

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ УКРАИНЫ**  
**ГОСУДАРСТВЕННОЕ ВЫСШЕЕ УЧЕБНОЕ ЗАВЕДЕНИЕ**  
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ГОРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»**



**А.С. КОВРОВ**

**УСТОЙЧИВОСТЬ БОРТОВ КАРЬЕРОВ**  
**В СЛОЖНОСТРУКТУРНОМ МАССИВЕ**  
**МЯГКИХ ПОРОД**

**Монографія**

**Днепропетровск**  
**НГУ**  
**2013**

УДК 622.271.33:624.121

ББК 33.1

К 56

Рекомендовано до видання вченою радою Державного вищого навчального закладу «Національний гірничий університет» (протокол № 6 від 25 червня 2013 р.)

Рецензенти:

*М.С. Четверик* – доктор технічних наук, професор, завідувач відділу геомеханічних основ технології відкритої розробки Інституту геотехнічної механіки ім. М.С. Полякова НАН України (м. Дніпропетровськ);

*О.О. Сдвижкова* – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри вищої математики Державного вищого навчального закладу «Національний гірничий університет» (м. Дніпропетровськ).

**Ковров А.С.**

К 56 Устойчивость бортов карьеров в сложноструктурном массиве мягких пород: моногр. / А.С. Ковров. – Д.: Национальный горный университет, 2013. – 131 с.

ISBN 978 – 966 – 350 – 415 – 5

Изложены результаты исследований, на основе которых были установлены геомеханические закономерности устойчивого состояния откосов и бортов карьеров с учетом сложной геологической структуры, гидрогеологических характеристик и нагрузок горно-транспортного оборудования.

Материал монографии может быть использован в учебном процессе при изложении лекций по дисциплинам «Механика грунтов», «Механика горных пород», «Охрана земной поверхности», при изучении вопросов геомеханической оценки устойчивости естественных и техногенных откосов, прогноза оползнеопасных ситуаций, для дальнейшей разработки и усовершенствования методов анализа напряженно-деформированного состояния массива мягких вскрышных пород, а также специалистами научно-исследовательских учреждений для разработки проектной документации.

УДК 622.271.33:624.121

ББК 33.1

ISBN 978 – 966 – 350 – 415 – 5

© О.С. Ковров, 2013

© Державний ВНЗ «НГУ», 2013

## СОДЕРЖАНИЕ

Стр.

<b>ВВЕДЕНИЕ</b>	<b>5</b>
<b>ГЛАВА 1. СОВРЕМЕННЫЕ ТЕНДЕНЦИИ РАЗВИТИЯ ОТКРЫТОГО СПОСОБА РАЗРАБОТКИ МЕСТОРОЖДЕНИЙ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ</b>	<b>7</b>
1.1. Мировые тенденции развития открытых горных работ	7
1.2. Минерально-сырьевая база Украины	9
1.3. Состояние и перспективы открытой разработки месторождений в Украине	11
1.4. Особенности технологических процессов при разработке россыпных месторождений на Вольногорском ГМК	19
1.5. Управление состоянием породного массива при открытой разработке месторождений	23
<b>ГЛАВА 2. ОБЗОР ТЕОРЕТИЧЕСКИХ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ В ОБЛАСТИ ГЕОМЕХАНИКИ ОТКОСОВ И БОРТОВ КАРЬЕРОВ</b>	<b>27</b>
2.1 Современное состояние исследований по геомеханике откосов	27
2.2. Факторы, влияющие на устойчивость откосов и бортов карьеров	28
2.3. Анализ нарушений устойчивости бортов карьеров	31
2.4. Методы расчета откосов, основанные на гипотезе плоской поверхности скольжения	32
2.5. Методы расчета откосов, основанные на гипотезе криволинейной поверхности скольжения	36
2.6. Анализ современных теорий прочности применительно к оценке устойчивости откосов и бортов карьеров	43
2.7. Оценка устойчивости откосов в однородном массиве пород	47
<b>ГЛАВА 3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССА ДЕФОРМИРУЕМОСТИ ГОРНЫХ ПОРОД</b>	<b>58</b>
3.1. Моделирование на эквивалентных материалах	58
3.2. Подбор эквивалентных материалов и методика моделирования	63
3.3. Экспериментальные испытания образцов пород на сдвиг	72

<b>ГЛАВА 4. ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА НАРУШЕНИЯ УСТОЙЧИВОСТИ ОТКОСОВ В СЛОЖНОСТРУКТУРНОМ МАССИВЕ МЯГКИХ ГОРНЫХ ПОРОД</b>	<b>77</b>
4.1. Влияние сложной геологической структуры и обводнения массива пород на устойчивость откосов карьеров	77
4.2. Оценка нагрузки горно-транспортного оборудования на устойчивость вскрышных уступов карьеров	95
<b>ГЛАВА 5. ПРИМЕНЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЙ ОЦЕНКИ УСТОЙЧИВОСТИ ОТКОСОВ И БОРТОВ КАРЬЕРОВ, СЛОЖЕННЫХ МЯГКИМИ ПОРОДАМИ</b>	<b>104</b>
5.1. Рекомендации по прогнозу устойчивости уступов для условий Мотроновско-Анновского участка Малышевского циркон-рутил-ильменитового месторождения	104
5.2. Расчет экономической эффективности мероприятий по контролю устойчивости откосов	118
<b>ЗАКЛЮЧЕНИЕ</b>	<b>121</b>
<b>СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ</b>	<b>122</b>

## ВВЕДЕНИЕ

Современные тенденции развития минерально-сырьевой базы свидетельствуют о дальнейшем расширении открытого способа разработки месторождений полезных ископаемых. При этом, в стратегических планах горных работ должны одновременно учитываться как улучшение технико-экономических показателей, так и соблюдение безопасности труда с экологической составляющей [1].

В настоящее время и на прогнозируемую перспективу открытый способ разработки месторождений является основным в Украине, им добывается около 80% всех полезных ископаемых [2].

Современный этап развития открытого способа разработки месторождений характеризуется усложнением горно-геологических условий при одновременном возрастании требований к уменьшению отрицательного воздействия на окружающую среду. Интенсивное развитие открытых горных работ сопровождается ростом объемов вскрышных пород и глубин разработок, которая на многих рудных карьерах в настоящее время превышает 200 м. Для размещения огромного объема пустых пород на поверхности земли требуются значительные территории. Общая площадь земель, нарушенных открытым способом разработки, оценивается в пределах 2 млн.га. Причем, большая их часть расположена в земледельческих районах с высокой плотностью населения [3]. При добыче 1 млн. т угля нарушается от 3 до 43 га земли, железной руды - от 14 до 600 га, марганцевой руды - от 76 до 600 га, известняка - от 60 до 120 га, фосфоритов - от 22 до 77 га [4]. Действующие карьеры имеют глубину до 300-500м, проектная глубина некоторых карьеров составляет 700-1000 м [5].

Значительная роль в решении задач по рациональному использованию минеральных ресурсов отводится управлению состоянием массива горных пород и в частности вопросам определения оптимальных углов наклона бортов карьера, обеспечивающих их устойчивость и минимальный разнос. Цель такого управления заключается в обеспечении безопасного ведения горных работ и сокращении объемов вскрыши при сохранении устойчивости откосов уступов. Уточнение коэффициента запаса устойчивости бортов карьера только на 5%, в конечном итоге, может позволить уменьшить объем вскрыши и площадь карьера от 1,5 до 20 % в зависимости от горно-геологических условий разработки при сохранении объемов извлекаемого полезного ископаемого [3].

Под управлением состояния природных и техногенных массивов понимается совокупность мероприятий по поддержанию и переводу уступов, бортов карьеров и отвалов в устойчивое, близкое к предельному и неустойчивое состояние путем изменения в процессе разработки формы и параметров откосов, регулирования продолжительности обнажения или направленного изменения физико-механических свойств пород, обеспечивающих применение экономичных и безопасных способов открытой разработки.

В то же время современный уровень теоретических проработок в области управления состоянием горного массива (применительно к открытым горным

работам) не позволяет в полной мере удовлетворить запросам инженерной практики.

Исследования, изложенные в настоящей монографии, направлены на установление геомеханических закономерностей устойчивого состояния откосов и бортов карьеров, сложенных мягкими вскрышными породами, с учетом сложной геологической структуры, гидрогеологических характеристик и нагрузок горно-транспортного оборудования.

# Г Л А В А 1

## СОВРЕМЕННЫЕ ТЕНДЕНЦИИ РАЗВИТИЯ ОТКРЫТОГО СПОСОБА РАЗРАБОТКИ МЕСТОРОЖДЕНИЙ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ

### 1.1. Мировые тенденции развития открытых горных работ

Доля открытого способа добычи твердых полезных ископаемых в мире с 1964 по 1970 г. возросла с 65 до 70 %, в том числе на металлических рудах с 50 до 60 %, а на угле с 33 до 35%. В бывшем СССР с 1955 по 1984 г. доля открытого способа при добыче железных руд возросла в 1,8 раза, руд цветных металлов - в 1,4 раза, марганца - в 6 раз, угля - в 2,5 раза (табл. 1.1).

Таблица 1.1

Мировая доля добычи полезных ископаемых открытым способом, % [6]

Полезное ископаемое	1955	1960	1965	1970	1975	1984
Железная руда	48,9	58,7	71,8	79,2	82,5	85,9
Руды цветных металлов	46,8	50,0	61,5	70,0	65,2	-
Марганцевая руда	10,8	29,5	55,0	61,5	65,6	5,7
Уголь	16,6	20,0	24,0	26,7	32,7	41,3

В настоящее время на территории государств СНГ эксплуатируется около 6500 карьеров, на которых выполняется более  $\frac{3}{4}$  объема горных работ [7].

Столь бурный рост открытой разработки связан не только с целым рядом экономических, технологических, социальных ее преимуществ перед подземным способом, но вызван дальнейшим ростом потребности в полезных ископаемых и обусловлен достижениями научно-технического прогресса в области обогащения, горной техники, транспорта и т. д., что дало возможность освоить целый ряд сравнительно неглубоко залегающих месторождений, эксплуатация которых ранее была нецелесообразна или невозможна по различным причинам (бедное содержание, сложные горно-геологические условия и т. п.) [6].

Характерной особенностью современных железорудных карьеров является то, что в процессе строительства и эксплуатации их проектные параметры, в том числе и размеры, в результате доразведки, внедрения новой техники и технологий многократно пересматриваются. Так, в 1982 г. Южгипрорудой составлены проекты V очереди карьера ЮГОКа в связи с увеличением глубины с 300 до 500 м, и Полтавского ГОКа - до глубины 700 м.

Если учесть, что карьеры производительностью более 10 млн. т сырой руды в год имеют срок службы не менее 30 лет [8], то по мере совершенствования техники и технологии производства работ и прироста запасов в дальнейшем не исключается возможность пересмотра проектных параметров карьеров. Технико-экономические расчеты уже сейчас показывают реальность строительства карьеров-гигантов на базе ЮГОКа и НКГОКа конечной глубиной 900-1000 м длиной 6,3 км, шириной до 5 км и производительностью 150-180 млн. т руды в год.

Глубина карьеров других отраслей горнодобывающей промышленности не во многом уступает железорудным и достигает 350 м. Проектная глубина карьеров цветной металлургии составляет в основном 400-600 м.

Основными тенденциями открытого способа разработки в настоящее время являются:

- вовлечение в разработку месторождений со сложными инженерно-геологическими и гидрогеологическими условиями;
- дальнейшее увеличение единичной мощности карьеров;
- высокая концентрация и интенсификация работ;
- увеличение глубины карьеров;
- применение более производительных транспортных механизмов и комплексов, расширение использования циклично-поточной технологии.

Аналогичные тенденции наблюдаются в горнодобывающей промышленности за рубежом. Наибольшая доля открытых разработок в США, где открытым способом добывается 77% полезных ископаемых. В США, а также Канаде и Австралии доля добычи железных руд открытым способом составляет 95-97%. Самым крупным в мире считается меднорудный карьер «Бин-гэм Каньон», работающий с 1904 г., производительность которого достигала 160 млн. т по горной массе и 40 млн. т по руде. С учетом нагорной части (460 м) его глубина составляет 800 м, а проектом предусматривается увеличение до 900-950 м. Меднорудный карьер «Сиеррита» производительностью 33 млн. т по руде и 50,6 млн. т по вскрыше запроектирован до глубины 564 м, а карьер «Пинто Вэлли» с учетом нагорной части - свыше 1000 м.

Железорудные карьеры, расположенные в районе Великих Озер (бассейн Месаби), разрабатывают пологопадающие мощные (до 250 м) рудные тела таконитов. Толща покрывающих рыхлых пород до 50 м, проектная глубина 100-200 м. Производительность по сырой руде карьера «Хиббинг» достигает 29 млн. т, «Ризерв Майнинг» - 34 млн. т, «Миннтак» (2 карьера) - 36 млн. т. Для месторождений характерны простые гидрогеологические условия.

До 95 % железной руды в Канаде добывается открытым способом. На карьере «Маунт Райт» компании «Квебек Картье» добыча сырой железной руды превышает 45 млн. т в год, «Керол-Лейн» - 47 млн. т. Проектная глубина карьера составляет 600 м (в настоящее время около 300 м).

Железорудные месторождения Австралии находятся в благоприятных горно-геологических условиях: рудные тела обычно выходят на поверхность; коэффициент вскрыши колеблется от 0,4 т/т на карьерах рудника «Маунт-Том Прайс» до 4-6 т/т на карьерах рудника «Сэвидж Ривер» (в среднем 1,15-1,20 т/т); обводненность месторождений незначительна. Крупные нагорные карьеры расположены в Андах: «Куахоне» производительностью 23 млн. т медной руды, «Токепала» глубиной 520 м, «Чукикамата» производительностью 36 млн. т горной массы. Объем добычи на рудниках достигает: «Коу» (Бразилия) - 46 млн. т железной руды; «Бугенвиль» (Папуа-Новая Гвинея) - 30 млн. т медной руды; «Маунт Вейлбек» (Австралия) - 29 млн. т железной руды; «Хамерсли» (Австралия) - 40 млн. т железной руды [9].



Вышеприведенный анализ свидетельствует о том, что в мировой практике развития горной промышленности открытый способ разработки месторождений по сравнению с подземным сохраняет лидирующие позиции.

## 1.2. Минерально-сырьевая база Украины

Украина принадлежит к одному из наиболее насыщенных минеральными ресурсами регионов мира. По данным Государственного кадастра недр на начало 2008 года насчитывалось 8658 месторождений 97 видов полезных ископаемых и почти 12000 их проявлений. По объему разведанных запасов угля, железных, марганцевых и титаноциркониевых руд, а также графита, каолина, калийных солей, серы, огнеупорных глин, облицовочного камня Украина принадлежит к ведущим странам мира. Так, запасы угля по сравнению с мировыми составляют 7,1%, железных руд - 15, марганцевых - 42,8, серы - 17,2% [10].

По запасам и добыче железных, марганцевых, титаноциркониевых руд, многих видов неметаллического сырья Украина занимает ведущее место среди стран СНГ, Европы и мира. Занимающая территорию 0,4 % мировой суши и имеющая население 0,8 % от населения земного шара, она в конце 80-х - начале 90-х годов обеспечивала около 5 % мирового объема добычи полезных ископаемых [11]. В Украине насчитывается более 3 тысяч месторождений, на базе которых работает более 2 тысяч горнодобывающих предприятий. Соотношение добычи по основным видам полезных ископаемых иллюстрирует рис. 1.1.

В объемах добычи доминируют металлические полезные ископаемые, нерудное сырье для металлургии и особенно полезные ископаемые для строительства, а также каменный уголь. По данным ГНПП "Геоинформ Украины" Минприроды Украины динамика добычи полезных ископаемых за период 2001-2009 г.г. имеет устойчивый восходящий тренд (табл. 1.2) [12].

Таблица 1.2

Добыча полезных ископаемых в Украине в 2001-2009 годах, млн. т\*

Группа полезных ископаемых	2001	2003	2005	2007	2009
Горючие	78,2	80,0	79,0	75,1	73,4
Металлические	137,2	172,0	176,7	187,1	173,8
Горно-химические	7,5	8,0	8,9	8,3	7,4
Горнорудные	1,8	2,2	2,85	3,1	3,0
Нерудные для металлургии	39,6	50,2	53,1	58,4	56,2
Для строительства	52,7	98,1	105,5	144,6	141,1
Всего	317,0	410,5	426,0	476,6	454,9

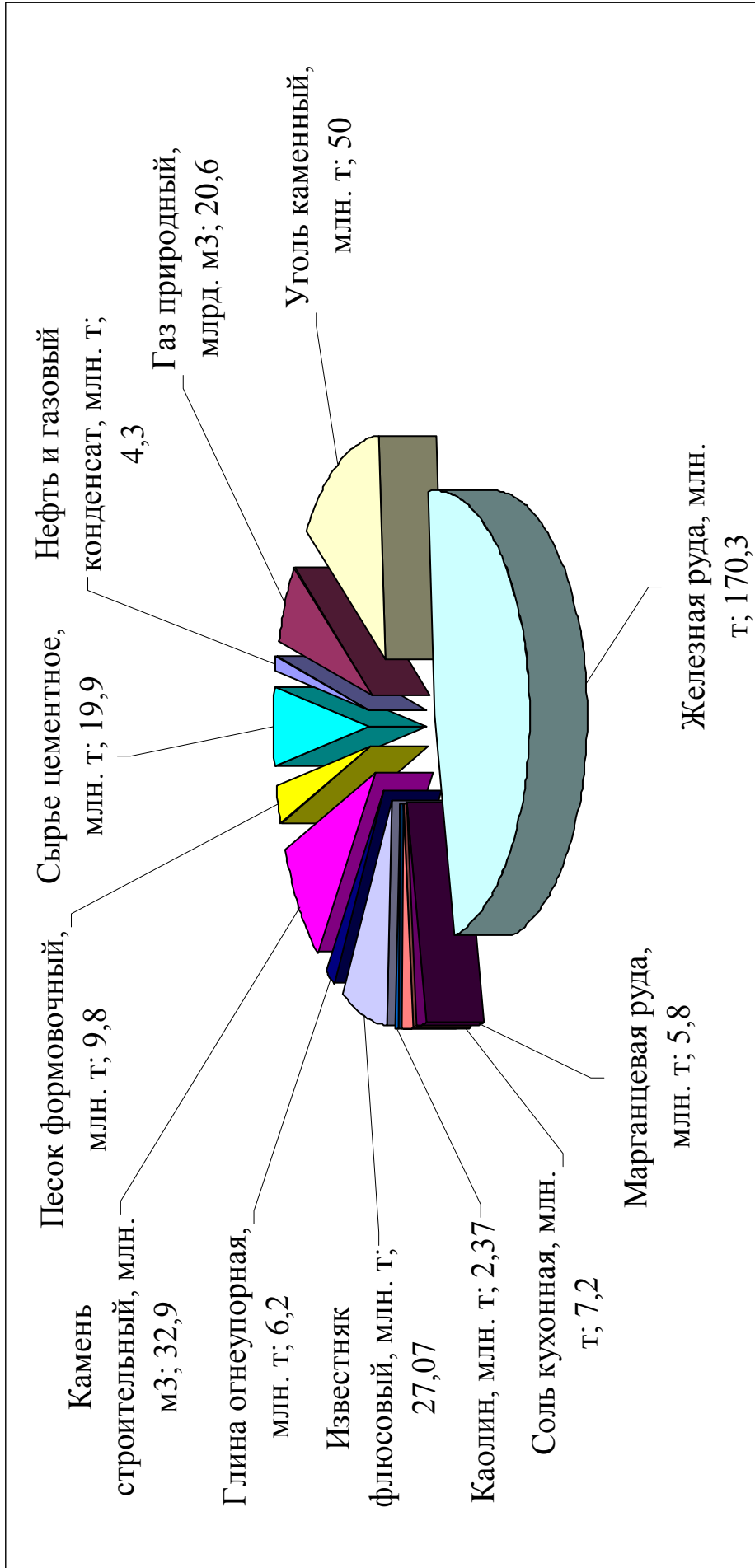


Рис. 1.1. Соотношение объемов добычи основных видов минерального сырья в 2008 г.  
(по данным ГНПП «Геоинформ України»)

Самые высокие темпы роста отмечаются в группе полезных ископаемых для строительства (рис. 1.2).

Большинство полезных ископаемых добывается в Украине в пределах нескольких главных горнопромышленных регионов - Донецкого, Криворожско-Никопольского, Прикарпатского. По данным геологической службы в Украине выявлены перспективные для освоения месторождения бурого угля, марганца, меди, свинца, цинка, золота, молибдена, ванадия, редкоземельных элементов и других видов полезных ископаемых. Прогнозируется подготовка на их базе инвестиционно привлекательных объектов недропользования [10].

Украина является крупным экспортером минерально-сырьевой продукции. На внешний рынок преимущественно поставляется железорудное сырье (в виде концентрата, агломерата и окатышей), марганцеворудная и флюсовая продукция. Значительные объемы экспорта приходятся также на титаноциркониевые концентраты и продукты их переработки (титан, цирконий, пигментная двуокись титана), каменную соль, строительный камень, декоративно-облицовочные камни.

На ближайшую перспективу в Украине основное приоритетное значение в развитии минерально-сырьевого комплекса Украины будут иметь:

- топливно-энергетические ресурсы;
- сырье для горно-металлургического комплекса, в первую очередь для действующих предприятий черной металлургии;
- сырье для горно-химического комплекса и сельского хозяйства.

Учитывая особенности геологического строения перспективных для освоения месторождений, разработка их целесообразна открытым способом.

### **1.3. Состояние и перспективы открытой разработки месторождений в Украине**

Открытая разработка месторождений полезных ископаемых осуществляется преимущественно на железорудных, марганцеворудных и флюсодобывающих предприятиях, представляющих основу горнопромышленного комплекса черной металлургии Украины. Состояние и технико-экономические показатели этого комплекса определяются его сырьевой базой и конъюнктурой внешнего и внутреннего рынков.

В настоящее время горнопромышленный комплекс включает 10 предприятий различной формы собственности по добыче железной руды, 2 предприятия по добыче марганцевой руды и 4 предприятия по добыче флюсосодержащего сырья.

Наиболее крупным объединением горнорудных предприятий является Государственная акционерная компания - ГАК «Укррудпром», которая включает 4 предприятия по добыче железных руд открытым способом и их переработке: ОАО «СевГОК», ОАО «ЦГОК», ОАО «ЮГОК», ОАО «ИнГОК». Кроме того, в состав горнопромышленного комплекса входят предприятия по добыче

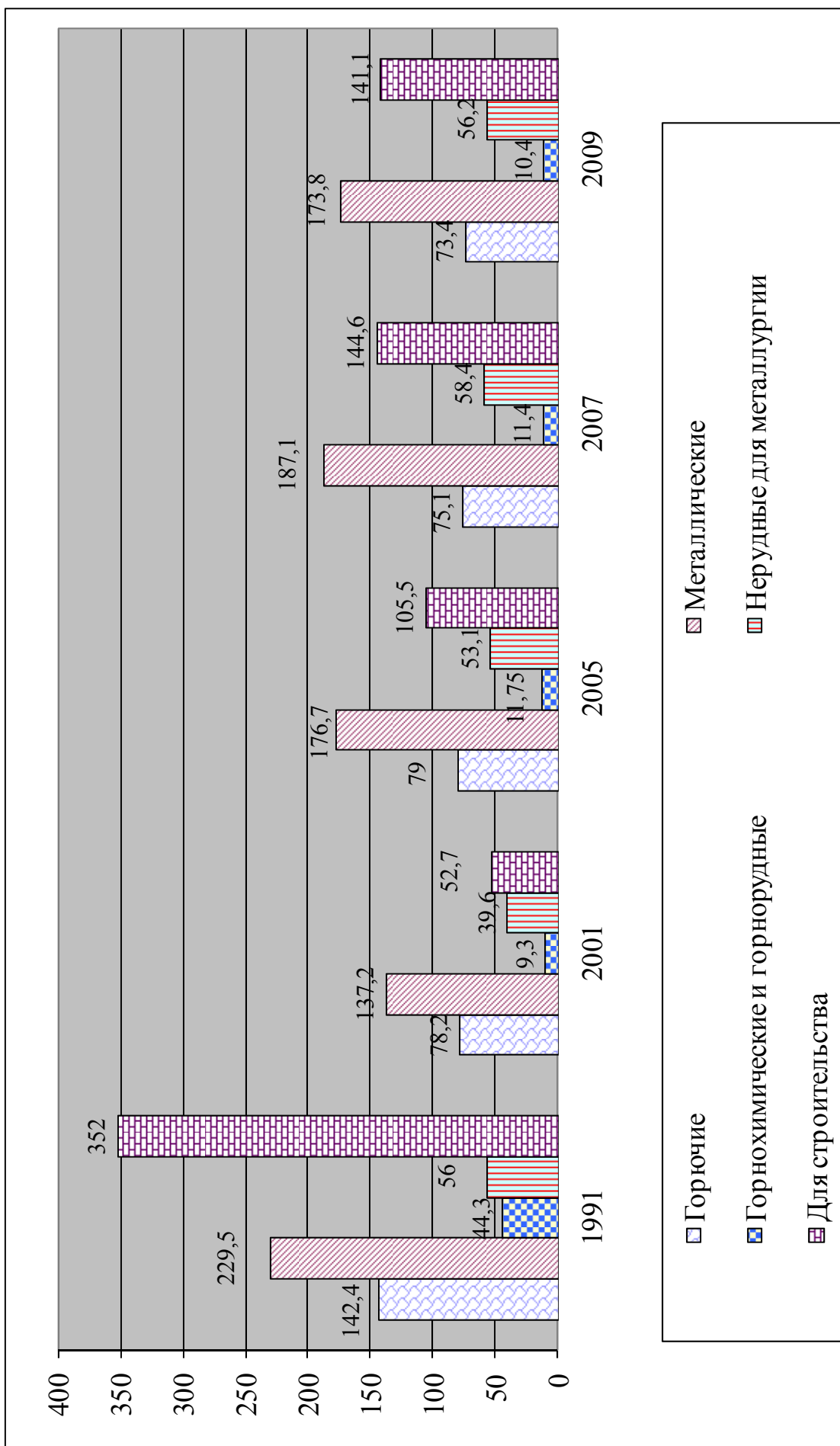


Рис. 1.2. Динамика добычи полезных ископаемых в Украине, млн. т

железных руд открытым способом - ОАО «Полтавский ГОК». Марганцевую руду добывают открытым способом - ОАО «Орджоникидзевский ГОК», открытым и подземным способом - ОАО «Марганецкий ГОК». Флюсоосодержащее сырье открытым способом добывают ОАО «Докучаевский ФДК», ОАО «Новотроицкое РУ», ОАО «Балаклавское РУ», ОАО «Комсомольское РУ». Россыпные месторождения титано-циркониевых руд разрабатывают Вольногорский горно-металлургический комбинат (ВГМК), Иршанский горно-обоганительный комбинат (ИГОК) и Демурицкий ГОК [13].

В стране получили развитие как подземный, так и открытый способы разработки железорудного сырья. Активизация открытого способа разработки была связана с необходимостью значительного увеличения объемов производства. С начала 70-х годов и до настоящего времени открытая разработка месторождений преобладает (рис. 1.3) [14]. Этот способ добычи полезных ископаемых является наиболее перспективным в техническом, экономическом и социальном отношении. Благодаря мощной индустриальной базе и значительным запасам полезных ископаемых, расположенных близко к земной поверхности, этим способом в настоящее время добывается примерно  $\frac{3}{4}$  общего объема твердого минерального сырья [15].

Прогрессивный открытый способ разработки месторождений полезных ископаемых имеет тенденции дальнейшего развития при условии совершенствования техники, технологии и организации горного производства

В табл. 1.3 приведены основные производственные показатели работы железорудных комбинатов Украины за период 2000-2010 г.г. [16], что свидетельствует об устойчивой тенденции развития отрасли.

С 1997 г. по объему внешней торговли железная руда занимает первое место в списке неэнергетического минерального сырья - мировой объем ее экспорта в денежном выражении превышает 10 млрд. долларов США [17].

Экспорт железорудного сырья значительно зависит от конъюнктуры мирового рынка, приоритетов внешней политики Украины, а также активности субъектов внешнеэкономической деятельности (рис. 1.4).

Согласно вышеприведенным данным за период 2000-2010 г.г. тенденция роста поставок металлургической продукции за рубеж сохраняется.

Таблица 1.3

Основные производственные показатели железорудных комбинатов Украины

Показатели	Годы					
	2000	2002	2004	2006	2008	2010
Добыто горной массы, тыс. м <sup>3</sup>	79,828	85,308	100,63	122,674	110,127	126,432
тыс. т	242,835	256,038	304,146	368,022	330,381	379,296
сырой руды, тыс. т	103,311	107,92	121,701	132,171	136,57	153,694
вскрыши, тыс. м <sup>3</sup>	50,075	54,892	70,251	87,352	71,782	83,556
в т.ч. скальных пород	41,37	46,441	59,837	75,385	58,877	69,583
наносов	8,704	8,452	10,226	11,967	12,905	13,973

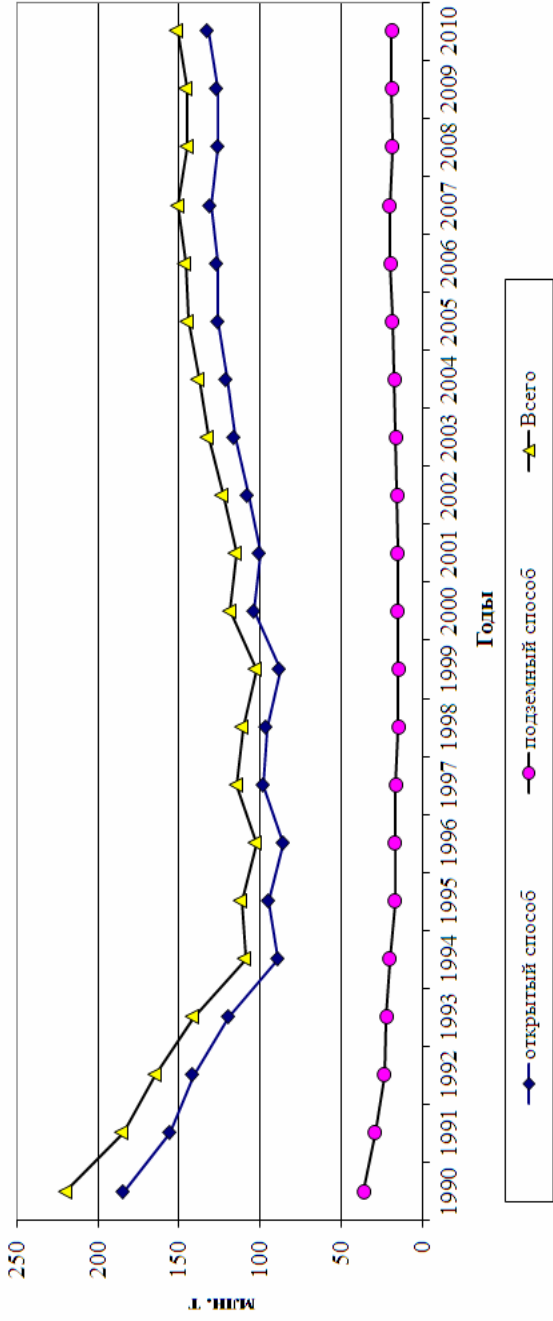


Рис. 1.3 - Добыча сырой железной руды в Украине по способам разработки

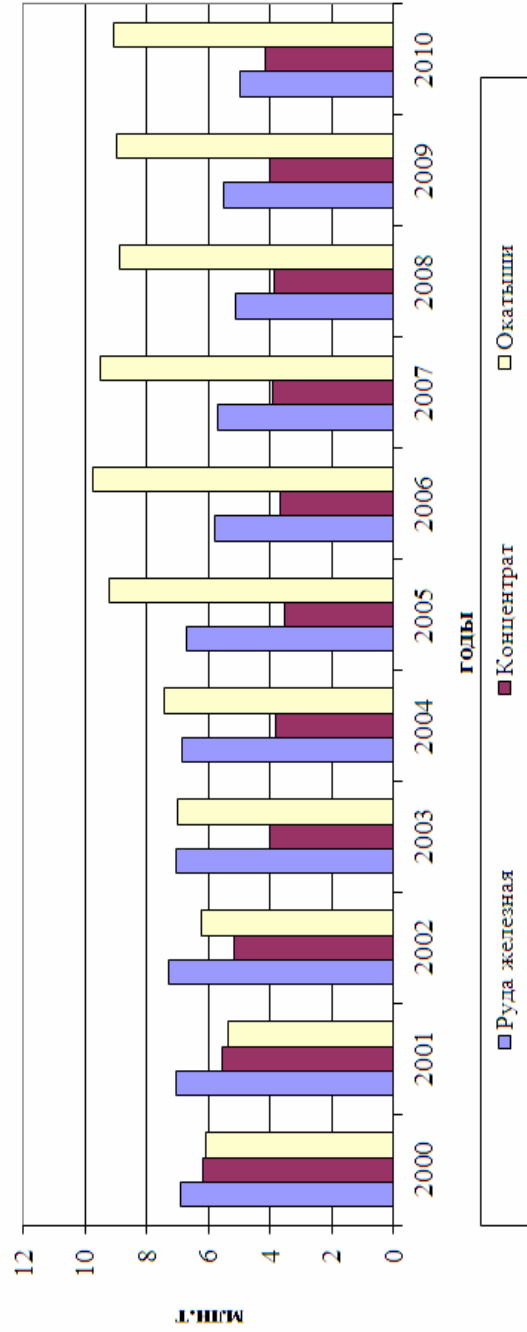


Рис. 1.4. Экспорт металлургического сырья

Более 85% экспорта железорудной продукции приходится на страны Восточной Европы, в числе которых лидируют Чехия, Словакия, Польша и Австрия. Несмотря на последствия мирового экономического кризиса 2008-2009 г.г. объем экспортных поставок в эти страны продолжает возрастать, что способствует развитию горных работ и увеличению выпуска продукции [18].

Учитывая важность развития горнопромышленного комплекса и рост экспортных поставок горнорудной продукции, объем капитальных вложений на горнодобывающих предприятиях Украины за период 2000-2010 г.г. постоянно растет, что показано на рис. 1.5. В период экономического спада 2008-2009 г.г. наблюдается уменьшение расходов на капитальное строительство, однако в 2010 г. тенденция к росту возобновляется [16].

Вышеприведенные данные свидетельствуют о росте спроса на горнорудную продукцию, как для внутреннего, так и внешнего рынка.

Флюсовые предприятия Украины поставляют горную продукцию для металлургии и для строительства. Основные производственные показатели работы флюсовых предприятий представлены на рис. 1.6.

За период 2000-2010 г.г. объемы производства сохраняются на относительно постоянном уровне, что свидетельствует о стабильном спросе на продукцию. Экспорт флюсового сырья и готовой продукции осуществляется преимущественно в Беларусь, Молдову и Россию [17].

Марганцево-рудное сырье в Украине добывают и обогащают на ОАО «Марганецкий ГОК» и ОАО «Орджоникидзевский ГОК». Эти ГОКи отрабатывают Никопольское месторождение марганцевых руд. Отработка руд на Марганецком ГОКе ведется как подземным (77,5% общей добычи), так и открытым (22,5%) способами. Проектные мощности карьеров освоены на 56,9%. ОАО «Орджоникидзевский ГОК» добывает руду только открытым способом, их проектные мощности освоены на 70,4%.

Основные производственные показатели по марганцеворудным предприятиям показаны на рис. 1.7.

Перспективы развития открытого способа добычи марганцевых руд в бассейне довольно неопределенные, т.к. требуется отвод новых земель (сельскохозяйственных угодий), которые находятся в частном владении и для развития карьеров их необходимо будет покупать у владельцев. Однако переход на подземный способ разработки также довольно проблематичен, т.к. строительство шахт требует больших капитальных затрат и как показала практика десяти лет на ввод в эксплуатацию. Наиболее перспективным в настоящее время является открыто-подземный способ разработки. При этом сокращаются площади земли под горный отвод, снижаются капитальные затраты на 25-30% [18].

Россыпные месторождения титаноциркониевых руд являются ценным стратегическим сырьем Украины. Наиболее мощное россыпное комплексное циркон-рутил-ильменитовое Малышевское месторождение разрабатывает Вольногорский горно-металлургический комбинат (ВГМК). На базе Иршанских ильменитовых россыпей работает Иршанский ГОК.

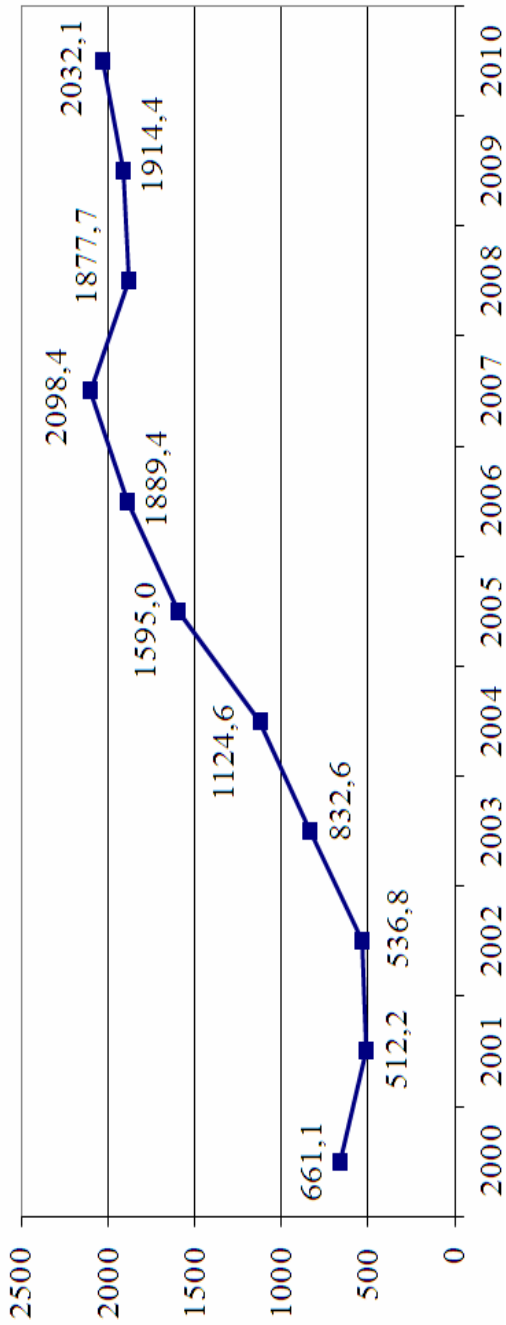


Рис. 1.5. Объемы капитальных вложений на горнодобывающих предприятиях Украины за 2000-2010 гг., млн. грн

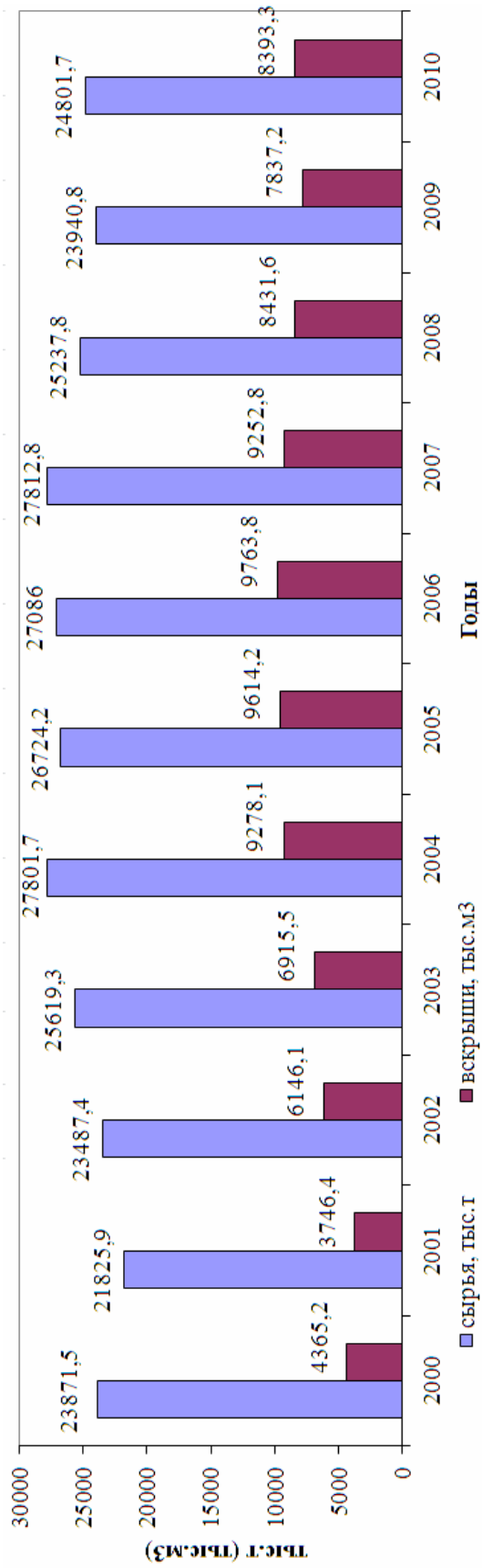


Рис. 1.6. Основные производственные показатели флюсовых предприятий



На рис. 1.8 и 1.9 приведены объемы производства горных работ ВГМК и ИГОКа, а также динамика добычи титаноциркониевых руд в Украине за период с 1990 по 2010г.

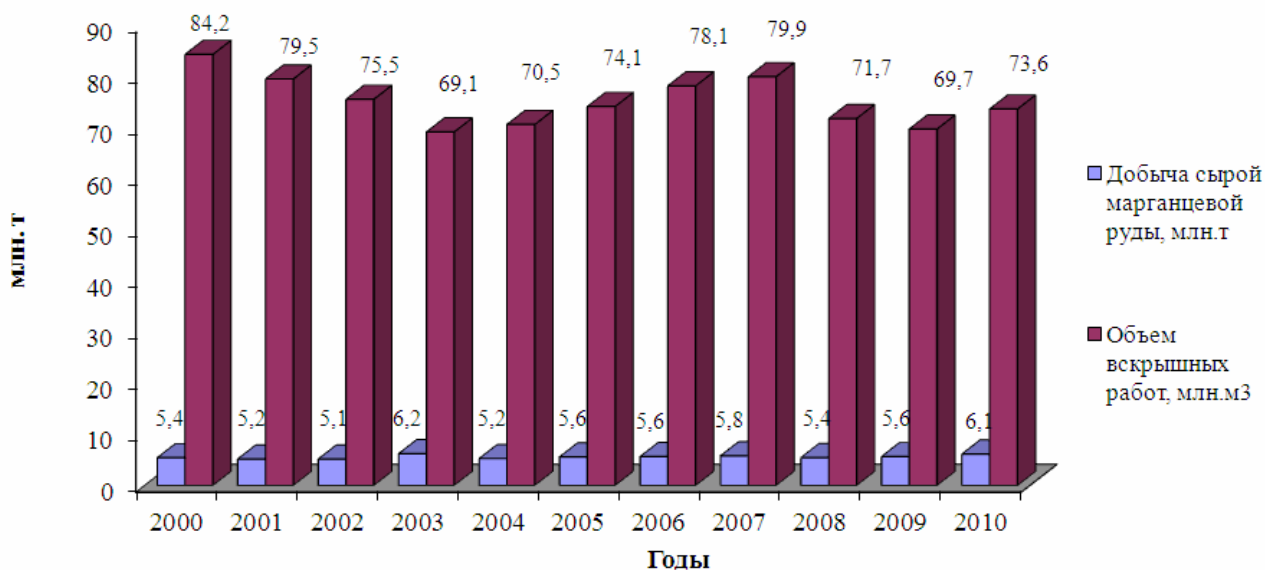


Рис. 1.7. Объем горных работ на марганцево-рудных карьерах

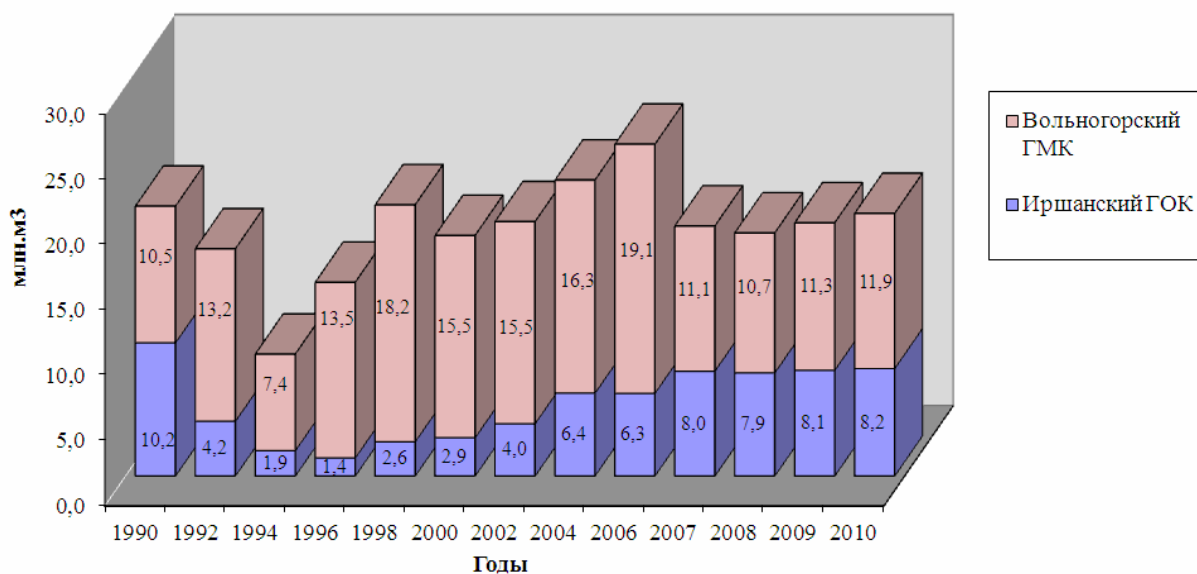


Рис. 1.8. Объемы вскрышных работ по добыче титаноциркониевых руд

Начиная с 1995 г. наблюдается устойчивый рост объемов добычи титаноциркониевого сырья за счет эффективной работы предприятий.

Анализ тенденций развития горно-металлургического комплекса Украины показывает, что рынок рудного и нерудного сырья интенсивно развивается. В соответствии с «Национальной программой развития горно-металлургического комплекса Украины...» предусматривается наращивание темпов добычи полезных ископаемых за счет внедрения прогрессивных технологий [19]. Аналогичная прогрессивная тенденция имеет место и при прогнозе развития горной промышленности Украины с позиций ее минерально-сырьевого комплекса.

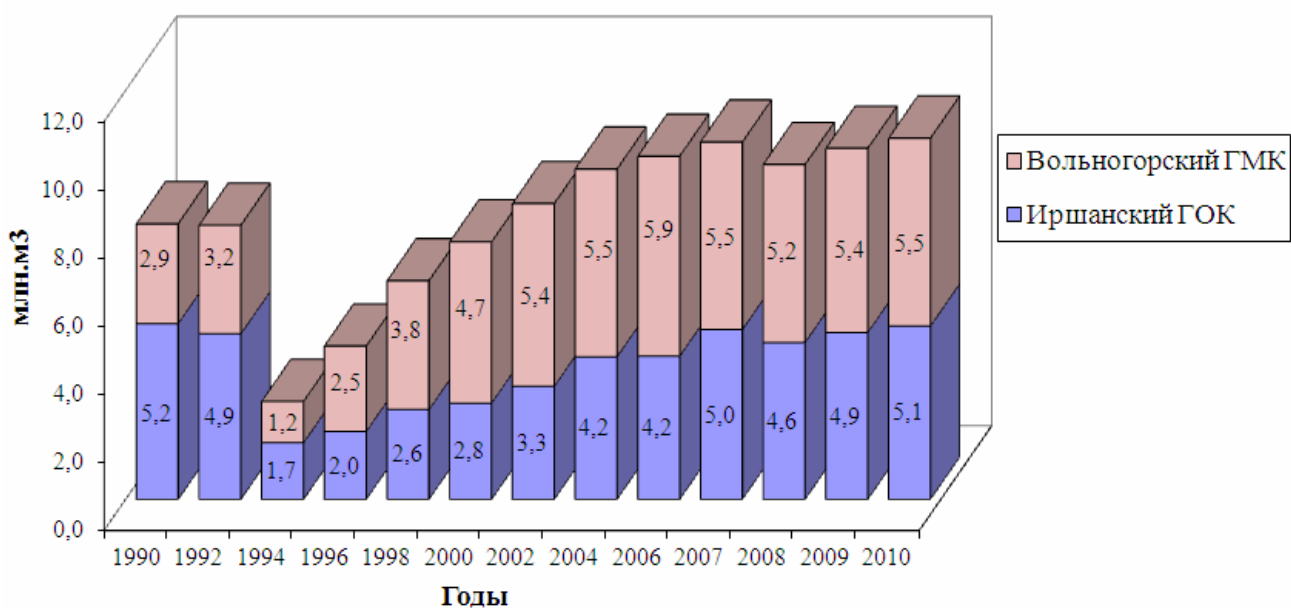


Рис. 1.9. Динамика объемов добычи титаноциркониевых руд в Украине

Динамика развития горной промышленности в Украине, представленная в табл. 1.4, оценивается как позитивная, а в качестве приоритетных направлений по прогнозным показателям на период 2010-2015 г.г. будут полезные ископаемые для металлургии и строительства.

Таблица 1.4

Динамика добычи полезных ископаемых в Украине [20]

Группы полезных ископаемых	1991 г.	2001 г.	2001 г. в % к 1991 г.	Прогнозные показатели на период 2010-2015 г.г.
Горючие	142,4	78,2	54,9	110-116
Металлические	229,5	137,2	59,8	130-140
Горно-химические	36,8	7,48	20,3	20-22
Горнорудные	7,48	1,78	23,8	5,0-5,5
Нерудные для металлургии	56,0	39,6	70,7	35-38
Для строительства	352,0	52,7	15,0	190-210
<b>ВСЕГО</b>	<b>824,2</b>	<b>316,2</b>	<b>38,4</b>	<b>490-531</b>

Анализ минерально-сырьевой базы и существующих тенденций развития горно-металлургического комплекса Украины показывает, что потребности в энергетическом и металлургическом сырье будут возрастать, несмотря на последствия мирового экономического спада 2008-2009 г.г. Особое значение для социально-экономического развития приобретают отрасли, поставляющие на внешний рынок стратегическое сырье, которыми являются руды черных и цветных металлов, а также горно-химическое сырье и строительные материалы.

Украина обладает мощным производственным потенциалом горнорудной промышленности, что дает возможность при наличии необходимых инвестиций

и целевой государственной поддержки конкурировать на мировом рынке железорудного, марганцевого, флюсового и других видов сырья, в том числе и на рынке Западной Европы, учитывая географическое положение.

На ближайшую перспективу в освоении минерально-сырьевой базы Украины будет доминировать открытый способ разработки месторождений полезных ископаемых. При этом, наращивание темпов производства будет осуществляться за счет модернизации оборудования, повышения эффективности технологических операций, увеличения производительности труда и снижения себестоимости продукции [21].

Современный уровень развития открытых горных разработок характеризуется освоением месторождений со сложными гидрогеологическими и инженерно-геологическими условиями, интенсификацией горных работ, значительным увеличением параметров карьеров. В этих условиях с целью обеспечения ритмичной, согласованной и безопасной работы всех звеньев механизированного производства особое значение приобретают вопросы управления устойчивостью откосов на основе прогноза, контроля и направленного изменения интенсивности геомеханических процессов, снижения прочности и развития сдвиговых деформаций пород. Установление характера и масштаба геомеханических процессов позволяет регламентировать мероприятия по направленному воздействию на бортовые массивы с целью предотвращения опасных деформаций, повышения полноты извлечения запасов полезного ископаемого из недр, сокращения объемов вскрышных работ и площади карьерных полей [7].

Выбор рациональных конструктивных параметров бортов карьера тесно связан с условиями устойчивости горного массива. Это обусловлено низкими показателями прочностных свойств пород (особенно в сложных горно-геологических условиях разработки), риском развития оползневых явлений, приоритетом геомеханических ограничений на параметры откосов перед технологическими [22].

#### **1.4. Особенности технологических процессов при открытой разработке россыпных месторождений на Вольногорском ГМК**

Вольногорский государственный горно-металлургический комбинат (ВГГМК) - один из крупнейших в мире комплексов по добыче и переработке руд, содержащих редкие минералы. Вольногорский ГМК включает 2 основных передела - горно-обогачительный и металлургический. На комбинате выпускается 40 видов продукции. Добыча руды на Вольногорском горно-металлургическом комбинате ведется открытым способом. По системе гидротранспорта пески транспортируются на обогащительное производство, которое включает дезинтеграцию и обесшламливание, гравитационное обогащение, сушку, доводочные операции по разделению коллективного концентрата с использованием электрических и магнитных методов обогащения.

80% продукции предприятие поставляет на экспорт в США, Канаду,

страны Европы, Ближнего Востока, СНГ.

