

Министерство образования и науки Российской Федерации федеральное
государственное бюджетное образовательное учреждение высшего
образования

"Санкт-Петербургский горный университет"

На правах рукописи



Мельников Никита Ярославович

**ГЕОМЕХАНИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ
БОРТОВ КАРЬЕРОВ ПРИ КРУТОМ ПАДЕНИИ СЛОЕВ,
НАПРАВЛЕННЫХ В МАССИВ, В УСЛОВИЯХ
КРИОЛИТОЗОНЫ**

Специальность 25.00.20 – Геомеханика, разрушение горных пород,
рудничная аэрогазодинамика и горная теплофизика

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание учёной степени кандидата технических наук

Научный руководитель
доктор технических наук,
Цирель Сергей Вадимович

Санкт-Петербург – 2019

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	4
ГЛАВА 1 СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА. ЦЕЛЬ И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЙ	10
1.1 Факторы, оказывающие влияние на устойчивость бортов карьеров	11
1.2 Анализ методов расчета устойчивости бортов карьеров и естественных откосов.....	16
1.3 Особенности деформирования откосов бортов с обратным крутым падением слоев	24
1.4 Анализ существующих методов оценки устойчивости откосов с обратным крутым падением слоев	28
1.5 Выводы по первой главе	40
ГЛАВА 2 ЛАБОРАТОРНЫЕ ИСПЫТАНИЙ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ МЕРЗЛЫХ ГОРНЫХ ПОРОД И СОПОСТАВИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ИССЛЕДОВАНИЙ ПРОШЛЫХ ЛЕТ	41
2.1 Общие сведения о мерзлых горных породах.....	41
2.2 Дисперсионные породы в условиях отрицательных температур	42
2.3 Скальные и полускальные породы в условиях низких температур	52
2.4 Влияние циклов замораживания-оттаивания на прочностные характеристики горных пород.....	61
2.4.1 Влияние циклов замораживания-оттаивания на прочностные свойства дисперсных горных пород	62
2.4.2 Влияние циклов замораживания-оттаивания на прочностные свойства скальных и полускальных горных пород.....	65
2.5 Лабораторные испытания прочностных свойств на контактах горных пород в талом и мерзлом состояниях	73
2.6 Выводы по второй главе	82
ГЛАВА 3 ИССЛЕДОВАНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ ДЕФОРМИРОВАНИЯ БОРТОВ КАРЬЕРОВ ПРИ ОБРАТНОМ ПАДЕНИИ СЛОЕВ НА МОДЕЛЯХ ИЗ ЭКВИВАЛЕНТНЫХ МАТЕРИАЛОВ.....	85

3.1 Обобщение и анализ изучения деформирования откосов на моделях из эквивалентных материалов.....	85
3.1.1 Основные особенности изучения механических процессов методом физического моделирования	85
3.1.2 Моделирование откосов методом эквивалентных материалов	88
3.2 Физическое моделирование бортов карьеров формируемых в массиве при крутом несогласном с наклоном борта падении слоев	91
3.2.1 Выбор физико-механических свойств.....	91
3.2.2 Подбор и испытание физико-механической свойств эквивалентных материалов модели.....	92
3.2.3 Изготовление физических моделей	95
3.2.4 Процесс моделирования поэтапно открытой отработки.....	99
3.2.5 Результаты анализа физического моделирования	100
3.3 Выводы по третьей главе	106
ГЛАВА 4 РАЗРАБОТКА РЕКОМЕНДАЦИЙ ПО ОЦЕНКИ УСТОЙЧИВОСТИ БОРТОВ КАРЬЕРОВ С ОБРАТНОЙ КРУТОПАДАЮЩЕЙ СЛОИСТОСТЬЮ .	108
4.1 Метод прогнозирования полной потери устойчивости бортов с обратным падением слоев.....	108
4.2 Обоснование предельных параметров бортов карьеров с обратным падением слоев	117
4.3 Особенности распространения деформаций на поверхности прибортового массива.....	120
4.4 Выводы по четвертой главе	126
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	128
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	130

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования. Обработка запасов месторождений открытым способом приводит к изменению напряженно-деформированного состояния массива, что влечет за собой опасность возникновения оползней или обрушений. Завышенные углы наклона бортов карьеров могут стать причиной обрушения, а заниженные углы приводят к увеличению объема вскрышных работ.

Многочисленными исследованиями установлено, что горные породы в прибортовых массивах можно охарактеризовать как слоистую трещиноватую среду, а их поведение в некотором приближении можно описать с использованием законов сыпучей среды. Данное допущение позволяет для оценки устойчивости бортов использовать критерий Кулона-Мора, согласно которому предельно-напряженное состояние откоса достигается при определенном соотношении нормальных и касательных напряжений, а разрушение горных пород осуществляется путем сдвига. На сегодняшний день на основании данного подхода было разработано более 150 методов расчетов устойчивости откосов.

Однако в прибортовых массивах со сложным структурным строением существует вероятность возникновения условий, при которых процесс разрушения откосов будет иметь иной характер. Одним из таких примеров являются откосы, в которых крутопадающая слоистость направлена в массив (далее – обратное падение).

Вопросы оценки устойчивости бортов карьеров при обратном падении слоев рассматривались в работах Афанасьева Б.Г., Пушкарева В.И., Абрамова В.К., Сапожникова В.Т., Новиковой Л.К., Гудмана Р., Брэя Дж.

Деформирование таких откосов представляет собой сложный процесс, представляющий собой наклон слоев и последующее их опрокидывание с межслоевыми подвижками по контактам, в результате чего по всей поверхности образуются заколы в виде обратных ступенек.

Разработанные на сегодняшний день методы оценки устойчивости бортов карьеров при обратном падении слоев являются весьма приближенными, зачастую не просто упрощающими, но и в некоторых случаях искажающими физические процессы, происходящие в массиве.

Кроме того, в большей части подходов контактные условия горных пород характеризуются только углом трения, а величина сцепления полностью игнорируется, что в особенности недопустимо в условиях криолитозоны.

В условиях криолитозоны прибортовой массив находится в мерзлом состоянии, а контакты горных пород дополнительно сцементированы льдом. В этом случае прочностные свойства контактов изменяются, и в большей части случаев значительно возрастают по сравнению с талыми условиями. В этом случае может наблюдаться изменение характера деформирования бортов карьеров и увеличение коэффициента запаса устойчивости откосов.

В связи с этим разработка рекомендаций по оценке устойчивости бортов при крутопадающем обратном падении слоев с учетом особенностей поведения деформирования откосов и прочностных свойств по контактам горных пород является весьма актуальной.

Цель работы. Разработка методики оценки устойчивости бортов глубоких карьеров в массивах с крутопадающей несогласной с наклоном откоса слоистостью в условиях криолитозоны.

Основные задачи исследования:

- анализ отечественной и зарубежной научно-технической литературы по оценке устойчивости бортов карьеров в условиях крутого падения слоев, направленных в массив;
- испытания физико-механических свойств пород в мерзлом и талом состояниях;
- проведение физического моделирования прибортового массива с крутопадающей несогласной с наклоном откоса борта слоистостью при различных контактных условиях;

- установление характера деформирования бортов карьеров с обратной крутопадающей слоистостью;

- сопоставление результатов физического моделирования с результатами расчетов устойчивости методами алгебраического сложения сил и конечных элементов;

- разработка способов прогнозирования процессов деформирования бортов карьеров с крутопадающей слоистостью, направленной в массив;

- разработка рекомендаций по определению параметров бортов карьеров при их формировании в массивах с крутопадающей несогласной с наклоном борта слоистостью в условиях криолитозоны.

Идея работы. Оценку устойчивости бортов карьеров с обратным падением слоев необходимо проводить с учётом прочностных свойств по контактам слоев горных пород и величин допустимых деформаций, наблюдаемых в массиве.

Объектом исследования являются борта карьеров, формируемых в осадочные месторождения с крутопадающей слоистостью.

Методология и методы исследования. Поставленные задачи решались с использованием комплекса исследований, включающего в себя обобщение и анализ российского и международного опыта оценки устойчивости бортов карьеров с крутым обратным падением слоев; физическое моделирование процессов деформирования откосов с обратной слоистостью; сопоставление результатов физического моделирования с результатами расчетов аналитическими и численными методами.

Достоверность научных положений, выводов и рекомендаций подтверждается соблюдением критериев подобия при физическом моделировании процессов деформирования прибортовых массивов, статистической обработкой полученных результатов, а также сопоставлением с результатами натурных наблюдений, численного моделирования и материалами о проведенном ранее физическом моделировании бортов карьеров при обратном падении слоев горных пород.

Научная новизна:

– установлен характер изменения процессов деформирования и разрушения откосов с обратной крутопадающей слоистостью в зависимости от прочностных свойств на контактах слоев горных пород;

– выявлены закономерности, характеризующие распределение смещений в бортах карьеров с обратной крутопадающей слоистостью в зависимости от характера деформирования откосов;

– выявлен скачкообразный характер снижения скоростей смещений перед потерей устойчивости откосов с обратной крутопадающей слоистостью.

Защищаемые положения:

1. Процесс разрушения откосов с обратной крутопадающей слоистостью определяется прочностью контактов: с увеличением прочностных свойств контактов слоев горных пород, процесс разрушения, представляющий собой опрокидывание слоев, трансформируется в изгибы с их дальнейшим срезом по плавной криволинейной поверхности аналогично изотропному откосу;

2. Прогноз потери устойчивости откосов с обратной крутопадающей слоистостью должен осуществляться на основе численного моделирования и натурных наблюдений, а критерием смещений, прогнозирующим обрушение, является спад максимальных скоростей смещений в 1,5 раза относительно максимальных скоростей смещений предыдущего этапа ведения горных работ;

3. При обосновании параметров бортов карьеров с обратной крутопадающей слоистостью необходимо учитывать как прочностные свойства по контактам горных пород, так и допустимые величины деформаций при различных коэффициентах запаса.

Теоретическая и практическая значимость работы:

– определены особенности процессов деформирования и разрушения бортов карьеров с обратной крутопадающей слоистостью;

– установлены критерии прогнозирования процессов деформирования и разрушения бортов карьеров с обратной крутопадающей слоистостью;

– результаты исследований рекомендуются к внедрению на осадочных месторождениях с крутопадающей слоистостью, а также будут полезны в научно-исследовательских и проектных организациях при проектировании карьеров с обратной крутопадающей слоистостью и решении геомеханических и горнотехнических задач, возникающих при эксплуатации таких карьеров.

Апробация и реализация результатов работы. Основные положения и результаты выполненных в работе исследований были представлены на международных конференциях в период 2015-2019 гг.: 56 Konferencija Studenckich Kol Naukowych PionuG orniczego (Польша, г. Краков, AGH, 2015), 68th Berg-und Huttenmannischer Tag 2016 (Германия, г. Фрайберг), VIII Международная научно-практическая конференция «Традиционная и инновационная наука: история, современное состояние, перспективы» (Россия, г. Пермь), VIII Международная научно-практическая конференция «Научные исследования и разработки в эпоху глобализации» (Россия, г. Пермь), VIII Международная научно-практическая конференция «Инновационные направления в проектировании горнодобывающих предприятий» (Россия, г. Санкт-Петербург), 2018 European Rock Mechanics Symposium (Россия, г. Санкт-Петербург), X Международная конференция «Комбинированная геотехнология» (Россия, г. Магнитогорск). Принято участие в научно-исследовательской работе, проводимой в рамках выполнения соглашения между Российским научным фондом, руководителем проекта и организацией о предоставлении гранта на проведение фундаментальных научных исследований и поисковых научных исследований: Проект № 17-77-10101 от 24 июля 2017 г. «Оценка устойчивости бортов карьеров на основе иерархично-блочной модели скальных массивов и разработки метода расчета коэффициента структурного ослабления».

Разработанная методика полезна для горнорудных предприятий, научно-исследовательских организаций и учебных учреждений. Полученные результаты могут использоваться в строительных и проектных организациях для выполнения расчетов и оценки наблюдаемых процессов.

Публикации. По теме научно-квалификационной работы опубликовано 5 работ, из них 2 в ведущих рецензируемых изданиях, включенных в перечень ВАК РФ, 1 – включенных в международную базу цитирования Scopus.

Объем и структура работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы. Содержит 140 страниц машинописного текста, 91 рисунок, 13 таблиц, 13 формул и список литературы из 93 наименований.

Благодарности. Автор выражает глубокую признательность главному научному сотруднику Научного центра геомеханики и проблем горного производства, д.т.н. С. В. Цирелю за научное руководство работой. За всестороннюю помощь в организации работы автор благодарит заведующего лабораторией устойчивости бортов карьеров, к.т.н. А. А. Павловича. За помощь в проведении физического моделирования выражается благодарность заведующему лабораторией моделирования, к.т.н. Б. Ю. Зуеву и старшему научному сотруднику, к.т.н. Р. С. Истомину. За помощь в проведении лабораторных испытаний прочностных свойств горных пород автор благодарен заведующему лабораторией физико-механических свойств и разрушения горных пород, к.т.н. М. Д. Ильинову, ведущему сотруднику, к.т.н. В. А. Коршунову и инженеру А. А. Бажукову. Искреннюю благодарность автор выражает всему коллективу Научного центра геомеханики и проблем горного производства Санкт-Петербургского горного университета.

ГЛАВА 1 СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА. ЦЕЛЬ И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЙ

В настоящее время на добычу полезных ископаемых открытым способом приходится 2/3 всех полезных ископаемых, добываемых из недр, что делает данный вид горных работ одним из самых распространенных.

Открытые горные работы, характеризуются извлечением пород с постепенным увеличением глубины выемки, что приводит к изменению напряженно-деформационного состояния массива, в результате чего появляется риск возникновения оползневых явлений, которые могут послужить причиной нанесения ущерба здоровью людей и работоспособности горных механизмов, а также нарушения технологического процесса добычных работ.

Разрушение откосов является одним из самых распространенных происшествий среди всех аварийных ситуаций, которые происходят на горных предприятиях. Так, по данным анализа ВГСЧ МЧС России за период 2009-2014 годов было установлено, что среди 265 аварий на горных предприятиях 20% относятся к обрушениям [71]. Как правило, причиной обрушения и оползней откосов является несоответствие их геометрических параметров инженерно-геологическим условиям, в частности, завышенные углы откосов. С другой стороны, заниженные углы откосов могут стать причиной извлечения дополнительных миллионов кубометров горных пород.

Таким образом, устойчивость бортов и уступов карьеров является одним из наиболее важных вопросов при открытой разработке месторождений, определяющих безопасность, эффективность и экономичность эксплуатации карьеров.

Надежное прогнозирование устойчивости уступов и бортов карьеров позволяет обосновывать параметры откосов, обеспечивающих безопасную эксплуатацию на весь период отработки месторождения.

1.1 Факторы, оказывающие влияние на устойчивость бортов карьеров

Сопровождение специализированными организациями отработки месторождений открытым способом, а также участие в комиссиях по выявлению причин произошедших оползней и обрушений как на карьерах, так и естественных откосах позволило выявить ряд факторов, которые оказывают влияние на устойчивость откосов. Согласно, предложенной классификации ВНИМИ [61], основные факторы разделены на четыре группы: инженерно-геологические, гидрогеологические, физико-географические, горно-технические (рисунок 1.1).



Рисунок 1.1 – Основные факторы, оказывающие влияние на устойчивость бортов карьеров и естественных откосов

Рассмотрим более подробно каждый из факторов:

Инженерно-геологические факторы

Разрушение откосов представляет собой сдвиг или срез по поверхности ослабления под действием касательных напряжений вызванных силами собственного веса пород. Поэтому один из основных факторов, который нужно учитывать при оценке устойчивости откосов, это прочностные свойства горных пород – сцепление и угол внутреннего трения, отвечающие за показатели сопротивления сдвигу. Сцепление и угол внутреннего трения пород в массиве зависят, главным образом, как от прочностных характеристик образцов пород, так и от трещиноватости массива.

Прочность пород в образце в свою очередь зависит от минералогического и гранулометрического состава, пористости, структуры, текстуры, а также от степени метаморфизма. В работе Г. Л. Фисенко приводится понятие критической прочности, позволяющая откосу борта карьера сохранять устойчивое положение под общим углом откоса 60° [76]. Считается, что прочность, превышающая значения критической отметки, не требует детального изучения, так как в этом случае устойчивость откоса в основном будет определяться степенью и характером трещиноватости.

На основании многочисленных испытаний и исследований установлено, что в большинстве случаев разрушение откосов происходит по плавной криволинейной поверхности скольжения, имеющей форму близкой к круглоцилиндрической [28, 43, 47, 48, 61, 76]. В этом случае несущая способность откоса будет определяться непосредственно прочностными свойствами массива горных пород.

Наряду с прочностью пород, значительное влияние на устойчивость откосов оказывает ориентация слоистости, трещиноватости и нарушений относительно выработки [61, 76]. В частности, наличие нарушений или протяженных поверхностей ослабления в массиве может оказать влияние на форму и положения поверхности скольжения, которая в этом случае может быть плоской, криволинейной, ломаной, желобчатой или в виде комбинации данных форм.

Контакты слоев, трещин и нарушений характеризуются относительно низкой, по сравнению с образцами горных пород величиной сцепления. В то же время, в зависимости от шероховатости и неровности поверхностей, контакты горных пород также могут иметь весьма низкие углы трения. При неблагоприятной ориентации возможных поверхностей ослабления и в случае их низкой несущей способности устойчивость прибортового массива может быть значительно снижена, несмотря на относительно высокие прочностные характеристики горной породы [76].

Среди инженерно-геологических факторов, помимо прочностных характеристик пород и нарушений различных рангов при оценке устойчивости также стоит учитывать процессы, при воздействии которых со временем снижаются прочностные характеристики пород.

К таким процессам относятся следующие:

- Выветривание

Данный процесс приводит к нарушению структурных связей, вследствие чего происходит рост трещин в горных породах под воздействием внешних климатических факторов (колебания температуры, химическое воздействие воды и др.). Результатом выветривания являются осыпи, выполаживающие откос борта.

- Набухание

Представляет собой процесс увлечения объема горной породы посредством впитывания жидкости из окружающей среды, в результате чего, происходит снижение плотности пород, и следовательно, снижение их сопротивляемости к сдвиговым нагрузкам;

- Разуплотнение

Данный процесс характеризуется увеличением объема пород после снятия нагрузки, что приводит к снижению несущей способности массива пород. В скальных породах разуплотнение проявляется в виде образования трещин, в глинистых породах – образованием микротрещин.

Гидрогеологические факторы

Наличие водоносных горизонтов, водоемов, открытых и подземных водотоков, дождевых и талых вод, становится причиной возникновения деформационных процессов. В обводненном состоянии в породах массива возникают силы и процессы, снижающие устойчивое состояние откосов. Одной из таких сил является гидростатическое давление [61, 76].

Гидростатическое давление рассматривается, как суммарная составляющая гидродинамического давления, проявляющаяся в виде объемной силы, которая совпадает по направлению с линией водотока и гидростатического взвешивания, направленного вверх и равного объему элементарного блока ниже уровня подземных вод. Таким образом, за счет гидростатического давления уменьшается нормальная составляющая веса блока, в результате чего снижаются эффективные напряжения в массиве, что способствует уменьшению нормальных напряжений.

Помимо силового воздействия, наличие вод способствует процессам набухания и разуплотнения горных пород, а также проявлению таких явлений, как оплывины, суффозии, выщелачивание, внезапные порывы вод в выработки.

Физико-географические факторы

При оценке устойчивости откосов бортов и уступов карьеров необходимо учитывать, в каких климатических условиях расположено месторождение, то есть учитывать возможное количество атмосферных осадков, характер дождей, мощность снегового покрова, перепады температур и мощность сезонного протаивания, рельеф местности, ветер, сейсмичность [61, 76, 81]. Обильное количество атмосферных осадков повышает степень обводненности пород, что ведет, как указывалось выше, к снижению сопротивляемости массива горных пород к сдвиговым нагрузкам. От рельефа местности зависит характер стока атмосферных вод, питание водоносных горизонтов и ветровая эрозия.

Например, резко выраженный рельеф без сточных впадин обеспечивает хороший сток атмосферных вод, в то время как бугристо-котлованный рельеф характеризуется плохим стоком вод, в результате чего увеличивается обводненность откосов. Относительно ветровых эрозий холмистый рельеф больше подвержен ветровым агентам выветривания, нежели равнинный рельеф.

При анализе климата месторождения особое внимание необходимо уделять наличию мерзлотных условий, которые характеризуются отрицательными температурами. Наличие мерзлотных условий может оказывать отрицательное воздействие на прочностные свойства пород и массива в целом.

Разрушение несущей способности пород в криологических условиях заключается в том, что при замерзании вода, которая содержится в породе, увеличивается в объеме, что способствует расширению пор и образованию новых трещин. При следующем цикле замораживания вода заполняет новые образовавшиеся нарушения и расширяет их [38, 40]. Результатом криогенного выветривания (в зависимости от глубины сезонного слоя протаивания, степени влажности и способности пород впитывать влагу) являются осыпи, образование отдельных блоков и выполаживание откосов уступа.

С другой стороны, трещиноватые и слоистые породы в условиях смерзания цементируются льдом, что способствует увеличению несущей способности откосов.

Горнотехнические факторы

Среди горнотехнических факторов стоит отметить значимость влияния буровзрывных работ на устойчивость открытых выработок [61, 76]. Так, к примеру, применение массовых взрывов приводит к снижению сил сцепления по поверхностям ослабления, в результате чего повышается риск обрушения откоса. Также при весьма грубых способах взрывания увеличивается интенсивность прорастания трещин (в некоторых случаях возникают новые трещины), в результате чего образуются осыпи, покрывавшие бермы. Все это подчеркивает важность вопроса выбора способа взрывания, учета расстояния от места взрыва до ответственного сооружения и анализа структуры массива, от чего зависит степень влияния взрывных работ на устойчивость откосов.

При проектировании открытых горных работ также следует учитывать ориентацию горных выработок относительно трещин, нарушений и других поверхностей ослабления, форму профилей площадок уступов, обеспечивающих сток дождевых и талых вод, что достаточно важно для пород, склонных к

набуханию и размоканию, ширину и частоту расположения берм отчистки и транспортных берм.

1.2 Анализ методов расчета устойчивости бортов карьеров и естественных откосов

Для прогнозирования устойчивости бортов и уступов используют различные методики расчетов, задача которых заключается в определении оптимального угла наклона откоса при установленной его высоте, или, наоборот, определение высоты откоса при установленном его угле наклона.

Геомеханическими исследованиями установлено, что надежность расчетов при оценке устойчивости бортов и уступов зависит не только от надежности изучения инженерно-геологических условий месторождения и достоверности исходных прочностных свойств сопротивлению сдвигу горных пород, но и от степени соответствия принятой расчетной модели реальному распределению напряжений в прибортовом массиве и характеру его деформирования (разрушения).

Выделяют четыре кинематические формы разрушения откосов [57]:

- Стационарное неравновесное разрушение – развитие поверхности скольжения под действием постоянных гравитационных сил;
- Стационарное равновесное разрушение – постепенное развитие поверхности скольжения под воздействием внешних сил, при остановке которых развитие поверхности скольжения также останавливается;
- Нестационарное неравновесное неустановившееся разрушение – развитие поверхности ослабления в результате изменения свойств пород во времени, что характерно для откосов подверженных интенсивному выветриванию, а также обладающие повышенными реологическими свойствами;
- Нестационарное неравновесное динамическое разрушение – обусловлено разрушением откосов под действием резко меняющихся во времени нагрузок.

В настоящее время вопросы, связанные с образованием и развитием трещин в прибортовом массиве, остаются нерешенными и являются весьма актуальными. Однако по результатам исследования процессов деформирования бортов различными авторами путем физического моделирования [30, 47, 76] или натуральных наблюдений [28, 43] можно сделать вывод, что массив в прибортовой зоне деформируется путем сдвига. Поверхность скольжения откоса образуется в результате развития микродеформаций в области максимальных деформаций сдвига. Но при этом А. М. Мочалов отмечает [47], что разрушение массива однородного откоса вдоль потенциальной поверхности скольжения зависит от деформационных свойств массива, а конкретно, от закономерности развития деформаций пород при различных напряженных состояниях. Поскольку на большей части поверхности скольжения, за исключением краевых участков, напряжения изменяются относительно несущественно, а изменение характера деформирования пород от напряженного состояния в пределах реальных величин напряжений в откосах также незначительно, можно считать, что разрушение массива однородного откоса вдоль потенциальной поверхности скольжения происходит практически одновременно.

В то же время имеются и другие взгляды на формирование поверхности скольжения в массиве: разрушение откосов может представлять собой либо постепенное развитие во времени поверхности скольжения от точки к точке (от точки в нижней части откоса к верхней точке или наоборот), либо параллельное формирование площадок разрушения в верхней и нижней части откоса [57].

Большинство методик расчетов устойчивости откосов основано на том, что разрушение откосов происходит одновременно во всех точках поверхности скольжения, то есть выполняются условия стационарного равновесного разрушения.

К настоящему времени разработано около 150 способов и приемов расчета устойчивости естественных откосов и бортов карьеров, основанных на методе предельного равновесия [59]. Такое большое количество методов связано со

сложностью и разнообразием горно-геологических и горнотехнических условий ведения горных работ.

Ряд специалистов предлагали различные классификации методов [22, 57]. Наиболее полной является классификация, предложенная М. Е. Певзнером [57], в которой основным принципом при разделении методов на классы является определение параметров откосов, обеспечивающих их устойчивость.

Данная классификация составлена по схеме, представленной на рисунке 1.2

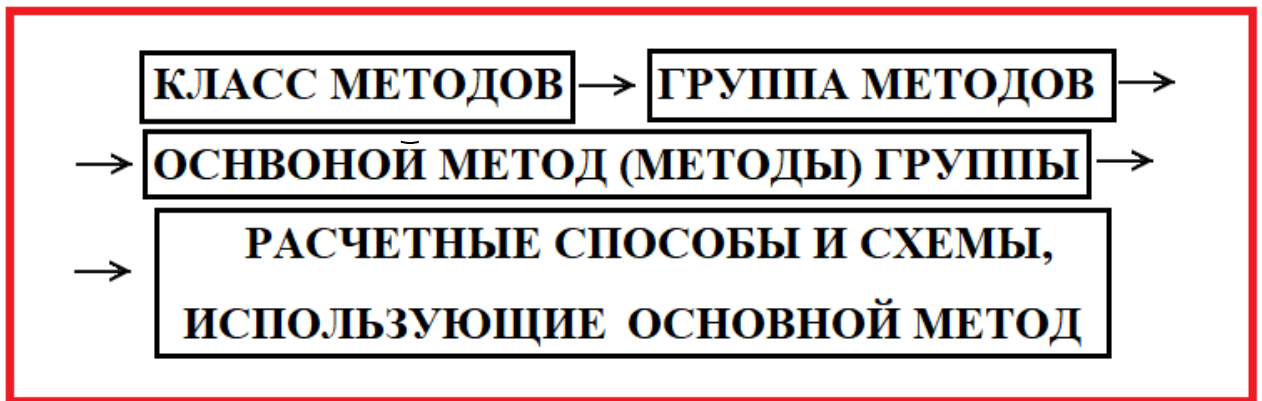


Рисунок 1.2 – Схема классификация методов оценки устойчивости по М. Е. Певзнеру [57]

Класс А

Методы данного класса решают задачи построения контура откоса, находящегося в предельно устойчивом состоянии.

Основой методов расчетов данного класса послужила теория Ренкана – Кеттера, суть которой состоит том, что в любой точке предельно напряженного состояния массива возможны два направления сдвиговых нагрузок, нормаль к каждой из них составляет с направлением наибольшего главного напряжения углы $45^\circ + \varphi/2$ и $45^\circ - \varphi/2$, где φ – угол внутреннего трения.

В рассматриваемом классе методы разделены на две основные группы: численный (составленный В. В. Соколовским) и графический (разработанный С. С. Голушкевичем).

В работах В. В. Соколовского [72] представлены методы решения, которые характеризуются взаимосвязью касательных напряжений по линии поверхности скольжения, определяют формы откосов, при которых сохраняется состояние

их предельного равновесия. В работах С. С. Голушкевича также приводятся формулы более сложной структуры, решающие задачи устойчивости откосов. Недостатком данных методов является то, что они не пригодны для анизотропных откосов, построение откосов весьма трудоемко, а построение выпуклых откосов не всегда экономически выгодно и выполнимо на практике.

Тем не менее, работы В. В. Соколовского и С. С. Голушкевича являются основополагающими в развитии теории предельного равновесия массива горных пород.

Класс Б

В классе представлены методы, рассчитывающие контур откоса, при котором сохраняется равенство угла наклона касательной к углу сопротивления сдвига.

Основой методов данного класса стали работы Н. Н. Маслова и М. Н. Троицкой.

Согласно методу Маслова, устойчивое состояние откоса будет обеспечено при равенстве между углом откоса и углом сопротивлению сдвигу. Однако по данному методу, нельзя найти наиболее напряженную поверхность скольжения. Также при использовании метода Маслова контур откоса получается более пологим относительно контура, находящегося в предельно напряженном состоянии.

Метод Троицкого рассматривает зависимость между высотой откоса и его заложением $\tau = \sigma \cdot tg\varphi$, составленной по аналогии с уравнением сдвигу пород не обладающих сцеплением $h = l \cdot tg\varphi$. Уравнения имеют только внешнее сходство, но описывают разные явления. Данный метод, как и метод Маслова, не позволяет определить наиболее напряженную поверхность скольжения.

Методы класса Б нецелесообразны в практическом применении, так как они не обеспечивают нахождение наиболее напряженной поверхности скольжения, в каждой точке которой выполняется условие предельного равновесия, а также условие, где отношение сумм удерживающих сил к сумме сдвигающих сил имеют минимальное значение.

Класс В

К данному классу относятся методы, определяющие в массиве наиболее напряженную поверхность скольжения, вдоль которой удовлетворяется условие предельного равновесия.

Класс В разделен на 5 отдельных групп, классификационных по форме поверхности скольжения.

К первой группе относятся работы Г. Франсе, О. Винклера, Л. Н. Бернацкого, П. Н. Цимбаревича, методы которых построены на том, что разрушение откосов происходит по плоской поверхности скольжения.

Данные методы значительно завышают параметры откосов, а также не соответствуют нахождению наиболее напряженной поверхности, отвечающей условиям, где отношение сумм удерживающих сил к сумме сдвигающих сил имеет минимальное значение, что делает данные методы неприменимыми на практике.

К следующей группе относятся методы, которые характеризуются построением круглоцилиндрической поверхности скольжения. Среди таких методов можно отметить работу В. Феллениуса, в основе которой лежит построение диаграмм, основанных на соотношении между относительной величиной сцепления, высотой вертикального откоса и фактическими параметрами откоса. Данный метод определяет предельно устойчивый угол откоса. Однако, по мнению Г. Л. Фисенко, расчеты методом В. Феллениуса дают завышенные результаты относительно результатов расчетов по методики В. В. Соколовского и С. С. Голушкевича [77], что объясняется отсутствием в расчетах учета отрыва H_{90} в верхней части откоса.

Метод Тейлора основан на построении поверхности скольжения при помощи двух окружностей, проведенных из некоторой точки вне откоса, которая определяется при помощи специальной таблицы. Расчет устойчивых параметров откоса осуществляется при помощи графика.

Среди аналитических способов, можно отметить расчет устойчивости откосов методом Н. А. Маслова. Данный метод характеризуется двумя системами

уравнений, заключающих в себе два варианта закона распределения нормальных напряжений, решение которых приводит к уравнению третьей степени с одним неизвестным коэффициентом запаса устойчивости. Однако данная методика при расчетах не учитывает разделения оползневого клина на вертикальные блоки. Также стоит отметить работы С. Хюльтин и Г. Крей, расчеты которых учитывают разбивку оползневого клина на вертикальные блоки по поверхности скольжения, которая определяется путем подбора.

Метод С. Хюльтина заключается в построении многоугольника сил, действующих на боковые стенки и основание блока. Замкнутый многоугольник соответствует верному значению угла внутреннего трения, в противном случае его нужно изменить.

Метод Крея основан на разложении реакций каждого блока на нормальную и тангенциальную силу, которая, в свою очередь, разделяется на вертикальные и горизонтальные составляющие. Далее определяется величина угла внутреннего трения, при которой должно соблюдаться равенство моментов сдвигающих и удерживающих сил. Среди методов, рассматривающих условия предельного равновесия каждого вертикального отсека, на которые поделена оползневая масса, необходимо отметить методы А. Бишопа, Е. Спенсера и Моргенштерна-Прайса [57], нашедших широкое применения в реальной практике.

Третью группу представляют методы, в которых поверхность скольжения рассматривается как логарифмическая спираль. Такой принцип не требует допущений, касающихся распределения напряжений в плоскости скольжения.

По мнению Д. Тейлора, основным достоинством таких методов считается то, что все силы, приложенные по плоскости скольжения к оползневой массе, направлены к центру спирали. Среди методов данной группы, для практического применения подходит метод Ю. С. Козлова – В. А. Будкова, который находит поверхность скольжения, отвечающей условию, когда отношение сумм удерживающих сил к сумме сдвигающих сил имеют минимальное значение.

В четвертой группе описываются методы, использующие поверхность скольжения сложной криволинейной формы. Среди таких методов стоит отметить

метод Г. Л. Фисенко, получивший наибольшее распространение на практике, в котором поверхность скольжения рассматривается как сочетание отрезков окружностей и прямой. Также к этой группе относятся способы расчетов устойчивости, использующие вариационный подход, среди которых можно отметить методы В. И. Бухарова, А. Ю. Иванова и И. Того. В этой группе поверхность скольжения рассматривается как кусочно-линейная функция, сводящая вариационную задачу к поиску экстремума функций многих переменных.

В последнюю группу включены методы, рассматривающие обрушение откосов по поверхности скольжения ломаной формы. К таким методам относится метод «прислоненного откоса» Л. П. Ясюнас, в котором определяется давление каждого сектора, на которые разделен оползневой клин, и строится эпюра. Также в данной группе методов можно отметить метод «горизонтальных сил». Однако из-за неточного определения горизонтальных реакций между блоками, он дает заниженные результаты. Методы данной группы применяются в том случае, когда известно направление поверхностей ослабления в теле массива.

Класс Г

В этот класс включены методы расчетов устойчивости откосов, учитывающие прочностные характеристики по поверхности скольжения, вдоль которой удовлетворяется условие специального предельного равновесия. Отличительной особенностью методов этого класса является различные схемы расчетов, в которых поверхность скольжения определяются исходя из пространственной ориентации поверхности ослабления в откосе. Среди таких методов можно найти схемы, учитывающие ситуации, когда трещина падает в сторону выемки под углом большим, меньшим или совпадающим с углом наклона откоса или подрезает уступы; две секущие трещины или несколько поверхностей ослабления, образующих поверхность скольжения; в породах имеется слоистость, падающая горизонтально, совпадающая с углом откоса или меньше.

