические аспекты управления геологической средой. I Всесоюзный съезд инж.-геол., гидрогеол., геокриол. Киев, 1988. Ч 2. с. 132-134.
26. Сергеев Е.М. Проблемы инженерной геологии в связи с охраной и рациональным использованием геологической среды. Вестн. МГУ. Сер. 4. Геология. 1987. №5. С.77-86.
27. Трофимов В.Т., Герасимова Н.С., Красилова Н.С. Устойчивость геологической среды и факторы ее определяющие. Геоэкология. 1994. №2. С.18-28.
28. Турсбеков С.В. Геомеханическое обеспечение устойчивости карьерных откосов. Алматы, КазНТУ, 2011, 213 с.
29. Фисенко Г.Л. Устойчивость бортов карьеров и отвалов. М., Недра, 1965, 256 с.
30. Морозов В.Н., Татаринов В.Н. Методика выбора участков земной коры для размещения экологически опасных отходов. Геоэкология. 1996. №6. С.109-120.
31. Фисенко Г.Л., Сапожников В.Т. Обеспечение безопасного ведения горных работ в условиях деформирующихся бортов карьеров /Сдвижение земной поверхности и устойчивость откосов. – Л.; ВНИМИ, 1988, С.88-95.
32. Richard H.Sillitoe Exploration and discovery of base- and precious-metal deposits in the Circum-Pacific region during the last 25 years. Metalminingagencyof. Japan, 1995. p.127,

Приложение

минерал Однородное по составу и строению химическое соединение или самостоятельно существующий химический элемент в твердом агрегатном состоянии, возникшие в земной коре в результате физико-химических процессов
горная порода Устойчивая по составу и строению природная ассоциация одного или нескольких минералов или минеральных агрегатов
скальная горная порода Твердая горная порода с пределом прочности при одноосном сжатии, превышающем 30 МПа
полускальная горная порода Твердая горная порода с пределом прочности при одноосном сжатии от 5 до 30 МПа
связная горная порода Горная порода, имеющая водно-коллоидную связь между частицами минералов и минеральными агрегатами
рыхлая горная порода Горная порода, залегающая в земной коре в виде скопления раздельных зерен и обломков минеральных агрегатов
разрушенная горная порода Первоначально твердая или связная горная порода, утратившая связи между минеральными частицами и минеральными агрегатами в результате внешнего воздействия
горная масса Одна или совокупность нескольких разрушенных горных пород, получаемых в результате разработки месторождения
массив горных пород Часть земной коры, состоящая из совокупности горных пород, сформировавшихся в определенной геологической обстановке, и характеризующаяся присущими ей физическими, химическими и геологическими параметрами
породный массив Часть земной коры, подверженная влиянию горных работ
структурный блок горной породы Часть массива горных пород, ограниченная системой естественных трещин
отдельность горной породы Кусок горной породы характерной формы, обусловленной генезисом, образующийся в результате разрушения по естественным плоскостям ослабления
представительный объем горной породы Наименьший объем горной породы, достоверно характеризующий ее свойства, состав и строение
проба горной породы Специально отобранный представительный объем рыхлой или разрушенной горной породы, предназначенный для исследований

штуф Кусок горной породы, отделенный от массива и предназначенный для исследований
керн горной породы Цилиндрический столбик горной породы, выбуриваемый из массива горных пород или штуфа
образец горной породы Кусок горной породы определенной формы, изготовленный для испытаний из штуфа или керна
полезное ископаемое Минеральное образование, используемое либо непосредственно в сфере материального производства, либо для извлечения химических элементов и их соединений
внутренние факторы горной породы Состав, строение и генезис горной породы, обусловливающие ее тип и свойства
внешние факторы горной породы Силы, силовые и энергетические воздействия, и вещественные среды, вызывающие изменения свойств и состояния горной породы
физический процесс в горной породе Процесс, происходящий в горной породе при взаимодействии внешних и внутренних факторов и приводящий к изменению ее физического состояния
физико-химический процесс в горной породе Процесс, приводящий к изменению агрегатного, фазового состава и микроструктуры горной породы
вещественное поле в горной породе Пространственно-временное распределение привнесенных в горную породу твердых, жидких или газообразных веществ
поле механических напряжений в горной породе Пространственно-временное распределение механических напряжений в горной породе
деформация горной породы Показатель изменения размеров, формы и объема куска или породного массива в результате воздействия внешних факторов
состояние горной породы Совокупность внешних факторов, воздействующих на данную горную породу, и вызванных ими изменений в горной породе
напряженно-деформированное состояние породного массива Состояние породного массива, характеризуемое совокупностью в нем компонентов напряжений и деформаций
свойство горной породы Присущая данной горной породе особенность, отражающая ее поведение при воздействии внешних факторов
физическое свойство горной породы Свойство горной породы, характеризующее протекание физических процессов в горной породе
показатель горной породы