В настоящее время разработка самого крупного в стране Малышевского месторождения ВГМК осуществляется карьером № 7 «Юг» и карьером № 7 «Север». Система разработки - комбинированная с внутренним отвалообразованием. Западный участок отработан в 1990 г. Тогда же начата разработка Центрального участка с вводом в эксплуатации 1-й очереди карьера № 7 «Север» с годовой производительностью до 3,5 млн. м<sup>3</sup>. С 1992 г. в состав горнорудного комплекса входят два карьера № 7 «Север» и № 7 «Юг». Верхние горизонты карьеров обрабатываются вскрышными комплексами машин непрерывного действия в составе: роторных экскаваторов производительностью 5000-6600 м<sup>3</sup>/час, системы конвейеров и отвалообразователей. Добыча рудных песков производится с применением шагающих и роторных экскаваторов с последующей подачей их на участок пульпоприготовления конвейерным и автомобильным транспортом. С участка пульпоприготовления путем гидромониторного размыва пульпа по напорному пульповоду подается на обогатительную фабрику.

На карьере № 7 «Север» применяется комбинированная система разработки. Впереди фронта вскрышных работ производится снятие чернозема автоскреперами с укладкой его в бурты или с непосредственным нанесением на рекультивируемую площадь. Средняя мощность вскрышных пород составляет 45 м. Передовой вскрышной уступ, высотой 22 м, обрабатывается вскрышным комплексом ТК-2 в составе роторного экскаватора КУ-800, двух забойных, магистрального и отвального конвейеров, перегружателя PVZ-6600, отвалообразователя ZP-6600 с отсыпкой вскрыши в выработанное пространство. Ниже расположены три вскрышных уступа, высотой по 8 м, которые обрабатываются экскаваторами ЭКГ-8(10)И по транспортной системе с погрузкой в автосамосвалы БелАЗ-7548 и вывозкой породы во внутренний отвал. Расстояние транспортирования пород вскрыши составляет 1-1,4 км.

Добычные работы производятся на I и II средних залежах. На I средней залежи выемка руды производится экскаватором ЭШ-10/70, который работает по комбинированной схеме: находясь на кровле рудного уступа, производит отработку нижнего вскрышного уступа верхним черпанием с отвалообразованием в выработанное пространство по бестранспортной системе и выемку руды с укладкой в конуса на горизонт установки, которая отгружается экскаватором ЭКГ-8И в автотранспорт и транспортируется на рудный склад передвижной пульпонасосной станции, находящейся непосредственно в карьере. На II средней залежи выемка руды производится также экскаватором ЭШ-10/70 с укладкой в конуса на кровле рудного уступа. Оработка конусов руды производится экскаватором ЭР-1500 и по забойному конвейеру и перегружателю П-1600 руда подается на рудный склад, который расположен на отметке кровли рудного уступа за контуром рудного тела в центральной части II средней залежи. Кроме отмеченных схем добычные горизонты обрабатываются экскаватором ЭШ-10/50 с погрузкой руды в автотранспорт и транспортировкой на рудный склад.

На карьере № 7 «Юг» также применяется комбинированная система раз-

работки. Впереди фронта горных работ производится снятие чернозема автоскреперами с укладкой в бурты на нерабочем борту карьера. Верхний вскрышной горизонт обрабатывается вскрышным комплексом в составе роторного экскаватора ЭРШР-1600, забойного, магистрального и отвального конвейеров, перегружателей ПГ-5000/60 и ПВП-6600, отвалообразователей ОШР-5000/190 и ЗР-6600 с укладкой породы во внутренний отвал. Ниже расположены два вскрышных уступа, которые обрабатываются комбинированным способом. Верхний уступ обрабатывается по транспортной системе экскаватором ЭКГ-8И с погрузкой в автотранспорт и вывозкой породы во внутренний отвал, а нижний надрудный – по бестранспортной системе экскаватором ЭШ-10/70 с укладкой породы в выработанное пространство и по транспортной системе экскаватором ЭКГ-8И с погрузкой в автотранспорт. Добычной горизонт обрабатывается экскаватором ЭШ-6/45 и ЭШ-10/50 с погрузкой руды в автотранспорт и транспортировкой ее на рудный склад передвижной пульпонасосной станции. Передвижная пульпонасосная станция находится в северном торце карьера на отметке кровли рудного уступа за контуром рудного тела.

Фронт горных работ на карьерах №7 «Юг» и №7 «Север» односторонний, вкрест простирается рудной залежи. Средняя длина фронта работ составляет 1,0 км. Годовое подвигание фронта горных работ составляет 250-270 м. Объемы производства горных работ на карьерах Вольногорского ГМК приведены в Приложении А. Из приведенных данных видно, что основные объемы (55-65%) вскрышных работ осуществляются роторными комплексами, 24-35% объемов вскрышных работ производится по транспортной системе разработки и только 10-12% вскрыши осуществляется по бестранспортной системе разработки.

Основными статьями в себестоимости горных работ Вольногорского ГМК являются: горно-подготовительные (вскрышные работы), налоги за пользование землей и недрами, общепроизводственные расходы (ремонтный фонд, техническое обслуживание, перемещение грузов, накладные расходы), электроэнергия, горюче-смазочные материалы.

На рис. 1.10 приведена структура основных затрат себестоимости добычи рудных песков на карьерах Вольногорского ГМК.

Как видно из диаграммы, самой затратной частью в структуре себестоимости добычи рудных песков (63%), являются расходы на проведение горно-подготовительных (вскрышных работ) за счет наличия больших объемов вскрыши. Так, объемы вскрышных работ при отработке карьеров Малышевского месторождения составляют более 22 млн. м<sup>3</sup> в год при объемах добычи 4,5-5,5 млн. м<sup>3</sup>, а на Мотроновском участке составят более 25 млн. м<sup>3</sup>.

В ближайшей перспективе разработка рудных песков на ВГМК будет характеризоваться дальнейшим снижением качества полезного ископаемого, изменением его показателей по площади месторождения, усложнением горно-геологических и социально-экономических условий промышленного освоения новых участков месторождения [23].

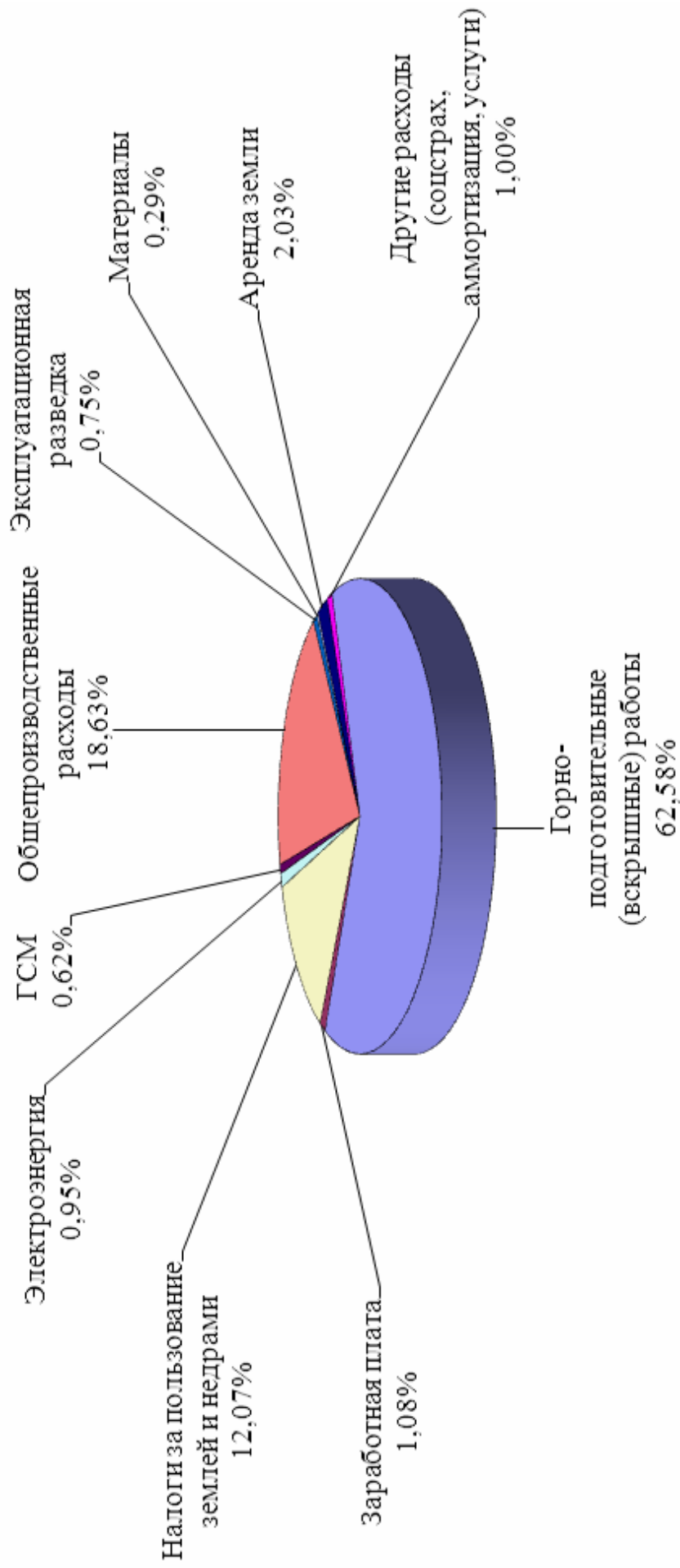


Рис. 1.10. Структура основных затрат себестоимости добычи рудных песков

В связи с этим, возникает задача рационального использования минерально-ресурсного потенциала россыпных месторождений при условии наращивания производственного потенциала предприятия, что в первую очередь связано с управлением и прогнозом устойчивости массива горных пород.

### **1.5. Управление состоянием породного массива при открытой разработке месторождений**

Управление состоянием природных и техногенных массивов при открытой разработке месторождений полезных ископаемых заключается в совокупности мероприятий по поддержанию и переводу уступов, бортов карьеров и отвалов в устойчивое, близкое к предельному состоянию путем изменения в процессе разработки геометрических параметров откосов, что обеспечивает экономичное и безопасное ведение горных работ [1].

Критерием оценки состояния как природных, так и техногенных массивов, в общем случае, является коэффициент запаса устойчивости (КЗУ). В наиболее общем виде, применительно к оценке устойчивости открытых горных выработок, величину КЗУ можно представить как отношение интегралов удерживающих и сдвигающих сил по предполагаемой линии (поверхности) скольжения. КЗУ является функцией, зависящей сложным образом, по крайней мере, от следующих управляющих параметров: высоты ( $H$ ) и угла откоса ( $\alpha$ ) массива, продолжительности обнажения ( $T$ ); формы обнажения, физико-механических свойств горных пород ( $\gamma$  - плотность,  $\rho$  - угол внутреннего трения пород,  $C$  - сцепление в массиве,  $\sigma_p$  и  $\sigma_c$  - сопротивление пород растяжению и сжатию,  $E$  - модуль упругости,  $\nu$  - коэффициент Пуассона [24].

Уточнение коэффициента запаса устойчивости бортов карьера только на 5% , в конечном итоге, может позволить уменьшить объем извлекаемой горной массы и площадь карьера от 1,5 до 20 % в зависимости от горно-геологических условий разработки [25].

Также известно, что на карьерах с глубиной до 300 м увеличение результирующего угла наклона борта на 3-4° позволяет сократить объем вскрыши до 10-11 млн. м<sup>3</sup> на 1 км фронта работ, что, естественно, повышает общую эффективность открытой системы разработки [26].

Научные принципы управления устойчивостью карьерных откосов выдвинуты академиком В. В. Ржевским и получили дальнейшее развитие в работах научной школы МГИ. Исследования устойчивости бортов карьеров с учетом фактора времени проводились Г.Л. Фисенко, В.И. Веселковым, А.М. Мочаловым, Г.Б. Афанасьевым (ВНИМИ), К.И. Туринцевым (УНИПромедь), А.И. Арсентьевым, В.А. Падуковым (ЛГИ), А.Н. Могилко, Н.Н. Куваевым (УкрНИИПроект) и др. [6, 7].

Дальнейшее развитие открытого способа разработки связано с увеличением глубины карьеров и усложнением горно-геологических условий разработки на фоне ухудшения технико-экономических показателей работы горных предпри-

ятий, при этом наблюдается рост себестоимости товарной продукции [27]. Так, в структуре себестоимости добычи основных видов горного сырья открытым способом материальные затраты, включающие горно-подготовительные и вскрышные работы, составляют от 50% до 70% [23, 28], что показано на рис. 1.11.

Обоснование рациональных геометрических параметров отвалов, уступов и бортов карьера позволяет существенно снизить материальные затраты на производство вскрышных работ.

При открытом способе разработки месторождений полезных ископаемых управление состоянием массива горных пород следует рассматривать как комплекс мероприятий по рациональному использованию минеральных ресурсов и охране окружающей среды. Основные задачи управления состоянием массива горных пород в этих случаях следующие: установление оптимальных углов наклона бортов карьера, обеспечивающих их устойчивость и минимальный разнос с учетом мероприятий по укреплению откосов; обоснование технологии складирования и устойчивости отвалов на неудобных и малопригодных для сельского хозяйства и строительства территориях. Эффективность этого управления характеризуется достижением оптимально-устойчивой конструкции бортов карьеров. В то же время современный уровень теоретических проработок в области управления состоянием горного массива при открытой разработке не позволяет в полной мере удовлетворить запросам инженерной практики [3]. Учитывая уровень современных теоретических и практических исследований в области управления состоянием горного массива пород, обоснование и уточнение параметров откосов карьеров остается актуальным.

Целью исследований, изложенных в настоящей монографии, является установление геомеханических закономерностей устойчивого состояния откосов и бортов карьеров, сложенных мягкими вскрышными породами, с учетом сложной геологической структуры, гидрогеологических характеристик и нагрузок горно-транспортного оборудования.

Объектом исследований в данной работе является устойчивость откосов и бортов карьеров в горно-геологических условиях Вольногорского горно-металлургического комбината, разрабатывающего Малышевское циркон-рутил-ильменитовое месторождение.

В процессе выполнения исследований использован комплексный подход, включающий анализ и обобщение натурных исследований; обобщение информационных источников и мирового опыта в области геомеханики открытых горных работ и устойчивости техногенных откосов; моделирование оползневых процессов на эквивалентных материалах; численное моделирование с использованием лицензионной программы конечно-элементного анализа *Phase2*.

На рис. 1.12 представлен алгоритм исследований устойчивости откосов бортов карьеров, выполненных в монографии.



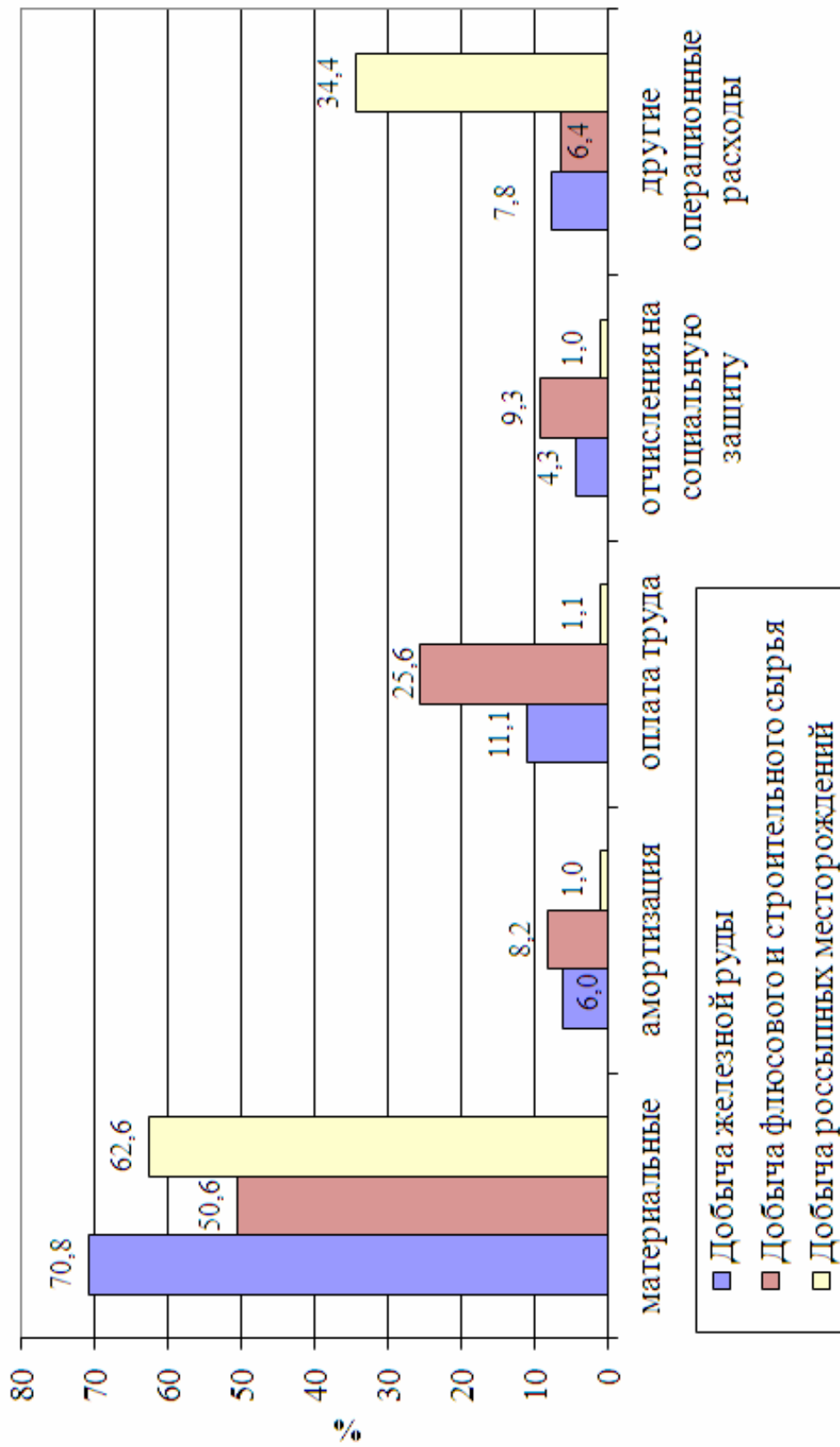


Рис. 1.11. Структура затрат на производство продукции



Рис. 1.12. Алгоритм исследований устойчивости откосов бортов карьеров

## Г Л А В А 2

### ОБЗОР ТЕОРЕТИЧЕСКИХ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ В ОБЛАСТИ ГЕОМЕХАНИКИ ОТКОСОВ И БОРТОВ КАРЬЕРОВ

#### 2.1. Современное состояние исследований по геомеханике откосов

Управление состоянием массива горных пород и прогнозирование устойчивости откосов и бортов карьеров является одной из важнейших инженерных задач для обеспечения безопасности и эффективности работ при открытом способе разработки месторождений. В настоящее время разработано около 300 методов, позволяющих изучать геомеханические процессы в откосах карьеров и прогнозировать их устойчивость с учетом влияния естественных и техногенных факторов, что положило основу развития новой науки - геомеханики открытых горных работ. Наибольший вклад в развитие этого научного направления внесли А.И. Арсентьев [29], Ю.П. Астафьев [1], И.В. Баклашов [30], Э.Л. Галустьян [31, 32], А.М. Гальперин [33, 34], А.М. Демин [35, 36], А.И. Ильин [6], Г.Л. Иофин [37], Д.М. Казикаев [38], П.И. Копач [39], Н.Н. Маслов [40, 41], Е.А. Несмашный [27], Ю.М. Николашин [42], П.Н. Панюков [43], М.Е. Певзнер [44, 45], С.З. Полищук [3, 46], И.И. Попов [47], В.В. Ржевский [48], В.В. Соколовский [49], Ю.И. Соловьев [50], Б.Н. Тартаковский [51, 52], К. Терцаги [53], Г.Л. Фисенко [54, 55], В.К. Цветков [56], П.М. Цимбаревич [57], Н.А. Цытович [58, 59], Г.И. Черный [60], А.Г. Шапарь [26, 61, 62, 63, 64, 65, 66], А.Н. Шашенко [67, 68] и др.

Исследованию деформационных процессов в естественных откосах и при бортовых массивах горных пород на карьерах посвящены работы Ю.П. Астафьева [1], И. В. Баклашова [30], А. М. Гальперина [33, 34], А.М. Демина [35, 36], Ю.М. Николашина [42], Н.Н. Маслова [40], И.И. Попова [47], Г.Л. Фисенко [54], А.Е. Шейдеггера [69] и др. авторов.

Несмотря на многочисленные исследования, проблема обеспечения устойчивости бортов карьеров, в силу своей сложности и разнообразия горно-геологических и гидрогеологических особенностей месторождений, остается актуальной. Практика показывает, что почти все открытые горные работы во всех странах мира сопровождаются оползневыми явлениями.

Основными причинами нарушения устойчивости откосов на карьерах являются следующие:

- неблагоприятные структурно-литологические условия: тектонические нарушения, изменение угла падения слоев, наличие прослоев глины и других обводненных зон, падающих в сторону выработки;
- изменение физико-механических свойств пород: потеря прочности пород на контактах в результате изменения их влажности, уменьшение прочности пород во времени;
- отрицательное влияние подземных вод, оказывающих гидростатическое и гидродинамическое воздействие на массив горных пород;

– динамическое воздействие на массив горных пород горно-транспортного оборудования, массовых взрывов и землетрясений.

Возникновение и развитие деформационных процессов откосов и бортов карьеров снижает основные преимущества открытых горных работ, наносит значительный материальный ущерб горному предприятию, нарушает правильное и безопасное ведение горных работ, вызывает значительные потери полезного ископаемого массива [7].

Разработка противооползневых мероприятий на карьерах обычно связана с оценкой условий устойчивости откоса. Такая оценка производится путем вычисления коэффициента запаса устойчивости, который характеризуется отношением сил, удерживающих массив пород на наклонной поверхности, к силам, сдвигающим этот массив [40, 70, 71, 72, 73, 74, 75]. Все расчётные методы оценки степени устойчивости откосов основаны на применении теории предельного равновесия. В расчетных моделях принимаются условные допущения: используется гипотеза затвердевшего тела [73, 74, 75, 76]; рассматривается узкая полоса откоса шириной 1 м и ее физико-механические параметры применяются для всего откоса [77]; допускается определенная форма поверхности скольжения; напряжения массива заменяются силами [78, 79]; в некоторых методах силы взаимодействия между отсеками, на которые разбивается оползневой блок, не учитываются; принимаются излагаемые далее допущения о значениях и проявлениях давления грунтовых вод и сейсмической силы; в некоторых методах при рассмотрении равновесия массива принимается одно уравнение статики; в отдельных случаях теория предельного равновесия применяется к грунтовому массиву, находящемуся в запредельном состоянии при  $KЗУ < 1$  [80, 76]. Учитывая перечисленные допущения, эти методы расчета, хотя и не вполне математически и физически строгие, но необходимы для разработки простых инженерных способов оценки устойчивости откосов [81].

## **2.2. Факторы, влияющие на устойчивость откосов и бортов карьеров**

Борта, откосы и отвалы как основные элементы открытой динамичной системы карьера изменяются в пространстве и во времени. Состояние массива горных пород зависит как от естественных, так и техногенных факторов, представленных на рис. 2.1.

Климатические условия района месторождения формируют влажностный режим горных пород и способствуют развитию процессов выветривания, определяя тем самым поведение пород в откосах и их устойчивость. Наиболее чувствительны к увлажнению атмосферными или подземными водами породы глинистого состава с различной степенью литификации. Устойчивость карьерных откосов снижается при повышении уровня подземных вод в приоткосной зоне, уменьшении сопротивления горных пород сдвигу, увеличении высоты откоса и его крутизны, а также возрастании дополнительных нагрузок на уступы карьеров и отвалов [34].

Состояние естественных и техногенных массивов в значительной степени определяется горно-техническими факторами - способом вскрытия карьерного поля, системой разработки и отдельными производственными процессами [82].



Рис. 2.1. Факторы, определяющие состояние массива горных пород на карьерах

Физико-географические и природно-геологические факторы играют первостепенную роль в устойчивости откосов уступов на карьерах. В группу этих факторов входят: климатические условия и рельеф района месторождения; условия залегания горных пород; вещественный состав и структурно-текстурные особенности пород в пределах горно-геологических ярусов; литологический состав естественных и техногенных массивов. Проведенная А.М. Деминым, В.К. Александровым и О.И. Шушкиной (1972, 1981) систематизация нарушений откосов на карьерах СССР, ГДР, КНР, ЧССР, НРБ, ФРГ и Италии показала, что с атмосферными осадками связано более 25 % деформаций откосов. Количество атмосферных осадков, интенсивность дождей, мощность снегового покрова и продолжительность его таяния оказывают наибольшее влияние на устойчивость песчано-глинистых пород в бортах карьеров [34].

К числу основных гидрогеологических факторов относятся: глубина залегания водоносного горизонта, водообильность, напорность, наличие гидравлической связи между горизонтами, гидродинамические характеристики водоносных горизонтов. Гидрогеологическими факторами обуславливаются:

- подток подземных, дождевых и талых вод, вызывающий набухание, снижение прочности и местные деформации откосов песчано-глинистых пород;
- гидродинамическое давление фильтрующихся в приоткосном массиве подземных вод, приводящее к оплыванию откосов раздельнозернистых и песчано-глинистых пород;
- суффозия, способствующая выносу мелких частиц;
- выщелачивание засоленных песчано-глинистых пород, карбонатных пород, галоидов, способствующее карстообразованию;
- внезапные прорывы подземных вод в результате вскрытия карстовых полостей или нарушения режима дренажа.

В глинистых породах, особенно в глинах монтмориллонитового состава, при увеличении влажности интенсивно развиваются процессы набухания, что существенно влияет на деформационные характеристики массива. Если в приоткосной области залегают падающие в сторону выемки или горизонтальные, подвергающиеся увлажнению литологические контакты, процесс набухания протекает совместно с процессами ползучести. Так, для условий карьеров Никопольского марганцевого бассейна мощность приконтактных зон, где глинистые породы разупрочняются вследствие набухания, изменяется от 0,2 до 2 м, при этом продолжительность периода набухания составляет 2-6 мес. Приближенную оценку влияния набухания на снижение сопротивления глинистых пород сдвигу и увеличению влажности можно проводить по эмпирическим формулам А.Н. Могилко [83], полученным в результате обобщения данных исследований на карьерах Украины:

$$C = C_0 \left[ 1 - At^{\beta'(t)} \right]; \quad (2.1)$$

$$W = W_0 \left[ 1 + Kt^{m'(t)} \right], \quad (2.2)$$

где  $C_0$ ,  $W_0$  - соответственно начальные сцепление и влажность;  $A$ ,  $K$  - эмпирические коэффициенты (для зеленовато-серых палеогеновых глин  $A = 0,72$ ;  $K = 0,12$ );

$$\beta_1' = 0,54 - 0,12t \quad \text{при } 0 < t < 0,6 \text{ мес};$$

$$\beta_2' = 0,465 - 0,02t \quad \text{при } 0 < t < 4 \text{ мес};$$

$$m' = 0,78 - 0,054t \quad \text{при } 0 < t < 5 \text{ мес};$$

где  $t$  - время, мес.

Если глинистые породы залегают в почве полезного ископаемого и являются верхним водоупором напорного водоносного горизонта, то при отсутствии дренажа этого горизонта происходит набухание глинистых пород и могут возникать крупные оползни [34].

### 2.3. Анализ нарушений устойчивости бортов карьеров

Анализ нарушений устойчивости бортов карьеров, выполненный в ВИОГЕМ, показал, что 75 % деформаций возникают в песчано-глинистых отложениях и только 25 % приходится на откосы твердых (скальных) и полутвердых (полускальных) трещиноватых пород. На двух третях карьеров наблюдаются нарушения устойчивости откосов объемом более 1000 м<sup>3</sup>, причем эти процессы интенсифицируются с увеличением глубины карьеров. Так, если при глубине карьеров до 100 м лишь на половине из них зафиксированы деформации откосов, то с переходом на большие глубины доля карьеров с нарушениями устойчивости откосов возрастает до 80 % [33].

Как видно из рис. 2.2. деформации откосов происходят в основном в виде оползней и обрушений. Для карьеров агрохимического сырья доля оползней составляет 85 %, в то время как на остальные деформации приходится всего 15 %. Это связано с распространением на карьерах этих отраслей комплексов преимущественно слабых и полускальных пород, в то время как на рудных карьерах до 80 % горной массы является скальной.

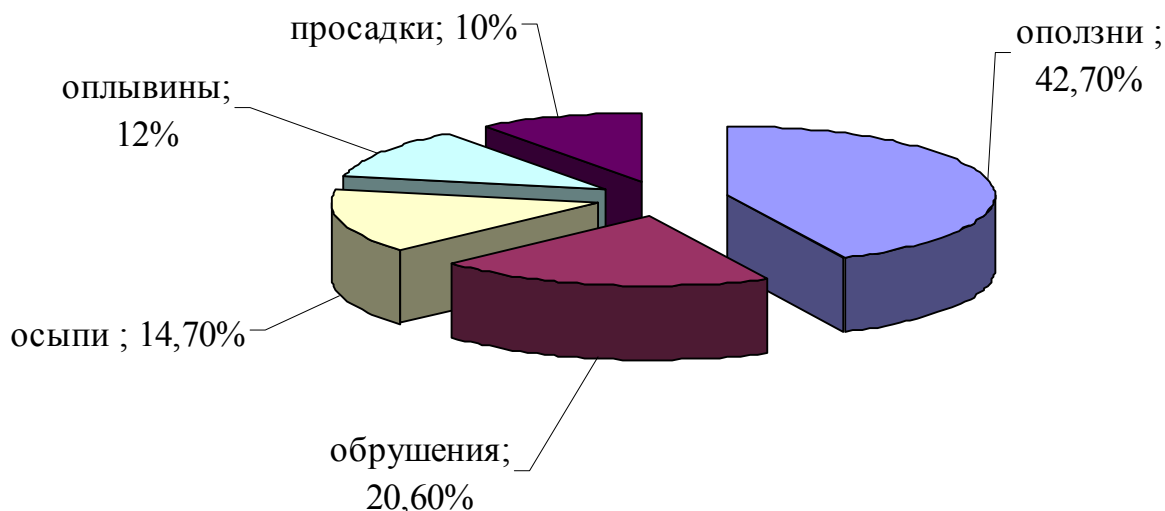


Рис. 2.2. Виды деформаций откосов на карьерах (по данным ВИОГЕМ)

Нарушения и деформации пород возникают преимущественно в мягких четвертичных породах. Обрушения достигают по фронту 8...20 м при глубине развития деформаций 2...4,5 м. В результате обрушенные массы заполняют рабочую площадку нижележащего уступа, геометрический профиль уступа становится более пологим (до 35-40°), что создает технологические проблемы при ведении горных работ. Если уступ увлажняется подземными водами, то в таких местах обрушенные массы насыщаются водой, приобретают текучую консистенцию и в результате формируется оплывина. Смещение переувлажненных масс приводит к обнажению откоса и дальнейшему развитию обрушений.

Для мягких пород карьеров типичными являются процессы вымывания глинистых частиц и отложение вымытого материала на нижней площадке уступа и откосах вследствие атмосферных осадков. Породная масса обычно мед-

ленно (при избыточном увлажнении в период дождей относительно интенсивно) смещается по откосам, образуя в пределах уступов локальные конуса выноса. Вынос породы из нижней части уступа обуславливает местные обрушения и оползни вышележащих пород. В итоге, при длительном стоянии образуются мощные оплывины, смещающиеся на нижележащие горизонты.

Гидрологические и гидрогеологические условия месторождения также оказывают существенное влияние на длительную устойчивость бортов карьеров. Так, наиболее опасным явлением нарушения устойчивости откосов в результате воздействия водоносных горизонтов является суффозия. При этом, деформации откосов протекают при резком понижении уровня подземных вод в прибортовой части массива горных пород и медленном понижении уровня воды за пределами карьера. Наличие крутой депрессионной воронки способствует развитию гидродинамического давления, направленного в сторону откоса, что при критических значениях гидравлического градиента вызывает вынос фильтративным потоком мелких твердых частиц.

Анализ исследований инженерно-геологических явлений на карьерах (ВИОГЕМ, УкрНИИпроект) позволяет сделать следующие выводы:

- 95 % всех деформаций составляют оползни, переходящие в оплывины;
- время существования уступов в устойчивом состоянии в зависимости от инженерно- и гидрогеологических условий и их параметров различно;
- деформациям подвержены отдельные уступы или несколько уступов, но не борт, сложенный песчано-глинистыми отложениями в целом;
- существует взаимосвязь между физико-механическими свойствами пород, геометрическими параметрами уступа и временем его существования в устойчивом состоянии [34].

#### **2.4. Методы расчета откосов, основанные на гипотезе плоской поверхности скольжения**

Самым простым допущением в отношении формы потенциальной поверхности скольжения является плоскость. На рис. 2.3. представлена схема откоса с плоской поверхностью скольжения.

Треугольник  $ABC$  находится в равновесии, если

$$W \sin \lambda = C \frac{H}{\sin \lambda} + W \cos \lambda \operatorname{tg} \varphi. \quad (2.3)$$

Если принять толщину треугольника  $ABC$  равную единице, то его вес будет равен:

$$W = \rho g \frac{H^2 \sin(\beta - \lambda)}{2 \sin \beta \sin \lambda}, \quad (2.4)$$

где  $\rho$  - плотность материала;  $g$  - ускорение силы тяжести.



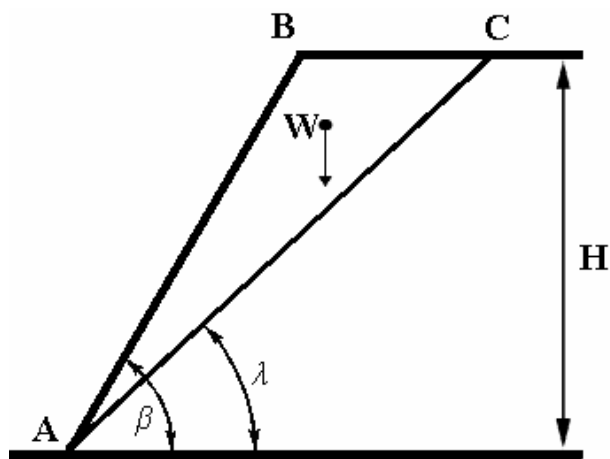


Рис. 2.3. Геометрическая схема откоса с плоской поверхностью скольжения ( $W$  - вес клина ABC;  $H$  - высота откоса;  $\beta$  - угол откоса;  $\lambda$  - угол наклона плоскости скольжения)

По данным Феллениуса [84], положение возможной поверхности скольжения наиболее опасно, так как для равновесия необходимо обеспечить максимальное сцепление  $C$ .

Решая уравнения (2.4) и (2.5) относительно  $C$  при  $\partial C/\partial \lambda = 0$ , получим:

$$\lambda = \frac{\beta + \varphi}{2}. \quad (2.5)$$

Вставляем это выражение в уравнение (2.4) и, решая его относительно  $H$ , получаем критическую высоту:

$$h_c = \frac{C}{\rho g} \cdot \frac{2 \sin \beta \cos \varphi}{\sin^2 \frac{1}{2}(\beta + \varphi)}. \quad (2.6)$$

Эта формула выражается через коэффициент запаса  $N(\beta, \varphi)$ :

$$N(\beta, \varphi) = \frac{2 \sin \beta \cos \varphi}{\sin^2 \left[ \frac{1}{2}(\beta - \varphi) \right]}. \quad (2.7)$$

Критическая высота откоса насыпи, при которой сохраняется устойчивость, рассчитывается из уравнения (2.6); значения коэффициента устойчивости можно определить по графику, представленному на рис. 2.4.

П.М. Цимбаревичу [57] принадлежит одно из первых решений задачи по определению предельной высоты уступа. Расчетная схема приведена на рис. 2.5. Предполагается, что однородный массив имеет сопротивление пород разрыву, равное нулю. Сдвигение блока ABC шириной равной единице происходит по плоскости, а AC - след этой плоскости. Сдвигающей является проекция силы веса  $T$  призмы ABC на линию AC, удерживающими - силы сцепления  $C$  и трения  $Ntg\rho$  вдоль линии AC.

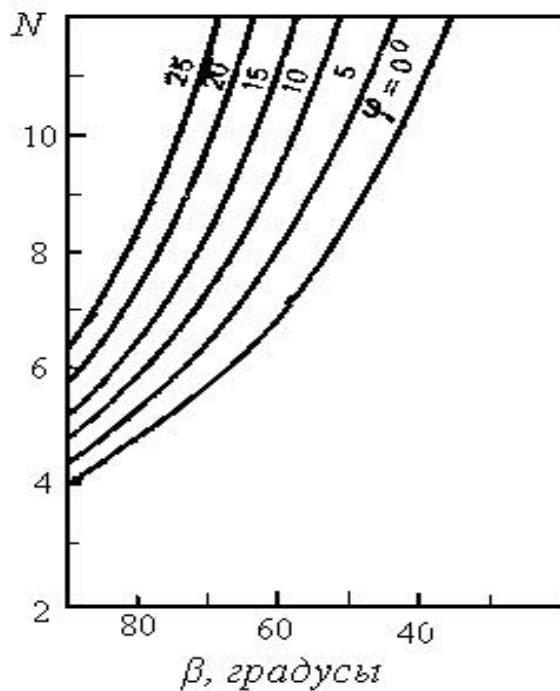


Рис. 2.4. Коэффициент устойчивости при различных значениях  $\varphi$  и  $\beta$  для модели с плоской поверхностью скольжения [69]

В общем виде условие равновесия пород по поверхности сдвижения  $AC$  имеет вид:

$$Q \sin \theta = Q \operatorname{tg} \rho \cos \theta + cl, \quad (2.8)$$

где  $l$  – длина линии скольжения  $AC$ ,  $\theta$  – угол наклона поверхности скольжения,  $C$  – сцепление,  $\rho$  – угол внутреннего трения пород откоса.

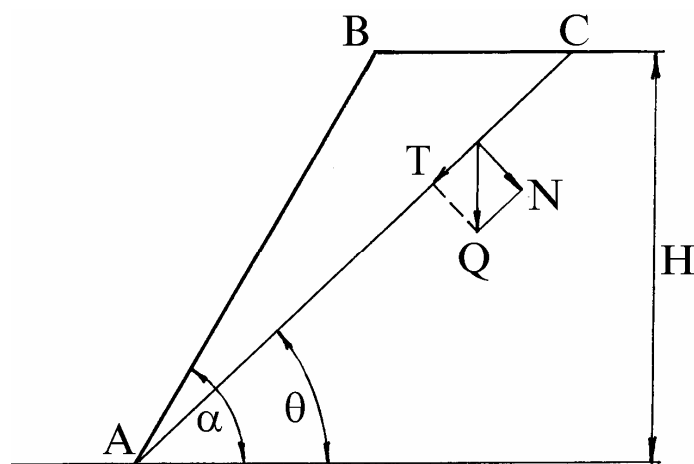


Рис. 2.5. Схема к расчету устойчивой высоты уступа по П.М. Цимбаревичу

Величины, входящие в уравнение (2.8), определяются как:

$$Q = \frac{1}{2} \gamma H^2 (\operatorname{ctg} \theta - \operatorname{ctg} \alpha), \quad (2.9)$$

$$l = \frac{H}{\sin \theta}, \quad (2.10)$$

где  $H$  – высота откоса,  $\alpha$  – угол наклона откоса поверхности,  $\gamma$  – объемный вес.

Подставляя в уравнение (2.8) значение входящих в него величин (2.9) и (2.10), получим:

$$\frac{1}{2} \gamma H (ctg \theta - ctg \alpha) (\sin \theta - \cos \theta tg \rho) = \frac{C}{\sin \theta}. \quad (2.11)$$

Выполним следующее преобразование:

$$ctg \theta - ctg \alpha = \frac{\sin(\alpha - \theta)}{\sin \alpha \sin \theta}, \quad (2.12)$$

$$\sin \theta - \cos \theta tg \rho = \cos \theta \frac{\sin(\theta - \rho)}{\cos \theta \cos \rho}. \quad (2.13)$$

С учетом этих зависимостей приходим к уравнению равновесия:

$$\frac{1}{2} \gamma H \frac{\sin(\alpha - \theta)}{\sin \alpha \sin \theta} \times \frac{\sin(\theta - \rho)}{\cos \rho} = \frac{C}{\sin \theta}. \quad (2.14)$$

Решая уравнение (2.14) относительно  $H$ , получим:

$$H = \frac{2C}{\gamma} \times \frac{\sin \alpha \cos \rho}{\sin^2(\alpha - \rho)}. \quad (2.15)$$

Для вертикального откоса при  $\alpha = 90^\circ$ , имеем:

$$H_{90} = \frac{2C}{\gamma} \times \frac{\cos \rho}{\sin^2\left(\frac{90^\circ - \rho}{2}\right)}. \quad (2.16)$$

Подобное выражение для высоты вертикального обнажения откоса предложено в формуле В.В. Соколовского - И.А. Симвулиди [49], выведенной из условия предельного равновесия при прямолинейной огибающей кругов напряжений Мора:

$$H_{90} = \frac{2c}{\gamma} ctg\left(\frac{90^\circ - \rho}{2}\right). \quad (2.17)$$

Р. Р. Чугаев [85, 86] для расчета деформаций откосов по плоской поверхности скольжения предложил «метод плоских поверхностей сдвига», который применим в случаях, когда поверхность скольжения является плоской или состоит из отдельных прямолинейных участков. В данном методе определяются действительные величины угла внутреннего трения и сцепления, характерные для рассматриваемой породы, а также критические значения этих параметров,

при которых рассматриваемый оползневой блок приходит в состояние предельного равновесия. Метод позволяет определять величины касательного и нормального напряжений, которые появляются в момент предельного равновесия.

## 2.5. Методы расчета откосов, основанные на гипотезе криволинейной поверхности скольжения

Методы круглоцилиндрической поверхности скольжения широко описаны в технической литературе и часто применяется в строительной практике. Существует множество разновидностей данного метода, такие как: шведский метод отсеков, метод В. Феллениуса [84], шведский метод круглоцилиндрических поверхностей скольжения, метод Терцаги [53], метод Терцаги-Крея [53, 87], метод Петтерсона [77], метод вертикальных элементов, метод Иванова - Тейлора [40, 77], метод Свена-Гультена [77], метод весового давления и т. д.

Критерием оценки состояния как природных, так и техногенных массивов, в общем случае, является коэффициент запаса устойчивости (КЗУ). В наиболее общем виде, применительно к оценке устойчивости открытых горных выработок, величину КЗУ можно представить как отношение удерживающих  $M_{уд}$  и сдвигающих  $M_{сдв}$  сил по предполагаемой линии (поверхности) скольжения:  $КЗУ = M_{уд}/M_{сдв}$  [88]. Возможны три состояния приоткосного (прибортового) участка породного массива: при  $КЗУ > 1$  откос устойчив,  $КЗУ = 1$  соответствует предельно устойчивому состоянию в момент инициации оползня, переходящему в состояние обрушения при  $КЗУ < 1$ .

Предполагается, что область породного массива, в которой участок  $КЗУ = 1$ , идентифицирует потенциальную поверхность скольжения, по которой обрушается массив. Поэтому основной инженерной задачей оценки откосов является выявление факторов, влияющих на устойчивость приоткосного массива пород, и определение КЗУ с учетом геометрических параметров уступа и комплекса горно-геологических факторов.

Методы расчета откосов, основанные на криволинейной поверхности сдвижения, можно подразделить на две группы. К первой относятся методы, в которых форма поверхности сдвижения определяется в ходе решения задачи. Это известные аналитические и графоаналитические решения Г.Л. Фисенко, Ю.И. Маслова, В.В. Соколовского в уточненной редакции И.С. Мухина и А.И. Сраговича, Н.Н. Маслова, Фелениуса и др.

В методах второй группы криволинейная форма поверхности принимается заранее, а сам метод сводится к алгоритму построения этой поверхности. Одной из первых в этой области были работы К. Терцаги [87].

На рис. 2.6 показана геометрическая схема потенциальной круглоцилиндрической поверхности скольжения, впервые предложенная Петтерсоном [89]; более детальные расчеты и развитие метода получили в трудах Феллениуса [90] и Тейлора [91, 92].

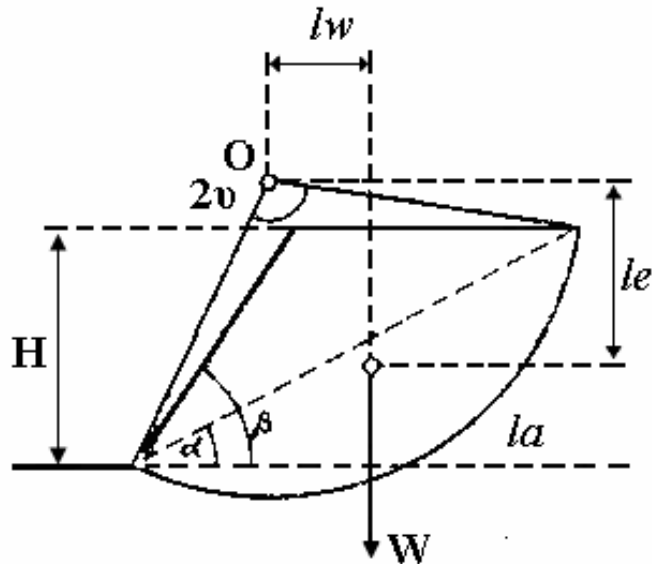


Рис. 2.6. Круглоцилиндрическая поверхность скольжения (по Петтерсону) [89]

По условию равновесия сумма всех моментов вокруг центра окружности  $O$  должна равняться нулю. Это условие может быть выполнено при  $\varphi = 0$ .

Из рис. 2.6 следует:

$$Wl_w - Cl_a r = 0, \quad (2.18)$$

или

$$C = \frac{Wl_w}{rl_a} = \rho g H / f(\lambda, \alpha, \beta). \quad (2.19)$$

Критическая высота откоса  $h_c$  выражается через коэффициент устойчивости  $N$ :

$$h_c = \frac{C}{\rho g} N(\lambda, \alpha, \beta). \quad (2.20)$$

где  $C$  - критическое значение сцепления.

График для определения коэффициента устойчивости, рассчитанный Феллениусом [90], приведен на рис. 2.7. Как видно из графика, величина  $N(\lambda, \alpha, \beta)$  увеличивается от 3,85 при  $\beta = 90^\circ$  до 7,35 при  $\beta = 0^\circ$ .

Для того чтобы как-то учесть увеличение сопротивления сдвигу  $\tau$  с глубиной Гибсон и Моргенштерн [93] приняли линейную зависимость возрастания прочности пород на сдвиг с глубиной:

$$\tau = \frac{kz}{h}, \quad (2.21)$$

где  $k$  - коэффициент пропорциональности;  $z$  - глубина потенциальной круглоцилиндрической поверхности скольжения от плоскости откоса.

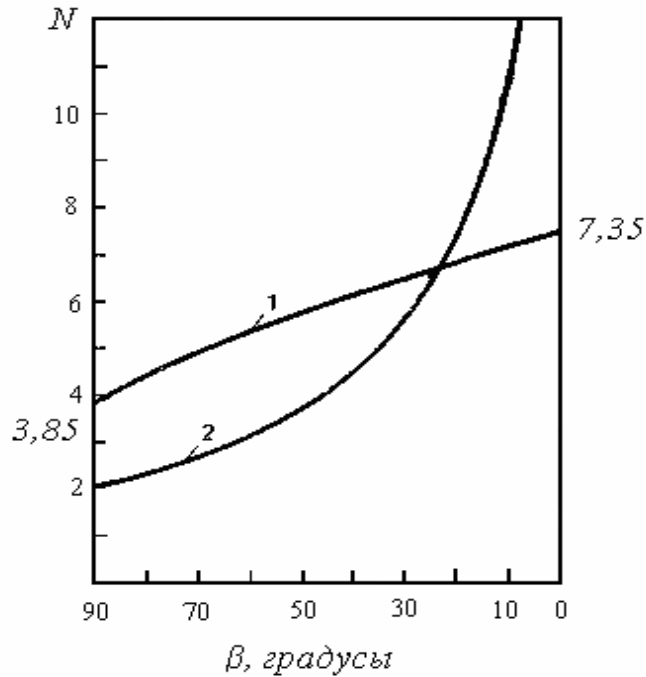


Рис. 2.7. Коэффициент устойчивости  $N$  для различных углов склона:  
 1 -  $C$  конечное,  $\varphi = 0^\circ$  [90]; 2 -  $\varphi = 0^\circ$ ,  $\tau = \tau(z)$  [93]

Приведенные выше расчеты являются полуэмпирическими из-за эвристического допущения равенства (2.21). Для более корректного расчета в случае  $\varphi = 0$  можно предположить, что сцепление, требующееся для поддержания равновесия откоса, может быть выражено в следующей форме:

$$C = \rho g H \frac{1}{F(\alpha, \lambda, \beta, \varphi)}. \quad (2.22)$$

Получив максимальное сцепление  $C$  и решив уравнения относительно  $H$ , получим критическую высоту  $h_c$ .

$$h_c = \frac{C}{\rho g} N(\alpha, \lambda, \beta, \varphi). \quad (2.23)$$

Значения  $N$ , рассчитанные Тейлором [91] и использованные Терцаги [94], были получены совершенно другим способом (круги трения). График для определения  $N$  приведен на рис. 2.8.

Феллениус [90] применил другой приближенный метод получения  $N$  путем разделения смещающегося тела на блоки, нормальные к плоскости рассматриваемого разреза. Позже Бишоп [95] учел условия напряженности между блоками. Описанные теории предполагают, что потенциальная поверхность скольжения имеет форму дуги окружности. Другой ее разновидностью, часто встречаемой в природе, является «стулообразная» форма. Часто геологические условия предопределяют наличие пологозалегающей потенциальной поверхности скольжения. В глубине склона последняя переходит в поверхность крутого

разрыва, выходящего на поверхность. Случаи этого типа описаны Хатчинсоном [96] в связи с оползнями в Китае.

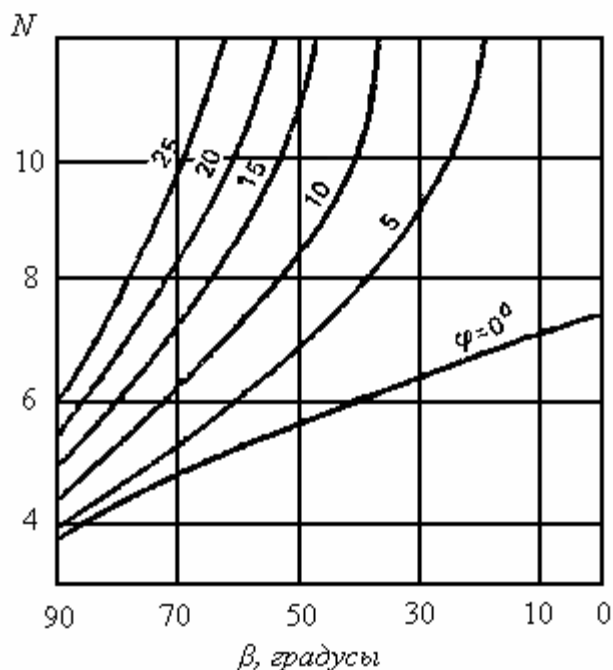


Рис. 2.8. Коэффициенты устойчивости  $N$  как функции угла склона  $\beta$  и угла внутреннего трения  $\varphi$  (по Тейлору)

Ю.М. Соловьев предложил метод [50], основанный на принятии модели гипотетического грунта, особенностью которого является предположение о том, что в вертикальных плоскостях породного массива отсутствуют нормальные напряжения и, следовательно, между вертикальными блоками, на которые условно разбита призма возможного обрушения, отсутствуют силы трения. Задача сводится к определению экстремальной поверхности сдвига, то есть такой поверхности, вдоль которой сопротивление сдвигу будет наименьшим. Расчетная схема приведена на рис. 2.9.

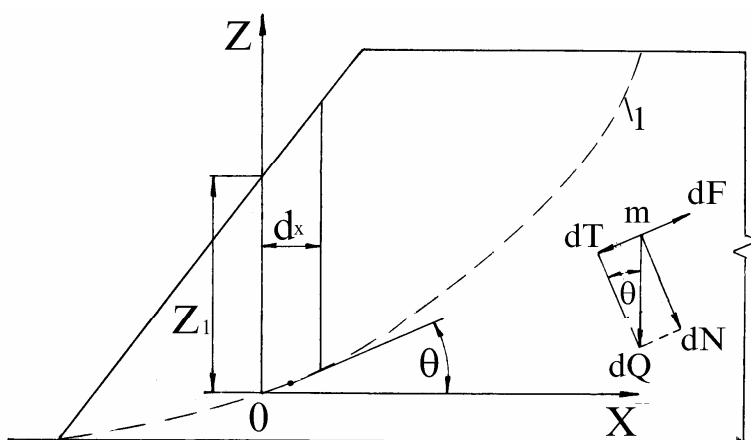


Рис. 2.9. Расчетная схема к определению положения экстремальной поверхности сдвига

Рассматривается условие равновесия точки  $m$ , лежащей на экстремальной поверхности сдвига:

$$dT_i - dF_i = a, \quad (2.24)$$

где  $a$  - некоторая очень малая величина. Определим входящие в уравнение (2.24) величины

$$dT_i = \gamma Z_i \sin \theta dx, \quad (2.25)$$

$$dF_i = \gamma Z_i \operatorname{tg} \rho \cos \theta dx + C \frac{dx}{\cos \theta}. \quad (2.26)$$

Тогда общее уравнение равновесия примет вид

$$\gamma Z_i (\operatorname{tg} \rho \cos \theta - \sin \theta) dx + C \frac{dx}{\cos \theta} = a. \quad (2.27)$$

Угол наклона поверхности сдвига определяется таким образом, чтобы величина  $a$  была минимальной ( $a \rightarrow \min$ ). Для этого уравнение (2.27) дифференцируется по переменной  $\theta$  и полученное выражение приравнивается нулю:

$$\frac{da}{d\theta} = -\gamma Z_i (\operatorname{tg} \rho \sin \theta + \cos \theta) dx + \frac{\sin \theta}{\cos^2 \theta} dx = 0. \quad (2.28)$$

Из соотношения (2.28) получим уравнения экстремальной поверхности сдвига:

$$\frac{C}{\gamma Z_i} = (\operatorname{tg} \rho + \operatorname{ctg} \theta) \cos^2 \theta. \quad (2.29)$$

Для построения поверхности сдвига этим методом, который часто называют «методом отсеков», необходимо знать начальное значение  $Z_i$  и от точки к точке определить положение поверхности скольжения [67]. Коэффициент устойчивости откоса по Ю.И. Соловьеву представляет собой отношение работ удерживающих и сдвигающих сил на перемещениях, которые для всех отсеков имеют одинаковую горизонтальную составляющую [81].