Методики оценки устойчивости рассматриваемого класса в свою очередь разделяются на две подгруппы, в одной из которых оценка устойчивости откосов

по поверхности скольжения решается в плоской постановке, в другой – методы расчетов устойчивости учитывают объемный характер обрушения.

Среди первой подгруппы можно отметить схемы Г. Л. Фисенко [77], Н. Н. Куваева [35], Э. Л. Галустяна [19], И. И. Попова [60], Л. В. Савкова [69] и др.

Во второй группе стоит выделить методы П. Н. Панюкова [56], Э. Г. Газиева и В. И. Речицкого [17, 18], также стоит отметить работы, расчетные схемы которых составлены на базе трехмерного векторного анализа, в основе которых положены разработки К. Джона, П. Лонде, В. Витке и других зарубежных авторов, рассматривающих оползневой клин как тетраэдр.

Методы этого класса пригодны в эксплуатации, так как они соответствуют условию нахождения минимального значения отношения сумм удерживающих и сдвигающих сил по поверхности разрушения, а также учитывают условия разрушения, свойства пород, форму откоса, величины и направления действующих сил в реальных условиях.

Класс Д

К классу отнесены методы, применяющие для оценки устойчивости вероятностный подход, основанный на использовании статистики. Методы позволяют оценивать неизвестные параметры путем распределений случайных величин. Класс делится на две подгруппы методов: в первой – методы используют закон распределения показателей, входящих в расчетные формулы; во второй – использование теории риска, определяющего устойчивый контур откоса.

Среди достаточно большого выбора методов расчета устойчивости откосов на сегодняшний день на практике применяется лишь небольшой перечень методов, которые прошли уже многолетнюю апробацию. В России по-прежнему к данным методам относят алгебраическое и векторное сложение сил, а за рубежом методы, удовлетворяющие всем трем уравнениям равновесия: методы Спенсера, Сарма и Моргенштерна-Прайса.

Возможность автоматизации расчетных методов устойчивости откосов, а в частности, определение местонахождения поверхности скольжения путем последовательных приближений, повышает сходимость результатов расчетов,

выполняемых различными методами, удовлетворяющих трем уравнениям равновесия или только части из них. В связи с этим все большее применение на практике находят зарубежные методы ввиду отсутствия конкурентоспособного российского программного обеспечения. Лишь нелегитимность применения зарубежных методов перед надзорными органами и российской нормативной базой останавливает их дальнейшее развитие.

1.3 Особенности деформирования откосов бортов с обратным крутым падением слоев

В главе 1.2 показано, что на практике при оценке устойчивости откосов преимущественно используются методы расчетов, основанные на теории предельного равновесия сыпучей среды, согласно которой при достижении откосом предельного состояния в массиве на участках максимальных касательных напряжениях формируется поверхность скольжения. Исходя из данного предположения, а также с учетом разнообразия геологического строения горных массивов разработано множество схем для различных условий [22, 67, 68, 80].

Однако с развитием открытой добычи в эксплуатацию вводятся месторождения с всё более сложными горно-геологическими условиями, что приводит к необходимости решать новые, усложненные задачи при оценке устойчивости бортов карьеров. К таким примерам следует отнести борта карьеров, в которых слои под крутым углом наклона падают не в выработанное пространство, а в противоположную сторону, в сторону массива (далее обратное падение). Деформирование таких откосов представляет собой более сложный процесс, чем простое сдвигание оползневой массы горных пород, рассматриваемое в традиционных методах расчета устойчивости, и представляет собой наклоны, опрокидывание и изгибы слоев с дальнейшим их срезом вкрест наслоения.

Впервые данный вид деформаций был зафиксирован в 1970-1975 г.г. на бортах разрезов «Южный», «Коркинский», «Батуринский» [54], на ряде разрезов «Кузбаса» и «Экабастуза», на карьере «Соколовский», а также на карьерах

Коршуновского и Качканарского ГОКов [27]. Деформирование таких откосов, по сравнению с изотропными, представляет собой более длительный процесс и может продолжаться 3-5, а то и более 10 лет. Отличительной особенностью при деформировании таких откосов является образование заколов и трещин на поверхности прибортовой полосы виде «обратных ступенек», обусловленных опрокидыванием блоков. При этом еще задолго до наступления предельного состояния величина таких трещин может достигать нескольких метров.

В настоящий момент расчетные схемы, приведенные в нормативных документах [61], не позволяют прогнозировать устойчивость бортов с обратной крутопадающей слоистостью, так как рассматривают разрушение откосов как сдвигение горной массы по наиболее напряженной поверхности скольжения, поэтому в расчетных методах учитываются только гравитационные силы. Данное утверждение актуально для бортов высотой не более 200 м, для которых методы расчетов устойчивости и разрабатывались в 70-ых годах [44, 61]. Однако в настоящее время высота бортов карьеров достигает 500 м и более, что в зависимости от геолого-структурного строения прибортового массива, способствует проявлению более сложного характера разрушения откосов [27].

Пример образования трещин на поверхности бортов карьеров, образующихся в процессе наклонов слоев, иллюстрируется рядом фотографий (рисунок 1.3-1.5), предоставленных автором работы [27] О. В. Зотеевым. Также процессы деформирования откосов в виде опрокидывания слоев рассматривались и зарубежными исследователями, среди которых стоит отметить работу S. O. Kayode [89] (рисунок 1.6-1.7).

Для оценки устойчивости бортов карьеров с обратной слоистостью в нормативных документах представлен метод, основанный на ведении отрицательной поправки в величину предельного устойчивого угла, рассчитанного для изотропного откоса. Однако данный метод разработан для бортов высотой не более 200 м, а также при оценке устойчивости не учитывает величину сцепления по контактам слоев, что делает такой способ весьма

приближенным, особенно при оценке устойчивости бортов с обратной слоистостью в мерзлых условиях.

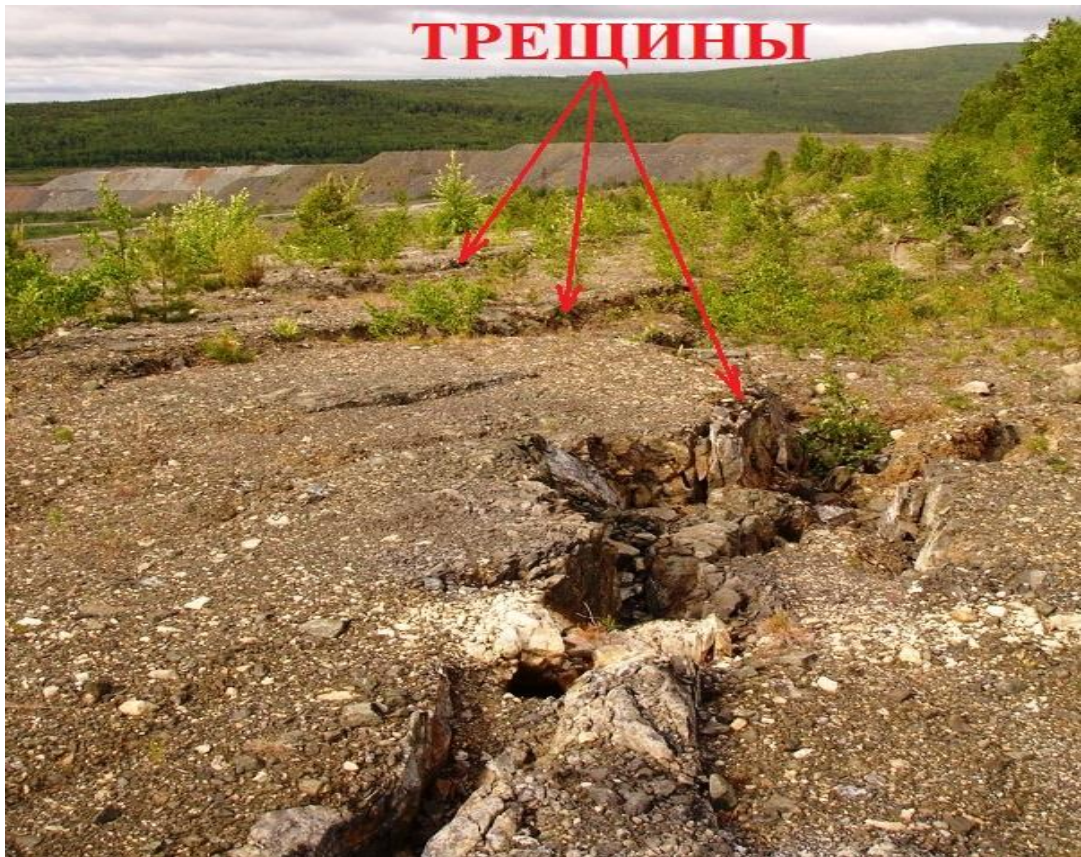


Рисунок 1.3 – Образование трещин в виде «обратных ступенек» на Северо-Западном борту Главного карьера Качканарского ГОКа

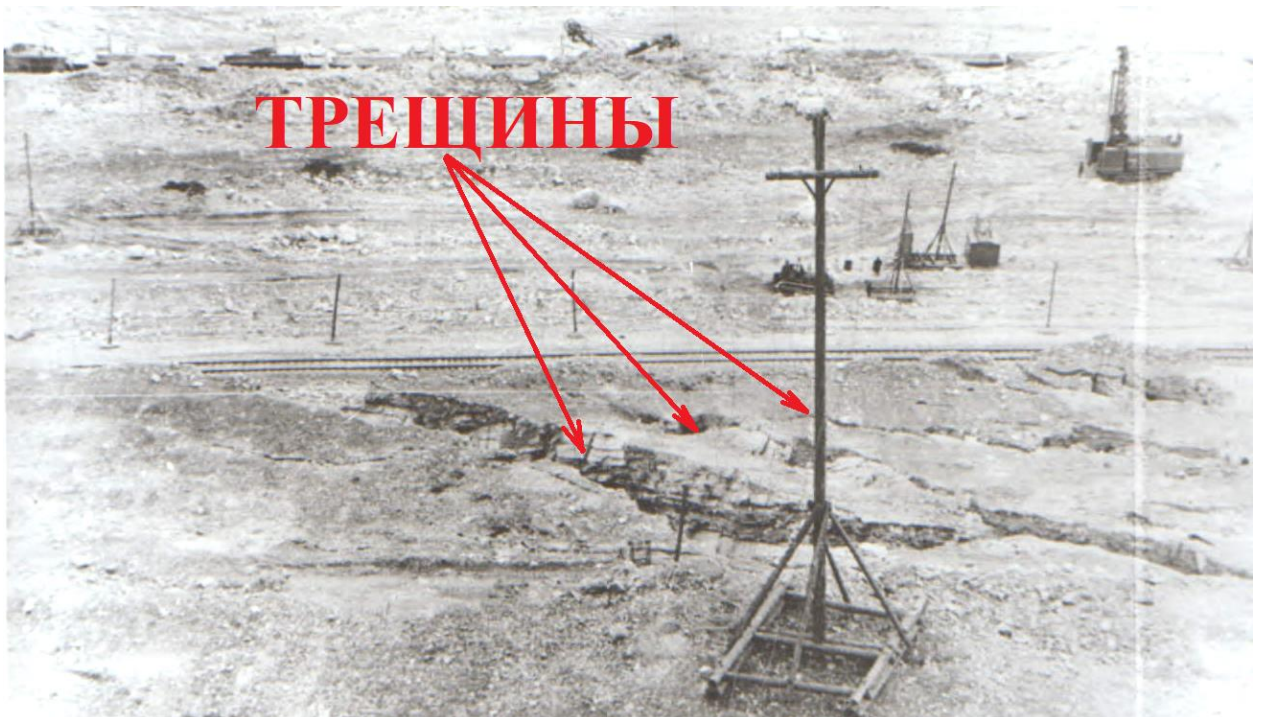


Рисунок 1.4 – Образование трещин в виде «обратных ступенек» (Северный борт «Коршуновского карьера»)



Рисунок 1.5 – Участок развития деформаций
(Западный борт «Соколовского карьера»)



Рисунок 1.6 – Обрушение участка борта карьера в виде опрокидывания слоев [89]



Рисунок 1.7 – Образование трещин в виде «обратных ступенек» [89]

В условиях криолитозоны прибортовой массив находится в мерзлом состоянии, а контакты горных пород дополнительно сцементированы льдом. В этом случае прочностные свойства контактов горных пород значительно возрастают по сравнению с талыми условиями. В связи с этим может наблюдаться изменение характера деформирования бортов карьеров и увеличение коэффициента запаса устойчивости откосов. Именно поэтому разработка рекомендаций по оценке устойчивости бортов при крутопадающем обратном падении слоев с учетом особенностей поведения деформирования откосов и прочностных свойств по контактам горных пород является весьма актуальной.

1.4 Анализ существующих методов оценки устойчивости откосов с обратным крутым падением слоев

В настоящее время вопросу оценки устойчивости бортов карьеров посвящено небольшое количество работ. В России наибольший вклад в изучение

данного направления внесли Б. Г. Афанасьев [2, 3, 4, 5, 6, 7, 8] и Л. К. Новикова [51, 52, 53, 64].

Согласно работе Б. Г. Афанасьева, нетипичный характер деформирования откосов в виде поворотов слоев реализуется в диапазоне углов наклона слоистости от $45-50^\circ$ в массив до $65-70^\circ$ в сторону выработанного пространства. Отличительная особенность откосов бортов с крутопадающей слоистостью заключается в заблаговременном проявлении первых деформаций относительно его предельного состояния. Первые микродеформации проявляются в прибортовом массиве при величине угла откоса меньше предельного на $15-25^\circ$. При углах откоса положе предельных на $5-10^\circ$ появляются первые видимые трещины со смещениями до $0,1-0,4$ м (для откосов высотой $100-200$ м); при углах положе предельных на $2-4^\circ$ наблюдается скачок деформаций со смещениями в откосе до $0,5-4$ м. При деформировании таких откосов ширина призмы обрушения больше, чем при разрушении изотропного в $3-4$ раза. Деформации в прибортовой полосе распространяются на $1,5-2,0 \cdot H$, где H – высота откоса (рисунок 1.8).

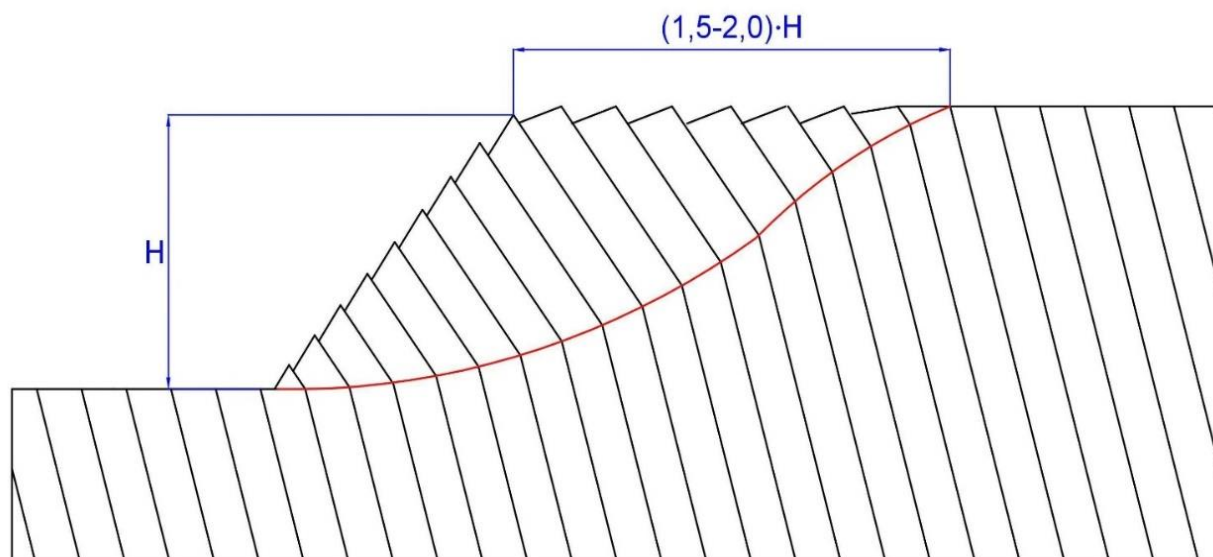
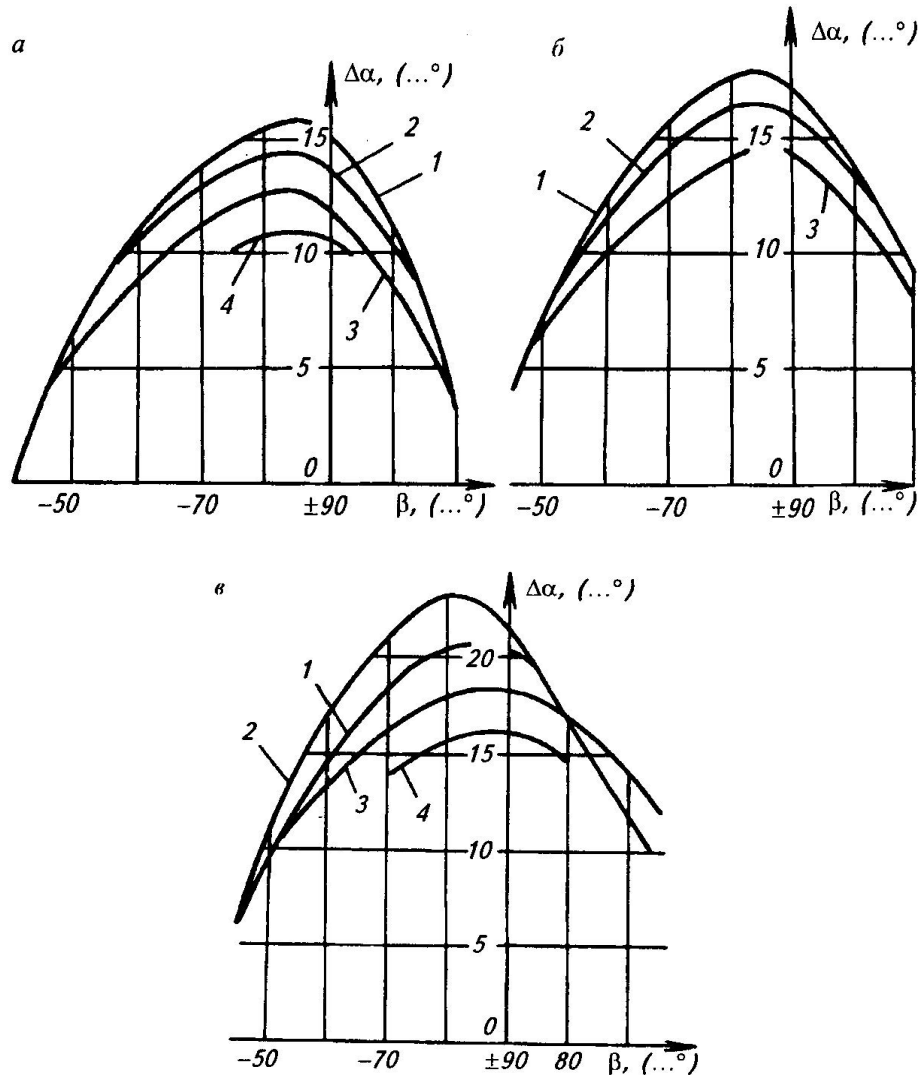


Рисунок 1.8 – Схематичный пример деформирования поверхности прибортового массива при опрокидывании слоев [61]

Также в работе предлагается графический метод нахождения реакции между блоками посредством совместного построения силовых и веревочных многоугольников.

На основании результатов работы [8] в правилах по обеспечению устойчивости откосов на угольных разрезах [61] приведен графический способ определения предельных углов откосов с обратной слоистостью, который заключается в введении отрицательной поправки в величину предельного угла изотропного откоса (рисунок 1.9). Величина такой поправки составляет 10-15°.



1 – $\alpha_{из} = 57^\circ, \varphi' = 17^\circ$; 2 – $\alpha_{из} = 52^\circ, \varphi' = 17^\circ$; 3 – $\alpha_{из} = 52^\circ, \varphi' = 24^\circ$; 4 – $\alpha_{из} = 52^\circ, \varphi' = 30^\circ$

Рисунок 1.9 – Графики поправок к углам наклона откосов при полном опрокидывании слоев (а), на момент скачка деформации (б) и при появлении видимых трещин (в)

В работе [53] Л. К. Новикова отмечает, что предложенный способ Б. Г. Афанасьева не учитывает высоту откоса и прочие факторы, что накладывает на способ ограничение в использовании. Также в основе предложенного метода веревочного многоугольника [8] рассматривается опрокидывание слоев с

подвижками по контактам, в то время как в предельном равновесии слоев подобная деформация не допускается, поэтому угол откоса, рассчитанный методом веревочного многоугольником, получается пологим. В ходе наблюдений в работе [8] выделено три стадии деформирования откосов с крутопадающей слоистостью:

1. Консольный изгиб слоев вдоль потенциальной поверхности скольжения;
2. Излом слоев по системе продольных нормальных трещин. Сцепление массива в целом уменьшается в 2 раза, что обусловлено ростом напряжений растяжений в поперченном сечении слоя;
3. Опрокидывание слоев со сдвигом по образовавшейся поверхности скольжения.

Исходя из того, что при изгибе слоев одна его часть будет работать на сдвиг со сжатием, а другая – со сдвигом на растяжение. Поэтому при оценке устойчивости откосов методом многоугольника сил величину сцепления вкрест наслоения предлагается определять путем следующих вычислений:

$$K_{\beta} = K \cdot C_K, \quad (1.1)$$

$$C_K = 0.5 \cdot (1 + C_{\tau}), \quad (1.2)$$

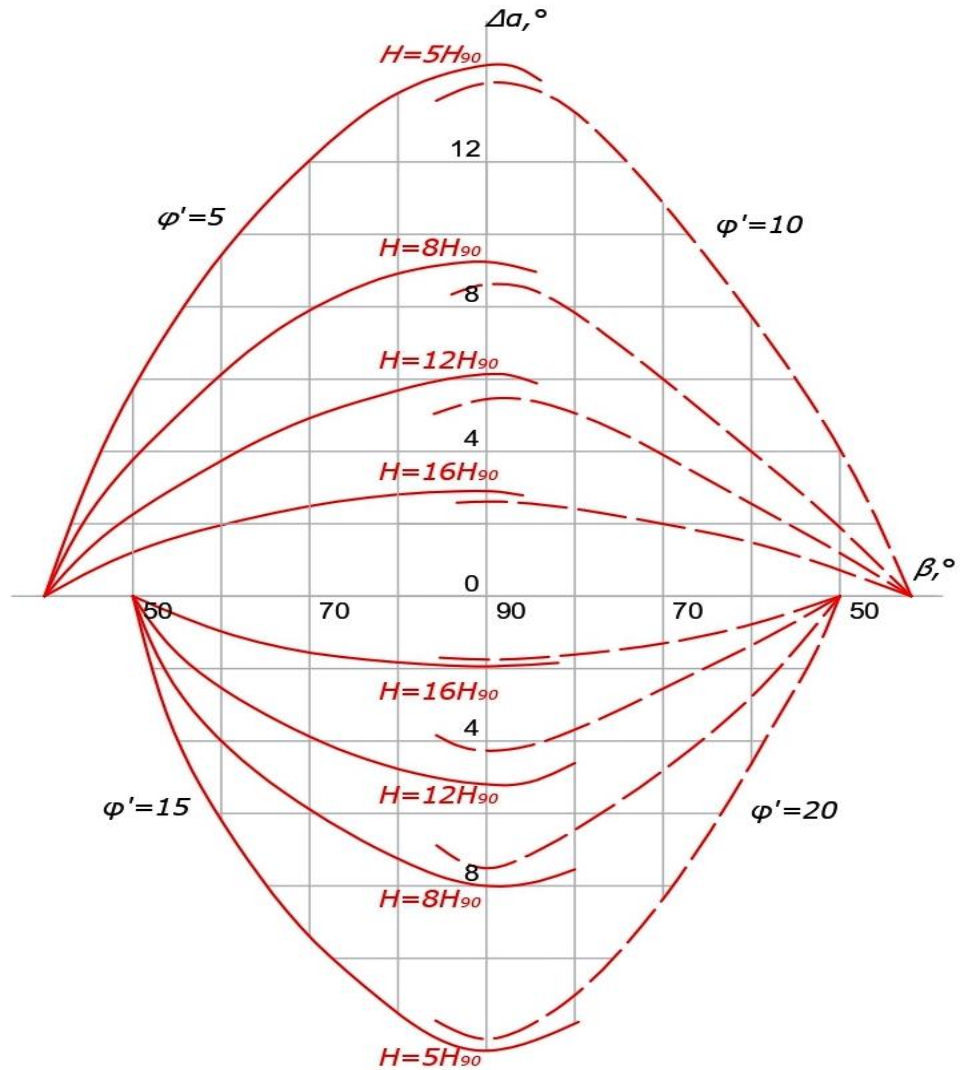
$$C_{\tau} = \frac{\sin(\arctg \frac{\delta_p}{K} \cdot \cos \beta)}{\sin(\arctg \frac{\delta_p}{K} + \beta)}, \quad (1.3)$$

где K_{β} – величина сцепления вкрест наслоения, C_K – коэффициент снижения величины сцепления, β – угол наклона слоя, δ_p – временное сопротивление пород растяжению.

По результатам исследований Л. К. Новиковой предложен свой график отрицательных поправок к изотропному откосу [53, 63] (рисунок 1.10-1.12), который, в отличие от графика поправок Б. Г. Афанасьева, учитывает высоту откоса, величина которой представлена в относительных величинах от H_{90} .

Наиболее подробно механизм деформирования откосов при крутом несогласном с наклоном борта падении слоев приведен в работе Гудмана и Брэя [87]. На английском языке данный механизм разрушения называют «Toppling» (в

переводе с англ. – «опрокидывание»). Приведенные авторами классификации разработаны, главным образом, на примере естественных склонов.



Для графического интерполирования:

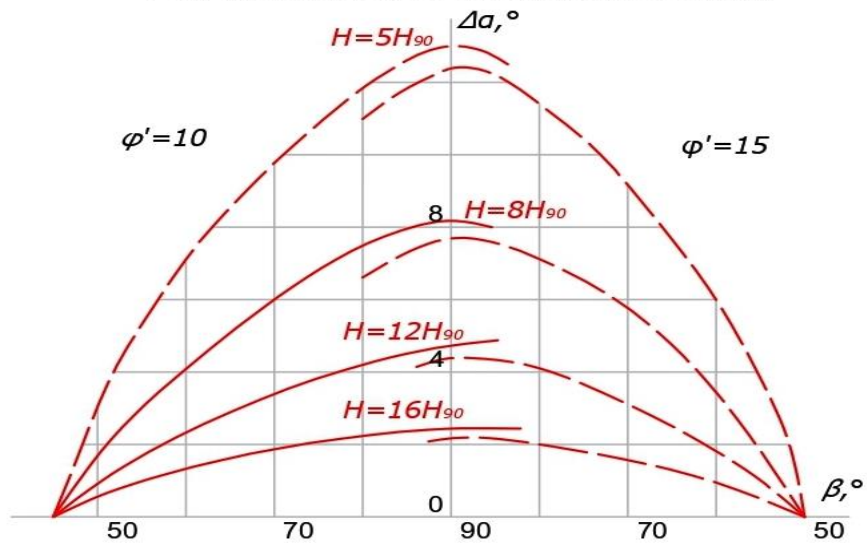
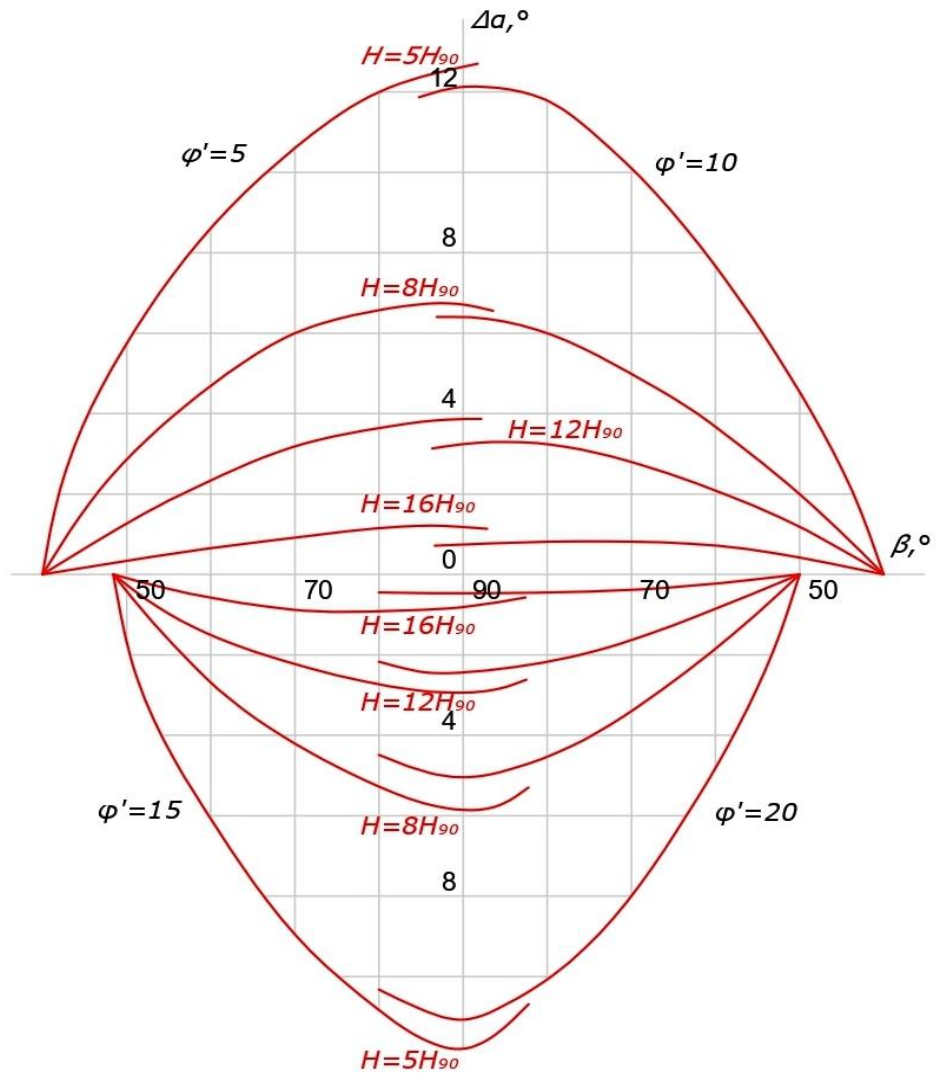


Рисунок 1.10 – График отрицательных поправок при величине угла внутреннего трения в массиве $\varphi = 25^\circ$ (β – угол наклона слоев, Δa – величина поправки, φ' – величина угла внутреннего трения по контактам слоев)



Для графического интерполирования:

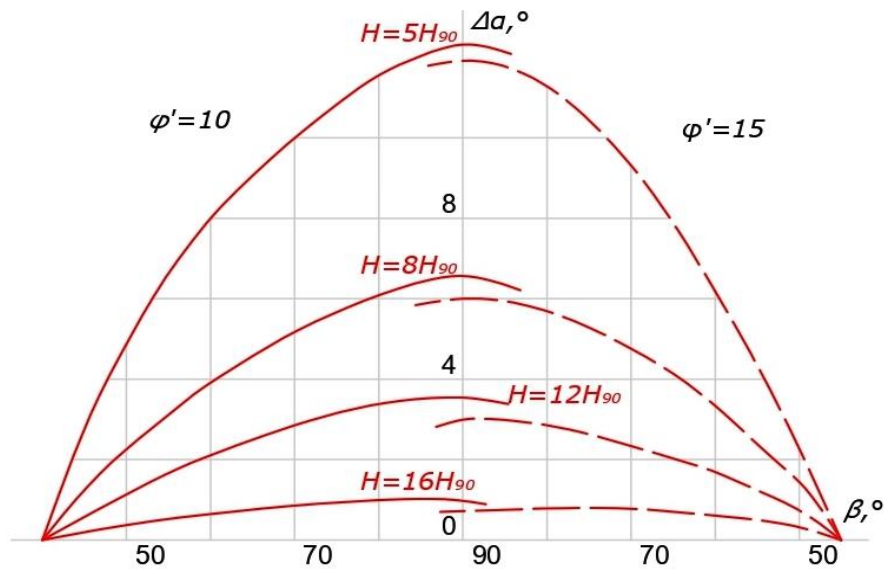
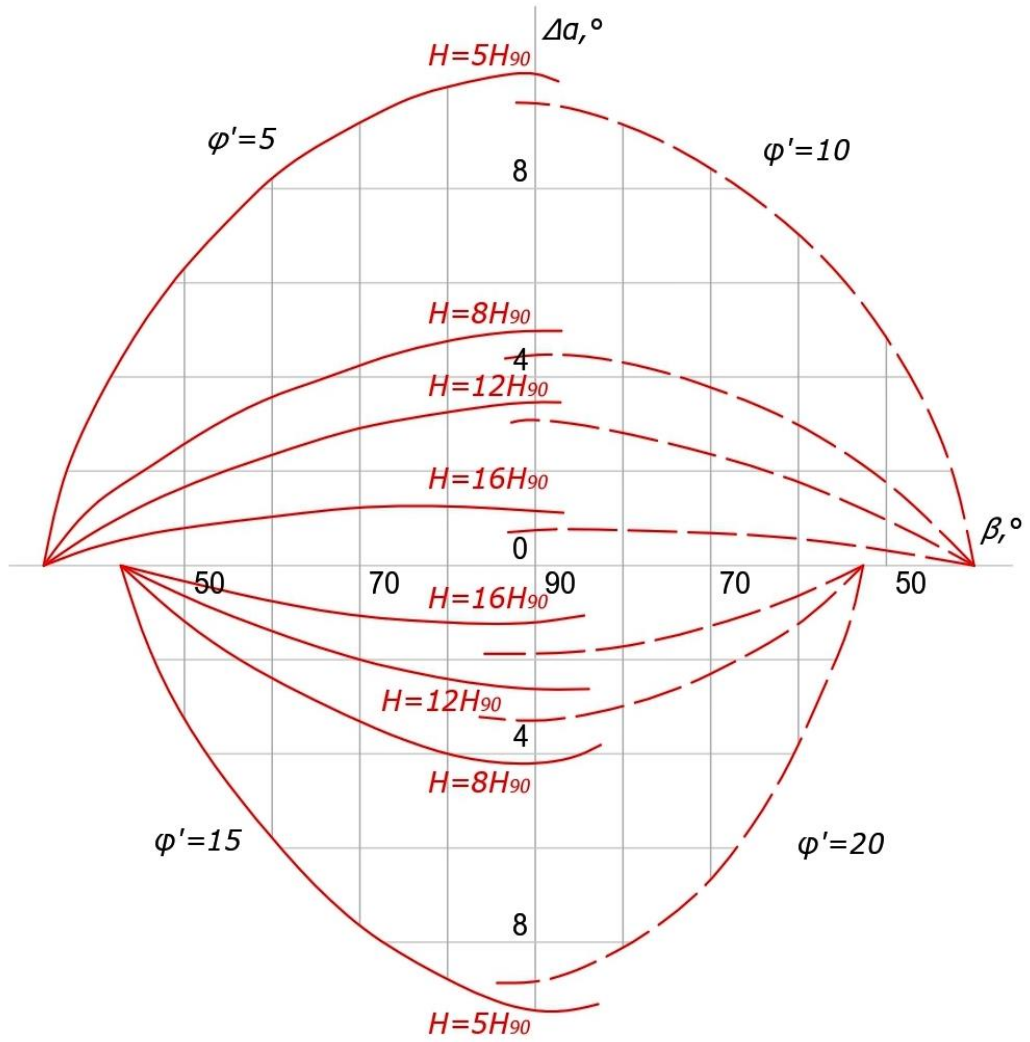


Рисунок 1.11 – График отрицательных поправок при величине угла внутреннего трения в массиве $\varphi = 30^\circ$



Для графического интерполирования:

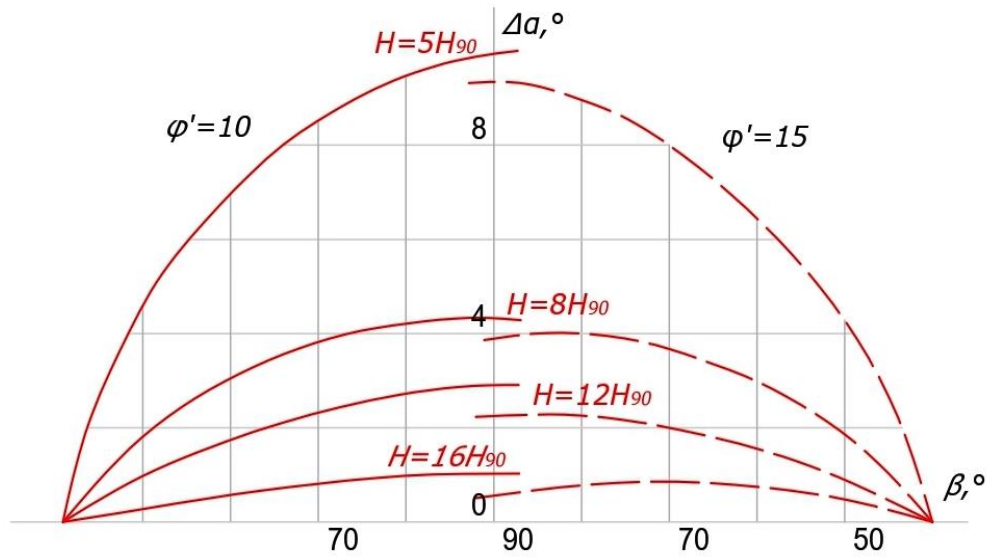


Рисунок 1.12 – График отрицательных поправок при величине угла внутреннего трения в массиве $\varphi = 35^\circ$

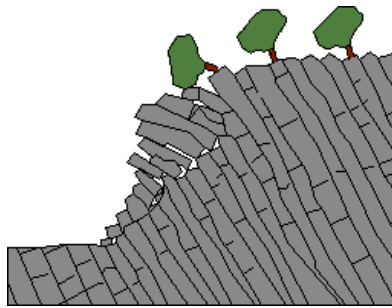
Согласно работе [87] под понятием «Toppling» понимается механизм разрушения прибортового массива или его участка, включающий опрокидывание системы блоков, образованных плоскостями слоев, кливажом или трещиноватостью, которые направлены вдоль откоса и имеют несогласное с наклоном борта падение слоев. Причем механизм опрокидывания может проявляться не только в скальных массивах, но и в мягких грунтах.