Характеристика, количественно оценивающая состояние горной породы
минеральный состав горной породы Количественное содержание минералов, входящих в состав данной горной породы
строение горной породы Форма, размеры, взаимное пространственное расположение и связь в горной породе минеральных зерен и минеральных агрегатов
текстура горной породы Характеристика строения горной породы, определяющая взаимное расположение и ориентировку минеральных агрегатов горной породы
структура горной породы Характеристика строения, определяющая размеры, форму и взаимную связь составляющих минерального агрегата
микроструктура горной породы Структура минеральных зерен и межзеренных границ в горной породе
статистический тип строения горной породы Строение, характеризующееся отсутствием преимущественной ориентации, равномерным распределением зерен и минеральных агрегатов в горной породе
матричный тип строения горной породы Строение, характеризующееся наличием крупных включений минеральных зерен или агрегатов в основной однородной минеральной среде
слоистый тип строения горной породы Строение, характеризующееся чередованием прослоек различных минералов, минеральных агрегатов или плоскостей ослабления
прожилковый тип строения горной породы Строение, характеризующееся наличием в породе минералов, агрегатов или пор в виде пучков, волокон, каналов с преимущественной ориентацией
параметр строения горной породы Характеристика, численно оценивающая строение горной породы
анизотропность горной породы Изменчивость физических параметров горной породы по направлениям их определения
коэффициент анизотропии горной породы Параметр строения, численно характеризующий анизотропность горной породы и равный отношению соответствующих физических параметров, определенных во взаимно перпендикулярных направлениях
коэффициент неоднородности горной породы Параметр строения, характеризующий разброс формы и размеров минеральных зерен или агрегатов горной породы, относительно среднего их значения
объемный коэффициент трещиноватости горной породы Параметр строения, характеризующий интенсивность развития трещин и равный количеству трещин в единице объема горной породы
линейный коэффициент трещиноватости горной породы Параметр строения, характеризующий интенсивность развития трещин, равный количеству трещин на единицу линейного размера горной породы
коэффициент трещинной пустотности горной породы Параметр строения, равный объему пустот, образованных трещинами в единице объема

горной породы
гранулометрический состав горной породы Распределение по размерам количества в горной массе или породе составляющих ее кусков, зерен, частиц
коэффициент формы зерен горной породы Параметр строения, характеризующий форму зерен минералов, минеральных агрегатов в горной породе или кусков рыхлой и разрушенной горной породы
влажность горной породы Массовая доля свободной и физически связанной воды в горной породе, находящейся в данных условиях
коэффициент водонасыщения горной породы Показатель, характеризующий степень заполнения водой порового объема находящейся в данных условиях горной породы
льдистость горной породы Объемная или массовая доля льда в горной породе в данных условиях
газоносность горной породы Общее количество газов, содержащихся в единице объема или массы горной породы в свободном и сорбированном состоянии
коэффициент газонасыщения горной породы Показатель, характеризующий степень заполнения газами порового объема горной породы, находящейся в данных условиях
газообильность горной породы Показатель, равный количеству газа, выделяющегося из единицы массы или объема горных пород при их добыче
плотностные свойства горной породы Свойства, характеризующие взаимосвязь между массой и объемами горных пород или минералов
плотность горной породы Масса единицы суммарного объема твердой фазы в горной породе
объемная масса горной породы Масса единицы объема сухой горной породы в ненарушенном состоянии
насыпная масса горной породы Масса единицы объема рыхлой или разрушенной горной породы
коэффициент разрыхления горной породы Параметр, показывающий, во сколько раз изменяется объем горной породы при ее разрушении
механические свойства горной породы Свойства, характеризующие возникновение, распределение и изменение механических напряжений и деформаций в горной породе при воздействии механических нагрузок
упругие свойства горной породы Механические свойства, характеризующие процессы упругого деформирования горных пород
прочностные свойства горной породы Механические свойства, характеризующие процессы разрушения горных пород