К. Терцаги впервые был предложен графоаналитический метод, суть которого состоит в предположении, что поверхность сдвига является круглоцилиндрической. Ее расчет производится методом приближения, состоящем в повторении расчетов для нескольких возможных поверхностей скольжения. Наиболее опасной (экстремальной) будет поверхность, для которой коэффициент устойчивости будет минимальным.

Сущность метода состоит в следующем. На разрезе откоса, который вычерчивается в определенном масштабе, наносится ряд возможных цилиндрических поверхностей скольжения (рис. 2.10,  $a$ ), каждая из которых обеспечивает определенный, пока неизвестный, коэффициент запаса прочности  $K_i$ . Длина возможных поверхностей скольжения вдоль фронта работ принимается равной



единице. Каждая из очерченных призм скольжения разбивается на вертикальные отсеки одинаковой ширины  $b$  (рис. 2.10, б). Вес каждого отсеков  $Q_i$  раскладывается на составляющие  $T_i = Q_i \sin \alpha$  и  $N_i = Q_i \cos \alpha$ .

Для определения коэффициента устойчивости откоса  $K_i$  рассматривают соотношение моментов сил, действующих относительно точки  $O$ :

$$K_i = \frac{M_y}{M_c}, \quad (2.30)$$

где  $M_y$  - момент сил, удерживающих откос от сползания;  $M_c$  - момент сил, сдвигающих откос.

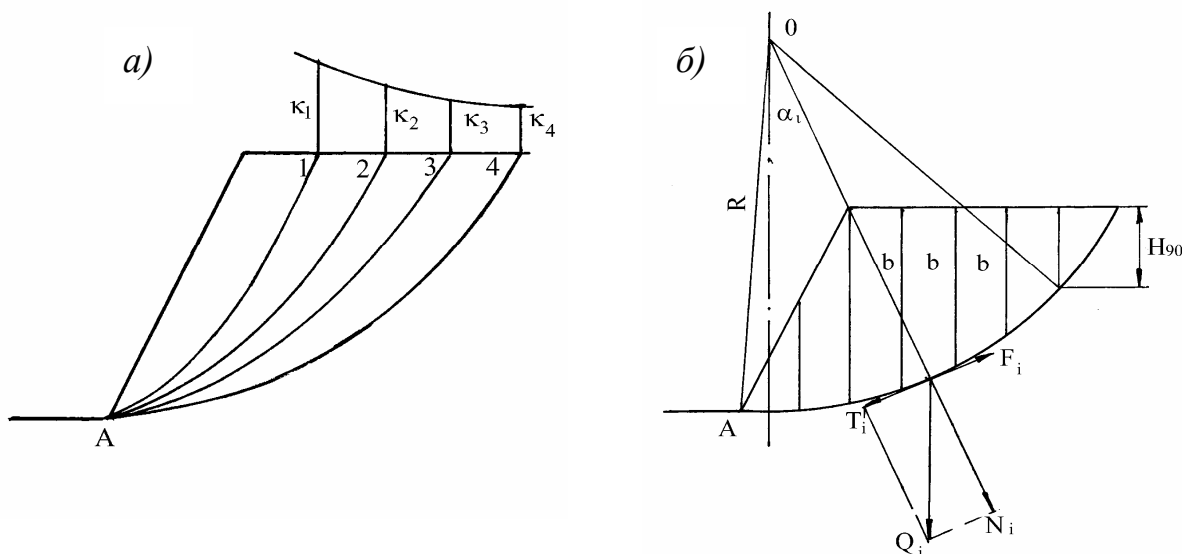


Рис. 2.10. Схемы к расчету устойчивости откосов по К. Терцаги

Момент сил, удерживающих откос, равен:

$$M_y = ClR + \sum_i^n N_i \operatorname{tg} \rho R, \quad (2.31)$$

где  $C$  - сцепление,  $\rho$  - угол внутреннего трения,  $l$  - длина дуги,  $R$  - радиус поверхности скольжения.

Момент сил, сдвигающих откос, равен:

$$M_c = \sum_i^n T_i R. \quad (2.32)$$

С учетом полученных соотношений получим формулу для определения коэффициента устойчивости откоса:

$$k = \frac{Cl + \operatorname{tg} \rho \sum_i^n Q_i \cos \alpha_i}{\sum_i^n Q_i \sin \alpha_i}. \quad (2.33)$$

Графоаналитический метод Терцаги дает удовлетворительные результаты для сравнительно однородных и необводненных пород [67].

К настоящему времени при оценке устойчивости карьерных откосов широкое распространение получили расчетные методы и схемы Г.Л. Фисенко и последователей его научной школы (методы ВНИМИ).

Метод касательных напряжений, разработанный Г.Л. Фисенко на основе теории предельного равновесия сыпучей среды и позволяет определить поверхность скольжения в однородном массиве для условий плоского откоса.

Порядок выполнения расчета для оценки устойчивости откоса, иллюстрирует рис. 2.11, а. В выбранном масштабе отстраивают развертку расчетной поверхности скольжения, на которой в соответствующих точках (середине элементарного участка поверхности скольжения) восстанавливают ординаты, равные действующим касательным напряжениям и сопротивлениям сдвигу.

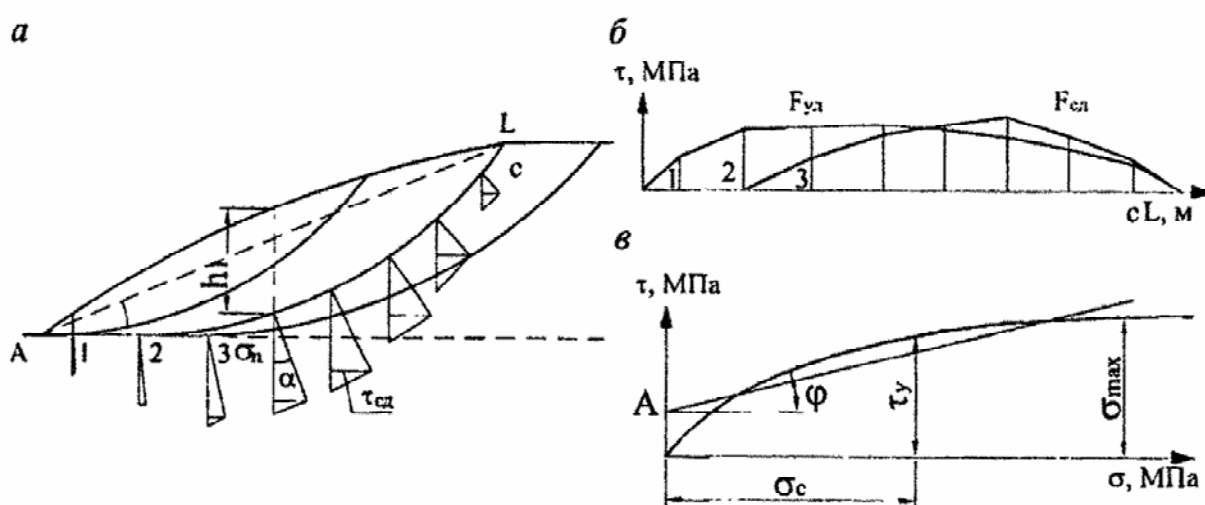


Рис. 2.11. Схема устойчивости откоса методом «касательных напряжений»:

а - расчетный профиль; б - эпюры удерживающих и сдвигающих напряжений, действующих в откосе; в - паспорт прочности пород

Определяют сдвигающие касательные напряжения:  $\tau_{cd} = 1/2 h_i \gamma \sin 2 \alpha_i$ , где  $h_i$  - высота породного отсека в расчетной точке поверхности скольжения;  $\gamma$  - плотность пород;  $\alpha_i$  - угол наклона поверхности скольжения.

Сопротивление пород сдвигу (удерживающее касательное напряжение  $\tau_{y\partial}$ ) определяется на графике сопротивления сдвигу по величине нормального напряжения  $\sigma_n = h_i \gamma \cos^2 \alpha_i$ . Концы ординат соединяются плавными кривыми и рассчитывают площади фигур, ограниченных этими кривыми и осью абсцисс.

Удобна также графическая интерпретация метода касательных напряжений (см. 2.11, б). В контуре откоса отстраивают одним из известных способов поверхность скольжения и разбивают призму возможного обрушения на элементарные блоки, количество которых назначают из условия аппроксимации кривой скольжения прямолинейными отрезками. В пределах каждого элементарного блока проводят нормаль к отрезку поверхности скольжения, откладывают вертикально направленный вектор  $\gamma h$ , восстанавливают из его конца пер-

пендикуляр на направление нормали и из полученной точки опускают перпендикуляр на вектор  $yh$ . Стороны образованного треугольника составляют векторы  $\tau_{cd}$  и  $\sigma_n$ . По величине вектора  $\sigma_n$  определяют с использованием графика  $\tau = f(\sigma_n)$  величину удерживающего касательного напряжения  $\tau_{y\partial}$ . Последний этап включает в себя построение на развертке кривой скольжения эпюр касательных  $\tau_{cd}$  и  $\tau_{y\partial}$ , расчет площадей соответствующих фигур и определение коэффициента запаса устойчивости [34].

Метод Маслова - Берера [40, 41] применяется в случаях, когда откос сложен разнородными мягкими породами и оползень происходит по известной произвольной поверхности скольжения. Предполагается, что эта поверхность скольжения уже установлена хотя бы на части ее простираения каким-либо из опытных или теоретических способов.

Метод Г.М. Шахунянца [97, 98] применяется, когда поверхность скольжения каким либо из имеющихся методов четко определена на всем протяжении. Шахунянец предложил использовать для определения коэффициента устойчивости массива грунта, сползающего по фиксированной поверхности скольжения, формулу, полученную для круглоцилиндрической поверхности.

Графостатический метод Л.Л. Покровского [99] заключается в том, что для выяснения состояния устойчивости земляного массива строится многоугольник сил.

Несмотря на значительное разнообразие методов расчета устойчивости откосов с допущением круглоцилиндрической поверхности скольжения, основным недостатком является их применимость в случае, когда склон сложен однородными мягкими породами. В реальных горно-геологических условиях при разработке месторождений открытым способом прибортовой массив подвержен комплексному воздействию природных и техногенных факторов, что требует разработки более совершенных алгоритмов и методических подходов к оценке устойчивости откосов.

## **2.6. Анализ современных теорий прочности применительно к оценке устойчивости откосов и бортов карьеров**

Для описания геомеханических процессов в прибортовом массиве используют различные критерии прочности. По способу получения критерии прочности можно разделить на две большие группы: аналитические и эмпирические. Известны аналитические критерии прочности – Треска–Сен-Венана, Ю.И. Ягна, П.П. Баландина, И.Н. Миролюбова, Л.Я. Парчевского и А.Н. Шашенко. К наиболее популярным эмпирическим относятся критерии О. Мора, З.Т. Бенявского, Хоека-Брауна и некоторые другие. Эмпирические критерии прочности получают на основе обработки результатов лабораторных испытаний горных пород в сложных напряженных состояниях и натурных измерений при соблюдении основных базовых положений механики разрушения [67], аналитические - с использованием некоторой общей зависимости [100].

В настоящее время существует большое количество теорий прочности, однако все они не универсальны: хорошо описывая процесс разрушения одних твердых тел, они непригодны для других, отличающихся по структуре. Для оценки состояния бортов карьеров с мягкими покрывающими породами используют несколько критериев прочности, которые рассмотрены ниже.

*Теория прочности П.П. Баландина* [100, 101] в качестве критерия прочности использует результаты испытаний материала при предельных одноосном растяжении и одноосном сжатии. При этом, формула эквивалентности, приводящая сложное напряженное состояние к простому одноосному, выглядит так:

$$\sigma_{\text{экв}} = \frac{(1-\psi)(\sigma_1 + 2\sigma_3) - \sqrt{(1-\psi)^2(\sigma_1 + 2\sigma_3)^2 + 4\psi(\sigma_1 - \sigma_3)^2}}{2\psi} \leq R_c, \quad (2.34)$$

где  $\sigma_{\text{экв}}$  – напряжение, эквивалентное одноосному напряженному состоянию,  $\psi = R_p/R_c$ .

Аналитическое выражение теории прочности Л.Я. Парчевского–А.Н. Шашенко [67], полученное из тех же предпосылок, что и теория прочности П.П. Баландина выглядит так:

$$\sigma_{\text{экв}} = \frac{(\psi - 1)(\sigma_1 + \sigma_3) + \sqrt{(1-\psi)^2(\sigma_1 + \sigma_3)^2 + 4\psi(\sigma_1 - \sigma_3)^2}}{2\psi} \leq R_c. \quad (2.35)$$

*Критерий Кулона-Мора.* При аналитических исследованиях параметров упругопластического состояния горных пород чаще всего используется критерий прочности Мора [24]. Прочностными характеристиками, входящими в условие прочности, основанное на прямолинейной огибающей предельных кругов главных напряжений, являются угол внутреннего трения  $\rho$  и сцепление  $C$ , либо пределы прочности на одноосное сжатие  $R_c$  и растяжение  $R_p$ .

Линейное соотношение Кулона-Мора имеет вид:

$$\tau = C + \sigma_n \operatorname{tg} \rho. \quad (2.36)$$

Здесь  $\tau$  - напряжение сдвига,  $\sigma_n$  - нормальное напряжение. Критерий Кулона-Мора также может быть выражен в основных напряжениях как:

$$\frac{\sigma_1}{\sigma_3} = \frac{2C \cos \varphi}{\sigma_3 (1 - \sin \varphi)} + \frac{1 + \sin \varphi}{1 - \sin \varphi}. \quad (2.37)$$

Одна из причин, по которой критерий Кулона-Мора часто используется в горной механике – то, что он может быть описан простым математическим выражением, легок для понимания и прост в использовании.

*Критерий Друкера-Прагера.* Этот критерий изначально был предложен для описания пластических деформаций в почвах и мягких породах, а позже для оценки прочности пород, бетонов, полимеров и других материалов.

Критерий пластического течения Друкера-Прагера [102] имеет вид:

$$\sqrt{J_2} = A + BI_1, \quad (2.38)$$

где  $I_1$  – первая постоянная напряжения Коши,  $J_2$  – вторая постоянная девиаторной части напряжения Коши,  $A$  и  $B$  – определяются по экспериментальным данным.

В переводе на главные напряжения, критерий выражается как:

$$\sqrt{\frac{1}{6}[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]} = A + B(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3). \quad (2.39)$$

Поскольку поверхность текучести Друкера-Прагера во многом совпадает с аналогичной поверхностью деформации в критерии Кулона-Мора, данный критерий может выражаться через сцепление  $C$  и угол внутреннего трения  $\varphi$ :

$$A = \frac{6c \cos \varphi}{\sqrt{3}(3 + \sin \varphi)}; \quad B = \frac{2 \sin \varphi}{\sqrt{3}(3 + \sin \varphi)}. \quad (2.40)$$

*Критерий Хоека-Брауна.* В этом критерии изначально учитываются физико-механические свойства интактного, то есть неповрежденного породного массива, который в процессе моделирования поэтапно подвергается внешним нагрузкам как природного (гравитация), так и техногенного происхождения (горные работы). В общем виде критерий Хоека-Брауна выражается формулой:

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \sigma_{ci} \left( m_b \frac{\sigma_3}{\sigma_{ci}} + s \right)^a, \quad (2.41)$$

где  $\sigma_1$  и  $\sigma_3$  – максимальные и минимальные напряжения в массиве,  $m_b$  – константа Хоека-Брауна для породного массива,  $s$  и  $a$  – постоянные величины, учитывающие генезис и состояние (качество) породного массива,  $\sigma_{ci}$  – предел прочности на одноосное сжатие массива пород в интактном состоянии [24].

Для породного массива в интактном состоянии критерий Хоека-Брауна сводится к следующему выражению:

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \sigma_{ci} \left( m_i \frac{\sigma_3}{\sigma_{ci}} + 1 \right)^{0.5}. \quad (2.42)$$

Здесь константа  $m_i$ , в отличие от константы  $m_b$ , учитывает только генезис и текстуру горных пород ( $4 \leq m_i \leq 33$ ). Бóльшая величина  $m_i$  соответствует хрупким породам, чем она меньше, тем пластичнее порода, а при  $m_i = 0$  имеет место идеальная пластичность.

Нормальные и сдвигающие напряжения относятся к главным напряжениям согласно уравнениям, опубликованными Г. Балмером [103]:

$$\sigma_n' = \frac{\sigma_1' + \sigma_3'}{2} - \frac{\sigma_1' - \sigma_3'}{2} \cdot \frac{d\sigma_1' / d\sigma_3' - 1}{d\sigma_1' / d\sigma_3' + 1}, \quad (2.43)$$

$$\tau = (\sigma'_1 - \sigma'_3) \frac{\sqrt{d\sigma'_1/d\sigma'_3}}{d\sigma'_1/d\sigma'_3 + 1}, \quad (2.44)$$

где

$$d\sigma'_1/d\sigma'_3 = 1 + am_b \left( m_b \sigma'_3 / \sigma_{ci} + s \right)^{a-1}. \quad (2.45)$$

В критерии учтены характеристика горного массива в зависимости от степени сцепления и связности кусков породы, как для однородного, так и для гетерогенного массива [104, 105], что выражается в уравнениях:

$$m_b = m_i \exp\left(\frac{GSI - 100}{28 - 14D}\right); \quad (2.46)$$

$$s = \exp\left(\frac{GSI - 100}{9 - 3D}\right); \quad (2.47)$$

$$a = \frac{1}{2} + \frac{1}{6} \left( e^{-GSI/15} - e^{-20/3} \right), \quad (2.48)$$

где *GSI* (*Geological Strength Index*) – коэффициент геологической прочности, учитывающий геологические особенности породного массива, в частности его структуру и наличие трещин ( $5 \leq GSI \leq 100$ ); *D* – параметр, зависящий от степени нарушенности массива вследствие взрывных работ и эффекта релаксации напряжений, варьирует от 0 (для интактного) до 1 (для сильно нарушенного) породного массива. В работе [106] приведена полная классификация массива горных пород в зависимости от степени сцепления и связности, а также таблицы коэффициентов геологической прочности для гетерогенных массивов [107].

*Сравнение критериев прочности.* С целью дать качественную оценку рассмотренным теориям прочности в пределах одной безразмерной системы координат ( $X = \frac{\sigma_3}{R_c}; Y = \frac{\sigma_1}{R_c}$ ) были построены нелинейные паспорта прочности для различных пород с учетом их структурных характеристик (рис. 2.12).

В качестве базовой использовалась усредняющая кривая, построенная в пределах этой же системы координат по экспериментальным точкам, полученным А.Н. Ставрогиным [109] в результате многочисленных испытаний горных пород различного генезиса. Критерии прочности оценивались по степени отклонения описанных ими паспортов прочности от экспериментальной кривой. Кривая, соответствующая тому или иному предлагаемому критерию прочности, должна находиться как можно ближе к результирующей кривой.

По результатам испытаний образцов горных пород (суглинки желто-бурые, палевые, красно-бурые; глины красно-бурые и серо-зеленые), отобранных на территории карьера №7 «Север» и №7 «Юг» Вольногорского ГМК были получены экспериментальные точки, соответствующие определенным значени-

ям напряженного состояния в безразмерных координатах. Как видно из рис. 2.12, результирующая кривая экспериментальных образцов ближе всего находится к кривой, соответствующей критерию Кулона-Мора.

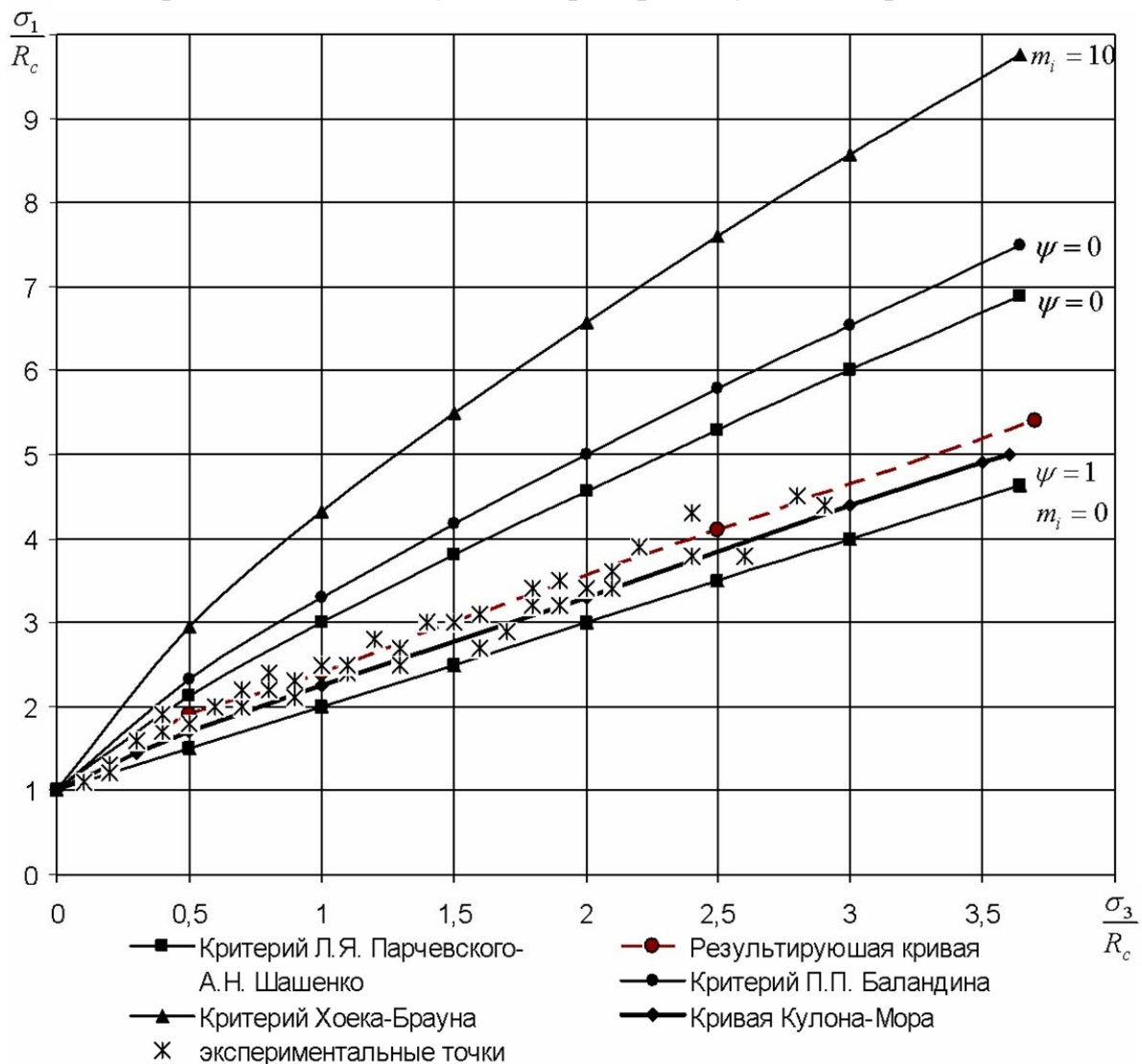


Рис. 2.12. Сравнение аналитических критериев прочности с экспериментальными данными испытаний горных пород [108]

Согласно полученным экспериментальным данным целесообразно использовать этот критерий прочности для численного моделирования устойчивости откосов и бортов карьеров, сложенных мягкими породами [108, 110].

## 2.7. Оценка устойчивости откосов в однородном массиве пород

В настоящее время для геомеханической оценки природных и техногенных массивов широко применяются разнообразные специализированные программы, базирующиеся на использовании численных методов решения, заимствованных из механики твердого деформируемого тела, например, метод конеч-

ных элементов (МКЭ) и метод граничных элементов (МГЭ). Наиболее эффективными инженерными программными продуктами являются Plaxis, SCad Structure Slope, FLAC, Phase2 и др.

Программа Plaxis v9 используется для расчетов напряженно-деформированного состояния системы «основание–фундамент–сооружение» методом конечных элементов в условиях плоской осесимметричной задачи и ориентирована на решение сложных геотехнических задач, возникающих на этапах строительства, эксплуатации и реконструкции сооружений.

Программа "SCad Structure Slope" V1.1.0.86 компании SCAD Soft (<http://www.scadsoft.com>) предназначена для расчёта устойчивости откосов. В качестве механизма потери устойчивости принимается механизм скольжения оползающего массива относительно неподвижной части откоса и в результате рассчитывается коэффициент запаса устойчивости массива. При этом, поверхность скольжения выглядит трехмерной. В основе алгоритма расчета, реализованного в программе, лежит методика, предложенная в работе [111].

Программный комплекс FLAC 4.0 и FLAC/Slope компании Itasca базируется на методе конечных разностей и позволяет анализировать несколько поверхностей скольжения, используя модифицированную методику СПС, и выполнять комплексную оценку устойчивости откоса [112, 113].

Для численного моделирования устойчивости откосов и бортов карьера Вольногорского ГМК выбрана инженерная программа конечно-элементного анализа Phase2 компании Rocscience Inc. ([www.rocscience.com](http://www.rocscience.com)) – мощный современный программный продукт, предназначенный для выполнения оценки устойчивости горных выработок и техногенных массивов при открытой и подземной разработке полезных ископаемых. Phase2 позволяет моделировать геомеханические и гидрогеологические процессы, происходящие в массиве горных пород и определять коэффициент запаса устойчивости откосов [107]. Верификация данного программного продукта путем сопоставления результатов моделирования с основными закономерностями напряженно-деформированного состояния массива горных пород и принципами геомеханики, а также с эмпирическими данными по оползневым процессам в гражданском строительстве [114] дает достоверные и точные результаты.

Все инженерные расчеты, представленные в работе, выполнены с помощью лицензионной версии данной программы в Научно-образовательном центре ГВУЗ «Национальный горный университет» в рамках международного проекта «Стійкість геотехнічних систем: ризику, процеси та явища» (грант USB1-021-DP-07 фонду Civilian Research and Development Foundation).

С целью сравнения применимости критериев прочности для геомеханической оценки в программе Phase2 выполнено численное моделирование устойчивости однородного откоса. Профиль откоса изображен на рис. 2.13.



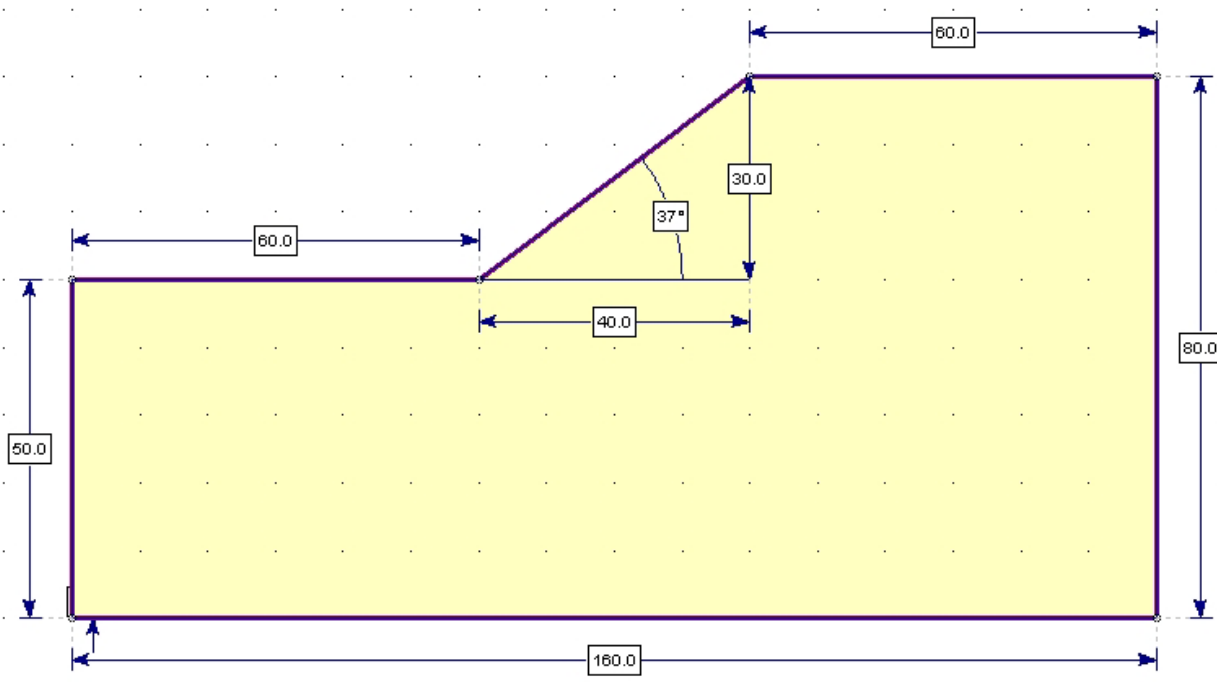


Рис. 2.13. Геометрические параметры откоса

Для однородного породного массива вскрышных пород, сложенного суглинками, приняты следующие физико-механические свойства: модуль Юнга  $E = 20$  МПа, коэффициент Пуассона  $\mu = 0,35$ , плотность  $\gamma = 0,01764$  МН/м<sup>3</sup>, предел прочности на одноосное сжатие intactной породы  $\sigma_{сж} = 1,4$  МПа, сцепление  $C = 0,01 \dots 0,11$  МПа, угол внутреннего трения  $\varphi = 19 \dots 28^\circ$ .

Поскольку геометрические параметры имеют первостепенное значение при оценке устойчивости откосов на карьерах были выполнены расчеты коэффициентов запаса устойчивости (КЗУ) при различных углах наклона откоса (от 30 до 70°) и высотах уступа (от 15 до 40 м) с учетом структурных особенностей породного массива.

При использовании критерия Хоека-Брауна получены зависимости КЗУ от высоты уступа  $H$  и угла наклона откоса  $\alpha$ , представленные на рис. 2.14. Очевидно, что при угле  $\alpha \leq 44^\circ$  обеспечивается достаточная устойчивость откоса в диапазоне высот уступа  $H = 15 \dots 40$  м, поэтому для учета влияния прочностных характеристик пород на устойчивость уступа принимается  $\alpha = 40^\circ$  [115].

Для четвертичных красно-бурых глин и лессовидных суглинков предел прочности на одноосное сжатие варьирует в диапазоне  $\sigma_{сж} = 0,6 \dots 3,0$  МПа. На рис. 2.15 представлены графические результаты расчетов зависимости КЗУ от этого параметра. Так, для принятых геометрических параметров устойчивость откоса будет обеспечена при значениях предела прочности на сжатие вскрышных пород  $\sigma_{сж} \geq 1,0$  МПа [116].

Коэффициент геологической прочности (КГП), используемый в критерии Хоека-Брауна является величиной неоднозначной, так как в расчетах рекомендуется учитывать его ориентировочное значение без особой точности [106].

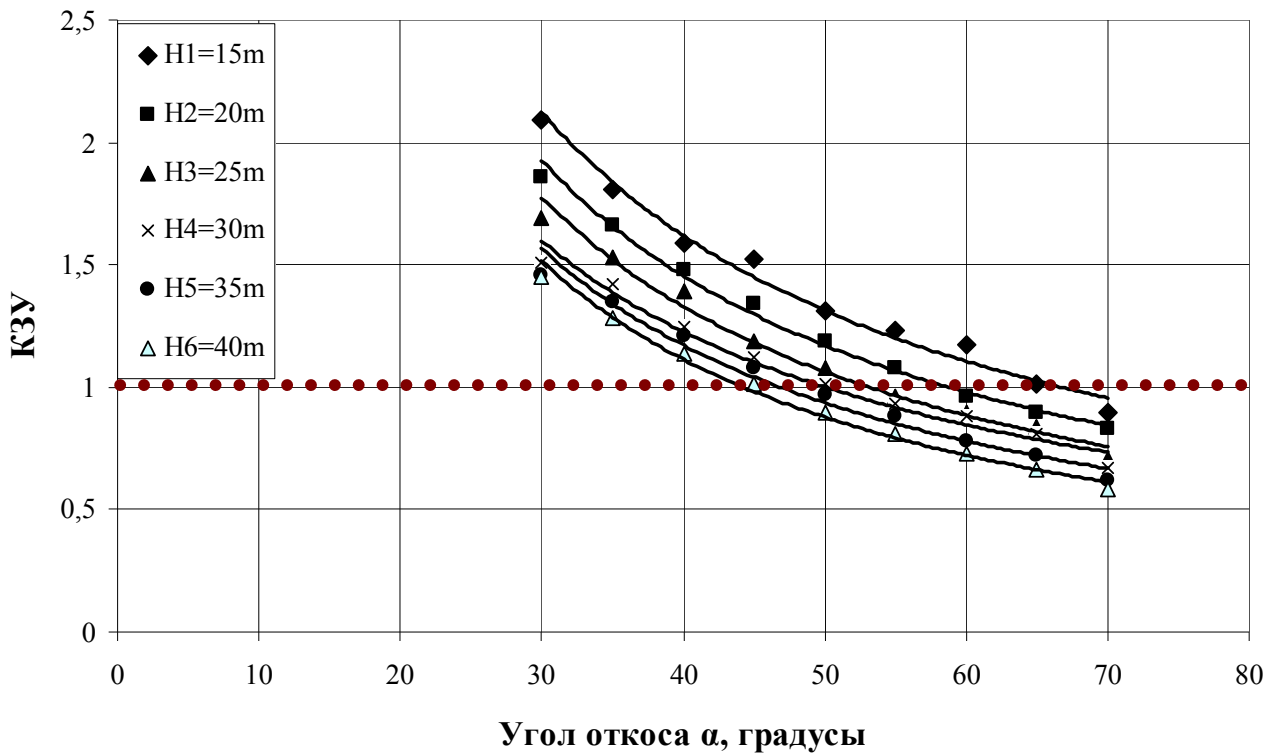


Рис. 2.14. Зависимость КЗУ от геометрических параметров откоса (критерий Хоека-Брауна)

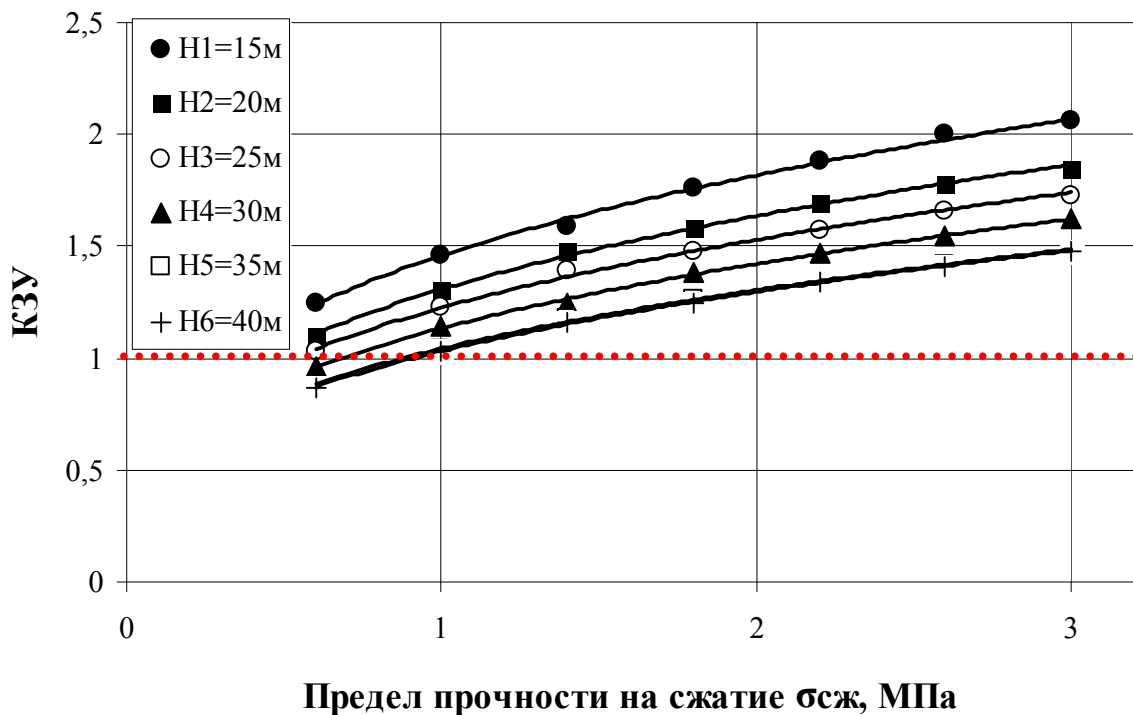


Рис. 2.15. Зависимость КЗУ от предела прочности на одноосное сжатие  $\sigma_{сж}$

Из результатов расчета КЗУ от коэффициента геологической прочности, приведенных на рис. 2.16, видно, что устойчивое состояние откоса обеспечивается при КГП  $\leq 17$ .

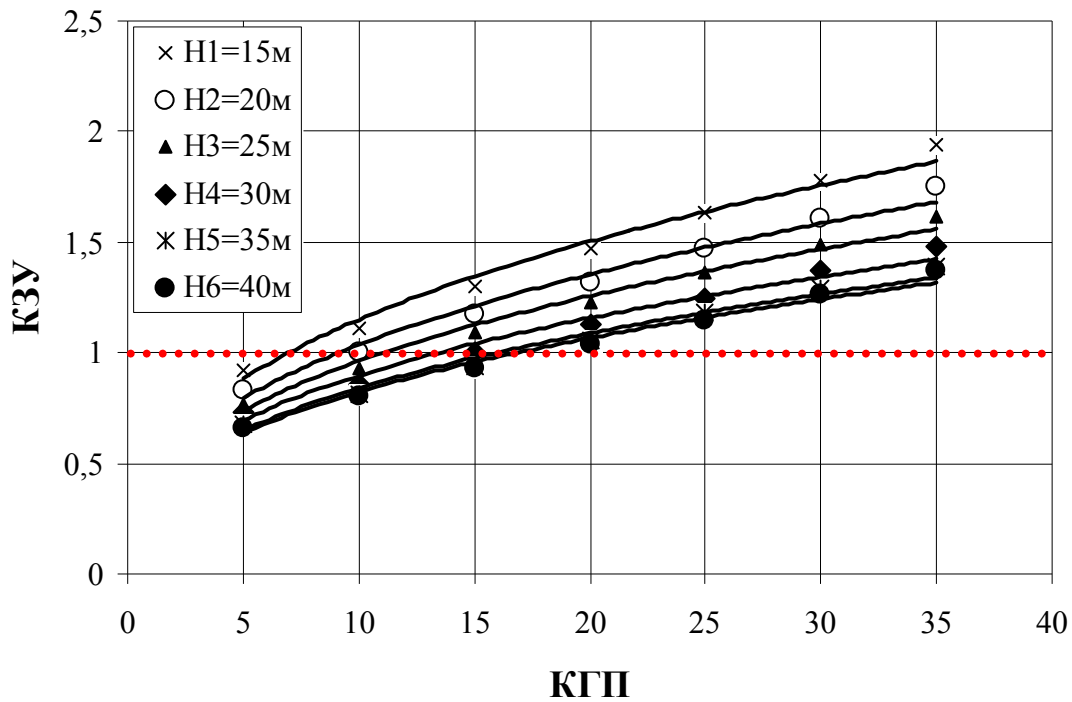


Рис. 2.16. Зависимость КЗУ от коэффициента геологической прочности

Таким образом, для принятых геометрических параметрах и физико-механических характеристиках однородного массива устойчивость откоса по критерию Хоека-Брауна будет обеспечена при угле наклона  $\alpha \leq 44^\circ$  в диапазоне высот уступа  $H=15...40$  м, пределе прочности на сжатие пород  $\sigma_{сж} \geq 1,0$  МПа и значениях КГП  $\leq 17$  [115, 116].

Моделирование устойчивости борта карьера с использованием критерия Друкера-Прагера, как указывалось выше, основано на использовании в качестве базовых параметров сцепления и угла внутреннего трения, которые выражаются в виде интегральных параметров  $q$  и  $k$ . Результаты расчетов устойчивости при различных геометрических параметрах откоса, приведенные на рис. 2.17, показывают, что при высоте уступа  $H \leq 20$  м в широком диапазоне углов  $\alpha = 30...70^\circ$  обеспечивается устойчивость откоса.

Далее для оценки влияния угла внутреннего трения  $\varphi$  на устойчивость откоса принимается  $H = 20$  м при вариациях угла откоса  $\alpha = 30...70^\circ$  и среднем значении сцепления суглинков  $C = 0,04$  МПа. Из приведенной на рис. 2.18 зависимости КЗУ от угла внутреннего трения  $\varphi$  следует, что угол внутреннего трения в диапазоне  $\varphi = 18...28^\circ$  при выбранных геометрических параметрах и условиях моделирования не влияет на устойчивость откоса.

При высоте уступа  $H = 20$  м при вариациях угла откоса  $\alpha = 30...70^\circ$  рассчитаны значения КЗУ откоса в зависимости от предела прочности на одноосное растяжение  $\sigma_p$ . Из приведенной на рис. 2.19 зависимости видно, что устойчивое состояние откоса будет обеспечено при значениях  $\sigma_p \geq 0,04$  МПа.

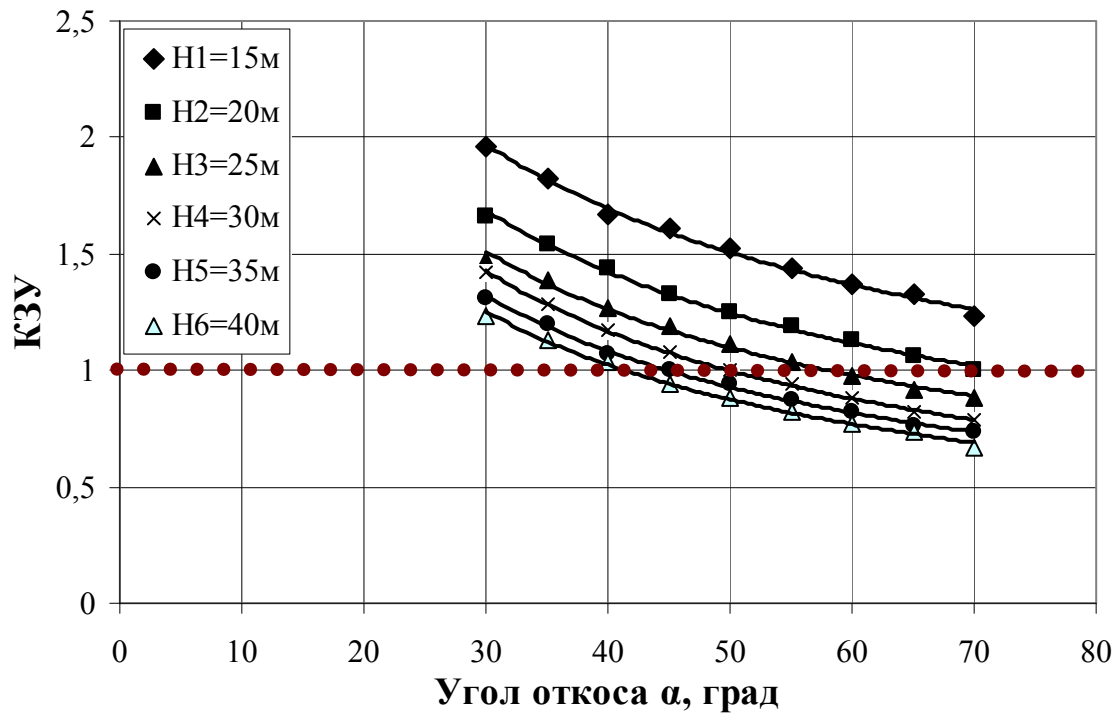


Рис. 2.17. Зависимость КЗУ от геометрических параметров (критерий Друкера-Прагера)

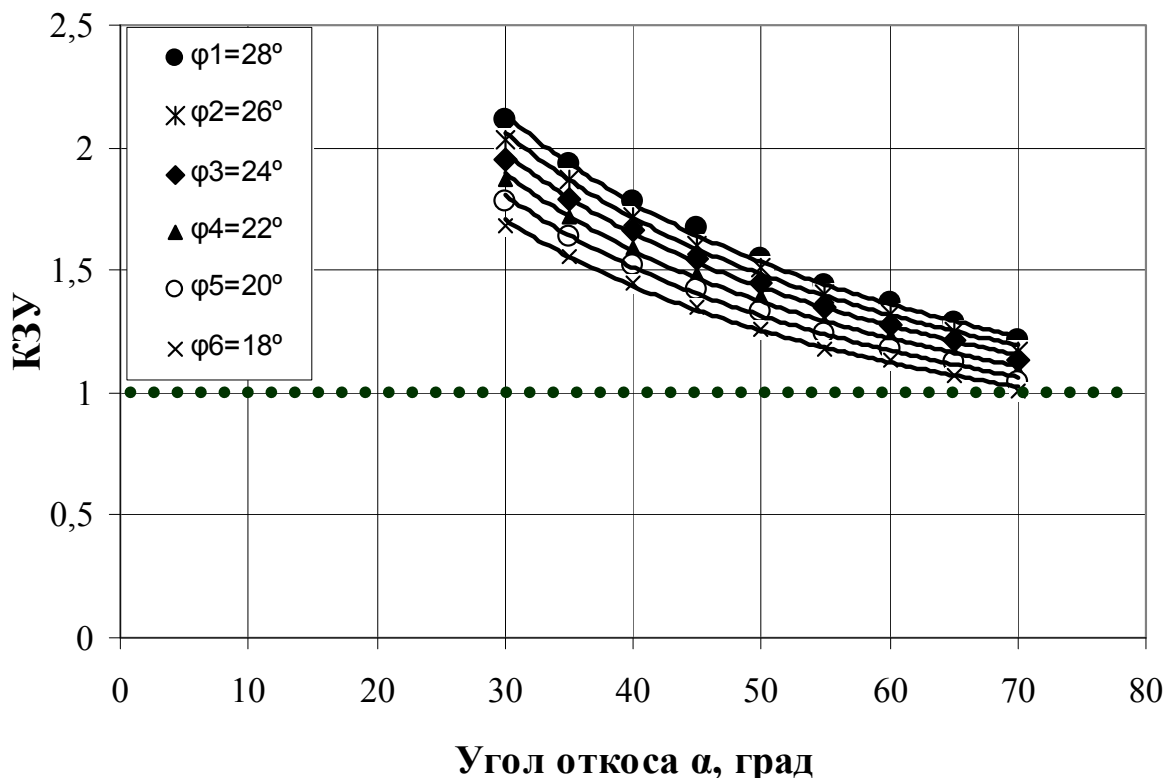


Рис. 2.18. Зависимость КЗУ от угла внутреннего трения  $\varphi$

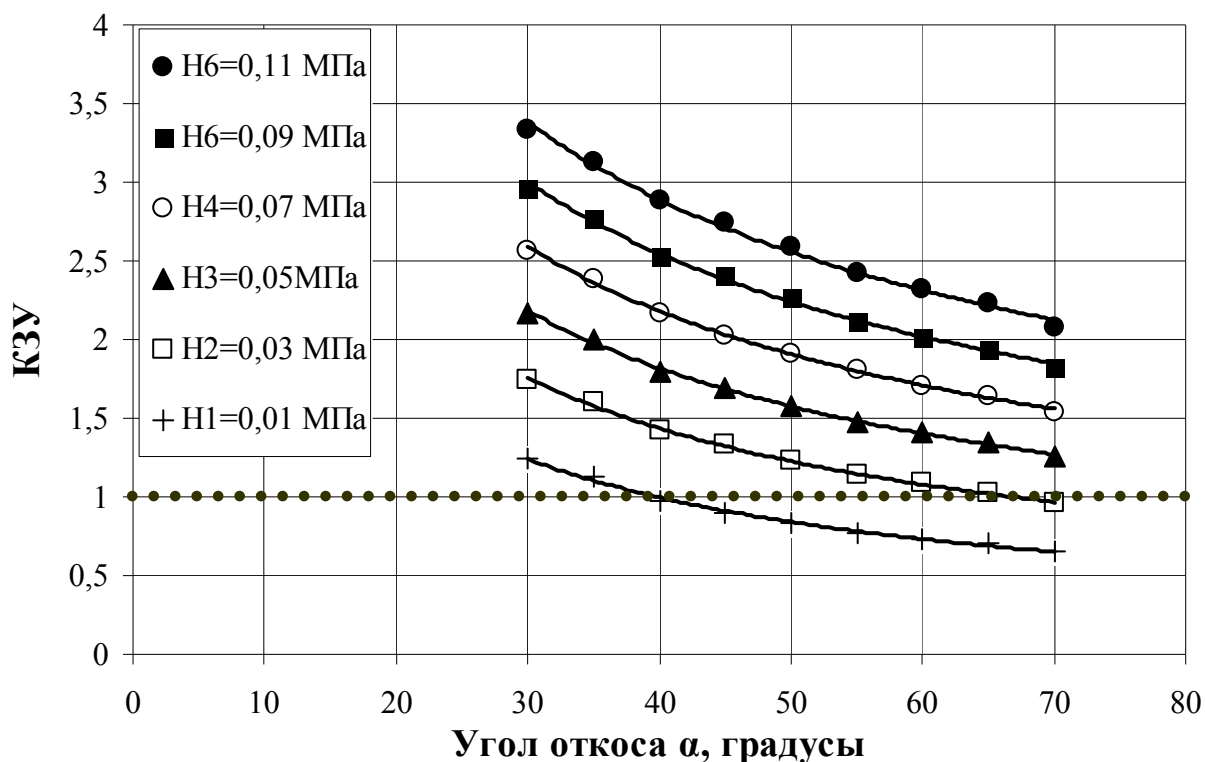


Рис. 2.19. Зависимость КЗУ откоса от предела прочности на растяжение  $\sigma_p$

Анализируя результаты моделирования по критерию Друкера-Прагера можно сделать вывод, что устойчивые параметры однородного откоса с вышеприведенными характеристиками будут обеспечены при высоте уступа  $H \leq 20$  м, углах откоса  $\alpha = 30 \dots 70^\circ$ , сцеплении суглинков  $C = 0,04$  МПа, угле внутреннего трения  $\varphi = 18 \dots 28^\circ$  и значениях предела прочности на одноосное растяжение  $\sigma_p \geq 0,04$  МПа. При этом угол внутреннего трения при заданных геометрических параметрах и прочностных свойствах суглинков практически не влияет на устойчивость откоса [117, 118].

Критерий Кулона-Мора согласно экспериментальным данным, представленным на рис. 2.12, рекомендован в качестве приоритетного для численного моделирования откосов и бортов карьеров, сложенных мягкими породами. Зависимости КЗУ от геометрических параметров откоса, представленные на рис. 2.20, похожи на аналогичные результаты расчета КЗУ по критериям Хоека-Брауна и Друкера-Прагера.

Результаты расчетов КЗУ откоса высотой  $H = 20$  м при различных углах наклона и сцепления пород приведены на рис. 2.21. При сцеплении пород  $C = 30 \dots 50$  кПа и более откос находится в устойчивом состоянии.

Согласно лабораторным данным, сцепление пород в образцах, отобранных в пределах одного участка, могут значительно варьировать, что снижает достоверность результатов расчета устойчивости откосов. Поэтому, при использовании в расчетных схемах фактора сцепления необходимо учитывать структурные особенности, водонасыщение массива и другие факторы.

Зависимость устойчивости откоса от угла внутреннего трения изображена на рис. 2.22.