Гудман и Брэй установили, что опрокидывание может быть первичным и вторичным. Причем каждый из этих механизмов имеет свои разновидности (таблица 1.1, рисунки 1.13 и 1.14.).

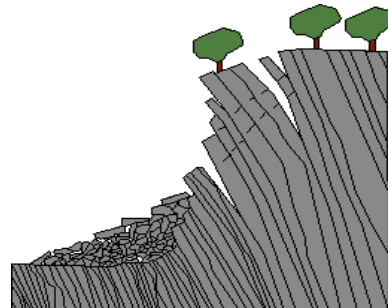
Опрокидывание слоев откоса обычно протекает с невысокой скоростью. При этом в процесс деформирования может быть включен значительный объем горных пород с распространением трещин отрыва и последующим обрушением откоса. Обрушение чаще всего начинается в области подошвы откоса при понижении горных работ или в процессе эрозии.

Таблица 1.1 – Механизмы разрушения откосов при крутом падении слоев, направленных в сторону выработанного пространства

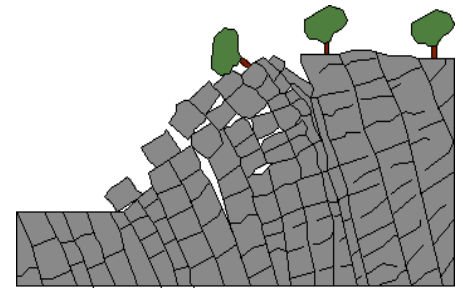
Первичное опрокидывание	Вторичное опрокидывание
1. Деформирование откоса путем изгиба слоев (flexural toppling)	1. Опрокидывание блоков в верхней части откоса ввиду скольжения блоков пород, залегающих в призме упора (slide-head-topple)
2. Деформирование откоса путем опрокидывания блоков (Block toppling)	2. Опрокидывание происходит при резкой деформации вышележащего грунта либо при понижении горных работ (slide-base-toppling)
3. Деформирование откоса с элементами изгиба слоев и опрокидывания блоков (Block flexure toppling)	3. Опрокидывание призмы упора происходит под действием скольжения призмы активного давления (slide-toe-toppling)
–	4. Опрокидывание блоков, образованных в результате формирования трещин отрыва (tension crack toppling)



Деформирование откоса путем опрокидывание блоков (Block toppling)

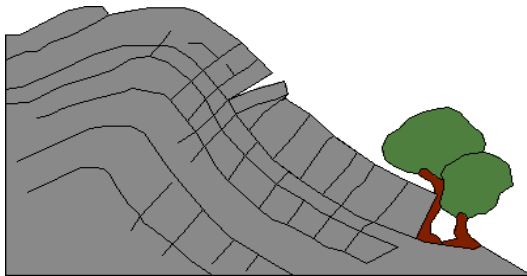


Деформирование откоса путем изгиба слоев (flexural toppling)

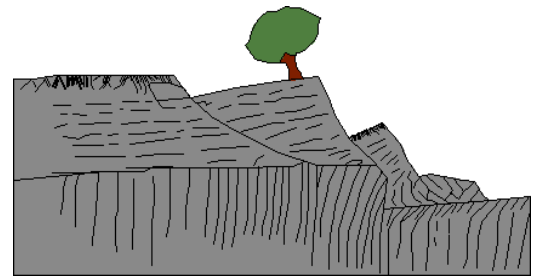


Деформирование откоса с элементами изгиба слоев и опрокидывания блоков (Block flexure toppling)

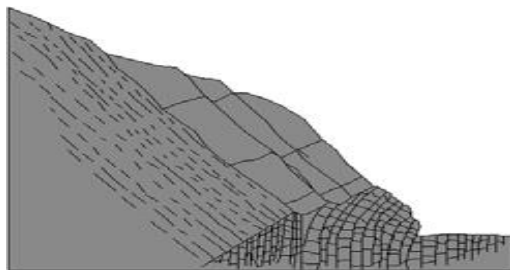
Рисунок 1.13 – Механизмы первичного опрокидывания блоков прибортового массива



Опрокидывание блоков в верхней части откоса ввиду скольжения блоков пород, залегающих в призме упора

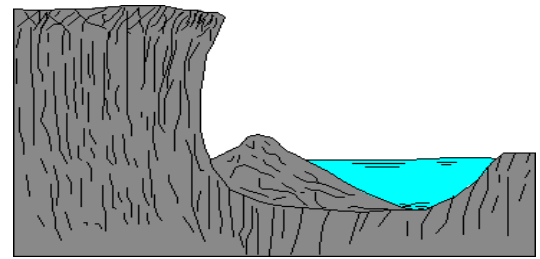


Опрокидывание происходит при резкой деформации вышележащего грунта либо при понижении горных работ (slide-base-toppling)



(slide-head-topple)

Опрокидывание призмы упора происходит под действием скольжения призмы активного давления (slide-toe-toppling)

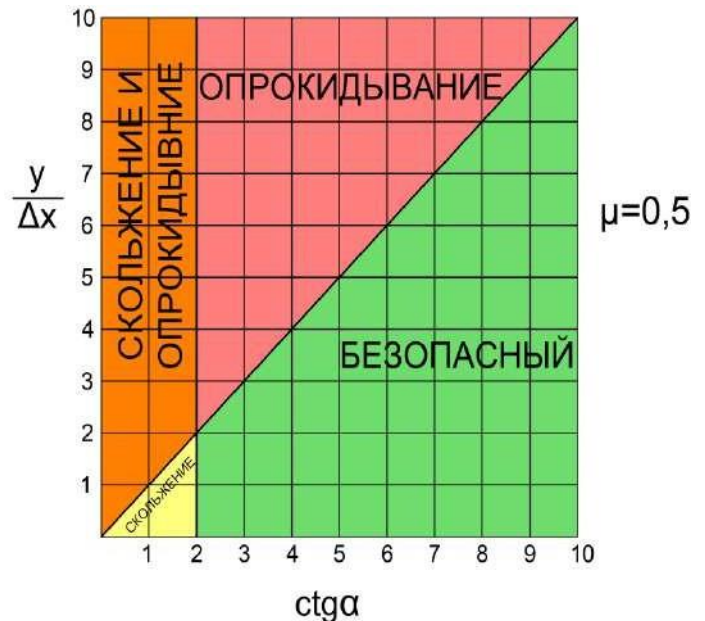
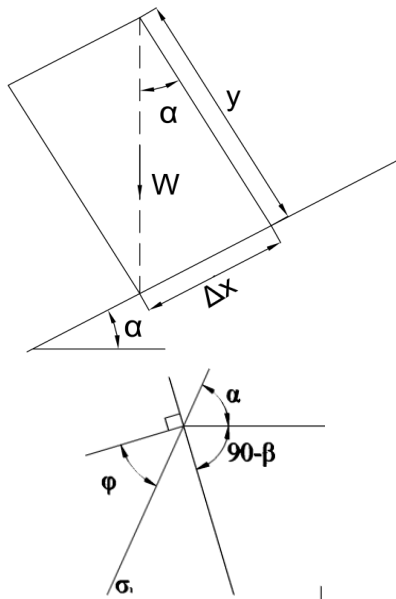


Опрокидывание блоков, образованных в результате формирования трещин отрыва (tension crack toppling)

Рисунок 1.14 – Механизмы вторичного опрокидывания блоков прибортового массива

На рисунке 1.15 схематично показан пример, иллюстрирующий условия, необходимые для опрокидывания блока. Очевидно, что если угол наклона основания меньше угла трения контакта между блоком и основанием, то блок не будет скользить. С другой стороны, опрокидывания также не будет, если соблюдается условие, $y/\Delta x < \text{ctg}\alpha$. Однако в реальном массиве откос состоит, как

правило, из нескольких блоков. Причем блоки взаимодействуют между собой и имеют больше степеней свободы.



Опрокидывания не будет, если: $y / \Delta x < \text{ctg}\alpha$

Совмещенный критерий скольжения и опрокидывания по

Скольжения не будет, если: $\varphi > \alpha$ или $1/\mu < \text{ctg}\alpha$

Хуку и Брэю (1974)

Рисунок 1.15 – Механизмы вторичного опрокидывания блоков прибортового массива

Согласно [87], напряженное состояние в откосе является одноосным, поэтому главное напряжение σ_1 направлено параллельно плоскости откоса. Слои начинают свое скольжение относительно друг друга при отклонении вектора σ_1 от нормали к плоскости слоев под углом трения φ . В этом случае условие межслойного скольжения возможно при условии: $\alpha \geq \varphi + \beta$.

Однако Гудман и Брэй отмечают, что значительное влияние на опрокидывание также оказывают следующие факторы: высота откоса, мощности слоев, прочностные свойства самой породы и их контактов, наличие пересекающих трещин, обводненность и т.д.

В результате проведенных исследований [87], была разработана методика расчета устойчивости откоса на основе теории предельного равновесия, учитывающая его деформирование путем опрокидывания блоков и наличие подстилающей трещиноватости (Block toppling). Данный метод реализован в программе RocTopples (Rockscience Inc., Canada), рисунок 1.16.

Оценка устойчивости откосов при обратной слоистости также может быть выполнена с использованием численных методов [86, 88, 0, 92]. Однако их применение связано с большими трудозатратами, чем использование аналитического алгоритма, основанного на методе предельного равновесия.

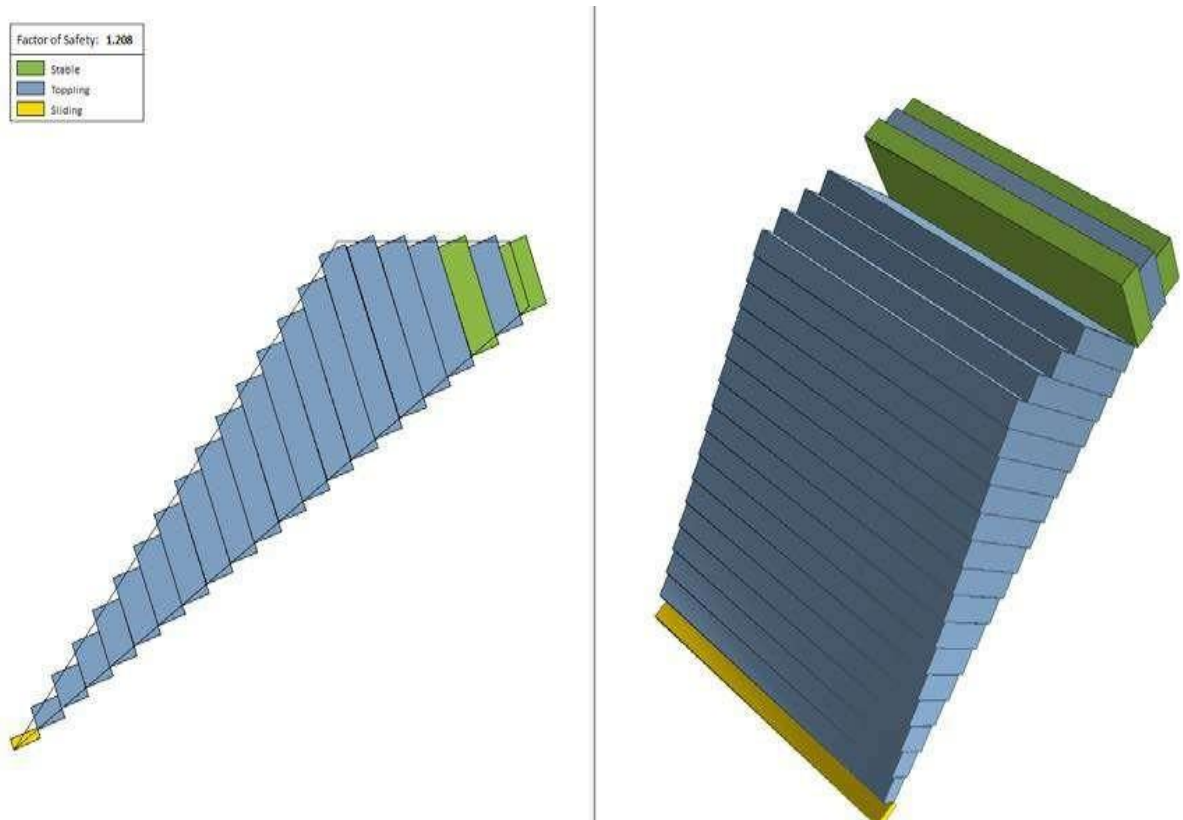


Рисунок 1.16 – Схема расчета устойчивости уступа с обратным падением слоев

Анализ результатов расчетов с использованием программы RocTopple показал, что с увеличением угла наклона крутопадающей слоистости, направленной в массив, угол откоса при одной и той же высоте увеличивается, рисунок 1.16 [78]. Это связано с тем, что при углах наклона контакта в диапазоне $55^\circ \leq \beta \leq 80^\circ$ нормальная составляющая от веса блока направлена не на его основание (увеличение удерживающей силы), а на нижележащий блок. В то же время при возможности реализации механизма опрокидывания, получаемые результаты имеют лучшую сходимость с натурными условиями, чем при использовании других расчетных схем (клин, сдвиг по трещине, однородный откос).

Также следует отметить, что расчетная схема Гудмана и Брэя «весьма чувствительна» к мощности слоев, рисунок 1.17. Приведенные на графике изломы

линий связаны с тем, что по мере изменения мощности слоя меняется соотношение блока $y/\Delta x$ и, соответственно, меняется режим кинематического движения блока (скольжение, опрокидывание, устойчивость).

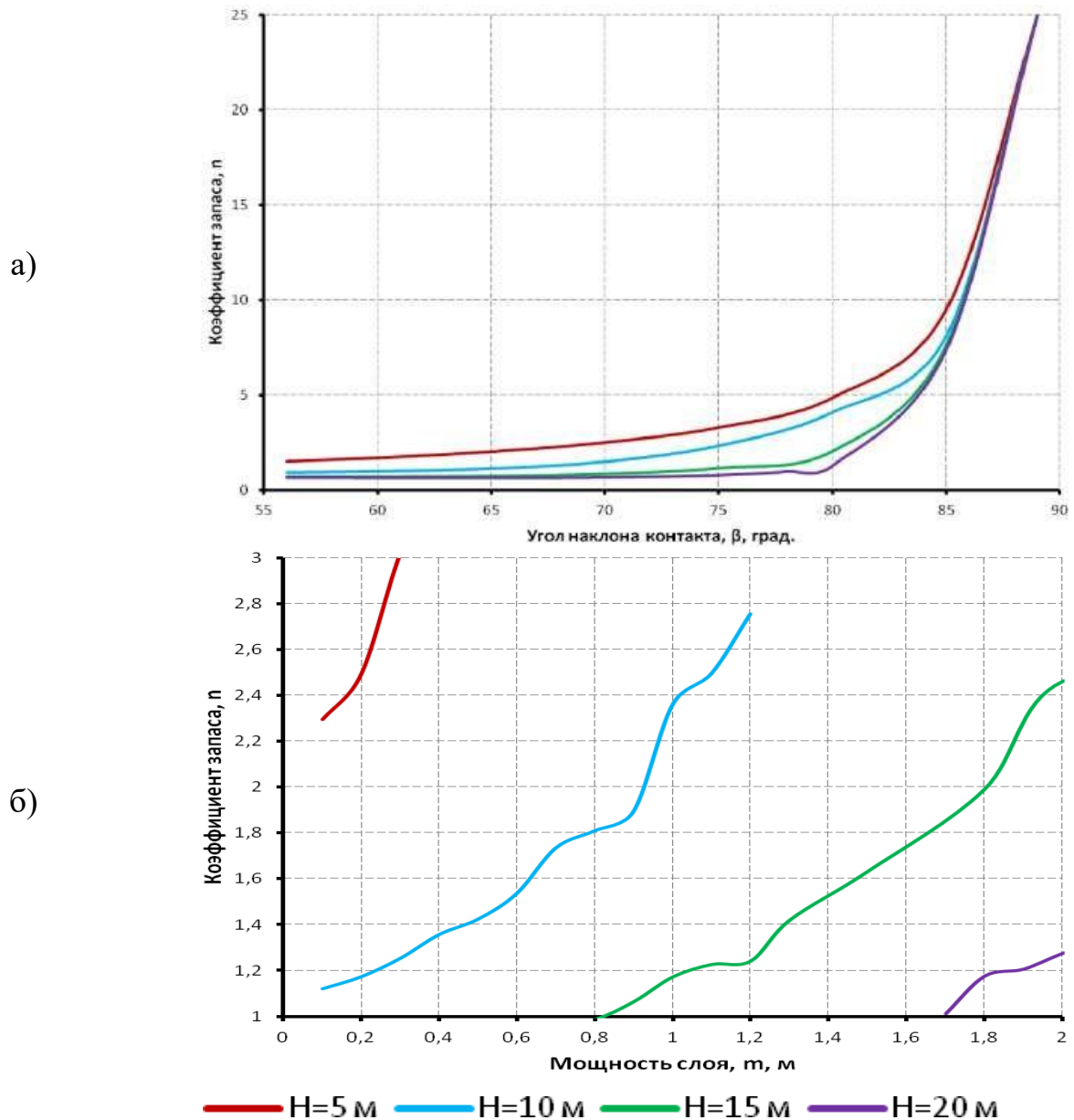


Рисунок 1.17 – График зависимости коэффициента запаса устойчивости уступа различной высоты от угла наклона падения слоев (а) и от их мощности (б)

На Западе оценка кинематической возможности деформирования откоса путем опрокидывания блоков является обязательным требованием и относится к одной из основных расчетных схем при расчетах устойчивости уступов и участков борта.

Методика, разработанная Гудманом и Бреем [87], больше применима для расчетов устойчивости уступов, участков бортов и не учитывает такие процессы,

как изгиб слоев и их последующий срез, характерный для бортов карьеров. причем обязательным условием применения методики является наличие подсекающей трещины.

1.5 Выводы по первой главе

В первой главе осуществлен анализ методов оценки устойчивости бортов карьеров и естественных откосов. Приведено описание факторов, оказывающих влияние на устойчивость откосов.

В связи с развитием горной науки горное производство охватывает все больше месторождений, отличающихся своей «уникальностью» и требующих перед оценкой устойчивости откосов разработки новых решений в рамках нестандартных задач. К таким месторождениям можно отнести те, при разработке которых образуются борта карьеров с обратной слоистостью, в которых создаются условия для деформирования откосов в виде изгиба или опрокидывания крутопадающих слоев. Данный вид деформирования отличается от типовых разработанных схем оценки устойчивости откосов, и прогноз геомеханических процессов в таком случае становится менее точным.

Описанные в первой главе методы, разработанные как в России, так и за рубежом, имеет ряд недостатков, которые ограничивают их использование. В первую очередь стоит отметить, что методы оценки устойчивости с обратным падением, вошедшие в нормативные документы [61], не учитывают величину сцепления по контактам. Однако за счет смерзания контактов слоев горных пород происходит изменение их прочностных характеристик, что оказывает влияние на предельные параметры откосов, а также на характер деформирования прибортовых массивов.

В связи с тем, что 65% территории России находится в зоне многолетней мерзлоты, в настоящее время в эксплуатацию вводится все больше месторождений в данных условиях, при разработке которых образуются борта с обратным крутым падением слоев. Таким образом, существующие методы оценки устойчивости бортов карьеров требуют дальнейшей разработки.

ГЛАВА 2 ЛАБОРАТОРНЫЕ ИСПЫТАНИЯ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ МЕРЗЛЫХ ГОРНЫХ ПОРОД И СОПОСТАВИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ИССЛЕДОВАНИЙ ПРОШЛЫХ ЛЕТ

2.1 Общие сведения о мерзлых горных породах

Согласно ГОСТ 25100-95 Грунты. Классификация, грунт мерзлый – это грунт, имеющий отрицательную или нулевую температуру, содержащий в своем составе видимые ледяные включения и (или) лед цемент и характеризующийся структурными криогенными связями.

Многолетнемерзлые породы представляют собой породы, которые непрерывно находятся в мерзлом состоянии в течение трех и более лет. Среди мерзлых пород, в свою очередь, различают сингенетические и эпигенетические. Сингенетические появились одновременно с самой породой, а эпигенетические промерзли после накопления и формирования толщи пород. Особые свойства мерзлых пород определяются наличием в них влаги.

Площадь распространения многолетней мерзлоты занимает 65 % площади России, рисунок 2.1.



Рисунок 2.1 – Карта распространения многолетнемерзлых пород

Основной особенностью мерзлых пород являются различные показания прочностных характеристик в талом и мерзлом состояниях. Эти различия зависят от влажности, пористости, степени трещиноватости, дисперсности, длительности нагрузки, льдистости, наличия ледяных прослоек и углов их расположения, процентного содержания незамерзшей воды, а также циклов замораживания-оттаивания (ЦЗО). В зависимости от совокупности этих факторов породы могут вести себя как твердые или пластичные тела, причем поведение дисперсных и монолитных (скальных) пород может быть весьма различным.

2.2 Дисперсионные породы в условиях отрицательных температур

Мерзлый грунт представляет собой совокупность органоминеральных частиц с включениями незамерзшей воды (растворов) и газов, связанных поровым льдом.

По физическому состоянию вечномерзлые грунты разделяют на твердомерзлые, пластично-мерзлые и сыпучемерзлые.

В условиях низких температур лед оказывает цементирующее действие на дисперсные породы, в результате чего они становятся схожими с монолитами по структуре. В результате смерзания происходят изменения прочностных свойств мерзлых грунтовых пород. Этому вопросу посвящено множество исследований, анализируя которые, можно выделить следующие особенности:

1) В условиях отрицательных температур наблюдается увеличение прочностных характеристик грунта.

Изменения прочностных характеристик на стадии фазового перехода поровой воды (превращения воды в лед) для различных пород различны, и на ранних стадиях промерзания грунта имеется четкая зависимость от льдистости и наличия незамерзшей воды [84].

В работе [84] показано, что при понижении температуры от -1 до -2 °С количество незамерзшей воды при испытаниях на сжатие для песка уменьшается на 0,1 %, для глины на 5 % что, в свою очередь приводило, к увлечению предела прочности на сжатие первого на 15 %, второго на 35 %. При дальнейшем

понижении температуры прочность на сжатие также увеличивалась, что, помимо наличия льдистости и количества незамёрзшей воды, обуславливается изменением прочности льда, интенсивность возрастания которого меняется по сложному закону.

При понижении температуры до -20 °С интенсивность увеличения прочности льда снижается, но при дальнейшем снижении температуры прочность возрастает [85]. Увеличение прочности льда в свою очередь обусловлено, тем, что при понижении температуры подвижность атомов, имеющих слабую водородную связь, уменьшается, что приводит к увеличению прочности, для которой имеется предел. Стоит отметить, что изменение скорости движения атомов в структурной решетке при различных температурах (до -20 и до -55) имеет разный характер.

По мнению ряда авторов [84, 16], сопротивление мерзлых грунтов на растяжение в 5-6 раз меньше сопротивления на сжатие, что объясняется увеличением числа контактов между частицами и уменьшением расстояния между ними при сжатии, а также меньшим числом контактов и увеличением расстояния при растяжении.

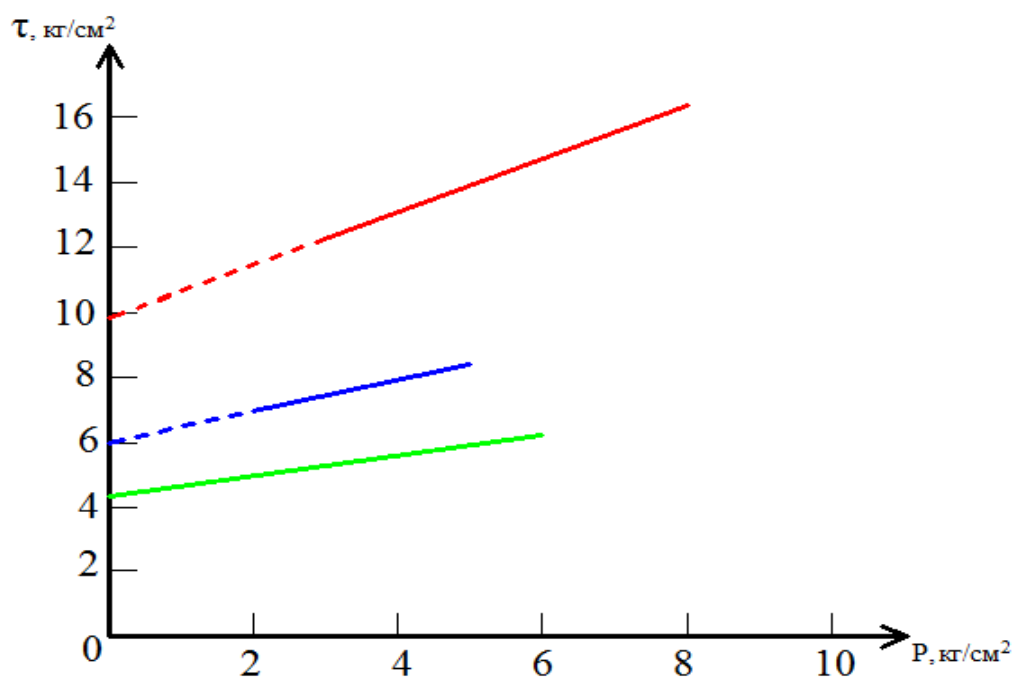
Пределы прочности на сжатие и растяжение при понижении температуры возрастает и также зависят от состава грунта, степени льдистости, влажности, текстуры и т.д., Кроме того прочностные характеристики мерзлого грунта зависят от скорости приложения нагрузки. Важно также отметить, что многолетнемерзлые грунты обладают пределом прочности на растяжение и, как было показано в опыте в Игарке [84], при растягивающем напряжении образец супеси при нагрузке $1,8 \text{ кГ/см}^2$ не разрушался на протяжении 6 лет.

При сдвиговой нагрузке сопротивление мерзлого грунта зависит от температуры, величины внешнего давления и влажности. Чем ниже температура, тем больше сопротивление грунта при сдвиговой нагрузке, а также тем больше сцепление и угол внутреннего трения. При температурах близких к 0, угол внутреннего трения, в сравнении с углом внутреннего трения талой породы, практически не меняется, зато наблюдается увеличение значений сцепления [84].

Наряду с вышеуказанными факторами, которые оказывают влияние на прочность грунта при сдвиговых нагрузках, установлена также ее зависимость от текстуры.

Сравнивая массивную и слоистую текстуру грунта, льдистость последнего будет выше, а так как лед обладает большими прочностными характеристиками, чем массивная текстура грунта, то грунт с такой текстурой также обладает большими прочностными характеристиками, чем слоистый мерзлый грунт, если зона сдвига проходит через ледяные прослойки [58]. Оценивая прочностные характеристики слоистого грунта, необходимо учитывать, что чем больше площадь контакта заполнена льдом, тем выше показатель прочности.

Если сравнивать прочностные характеристики при сдвиге между зоной направления усилия проходящую через ледяную прослойку, пересекающую массивную текстуру, или проходящую по контакту между льдом и породой, то наименьшей показатель прочности наблюдается у последнего варианта (рисунок 2.2), поэтому направление разрушения усилия тоже оказывает влияние на прочностные показатели.



τ – сопротивление породы сдвигу, P – нормальная нагрузка, красная линия – грунтовый лед, синяя линия – суглинок слоистой текстуры, зеленая линия – суглинок массивной текстуры

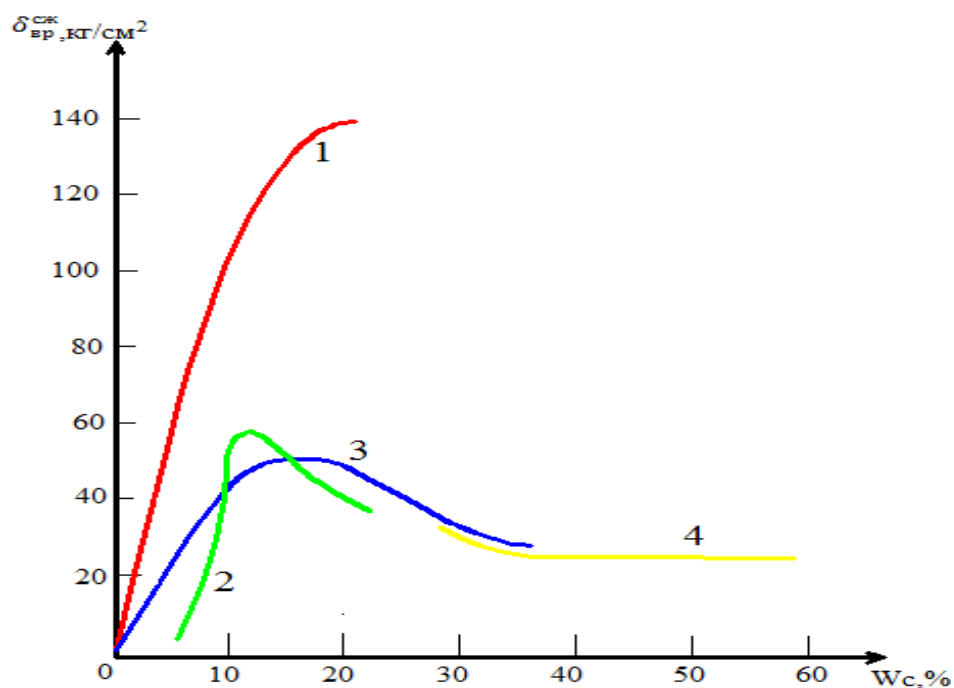
Рисунок 2.2 – Диаграмма сдвига мерзлого грунта и льда при быстром приложении нагрузки [58]

2) *Изменение прочности грунта при его замораживании в значительной мере зависит от исходной степени водонасыщения.*

При исследовании влияния плотности и влажности на прочность смерзания песчаника можно отметить работу Е. Л. Алькова [1]. По результаты исследований данной работе установлено следующее:

- при увеличении влажности от 5 % до 15 % и понижении температуры от -5 C° до -15 C° прочность на сдвиг песчаника возрастает в 5 раз;
- с увеличением плотности от $1,5\text{ г/см}^3$ до $1,8\text{ г/см}^3$ прочностные свойства песчаника возрастают в 4,6 раза;
- разуплотненные породы с влажностью менее 5 % не смерзались.

При доведении грунта до полной водонасыщенности практически все его поры заполняются водой. При отрицательных температурах вода превращается в лед, в результате чего частицы грунта скрепляются и превращаются в единый монолит. Однако при дальнейшем увеличении влажности до полной водонасыщенности и перенасыщенности прочность пород снижается и приближается к прочности льда, рисунок 2.3 и 2.4 [84].