предел прочности горной породы при одноосном сжатии Предельное одноосное сжимающее напряжение, при котором происходит разрушение горной породы
предел прочности горной породы при одноосном растяжении Предельное одноосное растягивающее напряжение, при котором происходит разрушение породы
предел прочности горной породы при сдвиге Предельное касательное напряжение, при котором происходит разрушение породы
предел прочности горной породы при срезе Предельное напряжение, при котором происходит разрушение породы под воздействием встречных сил, действующих в одной плоскости
предел прочности при объемном сжатии горной породы Предельное сжимающее напряжение, при котором происходит разрушение горной породы, находящейся в условиях объемного напряженного состояния
длительная прочность горной породы Предел прочности горной породы при соответствующей длительности действия нагрузки
предел длительной прочности горной породы Максимальные напряжения, выдерживаемые горной породой без разрушения при любой длительности их действия
паспорт прочности горной породы Зависимость предельных разрушающих касательных напряжений от действующих в горной породе нормальных напряжений, графически представляющая собой огибающую серии предельных кругов напряжений
угол внутреннего трения горной породы Показатель паспорта прочности горной породы, равный углу наклона касательной к огибающей предельных кругов напряжений в точке ее пересечения с осью касательных напряжений
коэффициент внутреннего трения горной породы Показатель паспорта прочности горной породы, равный отношению приращения нормальных и касательных разрушающих напряжений - тангенсу угла внутреннего трения
сцепление в горной породе Показатель паспорта прочности, равный пределу прочности горной породы при срезе в условиях отсутствия нормальных напряжений
модуль деформации горной породы Отношение приращения нормальных напряжений в горной породе к соответствующему приращению упругих и пластических деформаций
модуль полной деформации горной породы Отношение предела прочности горной породы к ее предельной деформации
предельная деформация горной породы Максимальная деформация горной породы при нагрузке, равной ее пределу прочности

коэффициент поперечных деформаций горной породы Отношение относительной поперечной деформации горной породы к ее относительной продольной деформации при данном уровне напряжений
дилатансия горной породы Превышение прироста объема горной породы по отношению к его упругому изменению при нагружении, обусловленное деформациями сдвига
пластические свойства горной породы Механические свойства, характеризующие процессы пластического деформирования горной породы
коэффициент пластичности горной породы Параметр, оценивающий пластичность горной породы и определяющий вклад пластических деформаций в разрушение горной породы
модуль пластичности горной породы Параметр, оценивающий пластичность горной породы и равный отношению прироста напряжений выше предела упругости к полной пластической деформации горной породы
верхний предел пластичности связной горной породы Параметр, характеризующий влияние воды на пластичность связной горной породы и равный влажности, при которой порода теряет способность сохранять форму
нижний предел пластичности связной горной породы Параметр, характеризующий влияние воды на пластичность связной горной породы и равный влажности, при которой порода теряет способность хрупко разрушаться
число пластичности горной породы Параметр, характеризующий пластичность влажной связной горной породы и равный разности между ее верхним и нижним пределами пластичности
реологические свойства горной породы Механические свойства, отражающие влияние длительного воздействия нагрузок на изменение напряженно-деформированного состояния горных пород
коэффициент ползучести горной породы Параметр, характеризующий реологические свойства горной породы и равный относительному изменению пластической деформации горной породы за определенный период времени действия напряжений
период релаксации напряжений в горной породе Параметр, равный времени, в течение которого напряжения в горной породе в результате релаксации убывают в *e* раз
коэффициент структурного ослабления породного массива Параметр, характеризующий степень отличия прочности породного массива от прочности образца горной породы
полная влагоемкость горной породы Параметр, равный максимально возможной массовой доле свободной и физически связанной воды, которую способна вместить данная горная порода
коэффициент фильтрации горной породы Параметр, характеризующий скорость перемещения флюидов в горной породе при единичном градиенте давления

горно-технологические свойства горной породы Свойства, характеризующие взаимодействие между горной породой и инструментом, механизмом или технологическим процессом при производстве горных работ
крепость горной породы Горно-технологическое свойство, характеризующее сопротивляемость горной породы разрушению в процессах горного производства
коэффициент крепости горной породы Параметр, оценивающий количественно крепость горных пород
твердость горной породы Параметр характеризующий сопротивляемость поверхностного слоя горной породы разрушению или деформированию
контактная прочность горной породы Параметр, характеризующий сопротивляемость поверхностного слоя горной породы разрушению при внедрении индентора в необработанную поверхность
смерзаемость горной породы Горно-технологическое свойство, характеризующее способность увлажненной, разрушенной горной породы переходить в монолитное состояние в результате воздействия отрицательных температур
технологические свойства горной породы Свойства, характеризующие качество, полезного ископаемого применительно к его последующему использованию или переработке

ОСНОВЫ ГЕОМЕХАНИКИ ПРИ ОТКРЫТОЙ РАЗРАБОТКЕ МЕСТОРОЖДЕНИЙ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ

Отпечатано с авторского оригинала

Кожогулов Камчибек Чонмурович
Турсбеков Серик Вахитович
Никольская Ольга Викторовна
Турсбекова Галия Жанмолдановна
Турсбеков Нуржан Серикович

Компьютерная верстка Лукъянов К.А.
Дизайн Авилкин Е.А.

Подписано в печать 29.06.2016 г. Формат 60x84 1/16 Бумага офсетная
Объем 9,1 п.л. Тираж 500 экз. Заказ №470

Копировальный салон ИП «Авил2010».
г. Алматы, ул. Масанчи д. 104, оф. 3