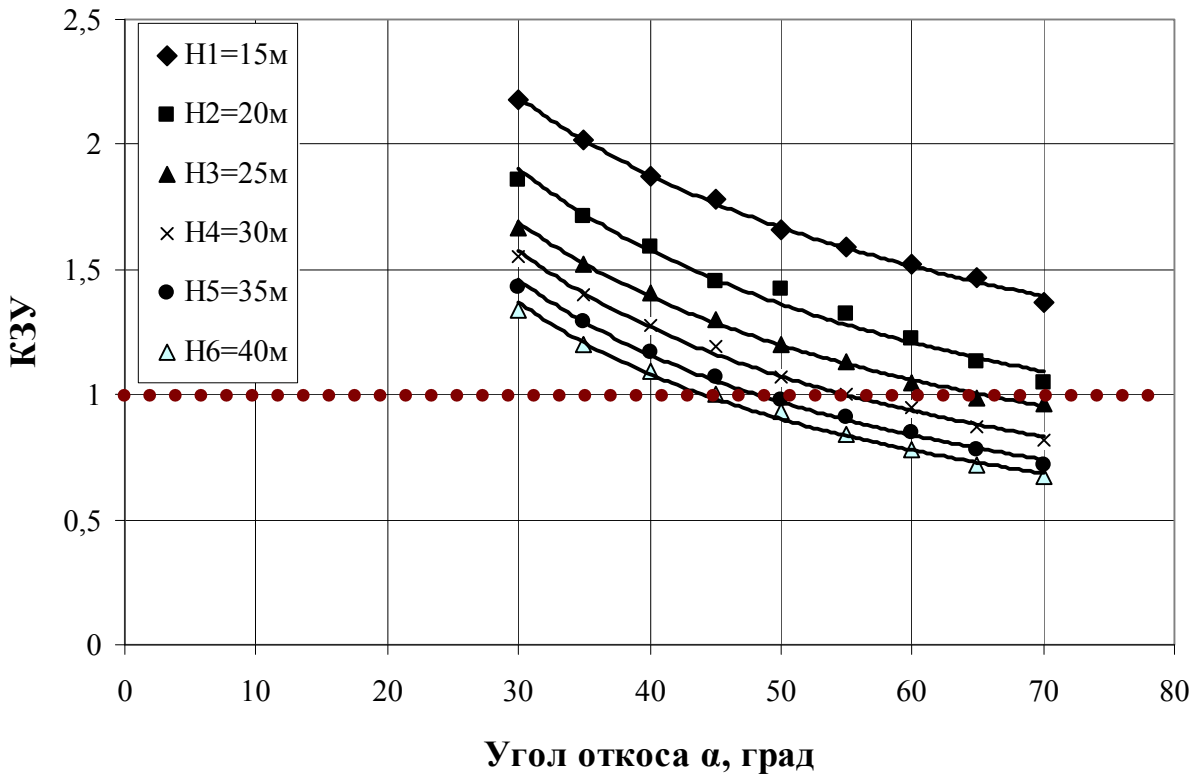


Рис. 2.20. Зависимость КЗУ от геометрических параметров (критерий Кулона-Мора)

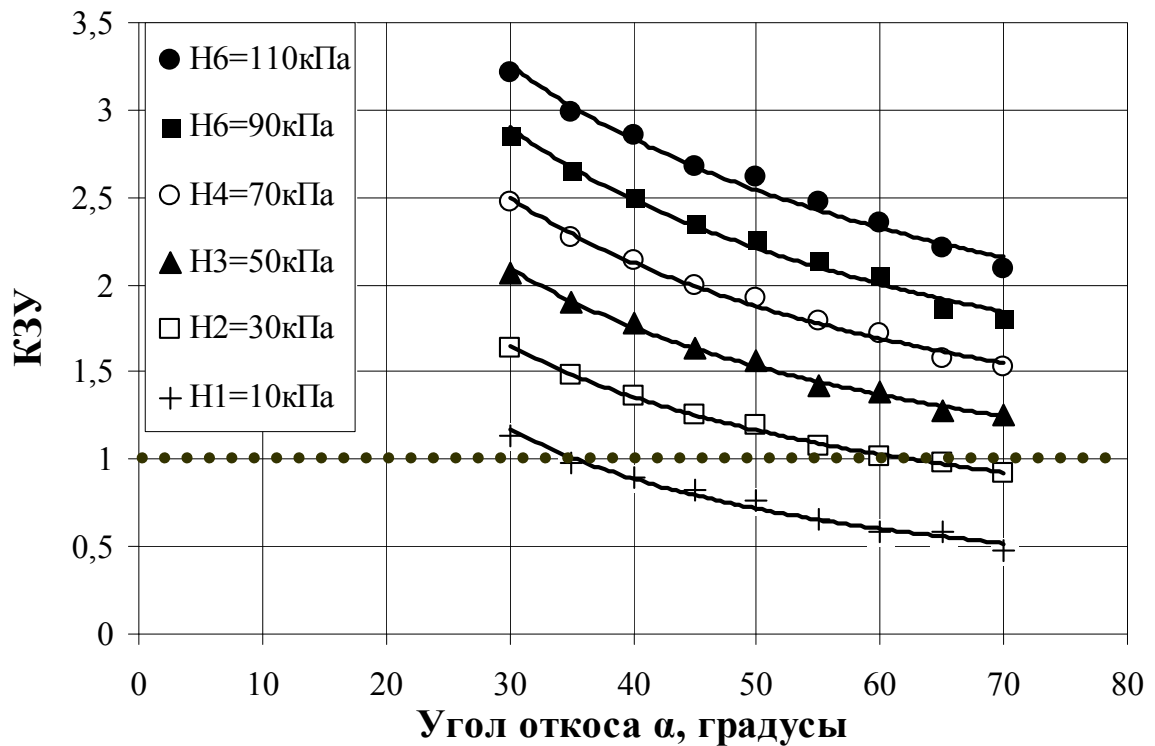


Рис. 2.21. Зависимость КЗУ от сцепления пород в массиве

Результаты данного этапа моделирования дают основание утверждать, что величина угла внутреннего трения в диапазоне  $\varphi = 18...28^\circ$  при заданных геометрических параметрах откоса не снижает устойчивости откоса.

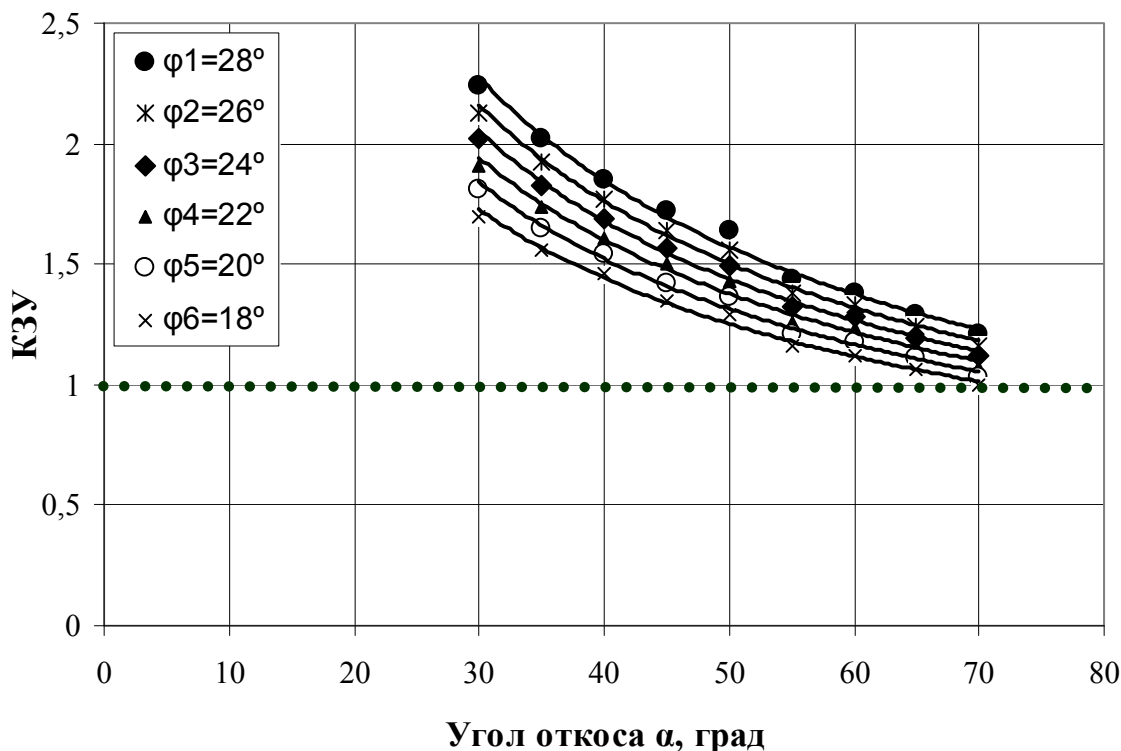


Рис. 2.22. Зависимость КЗУ от угла внутреннего трения

В табл. 2 сведены результаты моделирования устойчивости откоса для условий карьера Вольногорского ГМК с использованием вышеприведенных критериев прочности. Для некоторых геометрических параметров значения КЗУ, рассчитанные по разным критериям, совпадают. Расхождения в полученных значениях КЗУ обусловлены различным набором исходных данных [119]. Для точной оценки устойчивости откосов на карьерах рекомендуется использовать как аналитические, так и эмпирические критерии прочности, что позволяет более достоверно моделировать геомеханические процессы [108].

Анализируя влияние геометрических параметров откоса и физико-механических характеристик пород на устойчивость массива, установлены некоторые особенности процесса сдвижения пород.

Линия скольжения проходит по круглоцилиндрической поверхности. В зависимости от геометрии уступа, линия выходит на поверхность уступа на различных расстояниях от верхней и нижней бровки. Так, при пологих углах ( $\alpha = 30...45^\circ$ ) точка выхода этой линии на верхнем уступе находится на расстоянии  $18,0 \pm 2,5$  м от верхней бровки, а в нижней части уступа –  $3,0 \pm 1,8$  м от нижней бровки; при возрастании угла наклона откоса ( $\alpha = 50...70^\circ$ ) точка выхода линии скольжения находится на верхнем уступе, на расстоянии  $12,0 \pm 2,1$  м от верхней бровки, а в нижней части практически выходит на нижнюю бровку или даже выше ее на поверхности откоса.

Зависимость КЗУ от геометрических параметров откоса

Высота уступа $H$ , м	Зависимость КЗУ от угла откоса, градусы								
	30	35	40	45	50	55	60	65	70
15	<sup>1</sup> 2,18	2,02	1,87	1,78	1,66	1,59	1,52	1,47	1,37
	<sup>2</sup> 2,09	1,81	1,59	1,52	1,31	1,23	1,17	1,01	0,90
	<sup>3</sup> 1,96	1,82	1,67	1,61	1,52	1,44	1,37	1,33	1,23
20	1,86	1,71	1,59	1,45	1,42	1,32	1,22	1,13	1,05
	1,86	1,66	1,48	1,34	1,19	1,08	0,96	0,90	0,83
	1,66	1,54	1,44	1,33	1,25	1,19	1,13	1,06	1,00
25	1,67	1,52	1,41	1,30	1,20	1,13	1,05	0,99	0,96
	1,69	1,53	1,39	1,19	1,08	0,96	0,90	0,84	0,71
	1,47	1,39	1,27	1,19	1,11	1,04	0,98	0,92	0,88
30	1,55	1,40	1,28	1,19	1,07	1,00	0,95	0,87	0,82
	1,51	1,42	1,25	1,12	1,01	0,93	0,88	0,81	0,67
	1,42	1,28	1,17	1,08	1,00	0,94	0,88	0,82	0,79
35	1,43	1,29	1,17	1,07	0,98	0,91	0,85	0,78	0,72
	1,46	1,35	1,21	1,08	0,97	0,88	0,78	0,72	0,62
	1,31	1,20	1,07	1,00	0,94	0,87	0,82	0,76	0,74
40	1,34	1,20	1,09	1,00	0,93	0,84	0,78	0,72	0,67
	1,45	1,28	1,14	1,01	0,90	0,81	0,73	0,66	0,58
	1,23	1,13	1,04	0,94	0,88	0,82	0,77	0,74	0,67

\*Примечание. Критерии прочности: <sup>1</sup>Кулона-Мора, <sup>2</sup>Хоека-Брауна, <sup>3</sup>Друкера-Прагера

Характерной особенностью механизма сдвижения массива является образование областей критических напряжений в откосе, что ведет к возникновению максимальных деформаций и инициирует процесс образования поверхности скольжения (рис. 2.23).

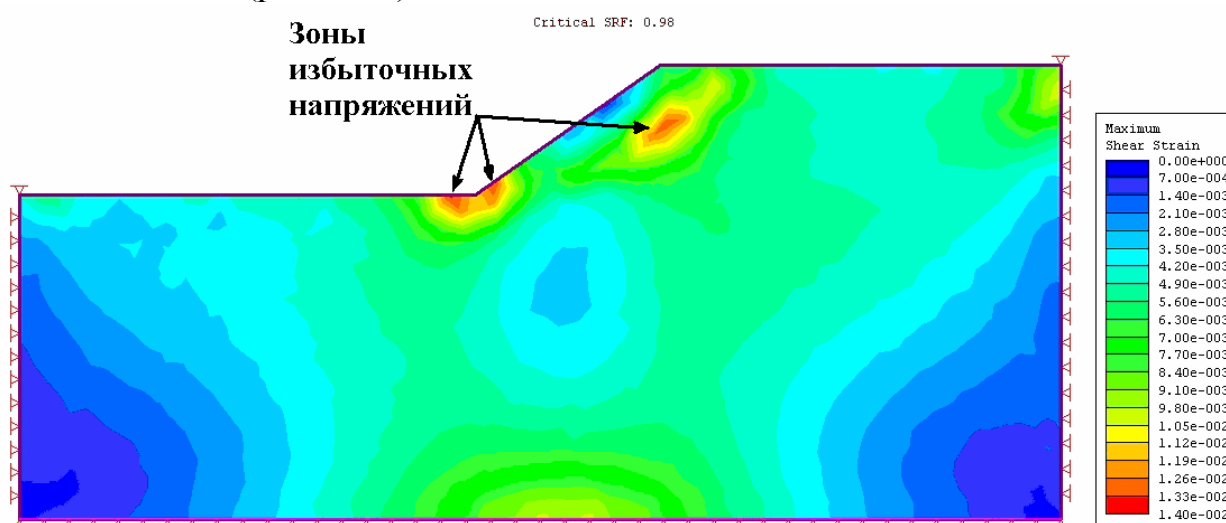


Рис. 2.23. Образование областей критических напряжений в откосе



Таких областей идентифицировано три и, как показывают многочисленные этапы моделирования, наблюдаются они независимо от вариации геометрических или механических характеристик массива. Главная критическая область возникает на поверхности откоса в нижней его части на расстоянии  $3,0 \pm 1,5$  м от нижней бровки и ее размер составляет в среднем  $3,0-3,5$  м. Аналогичная по размерам и интенсивности напряжений область деформаций возникает у подошвы уступа на расстоянии  $3,2 \pm 0,8$  м от нижней бровки. Третья область образуется в глубине массива на расстоянии  $10,0 \pm 2,0$  м ниже верхней бровки, и с ней связан процесс инициации сдвиговых процессов.

Нарастание напряжений в описанных областях приоткосной части массива вследствие природных факторов или внешних техногенных нагрузок обуславливает процесс образования поверхности скольжения, по которой оползает породный массив. При этом, линия скольжения огибает по контуру три области критических напряжений [119]. Максимальные сдвиговые деформации в этих участках достигают значений  $\varepsilon_{\max} = 1,4 \cdot 10^{-4}$ , что примерно в 2 раза выше по сравнению с остальной частью прибортового массива пород.

Результаты исследования напряженного состояния в однородном массиве пород с использованием различных критериев прочности позволяют сделать вывод о том, что *снижение геомеханической устойчивости однородного откоса уступа из мягких вскрышных пород до коэффициента запаса 1,05...1,15, приводит к возникновению в массиве зон избыточных напряжений, по которым проходит поверхность скольжения, что позволяет прогнозировать образование оползнеопасных участков на карьерах.*

В настоящее время на карьерах получила распространение технология лазерного сканирования откосов и бортов карьеров, позволяющая осуществлять объемный анализ откоса с определением потенциальных оползнеопасных участков. Например, сканеры, разработанные компанией SRK Consulting ([www.srk.com](http://www.srk.com)) способны осуществлять лазерную съемку откоса и после обработки данных в специализированной программе выдавать результаты в 3D формате с отображением избыточных напряжений, трещин, а также потенциальных линий скольжения в массиве пород.

Аналогичную оценку геомеханической устойчивости откосов можно выполнять с помощью программы конечно-элементного анализа *Phase2*, что было продемонстрировано в данной главе монографии.

## Г Л А В А 3

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССА ДЕФОРМИРУЕМОСТИ ГОРНЫХ ПОРОД

#### 3.1. Моделирование на эквивалентных материалах

При разработке месторождений полезных ископаемых и строительстве подземных сооружений необходимо решать весьма сложные инженерные задачи, связанные с напряженно-деформированным состоянием массива горных пород и проявлением различных геофизических процессов.

Одним из методов исследования сложноструктурных объектов в геомеханике является моделирование в лабораторных условиях различных физических процессов горного производства. Цель моделирования заключается в воспроизведении и изучении на модели физического процесса, подобного происходящему в натуральных условиях. Метод моделирования позволяет на уменьшенных или увеличенных по отношению к действительности моделях проводить качественные и количественные исследования изучаемого процесса [67].

В простейшем случае модель воспроизводит изучаемое явление с сохранением физической природы и геометрического подобия, а отличается от оригинала (натуры) лишь размерами одноименных параметров и скоростью протекания исследуемого процесса. Иногда значительно проще, удобнее и рациональнее модель изготавливать из среды, отличной по своей физической природе от оригинала. Однако ее создают также с соблюдением условий подобия. В этом случае исследование какого-либо процесса в оригинале заменяют изучением аналогичного явления на модели.

Метод моделирования базируется на теории подобия. Однако с помощью теории подобия изучают свойства заведомо подобных систем, а моделирование применяют для решения прикладной задачи: установить, каким требованиям должна удовлетворять модель, чтобы процессы, происходящие в ней, были подобны протекающим в натуре.

Для того чтобы процесс в модели был подобен процессам в натуре, необходимо и достаточно выполнять следующие требования:

- 1) модель должна быть геометрически подобна образцу;
- 2) процессы в модели и образце должны принадлежать к одному классу и описываться одинаковыми дифференциальными уравнениями;
- 3) начальные и граничные условия в модели должны быть реализованы таким образом, чтобы безразмерные начальные и граничные условия модели тождественно совпадали с такими же условиями в натуре;
- 4) одноименные безразмерные параметры, входящие в дифференциальные уравнения, начальные и граничные условия, в модели и натуре должны быть соответственно равны.

Для исследования проявлений горного давления широко используется метод моделирования на эквивалентных материалах, предложенный Г.Н. Кузнецовым в 1936 г. [120]. Его преимуществом является возможность определения

напряженно-деформированного, а чаще всего только лишь деформированного состояния массива, в интересующих областях, которое в натуральных условиях осуществить невозможно ввиду труднодоступности участков массива.

Основные принципы этого метода сводятся к замене в модели естественных горных пород искусственными материалами с физико-механическими свойствами, которые, в соответствии с принятым масштабом моделирования, находятся в определенных соотношениях с физико-механическими свойствами натуральных горных пород.

При условии удовлетворения всех критериев подобия для эквивалентных материалов и обеспечении геометрического подобия природы и модели, совпадение механических процессов может быть обеспечено при подобии граничных условий [66].

Сущность метода эквивалентных материалов заключается в том, что на физических моделях с известными допущениями и при соблюдении условий подобия изучают физические процессы и результаты этих исследований используют для разработки теории "механизма" процесса, а также практических рекомендаций для промышленности [121].

При исследовании геодинамических процессов в соответствии с принципом механического подобия задаются переходные множители для длины (геометрическое подобие), времени (кинематическое подобие) и массы (динамическое подобие).

*Геометрическое подобие* обеспечивается в том случае, если все линейные размеры модели будут уменьшены в определенное постоянное число раз по сравнению с той областью природы, в которой изучают данное явление:

$$\frac{l'_n}{l'_m} = \frac{l''_n}{l''_m} = \dots = \frac{l^i_n}{l^i_m} = C_l, \quad (3.1)$$

где  $l'_m, l'_n$  - линейный размер модели и области в натуре.

Геометрическое подобие имеет место, если все размеры пространства, занятого изучаемой системой, и размеры ее отдельных элементов будут изменены в определенное число раз по сравнению с размерами пространства, занятого моделирующей системой.

*Кинематическое подобие* будет обеспечено, если сходственные частицы, двигаясь по геометрически подобным траекториям, проходят геометрически подобные пути в промежутки времени, отличающиеся постоянным множителем:

$$\frac{\tau'_n}{\tau'_m} = \frac{\tau''_n}{\tau''_m} = \dots = \frac{\tau^i_n}{\tau^i_m} = C_\tau, \quad (3.2)$$

где  $\tau'_n$  и  $\tau'_m$  — промежуток времени в натуре и модели.

Кинематическое подобие имеет место в этих двух системах в том случае, если сходственные частицы, двигаясь по геометрически подобным траекториям, проходят геометрически подобные пути в промежутки времени, отличающиеся постоянным множителем.

*Динамическое подобие* имеет место в том случае, если массы двух сходственных частиц (соответственным образом расположенных в пространстве и времени) отличаются друг от друга в одно и то же число раз:

$$\frac{m'_n}{m'_m} = \frac{m''_n}{m''_m} = \dots = \frac{m^i_n}{m^i_m} = C_m, \quad (3.3)$$

где  $m_n$  и  $m_m$  — масса частицы в натуре и модели.

*Динамическое подобие* имеет место в том случае, если массы двух любых сходственных частиц, т. е. частиц, соответственным образом расположенных в пространстве и времени, отличаются друг от друга постоянным множителем.

Закон динамического подобия Ньютона выражается следующей математической формулировкой:

$$\frac{P_n}{P_m} = \frac{\rho_n}{\rho_m} \cdot \frac{L^2}{l^2} \cdot \frac{V^2}{v^2}, \quad (3.4)$$

или

$$\frac{P_n}{\rho_n L^2 V^2} = \frac{P_m}{\rho_m l^2 v^2} = idem = N_e, \quad (3.5)$$

где  $P_n, \rho_n, L, V$  — соответственно сила, плотность, линейный размер и скорость в исходной натуральной системе, а  $P_m, \rho_m, l, v$  — соответственно сила, плотность, линейный размер и скорость в элементах тождественной модели.

Следовательно, определив параметры модели, при которых соотношения множителей подобия удовлетворяют условию (3.5), получим модель, динамические процессы в которой будут подобны процессам в натуре.

Для решения конкретной задачи о напряжениях в толще породной массе откоса уступа установим критерии и множители подобия для моделирования указанного процесса с помощью метода эквивалентных материалов. На основании изложенного выше выделим основные силы, которые определяют характер физического процесса.

В первом приближении можно ограничиться учетом внешних (тяжести) и внутренних (напряжений) сил, возникающих в породе.

Преобразуем формулу (3.5), выражающую общий закон подобия Ньютона для случая совместного действия сил тяжести и внутренних напряжений. Заменяя в формуле (3.5) значения квадратов скоростей  $V^2$  и  $v^2$  через ускорения и длины, получаем:

$$\frac{P_n}{\rho_n a_n l_n^3} = \frac{P_m}{\rho_m a_m l_m^3} = idem. \quad (3.6)$$

В рассматриваемой задаче деформация и разрушение породы происходят за счет действия сил тяжести. Поэтому значения ускорения  $a$  в формуле (3.6) будет иметь значение ускорения силы тяжести  $g$ . Следовательно, выполняя замену, имеем:

$$\begin{aligned}\rho_n a_n &= \rho_n g_n = \gamma_n; \\ \rho_m a_m &= \rho_m g_m = \gamma_m,\end{aligned}\tag{3.7}$$

где  $g$  – ускорение силы тяжести, которое можно принять неизменным и в модели, и в натуре;  $\gamma_n$  и  $\gamma_m$  – объемный вес материала природы и модели.

Кроме того, введем в формулу (3.6) обозначение

$$\frac{P_m}{L^2} = N_M; \quad \frac{P_n}{L^2} = N_N,\tag{3.8}$$

под которыми подразумеваются значения предельных напряжений – предел прочности материала на растяжение, сжатие, сдвиг, а также деформационные характеристики пород, например, модуль упругости и т.п.

Подставив величины из формул (3.7) и (3.8) в выражение (3.6), получим:

$$K = \frac{N_M}{\gamma_m L_m} = \frac{N_N}{\gamma_n L_n} = idem,\tag{3.9}$$

где  $K$  – некоторое безразмерное число, которое является «определяющим критерием подобия» для исследуемых процессов деформаций и разрушений пород в условиях действия сил тяжести и напряжений, возникающих в породах.

На основании полученного выражения можно установить основные требования к модели, соблюдение которых обеспечит механическое подобие ее рассматриваемому явлению. Если модель изготовить из материала природы, то будем иметь одинаковые физико-механические свойства модели и природы:  $N_m = N_n$ ;  $\gamma_m = \gamma_n$ .

Из формулы (3.9) имеем:

$$N_m = \frac{l_m}{l_n} \cdot \frac{\gamma_m}{\gamma_n} N_n.\tag{3.10}$$

Имея данные о характеристиках механических свойств моделируемых пород, выражающихся в некоторых численных значениях  $N_n$ , можно для заданного масштаба модели  $l/L$  и заданного отношения  $\gamma_m/\gamma_n$  подсчитать численные значения соответствующих характеристик механических свойств материала модели, которые необходимы для обеспечения подобия модели и природы. В этом случае подходит метод эквивалентных материалов. В качестве определяющих физико-механических характеристик должны быть взяты те характеристики, которые играют в данном процессе ведущую роль. Так, при изучении процесса разрушения пород в качестве определяющих характеристик их механических свойств должны быть взяты предельные значения прочности породы при ее разрушении, которые могут быть определены путем построения огибающей кругов Мора.

В практике расчетов деформаций сыпучих и пластичных материалов во многих случаях используются более простые представления о предельных состояниях этих материалов, характеризующихся некоторыми постоянными значе-

ниями силы сцепления  $C$ , имеющей размерность напряжений, и безразмерным коэффициентом  $\operatorname{tg} \varphi$ , где  $\varphi$  - угол внутреннего трения материала.

Таким образом, при подборе материалов-эквивалентов в качестве определяющих характеристик прочности можно использовать совокупность значений временного сопротивления пород на сжатие  $R_{сж}$  и растяжение  $R_p$  или же коэффициента сцепления  $C$  и угла внутреннего трения  $\operatorname{tg} \varphi$ . Для соблюдения условий подобия необходимо выполнение следующих равенств:

– для внешних сил:

$$P_m = \frac{\gamma_m}{\gamma_n} \cdot \frac{l_m^3}{l_n^3} \cdot P_n, \quad (3.11)$$

– для процессов разрушения:

$$R_{сж.м} = \frac{l_m}{l_n} \cdot \frac{\gamma_m}{\gamma_n} \cdot R_{сж.н}; \quad (3.12)$$

$$R_{p.м} = \frac{l_m}{l_n} \cdot \frac{\gamma_m}{\gamma_n} \cdot R_{p.н}, \quad (3.13)$$

или

$$C_m = \frac{l_m}{l_n} \cdot \frac{\gamma_m}{\gamma_n} C_n; \quad (3.14)$$

$$\operatorname{tg} \varphi_m = \operatorname{tg} \varphi_n. \quad (3.15)$$

Для подбора прочностных характеристик материалов, эквивалентных рыхлым несвязным породам, основным условием будет равенство (3.12-3.13), так как практически в этих породах величина сцепления  $C_n$  очень мала и при масштабе модели, меньшем, чем 1:10, сцепление  $C_m$  будет близким к нулю.

Для соблюдения подобия процессов механики горных пород в области упругих деформаций должны выполняться следующие равенства:

$$E_m = \frac{\gamma_m}{\gamma_n} \cdot \frac{l_m}{l_n} \cdot E_n; \quad (3.16)$$

$$\mu_m = \mu_n, \quad (3.17)$$

где  $E$  – модуль упругости материалов модели и природы,  $\mu$  – коэффициент Пуассона материалов модели и природы.

Механические процессы в массиве горных пород в области пластических деформаций во всем диапазоне напряжений от начальных до разрушающих без учета влияния времени будут подобны, если соблюдается следующее условие:

$$\frac{\varepsilon_{n.м}}{(\varepsilon_y + \varepsilon_n)_м} = \frac{\varepsilon_{n.н}}{(\varepsilon_y + \varepsilon_n)_н}. \quad (3.18)$$

При этом  $(\varepsilon_y + \varepsilon_n) = f(\sigma)$ , где  $\varepsilon_n$  и  $\varepsilon_n$  - пластическая и упругая относительные деформации [120].

### 3.2. Подбор эквивалентных материалов и методика моделирования

Лабораторный подбор и испытания эквивалентного материала для изготовления моделей направлены в сторону изыскания удобообрабатываемых смесей, которые не обладали бы длительными сроками схватывания и твердения, а по своим физико-механическим свойствам обеспечивали бы подобие с горными породами. При этом безразмерные константы - коэффициенты Пуассона и углы внутреннего трения должны численно совпадать в эквивалентном материале и натуральных горных породах [67].

К эквивалентным материалам, имитирующим мягкие горные породы, предъявляются следующие требования:

1. Компоненты материала должны обеспечивать стабильность механических характеристик во времени при незначительных колебаниях температуры и влажности;

2. Компоненты материала должны обеспечивать различный характер деформации, аналогичный породам в натуре, а при изменении их количественного состава – изменение свойств в заданных пределах;

3. Простота и удобство изготовления;

4. Небольшая стоимость приготовления эквивалентных материалов.

В качестве инертного материала наиболее подходящим является песок. Его применение обеспечивает небольшую стоимость и простоту изготовления эквивалентного материала. Кроме того, песок является негигроскопичным материалом, что способствует стабильности свойств эквивалентного материала.

К недостаткам этого компонента следует отнести большую зернистость, что искажает подобие при моделировании тонкодисперсных глинистых пород, а также небольшие колебания объемного веса, что затрудняет моделирование в пределах одной модели значительно различающихся по объемному весу пород.

Более жесткие требования предъявляются к связующему материалу. Прежде всего, он должен в течение длительного времени обеспечивать постоянство как объема, так и свойств эквивалентных материалов, т. е. должен содержать минимальное количество летучих. Все это предопределяет использование в качестве связующего компонента технических масел и смазок. Основным свойством технических масел и смазок, обуславливающим свойства эквивалентного материала, является их вязкость. Анализ технических масел и смазок по всем перечисленным выше требованиям показывает, что наиболее удовлетворительными являются трансформаторное и веретенное масла. Применение этих масел придает эквивалентному материалу хрупкое разрушение, свойственное суглинкам и четвертичным глинам [121].

Модели изготавливают непосредственно в испытательных стендах, представляющих собой жесткие рамные конструкции. При изготовлении плоских моделей вместо опалубки используют прозрачные ограждающие стенки, ста-

ционарно закрепляемые на весь период испытания модели. Для этих целей применяются листовые закаленные стекла, укрепляемые на стыках, которые обеспечивают необходимую жесткость прозрачного бокового ограждения.

После изготовления модели из эквивалентного материала на поверхность моделируемого массива наносится мерная сетка для регистрации картины поля напряжений, деформаций и смещений в период испытания.

Для определения точек сдвижений плоской модели в процессе ее испытания служит метод фотофиксации - периодическое фотографирование боковой поверхности модели с установленными в ней марками и последующие измерения смещений марок на фотоснимках, осуществляемые на компараторе. Метод фотофиксации позволяет быстро и одновременно регистрировать смещения всех точек на боковой поверхности модели, но точность определения смещений точек модели, учитывая масштаб моделирования, оказывается обычно ниже точности определения смещений соответствующих точек при измерениях непосредственно в натуральных условиях.

Моделирование на эквивалентных материалах позволяет с большой степенью детальности проследить механизм процессов в толще пород, особенно процессов деформирования пород с разрывом сплошности, что обычно исключено при других методах моделирования. Вследствие этого метод эквивалентных материалов является наиболее действенным, благодаря чему он получил широкое применение при решении различных задач механики горных пород.

Эксперименты по моделированию проводились в лабораторных условиях на кафедре строительства и геомеханики Национального горного университета. Для этих целей был специально изготовлен плоский стенд размерами 630x545мм, который позволяет моделировать геомеханические процессы, имеющие место в уступах и бортах карьеров. Стенд в собранном виде представляет собой полый лоток, рабочее пространство которого образовано двумя стеклянными перегородками толщиной 6мм. Перегородки прижимаются жестко струбцинами к ограничительной рамке U-образного профиля толщиной 50мм, в результате чего образуется полость для заполнения эквивалентным материалом (рис. 3.1).

Мощность слоя исследуемой загрузки ограничено размерами рамки стенда, расположенной между стеклянными перегородками, и составляет 50мм.

В качестве эквивалентного материала применялась смесь промытого речного песка, просеянного через сито с ячейками 0,5x0,5мм. Используя рекомендации по моделированию геомеханических процессов в откосах, сложенных несвязными сыпучими породами [26, 120], в качестве связующего компонента к исходной смеси добавляли веретенное масло (3% по объему). Это масло обычно применяется в качестве рабочей жидкости для гидросистем различных машин и механизмов, а также в качестве компонента смазок и для специальных целей. Преимуществом применения жидких смазок в эквивалентных материалах является обеспечение постоянства влажности смеси и подходящих для условий моделирования механических характеристик.



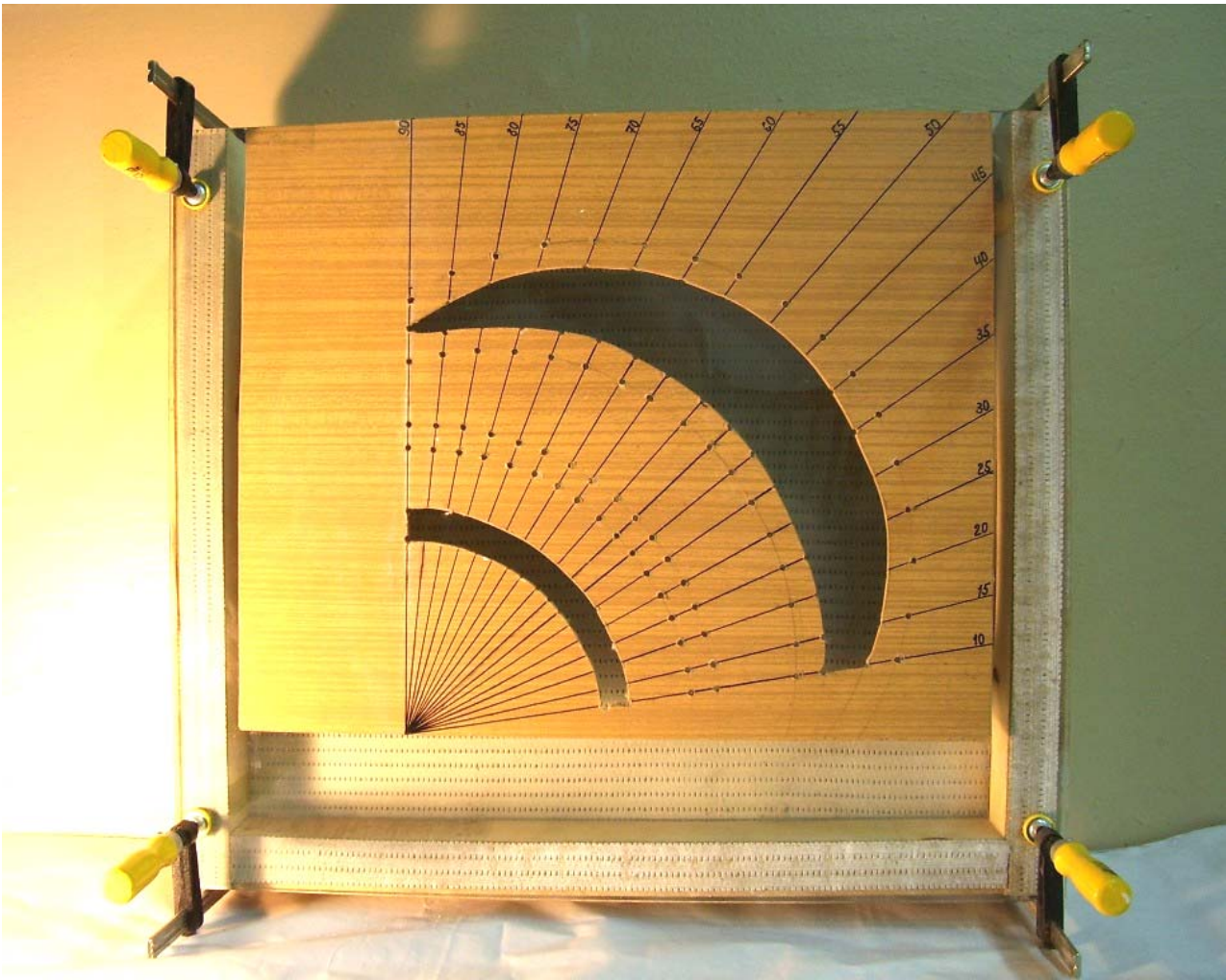


Рис. 3.1. Общий вид стенда для моделирования на эквивалентных материалах

Для расчета прочностных характеристик типовое отношение объемных весов принимается  $\frac{\gamma_M}{\gamma_H} = 0,7$  [120, 121].

Для расчета прочностных свойств эквивалентного материала принимаем усредненные значения физико-механических характеристик мягких вскрышных пород для условий карьеров Вольногорского ГМК в состоянии естественного увлажнения: сцепление  $C=18$  кПа, угол внутреннего трения  $\varphi=21^\circ$ . Тогда, получаем усредненные прочностные характеристики пород:

$$R_{сж.н} = 2Ctg\left(45^\circ + \frac{\rho}{2}\right) = 2 \cdot 18 \cdot tg\left(45^\circ + \frac{21}{2}\right) = 52 \text{ кПа}; \quad (3.19)$$

$$R_{р.н} = 2Ctg\left(45^\circ - \frac{\rho}{2}\right) = 2 \cdot 18 \cdot tg\left(45^\circ - \frac{21}{2}\right) = 25 \text{ кПа}. \quad (3.20)$$

Расчет прочностных характеристик материала, эквивалентного вмещающим горным породам, определялся по формулам 3.12-3.15:

$$R_{сж.м} = \frac{0,4}{20} \cdot 0,7 \cdot 52 = 0,73 \text{ кПа};$$

$$R_{p.m} = \frac{0,4}{20} \cdot 0,7 \cdot 25 = 0,35 \text{ кПа};$$

$$C_m = \frac{0,4}{20} \cdot 0,7 \cdot 18 = 0,25 \text{ кПа};$$

$$\text{tg } \varphi_m = \text{tg } 21^\circ = 0,384.$$

Учитывая удельные веса (для песка  $d_1=2,54 \text{ г/см}^3$ ; для веретенного масла  $d_2=0,92 \text{ г/см}^3$ ) вышеуказанных компонентов, расчет состава смесей по весу в % производится по следующей формуле:

$$a_i' = \frac{a_i d_i}{\sum_1^n a_i d_i}. \quad (3.21)$$

Состав смеси эквивалентного материала приведен в табл. 3.1.

Учитывая только внутреннюю полость лотка с внешними размерами 630x545мм и шириной ограничивающих ребер 40мм, общий вес модели составит:

$$P = (l - 2n) \cdot (b - n) \cdot m \cdot \gamma_m \cdot k, \quad (3.22)$$

где  $P$  – вес модели, г;  $l$  – длина модели, см;  $b$  – ширина модели, см;  $n$  – толщина ограничивающих ребер;  $m$  – мощность слоя, см;  $\gamma_m$  – объемный вес материала, г/см<sup>3</sup>;  $k$  – коэффициент запаса на потери материала при изготовлении, который обычно берется равным от 1,10 до 1,15 [120], принимаем равным 1,10.

Таблица 3.1

Состав смеси эквивалентного материала

Компоненты смеси	% по объему	% по весу	по весу, г
Песок, $a_1$	97,0	98,89	19911,1
Веретенное масло, $a_2$	3,0	1,11	406,3
ВСЕГО:	100	100	20317,4

Порядок проведения испытаний по обрушению откоса следующий. Изначально стенд располагается в горизонтальном положении. В рабочую область лотка засыпается смесь из эквивалентного материала и аккуратно разравнивается металлическим шпателем размером 150x80мм без уплотнения по уровню ограничивающей рамки. После выравнивания поверхности вырезается профиль откоса, соответствующий натурным размерам моделируемого откоса уступа в масштабе 1:50, и задаются углы по транспортиру с шагом делений в 1°.

После завершения формирования откоса на выровненную поверхность смеси наносилась координатная сетка для документирования механических изменений в откосе. Для этих целей в качестве трафарета использовался лист из жесткого картона с продольными прорезями размером в 3мм и шагом 20мм.

Трафарет перед каждым экспериментом располагался на поверхности сформированной модели, и на него наносились последовательно горизонтальные, а затем и вертикальные линии сетки с помощью краски-аэрозоля белого цвета. В течение 10 минут краска высыхала, лоток накрывался лицевой стенкой из стекла, прижимался струбцинами к ограничивающей рамке, и модель медленно поднималась в вертикальное положение. При этом происходил процесс деформации массива и сдвигение призмы обрушения, что можно было визуальнo наблюдать и фиксировать с помощью фотоаппарата. Перед каждым экспериментом эквивалентный материал подвергали тщательному перемешиванию металлическим шпателем и вновь засыпали в лоток стенда.

Для моделирования устойчивости уступа в лотке стенда формировался откос из эквивалентного материала с различными углами наклона в диапазоне от 40 до 90° с шагом 5°. Задача заключалась в изучении устойчивости уступа при различных углах откоса без вертикальной подрезки, чтобы выявить условия критического состояния массива, когда силы, удерживающие откос, находятся в равновесии по отношению к сдвигающим силам.

Как известно, в плоских моделях возможны погрешности, возникающие за счет сил трения смеси о боковые грани, в результате чего возникает дополнительное сопротивление силам, стремящимся сдвинуть откос. Для уменьшения сил трения на границе взаимодействия эквивалентного материала со стеклом перед засыпкой стенда рабочие поверхности стеклянных перегородок протиралась порошком из талька.

После завершения формирования откоса на выровненную поверхность смеси наносилась координатная сетка для документирования механических изменений в откосе. Для этих целей в качестве трафарета использовался лист из жесткого картона с продольными прорезями размером в 3мм и шагом 20мм. Трафарет перед каждым экспериментом располагался на поверхности сформированной модели, и на него наносились последовательно горизонтальные, а затем и вертикальные линии сетки с помощью краски-аэрозоля белого цвета. В течение 10 минут краска высыхала, лоток накрывался лицевой стенкой из стекла, прижимался струбцинами к ограничивающей рамке, и модель медленно поднималась в вертикальное положение. При этом происходил процесс деформации массива и сдвигение призмы обрушения, что можно было визуальнo наблюдать и фиксировать. Для определения сдвижений точек плоской модели в процессе ее испытания применен метод фотофиксации – периодическое фотографирование боковой поверхности модели.

Деформации массива материала, происходящие в толще модели, анализировались по смещениям линий в координатной сетке. Вся наглядная информация замерялась и фиксировалась в журнал моделирования. Испытание моделей проходило при постоянной высоте уступа в масштабе 1:50. После проведения лабораторных испытаний, проводилась обработка результатов моделирования с анализом деформаций массива и появления трещин по фотографиям.

Исходные модели перед каждым экспериментом в горизонтальном положении фиксировались с помощью фотоаппарата, который закреплялся на шта-

тиве на уровне 1 м от поверхности стенда. Дальнейшая фотофиксация модели в вертикальном положении велась на протяжении каждого этапа моделирования из одной и той же точки.

На рис. 3.2 показаны ключевые этапы моделирования устойчивости породного уступа с использованием эквивалентных материалов.

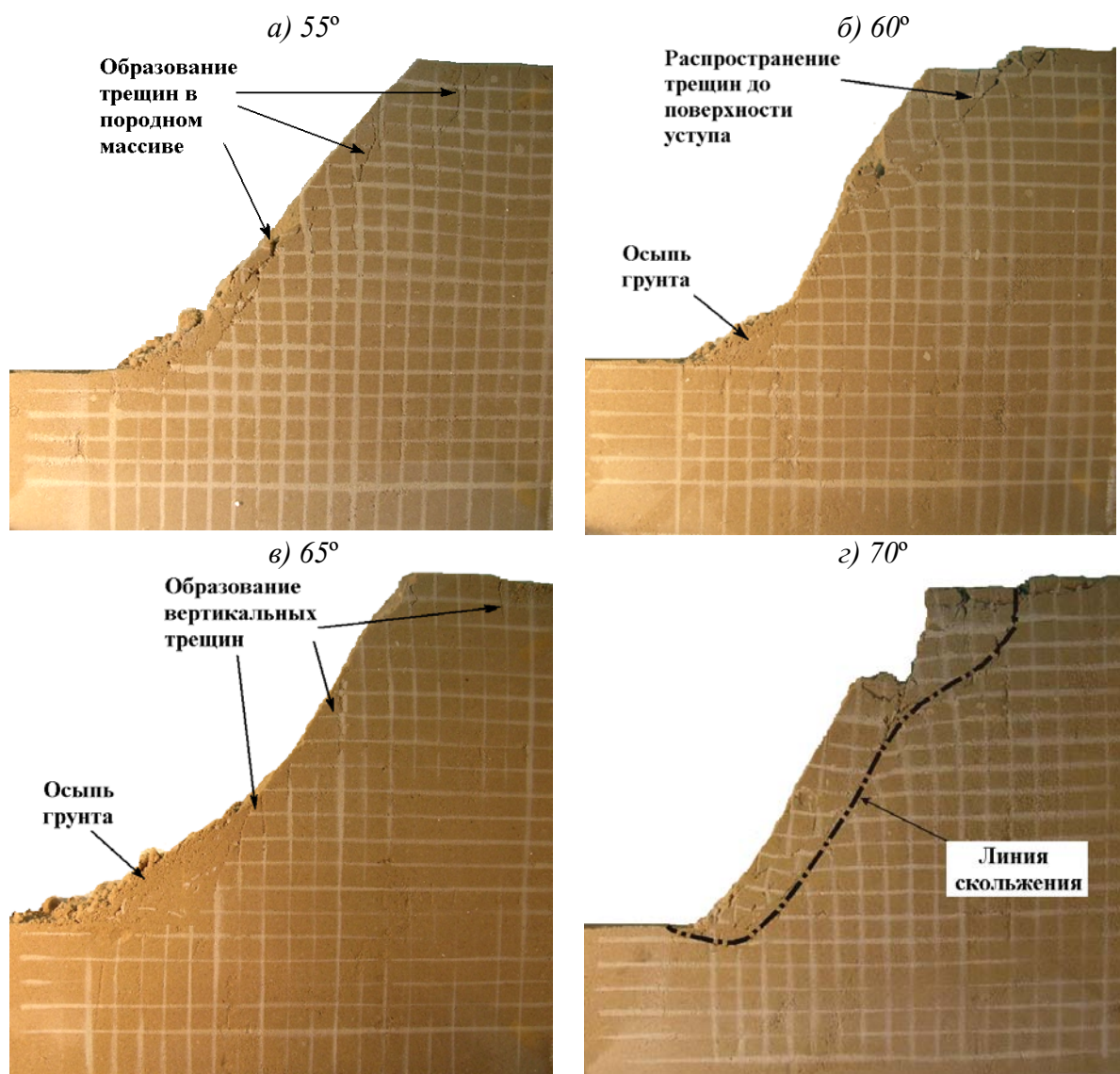


Рис. 3.2. Результаты моделирования устойчивости породного уступа

Выявлено, что при угле откоса до 50° в структуре откоса не происходит существенных нарушений сплошности материала, однако по линиям координатной сетки наблюдались незначительные деформации массива в виде искривленных линий, как на уровне верхней площадки, так и в нижней части на уровне подошвы. Это свидетельствует о начинающемся процессе деформации массива, но в целом устойчивость откоса сохраняется.

При 55° возникают существенные нарушения целостности массива, что проявляется в виде осыпей, когда отдельные частицы и куски материала отры-

ваются от поверхности откоса и скатываются к подошве уступа. При этом имеет место расчленение поверхности откоса мелкими вертикальными трещинами.

При ступенчатом увеличении угла наклона откоса до  $60-70^\circ$  возникают глубокие вертикальные трещины с внутренними деформациями массива, что вызывает постепенное смещение призмы обрушения по круглоцилиндрической поверхности. Следует отметить, что при увеличении угла откоса имеют место множественные деформации, затрагивающие более глубокие слои модели.

На рис. 2,2 видно, что в верхней части уступа сформировалась вертикальная трещина, соответствующая появлению обнажения  $H_{90}$ . В кровле заметен также ряд вертикальных трещин, одна из которых показывает вероятную поверхность смещения массива. При  $70^\circ$  происходит полная потеря устойчивости откоса и обрушение уступа с четко выраженной вертикальной линией отрыва. Сама линия скольжения имеет выгнуто-выпуклую форму. Процесс сдвижения затрагивает часть пород в основании уступа. Выход линии скольжения имеет место на некотором расстоянии от нижней бровки уступа [122].

С целью более глубокого изучения геомеханических процессов в откосе и формы поверхности скольжения, выполнено моделирование уступа с применением элементов применяемой на карьерах технологии управляемого обрушения. Особенностью этой технологии является подработка нижней части откоса уступа и создание отрезной щели в верхней его части [63].

В качестве объекта рассмотрения взят реальный случай обрушения уступа на карьере, имевший место в действительности [124]. Для этого случая известны геометрические параметры уступа: высота  $H = 43,0$  м, угол откоса  $\alpha = 42^\circ$ , шаг обрушения в подошве уступа  $a_1 = 11,54$  м, расстояние от верхней бровки до отрезной щели в кровле уступа  $a_2 = 10,39$  м, глубина отрезной щели  $h = 9,54$  м; физико-механические характеристики пород: объемная плотность  $\gamma = 1900$  кг/м<sup>3</sup>, угол внутреннего трения  $\rho = 22^\circ$ , сцепление  $C = 60$  кПа, модуль упругости  $E = 2,78 \cdot 10^9$  кг/м<sup>2</sup>, коэффициент Пуассона  $\nu = 0,2$ , пределы прочности на одноосное сжатие и растяжение  $R_c = 297 \cdot 10^4$ ,  $R_p = 135 \cdot 10^4$  кг/м<sup>2</sup>.

Устойчивость откоса уступа и процесс обрушения детально исследованы с помощью метода конечных элементов (МКЭ) в программной среде COSMOS/M2.6 [68]. В результате моделирования была рассчитана форма поверхности сдвижения, по которой происходит оползание призмы обрушения в породном уступе (рис. 3.3). На рис. 3.4 показаны результаты моделирования устойчивости уступа с вертикальной подрезкой на модели из эквивалентного материала. При заданном угле  $\alpha = 42^\circ$  и в отсутствие внешних воздействий поверхность откоса находится в устойчивом состоянии. Для ослабления сил сцепления в кровле уступа на верхней площадке модели формировался вертикальный пропил на расстоянии 3-4 см от верхней бровки. Учитывая исходные данные по профилю уступа, приведенные в работе [124] и масштаб моделирования 1:50, высота вертикального пропила  $h = H_{90} = 9,54 \text{ м} / 150 = 0,064 \text{ м} = 6,5 \text{ см}$ .

Для инициации сдвижения массива в нижней части откоса по уровню подошвы последовательно извлекались вертикальные блоки с шагом 1 см, что соответствует расстоянию 1,5 м для натурального объекта.

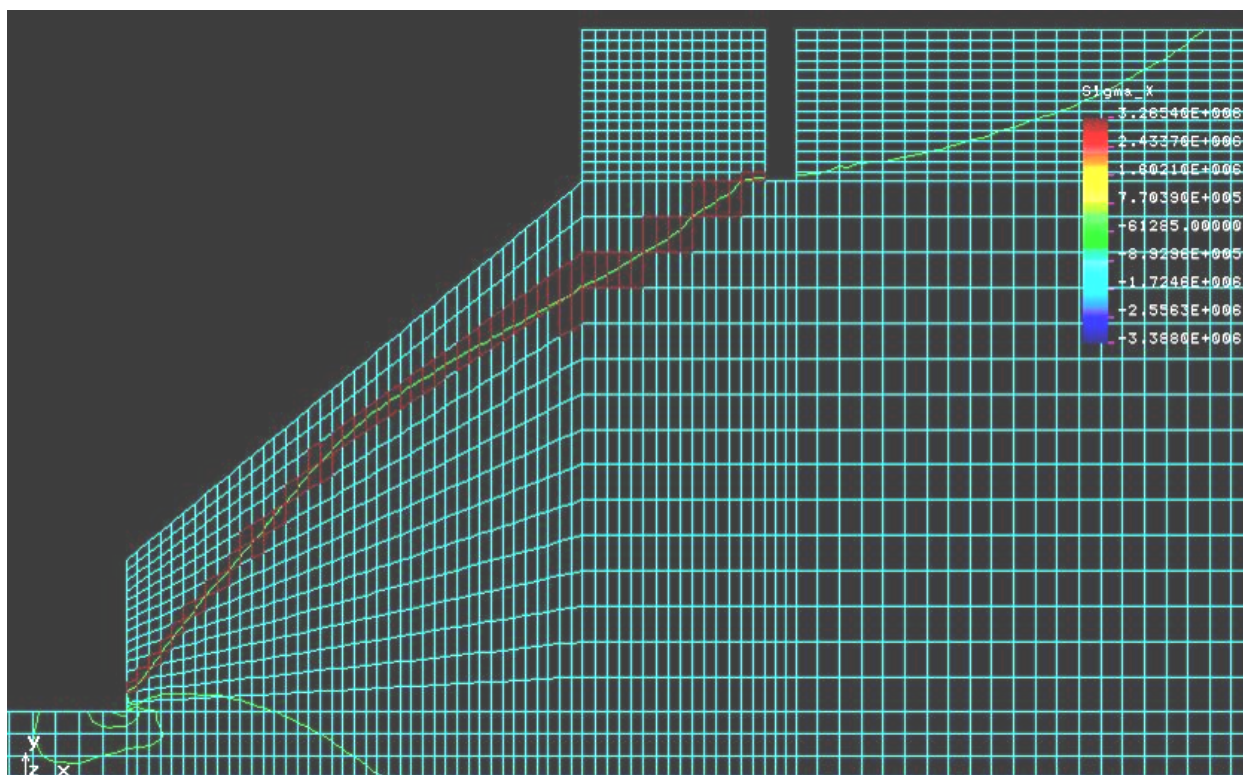


Рис. 3.3. Форма криволинейной поверхности сдвижения пород

При смещении массива фиксировали поверхность сдвижения и сопоставляли с результатами компьютерного моделирования и следами возможных поверхностей скольжения по Ю.И. Соловьеву. При вертикальной подрезке в кровле уступа на фиксированном расстоянии  $a_2$  от верхней бровки и вертикальной подрезке откоса на изменяющемся расстоянии  $a_1$  от нижней бровки наблюдалось сдвижение массива по сложной криволинейной поверхности скольжения.