1-песок, 2-супесь, 3-глина (содержание фракций $0,005\text{ мм} - 51\%$), 4 – пылеватая глина (содержание фракции $< 0,005\text{мм} - 63\%$)

Рисунок 2.3 – Зависимость временного сопротивления сжатию $\delta_{вр}^{сж}$ мерзлых грунтов от их суммарной влажности W_c

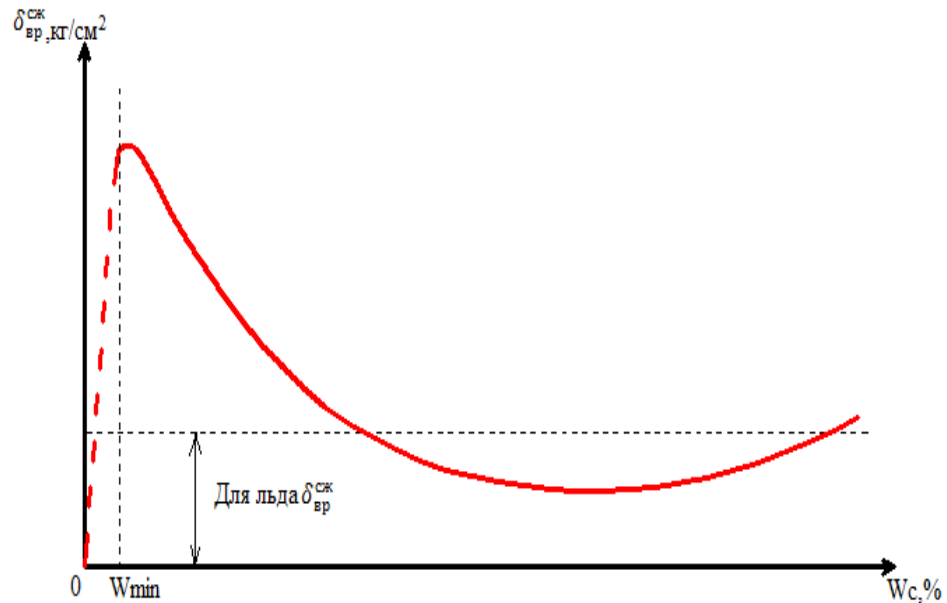


Рисунок 2.4 – Общий характер зависимости сопротивления мерзлых грунтов сжатию $\delta_{вр}^{сж}$ от влажности W_c

3) Прочностные характеристики грунта зависят от скорости приложения нагрузки (мгновенная и длительная нагрузка).

Мгновенная прочность – прочность, характеризующая сопротивление грунта от прикладываемой к нему кратковременной нагрузке. Предельно-длительная прочность – прочность, характеризующая сопротивление грунта нагрузкам, при которых деформация имеет затухающий характер и не переходит в вязко-пластичное течение, которое заканчивается разрушением.

Различие между мгновенной и длительной прочностью заключается в том, что при мгновенных нагрузках лед характеризуется высокими прочностными характеристиками, что, соответственно, приводит к повышению сопротивляемости грунта нагрузке, в то время как для активации процесса таяния требуется время.

При длительном воздействии внешних сил, в связи с таянием льда, возникает релаксационное напряжение, которое проявляется в виде затухающей или не затухающей ползучести, что способствует нарушению контактов связей, образованию микро- и макротрещин и т.д. [16].

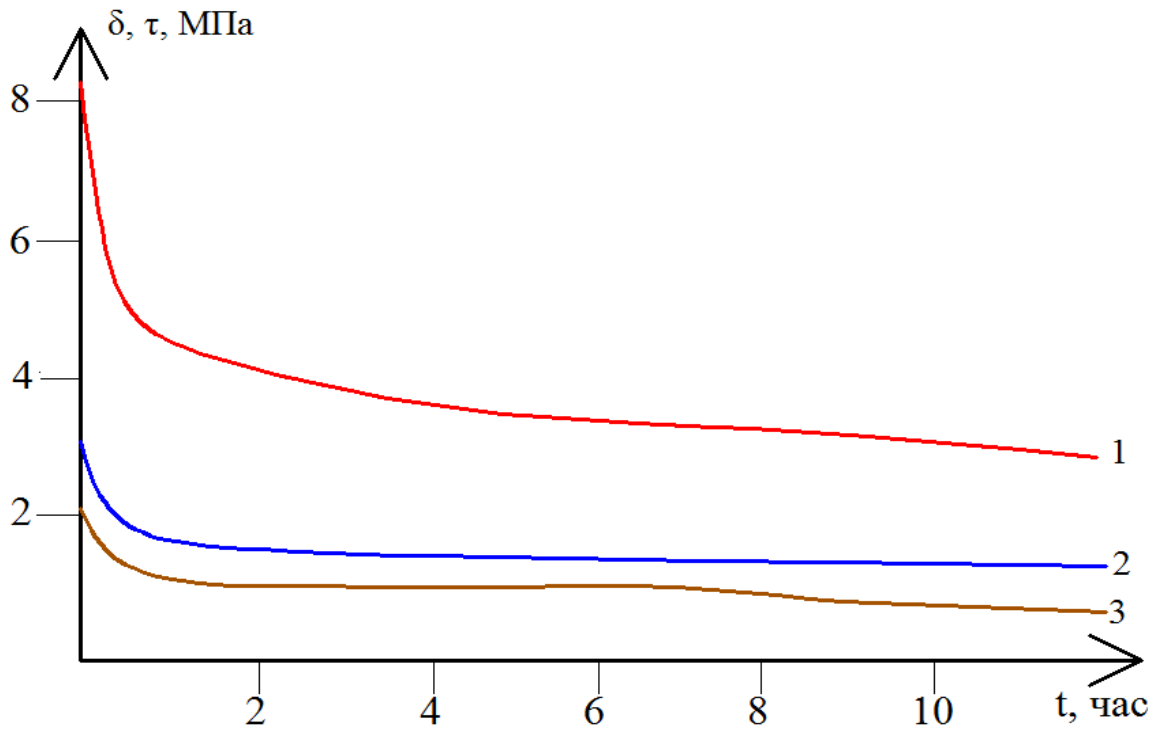
Наблюдения Вялова С.С. [16] показывают, что длительная прочность мёрзлых грунтов в 2-15 раз меньше мгновенной прочности. Снижение длительной прочности зависит от типа грунта, степени льдистости - влажности, температуры и вида напряженного состояния.

Исходя из анализа сравнения прочностных характеристик мерзлого грунта при мгновенных и длительных нагрузках, было установлено, что предел прочности на сжатие при длительных нагрузках снижается в 1,5-3 раза, на растяжение – 12-15 раз, на сдвиг в – 2,5-6,5 раз. Резкое снижение прочности наблюдалось в начальной стадии процесса, затем интенсивность снижения резко замедлялась и образцы разрушались через 250-350 дней.

Сравнивая прочностные характеристики мерзлого грунта при различной скорости нагружения, следует отметить, что прочность на сжатие имеет наибольший показатель как при мгновенной, так и при длительной нагрузке, рисунок 2.5 [16]. Прочность на сжатие при мгновенных нагрузках больше прочности на растяжение в 2,6 раза и больше, чем при сдвиге в 3,1 раз. Для предельно-длительной прочности эти соотношения составляют 2,64 и 3,63 соответственно. Большая прочность на сжатие обусловлена в первую очередь тем, что при сближении частиц силы молекулярного сцепления увеличиваются, как указывалось выше.

Различия между мгновенной и длительной прочностью характеризует график зависимости предела прочности на сдвиг от времени воздействия нагрузки, рисунок 3.6 [84, 16]. Как показывает график, пересечение кривой с осью ординат характеризует значение мгновенной прочности. С течением времени происходит уменьшение сопротивляемости грунта внешним нагрузкам, связанное, как указывалось выше, с таянием льда в породе, что приводит к снижению прочностных характеристик.

Мгновенная прочность зависит от скорости нагружения: чем больше скорость, тем выше показатель предела прочности, рисунок 2.7. Также очень резко выражена зависимость мгновенной прочности от температуры и влажности, как показано на рисунке 2.8 [16].



(1 – одноосное сжатие, 2 – растяжение, 3 – чистый срез)

Рисунок 2.5 – Кривые длительной прочности келловейской супеси ($t = -10^\circ\text{C}$) при различных видах испытаний

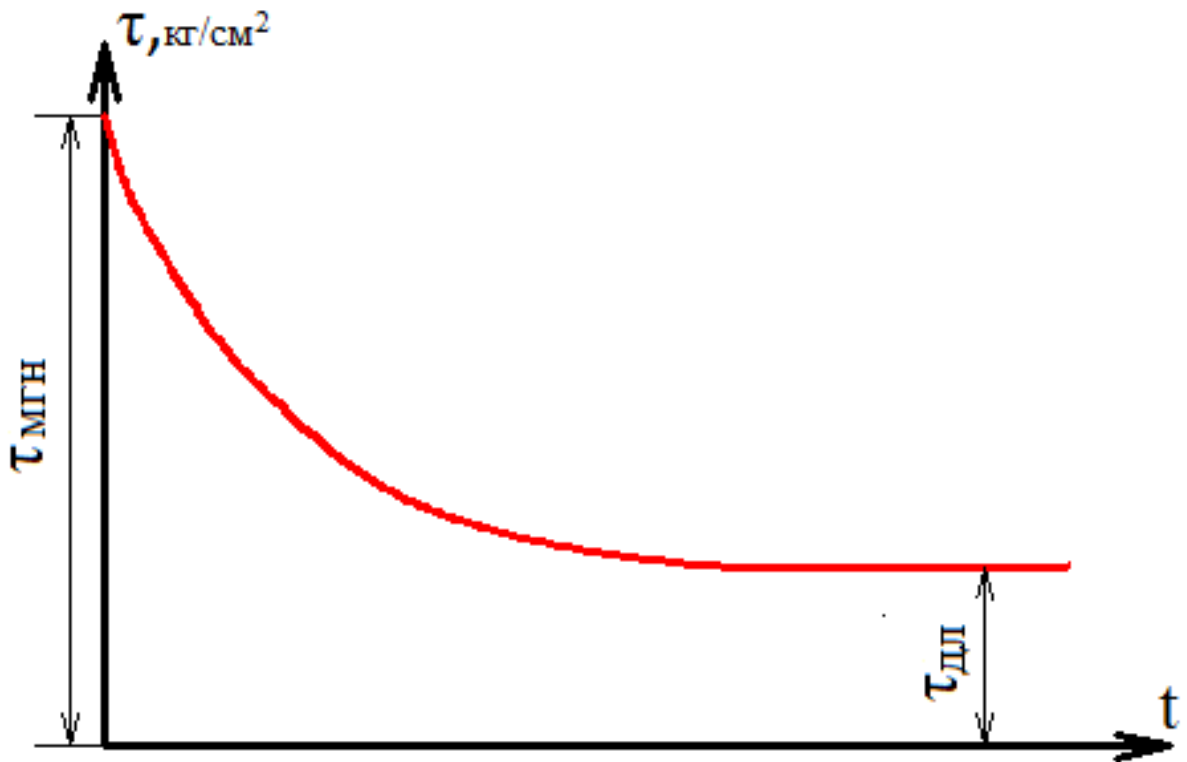


Рисунок 2.6 – Зависимость сопротивления мерзлого грунта сдвигу от продолжительности действия сдвигающего усилия

Эксперименты, проведенные в Горном университете на образцах скальной разрыхленной отвальной массы с влажностью 5 % и рыхлых породах основания отвалов, представленных супесью, при влажности 10 %, показали, что при замораживании образцов при температуре -5°C происходит резкое увеличение их несущей способности, таблица 2.1.

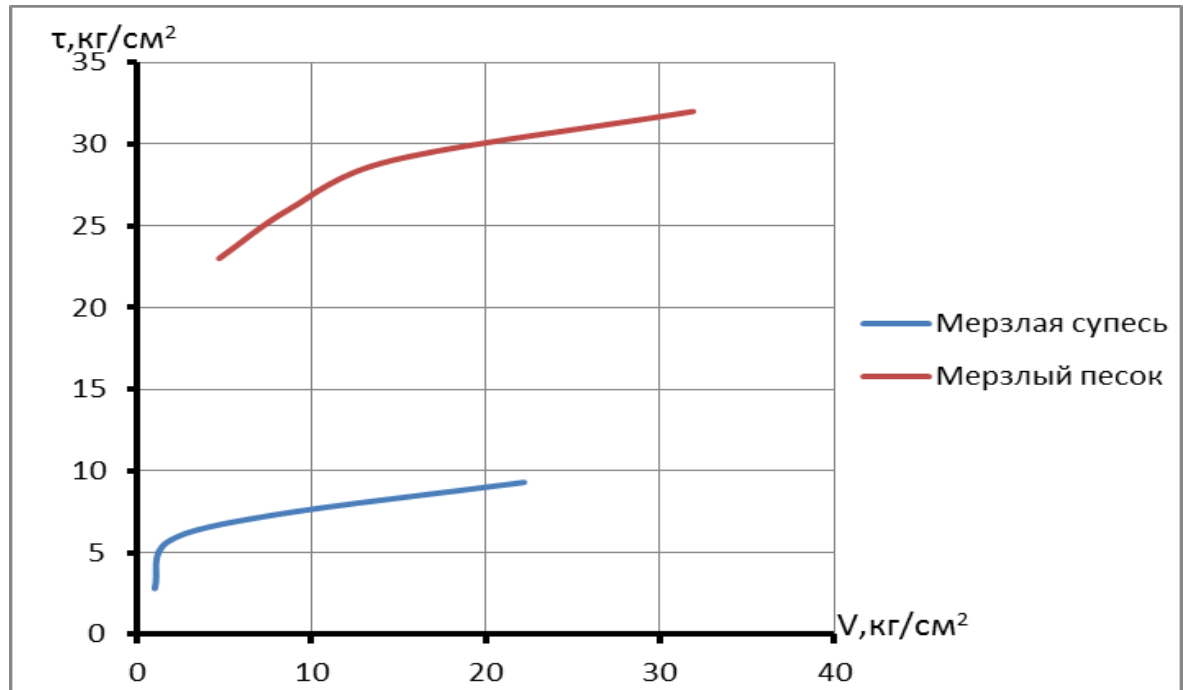
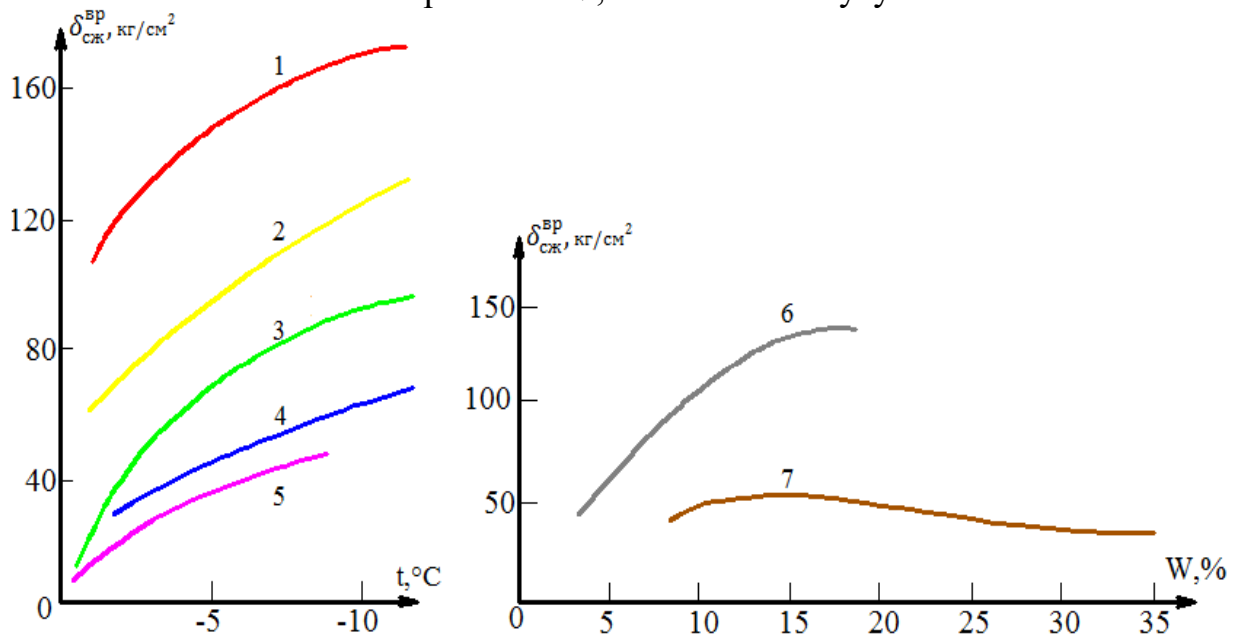


Рисунок 2.7 – Зависимость прочности смерзания τ , кг/см² от скорости напряжения V , кг/см² в 1 минуту



1-пылеватый песок; 2 – кварцевый песок; 3 – супесь; 4 - глина; суглинок тяжелый; 5 – лед; 6 – песок; 7 – глина

Рисунок 2.8 – Зависимость временного сопротивления сжатию мерзлого грунта от температуры и влажности [16]

Мерзлые грунты имеют повышенные прочностные характеристики при мгновенных кратковременных нагрузках, о чем можно также судить из опытов Н. К. Пекарской, где песок при скорости нагружения $500-900 \text{ кг/см}^2$ при температуре -40°C показал предел прочности до 154 кг/см^2 , глина до 750 кг/см^2 [58].

При длительном воздействии внешней нагрузки, вследствие плавления льда, происходит течение мерзлого грунта, в результате чего развиваются пластические деформации, которые, в зависимости от приложенной нагрузки, могут характеризоваться как затухающая или не затухающая ползучесть. Если приложенная нагрузка больше предела длительной прочности, то развивается незатухающая ползучесть, что приводит к дальнейшему хрупкому или пластическому разрушению. Если приложенная нагрузка меньше предела длительной прочности, то развивается затухающая ползучесть, которая характеризуется постепенным уменьшением скорости необратимых деформаций в пределе стремящемся к нулю.

В исследованиях длительной прочности при сдвиговых нагрузках установлено, что основной спад прочностных характеристик главным образом происходит за счет спада сцепления, а не угла внутреннего трения.

Особое влияние длительной нагрузки на прочность мерзлого грунта изучалось в работе Н. К. Пекарской [58]. Известно, что прочность льда при длительных нагрузках равна нулю. Если при условно мгновенных нагрузках лед имеет наибольшие прочностные характеристики ввиду смерзания частиц грунта, то при длительных нагрузках лед тает, что приводит к уменьшению несущей способности грунта. Однако, говоря о длительности нагрузки, нужно учитывать временные рамки воздействия внешних сил, а также то, как за время воздействия нагрузки меняются прочностные характеристики грунтов.

Таблица 2.1 – Физико-механические свойства образцов талой и замороженной отвальной массы и грунтов

Состав пробы	Давление уплотнения, МПа	Предел прочности при одноосном растяжении σ_p , МПа	Предел прочности при одноосном сжатии σ_c , МПа	Коэффициент хрупкости σ_c / σ_p	Сцепление C_0 , МПа	Угол внутр. трения φ_0 , град
Замороженная порода основания отвала	0	1,168	3,92	3,4	1,39	32,6
		1,005	3,36	3,3	1,19	32,4
		0,928	3,06	3,3	1,09	31,9
	0,7	1,711	6,20	3,6	2,10	35,6
		1,628	5,82	3,6	1,99	35,1
		1,501	5,44	3,6	1,85	35,6
	1,4	2,215	7,84	3,5	2,70	34,7
		1,950	7,14	3,7	2,41	36,0
		1,790	6,33	3,5	2,18	34,7
Талая порода основания отвала	0	–	–	–	0,005	31,6
		–	–	–	0,011	33,0
	0,7	–	–	–	0,029	32,6
		–	–	–	0,025	33,6
	1,4	–	–	–	0,054	32,8
		–	–	–	0,052	32,8
Замороженная отвальная масса	0	0,515	1,82	3,5	0,63	34,6
		0,517	2,02	3,9	0,66	38,3
		0,526	2,32	4,4	0,71	42,4
	0,7	0,719	3,13	4,3	0,97	41,9
		0,974	3,81	3,9	1,24	38,3
		1,105	4,01	3,6	1,36	35,7
	1,4	0,982	4,49	4,6	1,35	41,5
		0,782	4,15	5,3	1,16	40,1
		0,947	4,57	4,8	1,34	40,5
Талая отвальная масса	0	–	–	–	0,006	35,3
	0,7	–	–	–	0,036	33,4
	1,4	–	–	–	0,048	32,4

Для оценки длительной порочности грунтов часть опытов проводилась ступенчатым способом нагружения [58], то есть каждую ступень нагрузки выдерживали до затухания деформации или установления пластического течения. Включая все ступени, продолжительность опытов составляла 2,5-3 месяца. При проведении испытаний при одинаковых нагрузках образец льда разрушался (фактически плавлением) в течение длительного времени, в то время как мерзлый грунт массивной структуры разрушался всего за пару минут. Это связано с тем, что лед имеет меньшую скорость течения, а, следовательно, большую сопротивляемость к малым нагрузкам, нежели мерзлый грунт. Такая же зависимость наблюдается при длительном воздействии нагрузки до 2,5-3 месяцев. Исходя из этого, можно сделать вывод, что лед в мерзлом грунте при длительности нагружения до 3 месяцев оказывает такое же положительное влияние на прочностные характеристики грунтов, как и при мгновенных нагрузках. Однако при построении кривых длительной прочности мерзлых грунтов и льда можно спрогнозировать, что в определенный момент лед становится менее прочным, чем мерзлый грунт, и будет негативно влиять на прочность грунта слоистой структуры. При оценке прочности грунтов необходимо исходить из предела величины деформации, а не из значения предельной длительной прочности, так как лед имеет большее сопротивление к разрушению, вязкость и меньшую скорость пластического течения в сравнении с мерзлым грунтом.

2.3 Скальные и полускальные породы в условиях низких температур

В криологических условиях воздействие отрицательных температур на скальные породы приводит к снижению их прочностных характеристик за счет расклинивающего действия льда в трещинах и порах. Процесс снижения прочности неоднозначен и для различных пород протекает по-разному. Определяющую роль в снижении прочности крепких пород играет степень пористости и трещиноватости, а также минералогический состав, тип заполнителя пор и трещин и другие факторы. Анализ результатов исследований прочности

крепких пород в условиях мерзлоты, проведенных различными учеными, позволяет выделить следующие особенности:

1) Прочностные свойства скальных горных пород и их контактов в замороженном состоянии больше прочности тех же пород в талом состоянии

Согласно [45, 61] прочностные свойства скальных и полускальных горных пород в условиях криолитозоны увеличиваются по сравнению с теми же породами в талом состоянии, таблицы 2.2 и 2.3.

Таблица 2.2 – Прочность в образце мерзлых и талых скальных и полускальных пород [61]

Породы	Мерзлые условия		Талые условия		Влажность W.%
	Величина сцепления C_0 , МПа	Угол внутреннего трения φ , град.	Величина сцепления C_0 , МПа	Угол внутреннего трения φ , град.	
Мергель с прослоями песчаника	11,0	32	7,5	26	4.6
Известняки песчанистые	9,0	36	5,8	36	1,4
Известняки глинистые	16,0	37	10,6	37	1.6
Алевролиты	10,0	30	5,0	30	6.5
Диабазы	30,0	36.5	23,0	36	0.66
Мергель	3,7	35	0,8	35	12,0
Песчаник мелкозернистый (цемент карбонатный)	26,0	–	25,0	33	–
Песчаник крупнозернистый (цемент железисто-гидролюдистый)	20,8	–	16,0	33	–

Таблица 2.3 – Значения сцепления и углов трения по трещинам [61]

Породы	Полное заполнение контактов трещины льдом		Частичное заполнение контактов трещины льдом		Немерзлые породы	
	C , МПа	φ , град.	C , МПа	φ , град.	C , МПа	φ , град.
Углистый песчаник	0,22	0,18	0,10	20	0,2	20
Уголь	0,14	0,10	0,10	14	0,2	15
Углистый аргиллит	0,30	0,15	0,10	15	0,2	15

Однако в данных работах также отмечается, что при влажности менее 0,2 % прочность пород в образце в талом и мерзлом состояниях практически не изменяется. Это относится к скальным породам, характеризующимся низкой пористостью, т. е. скальные породы в этом случае являются сухими и при отрицательной температуре находятся в морозном (охлажденном) состоянии.

2) Прочность горных пород зависит от температурного режима.

При замораживании горных пород лед увеличивается в объеме и расклинивает поры, что приводит к уменьшению несущей способности породы. При дальнейшем понижении температуры лед перестает расширяться, а соответственно, и расклинивать, что приводит к увеличению прочности пород.

Так, например, в работе [46] показано, что предел прочности на сжатие при температурах $-50 - -80$ °С снижается незначительно, при дальнейшем снижении прочность увеличивается и при температуре -150 °С становится на 50-70 % выше, чем предел прочности при естественных температурах. Изменение прочностных характеристик в работе объясняется двумя факторами:

1) развитием микротрещин на границах минеральных зерен под воздействием структурных термических напряжений;

2) упрочнением минералов.

Первый фактор оказывает преобладающее влияние при температурах $-50 - -80$ °С и способствует снижению прочности при дальнейшем снижении температуры; при увеличении прочности преобладает второй фактор.

Данный вывод подтверждают результаты лабораторных исследований прочностных свойств гранита в условиях отрицательных температур [46]. Как показывают результаты при температуре $-60 - -80$ С°, прочность на растяжения уменьшается в 1,2 раза. Однако при температуре отметки -180 С°, прочностные свойства гранита возрастают и превышают значение прочностных свойств, характерные при температуре $+20$ С°. Зависимости изменения прочности и энергии разрушения образцов гранита при снижении температуры приведены на рисунках 2.9 и 2.10.

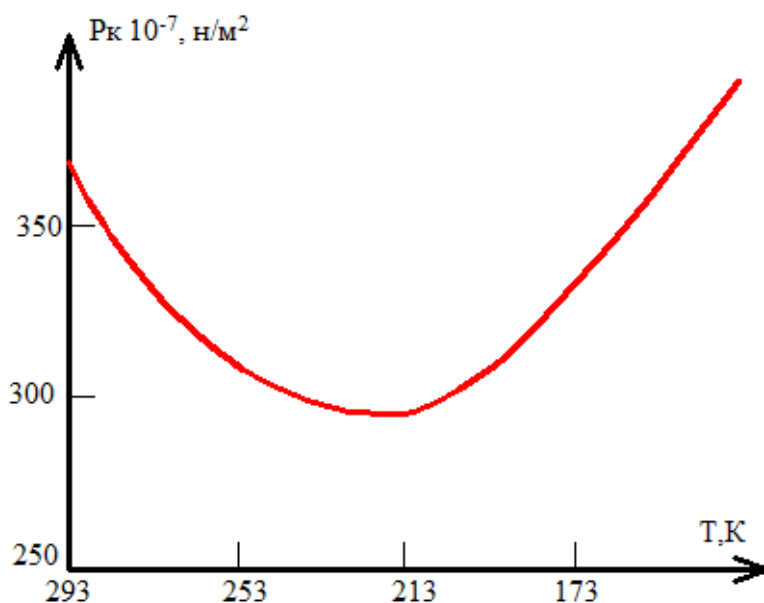


Рисунок 2.9 – Заивисимость прочности гранита от температуры

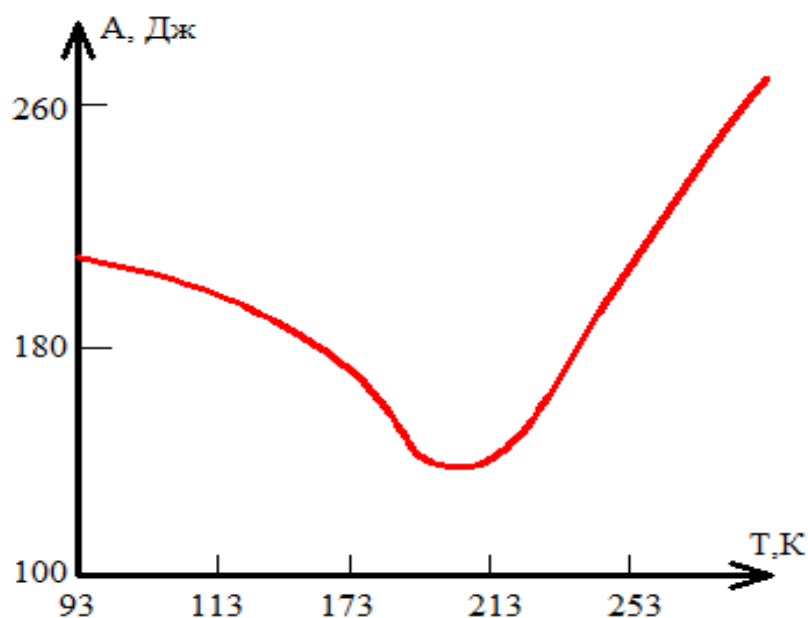
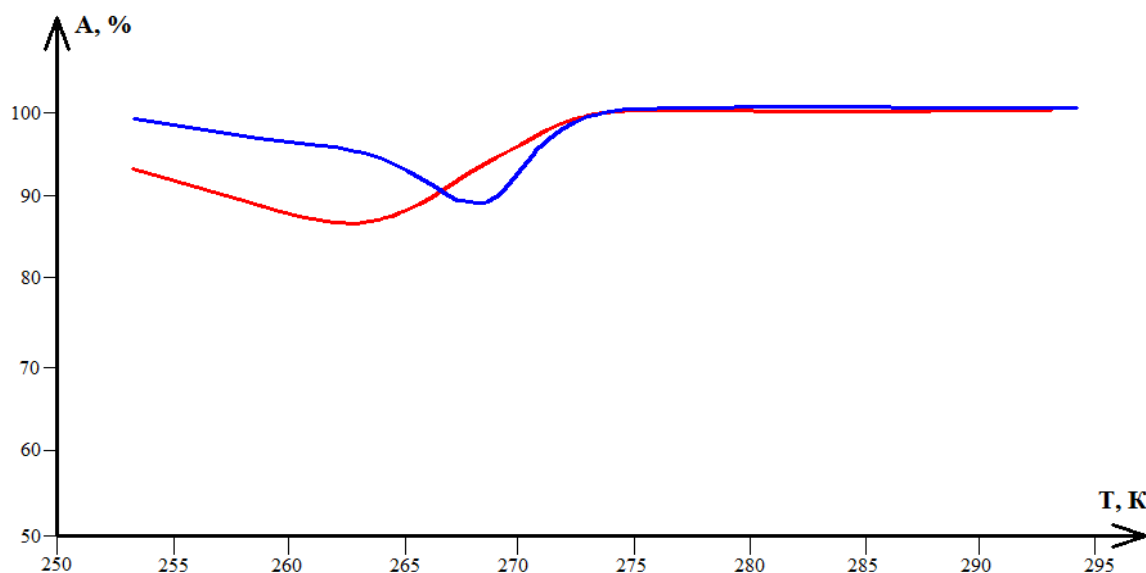


Рисунок 2.10 – Зависимость работы разрушения гранита от низких температур

В работах [26, 25] приведены исследования зависимости энергоёмкости дробления карбонатов (карьеров «Удачный» и «Мохсоголлох») и кимберлитовых пород (трубка «Интернациональная»). Как показывают результаты, температуре -5°C – -10°C, энергетические затраты на дробления пород снижаются на 10–40% по сравнению с энергетическими затратами при дроблении тех же пород при температуре +20°C., что обусловлено снижением прочностных свойств пород в условиях отрицательных температур (рисунок 2.11)



(красная линия – известняк, синяя линия – кимберлит)

Рисунок 2.11 – Зависимость относительной энергоемкости работы разрушения пород от температуры

Более подробно закономерности изменения прочности кимберлитовых и карбонатных пород с изменениями температуры установлены в работе А. С. Курилко [40]. В ходе лабораторных исследований [40] установлено, что при отрицательной температуре до -20°C , прочностные свойства кимберлита и карбонатных пород снижаются на 45-50%. Но при снижении температуры до -40°C прочностные свойства пород обратно возрастают и достигают исходных значений (при температуре $+20^{\circ}\text{C}$). При снижении температуре -50°C , прочностные свойства пород на 20% превышают исходные значения.

Снижение прочности в диапазоне температур $0\dots-20^{\circ}\text{C}$ связано с фазовым переходом воды. При кристаллизации поровой воды происходит увеличение ее объема на 9 %, в результате чего происходит расклинивание пор и расширение трещин. При интенсивном замерзании воды в порах происходит рост внутреннего напряжения, которое прекращается с прекращением роста кристаллов льда. При дальнейшем снижении температуры лед цементирует и упрочняет породу, что увеличивает прочность. Также стоит отметить, что для пресной воды интенсивность фазового перехода наблюдается при температурах $0\dots-3^{\circ}\text{C}$. Однако для засоленной воды интенсивность фазового перехода, в зависимости от концентрации, может происходить при температуре до -20°C . Поэтому при

воздействии отрицательной температуры на прочность скальных пород необходимо учитывать степень засоленности поровой воды, которая оказывает влияние на фазовый переход воды, а значит, и на диапазон температур, при которых будут происходить изменения прочности.

3) При изучении прочностных характеристик мерзлых горных пород следует учитывать их геологическое происхождение.

Если прочность кристаллических низкопористых пород уменьшается с понижением температуры, как показано в пункте 1, то прочность осадочных высокопористых (пористость 12%) и трещиноватых пород увеличивается на 17-45% [66]. В работах М. А. Розенбаума [66] установлено, что прочность мерзлого угля повышается при понижении температуры от -2 до -6 °С, после дальнейшего понижения температуры прочность не меняется. Для определения прочности угля при изменении температуры получена следующая формула:

$$R_t = \frac{R_M}{1 + \left(\frac{R_M}{R_1 - 1}\right) \frac{t_M - t}{t}} \quad (2.1)$$

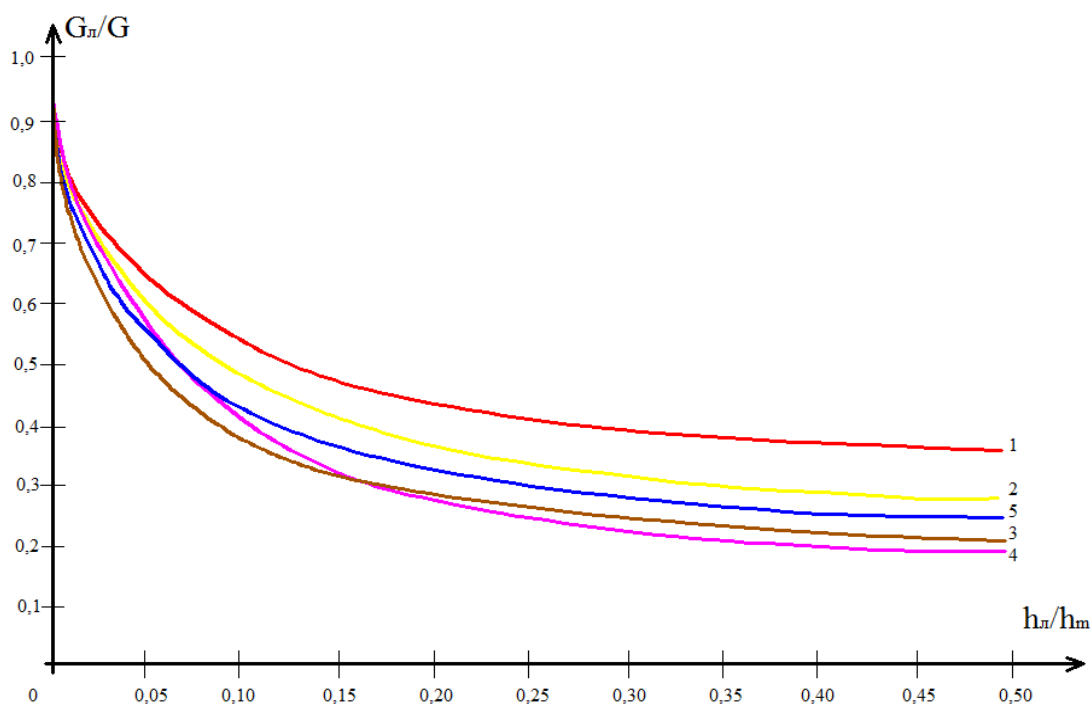
где: R_t – прочность угля при данной температуре; R_M – прочность угля при температуре -6 °С и ниже; R_1 – прочность угля при положительной температуре; t_M – температура пород, соответствующая прочности R_M ; t – фактическая температура.

Наличие ледяных прослоек в образцах горной породы способствует уменьшению ее прочности в 2-8 раз. Для расчета прочности породы с ледяными прослойками на ее контактах рекомендуется использовать следующую формулу:

$$R_{сж} = \frac{h}{\frac{h_L}{R_L} + \frac{h_M}{R_M}} \quad (2.2)$$

R_M – прочность мерзлой породы, МПа; R_L – прочность льда, МПа; h – общая высота образца с ледяными прослоями; h_M – его высота без ледяных прослоев; h_L – суммарная толщина ледяных прослоев.

В результате исследований была получена зависимость прочности образца породы от толщины ледяных прослоек, представленная на рисунке 2.12.



(1 – диабаз, 2 – мрамор, 3 – песчаник, 4 – уголь, 5 – горючий сланец)

Рисунок 2.12 – Зависимость изменения прочности образцов от толщины ледяных прослоек [бб]

При расположении прослоек льда под углом к горизонтальной плоскости, прочность образца занимает промежуточное значение между прочностью образца с горизонтально расположенными прослойками и значением сцепления льда с образцом. При угле наклона слоев, больших 35° , прочность образцов равна сцеплению льда с образцом. Вертикальное расположение прослоек не влияет на прочность образца. Для расчёта такой прочности получена следующая формула:

$$R_l^a = \frac{R_l}{1 + \left(\frac{R_l}{C} - 1\right) \sin^3 a} \quad (2.3)$$

где R_l – прочность образца, содержащего горизонтальные прослойки льда; C – сцепление льда с материалом; a – угол наклона ледяной прослойки.

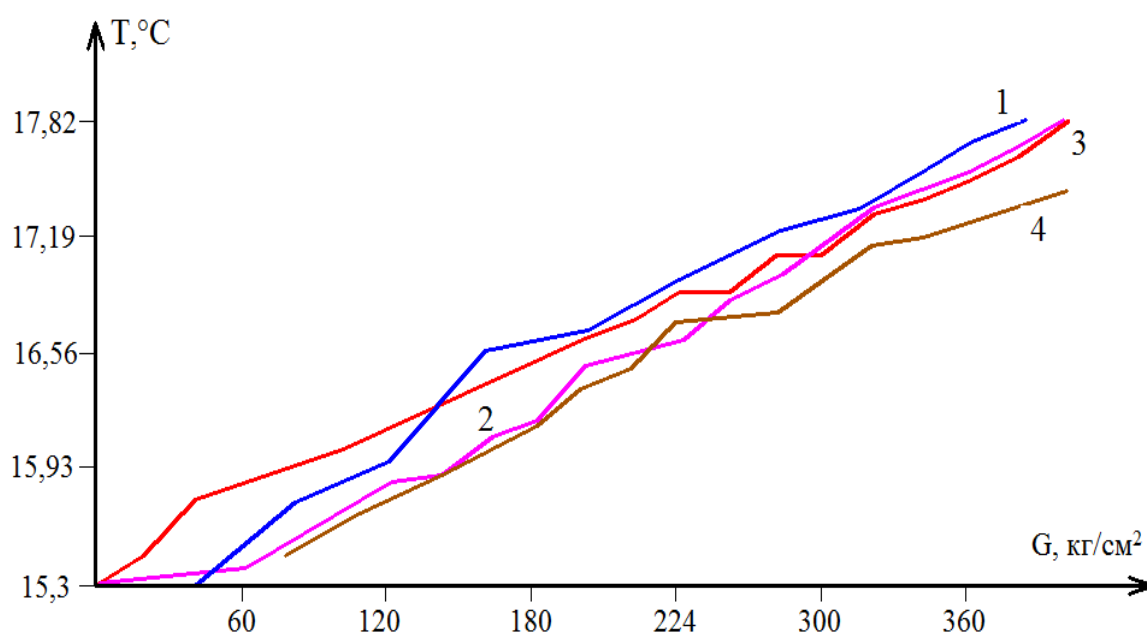
4) С уменьшением скорости прикладываемой нагрузки к образцу горных пород их прочность уменьшается

Прочность льда при длительных нагрузках равна нулю. Прочность пород при длительных нагрузках в условиях отрицательных температур, а также при наличии ледяных прослоек составляет 30-40 % от показаний прочности при условно-мгновенных нагрузках. Если отношение сумм высот ледяных прослоек к

общей высоте образца больше 0,15, то длительная прочность такого образца равна нулю.

5) *Изменение напряжённо-деформационного состояния массива приводит к изменению его температуры.*

С помощью специальной установки, создающей всестороннее давление до 60 МПа, было зафиксировано, что с повышением напряжения возрастает и температура образцов [66]. При стабилизации напряжения, сохраняется и новое значение температуры. Резкое понижение напряжения сопровождается резким понижением температуры. При циклическом нагружении повышение и понижение температуры происходит в таких же диапазонах, что и в предыдущих циклах. С ростом напряжения до 40 МПа приращения температуры массива в натуральных условиях находилось в пределах 1,5-3°C, в лабораторных условиях приращение температуры образцов составляло 2,5-3,5 °С. Такой разброс приращений температуры при увеличении давления связан с тем, что в натуральных условиях происходит теплообмен с воздушной средой, поэтому значения приращения ниже. Исходя из графиков рисунка 2.13, видно, что зависимость изменения напряжения и температуры имеет линейный характер.



(1 – бурый уголь (Анадырь), 2- каменный уголь, 3-бурый уголь (Шураб), 4 – мрамор)

Рисунок 2.13 – Зависимость приращений температур образцов пород от измененного напряжённого состояния

б) Прочность мерзлых горных пород зависит от их исходной водонасыщенности и пористости.

Чем больше пористость и влажность пород, тем больше степень водонасыщения и тем большее разрушение окажет замерзающая в порах вода при своем расширении.

Сравнивая два образца известняка с пористостью 12 % и ниже 1 %, энергоёмкость при дроблении первого при понижении температур от +20 °С до -5 °С снижается на 42 %, во втором случае – на 14 % [38].

Анализ испытаний по снижению прочности при увеличении пористости образцов кимберлита, отобранных на карьере Удачный, показал, что образцы с пористостью 5 % и влажностью до 2 % имеют прочностные характеристики в 2 раза меньше, чем при пористости менее 1 % (рис.2.14)

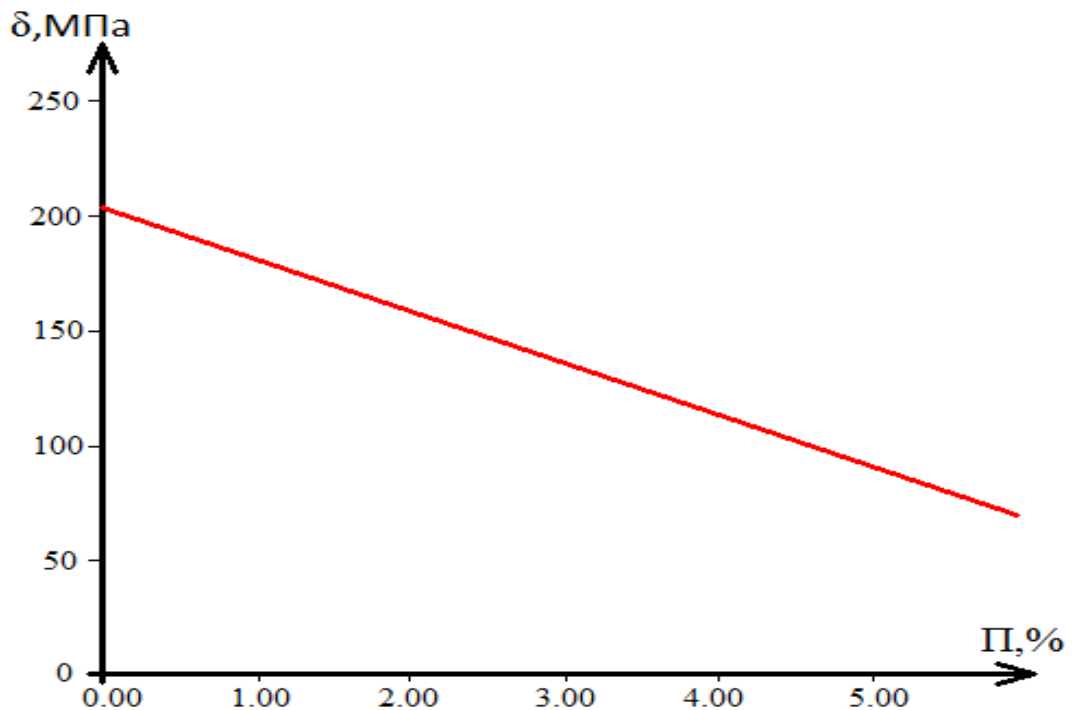


Рисунок 2.14 – Зависимость прочности пород от пористости

Исследования влияния влажности доломитового известняка, доломита и доломитизированного песчаника, отобранные из борта карьера «Мир» при температурах от +25°С до -35°С, показали, что при увеличении влажности происходит снижение предела прочности пород на сжатие (рисунок 2.15) [30].

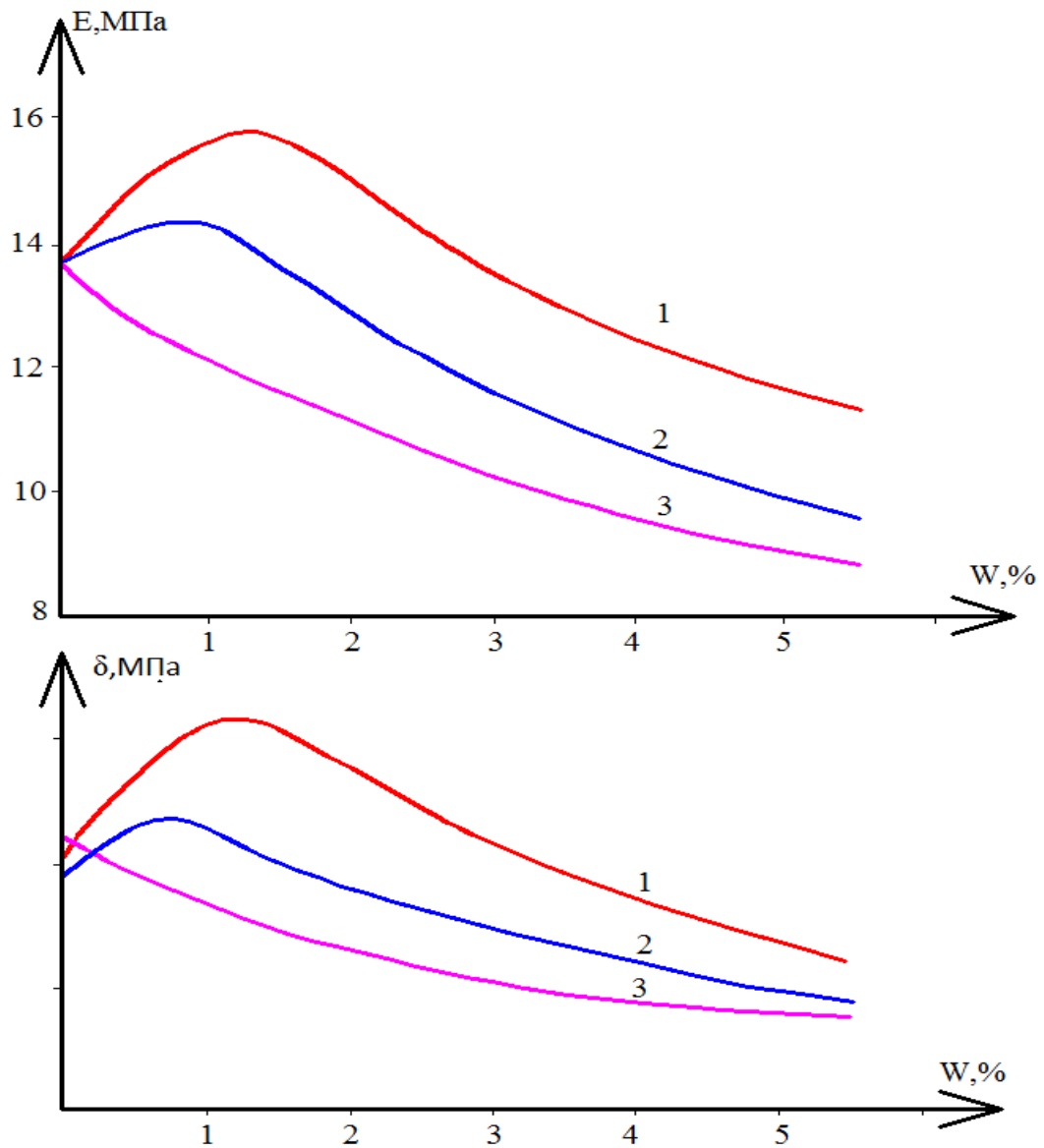


Рисунок 2.15 – Зависимость жесткости и прочности пород от температуры и влажности (1 – $t = -35^{\circ}\text{C}$, 2 – $t = -2^{\circ}\text{C}$, 3 – $t > 0^{\circ}\text{C}$)

Однако в работах М. А. Розенбаума отмечалось [66], что уровень влажности образцов пород (уголь, песчаник, диабаз, горючий сланец, мрамор, известняк) до 9 % не оказывает влияние на их прочностные характеристики, что придает противоречивый характер указанным выше фактам.

2.4 Влияние циклов замораживания-оттаивания на прочностные характеристики горных пород

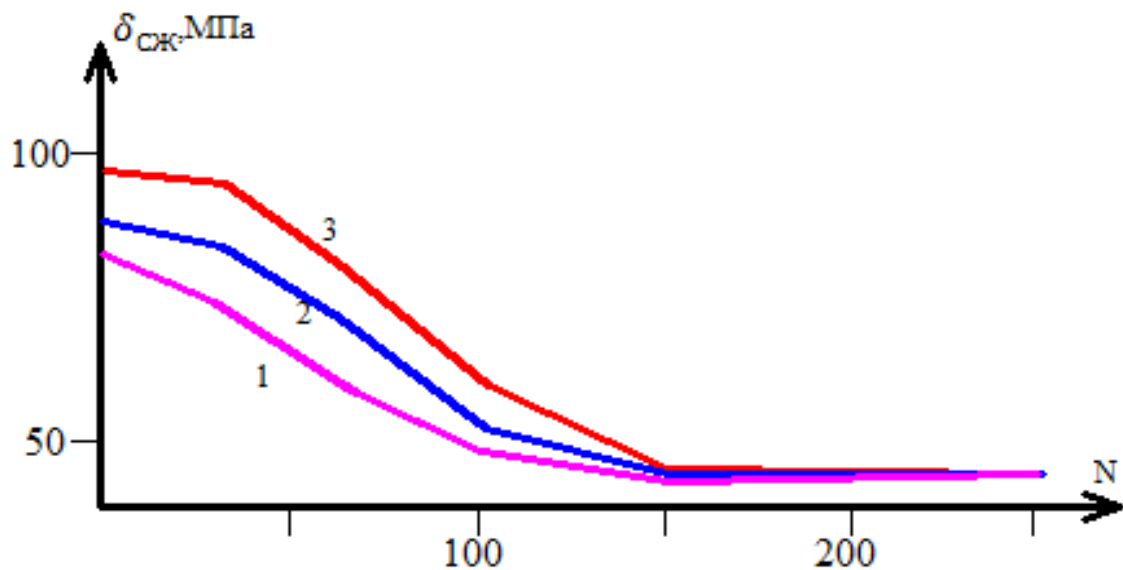
В криологических условиях одним из самых негативных факторов, способствующих снижению прочности горных пород, является воздействие

циклов замораживания-оттаивания (ЦЗО), которое характеризуется как криогенное выветривание.

Криогенное выветривание – деструкция и дезинтеграция горных пород под воздействием знакопеременной температуры с переходом на ноль и циклическим замораживанием-оттаиванием поровой и трещинной вод, при кристаллизации которой возникает внутреннее напряжение [15]. Влияние криогенного выветривания на сопротивляемость пород, как и стационарное температурное воздействие, зависит от многих факторов, но, прежде всего, нужно различать воздействие ЦЗО на дисперсионные и скальные породы, так как под действием температурных флуктуаций отличаются различным механизмом разрушения.

2.4.1 Влияние циклов замораживания-оттаивания на прочностные свойства дисперсных горных пород

В условиях циклического воздействия замораживания-оттаивания разрушение дисперсных пород проходит в виде разрушения фракций на более мелкие фракции. Крупнообломочные грунты могут характеризоваться различной прочностью обломочного материала крупной фракции, однако под влиянием ЦЗО, так как происходит снижение прочности каждой фракции, материал крупных фракций становится более однородным по прочности, рисунок 2.16 [15].



(1 – фракции 20-40 мм, 2 – 20-80 мм, 3 – 40-80 мм)

Рисунок 2.16 – Влияние циклов замораживания-оттаивания на прочность $\delta_{сж}$, крупных фракций песчано-сланцевого состава

В работах Б. И. Балакова по результатам изучения изменений механических характеристик крупнообломочных грунтов при воздействии ЦЗО наблюдалось, что после 100-250 ЦЗО значение сцепления уменьшилось в 1,5-3 раза, модуль деформации в диапазоне нагрузок 0,35-0,9 МПа снизился на 25-70 %, тангенс угла внутреннего трения изменился в пределах 10-14 %, но для размокающих грунтов значения повысились в пределах 50 циклов таблица 2.4.

Таблица 2.4 – Влияние ЦЗО на модуль общей деформации (E_0) и параметры прочности крупнообломочных грунтов [15]

Порода	Число ЦЗО, N	E_0 , МПа при $\delta=0-0,35$ МПа	E_0 , МПа при $\delta=0,35-0,80$ МПа	tgφ при $\delta, \tau^*=0-14$ МПа	C при $\delta, \tau=0-14$ МПа
Горная порода песчанико-сланцевого состава, (бассейн р. Колыма)	0	23	44,3	1	0,06
	30	31,8	44,6		
	60	22,4	30,6	0,97	0,04
	100	29	30,0	0,97	0,04
	150	25,9	33,5	0,97	0,03
	250	23,9	33,5	0,9	0,02
Горная масса доломитизированных известняков, водонасыщенная (Ленинградская обл.)	0	28,5	47,2	0,97	0,1
	20	28,5	52,7	0,88	0,07
	80	28,5	38,6	0,88	0,07
	150	25,3	36,1	0,83	0,07
Горная масса алевролитов, азрированная (Зираны ГЭС, С. Кавказ)	0	53,6	61,7		
	50	53,6	68,5	–	–
	100	53,6	36		
Тоже, размокающая, водонасыщенная	0	26,8	32,2	0,51	0,08
	50	21,9	11,3	0,57	0,07
	100	26,8	-	0,57	0,05

* δ, τ - вертикальная и сдвиговая нагрузки

Интересный подход к анализу дезинтеграции пород приводится в работах А. В. Степанова [73, 74], в которых при криогенном воздействии рассматриваются изменения коэффициента фильтрации. Коэффициент фильтрации зависит от гранулометрического состава и для песчано-сланцевой породы, чем меньше фракции породы, тем меньше коэффициент фильтрации. Результаты работ

показали, что при увеличении ЦЗО коэффициент фильтрации пород снижается на 3 порядка (от 14 м/с до 0,037 м/с), что свидетельствует о дезинтеграции фракций на более мелкие фракции, таблица 2.5.

Таблица 2.5 – Долгосрочный прогноз значений коэффициента фильтрации K_f в горной массе песчанико-сланцевого состава, подверженный криогенному выветриванию

Срок прогноза, годы	Число ЦЗО	Коэффициент разнотерности $\Pi = d_{60}/d_{10}$	d_{17} , мм	K_f , см/с
0	0	107	0,7	14,3
6	250	6000	0,15	3,5
20	800	20000	0,01	0,037
50	2000	3000	0,005	0,0085

(d_{17} – крупность частиц меньше которых в породе 17 %)

Температурные флуктуации на глинистые грунты имеют иное влияние. В работах О. К. Ворнокова [15], А. С. Курилко [39], А. М. Розенбаума [66] и А. В. Степанова [73, 74] проводится анализ изменения коэффициентов фильтрации и диффузии песчано-глинистых пород при воздействии ЦЗО. После циклов температурного воздействия на образцы глины наблюдалось увеличение коэффициента фильтрации и диффузии на 2-3 порядка (рисунки 2.17-2.18).

Увеличение коэффициентов фильтрации связано с тем, что при минерализации влаги вследствие замораживания образуется криогенная текстура в виде прожилок льда, после оттаивания которой в материале образуются крупные поры и трещины, сквозь которые вода проходит быстрее. Данные процессы и обуславливают увеличение коэффициента фильтрации. С увеличением ЦЗО повышается скорость размокаемости, обусловленная тем, что при оттаивании вода вытекает из пор криогенной текстуры и заполняется воздухом, который при капиллярном впитывании воды за счет сжатия создает разрывающее напряжение.

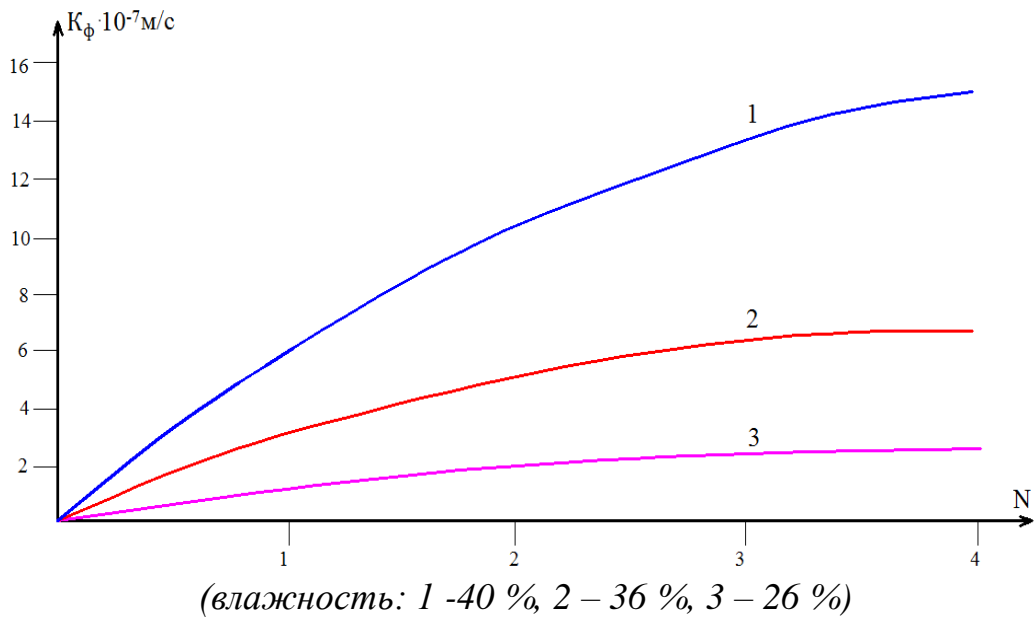


Рисунок 2.17 – Зависимость коэффициентов фильтрации песчано-глинистых пород от ЦЗО

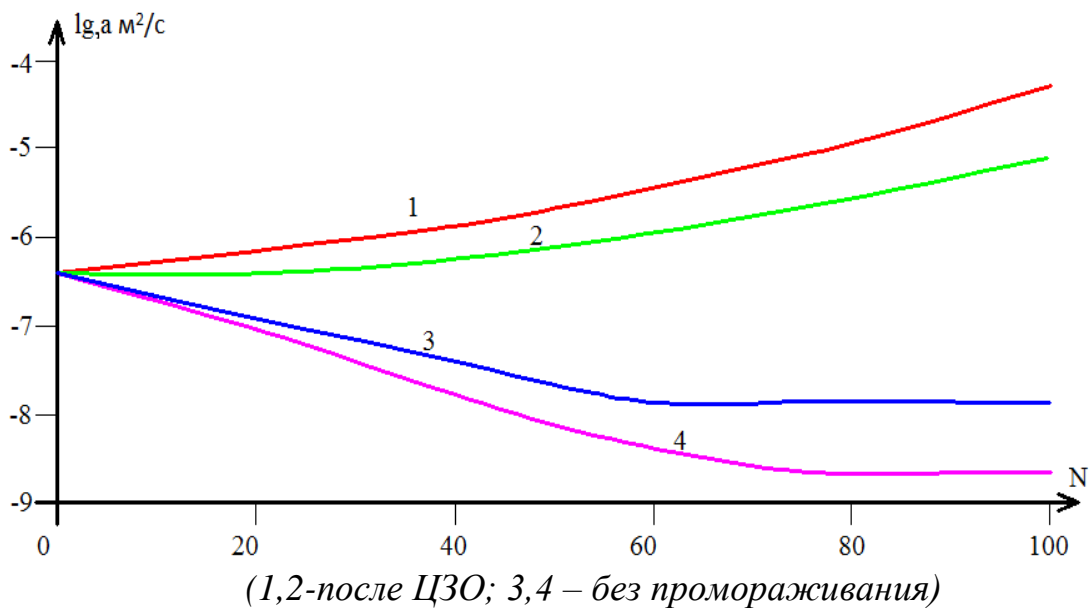


Рисунок 2.18 – Зависимость коэффициента диффузии от ЦЗО

2.4.2 Влияние циклов замораживания-оттаивания на прочностные свойства скальных и полускальных горных пород

В скальных породах при знакопеременном температурном воздействии происходит расшатывание и нарушение структуры по блокообразующим и другим трещинам, расшатывание и образование новых трещин, разрушение на мелкие блоки.

В работе Е. В. Захарова [25] изучались вопросы, связанные со снижением сопротивляемости кимберлитов и карбонатных пород при их дроблении после температурных флуктуаций. Как показывают результаты исследований, после первого цикла замораживания-оттаивания энергозатраты на разрушения известняка карьера «Айхал» в водном растворе снижаются на 40%, а после трех циклов снижаются на 60%. Энергоемкость при дроблении известняка карьера «Удачный» в солевом растворе снижается тем же образом, однако при дроблении тех же пород, замороженных в водной среде, энергоемкость в среднем увеличивается на 20%.

Воздействие трех циклов замораживания-оттаивания в водной среде на образцы кимберлита рудника «Интернациональный» приводит к снижению удельной энергоемкости его разрушения на 60 – 70 %. После 10 циклов замораживания-оттаивания удельные энергозатраты снижаются на 70-80 % по сравнению с исходными. Необходимо отметить, что происходит снижение удельной энергоемкости разрушения воздушно-сухих образцов несмотря на то, что при исследовании влияния отрицательных температур энергозатраты на разрушение увеличивались.

Снижение удельной энергоемкости разрушения исследованных горных пород обуславливается развитием и накоплением различных дефектов в испытуемых образцах в результате воздействия на них циклического замораживания-оттаивания.

Под воздействием ЦЗО породы могут дезинтегрироваться вплоть до разрушения, как показано на примере образцов кимберлита [38]. Степень разрушения породы зависит от их пористости: чем больше пористость, тем больше степень разрушения. Для образцов кимберлитов с пористостью 2 % дезинтеграция не наблюдается, а для пород с пористостью 3 % после 5 циклов замораживания-оттаивания наблюдалось разрушение 74 % образцов. Образцы с прочностью на сжатие 40 МПа разрушаются полностью.

Изменение физико-механических свойств при циклическом знакопеременном воздействии также зависит от их вещественного состава,

геологического возраста и степени литификации [24]. Как было установлено в ходе наблюдений в течении 25-летнего ЦЗО, у образцов песчаников холодниканской свиты, отобранных с борта карьера «Нерюгинский», происходило снижение прочности на сжатие на 40-50 %, изменение плотности на 10-12% и увеличение пористости с 3-4 % до 8-12 %. У образцов песчаников кабатинской свиты, отобранных на Сыллахском месторождении, снижение прочности находилось в пределах 30-35 %.

По результатам лабораторных исследований после 400 ЦЗО прочность песчаников на сжатие и растяжение уменьшилась до 33 % и коэффициент пористости увеличился с 2-3 % до 5-6 %. После 100 ЦЗО прочность алевролитов на растяжение и на сжатие уменьшилась на 40-50 %, а коэффициент пористости увеличился на 25-30 %.

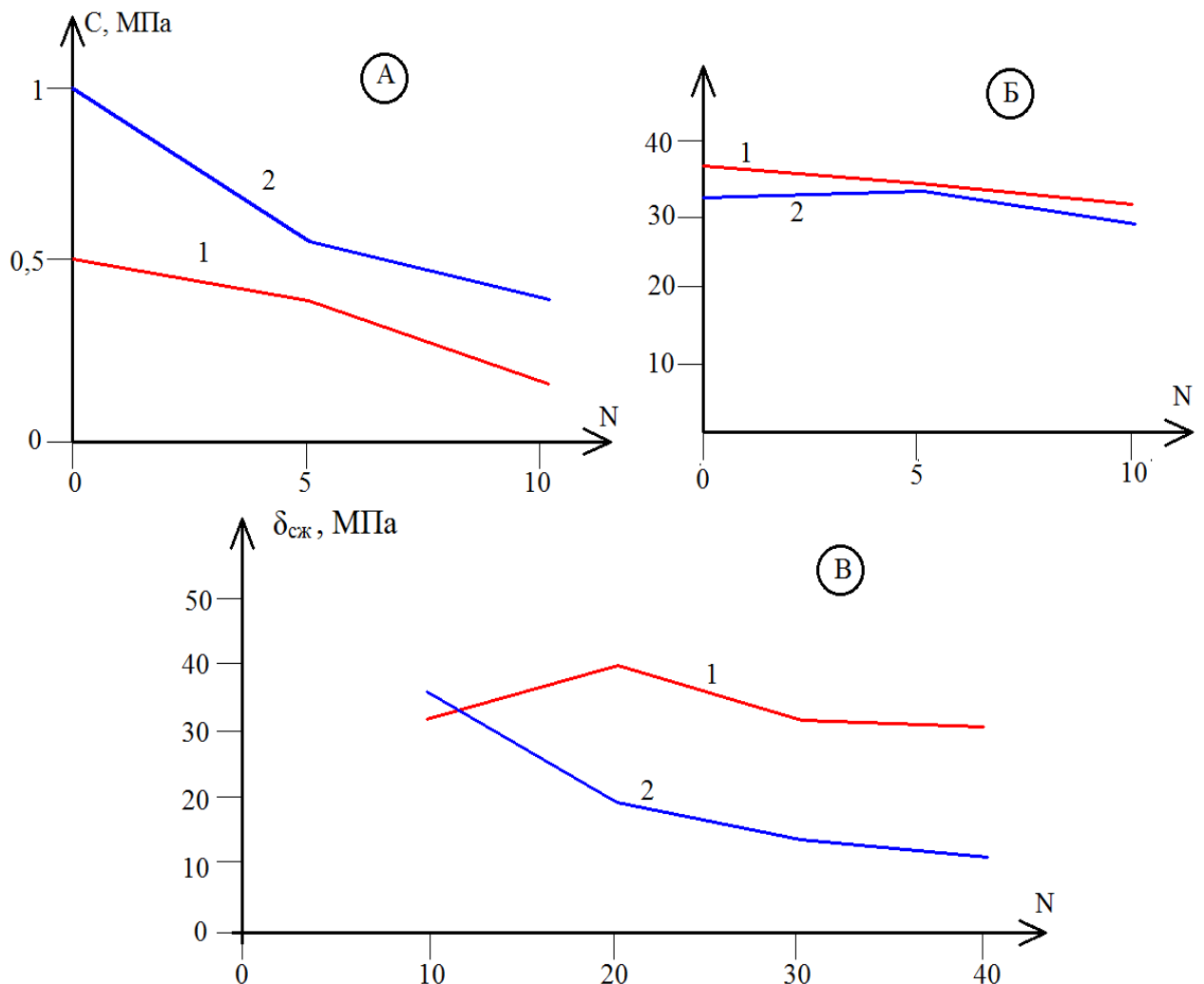
Как видно из результатов опытов, воздействию ЦЗО, а соответственно и криогенному выветриванию, менее подвержены мелкозернистые песчаники, а наибольшему – алевролиты крупнозернистые, а также песчаники с включениями детрита и растительных остатков.

В работе О. К. Воронков [15] приводятся результаты испытаний прочностных характеристик на срез алевролитов и мергелей после ЦЗО, в которых наблюдалось снижение показателей сцепления на 50% и угла внутреннего трения на 10-20 % (рис.3.19).

На основе работ О. К. Воронкова [15], в ходе которых проводились испытания влияния 12000 ЦЗО на образцы песчаников, гранитоидов и известняков, построены зависимости снижения прочностных характеристик этих пород в сухом и водонасыщенном состояниях. По результатам циклического температурного воздействия на образцы пород прочность известняков снизилась на 76 %, гранитоидов на 37 % и песчанников на 54 %.