Деформации массива начинаются при вертикальной подрезке блока на расстоянии 5 см от нижней бровки. При этом наблюдаются поверхностные трещины и осыпание материала в нижней части, а также разрушение вертикального блока и его смещение к области пропила в кровле. При увеличении ширины извлекаемого вертикального блока в подошве уступа до 6-7 см наблюдаются сдвижение массива по четко выраженной поверхности, которая берет начало от вертикального пропила в кровле (рис. 3.4, з).

Форма линии скольжения является сложной: выпуклой в верхней части и вогнутой в нижней части уступа. Профиль поверхности сдвижения похож на изолинию ослабления массива пород, изображенную на рис. 3.3, что свидетельствует о хорошей сходимости результатов, полученных в результате экспериментов на эквивалентных материалах и при компьютерном моделировании методом конечных элементов.

Линии скольжения, представленные на рис. 3.2, з и 3.4, з, в нижней части подобны экстремальным поверхностям в модели Соловьева [50], а в верхней части они имеют отличия [125, 126].

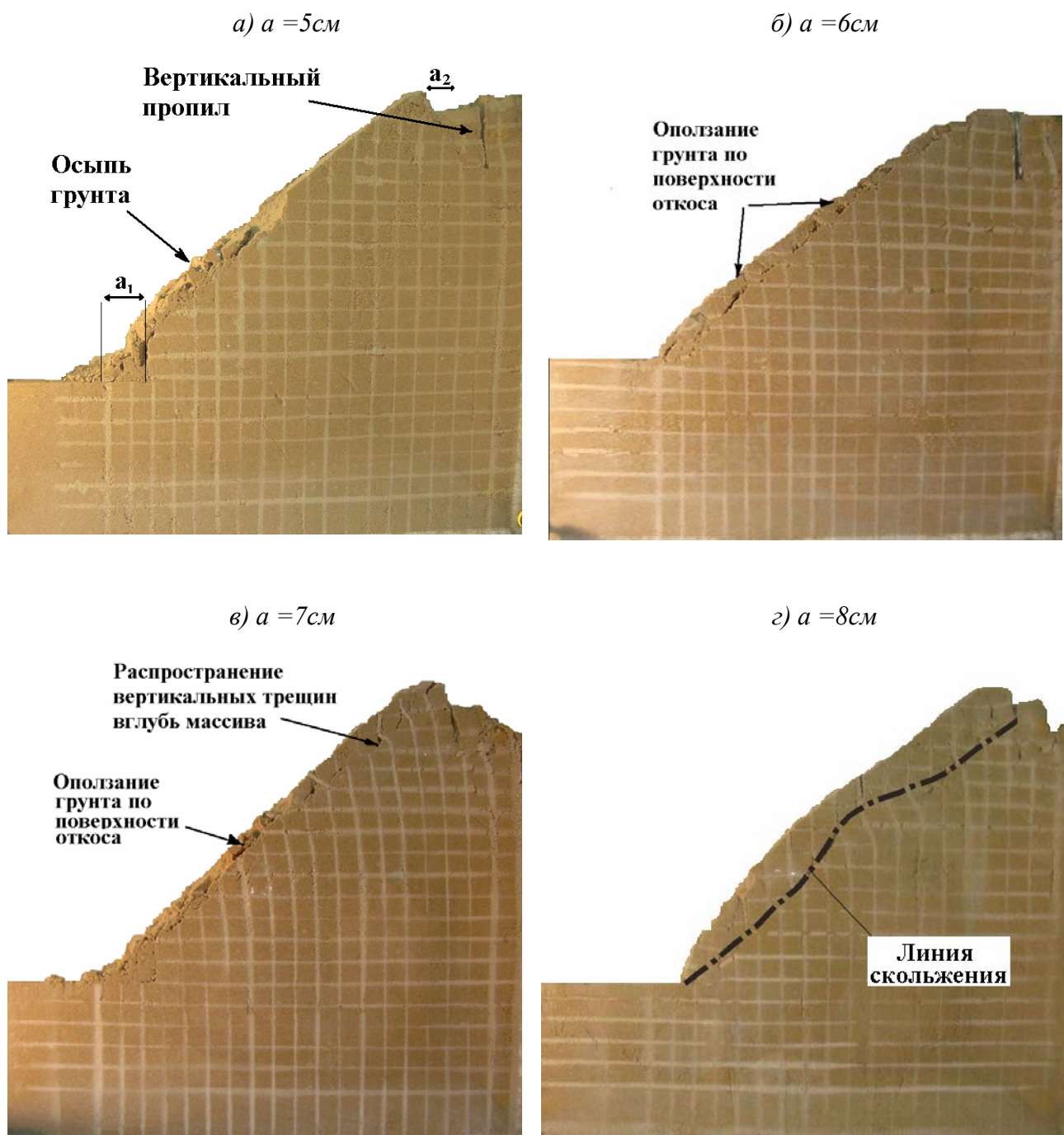


Рис. 3.4. Моделирование устойчивости уступа с вертикальной подрезкой

Использование метода моделирования на эквивалентных материалах позволило проанализировать геомеханические процессы, происходящие при сдвиге массива пород, слагающих породный уступ, и установить общие закономерности нарушения его устойчивости. При хорошо подобранных параметрах эквивалентных смесей метод дает достаточно хорошие результаты, которые коррелируют с результатами компьютерного моделирования.

### 3.3. Экспериментальные испытания образцов пород на сдвиг

С целью выполнения серий экспериментальных испытаний на сдвиг на карьере №7 Вольногорского ГМК были отобраны образцы пород ненарушенного (монолит) сложения при сохранении природного гранулометрического состава в соответствии с ДСТУ Б В.2. 1-8-2001 [127].

Размеры монолитных образцов 100x100x100 мм. Количество отобранных образцов – 3 монолита для каждой литологической разности, отобранные в разных точках карьера.

Образцы верхних вскрышных пород, представленные бурыми, желто-бурыми и красно-бурыми суглинками, отбирались на участках, подвергшихся оползневым процессам. Для отбора монолитов была использована специальная клиновидная лопата. С целью сохранения природной влажности для упаковки образцов горных пород использованы полиэтиленовые пакеты и специальные пластмассовые банки с герметически закрывающимися крышками. Места соединения крышки с тарой покрывался двойным слоем изоляционной ленты.

Для изоляции монолитов был применен метод парафинизации с использованием парафина нефтяного марки НВ 56-58 по ГОСТ 23683 с добавкой 35-50 % (по массе) гудрона, марли и изоляционной ленты. Монолиты суглинков и глин непосредственно после отбора были туго обмотаны слоем марли, пропитанной смесью парафина с гудроном. Затем весь монолит в марле был покрыт слоем смеси парафина с гудроном, обмотан вторым слоем марли, после чего еще раз покрыт слоем парафина с гудроном толщиной не менее 2 мм. До парафинирования на верхнюю грань монолита прикреплялась этикетка, завернутая в кальку и покрытая слоем парафина с гудроном. Образцы грунта, предназначенные для транспортирования в лабораторию, были упакованы в ящики [128].

Испытания образцов пород (суглинков, глины) с целью определения их физико-механических характеристик проводили в лабораторных условиях на кафедре строительства и геомеханики ГВУЗ «НГУ». Методика проведения большинства испытаний регламентирована ДСТУ Б В.2.1-4-96.

Определялись следующие характеристики: сопротивление пород срезу  $\tau$ , угол внутреннего трения  $\varphi$  и удельное сцепление  $C$ . Для этих целей был использован одноплоскостной срезной прибор П10-С с фиксированной плоскостью среза путем сдвига одной части образца относительно другой его части касательной нагрузкой при одновременном нагружении образца нагрузкой, нормальной к плоскости среза (рис. 3.5).

Для испытаний использованы образцы грунта ненарушенного сложения с природной влажностью.

Для определения сопротивления сдвигу использованы образцы в форме цилиндра диаметром 56 мм и высотой 20 мм, отобранные компрессионными гильзами. Образцы, отобранные в компрессионных гильзах перекладывались с обеих сторон листками фильтровальной бумаги и помещались в станину прибора. Испытания проводились без замачивания в расчете на природную влажность материала.



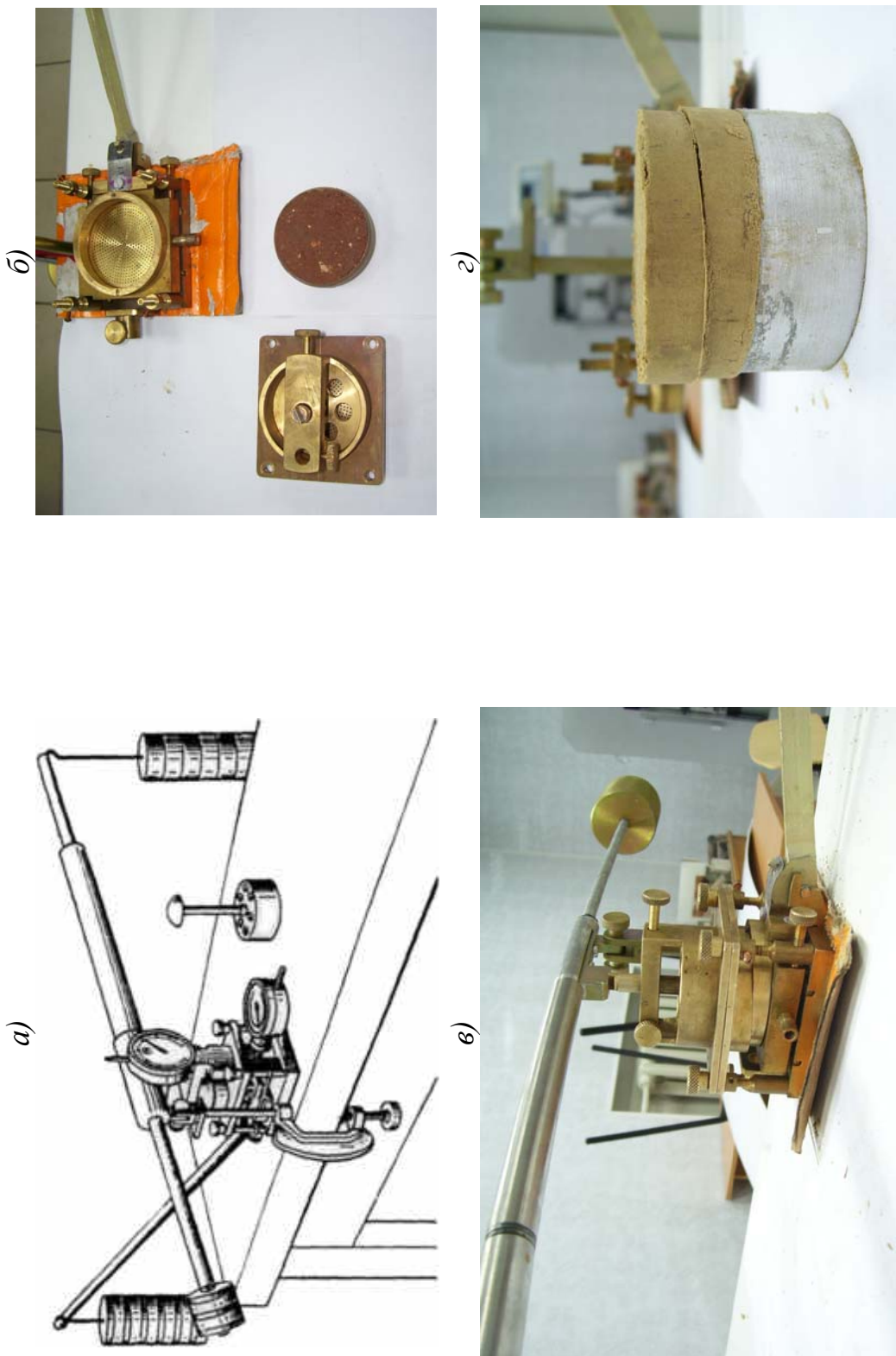


Рис. 3.5. Испытания образцов пород на сдвиг:  
 а) общий вид прибора П10-С; б) подготовка образца к испытанию;  
 в) нагружение модели; г) образец породы после испытания

Порядок выполнения эксперимента следующий. При помощи крепежного устройства нижняя часть прибора надежно закрепляется. На режущую заостренную часть гильзы надевается направляющий цилиндр приспособления для перемещения образцов грунта в прибор и при помощи поршня-выталкивателя образец грунта перемещается в прибор. По верхней и нижней плоскостям образца грунта предварительно прокладываются листки фильтровальной бумаги. Освобожденную от грунта гильзу снимают, устанавливают на место верхнюю часть прибора, плотно прижимают к поверхности грунта поршень и закрепляют его винтом.

К образцу прикладывают сначала вертикальную, сжимающую нагрузку, а потом горизонтальную, сдвигающую. Если испытание проводят только с целью получения показателей сопротивления сдвигу, то заданную расчетную величину вертикальной нагрузки прикладывают к испытываемому образцу сразу, в один прием, независимо от ее величины.

Каждую ступень вертикальной нагрузки выдерживают: при песчаных образцах грунта – не менее 5 мин; при глинистых образцах грунта – не менее 30 мин. Конечную ступень нагрузки выдерживают до условий стабилизации деформации сжатия. За условную стабилизацию деформации принимают величину сжатия, не превышающую 0,01 мм; для песчаных грунтов – за 30 мин; для супесей – за 3 ч; для суглинков и глин – за 12 ч [129].

По измеренным в процессе испытания значениям касательной и нормальной нагрузок вычисляют касательные и нормальные напряжения  $\tau$  и  $\sigma$ , МПа, по формулам:

$$\tau = \frac{Q}{A}; \quad (3.23)$$

$$\sigma = \frac{F}{A}, \quad (3.24)$$

где  $Q$  и  $F$  – соответственно касательная и нормальная силы к плоскости среза, кг,  $A$  – площадь среза, см<sup>2</sup>.

На основании проведенных испытаний вычисляются основные параметры сдвига: угол внутреннего трения и сцепление.

Результаты испытаний представляются в виде графика зависимости между давлением и сопротивлением сдвигу (рис. 3.6). На горизонтальной оси откладываются вертикальные нагрузки  $P$ , на вертикальной оси – соответствующие им величины сдвигающих усилий  $T$ . Прямая АСВ, проведенная через точки, соответствующие результатам параллельно испытанных образцов грунта, представляет собой линию сдвигающих напряжений. Угол наклона этой прямой к оси абсцисс образует угол внутреннего трения  $\varphi$ , а отрезок, отсекаемый прямой сдвига на оси ординат – величину сцепления  $C$ .

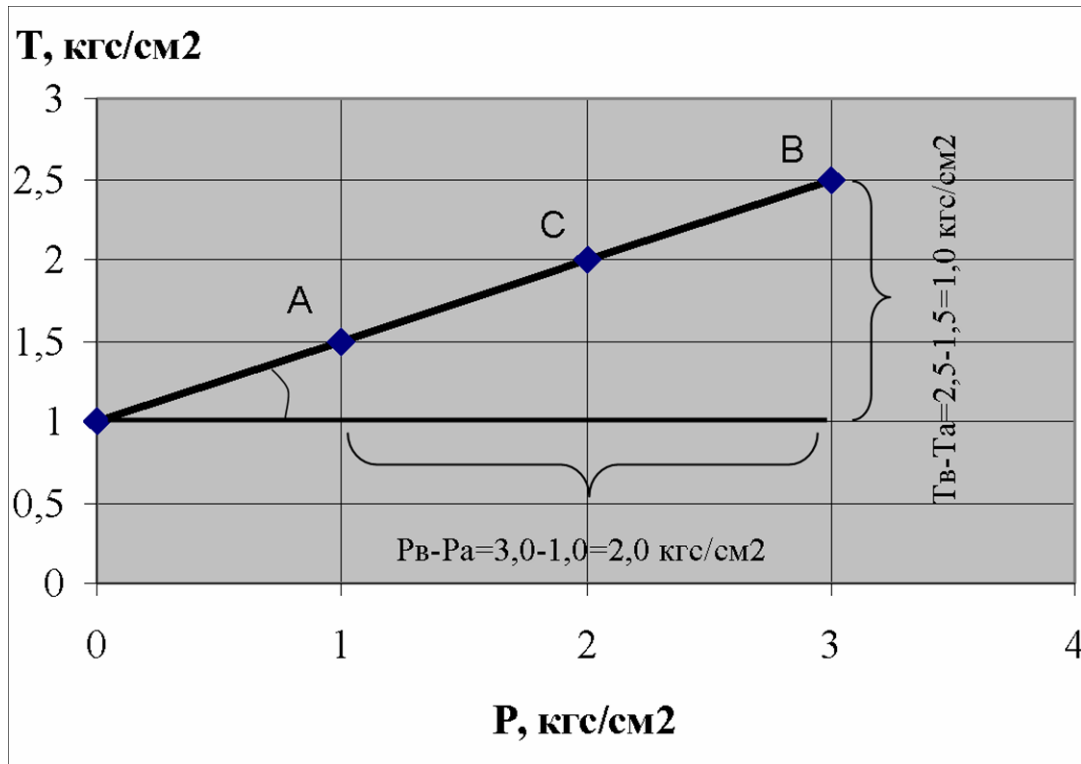


Рис. 3.6. График зависимости между давлением и сопротивлением сдвиг

Вычисляют эти характеристики по следующим формулам [112]:

– коэффициент внутреннего трения

$$tg\varphi = \frac{T_B - T_A}{P_B - P_A}; \quad (3.25)$$

– сцепления

$$C = T_A - P_A \cdot tg\varphi. \quad (3.26)$$

На рис. 3.7 представлены результаты испытаний образцов пород на сдвиг.

Удельные значения угла внутреннего трения  $\varphi$  и сцепления  $C$  при анализе не менее 3-х проб каждой литологической разности, вычислялись по формулам:

$$tg\varphi = \frac{n\sum\tau_i\sigma_i - \sum\tau_i\sum\sigma_i}{n\sum(\sigma_i)^2 - (\sum\sigma_i)^2}; \quad (3.27)$$

$$c = \frac{\sum\tau_i\sum\sigma_i^2 - \sum\sigma_i\sum\tau_i\sigma_i}{n\sum(\sigma_i)^2 - (\sum\sigma_i)^2}, \quad (3.28)$$

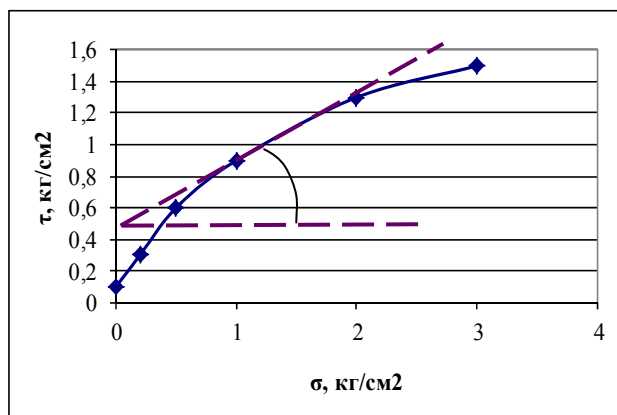
где  $\tau_i$  – опытные значения сопротивления срезам, определенные при различных значениях  $\sigma_i$  и относящиеся к одному инженерно-геологическому элементу или отдельному монолиту грунта (при  $n \geq 3$ ),  $n$  – число испытаний.

Полученные экспериментальным путем значения  $\varphi$  и  $C$  использованы в качестве исходных данных для численного моделирования устойчивости отколов в сложноструктурном массиве пород, что описано в главе 4.

а) Темно-бурые суглинки

$\sigma$ , кг/см <sup>2</sup>	0	0,2	0,5	1	2	3
$\tau$ , кг/см <sup>2</sup>	0,1	0,3	0,6	0,9	1,3	1,5

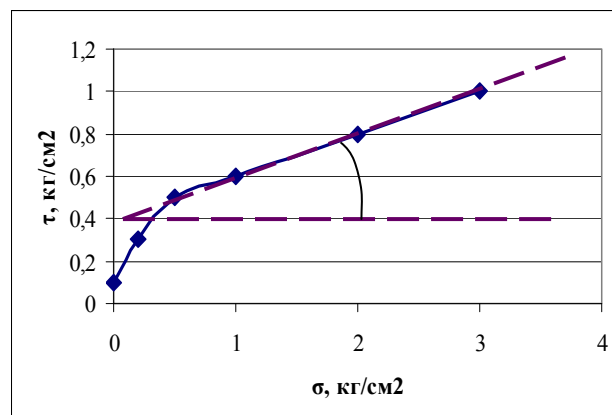
$$C=0,5 \text{ кг/см}^2; \varphi=29^\circ$$



б) Желто-бурые суглинки

$\sigma$ , кг/см <sup>2</sup>	0	0,2	0,5	1	2	3
$\tau$ , кг/см <sup>2</sup>	0,1	0,3	0,5	0,6	0,8	1

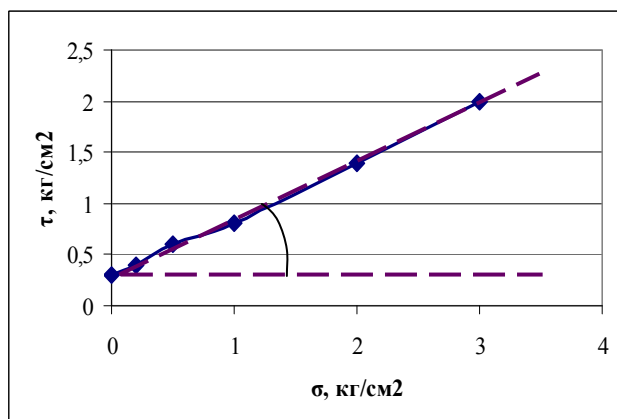
$$C=0,4 \text{ кг/см}^2; \varphi=21^\circ$$



в) Красно-бурые суглинки

$\sigma$ , кг/см <sup>2</sup>	0	0,2	0,5	1	2	3
$\tau$ , кг/см <sup>2</sup>	0,1	0,3	0,6	0,9	1,3	1,5

$$C=0,35 \text{ кг/см}^2; \varphi=20^\circ$$



г) Красно-бурые глины

$\sigma$ , кг/см <sup>2</sup>	0	0,2	0,5	1	2	3
$\tau$ , кг/см <sup>2</sup>	0,1	0,3	0,6	0,9	1,3	1,5

$$C=0,75 \text{ кг/см}^2; \varphi=20^\circ$$

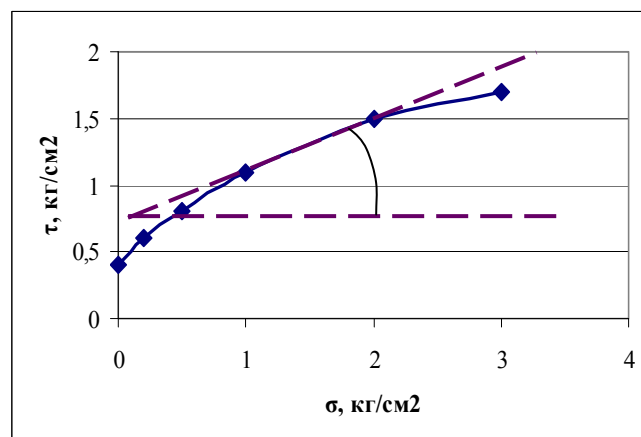


Рис. 3.7. Результаты испытаний образцов горных пород на сдвиг

## ГЛАВА 4

### ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА НАРУШЕНИЯ УСТОЙЧИВОСТИ ОТКОСОВ В СЛОЖНОСТРУКТУРНОМ МАССИВЕ МЯГКИХ ГОРНЫХ ПОРОД

#### 4.1. Влияние сложной геологической структуры и обводнения массива пород на устойчивость откосов карьеров

Решение плоской задачи устойчивости откосов с однородным массивом горных пород, выполненное в главе 2, дает наиболее общее представление об устойчивости откосов и бортов карьеров. В реальных условиях массив вскрышных пород представлен несколькими литологическими разностями, имеющими определенные физико-механические характеристики. В связи с этим, целесообразно определить коэффициент запаса устойчивости борта карьера с учетом сложной структуры массива пород. В качестве критерия прочности принят критерий Кулона-Мора, выбранный по результатам моделирования в главе 2 как наиболее адекватно отражающий геомеханические процессы в массиве мягких горных пород.

Для оценки устойчивых параметров откосов в программе конечно-элементного анализа *Phase2* заданы геометрические параметры борта карьера №7 «Север» Вольногорского ГМК (рис. 4.1). Используя рекомендации, изложенные в работе [130] в модели приняты максимальные углы откосов  $37^\circ$  для необводненного массива.

Область геометрической модели борта карьера разбивалась на конечные элементы и литологическим разностям сложноструктурного массива пород присваивались физико-механические характеристики по данным табл. 4.1.

Значения пределов прочности на одноосное сжатие и растяжение определены для каждой литологической разности по формулам:

$$\sigma_p = 2C \operatorname{tg} \left( 45^\circ - \frac{\varphi}{2} \right); \quad (4.1)$$

$$\sigma_{сж} = 2C \operatorname{tg} \left( 45^\circ + \frac{\varphi}{2} \right), \quad (4.2)$$

где  $C$  – сцепление пород в массиве,  $\varphi$  – угол внутреннего трения [26].

В модели учтены также деформационные характеристики горных пород: модуль Юнга  $E = 20$  МПа; коэффициент Пуассона  $\mu_1 = 0,35$  для суглинков и  $\mu_2 = 0,43$  для четвертичных глин.

Глины месторождения являются водоупором и повышают влажность вышележащих красно-бурых суглинков, что способствует возникновению зон ослабления с последующим развитием деформаций уступов и бортов карьера. Рудный пласт имеет мощность 2,0...24,0 м, сложен тонкозернистыми песками и в водонасыщенном состоянии может обладать плавунными свойствами [131].

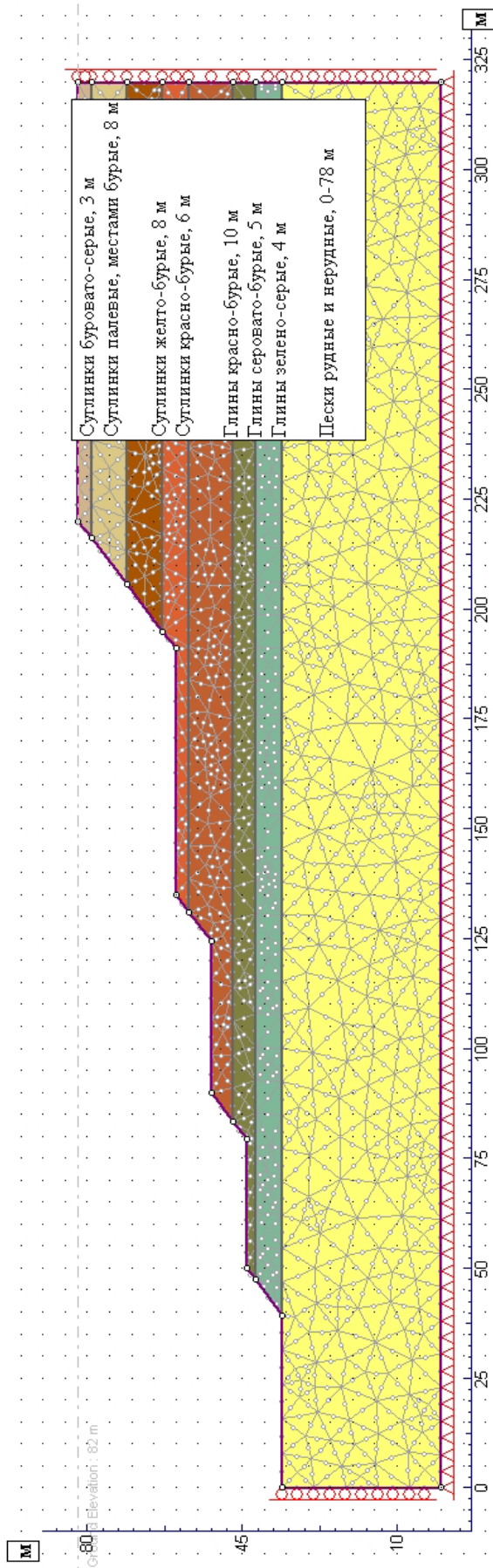


Рис. 4.1. Профиль борта карьера №7 «Север»

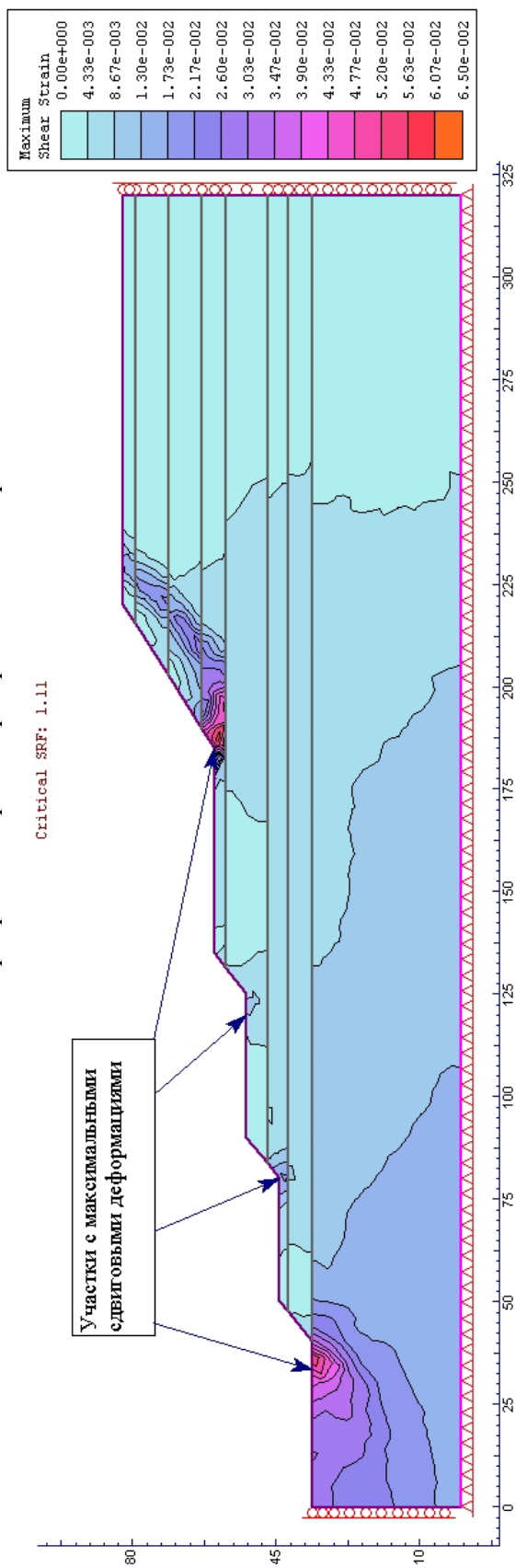


Рис. 4.2. Картина максимальных сдвиговых деформаций откосов (КЗУ=1,11)

Таблица 4.1

## Физико-механические характеристики вскрышных пород [21]

Наименование вскрышных пород	Мощность слоя (средняя по месторождению), $h_i$ , м	Плотность $\gamma$ , МН/м <sup>3</sup>	Сцепление $C$ , МПа	Угол внутреннего трения $\varphi$ , град	Предел прочности на сжатие / растяжение $\sigma_{сж.}/\sigma_p$ , МПа
Суглинки буровато-серые	0-5 (3)	0,0168	0,0110	14	<u>0,028</u> 0,017
Суглинки палевые, местами бурые	0-12 (8)	0,0187	0,0090	19	<u>0,025</u> 0,013
Суглинки желто-бурые	0-14 (8)	0,0196	0,0175	21	<u>0,051</u> 0,024
Суглинки красно-бурые	0-7 (6)	0,0189	0,0290	14	<u>0,074</u> 0,045
Глины красно-бурые	0-20 (10)	0,0190	0,0730	11	<u>0,176</u> 0,121
Глины серовато-бурые	0-10 (5)	0,0179	0,0590	15	<u>0,154</u> 0,091
Глины зелено-серые	0-5 (5)	0,0220	0,0975	31	<u>0,345</u> 0,110
Пески: рудные нерудные	0-78	0,0158	0,0150	32	<u>0,054</u>
	-	0,0172	0,0050	30	0,017

Для физико-механических свойств пород имеет место значительный разброс значений даже в пределах одного карьера. Поэтому, достоверность исходных данных является ключевым фактором при определении устойчивого состояния откосов и бортов карьера. Учитывая исходные технологические данные, оценка устойчивости откосов с использованием численного моделирования представляет практический интерес для оптимизации технологии разработки.

На рис. 4.2 представлены результаты моделирования устойчивости откосов необводненного сложноструктурного массива.

В массиве имеет место два участка с максимальными сдвиговыми деформациями, которые в данном случае определяют величину КЗУ=1,11. Для технологии разработки месторождения приоритетное значение имеет зона деформаций у нижней бровки вскрышного уступа, поскольку образование оползней в этом участке может нарушать работу горно-транспортного производства. Максимальные сдвиговые деформации достигают значений  $\varepsilon_{max}=0,048...0,056$  на границе красно-бурых суглинков и плотных глин. Деформации массива в слое рудных песков достигают значений  $\varepsilon_{max}=0,056$ , что не влияет на устойчивость нижнего вскрышного уступа, сложенного плотными серо-зелеными глинами.

Несмотря на то, что откос верхнего вскрышного уступа находится в устойчивом состоянии, полученного значения КЗУ может оказаться недостато-

чно для обеспечения устойчивости откоса, если учесть в условиях моделирования влияние таких факторов, как гидрогеологические характеристики месторождения и внешние нагрузки оборудования на уступах.

Совместное действие этих факторов вместе с геологическими особенностями массива может существенно снижать сопротивление пород сдвигу. Поэтому, для бортов, сложенных мягкими породами, рекомендуемые значения КЗУ варьируют в диапазоне 1,1...1,3.

Верхние четыре слоя четвертичных суглинков при заданных условиях моделирования наиболее подвержены сдвиговым деформациям. Нижележащие слои глин как более плотные, в меньшей степени подвержены геомеханическим нарушениям. Наибольшие деформации наблюдаются на уровне нижней бровки верхнего вскрышного уступа в слое красно-бурых суглинков ( $\varepsilon_{max}=6,2 \cdot 10^{-2}$ ), а также на расстоянии 4,3 м от подошвы самого нижнего уступа ( $\varepsilon_{max}=5,6 \cdot 10^{-2}$ ), на границе зелено-серых глин с рудными песками. Аналогичным участкам приборного массива соответствуют зоны максимальных горизонтальных и вертикальных смещений пород, что показано на рис. 4.3.

В верхнем вскрышном уступе максимальные смещения ( $d_{max} = 0,36$  м) возникают в верхних слоях палевых и желто-бурых суглинков. В самом нижнем добычном уступе участок максимальных смещений ( $d_{max} = 0,3$  м) находится на уровне нижней бровке.

Поскольку гидрогеологические условия месторождения являются наиболее значимым фактором устойчивости откосов, задачей второго этапа моделирования является определение КЗУ бортов с учетом гидрогеологических показателей массива.

Гидрогеологические условия месторождения характеризуются наличием двух водоносных горизонтов. Верхний приурочен к лессовидным суглинкам, имеет мощность 5...13 м, характеризуется низкими значениями коэффициента фильтрации (до 0,2...0,3 м<sup>3</sup>/сут), малой водообильностью. Нижний водоносный горизонт приурочен к тонкозернистым пескам полтавского горизонта. Абсолютные отметки кровли и подошвы рудных песков полтавской серии в пределах добычных участков находятся в основном ниже статического уровня водоносного горизонта, почти полностью обводнены и отработка их представляет большие трудности, что предопределяет возможность применения только гидромеханического способа выемки рудных песков.

Используя результаты зависимостей физико-механических характеристик суглинков от степени их влажности [132], можно определить коэффициент запаса устойчивости откосов с учетом обводненности горного массива. Так, зависимость угла внутреннего трения от влажности суглинков описывается уравнением:

$$\varphi = -0,06W_0^2 + 0,12W_0 + 39,86, \quad (4.3)$$

где  $\varphi$  - угол внутреннего трения, град.;  $W_0$  – влажность, %.



Critical SRF: 1.11

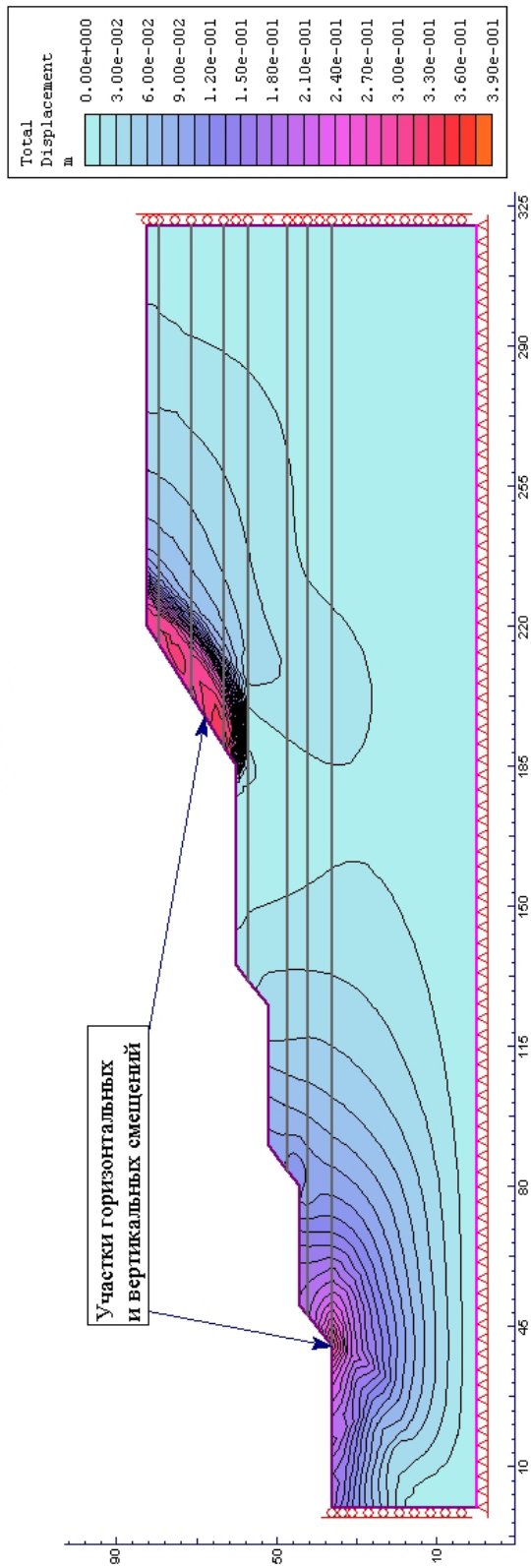


Рис. 4.3. Смещения в необводненном массиве пород (КЗУ=1,11)

Critical SRF: 0.9

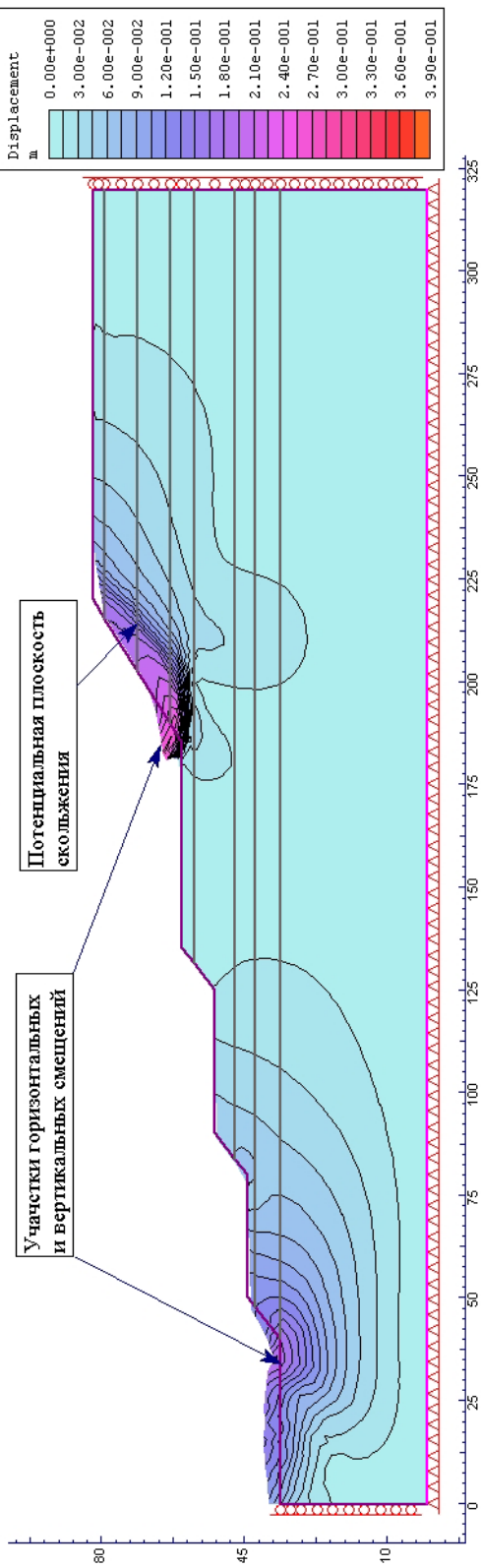


Рис. 4.4. Картина смещений в обводненном массиве пород (КЗУ=0,9)

Зависимость сцепления пород в массиве от влажности описывается уравнением:

$$C = 0,07W_0^2 - 3,87W_0 + 58,78, \quad (4.4)$$

где  $C$  - сцепление, кПа.

Расчетные физико-механические характеристики суглинков в обводненном массиве приведены в табл. 4.2.

Таблица 4.2

Физико-механические характеристики суглинков в обводненном массиве

Влажность $W_0$ , %	Сцепление $C$ , МПа	Угол внутреннего трения $\varphi$ , град	Предел прочности на сжатие $\sigma_{сж}$ , МПа	Предел прочности на раст. $\sigma_p$ , МПа	Коэффициент хрупкости, $\psi = \sigma_p / \sigma_{сж}$
10	0,027	35,06	0,104	0,028	0,27
12	0,022	32,66	0,082	0,025	0,30
14	0,018	29,78	0,064	0,021	0,34
16	0,015	26,42	0,048	0,018	0,38
18	0,012	22,58	0,035	0,016	0,45
20	0,0094	18,26	0,026	0,014	0,52

Согласно зависимостям 4.3 и 4.4 рассчитаны физико-механические свойства суглинков с учетом относительной влажности (табл. 4.3). Полученные значения принимаем в качестве исходных данных для моделирования устойчивости обводненного массива.

По результатам моделирования породного массива с учетом влагонасыщения  $KЗУ = 0,9$ . На рис. 4.4 показаны максимальные смещения в обводненном массиве ( $d_{max} = 0,3$  м), а также контуры призмы обрушения. В нижнем добычном уступе картина смещений и деформаций практически не меняется, так как на втором этапе моделирования изменялись только прочностные характеристики суглинков вследствие повышения их влажности.

Таблица 4.3

Физико-механические свойства суглинков с учетом влажности

Наименование вскрышных пород	Влажность $W_0$ , %	Сцепление $C$ , МПа	Угол внутреннего трения $\varphi$ , град	Предел прочности на сжатие / растяжение $\sigma_{сж} / \sigma_p$ , МПа
Суглинки буровато-серые	21	0,008	15,9	0,021 / 0,012
Суглинки палевые, бурые	18,5	0,011	21,0	0,032 / 0,015
Суглинки желто-бурые	17,7	0,012	23,2	0,036 / 0,016
Суглинки красно-бурые	21,5	0,008	15,0	0,021 / 0,012

На основании имеющихся и полученных закономерностей устойчивости обводненных откосов получена общая зависимость устойчивости прибортового массива от влажности суглинков, изображенная на рис. 4.5.

Зависимость имеет следующий вид:

$$KЗУ = -0,001W_0^2 + 0,003W_0 + 1,538, \quad (4.5)$$

где  $W_0$  – влажность пород, %.

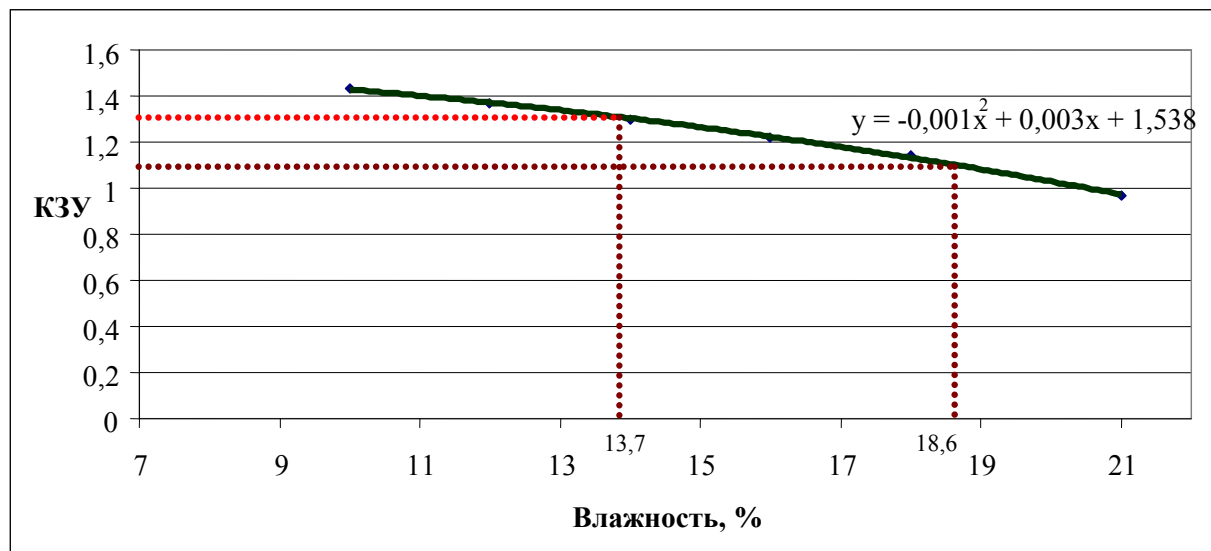


Рис. 4.5. Зависимость КЗУ от влажности вмещающих пород (суглинков)

На основании полученных результатов можно сделать вывод, что для обеспечения устойчивости откосов верхних вскрышных уступов рассматриваемого карьера, сложенных суглинками, влажность пород не должна превышать 13,7...18,6%. При этом обеспечивается КЗУ в диапазоне 1,1...1,3 [133].

По данным табл. 4.1 и 4.3 рассчитаны средневзвешенные значения предела прочности на одноосное сжатие  $\overline{\sigma}_{сж}$  по формуле 4.6:

$$\overline{\sigma}_{сж} = \frac{\sum_{i=1}^n \sigma_{сж}^i \cdot m_i}{\sum_{i=1}^n m_i}, \quad (4.6)$$

где  $\sigma_{сж}^i$  - предел прочности на одноосное сжатие отдельных литологических разностей, МПа;  $m_i$  - мощность слоя пород, м;  $i=1 \dots n$  – количество слоев.

Для верхнего слоя вскрышных пород мощностью 25 м, состоящего из суглинков, средневзвешенное значение  $\overline{\sigma}_{сж} = 0,029$  МПа (рис. 4.6). Это значение соответствует КЗУ=1,08 [88, 135].

Уравнение 4.5, полученное на основании экспериментальных исследований и численного моделирования, применимо для оценки устойчивости вскрышных уступов, сложенных суглинками.

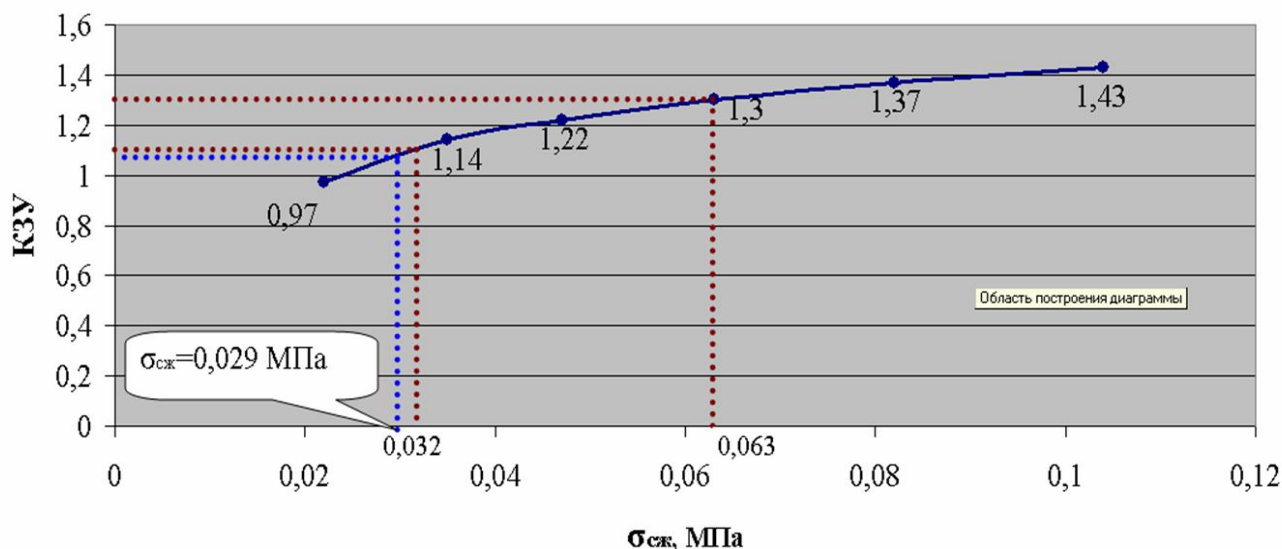


Рис. 4.6. Зависимость КЗУ от влажности вмещающих пород (суглинков)

Для более детальной оценки влияния гидрологических показателей на устойчивость бортов карьера для условий Малышевского месторождения выполнен ряд дополнительных инженерных расчетов, основанных на использовании общепринятых моделей влагопереноса в грунтах и горных породах.

Моделирование фильтрации в частично ненасыщенных породах выполнено на основании численного решения уравнения Ричардса [136]

$$\operatorname{div}(K(\psi) \operatorname{grad} \psi) - \frac{\partial K(\psi)}{\partial z} = c(\psi) \frac{\partial \psi}{\partial t}, \quad (4.7)$$

где  $\psi$  – поровое давление,  $\theta$  – влажность грунта,  $K = K_0 \cdot K_r(\theta)$  – коэффициент гидравлической проводимости,  $c(\psi) = \partial \theta / \partial \psi$  – влагоемкость ненасыщенного грунта,  $K_0$  – коэффициент фильтрации,  $K_r$  – относительная гидравлическая проводимость. Уравнение влагопереноса (4.7) позволяет моделировать одновременно фильтрацию как в зоне полного, так и неполного насыщения. Скорость фильтрации  $V$  определяется на основе соотношений:

$$V = -K(\psi) \operatorname{grad} \Phi, \quad \Phi = \frac{\psi}{\rho_w g} + z, \quad (4.8)$$

где  $\Phi$  – гидравлический потенциал,  $\rho_w$  – плотность воды.

Относительная влажность  $\bar{\theta}$ , поровое давление  $\psi$  и относительная гидравлическая проводимость  $K_r$  ненасыщенного грунта определяются по хорошо апробированным формулам Муалема – Ван Генухтена [136, 137].

Принятые для моделирования значения гидравлических параметров вскрышных пород представлены в табл. 4.4.

На боковых границах карьера задается уровень грунтовых вод, а на верхней границе – инфильтрационное питание. С учетом длительности геомеханических и фильтрационных процессов допустимо моделировать стационарную фильтрацию, соответствующую сезонным изменениям.

Таблица 4.4

## Гидравлические свойства вскрышных пород

Вскрышные породы	$K_0$ , м/с	$\alpha$ , 1/м	$n$	$m=1-1/n$
Суглинки	$2,9 \cdot 10^{-6} - 1,25 \cdot 10^{-5}$	3,6–7,5	1,31–1,89	0,24–0,47
Глины	$3,35 \cdot 10^{-7} - 5,5 \cdot 10^{-7}$	0,5–0,8	1,09–1,23	0,08–0,19
Пески	$8,25 \cdot 10^{-5}$	14,5	2,68	0,627

*Примечание:*  $\alpha$ ,  $m$  и  $n$  – эмпирические коэффициенты, зависящие от фильтрационных характеристик.

Предполагается, что деформации в массиве и вызывающие их напряжения не оказывают существенного влияния на фильтрационный поток.

Взаимосвязь геомеханических и гидрогеологических процессов в модели определяется по зависимостям физико-механических характеристик суглинков от их влажности [132]. С помощью встроенного модуля RocLab 1.0 программы Phase2 на основании усредненных физико-механических характеристик горных пород для условий Вольногорского ГМК определены значения модуля деформации для каждой литологической разности (табл. 4.5).