В водонасыщенном состоянии образцов снижение прочности для известняков и гранитоидов происходило еще на 15-20 % больше, чем снижение прочности в сухом состоянии, для песчаников на 40 % (рис. 2.20).

Анализируя эти данные, можно сделать вывод о том, что содержание воды в порах играет важную роль при разрушении горной породы, так как в условиях отрицательных температур при расширении объема воды в связи с фазовым переходом происходит расширение пор и образование трещин, и при следующем цикле замораживания вода заполняет новые образовавшиеся нарушения и расширяет в свою очередь их. Влияние ЦЗО на увеличение пористости показано на рисунке 2.21.



(1-алевролит, 2 –мергель)

Рисунок 2.19 – Зависимость сцепления (А), угла внутреннего терния (Б) и прочности на сжатие (В) от ЦЗО

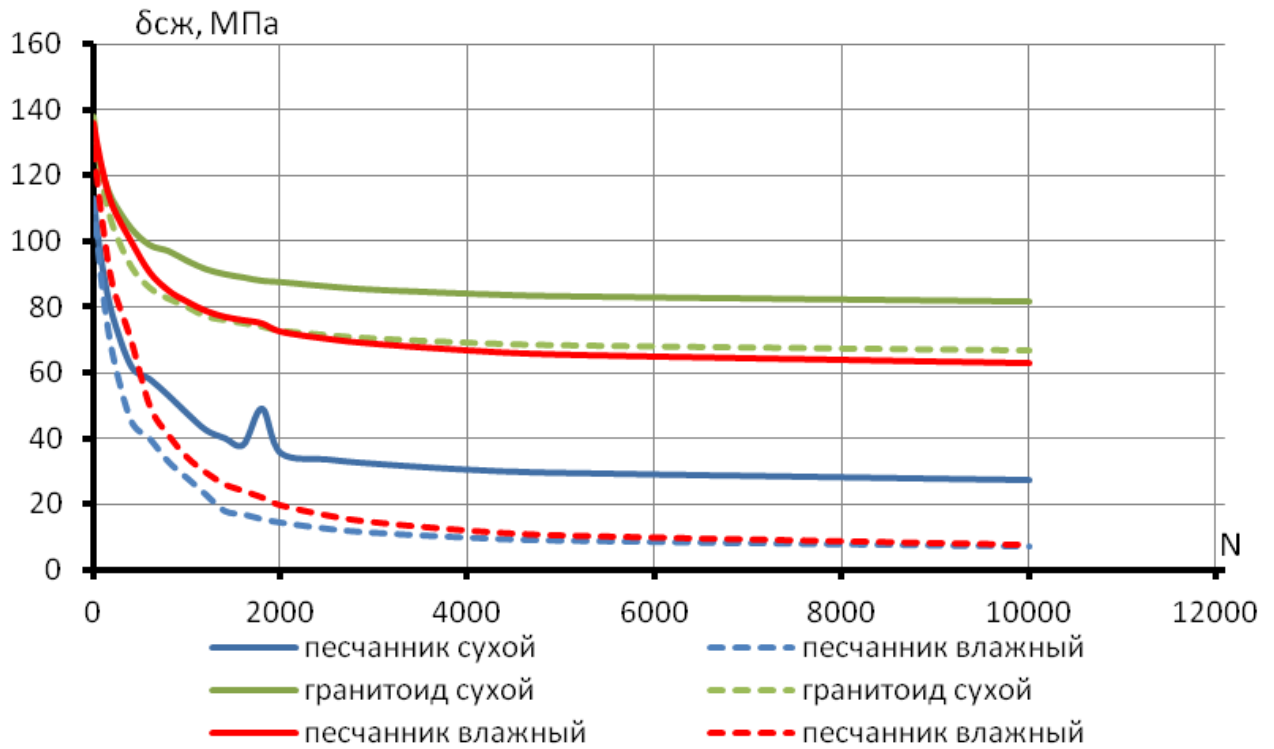


Рисунок 2.20 – Снижение прочности пород на сжатие после 12000 ЦЗО

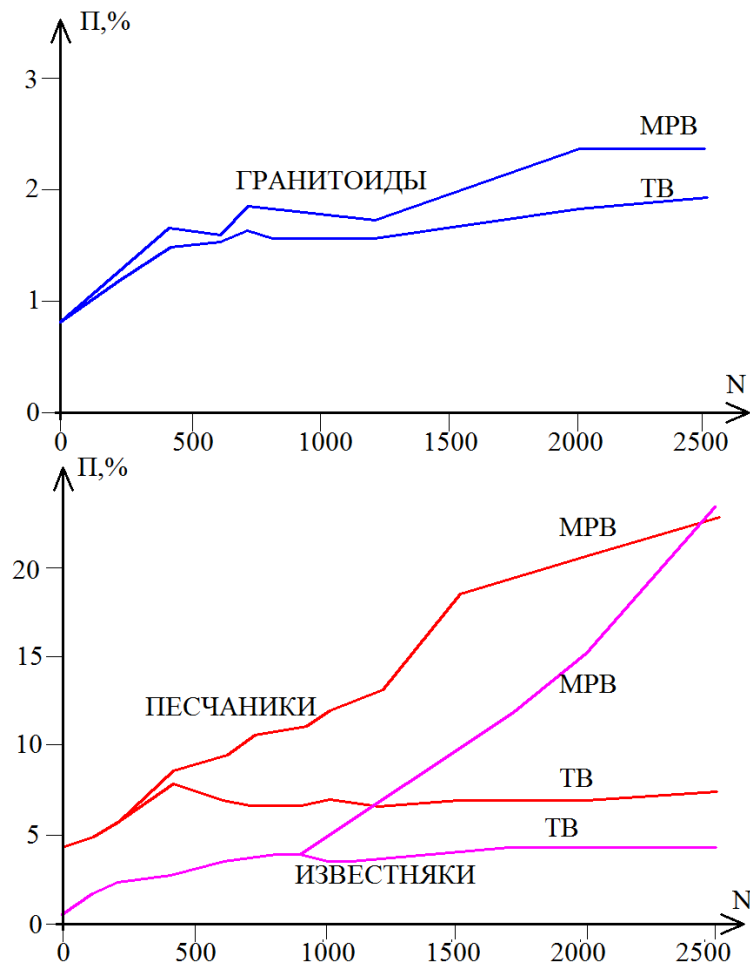


Рисунок 2.21 – Влияние морозного (MPB) и температурного (ТВ) выветривания на общую пористость скальных пород

Влияние степени водонасыщенности при температурных флуктуациях на расшатывание структурных связей в породе, расширение имеющихся трещин и образование новых подробно описано в работе А. С. Курилко [40].

При оценке влияния ЦЗО на прочность для вмещающих карбонатных пород исследование образцов проводилось в трех состояниях: в воздушно-сухом, в водонасыщенном и в водной среде. Прочность образцов в воздушно-сухом состоянии после 5 циклов снизилась на 12 %, после 40 на 26 %, после 200 на 43 %. После 200 циклов образцы сохранили целостность, образование микротрещин не зафиксировано.

В водонасыщенном состоянии прочность образцов с пористостью 1 % после 20 циклов снизилась на 30 %, с пористостью 2,5 – на 50%. У пород с глинистыми прослойками зафиксировано расслоение. Дезинтеграция пород не наблюдалась.

Замораживание образцов в водной среде оказало более жесткое влияние на их прочность. Результаты испытаний у разных серий показали разные значения. Некоторые образцы полностью разрушались после 5 циклов замораживание-оттаивание, у некоторых прочность снизилась до 30 % от первоначальной после 10 циклов. В среднем изменение прочности для образцов происходило после 1 цикла, после 5 циклов прочность снижалась на 50 %. В породах с глинистой прослойкой наблюдались самые низкие прочностные показатели. Также отмечены образцы, на которых ЦЗО не оказало никакого влияния, что объясняется ярко выраженной битуминизацией, снижающей смачивание стенок пор водой.

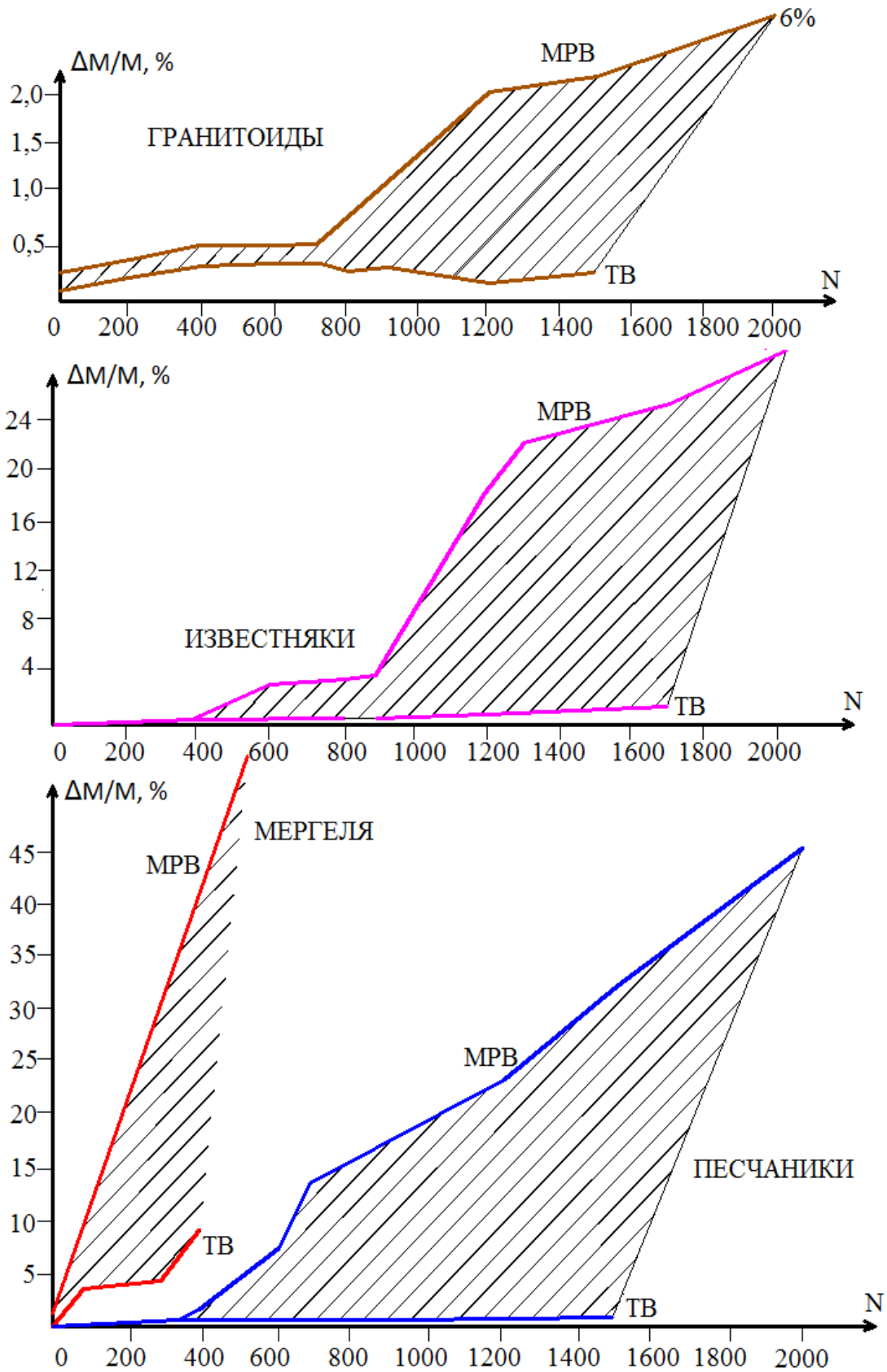
В работе О. К. Воронкова [15] приводятся термины температурного и морозного выветривания. Морозное выветривание (МРВ) – разрушение пород под воздействием знакопеременной температуры с периодическим переходом через 0°С и периодическим замораживанием-оттаиванием воды в порах, что вызывает напряжения вследствие кристаллизации воды в порах и трещинах.

Температурное выветривание (ТВ) характерно для пород в регионах с малым годовым количеством осадка и обусловлено разрушением пород, связанным с температурным напряжением.

В результате анализа влияния МРВ и ТВ установлено, что дезинтеграция пород под воздействием МРВ на 1-2 порядка больше ТВ (рисунок 2.22). Однако при циклическом воздействии в диапазоне 400-600 ЦЗО на малопористые монолитные скальные породы влияние двух видов выветривания одинаково. Это говорит о том, что процессы образования трещин и увеличения пористости происходят под влиянием ТВ раньше и являются предпосылками к морозному выветриванию. Также, исходя из графиков, в очередной раз можно сделать вывод, что влажность и пористость оказывают огромное воздействие на разрушение пород под действием ЦЗО.

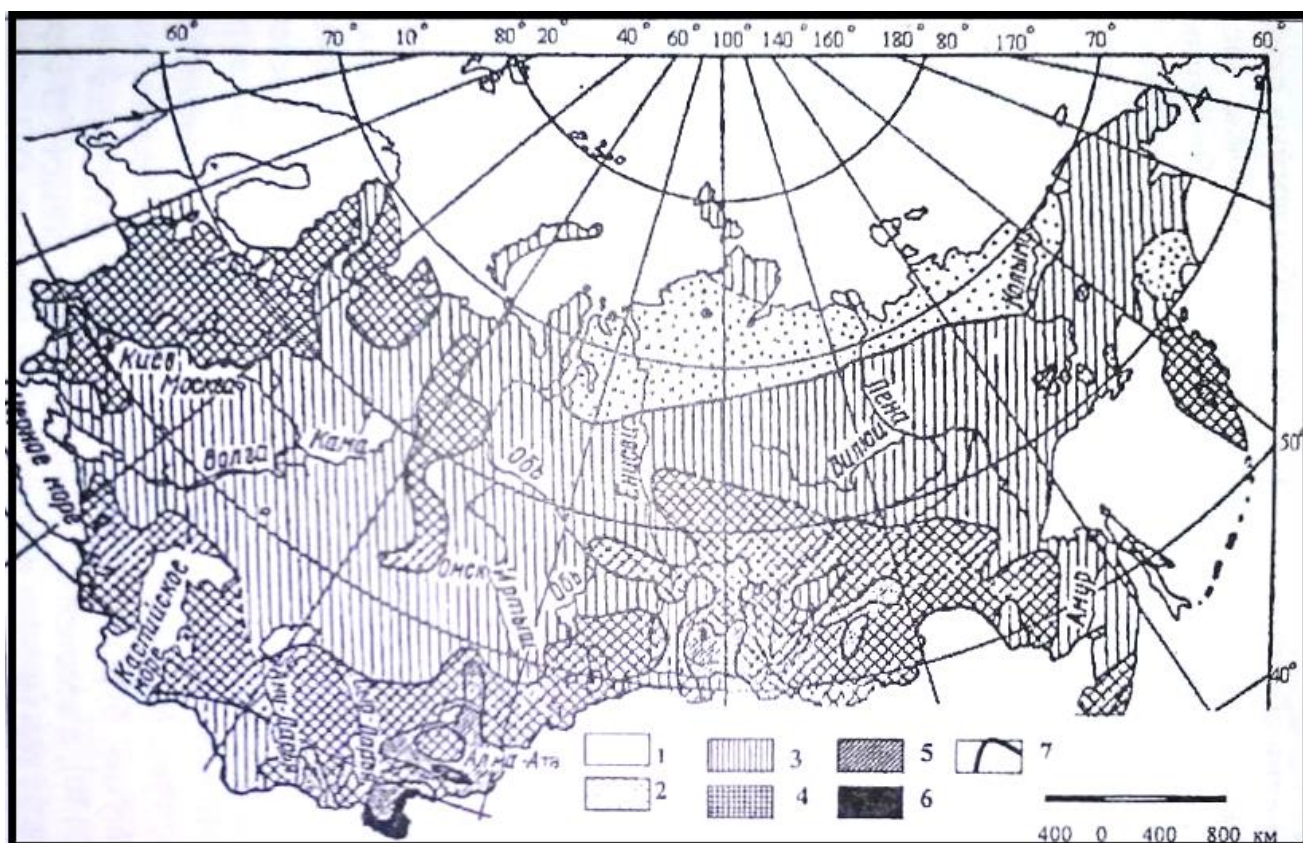
Исходя из анализа графиков, видно, что МРВ намного сильнее воздействует на увеличение пористости, чем ТВ. Принимая во внимание тот факт, что ключевым фактором разрушения при МРВ является поровая вода, нежели при ТВ, к вышеуказанным фактам можно дополнить, что степень водонасыщенности является одним из ключевых факторов, оказывающих влияние на степень дезинтеграции пород при ЦЗО.

В статье О. К. Воронков[14] представлена схема районирования территории РФ по годовому количеству циклов замораживания-оттаивания, составленная на основе многочисленных климатических справочников (рисунок 2.23). При испытании ЦЗО автор рекомендует обращать внимание на два параметра – массу M и скорость продольной волны v_p . На основе экспериментальных данных $\Delta M/M=f(\text{ЦЗО})$ и районирования ЦЗО можно количественно оценить скорость морозного выветривания, а также, используя корреляционные связи v_p с показателями физико-механических свойств, можно преобразовывать графики $v_p=f(\text{ЦЗО})$ в графические зависимости соответствующего показателя свойств от ЦЗО, и тем самым прогнозировать их изменение при выветривании.



(ΔM – потеря массы, M – исходная масса материала)

Рисунок 2.22 – Дезинтеграция пород под воздействием ЦЗО



(Области с числом циклов: 1 - $N_0 < 30$, 2 - $30 < N_0 \leq 50$, 3 - $50 < N_0 \leq 70$, 4 - $70 < N_0 \leq 100$, 5 - $100 < N_0 \leq 130$, 6 - $130 < N_0$, 7 – граница областей)

Рисунок 2.23 – Схема районирования территории России по числу (N_0) циклов замораживания-оттаивания (ЦЗО) за один год по поверхности почвы

2.5 Лабораторные испытания прочностных свойств на контактах горных пород в талом и мерзлом состояниях

Развитие процессов деформирования бортов карьеров с обратной слоистостью в криологических условиях в основном определяется прочностью замороженных контактов.

Определение прочностных свойств по контактам горных пород осуществляется либо в натуральных, либо в лабораторных условиях. Однако стоит отметить, что в натуральных условиях этот процесс весьма трудоемок и на практике встречается достаточно редко, в то время как наибольшее распространение получили лабораторные испытания. Тем не менее результаты, получаемые в лабораторных условиях также неоднозначны, что связано с отсутствием стандарта на испытание. В настоящий момент используются рекомендации ВНИМИ. Таким образом, результаты исследований по определению прочностных свойств по

контактам горных пород, полученные разными организумы, могут различаться между собой.

Анализ литературы показал, что в целом испытания прочностных свойств по контактам горных пород, особенно в мерзлом состоянии, характеризуется единичными работами, среди которых следует отметить работу ВНИМИ [61] (таблица 2.3).

Как показывают результаты, представленные в таблице 2.3, при наличии льда в трещинах пород наблюдается увеличение рост величин сцепления.

Для подтверждения данных результатов нами был проведен ряд лабораторных испытаний по определению прочностных свойств горных пород по контактам трещин в талом и мерзлом состояниях, а также при заполнении трещины льдом. Испытания проводились по естественной трещине и по плоскости распила. В качестве образцов использовались не только углистые, но и скальные породы.

Настоящие исследования осуществлялись в соответствии с требованиями Международного Геомеханического Общества ISRM. В качестве испытательного оборудования использовалась испытательная система GCTS RDS 200, общий вид которой приведен на рисунке 2.24.

Данный метод состоит в приложении и измерении сдвиговой и нормальной к поверхности распила или естественной трещины сил и в определении зависимости сдвигающей силы от прикладываемых нормальных напряжений. Сдвигение по трещине осуществлялось по наименьшему сопротивлению.

Для проведения сдвиговых испытаний вдоль плоскости распила из кусков горных пород формировались образцы цилиндрической формы. Диаметр таких цилиндров составлял 30 мм. Для испытаний на сдвиг вдоль естественной трещины выпиливались образцы с трещиной в соответствии с диаметром испытательного кольца, в котором полученный образец фиксировался при помощи цементного материала.

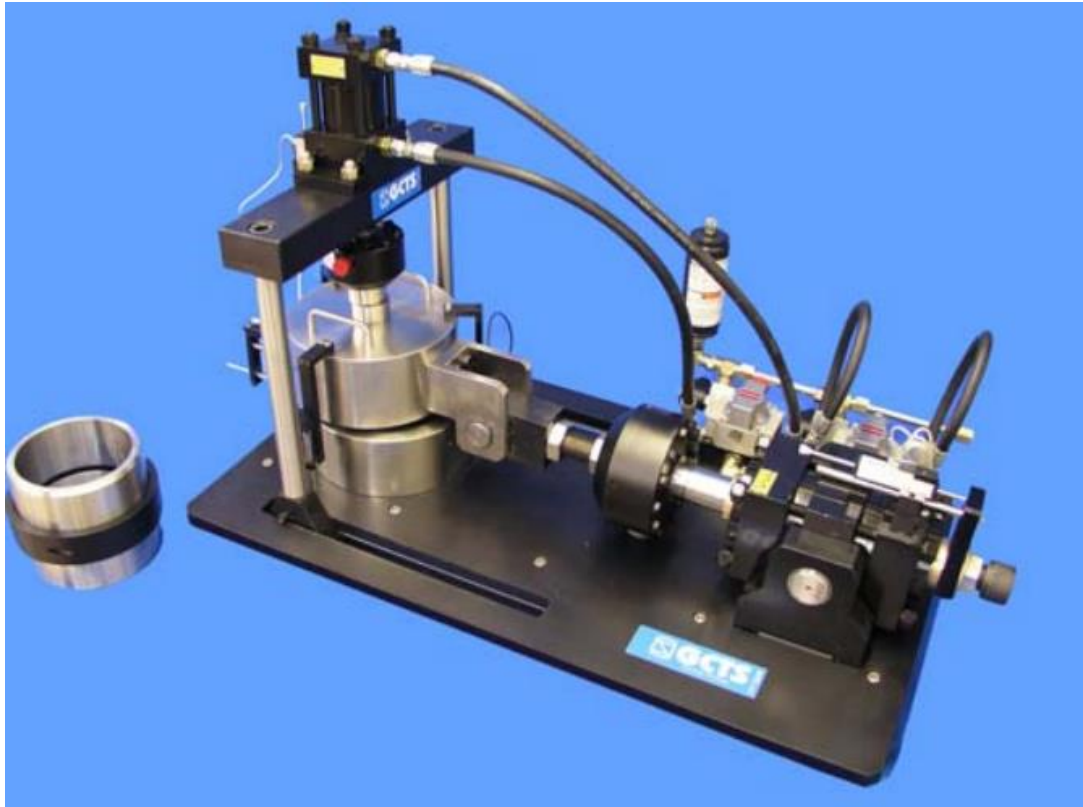


Рисунок 2.24 – Испытательная система GCTS RDS-200

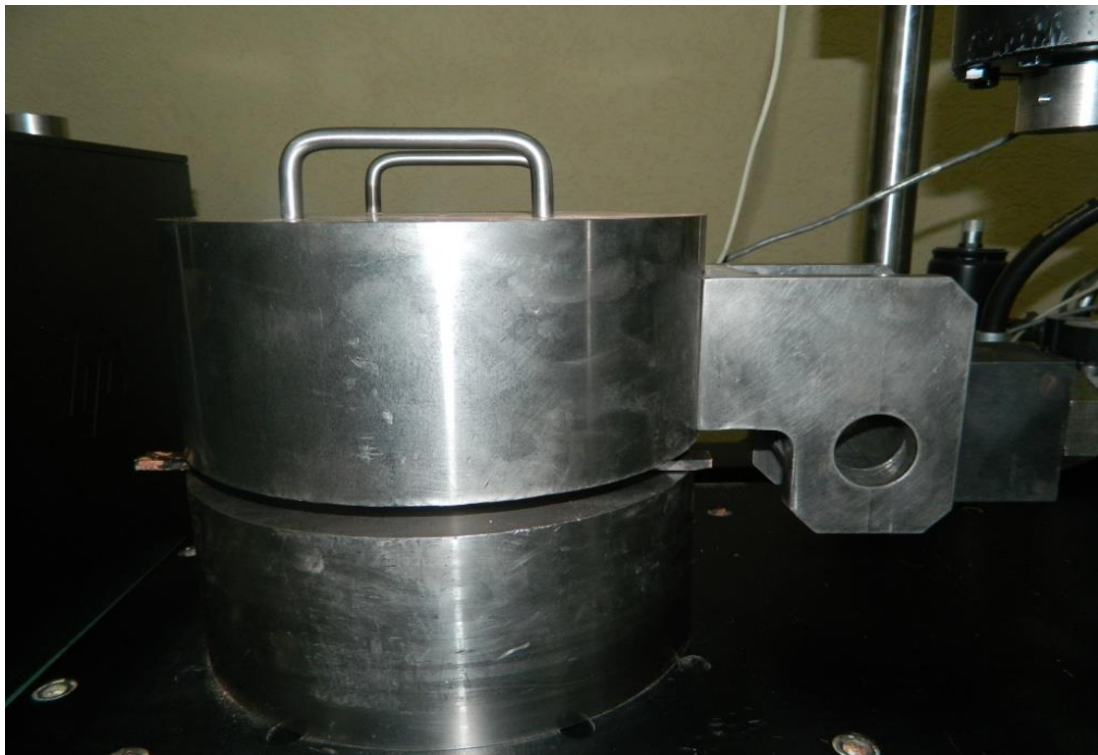


Рисунок 2.25 – Вид сдвиговых матриц в сервогидравлической испытательной системе GCTS RDS-200

При испытании образца на прямой сдвиг, закрепленный в матрицах-держателях составной образец непрерывно подвергали сдвигающей нагрузке со

скоростью сдвигового смещения около 0,1 мм/мин до стабилизации сдвигающей силы, после чего задавали следующую ступень вертикальной нагрузки и продолжали прикладывать сдвигающее усилие до стабилизации его на новом уровне. Испытания каждого образца проводились при трех заданных уровнях вертикальной нагрузки (в основном, при 0,8, 1,6 и 3,0 МПа).

Испытания сопровождалось непрерывным измерением нагрузок (сдвигающей и вертикальной) и бокового (касательного) смещения при помощи системы сбора и обработки информации, входящей в состав системы RDS-200. Касательное напряжение (напряжение сдвига) τ , МПа и нормальное (вертикальное) напряжение σ_n , МПа рассчитывали по формулам:

$$\sigma_n = P_1/S, \quad (2.4)$$

$$\tau = P_2/S, \quad (2.5)$$

где: P_1 – суммарная сила сдвига, кН; P_2 – суммарная вертикальная сила, кН; S – площадь перекрытия поверхностей сдвига, см².

По результатам лабораторных исследований были получены диаграммы зависимостей касательного напряжения от нормального напряжения. С помощью полученной диаграммы были определены величины остаточных сцепления и угла внутреннего трения породы. Примеры образцов для испытаний приведены на рисунке 2.26.

Для повешения качества проводимых исследования пород в мерзлом состоянии в помещении воссоздавались условия отрицательных температур. Для дополнительного усиления условий вокруг испытательного сдвигового оборудования располагались емкости со льдом, а вся установка была покрыта теплоизоляционным материалом (рисунок 2.27).

Результаты испытаний приведены в следующих таблицах 2.6-2.7 и на рисунках 2.28-2.39.

В ходе лабораторных исследований установлено, что в замороженном состоянии и при наличии льда в трещинах пород угля величина сцепления по контактам растет, в то время как изменение величины угла внутреннего трения в

некоторых испытаниях имеет сложный характер, что связано с большим разбросом в данном случае.

В целом, сравнивая полученные результаты, с результатами испытаний, приведенных в работе [61], значения и характер изменения сцепления с изменением состояния, сопоставимы между собой; что касается значения угла внутреннего трения, то в этом сопоставимы только результаты вдоль плоскости распила «угля 2». Увеличение прочностных свойств для данной породы связано с наличием влаги в порах пород в естественном состоянии.



2.26 – Образец скальной породы при наличии льда на контактах

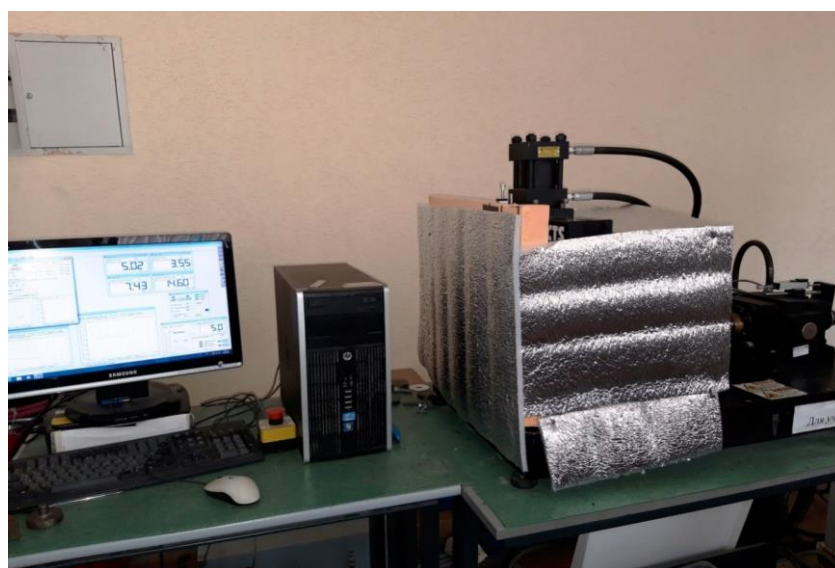


Рисунок 2.27 – Покрытие испытательного оборудования теплоизоляционным материалом

Таблица 2.6 – Результаты определений показателей сдвигу вдоль плоскости распила при различном состоянии горных пород

Порода	Состояние	Сцепление С, МПа	Угол внутреннего трения φ , град.	Естественная Влажность W, %
Уголь 1	Естественное (t=20°C)	0,012	24	13,0
	Влагонасыщенное	0,025	26	
	Замороженное	0,267	10	
	Лед на контактах	0,310	16	
Алевролит/ Алевропесчаник	Естественное (t=20°C)	0,073	29	0,5
	Влагонасыщенное	0,090	26	
	Лед на контактах	0,070	29	
Уголь 2	Естественное (t=20°C)	0,050	21	11,3
	Влагонасыщенное	0,034	25	
	Лед на контактах	0,342	21	

(уголь 1 и уголь 2 – пробы, отобранные с разных месторождений)

Таблица 2.7 – Результаты определений показателей сдвигу вдоль естественных трещин при различном состоянии горных пород

Порода	Состояние	Сцепление С, МПа	Угол внутреннего трения φ , град.	Естественная Влажность W, %
Уголь2	Естественное (t=20°C)	0,137	21	11,3
	Замороженное	0,246	21	
	Лед на контактах	0,387	26	
Алевролит	Естественное (t=20°C)	0,22	27	0,4
	Лед на контактах (100%)	0,26	25	
	Лед на контактах (50%)	0,23	27	
Алевропесчаник	Естественное (t=20°C)	0,189	32	0,6
	Лед на контактах (100%)	0,216	30	
	Лед на контактах (50%)	0,177	28	

Результаты испытаний на сдвиг пород, представленных алевролитом и алевропесчаником, показывают, что как с частичным, так и с полным заполнением трещины льдом, прочностные свойства по контактам практически не меняются. В данном случае прочностные свойства остаются неизменными в связи с тем, что данные породы не способны значительно впитывать в себя влагу (естественная влажность меньше 1%), в результате чего породы практически не смерзаются.