Таблица 4.5

## Усредненные физико-механические характеристики пород ВГМК

Наименование вскрышных пород	Мощность слоя, $h_i$ , м*	Плотность $\gamma$ , кг/м <sup>3</sup> *	Сцепление $C$ , МПа*	Угол внутреннего трения $\varphi$ , град*	Модуль деформации $E_0$ , МПа
Суглинки буровато-серые	0-5 (3)	1,5-1,71 (1,605)	0,022	20-23 (21,5)	7,3
Суглинки палевые, местами бурые	0-12 (8)	1,69-1,78 (1,735)	0,01-0,033 (0,022)	14,5-28 (21,3)	18,4
Суглинки желто-бурые	0-14 (8)	1,94	0,041	20,0	29,8
Суглинки красно-бурые	0-7 (6)	1,89-1,98 (1,935)	0,03-0,038 (0,034)	14-21 (17,5)	23,4
Глины красно-бурые	0-20 (10)	1,89-1,92 (1,905)	0,03-0,14 (0,085)	13-22 (17,5)	205,7
Глины серовато-бурые	0-10 (5)	1,79	0,059	15,0	133,1
Глины зелено-серые	0-5 (5)	1,9	0,02-0,29 (0,157)	14-17 (15,5)	151,6
Пески: рудные нерудные	0-78 -	1,92	0-0,116 (0,058)	27-31 (29,0)	50,9

*Примечание:* (\*) среднее значение показателя

Для вскрышных пород могут быть использованы экспериментальные данные работы [138], аппроксимированные зависимостями:

$$E_1(\bar{\theta}) = \frac{5.93}{\bar{\theta}^{2.339}}, \quad 0.3 < \bar{\theta} < 0.9, \quad E_2(\bar{\theta}) = \frac{3.107}{\bar{\theta}^{1.3243}}, \quad 0.2 < \bar{\theta} < 1.0, \quad (4.9)$$

где модуль деформации  $E_1$  (МПа) определяется для глин,  $E_2$  – для суглинков.

На первом этапе моделирования, используя данные табл. 4.5, определены характеристики напряженно-деформированного состояния массива (рис. 4.7).

Участки с максимальными сдвиговыми деформациями наблюдаются в слоях четвертичных суглинков верхнего вскрышного уступа, а также на границе серо-зеленых глин с рудными песками. Необходимый сложноструктурный массив пород находится в устойчивом состоянии, при этом КЗУ=1,3. Максимальные сдвиговые деформации по линии сдвижения в верхнем уступе варьируют в диапазоне  $\epsilon_{\max}=0,05$ , достигая максимума у нижней бровки откоса.

Из результатов моделирования фильтрации, представленных на рис. 4.8, видно, что значительная часть верхнего уступа даже при невысокой инфильтрации (31,5 мм/год) практически полностью насыщена. Серо-зеленые глины являются водупором, который препятствует дренирующему вертикальному перетоку в полтавские пески. Вблизи откоса на рассматриваемых уступах поровое давление достигает 0,04 МПа, что превышает величину сцепления верхних суглинков и может снижать устойчивость массива. Более детально распределение напряжений и деформаций без учета влажности показано на рис. 4.9.

Без учета водонасыщения пород линия сдвижения отличается от классической поверхности скольжения, что объясняется наличием более плотного, по сравнению с вышележащими суглинками, слоя красно-бурых глин. Он является своеобразным геомеханическим барьером, препятствующим распространению сдвиговых деформаций вглубь массива.

Распространение горизонтальных смещений по линии сдвижения в верхнем откосе проходит по границе желто-бурых и красно-бурых суглинков, физико-механические свойства которых отличаются незначительно. Абсолютные горизонтальные смещения по линии сдвижения в прибортовом массиве верхнего уступа варьируют в диапазоне  $U_x = 0,049 \dots 0,115$  м. При этом максимальные горизонтальные смещения  $U_x = 0,132$  м возникают на поверхности откоса, на расстоянии 6 м от нижней бровки и уменьшаются по горизонтальной линии вглубь массива.

Абсолютные вертикальные смещения по линии сдвижения в прибортовом массиве пород варьируют в диапазоне  $U_y = 0,026 \dots 0,061$  м. Следует отметить, что абсолютные величины вертикальных смещений в 2 раза меньше, чем горизонтальные, однако геометрически они охватывают большую область породного массива. Так, имеет место обширная область вертикальных смещений в верхней части откоса  $U_y = 0,052$  м, где интенсивность деформаций выше, чем на потенциальной поверхности скольжения. Вертикальные смещения достигают максимума,  $U_y = 0,061$  м, на поверхности откоса, на расстоянии 4 м от нижней бровки.

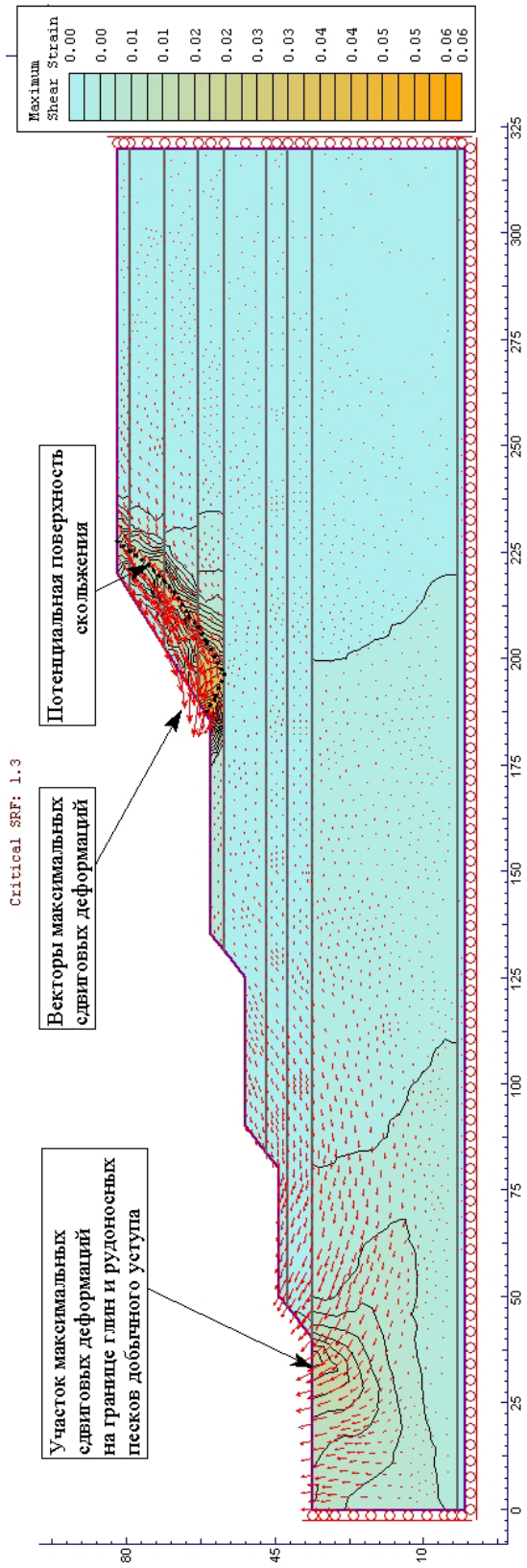


Рис. 4.7. Максимальные сдвиговые деформации в массиве (КЗУ=1,3)

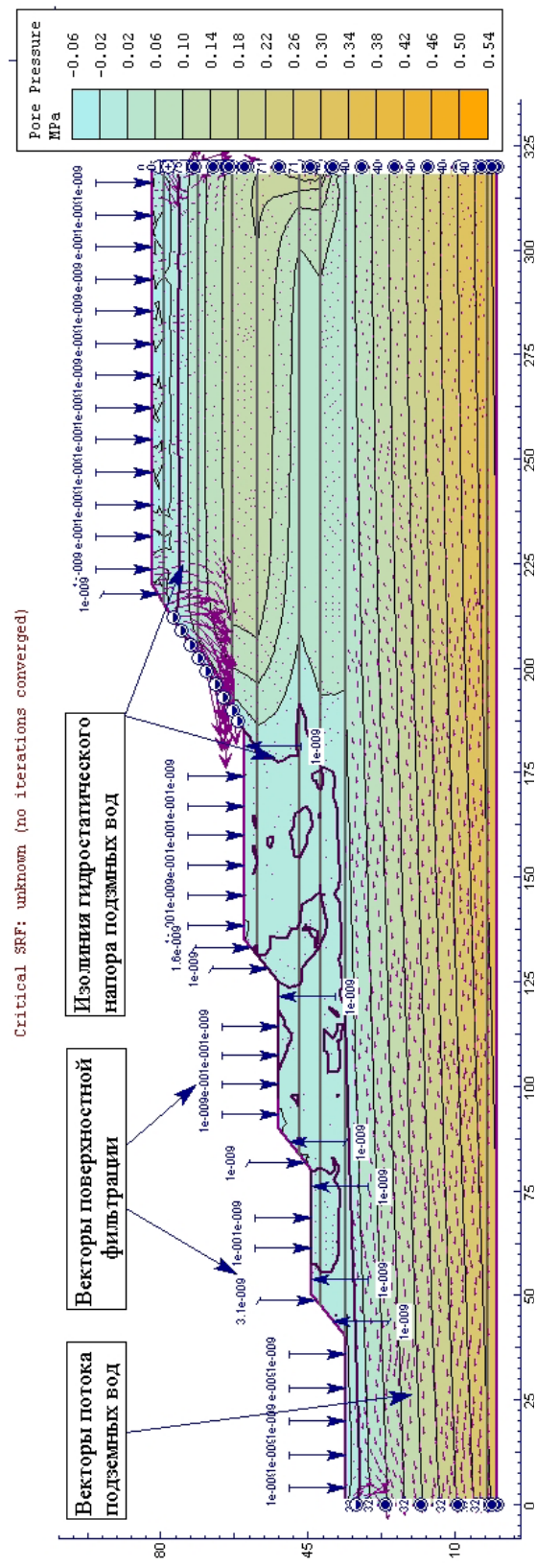


Рис. 4.8. Поровое давление (МПа) в массиве пород

С учетом неравномерного насыщения распределение напряжений и деформаций в прибортовой части массива существенно изменится. Согласно зависимостям (4.9) деформационных характеристик массива пород от влажности, приведенным в [138], модуль деформации будет уменьшаться с 30,3 до 16,6 МПа для суглинков и с 151,9 до 36,5 МПа для глин. По результатам моделирования при условии достижения максимальной влажности вмещающих пород КЗУ составит 0,91, тогда как КЗУ, вычисленный без учета водонасыщения, равен 1,3 (рис. 4.10).

Наращение максимальных сдвиговых деформаций обуславливает возникновение потенциальной поверхности скольжения, причем с увеличением водонасыщения таких поверхностей может быть несколько. Абсолютные горизонтальные смещения в верхнем вскрышном уступе затрагивают всю поверхность откоса и достигают максимального значения  $U_x = 0,35$  м, что на 0,08 м меньше, чем в необводненном массиве (рис. 4.11).

Область вертикальных смещений при условии водонасыщения уменьшается, достигая максимальных значений  $U_y = 0,24$  м, что на 0,02 м меньше, чем в необводненном массиве. Таким образом, горизонтальные деформации массива при условии водонасыщения за счет грунтовых вод и атмосферных осадков имеют доминирующее значение для устойчивости откосов.

Несмотря на то, что в целом интенсивность смещений массива в обводненном массиве меньше, чем в необводненном, повышение влажности способствует возникновению зон ослабления вдоль приоткосной области. Тогда возможно образование множественных линий скольжения по изолиниям максимальных смещений массива.

Для определения условий безопасного водонасыщения верхних вскрышных пород, представленных суглинками, получена зависимость КЗУ откоса уступа от влажности сложноструктурного массива, которая учитывает физико-механические и деформационные свойства пород (рис. 4.12, 4.13).

Для обеспечения устойчивого состояния откосов и бортов карьеров рекомендуется значение  $КЗУ = 1,1 \dots 1,3$ . Из графика видно, что соблюдение этих условий возможно при влагонасыщении массива 0,13...0,18 и пределе прочности на одноосное сжатие 2,2...4,2 МПа [133, 135].

Аналогичная оценка устойчивости уступов выполнена для горно-геологических условий карьера № 7 «Юг» Вольногорского ГМК, на котором применяется комбинированная система разработки.

Для моделирования устойчивости откосов борта карьера №7 «Юг» в программе Phase2 заданы геометрические параметры (рис. 4.14).

Результаты моделирования устойчивости откосов необводненного массива, представленные на рис. 4.15, дают основание полагать, что массив пород находится в состоянии, близком к устойчивому ( $КЗУ = 1,09$ ). Аналогичная картина устойчивости имеет место для необводненного массива горных пород карьера №7 «Север», показана на рис. 4.2 ( $КЗУ = 1,11$ ).



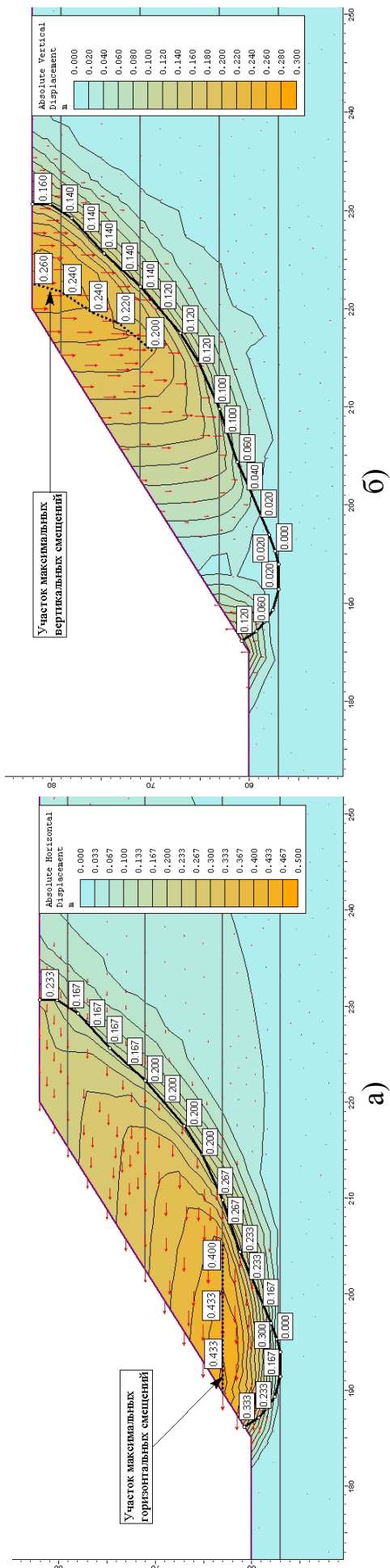


Рис. 4.9. Напряженно деформированное состояние, определенное на основании физико-механических свойств без учета водонасыщения: абсолютные горизонтальные (а) и вертикальные (б) смещения

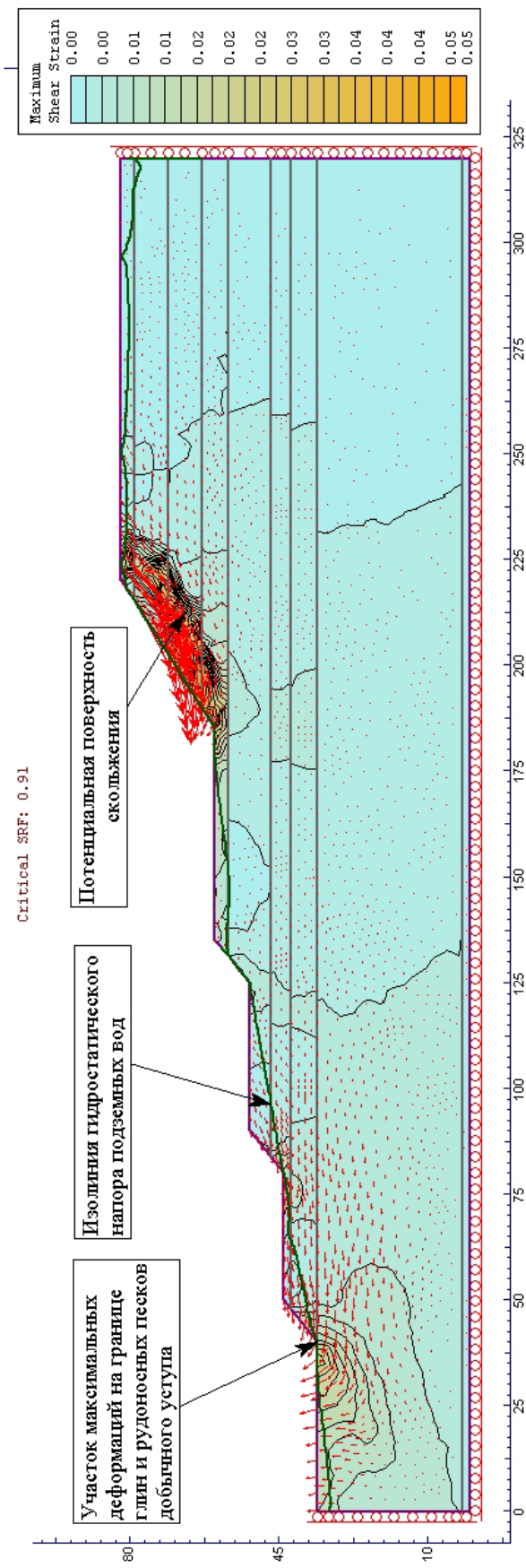
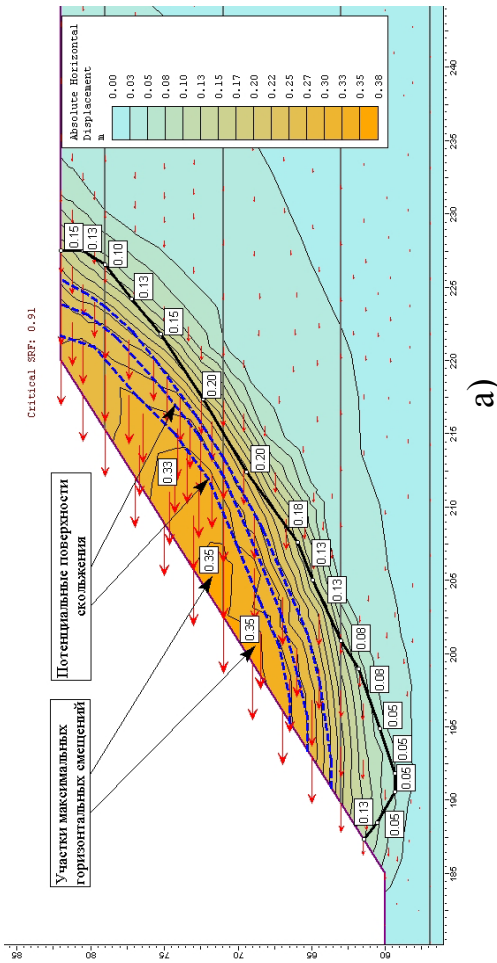
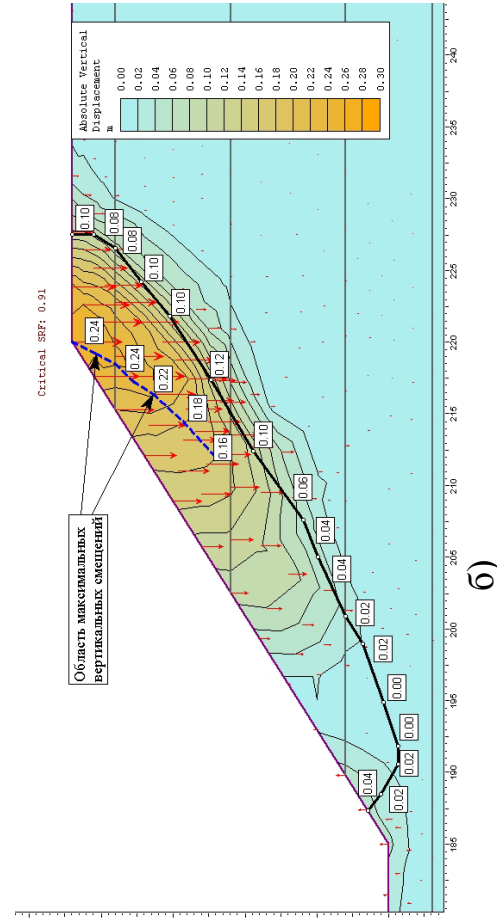


Рис. 4.10. Сдвиговые деформации в водонасыщенном массиве (КЗУ=0,91)



а)



б)

Рис. 4.11. Напряженно-деформированное состояние с учетом неравномерного водонасыщения: абсолютные горизонтальные (а) и вертикальные (б) смещения

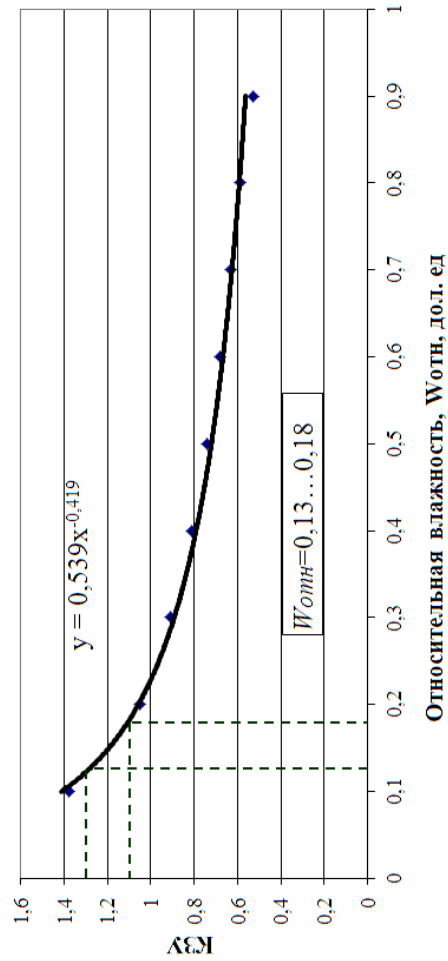


Рис. 4.12. Зависимость КЗУ откоса от влажности суглинков

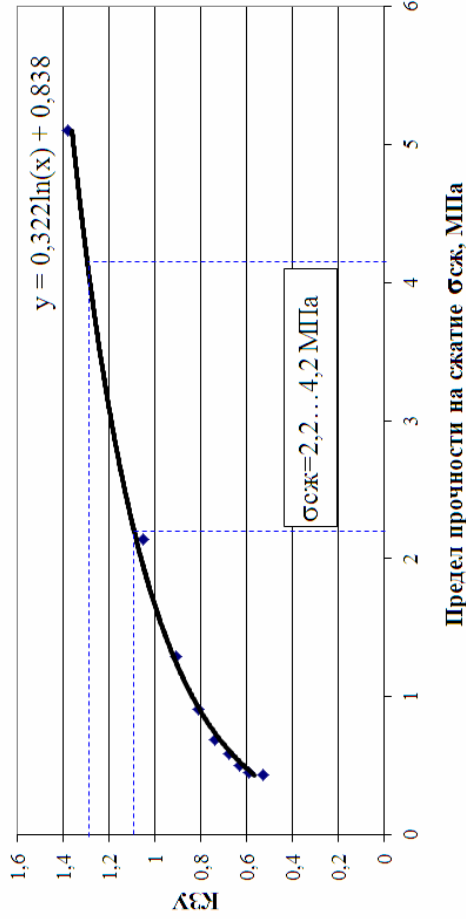


Рис. 4.13. Зависимость КЗУ откоса от предела прочности на сжатие от глины

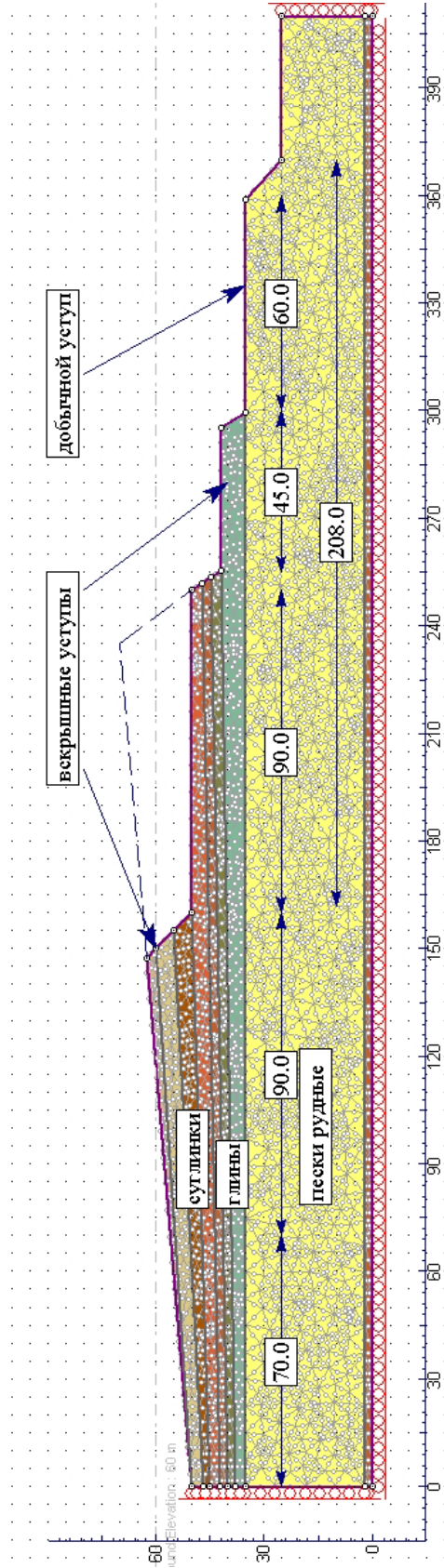


Рис. 4.14. Профиль борта карьера №7 «Юг»

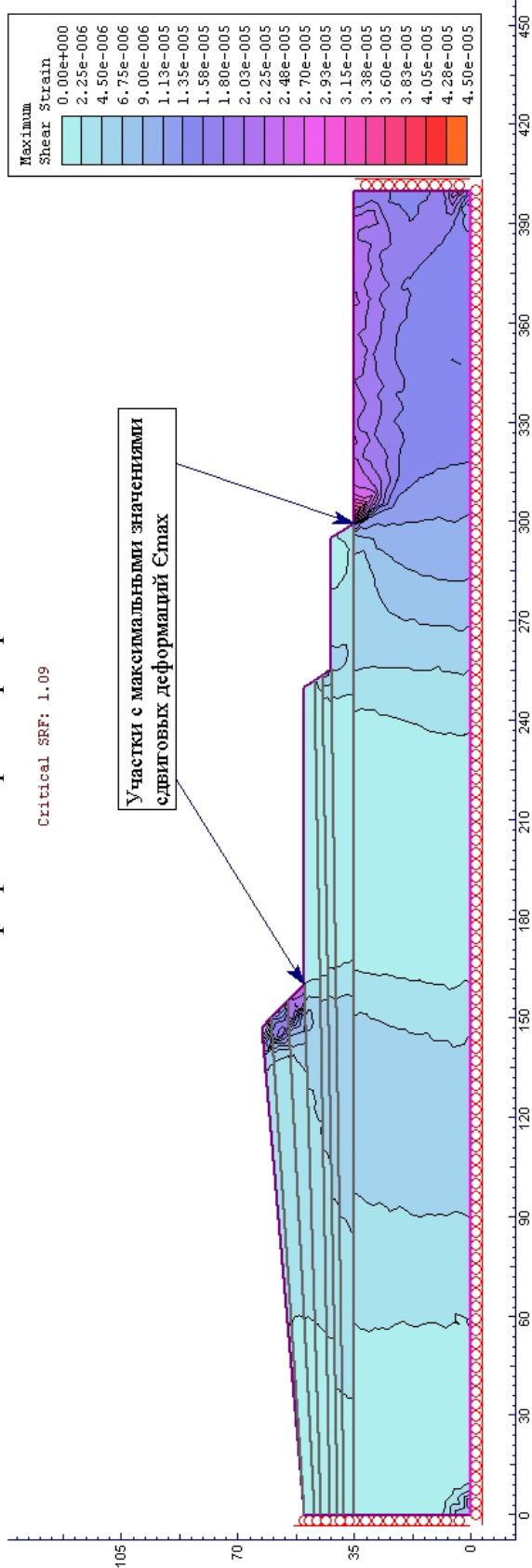


Рис. 4.15. Картина максимальных сдвиговых деформаций откосов уступов

Участки с максимальными значениями сдвиговых деформаций наблюдаются в прибортовой части передового вскрышного уступа, сложенного суглинками ( $\varepsilon_{max}=2,5 \cdot 10^{-4}$ ). При этом намечаются контуры потенциальной линии скольжения, верхняя граница которой начинается на расстоянии 6,8 м от верхней бровки передового уступа.

Идентичная картина наблюдается для горизонтальных и вертикальных смещений (сдвига) массива пород откосов (рис. 4.16).

В верхнем вскрышном уступе максимальные вертикальные смещения ( $d_{max}^{vert}=1,65 \cdot 10^{-4}$  м) возникают в верхних слоях буровато-серых и палевых суглинков, и их интенсивность постепенно снижается ближе к слою красно-бурых глин. Также значительные вертикальные деформации наблюдаются на границе серо-зеленых глин с рудными песками, что вполне объясняется их физико-механическими характеристиками.

Максимальные горизонтальные смещения преобладают в слое палевых суглинков ( $d_{max}^{hor}=4,0 \cdot 10^{-4}$  м) прибортовой части верхнего вскрышного уступа, а также на уровне нижней бровки нижнего добычного уступа ( $d_{max}^{hor}=3,8 \cdot 10^{-4}$  м).

Наличие подземных вод и водоемов приводит к снижению устойчивости откосов, что объясняется действием фильтрационного потока в массиве, уменьшающим силы трения по вероятной поверхности оползания. Наиболее чувствительны к увлажнению атмосферными или подземными водами породы глинистого состава с различной степенью уплотнения. Устойчивость карьерных откосов снижается при повышении уровня подземных вод в приоткосной зоне, уменьшении сопротивления горных пород сдвигу, увеличении высоты и угла откоса, а также возрастании нагрузок на уступы карьеров [139].

Второй этап моделирования связан с оценкой влияния гидрологических показателей массива на устойчивость откосов. Для этого на профиле карьера задается уровень грунтовых вод в виде статического напора в двух точках на левой и правой границе модели, а также гидравлические свойства для каждой литологической разности массива пород по методу Ван Генухтена [137].

Степень влагонасыщения массива  $S_e$  рассчитывается по формуле:

$$S_e = \frac{1}{\left[1 + (\alpha h)^n\right]^m}, \quad (4.10)$$

где  $\alpha$  – коэффициент Ван-Генухтена,  $1/\text{м}$ ;  $h$  – высота гидростатического напора,  $\text{м}$ ;  $m$  и  $n$  – эмпирические коэффициенты, зависящие от фильтрационных характеристик пород.

Коэффициент фильтрации  $K$ ,  $\text{м/с}$ , определяется по выражению:

$$K = K_s \left( \sqrt{S_e} \left[ 1 - \left( 1 - S_e^{1/m} \right)^m \right]^2 \right), \quad (4.11)$$

где  $K_s$  – коэффициент влагонасыщенной фильтрации,  $\text{м/с}$ .

Гидравлические свойства вскрышных пород месторождения представлены в табл. 4.6.

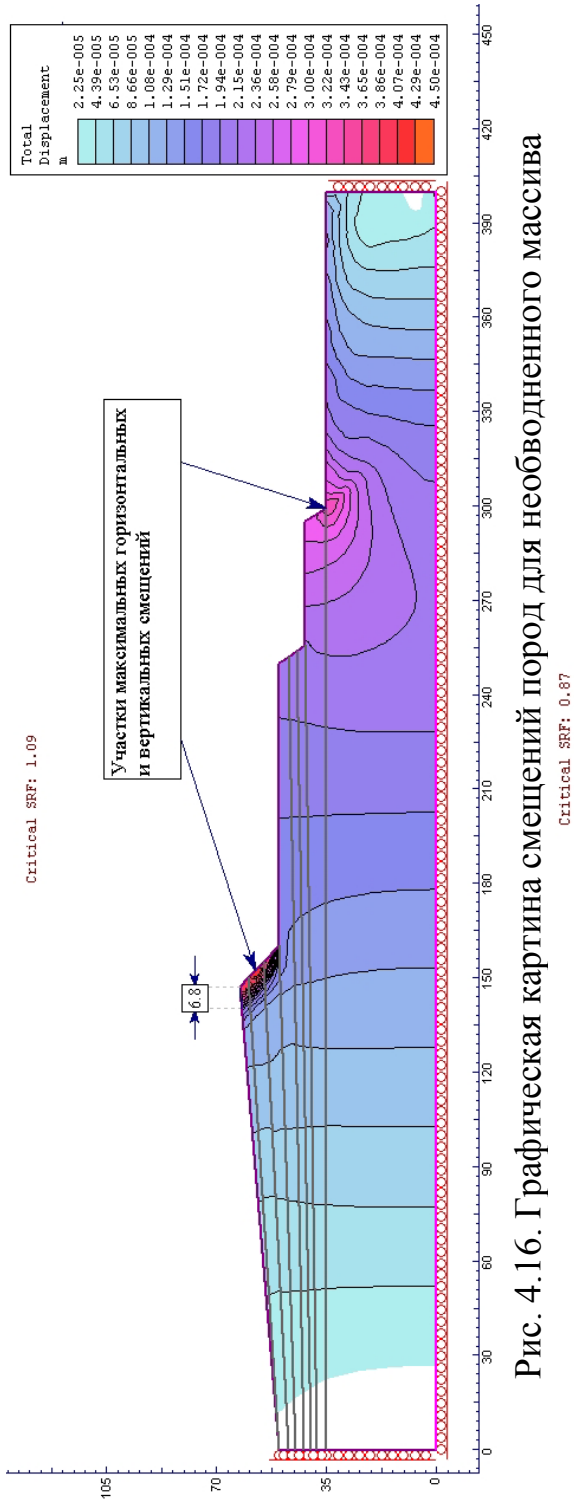


Рис. 4.16. Графическая картина смещений пород для необводненного массива

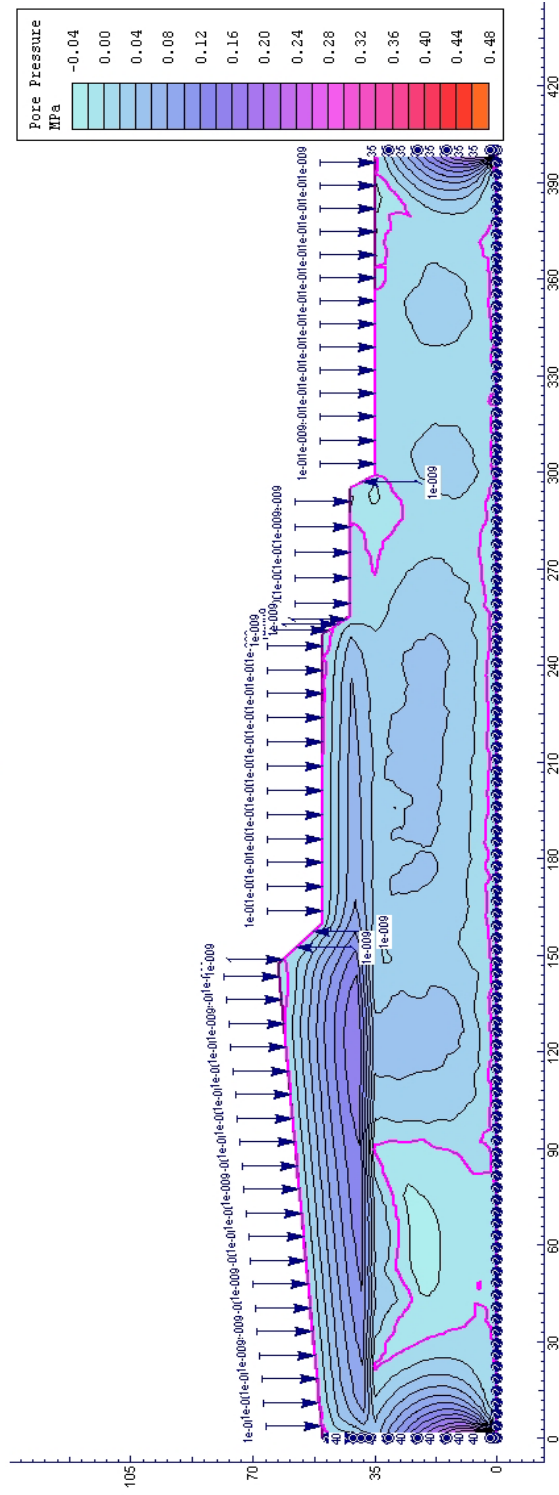


Рис. 4.17. Поровое давление в обводненном массиве

В условиях также учитывается влияние атмосферных осадков, интенсивность которых для данной местности составляет  $1 \cdot 10^{-9}$  м/с.

Таблица 4.6

Гидравлические свойства вскрышных пород по Ван-Генухтену

Наименование вскрышных пород	Коэффициент инфильтрации $K_s$ , м/с	$\alpha$ , 1/м	$n$	$m=1-1/n$
Суглинки буровато-серые	$1,25 \cdot 10^{-5}$	7,5	1,89	0,471
Суглинки палевые, бурые	$3,65 \cdot 10^{-6}$	5,9	1,48	0,325
Суглинки желто-бурые	$2,9 \cdot 10^{-6}$	3,6	1,56	0,359
Суглинки красно-бурые	$7,25 \cdot 10^{-7}$	1,9	1,31	0,237
Глины красно-бурые	$5,5 \cdot 10^{-7}$	0,8	1,09	0,083
Глины серовато-бурые	$3,35 \cdot 10^{-7}$	2,7	1,23	0,187
Глины зелено-серые	$5,5 \cdot 10^{-8}$	0,05	1,09	0,083
Пески	$1,0 \cdot 10^{-6}$	6,8	13,10	0,924

По результатам моделирования видно (рис. 4.17), что в слое серо-зеленых глин возникает область избыточного порового давления, достигающего 0,2 МПа. Это явление объясняется эффектом набухания глин. Серо-зеленые глины являются водоупором, препятствующим горизонтальной и вертикальной фильтрации. Вблизи откоса рассматриваемых уступов поровое давление составляет в среднем 0,04 МПа, что больше величины сцепления верхних суглинков, и может снижать устойчивость массива.

Коэффициент запаса устойчивости для обводненного массива равен 0,87. При увеличении обводненности массива за счет инфильтрации или атмосферных осадков, устойчивость откосов снижается, что необходимо учитывать при обосновании целесообразных параметров бортов карьера.

На рис. 4.18 показаны скорости горизонтальной и вертикальной разгрузки в обводненном массиве.

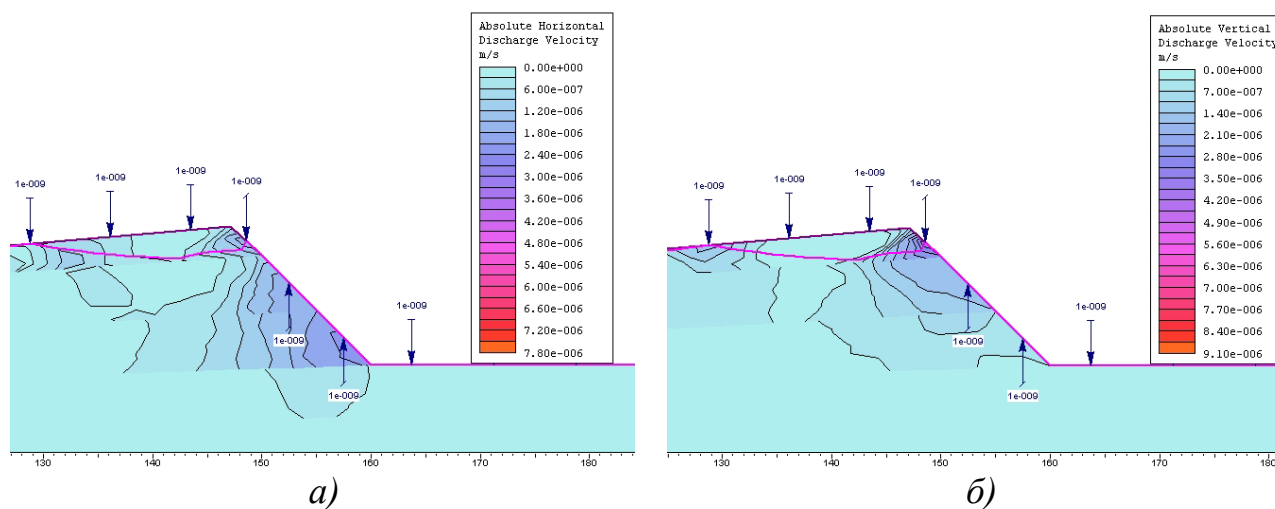


Рис. 4.18. Скорость горизонтальной (а) и вертикальной (б) разгрузки в обводненном массиве

Переувлажнение массива у подножия откоса связано с горизонтальной фильтрацией грунтовых вод, у верхней бровки – с атмосферными осадками.

Для обводненного массива  $KЗУ = 0,87$ , что близко по значению устойчивости борта карьера №7 «Север» ( $KЗУ = 0,9$ ) при одинаковых горно-геологических условиях.

Максимальное поровое давление возникает в слое серо-зеленых глин и достигает 0,2 МПа, что объясняется эффектом набухания глин. В приоткосной части рассматриваемых уступов поровое давление составляет в среднем 0,04 МПа, что больше величины сцепления верхних суглинков, и может снижать устойчивость массива.

Из полученных данных результатов моделирования видно, что желто-бурые суглинки, имеющие коэффициент сцепления  $C = 0,0175$  МПа, обладают более слабыми прочностными свойствами по сравнению с красно-бурыми суглинками, для которых сцепление составляет  $C = 0,0289$  МПа. В данном случае слой красно-бурых суглинков выступает в роли геомеханического барьера, поэтому потенциальная поверхность скольжения выходит на откос уступа выше уровня нижней бровки. Увеличение влажности желтых суглинков и слабые фильтрационные свойства красно-бурых суглинков и плотных сарматских глин являются доминирующим фактором снижения устойчивости откосов.

При увеличении обводненности массива за счет инфильтрации или атмосферных осадков, устойчивость откосов снижается, что необходимо учитывать при обосновании целесообразных параметров бортов карьера [134].

Результаты вышеизложенных исследований позволили сделать вывод о том, что *коэффициент запаса устойчивости откоса в сложноструктурном массиве мягких вскрышных пород, сложенного суглинками и глинами, находится в степенной зависимости от влажности, что позволяет управлять геометрическими параметрами уступа при изменчивых гидрогеологических условиях.*

#### **4.2. Оценка нагрузки горно-транспортного оборудования на устойчивость вскрышных уступов карьеров**

Для полной оценки устойчивости уступов карьеров не обходимо учитывать физико-механические характеристики вмещающих пород, гидрогеологические параметры, а также внешние нагрузки от горно-транспортного оборудования. Подобный комплексный анализ применен для горно-геологических условий карьера № 7 «Юг» Малышевского месторождения Вольногорского ГМК.

Расчет устойчивости откосов уступов глинистых пород, нагруженных горно-транспортным оборудованием, производится на предельное равновесие по наиболее слабой поверхности. В качестве расчетных характеристик, кроме сцепления  $C$  и угла внутреннего трения  $\varphi$ , используются ширина опорной части оборудования  $b$  и масса  $P$ , приходящаяся на 1 м длины опорной части [34].

Для оценки влияния нагрузки горно-транспортного оборудования на устойчивость вскрышных уступов карьера использованы средневзвешенные прочностные характеристики горных пород ВГМК, представленные в табл. 4.7.

Таблица 4.7

## Средневзвешенные характеристики пород по данным ВГМК

Наименование вскрышных пород	Мощность слоя, $h_i$ (*), м	Плотность $\gamma$ (*), кг/м <sup>3</sup>	Сцепление $C$ (*), МПа	Угол внутреннего трения $\varphi$ (*), град	Предел прочности на растяжение/сжатие $\sigma_p/\sigma_{сж}$ , МПа	Модуль деформации $E_0$ , МПа
Суглинки буровато-серые	0-5 (3)	1,5-1,71 (1,605)	0,022	20-23 (21,5)	0,03/0,064	7,3
Суглинки палевые, местами бурые	0-12 (8)	1,69-1,78 (1,735)	0,01-0,033 (0,0215)	14,5-28 (21,25)	0,029/0,063	18,4
Суглинки желтобурые	0-14 (8)	1,94	0,041	20,0	0,057/0,117	29,8
Суглинки краснобурые	0-7 (6)	1,89-1,98 (1,935)	0,03-0,038 (0,034)	14-21 (17,5)	0,050/0,093	23,4
Глины краснобурые	0-20 (10)	1,89-1,92 (1,905)	0,03-0,14 (0,085)	13-22 (17,5)	0,125/0,232	205,7
Глины сероватобурые	0-10 (5)	1,79	0,059	15,0	0,091/0,154	133,1
Глины зеленосерые	0-5 (5)	1,9	0,023-0,291 (0,157)	14-17 (15,5)	0,239/0,413	151,6
Пески: рудные нерудные	0-78 -	1,92	0-0,116 (0,058)	27-31 (29,0)	0,068/0,197	50,9

Примечание: (\*) среднее значение показателя

Для данного месторождения определены следующие величины устойчивых углов откосов рабочих уступов: откоса рабочего уступа в обводнённом состоянии - не более 25°, после выполнения дренажных работ - не более 37°.

Для точной оценки устойчивых параметров откосов и бортов карьера достоверность исходных данных является ключевым фактором. Согласно данным табл. 4.7, для рассматриваемого месторождения имеет место значительный разброс значений физико-механических свойств пород в пределах карьера.

В качестве исходных условий для внешних нагрузок на вскрышных уступах карьера принимаются следующие значения среднего удельного давления на грунт горно-транспортного оборудования: для экскаватора ЭКГ-8И - 0,199 МПа, экскаватора ЭКГ-10 – 0,216 МПа; для роторного экскаватора ЭРШР-1600-40/10 – 0,13 МПа при работе и 0,18 МПа при передвижении; для самосвала БелАЗ-7548 – 0,56 МПа (рис. 4.19).

Устойчивость нагруженных вскрышных уступов рассчитывается для условий транспортирования пород в отвалы самосвалами БелАЗ-7548 грузоподъемностью 42 т и массой снаряженного автомобиля – 29,5 т [140].



На первом этапе моделирования определена устойчивость откосов без нагрузок с учетом сложной геологической структуры массива. Результаты расчета устойчивости борта карьера, представленные на рис. 4.20, дают основание полагать, что массив пород борта находится в устойчивом состоянии. Рассчитанное значение  $KЗУ=1,3$  обусловлено преимущественно сдвиговыми деформациями в верхнем вскрышном уступе. Потенциальная линия скольжения проходит по участкам с максимальными сдвиговыми деформациями в каждом из геологических слоев. Участки с максимальными значениями сдвиговых деформаций наблюдаются в прибортовой части передового вскрышного уступа, сложенного суглинками. При этом намечаются контуры потенциальной линии скольжения, верхняя граница которой начинается на расстоянии 6,8 м от верхней бровки передового уступа.

Максимальные сдвиговые деформации достигают значений  $\varepsilon_{max} = 0,07$  по потенциальной поверхности скольжения. Максимальные смещения массива в пределах призмы возможного обрушения достигают  $U_x = 0,45$  м.

На втором этапе моделирования, на профиле борта задаются нагрузки от горно-транспортного оборудования. Роторный экскаватор ЭРШР-1600-40/10 двигается вдоль фронта вскрышных работ на передовом уступе и его положение относительно оси абсцисс остается неизменным. Картина максимальных сдвиговых деформаций и смещений в массиве передового уступа, испытывающего нагрузку от роторного экскаватора, показывает, что динамические нагрузки не влияют на устойчивость уступа (рис. 4.21).

На втором вскрышном уступе задействованы экскаватор ЭКГ-8И и самосвалы БелАЗ-7548. Нагрузки только от экскаватора ЭКГ-8И и комплекса ЭРШР-1600-40/10 не влияют на значение  $KЗУ$ . Однако, картина деформаций и смещений массива существенно меняется при статических нагрузках от автотранспорта (рис. 4.22).

Так, при условии, что самосвал находится на расстоянии 5 м от экскаватора,  $KЗУ = 1,1$  (рис. 4.22, а). При расположении самосвала на безопасном расстоянии до края бровки уступа  $b=3,2$  м,  $KЗУ=0,9$  (рис. 4.22, б). Поскольку рассчитанного значения  $KЗУ$  недостаточно для обеспечения устойчивости уступа, была выполнена верификация безопасного расстояния транспорта до края бровки. Учитывая динамику горных работ и возможность местоположения транспорта в различных точках рабочей площадки, определены  $KЗУ$  для второго вскрышного уступа, сложенного плотными сарматскими глинами. Из результатов расчетов, представленных в табл. 4.8 видно, что для обеспечения значения  $KЗУ=1,1...1,3$ , рекомендуемого для безопасного ведения открытых горных работ [141], расстояние от самосвала до края верхней бровки  $b$  должно быть не менее 3...4 м, что хорошо согласуется с расчетными значениями максимального безопасного расстояния. Работа автосамосвала БелАЗ-7548 на расстоянии более 4 м от верхней бровки не влияет на устойчивость уступа.