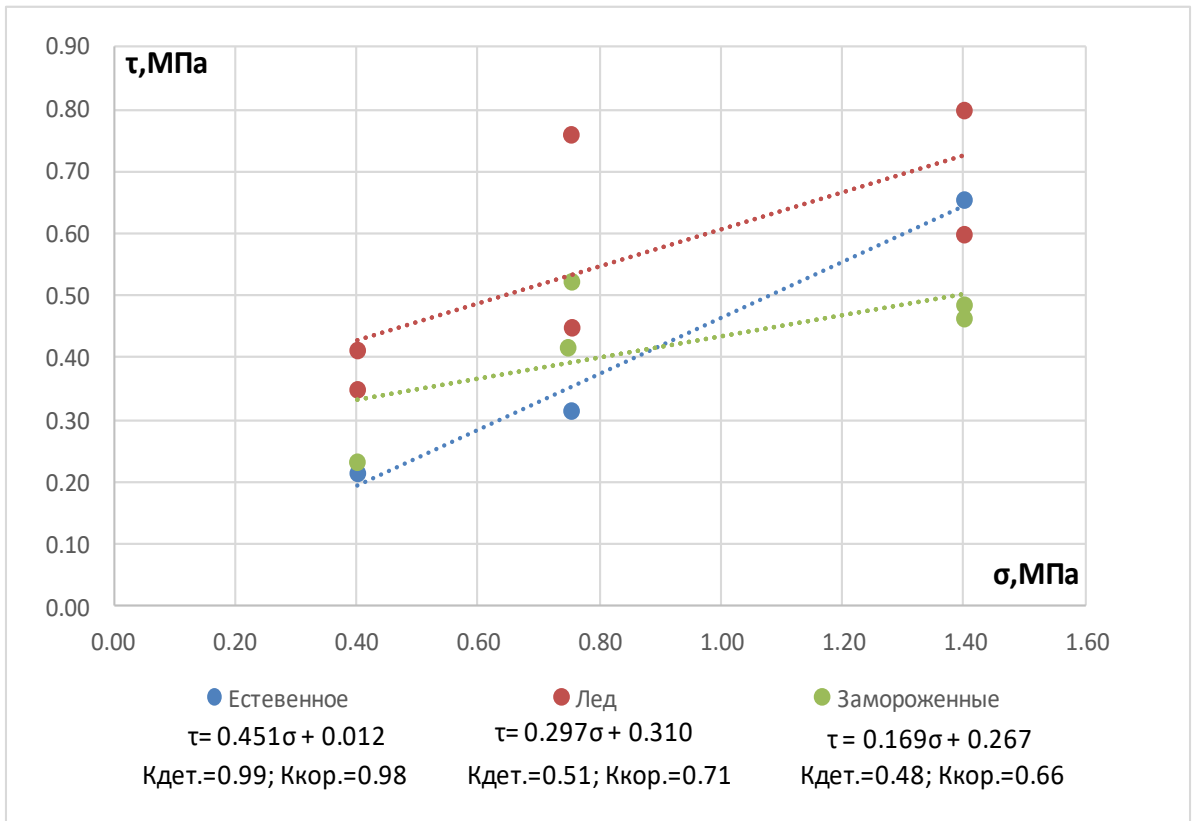


Рисунок 2.28 – Паспорт прочности на сдвиг вдоль плоскости распила (уголь 1)

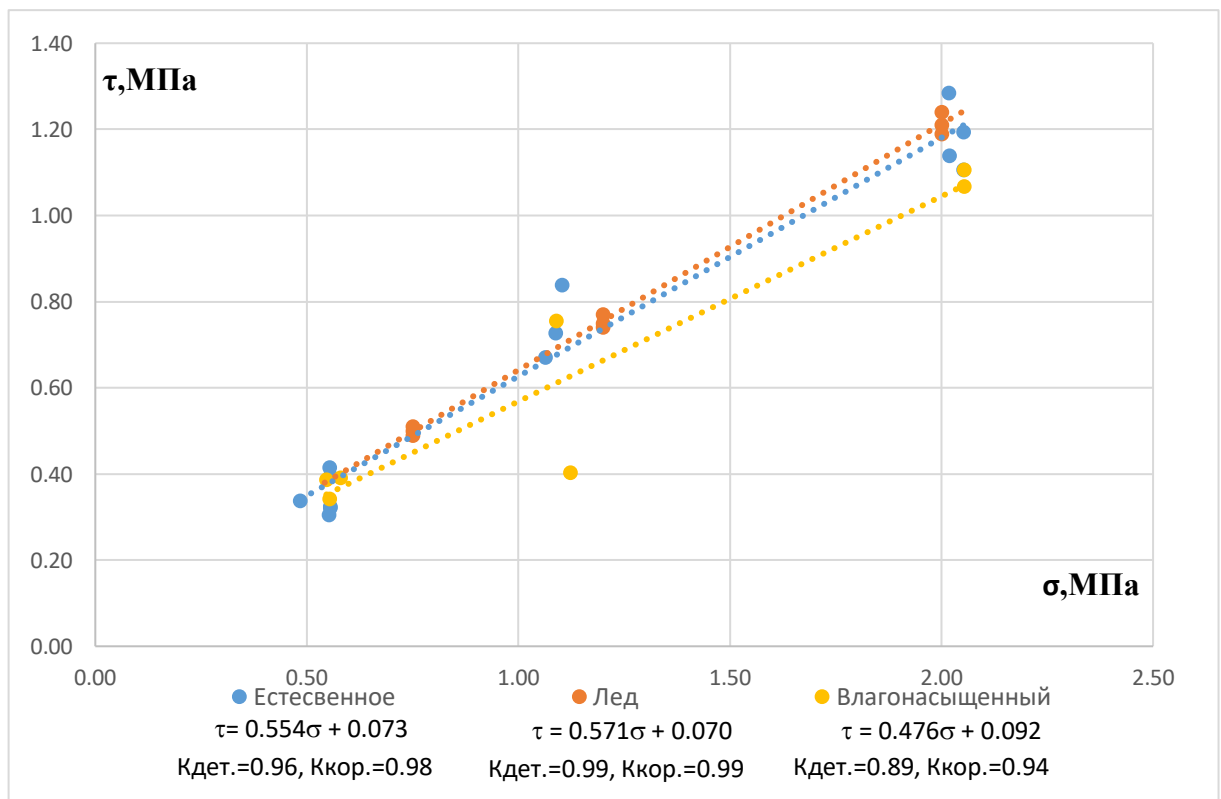


Рисунок 2.29 – Паспорт прочности на сдвиг вдоль плоскости распила (алевролит/алевропесчаник)

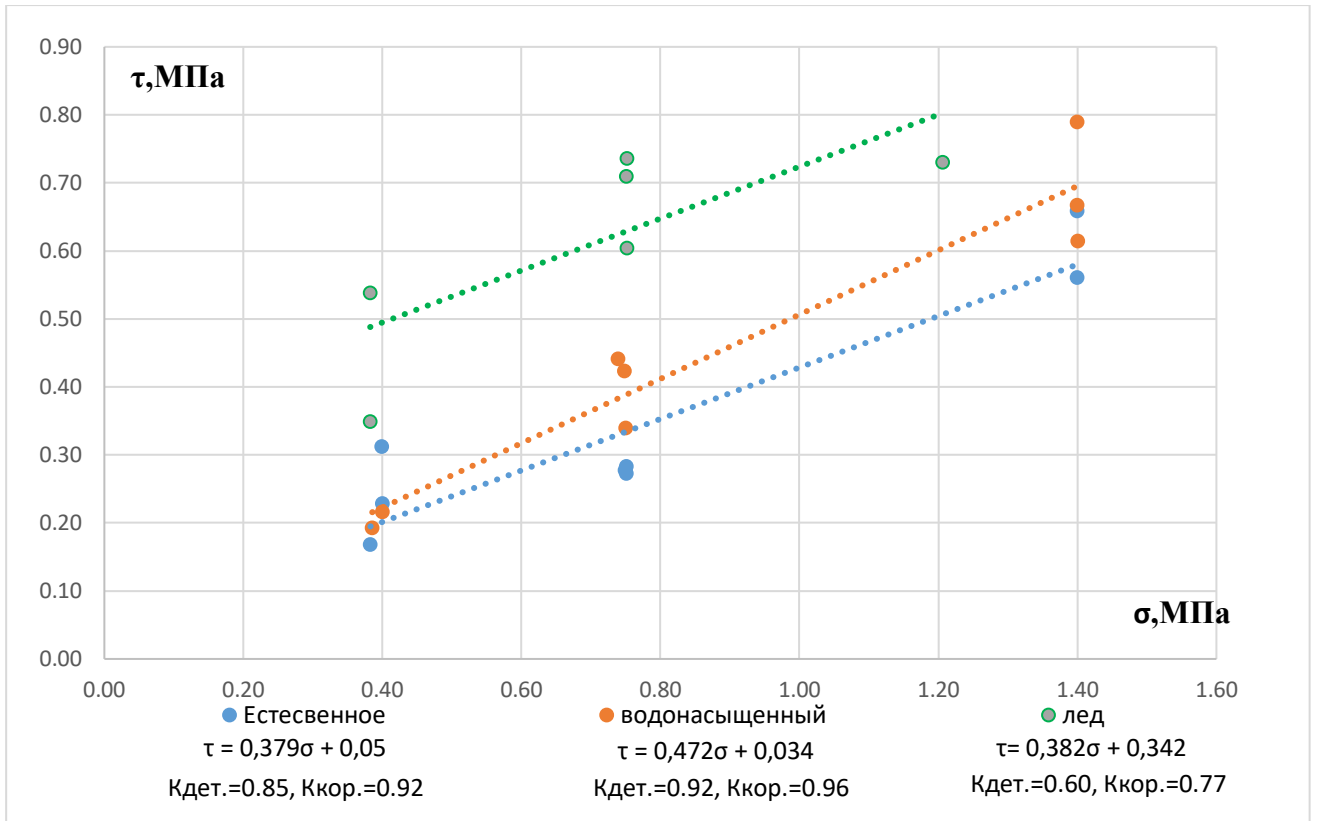


Рисунок 2.30 – Паспорт прочности на сдвиг вдоль плоскости распил (уголь 2)

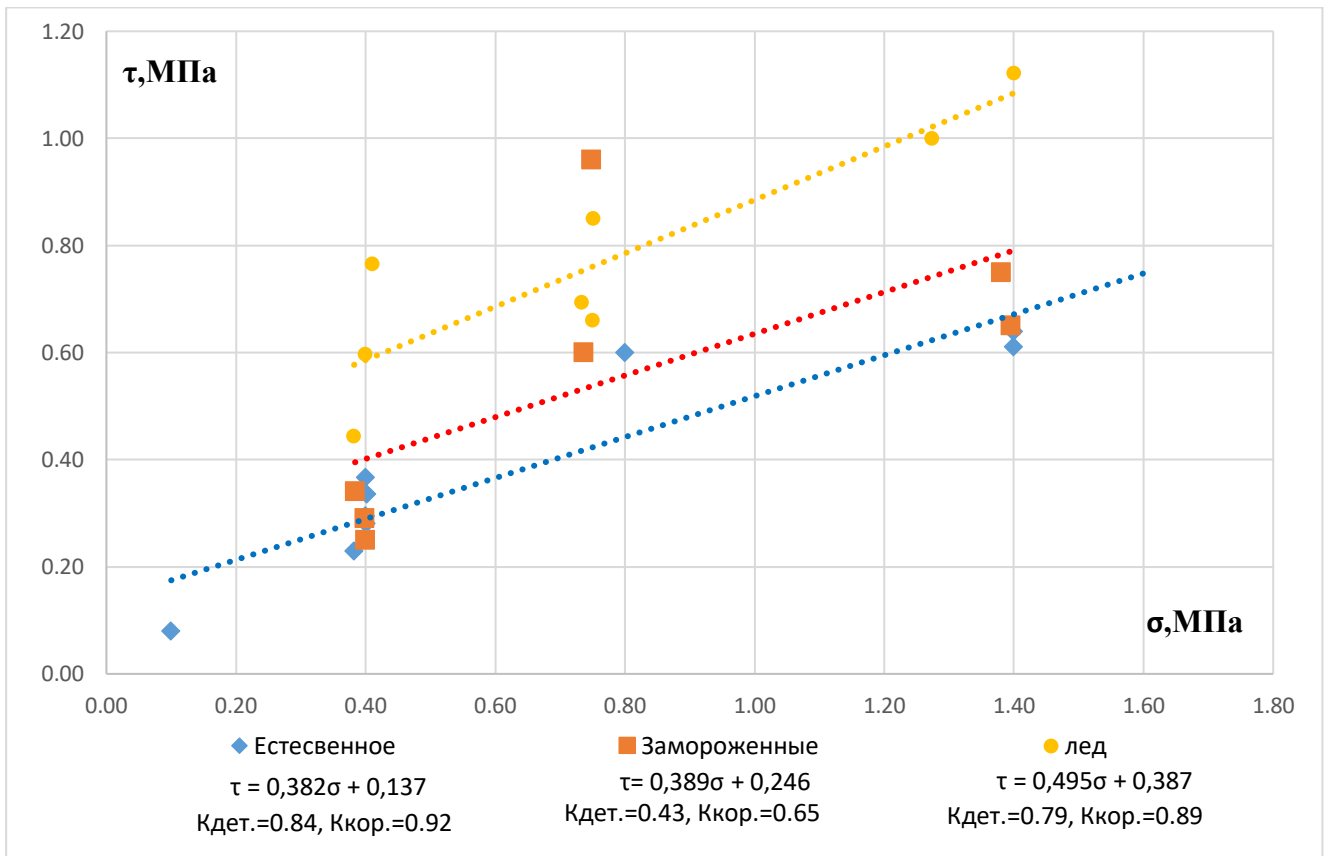


Рисунок 2.31 – Паспорта прочности на сдвиг вдоль естественной трещины (уголь 2)

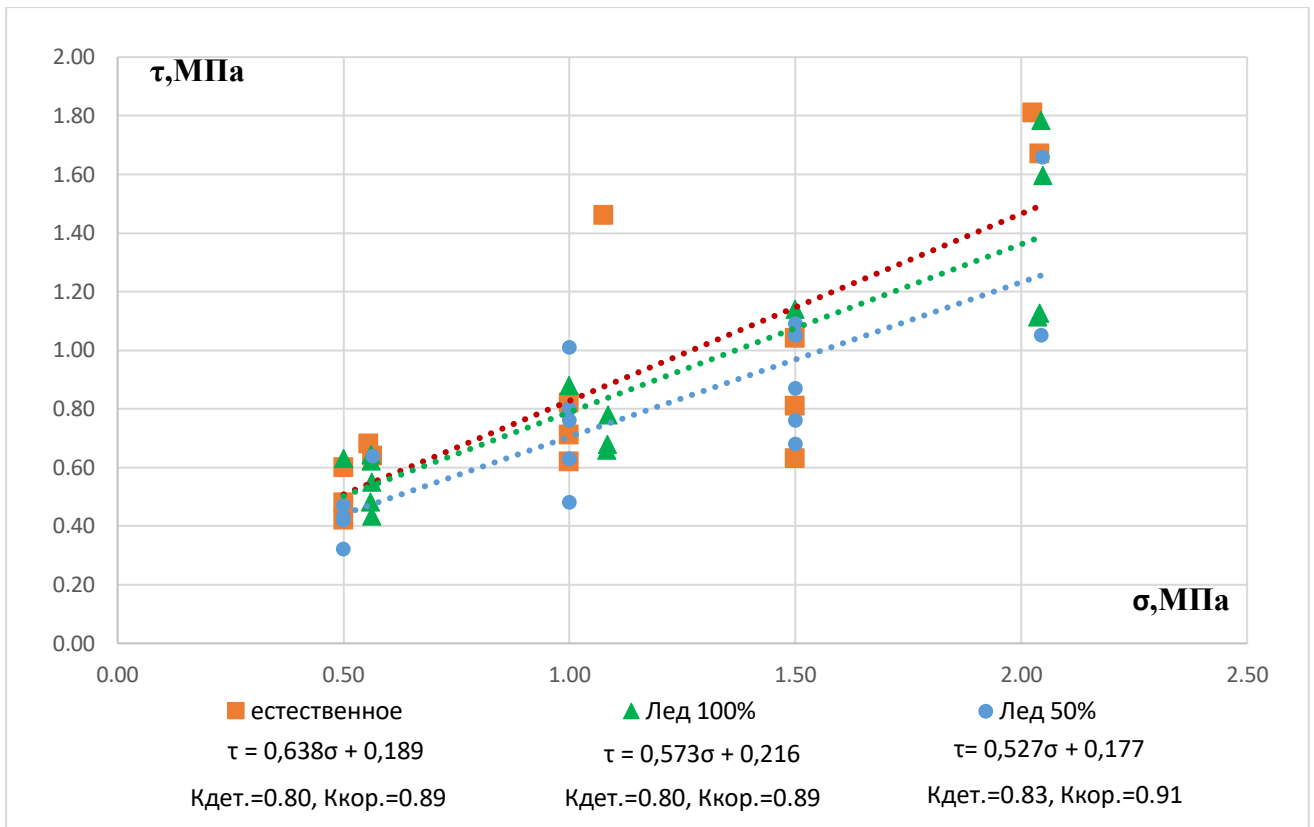


Рисунок 2.34 – Паспорта прочностей на сдвиг вдоль естественной трещины в (алевропесчаник)

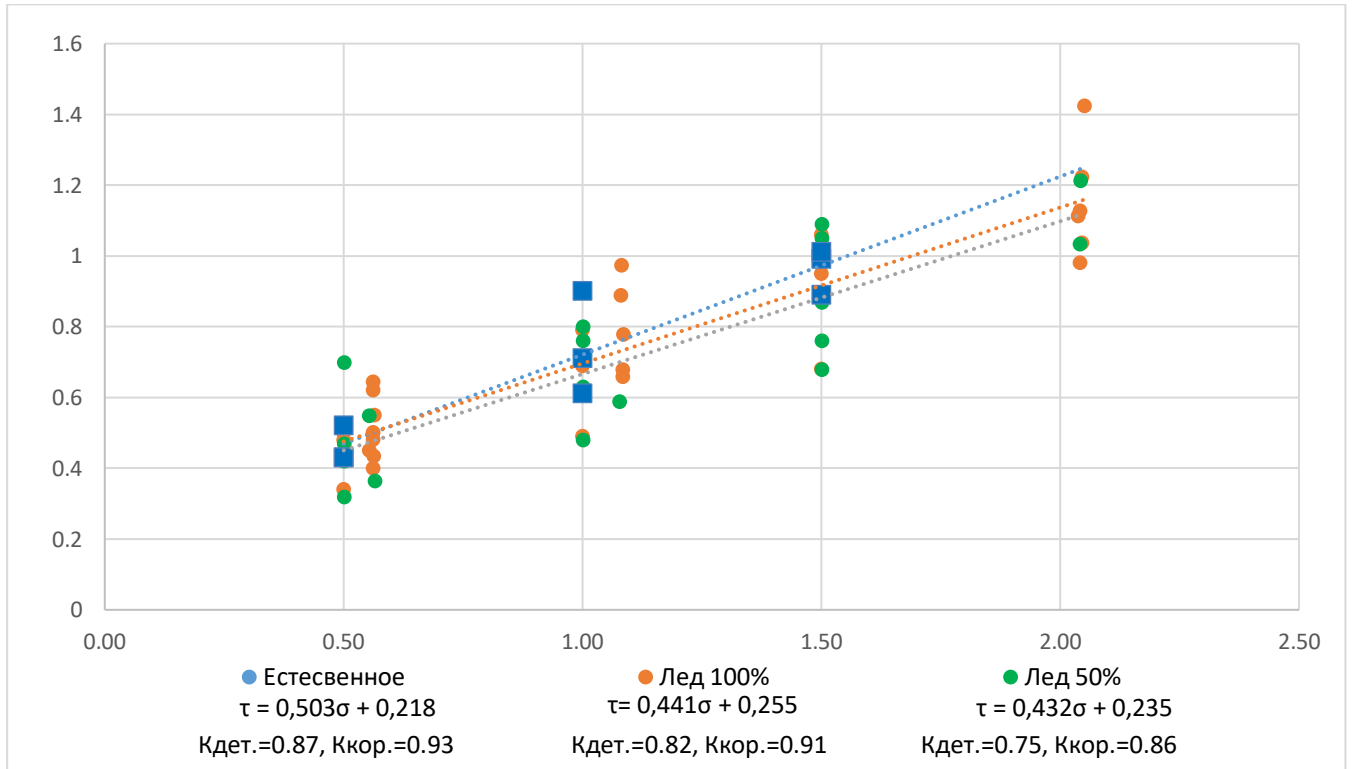


Рисунок 2.36 – Паспорта прочностей на сдвиг вдоль естественной трещины (алевролит)

2.6 Выводы по второй главе

На основании анализа результатов исследований физико-механических свойств мерзлых горных пород, проведенных различными учеными, можно сделать следующие выводы:

1. В криологических условиях под влиянием отрицательных температур происходят изменения физико-механических свойств горных пород. Эти изменения зависят от многих факторов. Однако необходимо различать воздействие данных факторов на дисперсные и скальные породы, так как воздействие данных факторов на различные породы в условиях криолитозоны приводит к различным эффектам.

2. В мерзлом состоянии дисперсные породы обладают большей прочностью, чем в талом. Дисперсные породы за счет цементации льда приобретают монолитную структуру. При этом следует отметить, что с ростом влажности прочность пород при снижении температуры увеличивается. Однако при полном влагонасыщении и перенасыщении показатели прочности идут на спад. Также стоит отметить, что длительная прочность дисперсных пород в 2-15 раз меньше мгновенной. Мгновенная прочность обуславливается высокими прочностными характеристиками льда, тогда как при длительной прочности происходит плавление льда, за счет чего нарушаются структурные связи, образуются поры и трещины, что приводит к снижению прочностных характеристик грунтов. Однако при длительных нагрузках на мерзлый грунт необходимо понимать, о какой длительности идет речь. При длительных нагрузках лед не разрушается, а плавится. Кроме того, лед обладает на порядок меньшей скоростью плавления, чем мерзлые дисперсные породы, поэтому до того момента, пока скорость плавления льда не способствует его разрушению, он упрочняет породы.

3. В существующих методических и нормативных документах по расчетам устойчивости бортов карьеров указывается, что прочность пород в образце, по контактам и в массиве, в условиях криолитозоны всегда выше, по сравнению с

теми же породами в талом состоянии. При влажности менее 0,2 % горные породы имеют одинаковые прочностные свойства в мерзлом талом состоянии.

4. По мнению ряда ученых, замораживание скальных пород приводит к уменьшению их прочностных характеристик в связи с ростом расклинивающего внутреннего напряжения, связанного с преобразованием поровой воды в частицы льда, которые с понижением температуры растут и расширяют поры и трещины. Чем большей пористостью и влажностью обладает скальная порода, тем сильнее происходит спад ее прочностных характеристик при замораживании. При дальнейших понижениях температуры, с прекращением роста льда в порах прекращается снижение прочности.

5. Одним из самых важных факторов разрушения в условиях многолетней мерзлоты является циклическое замораживание-оттаивание пород, которое характеризуется как криогенное выветривание. При температурных флуктуациях дисперсных пород происходит разрушение больших и средних фракций на более мелкие. При криогенном выветривании скальных пород, разрушение происходит за счет расклинивающего действия имеющихся пор и трещин и за счет образования новых при каждом цикле, причем, в зависимости от водонасыщенности, циклическое температурное воздействие может снижать прочность скальных пород вплоть до разрушения.

6. Разнообразие горных пород по минеральному составу, структурно-тектоническим и геологическим особенностям, неоднородности и анизотропности наделяет каждый массив своей индивидуальностью и уникальностью, поэтому весьма важно для различных месторождений проводить полный комплекс испытаний образцов горных пород на их восприимчивость к мерзлым условиям.

7. Анализ результатов исследований, выполненных различными учеными, а также проведенные нами лабораторные испытания контактов трещин и распилов в талом и мерзлых состояниях показали, что при проведении расчетов устойчивости бортов карьеров при обратном падении для наиболее полного учета реальных условий необходимо учитывать не только угол трения по контактам горных пород, но и величину сцепления. Наличие сцепления на контактах горных

пород может привести к изменению механизмов деформирования откосов, а игнорирование – к занижению параметров бортов карьеров, что весьма важно для месторождений, разрабатываемых в труднодоступных районах с неразвитой инфраструктурой.

В ходе лабораторных испытаний было установлено, что наличие мерзлотных условий имеет различное воздействие на прочностные свойства пород на контактах слоев. Результаты испытаний на сдвиг вдоль естественной трещины и плоскости распила показали, что увеличение прочностных свойств в мерзлотных условиях характерно для пород, способных впитывать влагу.

ГЛАВА 3 ИССЛЕДОВАНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ ДЕФОРМИРОВАНИЯ БОРТОВ КАРЬЕРОВ ПРИ ОБРАТНОМ ПАДЕНИИ СЛОЕВ НА МОДЕЛЯХ ИЗ ЭКВИВАЛЕНТНЫХ МАТЕРИАЛОВ

3.1 Обобщение и анализ изучения деформирования откосов на моделях из эквивалентных материалов

3.1.1 Основные особенности изучения механических процессов методом физического моделирования

Физическое моделирование представляет собой экспериментальный метод исследований сложно-структурных объектов, позволяющий на моделях, уменьшенных или увеличенных по отношению к действительности, воспроизводить и изучать физические явления натуральных условий. При геомеханических исследованиях устойчивости откосов метод моделирования является инструментом для изучения особенностей деформирования и процессов разрушения горных пород при ведении горных работ. По сравнению с натурными наблюдениями, отличающимися трудоемкостью, долгосрочностью и ограниченностью варьированием параметров исследуемого объекта, и аналитическими методами, перед которыми стоит очень сложная задача в описании и прогнозировании всех деформационных процессов, протекающих в массиве, изучение объектов посредством моделирования наиболее эффективно в простоте реализации [9].

Моделирование физических процессов основано на теории подобия. Согласно теории подобия, параметры модели и натурны связаны между собой определенными коэффициентами и преобразованиями [9, 11, 36, 42, 49].

Основные свойства и процессы подобия исследуемых явлений характеризуются тремя теоремами подобия [9, 11, 36, 49].

Первая теорема сформулирована Ж. Берtrandом в 1848 г. и основана на общем понятии динамического подобия Ньютона и втором законе механике, согласно которым явления можно охарактеризовать подобными между собой, если во всех аналогичных точках отношение одноименных величин представляет собой постоянную величину.

Вторая теорема, изложенная Дж. Букингеном и А. Федерманом в начале 20 века, устанавливает возможность сопоставлять результаты моделирования с натурой при помощи критериальных уравнений связи.

Согласно третьей теореме подобия, установленной М. В. Кирпичевым в 1930 г., для существования подобия между явлениями достаточно подобия условий однозначности и одинаковые критерии подобия.

Подобие механических процессов в модели и натуре основано на теории механического подобия Ньютона, которая предполагает геометрическое, динамическое и кинематическое подобие.

При изучении геомеханических процессов установлено, что деформации и разрушение пород происходят под действием сил тяжести. Таким образом, преобразуя формулу Ньютона, критерий подобия механических процессов, вызванных внутренними напряжениями под действием сил тяжести, можно описать следующим выражением (3.1):

$$K = \frac{N_m}{\gamma_m \cdot l} = \frac{N_n}{\gamma_n \cdot L}, \quad (3.1)$$

где K – некоторое безразмерное число, определяющее критерий подобия; l и L – линейные размеры модели и природы; γ_m и γ_n – удельный вес материала модели и природы; N_m и N_n – физико-механические характеристики модели и природы.

В практике моделирования различают физическое и математическое подобие [9, 42]. Концепция математического подобия, или аналоговое моделирование, заключается в замене одних физических полей другими, а для изучения на моделях закономерностей процессов, протекающих в натуральных условиях, используют тождественные уравнения. Одним из основных примеров аналогового моделирования является работа В. А. Веникова, который рассматривал подобие геомеханических процессов в электрических системах [13].

Физическое подобие, предусматривает идентичность модели с натурой по физической природе, но с изменением абсолютных значений, согласно принятому масштабу моделирования.

Физического моделирования бортов карьеров различают три основных метода:

- центробежный метод;
- оптический метод;
- метод эквивалентных материалов.

Основной принцип центробежного метода заключается в замещении гравитационных сил объемными инерционными силами вращения, позволяющими воспроизводить напряженно-деформационное состояние вокруг выработки как в упругой зоне, так и за ее пределами. Особенность данного метода, в отличие от метода эквивалентных материалов, заключается в способности придавать материалу модели под воздействием объемных инерционных сил, создаваемых вращением в центрифуге, некоторый фиктивный удельный вес, что позволяет при строительстве модели использовать горные породы идентичные по физико-механическим свойствам натуре без какого-либо механического масштабирования. Недостатками рассматриваемого способа моделирования является ограниченность предельных размеров модели по высоте, а также сложность воспроизведения слоистой и разнородной толщи.

Оптический метод основан на способности изотропных светочувствительных материалов под воздействием внешних нагрузок проявлять оптическую анизотропию. Поляризационный свет, пройдя через оптическую модель, разлагается на две взаимно перпендикулярные составляющие, имеющие различную скорость. Оптическая разность хода при интерференции таких лучей прямо пропорциональна разности главных нормальных напряжений. Таким образом, используя зависимость между оптическим эффектом и величиной разности главных напряжений, можно получить качественную картину распределения напряжений в исследуемом объекте.

Метод моделирования на эквивалентных материалах предложен Г. Н. Кузнецовым в 1936 г. [37]. Основной принцип данного метода заключается в замене естественных горных пород искусственными материалами при условии, что эквивалентность искусственной и естественной среды удовлетворяет

критериям подобия. Моделирование на эквивалентных материалах позволяет детально изучить механизмы процессов смещений как на поверхности массива, так и в других труднодоступных местах исследований, которые в натуральных условиях провести невозможно. Метод эквивалентных материалов является наиболее удобным и часто применяется для исследований геомеханических процессов в массивах горных пород.

3.1.2 Моделирование откосов методом эквивалентных материалов

Одним из наиболее важных этапов моделирования является подбор материала и различных компонентов, имитирующих поверхности ослабления, слабые пластичные слои, тектонические нарушения и др. Физико-механические свойства материала модели подбираются в определенных соотношениях согласно теории подобия, описанной выше. В связи с необходимостью моделирования предельного напряженного состояния на моделях малых размеров необходимо подобрать материал, имеющий большой объемный вес, маленькое сцепление и эквивалентный угол внутреннего трения. Исходя из того, что определяющими прочностными характеристиками горных пород бортов карьеров являются показатели сцепления и угла внутреннего трения, то при подборе прочностных свойств эквивалентного материала модели, согласно теории подобия, рекомендуются пользоваться следующими соотношениями (3.2, 3.3) [20]:

$$c_m = \frac{l_m}{l_n} \frac{\gamma_m}{\gamma_n} c_n, \quad (3.2)$$

$$\varphi_m \approx \varphi_n, \quad (3.3)$$

где c_m и c_n – физико-механические характеристики модели и натуре; φ_m и φ_n – физико-механические характеристики модели и натуре; l и L – линейные размеры модели и натуре; γ_m и γ_n – удельный вес материала модели и натуре.

В практике моделирования откосов для изготовления материала модели, как правило, используют смесь из слабоглинистого или кварцевого песка, трансформаторного масла, и, при необходимости, чугушной дроби для регулирования объемного веса модели [30, 47].

Для определения свойств смеси проводятся испытания на срез при различных нормальных нагрузках. При этом величина нагрузки должна соответствовать нагрузке уплотнения при закатке модели. Сопротивляемость сдвигу, в частности сцепление искусственных смесей, зависит от плотности, и возрастает с его увеличением, поэтому в зависимости от соотношения компонентов можно варьировать физико-механическими свойствами материала модели.

В работе [70] материал смеси в процессе моделирования укладывался в ящик с боковыми гранями из органического стекла с нанесенной сеткой, для установления смещений, а также с открытой верхней и одной торцевой гранью (рисунок – 3.1).

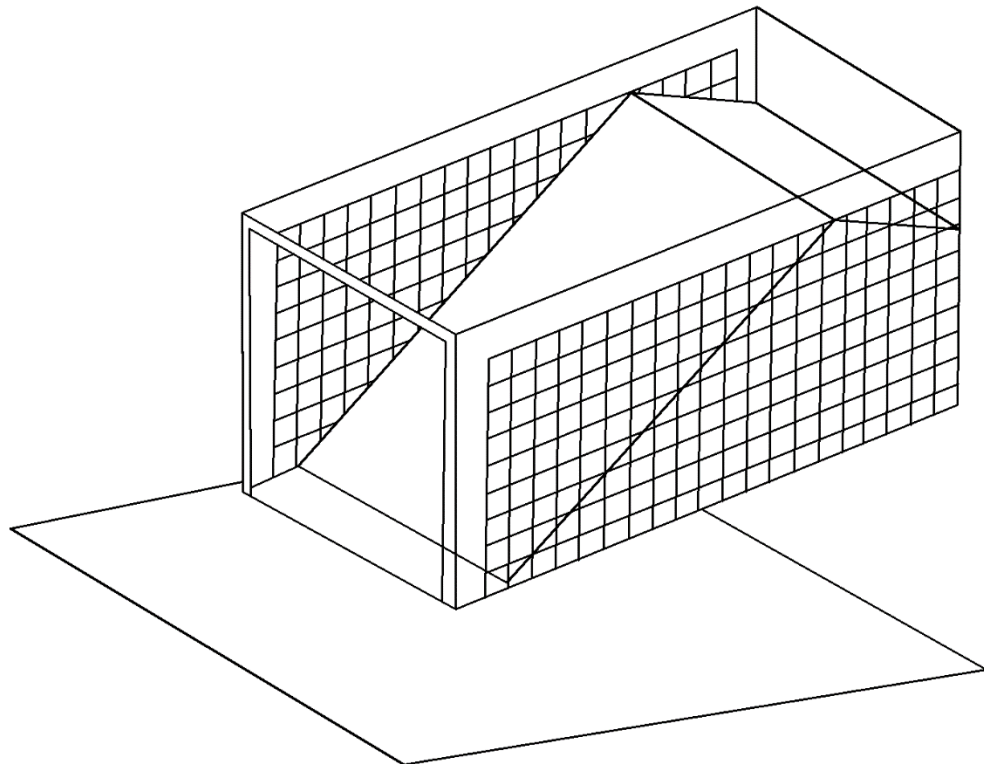


Рисунок 3.1 – Ящик модели

Определение предельного угла откоса модели осуществлялось путем подъема задней части основания ящика до обрушения. Однако основным недостатком данного способа является наличие силы трения между боковыми стенками ящика и телом модели, которая поглощает до 30 % действия веса материала модели.

Определение предельных параметров откосов при моделировании в работах [31, 32, 55] осуществлялось посредством выемки блоков и уменьшения угла наклона борта. При этом для имитации бокового распора, учитывая вышеуказанный недостаток, вместо боковых стенок в теле модели устанавливались стяжки с дискообразными элементами на концах, воспроизводящие объемное напряжение.

В работе [70] приведен сравнительный анализ данных теоретических расчетов и фактических результатов моделирования откосов установлено следующее:

- предельная высота смоделированных откосов, при одинаковых углах наклона, больше высоты расчетных на 6 %, в некоторых случаях на 12-15%;
- угол откоса борта, при одной и той же высоте, больше на 1,5°;
- расчетная и фактическая поверхность ослабления совпадает;
- фактическая высота отрыва (Н90) меньше расчетной на 12%, в некоторых случаях меньше на 30% или больше 15-16%.

Опыт работ по моделированию слоистых откосов приведен в материалах [32, 33, 54]. Особенность данных исследований заключается в способе создания модели и воспроизведения контактных условий. При создании модели слои необходимо укладывать в горизонтальной плоскости, поэтому матрицу, в которую закладывается материал модели, устанавливают на специальном вращательном стенде. Для моделирования слабых контактных условий в большинстве случаев между слоями укладывают либо полиэтилен, либо наносят слюду.

Большинство методов оценки устойчивости откосов, представленных в правилах обеспечения устойчивости откосов на угольных разрезах, определены по результатам физического моделирования.

Для оценки устойчивости откосов с крутопадающей слоистостью Б. Г. Афанасьевым была разработана методика, вошедшая в правила [61]. Суть данной методики заключается во введении отрицательной поправки в предельный

угол изотропного откоса. Величина такой поправки составляет $10-15^\circ$ и определяется с помощью графиков, представленных на рисунке 1.6 (пункт 1.3).

Однако данный способ не учитывает значение сцепления по контактам слоев, при наличии которого величина отрицательной поправки предельных углов изотропного и с крутопадающей слоистостью откосов может быть значительно меньше той, что указана в нормах. Отсюда следует, что используя принятый метод расчета, существует риск занижения предельных параметров бортов карьеров и уменьшения экономической эффективности открытой разработки, что может привести к неправильным «перестраховочным» решениям о нецелесообразности разработки месторождений в труднодоступных условиях с неразвитой инфраструктурой. Кроме того, данный способ разработан по результатам моделирования откосов бортов, высота которых составляет 200 м, в то время как на данный момент высота бортов достигает 500 м и более. Таким образом, данная тема изучена не достаточно и требует дальнейших исследований.

3.2 Физическое моделирование бортов карьеров, формируемых в массиве при крутом несогласном с наклоном борта падении слоев

Для моделирования откосов с обратным падением слоев методом эквивалентных материалов, учитывая, опыт исследований прошлых лет, описанный выше, были проведены следующие работы:

- выбор физико-механических свойств материала модели;
- подбор и испытание физико-механических свойств материала модели;
- изготовление физических моделей;
- процесс моделирования поэтапной открытой отработки;
- анализ и обработка результатов моделирования.