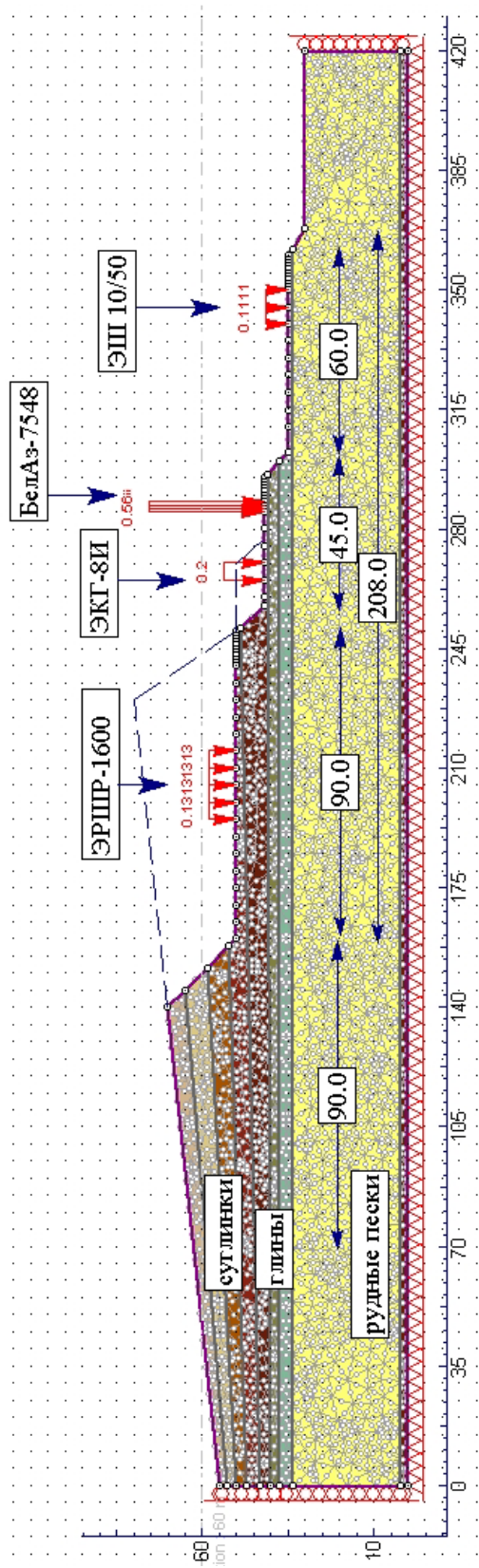


Рис. 4.19. Схема к расчету устойчивости откосов борта карьера №7 «Юг»

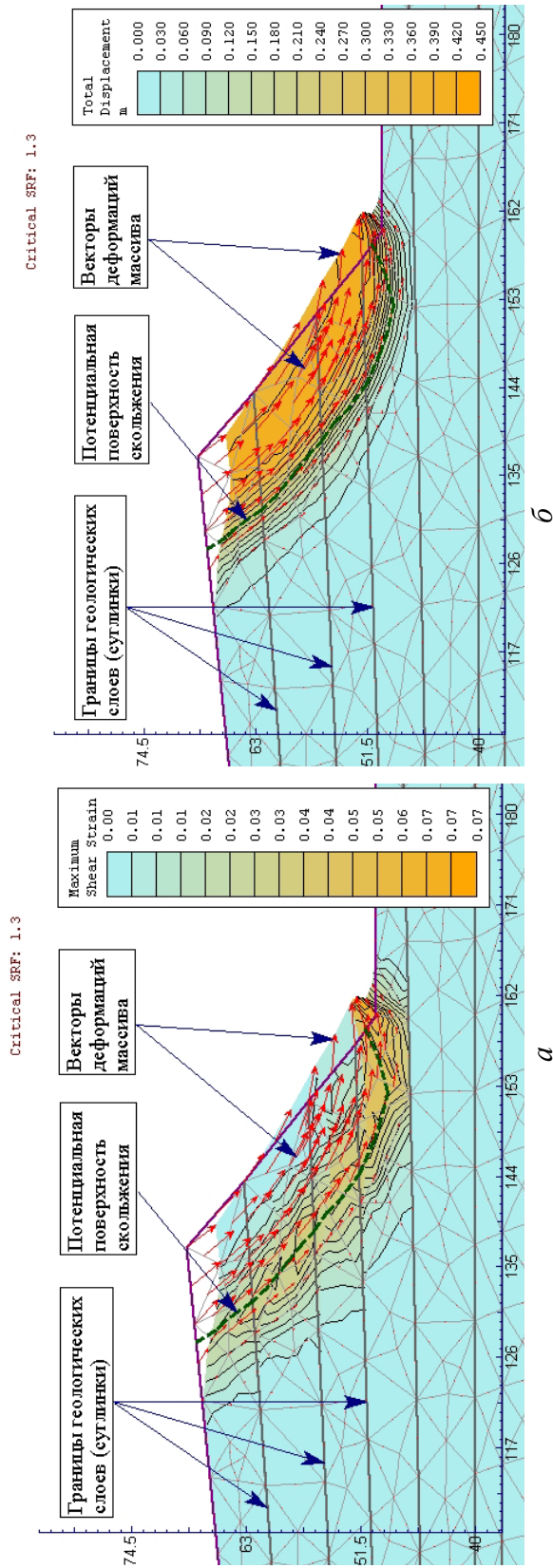


Рис. 4.20. Максимальные сдвиговые деформации (а) и смещения (б) в передовом уступе без нагрузок

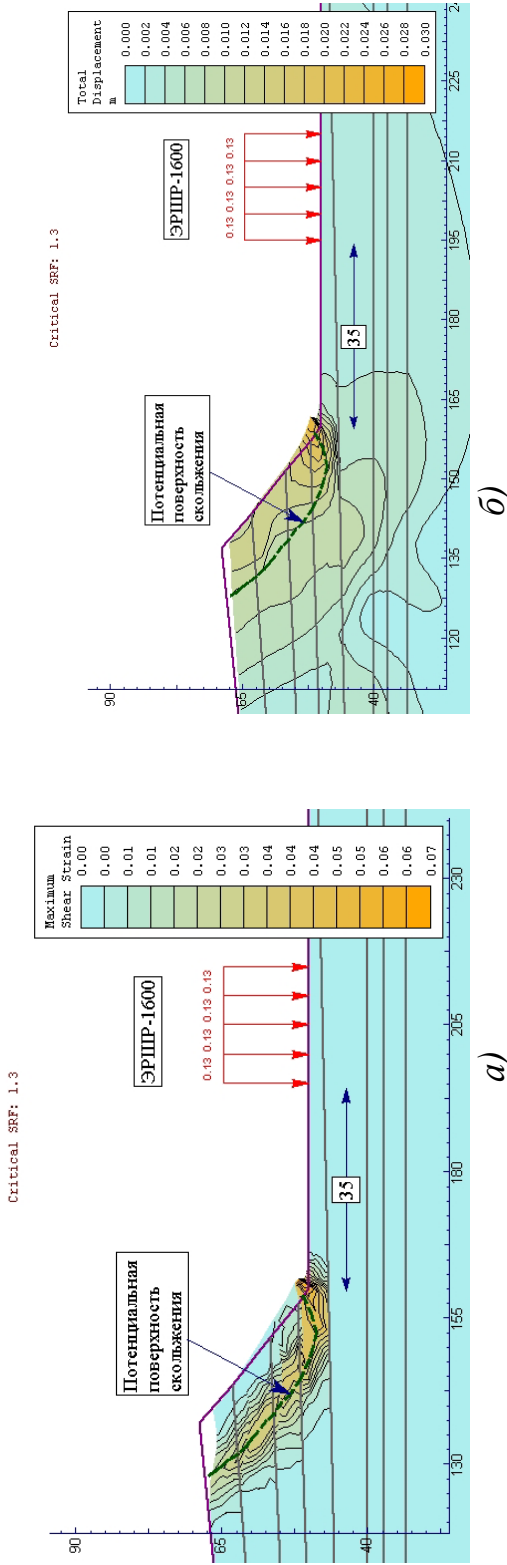


Рис. 4.21. Максимальные сдвиговые деформации (а) и смещения (б) в передовом уступе, нагруженном роторным экскаватором ЭРПП-1600-40/10

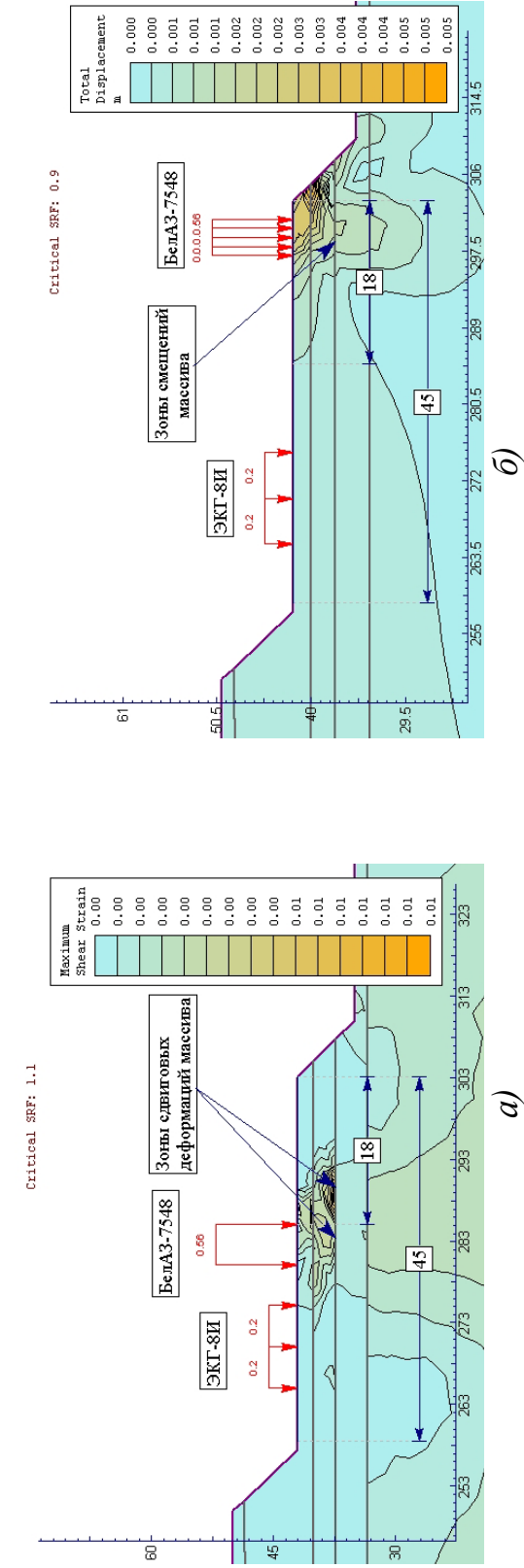


Рис. 4.22. Максимальные сдвиговые деформации (а) и смещения (б) в уступе, нагруженном экскаватором ЭКТ-8И при различном расположении автосамосвала БелАЗ-7548

Зависимость КЗУ от расстояния самосвала БелАЗ-7548 до края бровки

Расстояние от самосвала до края бровки $b$ , м	2	3	4	6	8	10	12	14	16	18
КЗУ	0,9	1,1	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3

Согласно технологии разработки рассматриваемого месторождения на кровле добычного уступа расположен драглайн ЭШ-10/50. Многочисленные этапы моделирования зависимости КЗУ от местоположения драглайна дают одинаковый результат  $КЗУ = 1,1$  для всего борта в целом (рис. 4.23), из чего можно сделать вывод, что расположение драглайна на кровле добычного уступа снижает в целом КЗУ, но не приводит к существенным сдвиговым деформациям в массиве. Это объясняется как малым удельным давлением драглайна на грунт, так и расположением на кровле добычного уступа, сложенного плотными серо-зелеными и красно-бурыми глинами.

В целом, значение КЗУ для всего борта снижается с 1,3 без учета внешних нагрузок до 1,1 с нагрузками горно-транспортного оборудования. Наибольшие сдвиговые деформации наблюдаются в зоне геомеханической нагрузки от автосамосвала, что связано с значительным удельным давлением на грунт.

На основании полученных результатов моделирования можно сделать вывод, что для условий карьера №7 «Юг» Малышевского месторождения ключевым фактором устойчивости уступов является определение условий их устойчивости при наличии динамических нагрузок от горно-транспортного оборудования и его безопасного расположения на уступах.

Поскольку вскрышные породы слагаются из нескольких слоев суглинков и глин, значительно отличающихся по физико-механическим характеристикам, оценить геомеханическое воздействие горно-транспортного оборудования возможно, разделив весь профиль на 2 условные литологические разности: 1 слой - легкие суглинки; 2 слой – плотные суглинки и глины.

В табл. 4.9 представлены усредненные физико-механические характеристики для условных литологических разностей.

Таблица 4.9

Средневзвешенные физико-механические характеристики для условных литологических разностей

Наименование вскрышных пород	Плотность $\gamma$ , кг/м <sup>3</sup>	Сцепление $C$ , МПа	Угол внутреннего трения $\varphi$ , град	Предел прочности на растяжение/сжатие $\sigma_p/\sigma_{сж}$ , МПа	Модуль деформации $E_d$ , МПа
1 слой - легкие суглинки	1,670	0,022	21,4	0,030/0,064	12,85
2 слой – плотные суглинки и глины	1,895	0,075	17,1	0,112/0,202	108,66

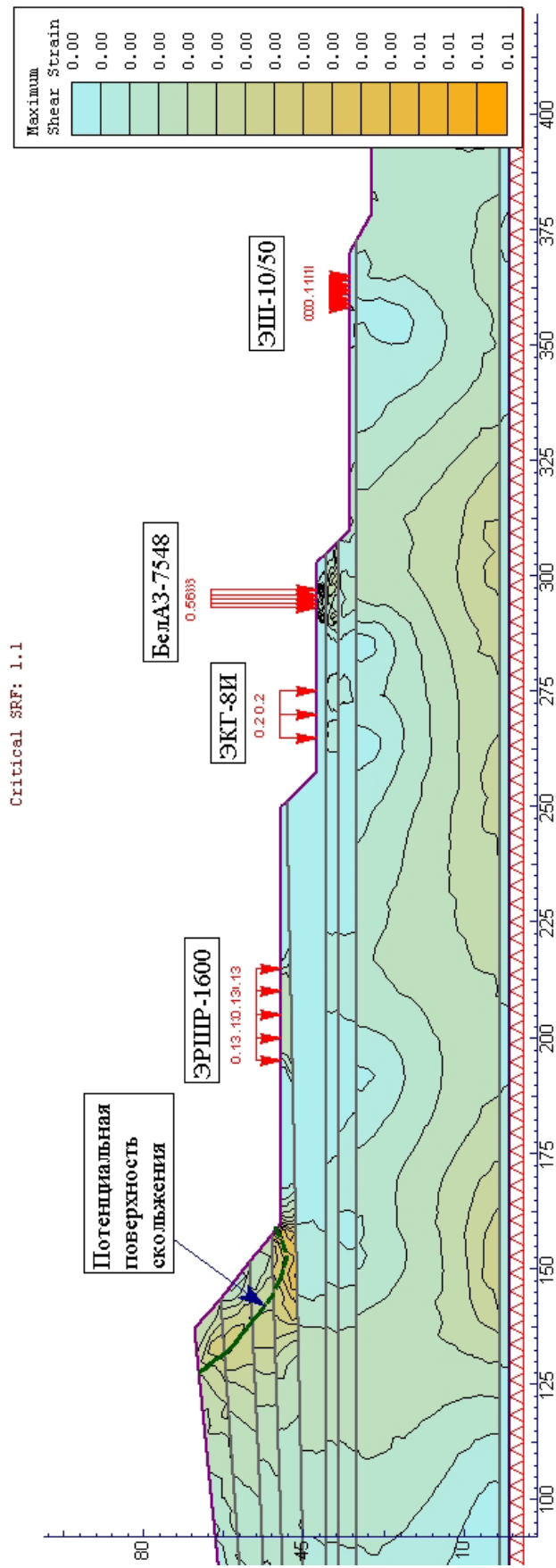


Рис. 4.23. Результаты расчета устойчивости борга с учетом нагрузки от горно-транспортного оборудования

Рассмотрим откос, сложенный однородным материалом с углом наклона  $\alpha = 45^\circ$ , высотой уступа  $H = 20$  м. Тогда, при вариациях гипотетической нагрузки горно-транспортного оборудования на верхней площадке уступа в диапазоне  $P_{\text{гто}} = 0,1 \dots 0,8$  МПа и безопасного расстояния до бровки  $b = 1 \dots 7$  м получим соответствующие зависимости КЗУ от нагрузок автотранспорта (рис. 4.24).

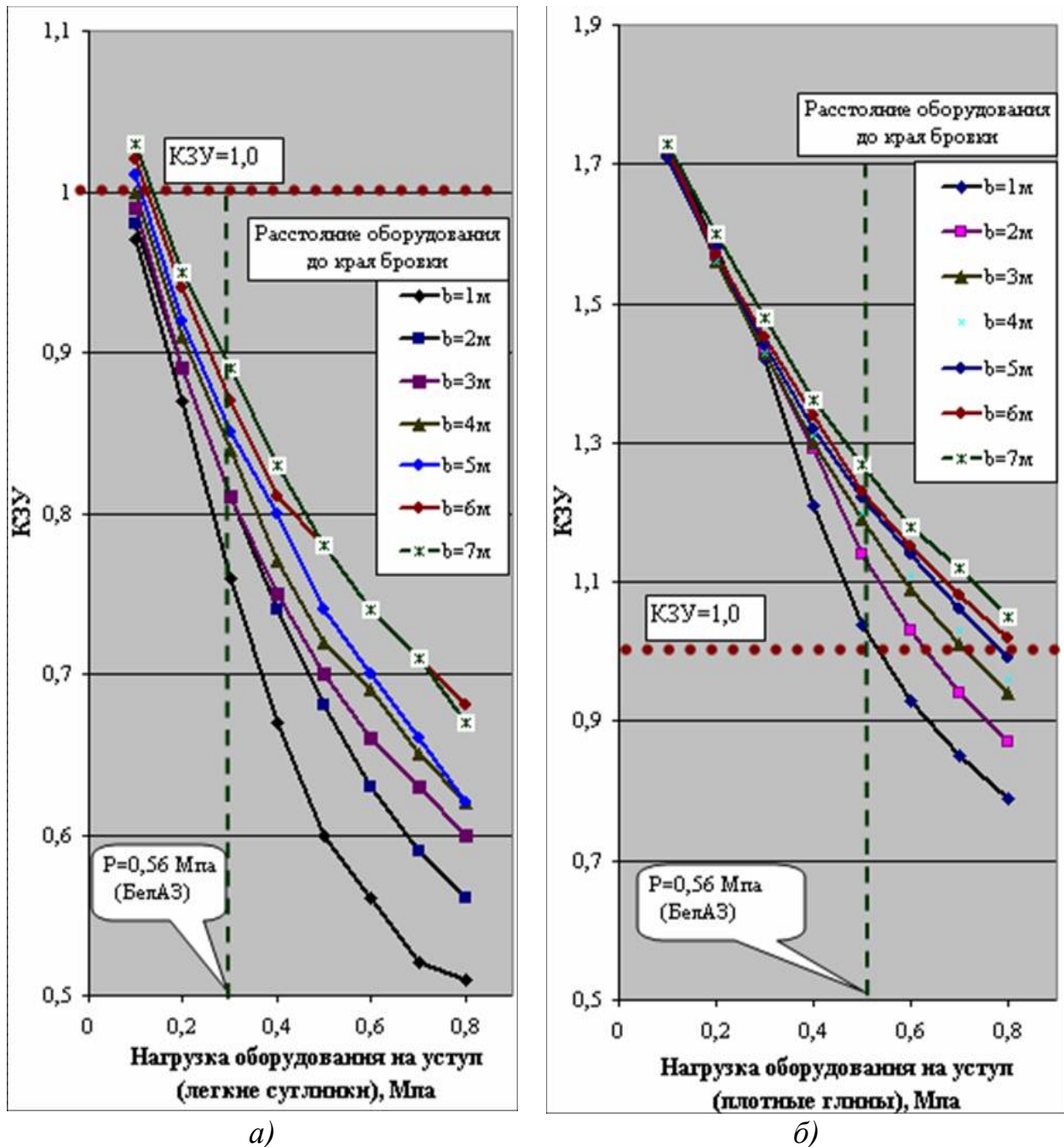


Рис. 4.24. Зависимость КЗУ от внешних нагрузок горно-транспортного оборудования и расстояния до края бровки для уступов, сложенных легкими суглинками (а) и плотными глинами (б)

Для откоса выбранного профиля, сложенного легкими суглинками и без учета внешней нагрузки  $KЗУ=1,14$ . Как показано на рис. 4.24,а, динамические нагрузки на уступе практически невозможны, так как условия предельного рав-

новесия откоса соблюдаются при внешней нагрузке не более 0,1 МПа и при безопасном расстоянии до края бровки не более 5...7 м. Для этих условий  $KЗУ=1,01...1,03$ , а значит, массив находится в предельно устойчивом состоянии. При усилении влияния других факторов, снижающих прочность массива, например наличие нарушений сплошности пород или изменение гидрогеологического режима, рассчитанных значений  $KЗУ$  может оказаться недостаточно для обоснования безопасных технологических операций на мягких вскрышных породах.

Аналогичные расчеты выполнены для уступа, сложенного плотными суглинками и глинами. Уступ заданного профиля без внешних нагрузок имеет  $KЗУ=1,86$ . Как видно из рис. 4.24,б, уступ находится в устойчивом состоянии при нагрузках до 0,5 МПа.

Таким образом, работа экскаваторов ЭКГ-8И на нижних вскрышных уступах и драглайнов ЭШ-10/50 на добычном уступе является безопасной. Динамические нагрузки от самосвалов БелАЗ-7548 оказывают ощутимое воздействие на устойчивость уступа. При соблюдении расстояния от самосвала до края бровки  $b=1...7$  м,  $KЗУ=1,03...1,28$ .

Для полной оценки устойчивости откосов и уступов следует учитывать как нагрузки от транспортных средств, так и гидрогеологические факторы, значительно влияющие на физико-механические свойства массива пород.

## Г Л А В А 5

### ПРИМЕНЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЙ ОЦЕНКИ УСТОЙЧИВОСТИ ОТКОСОВ И БОРТОВ КАРЬЕРОВ, СЛОЖЕННЫХ МЯГКИМИ ПОРОДАМИ

#### 5.1. Рекомендации по прогнозу устойчивости уступов для условий Мотроновско-Анновского участка Малышевского циркон-рутил-ильменитового месторождения

Закономерности, полученные в результате экспериментальных исследований образцов горных пород, изучения процессов нарушения устойчивости откосов на эквивалентных материалах, и численного моделирования в программах конечно-элементного анализа позволяют достоверно прогнозировать условия долговременной устойчивости уступов на карьерах. Установленные зависимости являются основой для реализации технических решений по повышению устойчивости карьерных уступов с целью техногенной безопасности и экономической эффективности открытой разработки месторождений с мягкими вскрышными породами.

В приложении Б представлен алгоритм оценки геомеханической устойчивости откосов и бортов карьеров, из которого понятно, что первостепенными факторами устойчивости уступов и бортов карьеров являются геометрические параметры, а именно высота и угол откоса уступа, которые связаны с структурными особенностями породного массива, гидрогеологическими характеристиками месторождения и нагрузками от горно-транспортного оборудования.

Настоящие рекомендации разработаны для горно-геологических и горно-технических условий Мотроновско-Анновского участка Малышевского комплексного циркон-рутил-ильменитового месторождения, которое планируется к введению в эксплуатацию. Технологической особенностью данного участка месторождения является сложный и изменчивый характер горно-геологических условий разработки, а с учетом гидрогеологических условий возникает повышенная опасность образования сдвигов пород вскрыши. Для обеспечения производительности карьера по руде (5 млн. м<sup>3</sup>/год) и выемки больших объемов вскрышных пород (25 млн. м<sup>3</sup>/год) необходимо использовать мощное горно-транспортное оборудование – роторные комплексы и шагающие драглайны. Разработка участка месторождения предполагается двумя вскрышными уступами. Вскрышные работы в подобных горно-геологических условиях эксплуатации производятся по транспортной и комбинированной (транспортной и транспортно-отвальной) системам разработки с внутренним отвалообразованием. Выемку пород вскрышных уступов рекомендуется производить по транспортной системе разработки с применением экскаватора ЭШ-13/50 и автосамосвалов БелАЗ-7547. Уступ до гор. +130 м отрабатывается по транспортной системе разработки вскрышными комплексами машин непрерывного действия в составе: роторных экскаваторов, системы ленточных конвейеров, перегружателей и отвалообразователей. Вскрышные работы производятся двумя роторными



комплексами с экскаваторами типа SRs-2000 фирмы «MAN TAKRAF». Ожидаемый объем выемки вскрышных пород – 9,5-10 млн. м<sup>3</sup>/год [131].

Согласно научно-исследовательской работе [130] определены величины устойчивых углов откосов рабочих уступов и внутрикарьерных отвалов, а именно: откоса рабочего уступа в обводнённом состоянии – не более 25°, после выполнения дренажных работ – не более 37°; откоса верхнего вскрышного уступа – не более 20°, нижнего вскрышного уступа – не более 31°; погашение нерабочих бортов в торцах карьера – не более 24°.

По мнению автора, приведенные значения углов откосов уступов являются заниженными, что вызывает необходимость дополнительной оценки устойчивости уступов в сложноструктурном массиве с использованием численного моделирования для определения рациональных геометрических параметров.

Экспериментальные испытания образцов горных пород на сдвиговом приборе П10-С, представленные в главе 3, позволили получить точные значения сцепления и угла внутреннего трения горных пород рассматриваемого месторождения. Различия в значениях прочностных характеристик обусловлены в большей степени влажностью пород, которая влияет на значения сцепления и угла внутреннего трения по установленным зависимостям [88, 135], а также на деформационные характеристики пород.

Оценка геомеханической устойчивости откосов и бортов карьеров для условий проектируемого Мотроновско-Анновского участка Малышевского месторождения выполнена с использованием численного моделирования и лабораторных исследований прочностных свойств образцов горных пород. В табл. 5.1 представлены физико-механические характеристики пород.

Значения сцепления и угла внутреннего трения получены по результатам испытаний образцов горных пород на сдвиг при естественной влажности. Значения модуля деформации получены по расчетным данным для указанных пород с использованием программного модуля *RocLab 1.0*, интегрированного в программу конечно-элементного анализа *Phase2*.

В результате моделирования методом конечных элементов, лабораторных исследований процессов обрушения на эквивалентных материалах и экспериментальных испытаний горных пород на сдвиг было установлено, что для обеспечения кратковременной устойчивости с учетом сложной геологической структуры угол наклона откоса для вскрышных уступов, сложенных желто-бурыми и красно-бурыми суглинками, может достигать 55°. Однако для долговременной устойчивости породного массива этого значения может оказаться недостаточно, если учитывать гидрогеологические и климатические условия, а также нагрузки горно-транспортного оборудования. Так, при визуальном обследовании передового уступа на карьере №7 «Север» установлено, что на некоторых участках вдоль фронта работ углы наклона откосов достигают 60° и более, что обуславливает возникновение масштабных обрушений и оползней.

Учитывая горно-геологические условия разработки Мотроновско-Анновского участка Малышевского месторождения, приоритетное значение имеет задача уточнения углов наклона откосов на проектируемом участке при

выявлении всего комплекса естественных и технологических факторов, влияющих на устойчивость уступов [142].

Таблица 5.1

Физико-механические характеристики вскрышных пород

Наименование вскрышных пород	Мощность слоя, $h_i$ (*), м	Плотность $\gamma$ (*), кг/м <sup>3</sup>	Сцепление $C$ (*), МПа	Угол внутреннего трения $\varphi$ (*), град	Предел прочности на растяжение/сжатие $\sigma_p/\sigma_{сж}$ , МПа	Модуль деформации $E_d$ , МПа
Суглинки буровато-серые	3	1,64	0,05	29	0,059/0,170	29,75
Суглинки палево-желтые	5	1,82	0,04	21	0,055/0,116	20,3
Суглинки желто-бурые	8	1,952	0,035	20	0,049/0,100	17,5
Суглинки красно-бурые	6	1,913	0,038	16	0,057/0,101	17,68
Глины красно-бурые	14	1,905	0,075	20	0,105/0,214	37,45
Глины серовато-бурые	3	1,79	0,060	15	0,092/0,156	31,2
Глины зелено-серые	8	2,1	0,149	21	0,205/0,434	86,8
Пески	17	1,95	0,058	32	0,064/0,209	36,57

*Примечание:* (\*) Средние значения показателей.

На рис. 5.1 показан предполагаемый профиль карьера Мотроновско-Анновского участка месторождения с нанесенными геологическими слоями горных пород. При этом, первый уступ сложен преимущественно суглинками, второй – плотными сарматскими глинами, третий – рудными и нерудными песками, что учитывается при обосновании геометрических параметров уступов карьера. Слои мелкозернистых и слабглинистых песков сильно обводнены, что представляет проблему при вскрытии этого участка месторождения.

Для условий Вольногорского ГМК передовые вскрышные уступы, сложенные преимущественно желто-бурыми и красно-бурыми суглинками, отрабатываются роторными комплексами с высотой уступа 20...22 м. Второй и третий ярус вскрышных уступов высотой 8...10 м, представленные плотными красно-бурыми и серо-зелеными глинами, отрабатываются экскаваторами ЭКГ-8И.

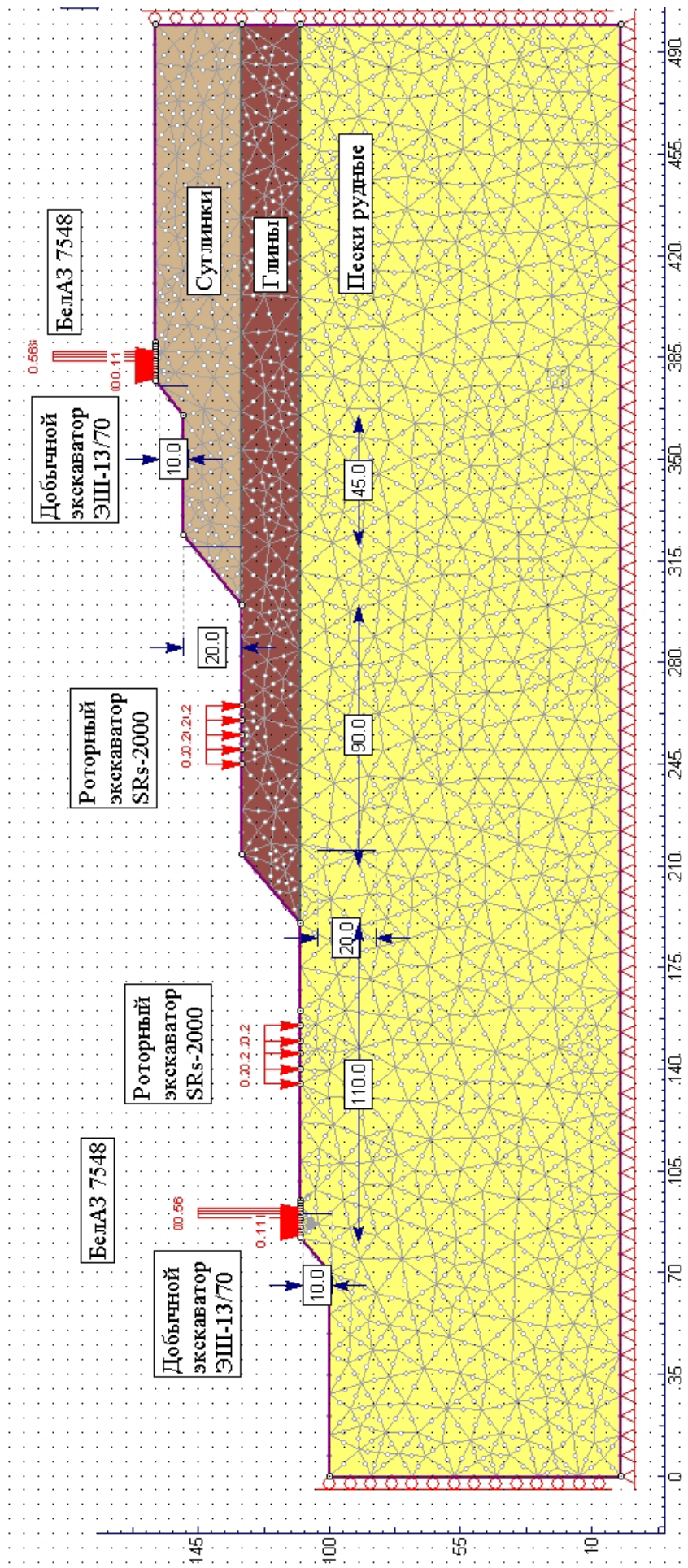


Рис. 5.1. Профиль проектируемого карьера Мотроновско-Анновского участка

При пологом залегании пластов снимается слой фиксированной толщины с относительно постоянными физико-механическими характеристиками, поэтому в расчетных схемах моделирования устойчивости бортов карьеров использованы средневзвешенные значения прочностных характеристик пород в пределах разрабатываемых высот уступов.

Средневзвешенные значения физико-механических характеристик для уступов, сложенных четвертичными суглинками и сарматскими глинами, рассчитаны по нижеприведенным формулам:

$$C_{cp} = \frac{C_1 \cdot h_1 + C_2 \cdot h_2 + \dots + C_n \cdot h_n}{h_1 + h_2 + \dots + h_n}, \quad (5.1)$$

$$\operatorname{tg} \rho_{cp} = \frac{\operatorname{tg} \rho_1 \cdot h_1 + \operatorname{tg} \rho_2 \cdot h_2 + \dots + \operatorname{tg} \rho_n \cdot h_n}{h_1 + h_2 + \dots + h_n}, \quad (5.2)$$

$$\gamma_{cp} = \frac{\gamma_1 \cdot h_1 + \gamma_2 \cdot h_2 + \dots + \gamma_n \cdot h_n}{h_1 + h_2 + \dots + h_n}, \quad (5.3)$$

$$\sigma_{cp}^p = \frac{\sigma_1^p \cdot h_1 + \sigma_2^p \cdot h_2 + \dots + \sigma_n^p \cdot h_n}{h_1 + h_2 + \dots + h_n}, \quad (5.4)$$

$$\sigma_{cp}^{сжс} = \frac{\sigma_1^{сжс} \cdot h_1 + \sigma_2^{сжс} \cdot h_2 + \dots + \sigma_n^{сжс} \cdot h_n}{h_1 + h_2 + \dots + h_n}, \quad (5.5)$$

$$E_{\delta}^{cp} = \frac{E_1 \cdot h_1 + E_2 \cdot h_2 + \dots + E_n \cdot h_n}{h_1 + h_2 + \dots + h_n}, \quad (5.6)$$

где  $C_1, C_2, C_n$  – сцепление пород отдельной литологической разности;  $\operatorname{tg} \rho_1, \operatorname{tg} \rho_2, \operatorname{tg} \rho_n$  – тангенс угла внутреннего трения  $\rho$  отдельной литологической разности;  $\gamma_1, \gamma_2, \gamma_n$  – плотность пород;  $E_1, E_2, E_n$  – модуль деформации;  $h_1, h_2, h_n$  – мощность слоя отдельной литологической разности [141].

Для суглинков получаем следующие физико-механические характеристики:

$$C_{cp} = \frac{0,05 \cdot 3 + 0,04 \cdot 5 + 0,035 \cdot 8 + 0,038 \cdot 6}{3 + 5 + 8 + 6} = \frac{0,858}{22} = 0,039 \text{ МПа};$$

$$\operatorname{tg} \rho_{cp} = \frac{0,554 \cdot 3 + 0,384 \cdot 5 + 0,364 \cdot 8 + 0,287 \cdot 6}{3 + 5 + 8 + 6} = \frac{8,216}{22} = 0,374,$$

$$\rho_{cp} = 20,5^\circ;$$

$$\gamma_{cp} = \frac{1,64 \cdot 3 + 1,82 \cdot 5 + 1,952 \cdot 8 + 1,913 \cdot 6}{3 + 5 + 8 + 6} = \frac{41,114}{22} = 1,869 \text{ кг} / \text{м}^3;$$

$$\sigma_{cp}^p = \frac{0,059 \cdot 3 + 0,055 \cdot 5 + 0,049 \cdot 8 + 0,057 \cdot 6}{3 + 5 + 8 + 6} = \frac{1,186}{22} = 0,054 \text{ МПа};$$

$$\sigma_{cp}^{сж} = \frac{0,170 \cdot 3 + 0,116 \cdot 5 + 0,100 \cdot 8 + 0,101 \cdot 6}{3 + 5 + 8 + 6} = \frac{2,496}{22} = 0,114 \text{ МПа};$$

$$E_o^{cp} = \frac{29,75 \cdot 3 + 20,3 \cdot 5 + 17,5 \cdot 8 + 17,68 \cdot 6}{3 + 5 + 8 + 6} = \frac{436,83}{22} = 19,86 \text{ МПа}.$$

Для глин физико-механические характеристики будут следующие:

$$C_{cp} = \frac{0,075 \cdot 14 + 0,060 \cdot 3 + 0,149 \cdot 8}{14 + 3 + 8} = \frac{2,422}{25} = 0,097 \text{ МПа};$$

$$\text{tg } \rho_{cp} = \frac{0,364 \cdot 14 + 0,268 \cdot 3 + 0,384 \cdot 8}{14 + 3 + 8} = \frac{8,972}{25} = 0,359,$$

$$\rho_{cp} = 19,5^\circ;$$

$$\gamma_{cp} = \frac{1,905 \cdot 14 + 1,79 \cdot 3 + 2,1 \cdot 8}{14 + 3 + 8} = \frac{48,84}{25} = 1,954 \text{ кз / м}^3;$$

$$\sigma_{cp}^p = \frac{0,105 \cdot 14 + 0,092 \cdot 3 + 0,205 \cdot 8}{14 + 3 + 8} = \frac{3,386}{25} = 0,135 \text{ МПа};$$

$$\sigma_{cp}^{сж} = \frac{0,214 \cdot 14 + 0,156 \cdot 3 + 0,434 \cdot 8}{14 + 3 + 8} = \frac{6,936}{25} = 0,277 \text{ МПа};$$

$$E_o^{cp} = \frac{37,45 \cdot 14 + 31,2 \cdot 3 + 86,8 \cdot 8}{14 + 3 + 8} = \frac{1312,3}{25} = 52,42 \text{ МПа}.$$

В табл. 5.2 сведены результаты расчета средневзвешенных физико-механических характеристик для пород верхних вскрышных уступов без учета влагонасыщения породного массива.

В табл. 5.3 представлены средневзвешенные физико-механические характеристики вскрышных пород при условии неполного водонасыщения массива, рассчитанные по установленным зависимостям прочностных свойств пород от влажности [143]. Устойчивость первого вскрышного уступа, сложенного макропористыми лессовидными суглинками, в большей степени зависит от влажности массива согласно результатам, представленным в разделе 4.

Величина коэффициента запаса устойчивости бортов карьеров, откосов уступов и отвалов устанавливается в зависимости от достоверности исходных свойств пород, их изменяемости во времени (в том числе за счет ползучести), технологии разработки и динамических воздействий, возникающих в процессе эксплуатации карьеров. При расчетах методом предельных состояний в явной форме учитываются только важнейшие факторы, от которых зависит переход в предельное состояние [141]. Рекомендуемые величины коэффициента запаса приведены в табл. 5.4.

Таблица 5.2

Средневзвешенные характеристики пород без учета водонасыщения массива

Наименование вскрышных пород	Средняя мощность слоя, $h_i$ , м	Плотность $\gamma$ , МН/м <sup>3</sup>	Сцепление $C$ , МПа	Угол внутреннего трения $\varphi$ , град	Предел прочности на растяжение/сжатие, $\sigma_p/\sigma_{сж}$ , МПа	Модуль деформации $E_\partial$ , МПа
Первый вскрышной уступ (суглинки)	22	0,0187	0,039	20,5	$\frac{0,054}{0,114}$	19,86
Второй вскрышной уступ (глины)	25	0,0195	0,097	19,5	$\frac{0,135}{0,277}$	69,1
Добычные уступы (пески мелкозернистые слабоглинистые)	17	0,0195	0,058	32,0	$\frac{0,064}{0,209}$	36,57

Таблица 5.3

Средневзвешенные характеристики пород в водонасыщенном массиве

Наименование вскрышных пород	Влажность, $W_{отн}$ , %	Плотность $\gamma$ , МН/м <sup>3</sup>	Сцепление $C$ , МПа	Угол внутреннего трения $\varphi$ , град	Предел прочности на растяжение/сжатие $\sigma_p/\sigma_{сж}$ , МПа	Модуль деформации $E_\partial$ , МПа
Первый вскрышной уступ (суглинки)	10	0,0187	0,027	35,06	$\frac{0,028}{0,104}$	54,4
	15	0,0198	0,017	28,16	$\frac{0,020}{0,055}$	32,8
	20	0,0202	0,009	18,26	$\frac{0,014}{0,026}$	23,0
Второй вскрышной уступ (глины)	35	0,0195	0,097	19,5	$\frac{0,135}{0,277}$	52,42
Добычные уступы (пески мелкозернистые слабоглинистые)	50	0,0195	0,058	32	$\frac{0,064}{0,209}$	36,57

Таблица 5.4

Рекомендуемые величины коэффициента запаса устойчивости (КЗУ) [141]

Общая характеристика откоса (или борта)	Величина КЗУ в зависимости от срока эксплуатации откоса	
	до 5 лет	более 5 лет
Нерабочий борт, сложенный глинами или трещиноватыми породами	1,20	1,30
Нерабочий борт с преобладанием песчаных и гравелистых пород	1,15	1,20
Рабочий борт	1,20	-
Откосы рабочих уступов и отвалов	1,20	-
Откосы уступов нерабочего борта, сложенные глинистыми и трещиноватыми породами	1,50	2,00
Откосы уступов нерабочего борта, сложенные песчаными и гравелистыми породами	1,15	1,20

В соответствии с представленным в приложении Б алгоритмом оценки геомеханической устойчивости откосов и бортов карьеров таких факторов для рассматриваемого месторождения выделено три: сложная геологическая структура массива горных пород, нагрузки от горно-транспортного оборудования и гидрогеологические характеристики.

Общий коэффициент запаса устойчивости  $KЗУ_{общ}$  определяется поэтапно с учетом влияния каждого фактора по следующему алгоритму:

$$KЗУ_{общ} = KЗУ_{геол} \rightarrow KЗУ_{гто} \rightarrow KЗУ_{гидр}, \quad (5.7)$$

$KЗУ_{геол}$  – коэффициент запаса устойчивости с учетом сложной геологической структуры массива горных пород;  $KЗУ_{гто}$  – коэффициент запаса устойчивости с учетом нагрузок от горно-транспортного оборудования;  $KЗУ_{гидр}$  – коэффициент запаса устойчивости с учетом гидрогеологических характеристик массива горных пород.

На первом этапе моделирования определены КЗУ с учетом сложной геологической структуры массива пород. Углы откосов при заданной высоте уступов принимались в диапазоне от 30 до 55° с шагом 5°.

Согласно результатам расчетов КЗУ установлено, что расположение драглайна ЭШ-13/70 на первом вскрышном уступе существенно не влияет на устойчивость откоса и борта карьера в целом. Поэтому при учете нагрузок от горно-транспортного оборудования минимальное расстояние драглайнов от верхней бровки принимается  $b=1$  м. Роторные экскаваторы SRs-2000 в процессе работы движутся практически по центру рабочей площадки шириной не менее 90 м уступа, поэтому их удельная нагрузка на грунт  $P=0,2$  МПа не оказывает существенного влияния на устойчивость откосов.

Нагрузки от автосамосвалов БелАЗ-7548 вносят наибольший вклад в процесс дестабилизации откосов. По результатам моделирования, представленным в разделе 4, установлено, что минимальное расстояние автосамосвалов до края бровки уступа, обеспечивающее безопасность транспортно-погрузочных работ, составляет  $b = 3$  м. Поэтому, на втором этапе оценки устойчивости уступов изменяется только этот параметр в диапазоне  $b = 3 \dots 7$  м.

На третьем этапе расчета КЗУ выполнена оценка влияния гидрогеологических факторов на общую устойчивость массива горных пород. По инженерно-геологическим данным, для Малышевского месторождения свойственно наличие двух основных водоносных горизонтов: в четвертичных суглинках и в рудоносных песках сарматской свиты. Первый горизонт слабонапорный и его влияние на прочностные свойства слоя суглинков выражается повышением их относительной влажности до  $W_{отн} = 10 \dots 20\%$ , что влияет на значения угла внутреннего трения, сцепления и модуля деформации. Глины обладают слабой водопроницаемостью и относительно постоянной влажностью, значение которой составляет в массиве  $W_{отн} = 35\%$  [143].

На рис. 5.2 представлены избранные графические результаты моделирования устойчивости борта для проектируемого карьера при средних значениях относительной влажности суглинков  $W_{отн} = 15\%$  и максимальном расположении автосамосвала БелАЗ-7548 от бровки уступа  $b = 7$  м, которые дают представление о геомеханических процессах в прибортовом массиве при различных углах откосов рабочих уступов.

При  $\alpha = 35^\circ$ , наибольшим деформациям подвергается передовой вскрышной уступ, сложенный суглинками и обрабатываемый драглайнами ЭШ-13/70 с нижним черпанием и погрузкой в автосамосвалы БелАЗ-7548 (рис. 5.3). Красно-бурые и серо-зеленые глины, из которых слагаются два нижележащих вскрышных уступа не испытывают существенных деформаций и смещений вследствие нагрузок от роторных экскаваторов SRs-2000.

Борт карьера при заданных условиях является устойчивым,  $КЗУ = 1,39$ . Нагрузки от драглайна существенно не влияют на КЗУ, однако при повышении влажности до  $W = 20\%$  в результате гидрогеологических факторов или атмосферных осадков работа оборудования на уступе является опасной, так как прочностные свойства суглинков снижаются. Добычные уступы вследствие неблагоприятных гидрогеологических факторов находятся в обводненном состоянии, что вызывает необходимость дополнительной инженерной оценки целесообразности использования тяжелых автосамосвалов на этом участке. Увеличение влажности суглинков с 10 до 20% без учета нагрузок от транспорта снижает КЗУ с 1,72 до 0,88.

При  $\alpha = 45^\circ$ , борт является устойчивым и с учетом только геологической структуры  $КЗУ = 1,19$ . Увеличение влажности суглинков с 10 до 20% без учета нагрузок от транспорта снижает КЗУ с 1,38 до 0,77.

При  $\alpha = 55^\circ$  возникают обрушения в уступе, сложенном суглинками, и с учетом геологической структуры  $КЗУ = 1,0$ . Увеличение влажности суглинков с 10 до 20% без учета нагрузок от транспорта снижает КЗУ с 1,23 до 0,56.



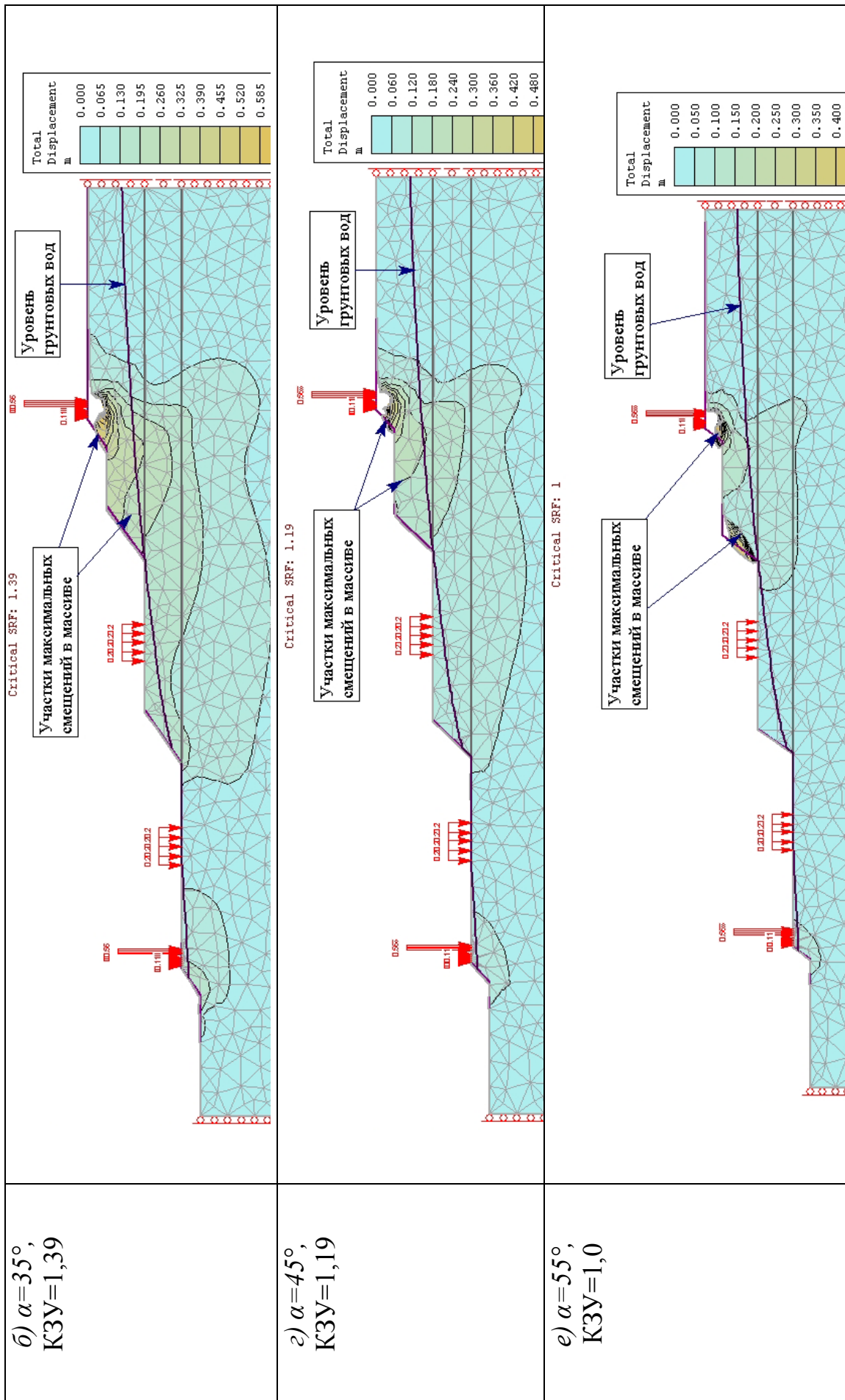
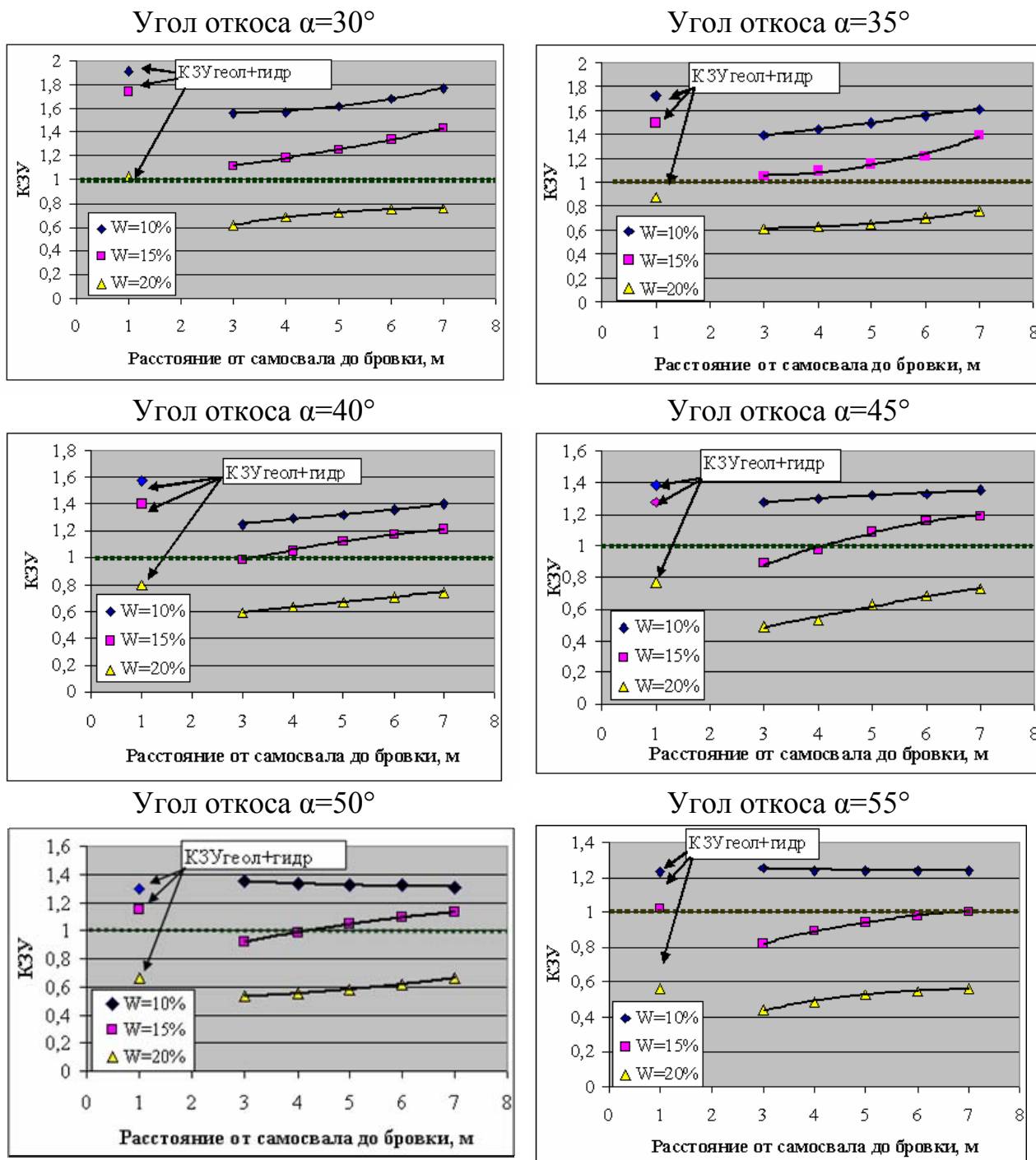


Рис. 5.2. Устойчивость борта карьера при различных углах наклона откосов

Таким образом, при  $\alpha=55^\circ$  возникает обрушение вскрышного уступа, что подтверждается результатами моделирования устойчивости откосов на эквивалентных материалах [122, 125].

Результаты моделирования в виде зависимостей КЗУ от влажности пород  $W$  и положения самосвала на уступе представлены на рис. 5.3.



*Примечание.* КЗУ<sub>геол+гидр</sub> – коэффициент запаса устойчивости откоса с учетом геологической структуры и влажности массива без нагрузок горно-транспортного оборудования

Рис. 5.3. Зависимость КЗУ от влажности пород  $W$  и положения самосвала на уступе

На представленных диаграммах зависимости КЗУ от угла наклона откоса  $\alpha=30...55^\circ$  и положения самосвала на уступе отдельно вынесены значения КЗУ-геол+гидр, учитывающие только геологическую структуру и влажность породного массива без нагрузок горно-транспортного оборудования. Как видно из установленных зависимостей, для горно-геологических условий Малышевского циркон-рутил-ильменитового месторождения влажность вмещающих пород является доминирующим фактором устойчивости откосов уступов [88, 134]. Гидрогеологические факторы также оказывают доминирующее влияние на изменение геомеханических свойств пород и развитие оползневых процессов на таких техногенных объектах, как насыпные дамбы [114] и отвалы карьерных пород [144] и т.п.

При наличии достоверных исходных данных о прочностных характеристиках и влажности вскрышных пород, возможно формировать геометрический профиль борта для изменчивых геологических и гидрогеологических условий месторождения и тем самым значительно повысить экономическую эффективность вскрышных работ.

Используя результаты численного моделирования, представленные на рис. 5.4, рассчитаны зависимости угла откоса уступа от влажности верхнего вскрышного горизонта суглинков (рис. 5.4). По имеющимся инженерно-геологическим данным средние значения естественной влажности суглинков составляет  $W_{омн}=16...18\%$ . Установлено, что для существующих гидрогеологических условий с учетом физико-механических свойств пород рекомендуемые значения КЗУ=1,1...1,3 будут обеспечены при угле наклона откоса  $\alpha=37...47^\circ$ .

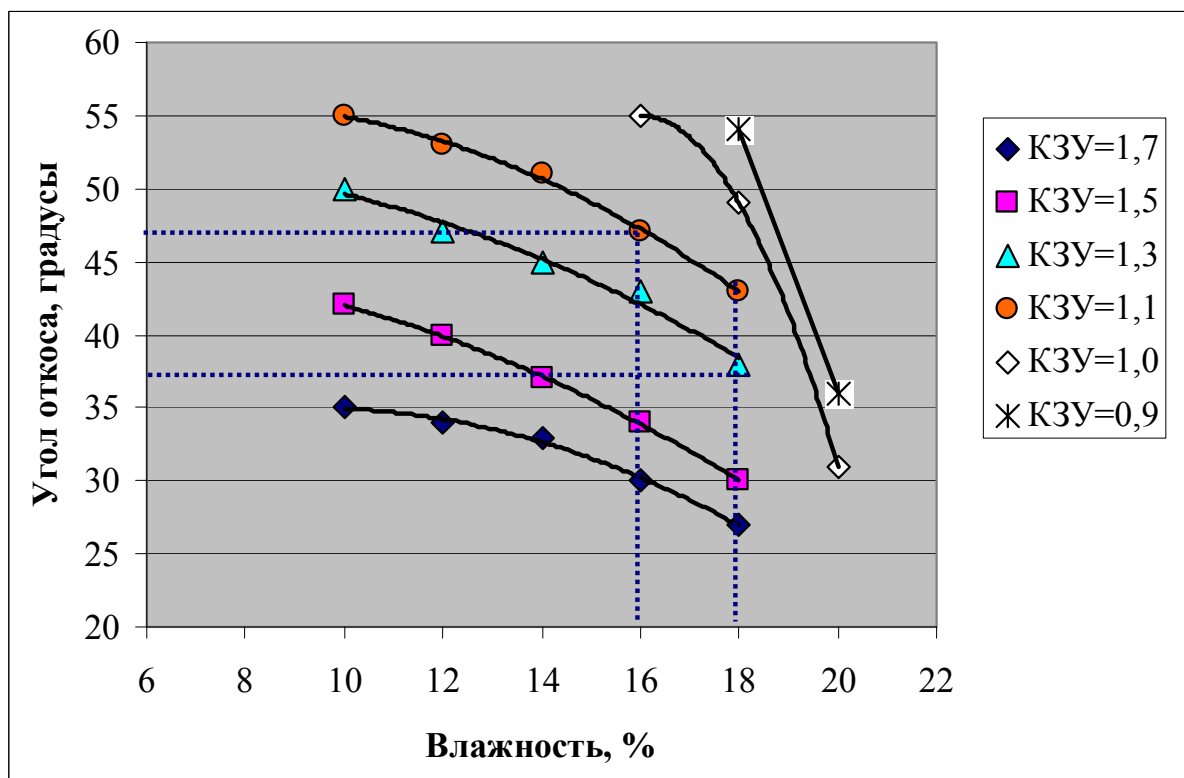


Рис. 5.4. Зависимость угла откоса уступа от влажности суглинков

Таким образом, для рассматриваемого участка месторождения рекомендуется устанавливать предельный угол наклона откосов для вскрышных уступов, сложенных суглинками, не более  $\alpha=47^\circ$ .

Комплексная оценка влияния факторов, определяющих геомеханическую устойчивость откосов, позволила разработать номограмму для расчета КЗУ и рациональных геометрических параметров вскрышных уступов, сложенных суглинками, для условий Мотроновско-Анновского участка Малышевского месторождения (рис. 5.5). В номограмме интегрированы как геометрические параметры уступа, так и основные физико-механические характеристики породного массива, что позволяет оперативно определять КЗУ для выбранного участка открытых горных работ без трудоемких расчетов и моделирования. При этом, свойства пород сведены к безразмерному виду по аналогии с предлагаемой дуговой номограммой Хоека-Брэя [144].

При наличии исходных данных прочностных свойств вмещающих пород, полученных расчетным способом или в результате лабораторных испытаний, можно определить с достаточной точностью условия устойчивого состояния откосов уступов, сложенных мягкими вскрышными породами.

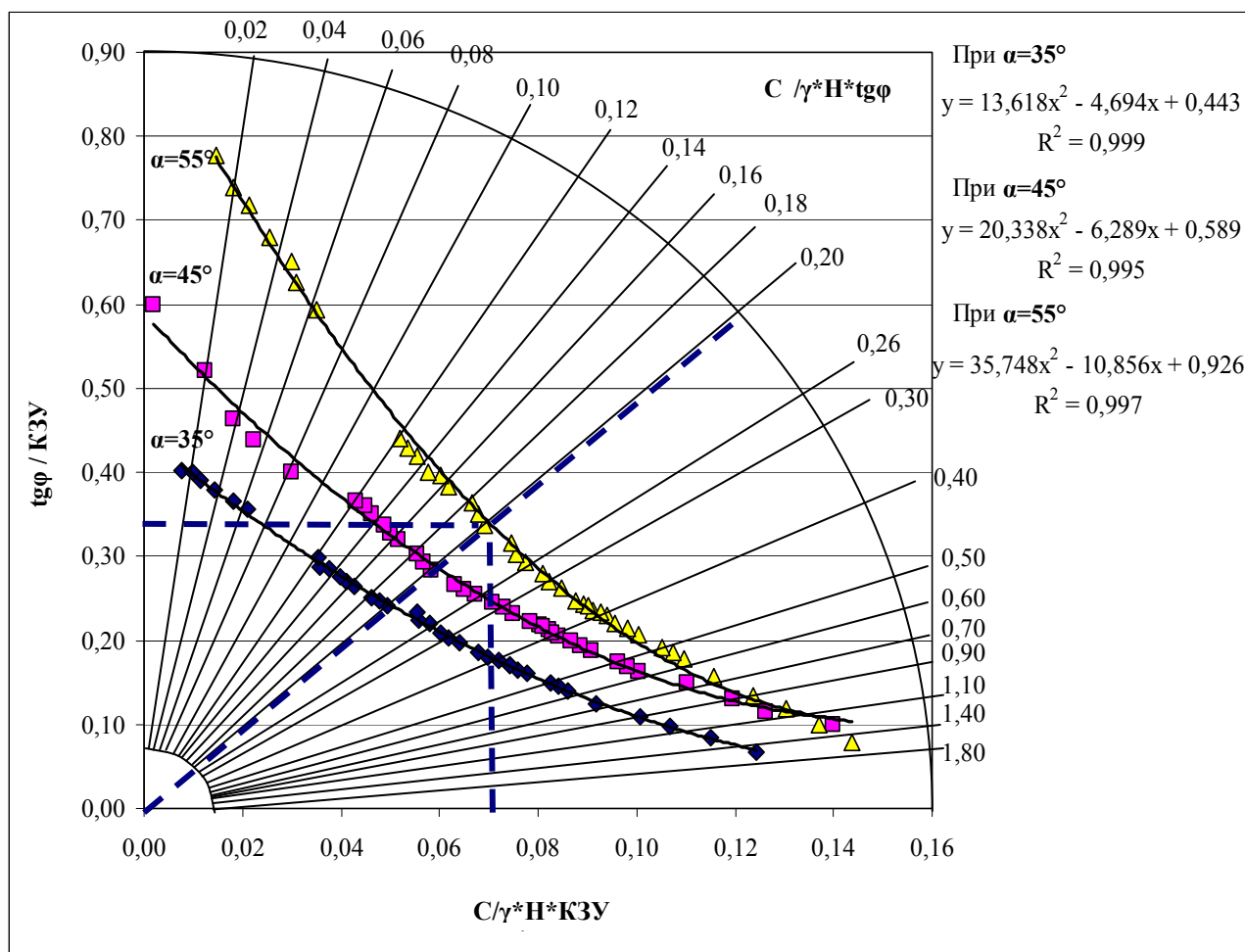


Рис. 5.5. Номограмма для определения устойчивых параметров откосов уступов (пояснение к примеру 1)

Для построения номограммы выполнен расчет КЗУ для откосов с углами наклона  $35^\circ$ ,  $45^\circ$  и  $55^\circ$ . Принятие угла наклона более  $55^\circ$  для вскрышных уступов, сложенных мягкими породами, нецелесообразно для условий рассматриваемого участка месторождения, что обосновано в работах [125, 126] и установлено результатами численного моделирования устойчивости откосов карьера в настоящем разделе.

Порядок пользования номограммой следующий.

*Пример 1.* Требуется определить высоту уступа при рекомендуемом угле откоса  $\alpha = 55^\circ$ , чтобы обеспечить  $KЗУ = 1,3$  для следующих прочностных характеристиках породного массива: плотность  $\gamma = 17,0 \text{ кН/м}^3$ , угол внутреннего трения  $\varphi = 24^\circ$  и сцепление  $C = 35 \text{ кПа}$ .

По заданным значениям прочностных свойств пород вычисляется значение безразмерного параметра на вертикальной оси  $\text{tg}\varphi/KЗУ = 0,445/1,3 = 0,343$  и проводится горизонтальная линия до пересечения с кривой, соответствующей  $\alpha = 55^\circ$  (рис. 5.5). Если из точки пересечения опустить перпендикуляр к горизонтальной оси, то в точке пересечения получается соответствующий безразмерный параметр  $C/\gamma * H * KЗУ = 0,07$ . Отсюда, определяется высота устойчивого уступа при заданном КЗУ:  $H = 35 \text{ кПа}/17,0 \text{ кН/м}^3 * 1,3 * 0,07 = 22,6 \text{ м}$ . На дуговой оси находится соответствующее значение безразмерного параметра  $C/\gamma * H * \text{tg}\varphi = 0,21$ .

*Пример 2.* Оценить, как изменится КЗУ откоса в результате его выполаживания с  $55^\circ$  до  $45^\circ$  при высоте уступа  $H = 20 \text{ м}$  и следующих физико-механических характеристиках породного массива: плотность  $\gamma = 18,6 \text{ кН/м}^3$ , угол внутреннего трения  $\varphi = 24^\circ$  и сцепление  $C = 44 \text{ кПа}$  (рис. 5.6).

На дуговой оси определяется соответствующее значение безразмерного параметра  $C/\gamma * H * \text{tg}\varphi = 44 \text{ кПа}/18,6 \text{ кН/м}^3 * 20 \text{ м} * \text{tg}24^\circ = 0,27$ . Из этой точки проводится отрезок к началу координат и на пересечении с кривыми для  $\alpha = 55^\circ$  и  $\alpha = 45^\circ$  вычисляются значения безразмерных параметров  $C/\gamma * H * KЗУ$  и соответственно значения КЗУ. Так, для  $\alpha = 55^\circ$  значение  $C/\gamma * H * KЗУ = 0,078$ , откуда  $KЗУ = 1,52$ ; для  $\alpha = 45^\circ$  значение  $C/\gamma * H * KЗУ = 0,067$ , откуда  $KЗУ = 1,77$ .

Построенная номограмма является также полезным инструментом для определения предельных значений сцепления и угла внутреннего трения мягких вскрышных пород с целью достижения требуемого значения КЗУ.

Таким образом, представленный выше алгоритм комплексной геомеханической оценки с учетом геологических, гидрогеологических и технологических факторов месторождения, позволяет определять устойчивые углы наклона откосов и выбирать рациональные геометрические параметры уступов.

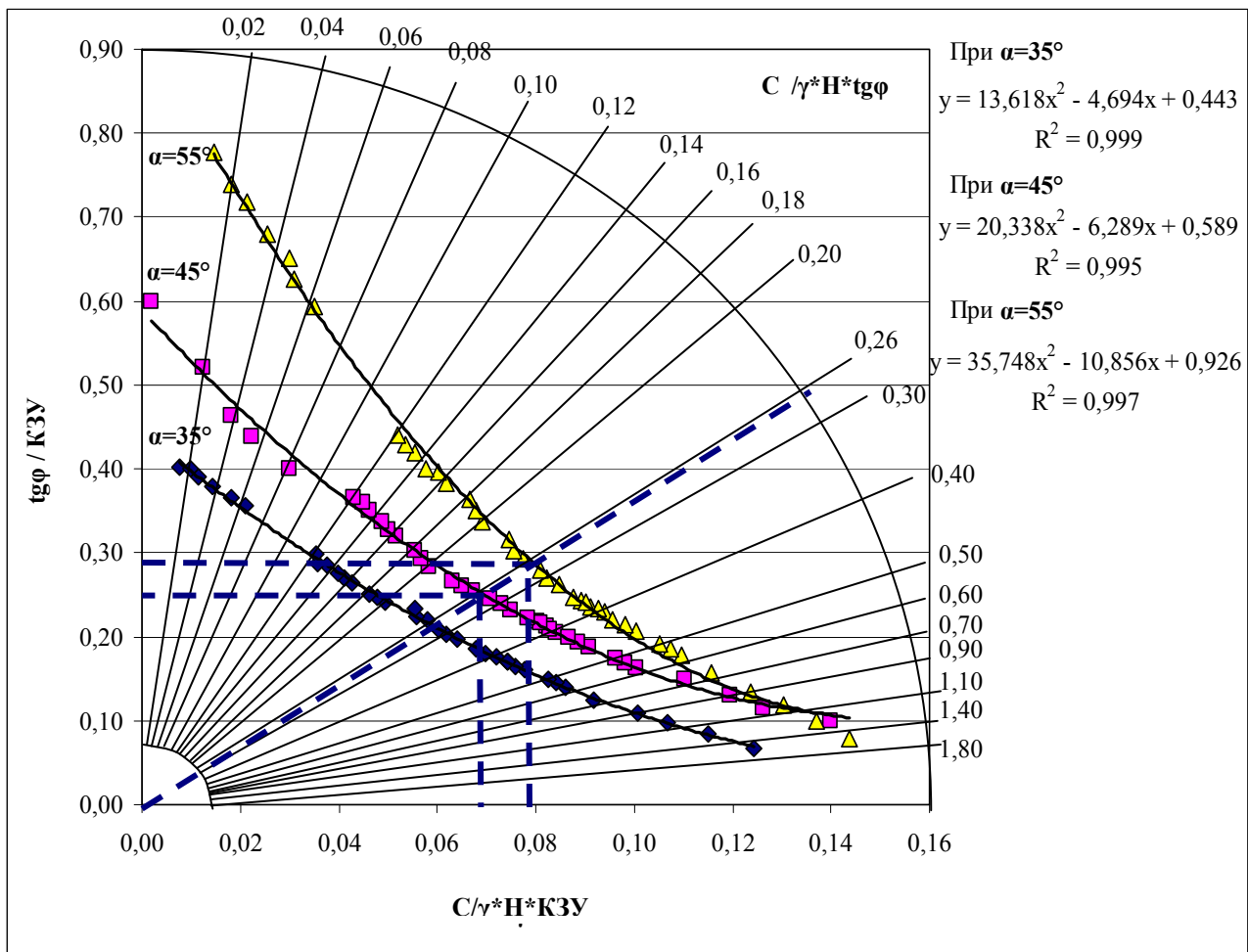


Рис. 5.6. Номограмма для определения устойчивых параметров откосов уступов (к примеру 2)

## 5.2. Расчет экономической эффективности мероприятий по контролю устойчивости откосов

Выбор эффективных мероприятий по контролю устойчивости уступов на карьерах связан с экономической оценкой ущерба от возможных деформаций массива горных пород в области призмы возможного обрушения, определением затрат на укрепление пород, изменением схемы вскрытия, системы разработки, структуры комплексной механизации, с учетом фактора времени на сопоставляемые затраты. В то же время экономическая эффективность производства имеет множество частных аспектов, и для их оценки применяются многочисленные самостоятельные показатели, в том числе такие, как производительность, себестоимость продукции, фондоотдача, прибыль и др. [44].

Согласно источникам [26, 34] увеличение угла откоса борта или уступа связано с уменьшением объема вскрышных работ, в результате чего снижается себестоимость добычи полезного ископаемого.

Для горно-геологических условий Мотроновско-Анновского участка месторождения для рабочих откосов рекомендуется устанавливать угол наклона

до 37° [131]. По результатам численного моделирования и лабораторных исследований процессов обрушения на эквивалентных материалах и экспериментальных испытаний горных пород на сдвиг было установлено, что с учетом гидрогеологических факторов угол откоса для вскрышных уступов, сложенных желто-бурыми и красно-бурыми суглинками, может достигать 47°. При этом, долговременная устойчивость откосов с учетом изменчивых гидрогеологических условий и действующих нагрузок горно-транспортного оборудования будет обеспечена.

Сокращение объема вскрыши за счет применения специальной заоткоски и укрепления уступов определяют по формуле:

$$\Delta V = \frac{H^2 l}{2} (\operatorname{ctg} \alpha_1 - \operatorname{ctg} \alpha_2), \quad (5.8)$$

где  $H$  - высота борта, м;  $l$  - длина борта, м;  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$  - проектные и рекомендуемые значения углов наклона откоса уступа, град.

На рис. 5.7 показаны зависимости сокращения объема вскрышных работ от изменения угла наклона откоса  $\alpha_2 = 47^\circ$  по сравнению с проектными  $\alpha_1 = 37^\circ$  на 1 км длины фронта работ. При высоте передового уступа  $H = 20$  м и заложении максимального рекомендуемого угла наклона откоса  $\alpha_2 = 47^\circ$ , сокращение объема вскрыши за счет применения заоткоски составит  $\Delta V = 78,91$  тыс.м<sup>3</sup>.

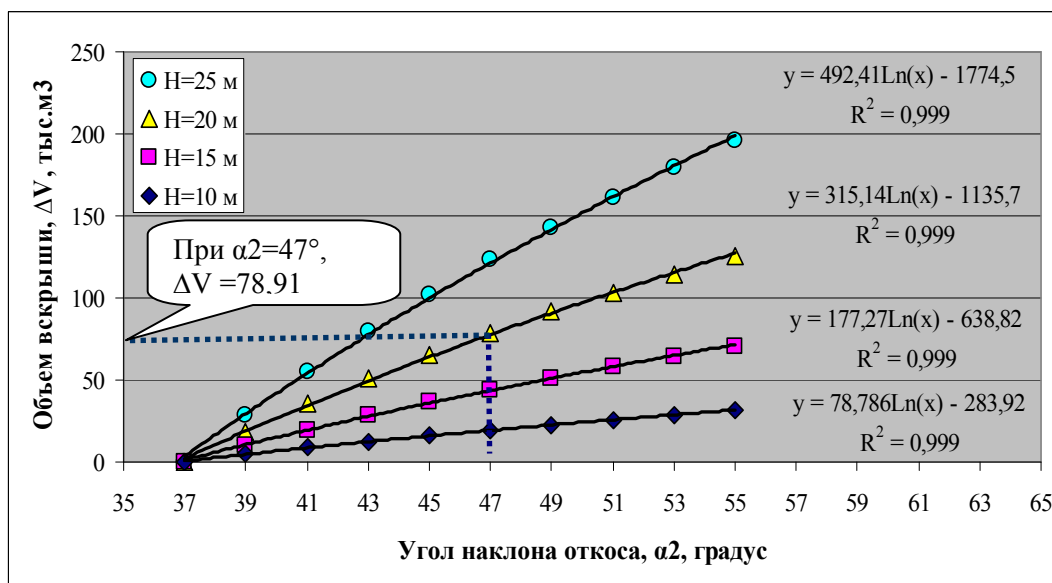


Рис. 5.7. Зависимость объема вскрыши от изменения угла наклона откоса уступа  $\alpha_2$

Экономия затрат от мероприятий  $C_s$  определяется по формуле:

$$C_s = C_g \Delta V, \quad (5.9)$$

где  $C_g$  - себестоимость 1 м<sup>3</sup> вскрыши, грн/м<sup>3</sup>;  $\Delta V$  - изменение объема вскрышных работ за счет изменения угла откоса уступа, м<sup>3</sup>.

Для условий Вольногорского ГМК себестоимость 1 м<sup>3</sup> вскрышных работ зависит от горно-геологических условий и варьирует в диапазоне

$$C_6 = 10,85 \dots 13,40 \text{ грн/м}^3.$$

Годовой экономический эффект  $\mathcal{E}_2$  от мероприятий по заложению рационального угла откоса уступа рассчитывается по формуле:

$$\mathcal{E}_2 = E - E_n \cdot C, \quad (5.10)$$

где  $E$  - годовая экономия либо результаты, которые достигаются в результате конкретной деятельности;  $E_n$  - нормативный коэффициент эффективности, постоянная величина, которая зависит от конкретной сферы деятельности, 0,12-0,15 (для горных предприятий обычно принимают  $E_n = 0,15$ );  $C$  - затраты на конкретную деятельность, для которой подсчитывается экономический эффект.

На рис. 5.8 приведены результаты расчета экономического эффекта  $\mathcal{E}_2$  от изменения угла наклона откоса уступа и соответственно объемов вскрышных работ.

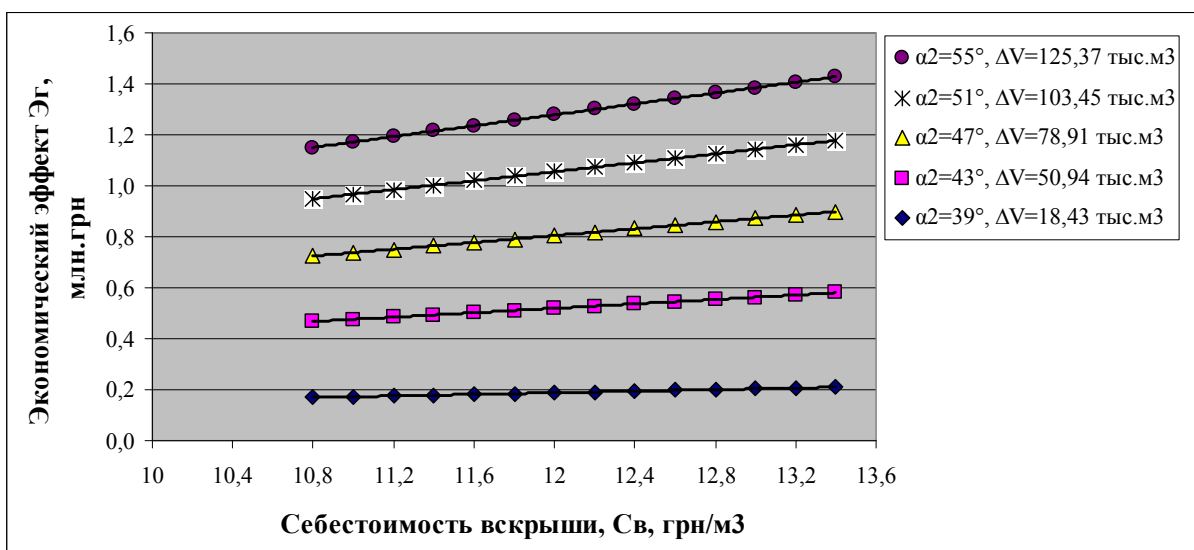


Рис. 5.8. Зависимость экономического эффекта от объема вскрышных работ

Так, для высоты передового уступа  $H = 20$  м и углах наклона откоса  $\alpha_2 = 39 \dots 55^\circ$  достигается экономический эффект  $C_3 = 0,17 \dots 1,43$  млн. грн на 1 км длины фронта вскрышных работ. Угол  $\alpha_2 = 55^\circ$  является предельным для откосов передового уступа, обеспечивая при относительной влажности  $W_{отн} \leq 16\%$  (рис. 5.4) кратковременную устойчивость породного массива. В случае рекомендуемого угла наклона откоса  $\alpha_2 = 47^\circ$ , экономический эффект  $C_3 = 0,72 \dots 0,90$  млн. грн на 1 км длины фронта вскрышных работ.



## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные научные и практические результаты, представленные в данной монографии, заключаются в обосновании рациональных геометрических параметров уступов карьеров с учетом структурно-геологических, гидрогеологических и горно-технологических факторов на основе впервые установленных закономерностей снижения устойчивости откосов, сложенных мягкими вскрышными породами.

В монографии выполнен анализ устойчивости откосов применительно к карьерам №7 "Север" и №7 "Юг" Вольногорского ГМК, результаты которого свидетельствуют о возможности уменьшения объема изъятия вскрышных пород за счет обоснования безопасных параметров открытой разработки.

Доказано, что процесс нарушения устойчивости откосов на карьерах с мягкими вскрышными породами связан с образованием специфических областей избыточных напряжений в откосе, что ведет к возникновению максимальных деформаций и инициирует процесс сдвижения массива пород по круглоцилиндрической поверхности скольжения.

Разработана новая гидрогеомеханическая модель, которая позволяет определять коэффициент запаса устойчивости (КЗУ) откосов карьеров с учетом сложной геологической структуры, влажности вскрышных пород и нагрузок от горно-транспортного оборудования.

Установлено, что для существующих гидрогеологических условий с учетом физико-механических свойств вскрышных пород рекомендуемое значение  $KЗУ = 1,1...1,3$  будет обеспечено при угле наклона откоса  $\alpha = 37...47^\circ$ .

Ожидаемый экономический эффект от увеличения угла наклона откоса с проектных  $37^\circ$  до рекомендованных в работе  $47^\circ$  для горно-геологических условий Вольногорского ГМК при средней высоте вскрышного уступа  $H = 20$  м составит  $C_e = 720...900$  тыс. грн на 1 км длины фронта горных работ.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Астафьев Ю. П. Управление состоянием массива горных пород при открытой разработке месторождений полезных ископаемых / Астафьев Ю. П., Попов Р. В., Николашин Ю. М. - Киев; Донецк: Вища шк. Головное изд-во, 1986. - 272 с.
2. Наукове обґрунтування та дослідження стратегічних напрямків підвищення ефективності відкритої розробки родовищ України: Звіт про НДР (заключний). Т.2/НГУ; Шифр теми ГП-376; № ДР 0106U001378.- Дніпропетровськ, 2007.- 242с.
3. Прогноз устойчивости и оптимизация параметров бортов глубоких карьеров/ [Полищук С. З., Лашко В. Т., Кучерский Н. И. и др.]; под ред. С. З. Полищука. - Днепропетровск: Изд-во "Полиграфист", 2001. - 370 с.
4. Никитин В.С. Загрязнение атмосферы промышленных центров и мероприятия по их предупреждению / В.С. Никитин, Н.Г. Максимкина. - М.: Недра, 1977. - 68 с.
5. Михайлов А.М. Охрана окружающей среды на карьерах / Михайлов А.М. - К.: Вища шк., 1990. - 264 с.: ил.
6. Ильин А. И. Управление долговременной устойчивостью откосов на карьерах / Ильин А. И., Гальперин А. М., Стрельцов В. И. - М.: Недра, 1985. - 248 с.
7. Голуб В. В. Обоснование метода расчета устойчивости бортов карьеров, формируемых в массиве горных пород сложной структуры: Дис... канд. техн. наук: 05.15.09 / НАН Украины; Институт проблем природопользования и экологии. - Д., 2004. – 230 с. - Библиогр.: с. 212-227.
8. Кумачев К. А. Проектирование железорудных карьеров / К. А. Кумачев, В. Я. Майминд. – М: Недра, 1981. – 464 с.
9. Синецкий А. П. Открытая разработка глубокозалегающих месторождений цветных металлов / А. П. Синецкий // Горный журнал. – 1980. - № 9. - С. 53-55.
10. Національна доповідь про стан навколишнього природного середовища в Україні у 2007 році. – К.: Вид-во Мінприроди України, 2008. – 187 с.
11. Гурский Д. С. Основные направления развития минерально-сырьевой базы Украины / Д. С. Гурский, В. И. Калинин // Горный журнал. – 2000. - №6. - С. 141-143.
12. Національна доповідь про стан навколишнього природного середовища в Україні у 2009 році. – К.: Вид-во Мінприроди України, 2010. - 196 с.
13. Сборник технико-экономических показателей горно-добывающих предприятий Украины в 2001-2002 г.г. - Кривой Рог: НТО ГНИГРИ, 2003. - 164 с.
14. Барсуков М.И. Охрана земель при открытой разработке месторождений / М.И. Барсуков, И.М. Барсуков - К.: Техніка, 1987. - 150 с.
15. Томаков П. И. Технология, механизация и организация открытых горных работ / П. И. Томаков, И. К. Наумов; Учебник для вузов. - 2-е изд., перераб. и доп. - М.: Недра, 1986. - 312 с.

16. Сборник технико-экономических показателей горно-добывающих предприятий Украины в 2000-2010 г.г. - Кривой Рог: ГП ГНИГРИ, 2010. - 155 с.
17. Сборник технико-экономических показателей горно-добывающих предприятий Украины в 1990-2000 г.г. - Кривой Рог: НТО ГНИГРИ, 2002. - 178 с.
18. Сборник технико-экономических показателей горно-добывающих предприятий Украины в 2002-2003 г.г. - Кривой Рог: НТО ГНИГРИ, 2003. - 164 с.
19. Концепція нарощування мінерально-сировинної бази як основи стабілізації економіки України на період до 2010 року (схвалена Постановою Кабінету Міністрів України від 9 березня 1999 р. №338) // Мінеральні ресурси України. - 2000. - №1. - С. 5-10.
20. Міщенко В.С. Економічні пріоритети розвитку мінерально-сировинної бази України / *Металлургическая и горнорудная промышленность.* – Днепропетровск: ОАО НИИ «Укрметаллургинформ» НМетАУ. - 2003. - №4(216). - С. 111-116.
21. Ковров А.С. Современные тенденции развития открытого способа разработки месторождений полезных ископаемых в Украине / А.С. Ковров // *Зб. наук. праць Національного гірничого університету.* - 2010. - №35. - Т.2.- С. 204-212.
22. Летучий В.В. К вопросу выбора рациональной конструкции бортов карьеров / В.В. Летучий // *Науковий вісник НГУ.* – 2010. - № 3. - С. 42-45.
23. Собко Б.Е. Усовершенствование технологии открытой разработки россыпных титано-циркониевых руд: Монография / Собко Б.Е. - Днепропетровск: Национальный горный университет, 2008. - 167 с.
24. Шашенко О.М. Деформованість та міцність масивів гірських порід: Монографія / Шашенко О.М., Сдвижкова О.О., Гапеев С.М. – Д.: Національний гірничий університет, 2008. - 224 с. - Рос. мовою.
25. Полищук С.З. Геомеханические задачи рационального природопользования на открытых горных работах / С.З. Полищук. - Киев: Наукова думка. - 1998. - 180 с.
26. Шапарь А.Г. Механика горных пород и устойчивость бортов карьеров / А.Г. Шапарь. - К: Вища школа, 1973. - 120 с.
27. Несмашный Е.А. Оптимизация геометрических параметров открытых горных выработок / Е.А. Несмашный. - Кривой Рог: Минерал, 1999. – 118 с.
28. Сборник технико-экономических показателей горно-добывающих предприятий Украины в 2004-2005 г.г. - Кривой Рог: ГП ГНИГРИ, 2006. – 155 с.
29. Арсентьев А.И. Устойчивость бортов и осушение карьеров / Арсентьев А.И., Букин И.Ю., Мироненко В.А. - М.: Недра, 1982. – 165 с.
30. Баклашев И.В. Деформирование и разрушение породных массивов / И.В. Баклашев - М.: Недра, 1988. – 272 с.
31. Галустьян Э.Л. Управление геомеханическими процессами в карьерах / Э.Л. Галустьян. - М.: Недра, 1980. – 237 с.
32. Галустьян Э.Л. Геомеханика открытых горных работ / Э.Л. Галустьян. - М.: Недра, 1992. – 272 с.
33. Гальперин А.М. Гидрогеология и инженерная геология / Гальперин А.М., Зайцев В.С., Норватов Ю.А. - М.: Недра, 1989. – 383 с.

34. Гальперин А.М. Геомеханика открытых горных работ / А.М. Гальперин; Учебник для вузов. - М.: Изд-во Московского государственного горного университета, 2003. - 473 с.
35. Демин А.М. Закономерности проявлений деформаций откосов в карьерах / А.М. Демин. - М.: Наука, 1981. - 144 с.
36. Демин А.М. Устойчивость бортов карьеров и отвалов / А.М. Демин. - М.: Недра, 1973. - 179 с.
37. Иофин Г.Л. Устойчивость бортов карьеров / Г.Л. Иофин. - М.: Metallurgizdat, 1953. - 49 с.
38. Казикаев Д.М. Геомеханические процессы при совместной и повторной разработке руд / Д.М. Казикаев. - М.: Недра, 1981. - 288 с.
39. Управление состоянием массивов на открытых разработках / [Копач П.И., Краснопольский И.А., Полищук С.З., Шапарь А.Г.]. - Киев: Наукова думка, 1988. - 248 с.
40. Маслов Н.Н. Механика грунтов в практике строительства (оползни и борьба с ними) / Н.Н. Маслов. - М.: Стройиздат, 1977. - 320 с.
41. Маслов Н.Н. Основы инженерной геологии и механики грунтов / Н.Н. Маслов. - М.: Высшая школа, 1982. - 511 с.
42. Николашин Ю. М. Маркшейдерский контроль деформационных процессов для прогноза устойчивости бортов глубоких карьеров: Дис... д-ра техн. наук: 05.15.01 / Криворожский технический ун-т. - Кривой Рог, 2000. - 304 л. - Библиогр.: л. 255-283.
43. Геомеханика отвальных работ на карьерах / [Панюков П.Н., Ржевский В.В., Истомина В.В., Гальперин А.М.]. - М.: Недра, 1972. - 184 с.
44. Певзнер М.Е. Геомеханика / М.Е. Певзнер. - 2-е изд., стер. - М.: Изд-во Московского государственного горного университета, 2008. - 438 с.: ил.
45. Певзнер М.Е. Борьба с деформациями горных пород на карьерах / М.Е. Певзнер. - М.: Недра, 1978. - 255 с.
46. Полищук С. З. Безопасность ведения открытых горных работ: прогноз деформационных процессов на карьерах / Полищук С. З., Голуб В. В., Галимуллин В. Ф. // Metallургическая и горнорудная промышленность. - 2006. - № 1. - С. 125-128.
47. Попов И.И. Борьба с оползнями на карьерах / И.И. Попов, Р.П. Окатов - М.: Недра, 1980. - 239 с.
48. Ржевский В.В. Основы физики горных пород: учебник для вузов / В.В. Ржевский, Г.Я. Новик. - 4-е изд., перераб. и доп. - М.: Недра, 1984. - 359 с.
49. Соколовский В.В. Статика сыпучей среды / В.В. Соколовский. - М.: Физматгиз, 1960. - 240 с.
50. Соловьев Ю.М. Устойчивость откосов из гипотетического грунта / Ю.М. Соловьев // Тр. НИИЖТ, т. XXVIII. - Новосибирск, 1962. - С. 34-38.
51. Тартаковский Б.Н. Разработка месторождений полезных ископаемых открытым способом / Б.Н. Тартаковский. - М.: Недра, 1975. - 184 с.
52. Тартаковский Б.Н. Управляемое обрушение уступов на карьерах / Б.Н. Тартаковский, А.Г. Шапарь. - К.: Техника, 1974. - 220 с.

53. Терцаги К. Теория механики грунтов / К. Терцаги. - М.: Госстройиздат, 1961. - 507с.
54. Фисенко Г. Л. Устойчивость бортов карьеров и отвалов / Г. Л. Фисенко. - М.: Недра, 1965. - 378 с.
55. Фисенко Г.Л. Укрепление откосов на карьерах / Фисенко Г.Л., Ревазов М.А., Галустьян Э.Л. - М.: Недра, 1974. - 206 с.
56. Цветков В.К. Расчет устойчивости откосов и склонов / В.К. Цветков. - Волгоград: Нижневолжское кн. изд-во, 1979. - 118 с.
57. Цимбаревич П.М. Механика горных пород / П.М. Цимбаревич. - М.: Углетехиздат, 1948. - 184 с.
58. Цытович Н.А. Механика грунтов / Н.А. Цытович. - М.: Высшая школа, 1979. - 272с.
59. Цытович Н.А., Основы накладной геомеханики в строительстве / Н.А. Цытович, З.Г. Тер-Мартиросян. - М.: Высшая школа, 1981. - 320 с.
60. Черный Г.И. Устойчивость подрабатываемых бортов карьеров / Г.И. Черный. - М.: Недра, 1980. - 216 с.
61. Шапарь А.Г. Управление состоянием горного массива / А.Г. Шапарь // Горн. энциклоп. - М., 1991. - Т. 5. - С. 262-263.
62. Шапарь А.Г. Устойчивость горного объекта / А.Г. Шапарь // Горн. энциклоп. - М., 1991. - Т.5. - С. 277.
63. Шапарь А.Г. Разработка высоких уступов с обрушением / А.Г. Шапарь. - М.: Наука, 1985. - 143 с.
64. Шапарь А.Г. Основные результаты и направления исследования по дальнейшему обоснованию методов разработки, основанных на использовании гравитационных сил / А.Г. Шапарь. - В сб.: Совершенствование техники и технологии открытой разработки месторождений. - Киев: Наукова думка. - 1974. - Вып. 4. - С. 191-193.
65. Шапарь А.Г. Проблемы управления состоянием массивов горных пород глубоких карьеров / А.Г. Шапарь. - В сб.: Проблемы разработки горизонтов глубоких карьеров. - Киев: Наукова думка, 1982. - С. 64-69.
66. Научная идея о местоположении и форме поверхности сдвигения в массивах грунта и горных пород: Научные открытия / [Шапарь А.Г., Полищук С.З., Голуб В.В., Баранов Ю.Д., Шурыгин В.Д.]. - М: «Сударыня». - 2004. - Вып. 2. - С. 55-56.
67. Шашенко А.Н. Механика горных пород: учебник для ВУЗов / А.Н. Шашенко, В.П. Пустовойтенко. - К.: Новий друк, 2004. - 400 с.
68. Шашенко А.Н. Механика грунтов: учебовий посібник / А.Н. Шашенко, В.П. Пустовойтенко, Н.В. Хозяйкина. - К.: Новий друк, 2008. - 128 с.: іл.
69. Шейдеггер А. Е. Физические аспекты природных катастроф / А. Е. Шейдеггер; [Пер. с англ.]. - М.: Недра, 1981. - 232 с.
70. Кнорре М.Е. Оползни и меры борьбы с ними / М.Е. Кнорре, С.К. Абрамов, Н.С. Рогозин. - М.: Стройиздат, 1951. - 172 с.
71. Маслов Н.Н. Условия устойчивости откосов и откосов в гидроэнергетическом строительстве / Н.Н. Маслов. - М.: Госэнергоиздат, 1955. - 215 с.

72. Оползни и инженерная практика / Под ред. Э.Б. Эккеля; сокращ. пер. с англ. проф. М.Н. Гольдштейна. – М.: Трансжеледориздат, 1960. - 268 с.
73. Дорфман А.Г. Оползневое давление и выпор грунта / А.Г. Дорфман // Вопросы геотехники. – Днепропетровск, 1972. - № 20. – С. 75-86.
74. Дранников А.М. Оползни. Типы, причины образования меры борьбы / А.М. Дранников. - Киев.: Укргрогипросельстрой, 1956. - 106 с.
75. Емельянова Е.П. Основные закономерности оползневых процессов / Е.П. Емельянова. – М.: Недра, 1972. – 310 с.
76. Качанов Л.М. Основы теории пластичности / Л.М. Качанов. - М.: Наука, 1969. – 420 с.
77. Маслов Н.Н. Основы механики грунтов и инженерной геологии / Н.Н. Маслов - М: Высшая школа, 1968. - 629 с.
78. Гинзбург Л.К. Величина коэффициента устойчивости склона при расчете удерживающих конструкций / Л.К. Гинзбург // Промышленное строительство и инженерные сооружения. – 1984. - № 1. – С. 14-16.
79. Гинзбург Л. К. Методы определения оползневое давления / Л.К. Гинзбург // Промышленное строительство и инженерные сооружения. - 1980. - №3. - С. 88-91.
80. Гинзбург Л.К. Расчет оползневое давления с учетом влияния сейсмичности и гидродинамической силы / Л.К. Гинзбург // Транспортное строительство. – 1974. - №9. - С. 117-122.
81. Кугель М. Разработка методов прогнозирования и предупреждения оползней в откосах на подрабатываемых территориях: Дис... канд. техн. наук: 05.15.09 / НАН Украины; Институт гидромеханики. - К., 2000. - 196л. - Библиогр.: л. 154-162.
82. Панюков П.Н. Инженерная геология / П.Н. Панюков. – М.: Недра, 1978. – 295 с.
83. Могилко А.Н. Определение длительной прочности пород методом обратных расчетов оползней / А.Н. Могилко, Н.Н. Куваев // Уголь Украины. - 1969. - № 11. - С. 19-21.
84. Fellenius, W., 1927. Erdstatische Berechnungen. Ernst, Berlin.
85. Чугаев Р.Р. Расчет общей устойчивости откосов земляной плотины с учетом фильтрационных сил / Р.Р. Чугаев // Гидротехническое строительство. - 1965. - № 5. – С. 61-64.
86. Чугаев Р.Р. Земляные гидротехнические сооружения (теоретические основы расчета) / Р.Р. Чугаев. - Л.: Энергия, 1967. - 437 с.
87. Терцаги К. Механика грунтов и инженерная практика / К. Терцаги, Р. Пек - М.: Госстройиздат, 1958. - 607 с.
88. Ковров О.С. Вплив складної геологічної структури та обводнення масиву порід на стійкість укосів кар'єрів / О.М. Шашенко, О.С. Ковров // Науковий вісник Національного гірничого університету. - 2011. - №3. - С. 63-68.
89. Petterson, E. K., 1916. Tekn. Tidskr. 46 : 289.
90. Fellenius, W., 1948. Erdstatische Berechnungen. Neue Aufl., Ernst, Berlin.
91. Taylor, D. W., 1937. J. Boston Soc. Civ. Eng., 24 : 197.
92. Taylor, D. W., 1948. Fundamentals of Soil Mechanics. J. Wiley, New York, N.Y.

93. Gibson, R. E. and Morgenstern, N., 1962. *Geotechnique*, 12:212.
94. Terzaghi, K., 1943. *Theoretical Soil Mechanics*. Wiley, New York, N.Y.
95. Bishop, A. W., 1965. *Geotechnique*, 15/79.
96. Hutchinson, J. N., 1969. *Geotechnique*, 19(1): 6.
97. Шахунянец Г.М. Расчет устойчивости склонов и откосов против скольжения пород / Г.М. Шахунянец; в кн.: Материалы совещания по вопросам изучения оползней и мер борьбы с ними. – Киев: Изд-во Киевского ун-та, 1964.
98. Шахунянец Г.М. К вопросу выбора рациональных методов расчета склонов / Г.М. Шахунянец; в сб.: Оползни и борьба с ними: Тр. Сев.-Кавказ. семинара. – Ставрополь, 1964.
99. Покровский Л. Л. Элементы расчета устойчивости оползневого массива / Л. Л. Покровский // Оползни и борьба с ними, Тр. Сев.-Кавказ семинара. – Ставрополь, 1964. - С. 92-98.
100. Пономарев С. Д. Расчеты на прочность в машиностроении / С.Д. Пономарев, В.Л. Бидерман и др. - Том I. – Москва: МАШГИЗ, 1956. – 884 с.
101. Алексеев А.Д. Предельное состояние горных пород / А.Д. Алексеев, Н.В. Недодаев. - Киев: Наукова думка, 1982. - 198 с.
102. Drucker, D.C., Prager, W. (1952). Soil mechanics and plastic analysis for limit design. *Quarterly of Applied Mathematics*, vol. 10, no. 2, pp. 157–165.
103. Balmer, G. 1952. A general analytical solution for Mohr's envelope. *Am. Soc. Test. Mat.* 52, 1260-1271.
104. Hoek, E. and Brown (1988). "The Hoek-Brown failure criterion - a 1988 update". *Proc. 15th Canadian Rock Mech. Symp.*: 31-38. [http://www.rocscience.com/library/pdf/RL\\_2.pdf](http://www.rocscience.com/library/pdf/RL_2.pdf).
105. Hoek E, Carranza-Torres CT, Corkum B (2002). "Hoek-Brown failure criterion-2002 edition". *Proceedings of the fifth North American rock mechanics symposium vol. 1*: 267–273. [http://www.rockeng.utoronto.ca/downloads/rocddata/webhelp/pdf\\_files/theory/Hoek-Brown\\_Failure\\_Criterion-2002\\_Edition.pdf](http://www.rockeng.utoronto.ca/downloads/rocddata/webhelp/pdf_files/theory/Hoek-Brown_Failure_Criterion-2002_Edition.pdf).
106. Hoek E. (2002). *Practical Rock Engineering*. London: Institution of Mining and Metallurgy. pp. 325.
107. Tutorials for Phase 2D elasto-plastic finite element program for slope and excavation stability analyses. – Toronto, Ontario: Rocscience Inc. - 2009.
108. Ковров А.С. Анализ некоторых теорий прочности применительно к оценке устойчивости откосов и бортов карьеров / А.Н. Шашенко, А.С. Ковров // 36. наук. праць Донецького національного технічного університету «Проблеми гірського тиску». - 2010. - №18. - С. 5-26.
109. Ставрогин А.Н. Пластичность горных пород / А.Н. Ставрогин, А.Г. Протосеня. – М.: Недра, 1979. – 301 с.
110. Ковров А.С. Оценка устойчивости естественных и искусственных породных откосов / А.Н. Шашенко, А.С. Ковров // *Геотехническая механика: Межвед. сб. науч. трудов.* – Д.: Ин-т геотехнической механики им. Н.С. Полякова НАН Украины. - 2010. - Вып. 91. - С. 43-54.
111. Федоровский В.Г. Метод расчета устойчивости откосов и склонов / В.Г. Федоровский, С.В. Курилло // *Геоэкология.* – 1997. - №6. - С. 95-106.
112. FLAC v. 4.0. 2000 / *Users Manual.* – Minneapolis: Itasca Consulting Group Inc.

113. Cała M., Flisiak J., Tajduś A. 2004. Slope stability analysis with modified shear strength reduction technique. Proceedings of the Conference Landslides: Evaluation and Stabilization, Rio de Janeiro, Brazil (2004). (ed. Lacerda, Ehrlich, Fontoura, Sayao).
114. Ковров А.С. Об устойчивости откоса правобережной плотины Днепродзержинской ГЭС / Б.М. Усаченко, А.Н. Шашенко, А.С. Ковров // Науковий вісник Національного гірничого університету. - 2010. - №11-12. - С. 82-88.
115. Ковров А.С. Оценка устойчивости откосов на карьерах с учетом структурных особенностей породного массива / А.С. Ковров // Зб. наук. праць Державного підприємства «Науково-дослідний гірничорудний інститут». - Кривий Ріг: ДП «НДГРІ». - 2010. - Вип. 52. - С. 42-52.
116. Ковров А.С. Оценка устойчивости откосов на карьерах с учетом структурных особенностей породного массива / А.С. Ковров // Моніторинг та мінімізація негативного впливу господарської діяльності залізрудних підприємств України на навколишнє природне середовище: Матер. міжнар. наук.-техн. конф. 8-9 жовт. 2010 р.: тези доп. - Кривий Ріг: ДП «НДГРІ», 2010. - С. 75-77.
117. Ковров А.С. Моделирование устойчивости борта карьера с использованием критерия Друкера-Прагера / А.С. Ковров // Зб. наук. праць Національного гірничого університету. - 2010. - №35. - Т.1. - С. 92-98.
118. Ковров А.С. Моделирование устойчивости борта карьера с использованием критерия Друкера-Прагера / А.С. Ковров // «Неделя эколога-2010», «Экологические проблемы горно-металлургических регионов. Прогрессивные информационные и технологические решения»: Материалы междунар. симп. 12-15 окт. 2010 г.: тез. докл. - Днепродзержинск: ДГТУ, 2010. - С. 138-140.
119. Ковров А.С. Моделирование устойчивости борта карьера методом конечных элементов / А.С. Ковров // Форум гірників-2010: Матеріали міжнар. конф. 21-23 жовт. 2010 р.: доп. - Д.: Національний гірничий університет, 2010. - Т.2. - С. 94-102.
120. Кузнецов Г.Н. Изучение проявлений горного давления на моделях / Г.Н. Кузнецов, М.Н.Будько, А.А. Филиппова и др. - М.: Углетехиздат. 1959. - 289 с.
121. Насонов И.Д. Моделирование физических процессов в горном деле / И.Д. Насонов, В.И. Ресин. - М.: Издательство Академии горных наук, 1999. - 343 с.: ил.
122. Ковров А.С. Моделирование явления потери устойчивости породных уступов на эквивалентных материалах / А.С. Ковров // Науковий вісник Національного гірничого університету. - 2009. - №9. - С. 27-30.
123. Шапарь А.Г. Разработка высоких уступов с обрушением / А.Г. Шапарь. - М.: Наука, 1985. - 143 с.
124. Голуб В.В. Анализ сдвижения природных и техногенных откосов с учетом пористости и обводненности массива / В.В. Голуб, С.З. Полищук // Геотехническая механика. - Д.: Институт геотехнической механики им. Н.С. Полякова НАН Украины. - 2000. - Вып. 22. - С. 98-104.



125. Ковров А.С. Моделирование процесса потери устойчивости породного уступа при управляемом обрушении / А.Н. Шашенко, А.С. Ковров // Форум гірників-2009: Матер. міжнар. конф. 30 вер. – 3 жовт. 2009 р.: тези доп. – Д.: Національний гірничий університет, 2009. - Т.2. - С. 202-208.
126. Kovrov A.S. Modeling of the rock slope stability at the controlled failure / A.N. Shashenko, E.A. Sdvizhkova, A.S. Kovrov // “EUROCK 2010: Rock Mechanics in Civil and Environmental Engineering”: Proceedings and monographs in engineering, water and earth sciences, June 15-18, 2010, Lausanne, Switzerland. – London: CRC Press / Balkema, 2010. - P. 581-584.
127. Грунти. Відбирання, упакування, транспортування і зберігання зразків: ДСТУ Б В.2. 1-8-2001 (ГОСТ 12071-2000). – К.: Державний комітет будівництва, архітектури та житлової політики України, 2002.
128. Грунти. Методи лабораторного визначення характеристик міцності і деформованості: ДСТУ Б В.2.1-4-96 (ГОСТ 12248-96). – К.: Державний комітет України у справах містобудування і архітектури, 1997.
129. Прибор П10-С для испытаний грунтов на сдвиг в полевых условиях: инструкция по эксплуатации, 1974. - 10 с.
130. Определение параметров устойчивости внутреннего отвалообразования при разработке Мотроновско-Анновского участка, а также разработка рекомендаций по обеспечению устойчивости внутренних отвалов: Отчет о НИР / Кривой Рог: КТУ. - К.: УкрНИИПроект, 2004. - С. 115-116.
131. Гамалинский А.И. Выбор и обоснование технологических схем вскрытия и разработки Мотроновско-Анновского участка Малышевского месторождения в сложных горно-геологических условиях / А.И. Гамалинский, И.А. Гамалинский, В.В. Терещенко // Науковий вісник НГУ. - 2009. - №12. - С. 36-42.
132. Деревягина Н. И. Исследование влияния физического состояния лессовых грунтов на их механические свойства в условиях объемно-напряженного состояния / Н. И. Деревягина // География, геоэкология, геология: опыт научных исследований: Материалы VII Международной научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых: докл. - Днепропетровск: ІМА-прес, 2010. - Вып. 7. - С. 72-74.
133. Ковров А.С. Влияние сложной геологической структуры и обводнения массива пород на устойчивость откосов карьеров / А.С. Ковров // Наукова весна-2011: Матеріали 2-ї наук.-техн. конф. студентів, аспірантів і молодих вчених, 25 берез. 2011 р.: тези доп. – Д.: ДВНЗ «НГУ», 2011. - С. 112-113.
134. Рекомендации по выбору методов расчета коэффициента устойчивости склона и оползневого давления / Министерство монтажных и специальных строительных работ СССР - М.: ЦБНТИ, 1986. – 134 с.
135. Ковров А.С. Оценка влияния сложной геологической структуры и обводнения массива пород на устойчивость откосов карьеров / А.С. Ковров // Образование. Инновации. Карьера: Материалы 1-й междунар. науч.-практ. конф., 12-14 апр. 2011 г.: тез. докл. – Междуреченск: Изд-во филиала ГУ КузГТУ, 2011. – С. 71-75.

136. Бэр Я. Физико-математические основы фильтрации воды / Бэр Я., Заславски Д., Ирмей С. - М.: Мир, 1971. – 452 с.
137. Van Genuchten, M. Th. 1980. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil. Sci. Soc. Am. J.* 44: 892-898.
138. Давыдов В.А. Особенности изысканий и проектирования автомобильных дорог в районах вечной мерзлоты / Давыдов В.А. – Омск: Омский политех. ин-т, 1979. – 63 с.
139. Vogel T. Effect of the shape of the soil hydraulic functions near saturation on variably-saturated flow predictions / Vogel T., van Genuchten M. and Cislerova M. - *Adv. Water Res.* 2001; 24: pp.133-144.
140. Трубецкой К.Н. Открытые горные работы: Справочник / [Трубецкой К.Н., Потапов М.Г., Винницкий К.Е., Мельников Н.Н. и др.]. – М.: Горное бюро, 1994. – 590 с.: ил.
141. Методические указания по определению углов наклона бортов, откосов уступов и отвалов строящихся и эксплуатируемых карьеров.– Л: ВНИМИ, 1972 г. – 162 с.
142. Инструкция по наблюдениям за деформациями бортов, откосов уступов и отвалов на карьерах и разработке мероприятий по обеспечению их устойчивости. - Л.: ВНИМИ, 1971. – 144 с.
143. Шурыгин Владимир Дмитриевич. Обоснование рациональных параметров открытой разработки россыпных месторождений в сложных горно-геологических условиях (на примере Малышевского месторождения): Дис... канд. техн. наук: 05.15.03 / Национальный горный ун-т. - Д., 2004. - 224л.: рис. - Библиогр.: л. 169-184.
144. Четверик М.С. Формирование техногенной геологической среды и ее взаимосвязь с природной / М.С. Четверик, Е.А. Бубнова. - *Кривий Ріг: Вісник Криворізького технічного університету.* – 2010. - Вип. 25. - С. 83-87.
145. Hoek E., Bray J. *Rock Slope Engineering. Rev. 3rd Ed.* - Taylor & Francis Routledge. – 2005.

Наукове видання

**Ковров** Олександр Станіславович

**СТІЙКІСТЬ БОРТІВ КАР'ЄРІВ  
У СКЛАДНОСТРУКТУРНОМУ МАСИВІ  
М'ЯКИХ ПОРІД**

**Монографія**

(Російською мовою)

Видано в авторській редакції

Підп. до друку 10.06.2013. Формат 30x42/4.  
Папір офсетний. Ризографія. Ум. друк. арк. 7,2.  
Обл.-вид. арк. 7,2. Тираж 50 пр. Зам. №

Підготовлено до друку та видруковано  
у Державному вищому навчальному закладі  
«Національний гірничий університет».  
Свідоцтво про внесення до Державного реєстру ДК № 1842 від 11.06.2004.

49005, м. Дніпропетровськ, просп. К. Маркса, 19.