3.2.1 Выбор физико-механических свойств

В качестве примера рассматривалось осадочное месторождение с крепкими скальными вмещающими породами, представленными песчаниками и алевролитами. В натуральных условиях высота исследуемого борта карьера составляет 500 м, средневзвешенная величина сцепления вмещающих

пород – 0,53 МПа, угол внутреннего трения вмещающих пород – 32° , плотность – 2,7 т/м³. Высота модели составляет 0,6 м, угол внутреннего трения материала смеси – 32° , плотность – 3,15 г/см³. Учитывая данные условия, согласно принципу механического подобия [20] получаем следующее:

$$C_m = C_n \cdot \frac{\gamma_m}{\gamma_n} \cdot \frac{l_m}{L_n} = 0,9 \cdot 0,0007 = 0,0007 \text{ МПа} = 70 \text{ Па} = 7 \text{ г/см}^2$$

$$\varphi_m \approx \varphi_n$$

На основании результатов расчетов определения физико-механических свойств модели, характеризующих натурные условия, были проведены экспериментальные исследования для подбора их оптимальной рецептуры.

3.2.2 Подбор и испытание физико-механической свойств эквивалентных материалов модели

При разработке рецептуры были учтены результаты физического моделирования, приведенные в работах [31, 55]. За основу был принят эквивалентный материал, состоящий из кварцевого песка, буровой чугунной дроби и машинного масла.

Использование дроби обусловлено необходимостью применения более крупного масштаба моделирования прочностных параметров горных пород путем изменения соотношения удельных весов материалов природы и модели, а машинное масло обеспечивало требуемое сцепление частиц песка и дроби, а также величину угла внутреннего трения.

Однако проведённые предварительные испытания показали, что использование машинного масла не обеспечивает однородности свойств ЭМ, вследствие его «перетекания» от вышележащих слоёв к нижележащим (при укатке). Поэтому в качестве связующего был выбран жировой солидол типа Ж, обеспечивающий близкие к машинному маслу характеристики и однородность свойств ЭМ по всему объёму.

Методика изготовления образцов из ЭМ включала в себя:

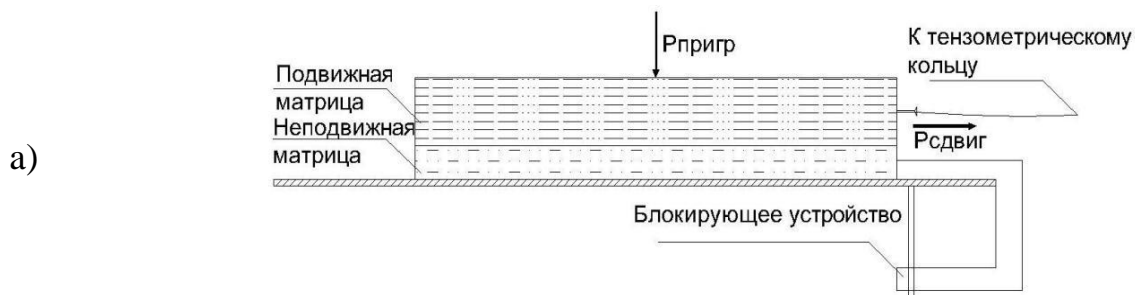
- перемешивание смеси кварцевого песка и солидола в смесителях типа ЗЛ-10-01 и ЗЛ-63-01 на 10 и 63 литра, оснащенных лопастями специальной Z-образной формы;
- перемешивание смеси песка, солидола и чугунной дроби (до 2,0 мм) в бетономешалке;
- укладку полученной смеси ЭМ в стационарную и подвижную матрицу;
- уплотнение смеси в матрицах с помощью стального катка с удельным давлением $2,5 \text{ Н/см}^2$ (7 полных циклов укатки).

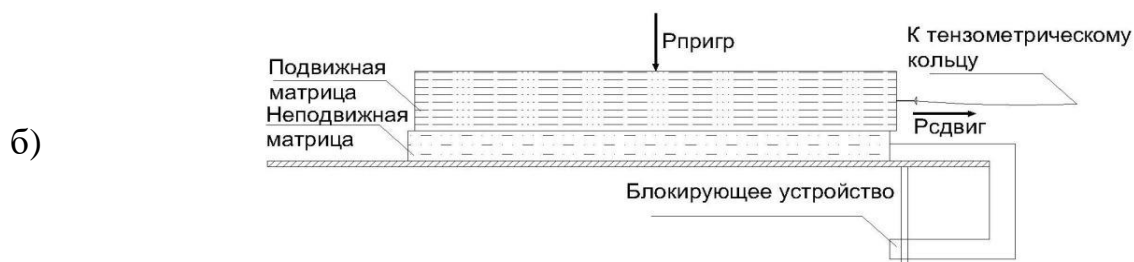
Для исследований прочностных свойств образцов ЭМ проводились следующие испытания: прочность на одноосное сжатие и растяжение, на одноплоскостной срез.

При этом основное внимание было уделено определению характеристик сдвигу: сцеплению и углу внутреннего трения. Методика определения этих параметров при испытаниях образцов из ЭМ включала в себя:

- закрепление неподвижной матрицы;
- установку силоизмерительного тензометрического кольца;
- создание нормальной нагрузки с учетом собственного веса ЭМ;
- проведение испытаний на сдвиг;
- построение графических зависимостей.

На рисунке 3.3 представлена принципиальная схема установки для проведения испытаний образцов ЭМ на одноплоскостной срез.





а) – до сдвига; б) – после сдвига

Рисунок 3.3 – Схема испытаний образцов ЭМ на срез

В таблице 3.1 приведены данные по результатам испытаний ЭМ с различным процентным содержанием солидола, песка и «литой» дроби. Основная фракция кварцевого песка – 0,3 мм, чугунной литой дроби – 2,0 мм.

Таблица 3.1 – Результаты определения основных физико-механических свойств ЭМ

Рецептура ЭМ	Вид испытания	Результат испытаний, г/см ²
60%-Др 39%-П 1%-С	Одноосное сжатие	14
60%-Др 39%-П 1%-С		17
60%-Др 39%-П 1%-С		нет
60%-Др 38%-П 2%-С		21
60%-Др 38%-П 2%-С		25
60%-Др 38%-П 2%-С		28
60%-Др 37%-П 3%-С		33
60%-Др 37%-П 3%-С		29
60%-Др 37%-П 3%-С		28
60%-Др 39%-П 1%-С		Одноосное растяжение
60%-Др 39%-П 1%-С	5,6	
60%-Др 39%-П 1%-С	5,8	
60%-Др 38%-П 2%-С	7,4	
60%-Др 38%-П 2%-С	6,8	
60%-Др 38%-П 2%-С	7,0	
60%-Др 37%-П 3%-С	15,8	
60%-Др 37%-П 3%-С	12,6	
60%-Др 37%-П 3%-С	10,7	
60%-Др 39%-П 1%-С	Одноплоскостной срез	
60%-Др 39%-П 1%-С		19,8
60%-Др 39%-П 1%-С		27,4
60%-Др 38%-П 2%-С		18,4
60%-Др 38%-П 2%-С		23,9
60%-Др 38%-П 2%-С		29,3
60%-Др 37%-П 3%-С		21,4
60%-Др 37%-П 3%-С		36,3
60%-Др 37%-П 3%-С		42,1

Прим. Др – литая чугунная дробь; П – песок; С – жировой солидол.

Окончательные результаты испытаний на сдвиг эквивалентных материалов для моделирования изотропного и слоистого массива приведены на рисунке 3.4.

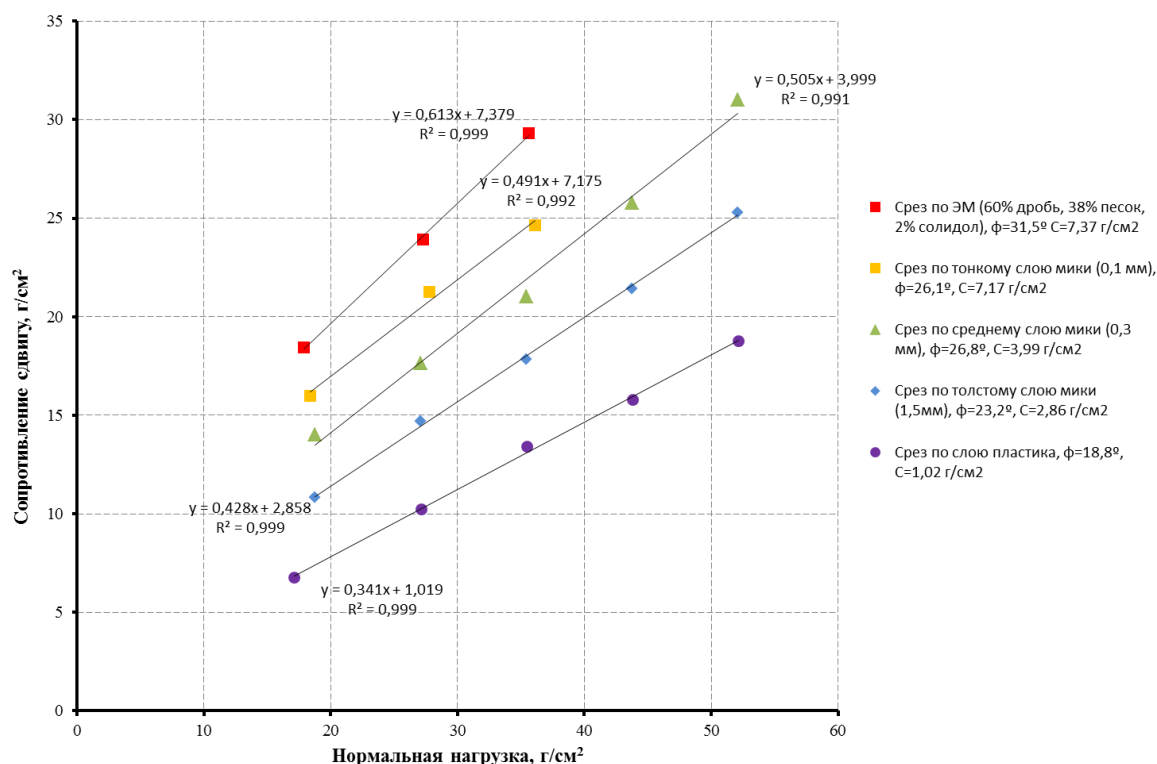


Рисунок 3.4 – Результаты испытаний на сдвиг ЭМ при различных контактных условиях

В соответствии с проведенными экспериментами для моделирования сплошного массива был выбран ЭМ следующего состава:

- «литая» дробь – 60 %;
- мелкодисперсный кварцевый песок – 38 %;
- жировой солидол – 2 %.

Для моделирования контактов слоёв были использованы следующие материалы:

- полиэтиленовая плёнка 150 мкм (2 слоя);
- слюда пластинчатая.

3.2.3 Изготовление физических моделей

Стенд для моделирования геомеханических процессов был разработан на базе поворотного стенда, обеспечивающего воспроизведение пластов крутого падения (до 90°). Схема стенда до и после модернизации приведена на рисунке 3.5.

а)



б)



Рисунок 3.5 – Поворотный стенд до модернизации(а) и после модернизации(б)

Размеры ДхВхГ «рабочей камеры» для изготовления модели составили, соответственно 1,87х0,77х0,51 м. Камера изготавливалась из многокомпонентного материала в составе алюминиевых и стальных швеллеров, стальных листов различной толщины, клееной дощатой древесины, ДВП, ДСП. Составные элементы камеры скреплялись между собой и с элементами поворотного стенда с помощью специального крепежа.

Физические модели изготавливались по технологии аналогичной изготовлению образцов путем послойного уплотнения катком с удельным давлением 2,5 Н/см² при 7 циклах послойно. Для обеспечения воспроизведения

объемного напряженного состояния при формировании моделируемого массива в процессе изготовления модели между слоями устанавливались металлические стяжки с плотностью, обеспечивающей перекрытие порядка 40 % внешней поверхности модели. Схема расположения стяжек приведена на рисунке 3.6.

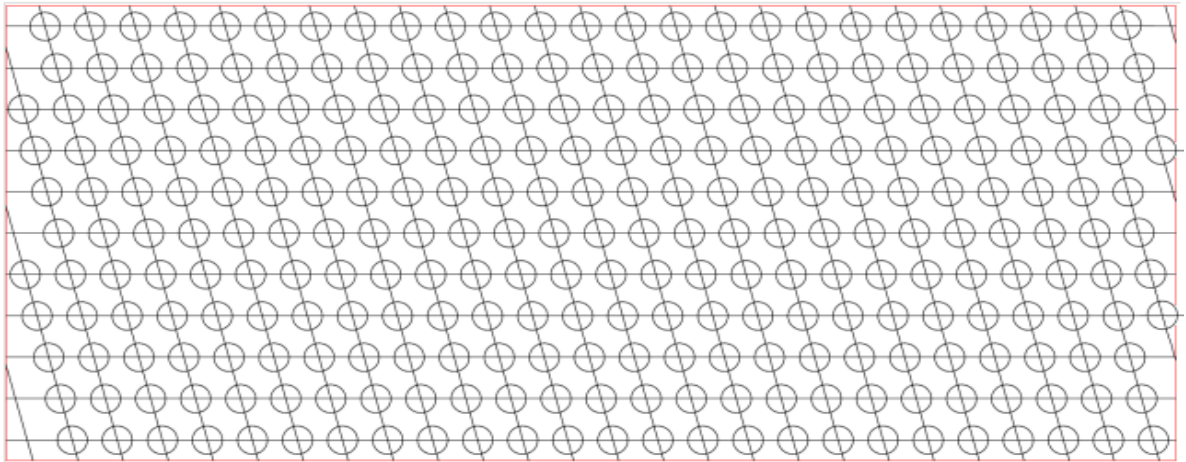


Рисунок 3.6 – Схема расположения стяжек в модели

Для обеспечения укатки слоёв в горизонтальной плоскости и устойчивости модели проводился предварительный поворот стенда на угол 73° , соответствующий углу обратного падения моделируемых пластов, а также установка сплошной опалубки по мере изготовления модели, рисунок 3.7.



Рисунок 3.7 – Основное положение стенда при изготовлении модели

После изготовления модели проводился обратный поворот стенда и снятие сплошной опалубки, рисунок 3.8.



Рисунок 3.8 – Вид изготовленной модели, повернутой в рабочее положение

В соответствии с проведёнными испытаниями образцов были выбраны физико-механические свойства эквивалентных материалов для создания моделей с тремя различными условиями, которые приведены в таблице 3.2.

Таблица 3.2 – Физико-механические свойства эквивалентных материалов

№ модели	Прочностные свойства в массиве		Прочностные свойства на контактах слоев		Угол падения слоев, град.
	Сцепление (C), г/см ²	Угол внутреннего трения (φ), град.	Сцепление (C'), г/см ²	Угол внутреннего трения (φ), град.	
1	7,37	31,5	-	-	-
2	7,37	31,5	1,02	18,8	73
3	7,37	31,5	2,86	23,2	73

При воспроизведении относительно слабых контактных условий в модели 2 использовалась двухслойная полиэтиленовая плёнка, а при моделировании более

высоких значений прочностных свойств на контактах в модели 3 – пластинчатая слюда.

3.2.4 Процесс моделирования поэтапно открытой отработки

Процесс моделирования представлял собой поэтапную выемку блоков, которая обусловлена увеличением высоты и изменением угла откоса борта, вплоть до обрушения. На рисунке 2.9 представлена схема поэтапной отработки модели массива.

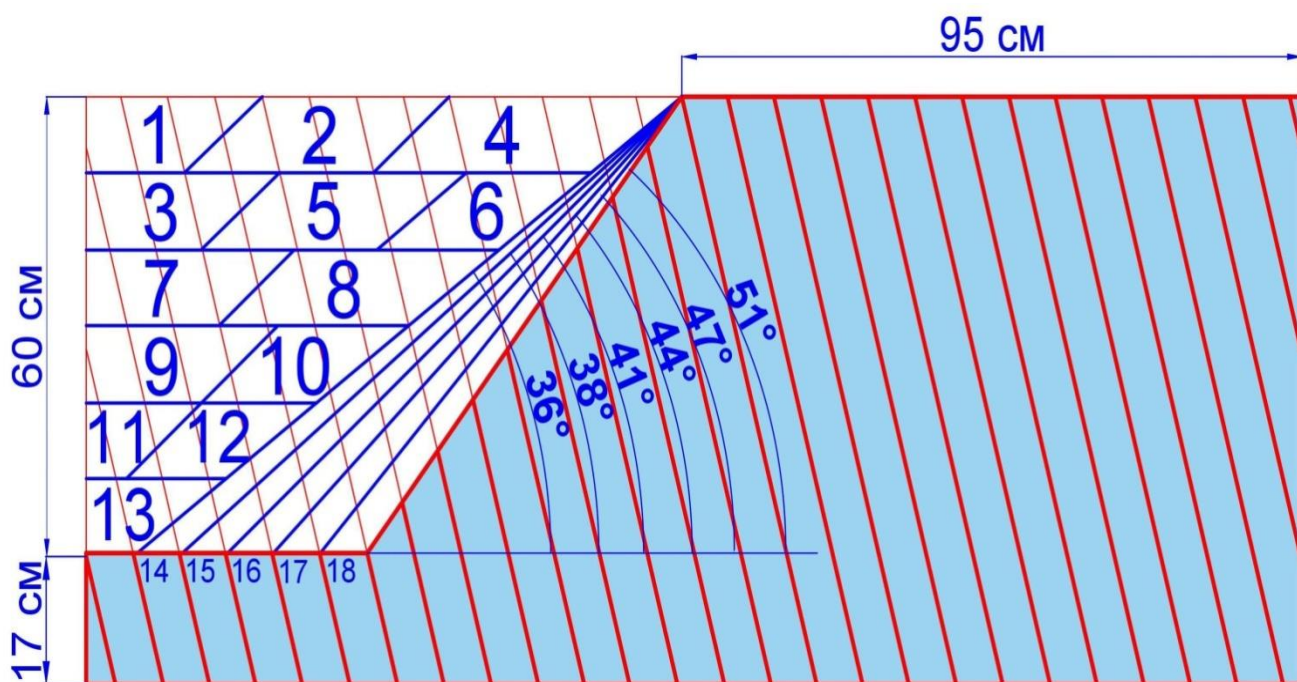


Рисунок 2.9 – Общая схема отработки моделей

Для обеспечения интегральной оценки процессов деформирования массива по всей глубине модели на внешнюю дисковую поверхность стяжек были установлены квадратные реперные марки (рисунок – 3.10), форма которых обеспечивает надежную фиксацию ее перемещения в 2D формате с помощью системы фото-видеофиксации и специального программного обеспечения.

В качестве фото-видеофиксаторов были использованы фоторегистратор Hasselblad H5D-200MS и высокоскоростной видеореги­стратор NAC Memrecam HX-3 (рисунок 3.11).



Рисунок 3.10 – Вид модели перед обработкой со стяжками



Рисунок 3.11 – Вид фоторегистратора Hasselblad H5D-200MS и видеореги­стратора NAC HX-3.

3.2.5 Результаты анализа физического моделирования

Обработка фото-видео материалов осуществлялась при помощи специального программного обеспечения ТЕМА Motion 2D, которая осуществляет импорт, экспорт и обработку фото- и видеофайлов в стандартных форматах, задание системы координат, автоматическое отслеживание координат маркеров или характерных элементов изображения в каждом кадре

видеозаписи/серии фотографий с помощью различных алгоритмов слежения и вычисления линейных и угловых перемещений, скоростей и ускорений с использованием координат найденных маркеров и/или характерных точек и информации о скорости съемки.

Таким образом, с помощью программного обеспечения ТЕМА Motion 2D на каждом этапе моделирования были определены координаты каждой марки, заложенной в теле модели. Для каждой модели за все этапы моделирования получен массив данных порядка 3000 значений, в различных системах координат. Путем сравнения координат марок на различных этапах были определены смещения горизонтального, вертикального и общего направления. По результатам такой обработки выявлены особенности деформирования откосов от первичных проявлений смещений до резких скачков деформаций и полной потери устойчивости, а также установлены механизмы их обрушения.

В результате проведенного моделирования были зафиксированы следующие процессы деформирования:

1) Процесс разрушения изотропного откоса характеризуется классическим сдвижением горной массы по плавной криволинейной поверхности скольжения (рисунок 3.11).

Обрушению предшествует резкий скачок деформаций. В ходе анализа определена фактическая поверхность скольжения, вдоль которой осуществлено обрушение, и положение поверхности скольжения, определенной по результатам расчета устойчивости методом алгебраического сложения сил. На рисунке 3.11 приведено расположение фактической и расчетной поверхностей скольжения.

При деформировании изотропного откоса вектора смещений точек в призме обрушения повторяют форму поверхности скольжения (или направлены параллельно) и по своим величинам практически равны друг другу во всех частях призмы обрушения (рисунок 3.12).

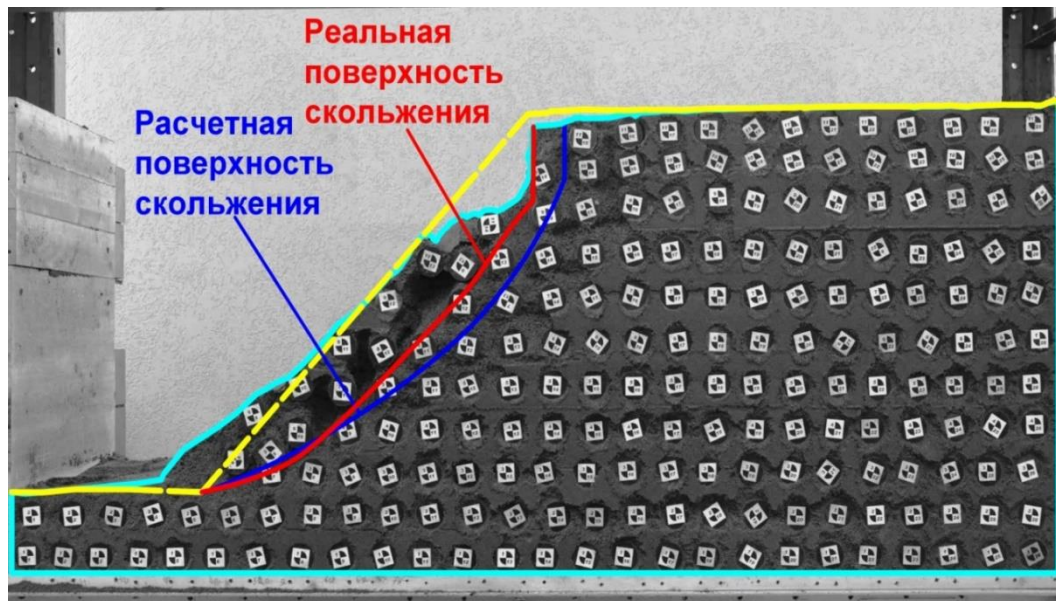


Рисунок 3.11 – Разрушение изотропного откоса (желтая пунктирная линия – контур до обрушения откоса)

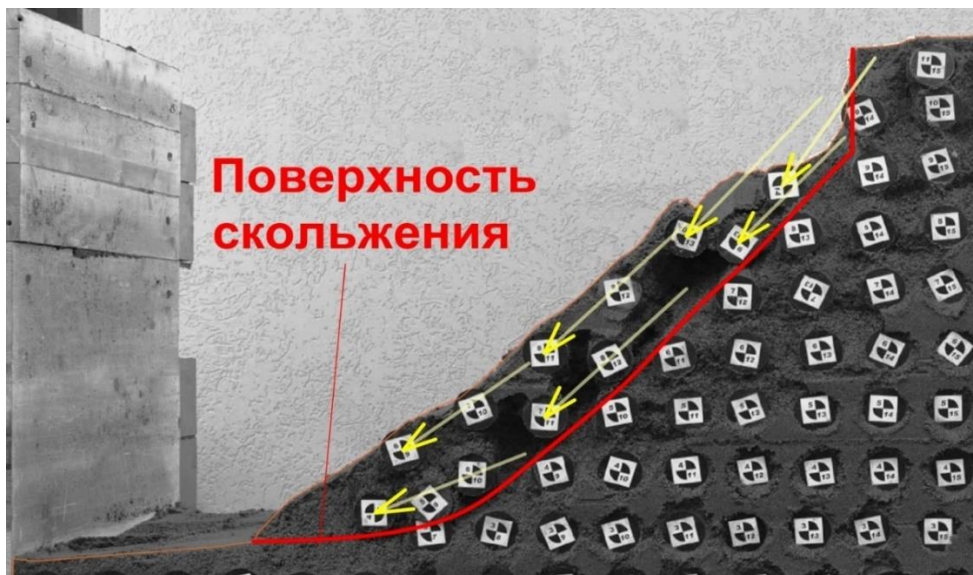


Рисунок 3.12 – Вектора смещений при деформировании изотропного откоса

2) Процесс деформирования слоистого откоса «слабый контакт» начался задолго до наступления предельного состояния и представляет собой совсем иной механизм, нежели движение по поверхности скольжения, свойственное изотропному откосу (рисунок 3.13).

В данном случае процессу разрушения предшествовали поэтапные скачки деформаций, сопровождающиеся небольшими наклонами слоев. Процесс нарастания деформаций характеризуется увеличением интенсивности наклона слоев, которые впоследствии трансформировались в полное их опрокидывание.

При деформировании слоистого откоса «слабый контакт» вектора смещений имеют форму полуокружности, что характеризует наклоны и опрокидывание слоев (рисунок 3.14).

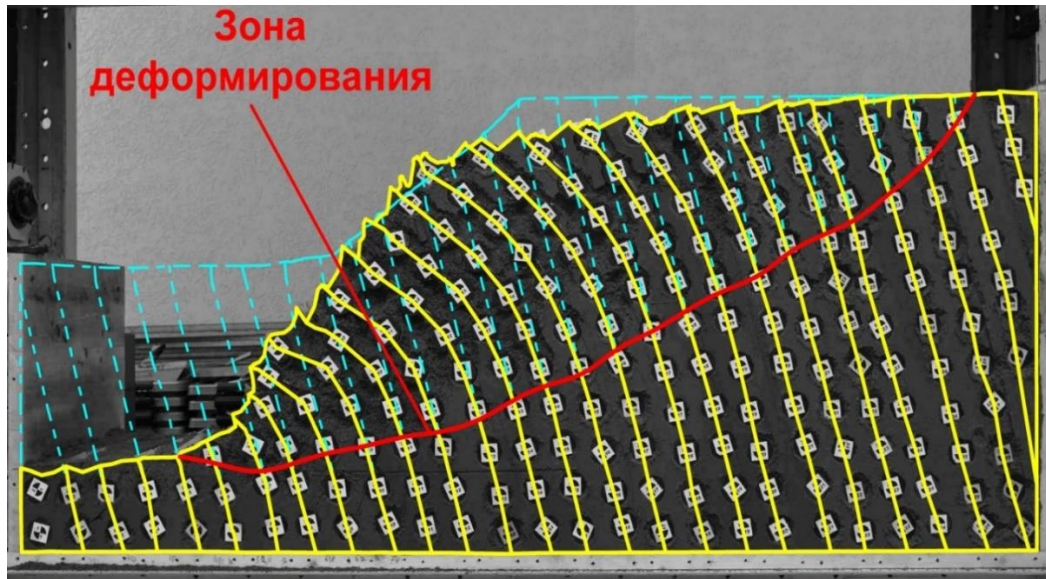


Рисунок 3.13 – Разрушение слоистого откоса «слабый контакт»

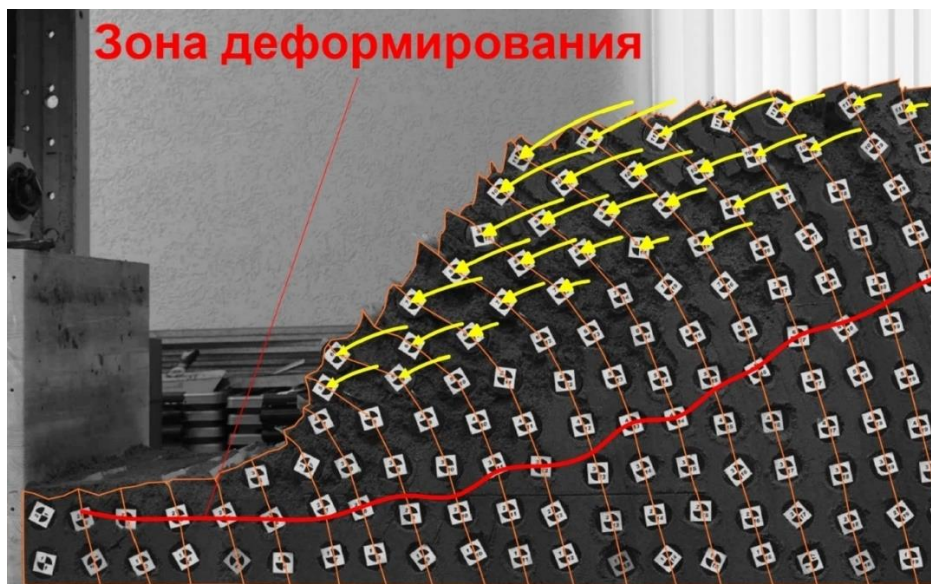


Рисунок 3.14 – Вектора смещений при деформировании слоистого откоса "слабый контакт"

3) Процесс разрушения слоистого откоса «прочный контакт» совмещает в себе особенности разрушения как изотропного, так и слоистого откоса «слабый контакт» (рисунок 3.15).

Процесс деформирования, также как и у слоистого откоса «слабый контакт», характеризуется поэтапными скачками деформаций в виде наклонов слоев, хоть и с меньшей интенсивностью, однако далее процесс деформирования

трансформировался в изгиб слоев с подрезкой вкrest наслоения по поверхности аналогичной изотропному откосу.

Вектора смещений при деформировании слоистого откоса «прочный контакт» имеют траекторию вдоль направления среза слоев вкrest наслоения, что сопоставимо с характером формирования векторов смещений в изотропном откосе (рисунок 3.16).

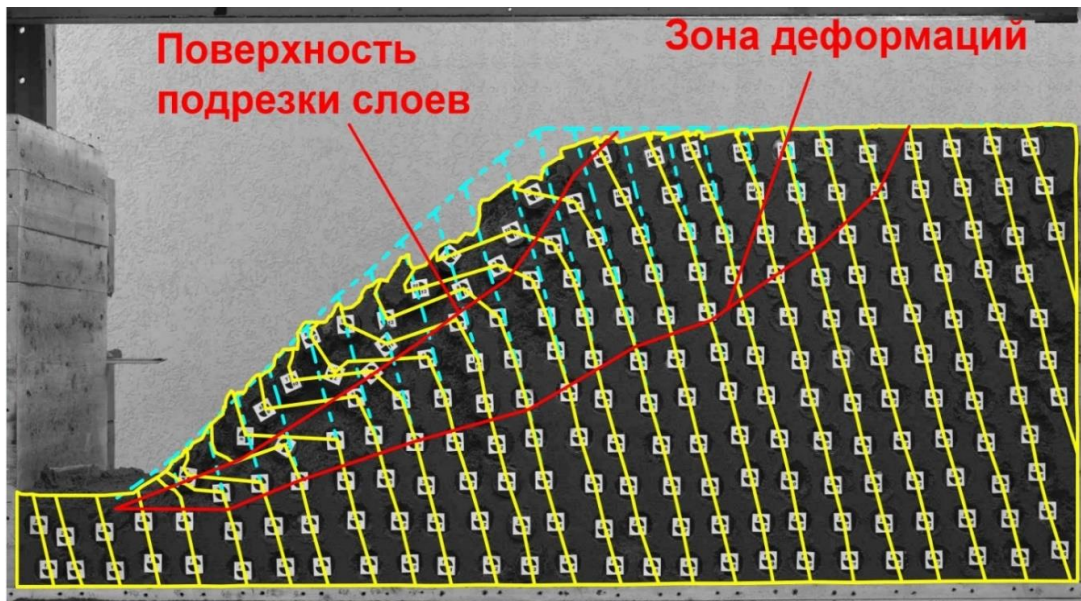


Рисунок 3.15 – Разрушение слоистого откоса «прочный контакт»

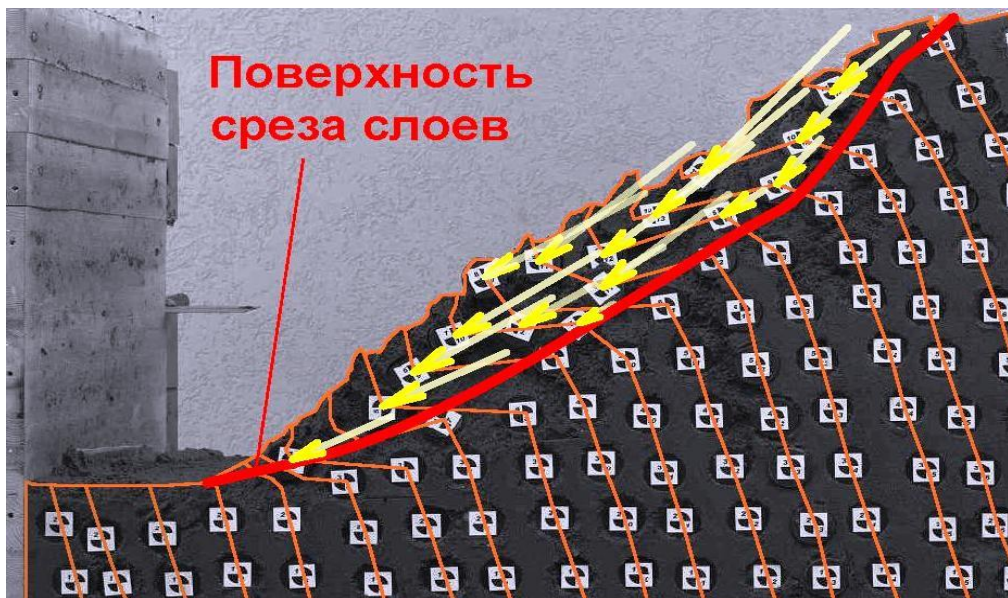


Рисунок 3.16 – Вектора смещений при деформировании слоистого откоса «прочный контакт»

Стоит отметить, что направления векторов смещений обусловлены механизмами деформирования откосов. В ходе анализе направлений векторов

смещений в качестве критерия было выбрано отношение горизонтальных и вертикальных составляющих максимальных смещений в откосе. Характер изменения векторов смещений при различных коэффициентах запаса на этапах, близких к предельному состоянию откосов характеризуется зависимостями, представленными на рисунке 3.17.

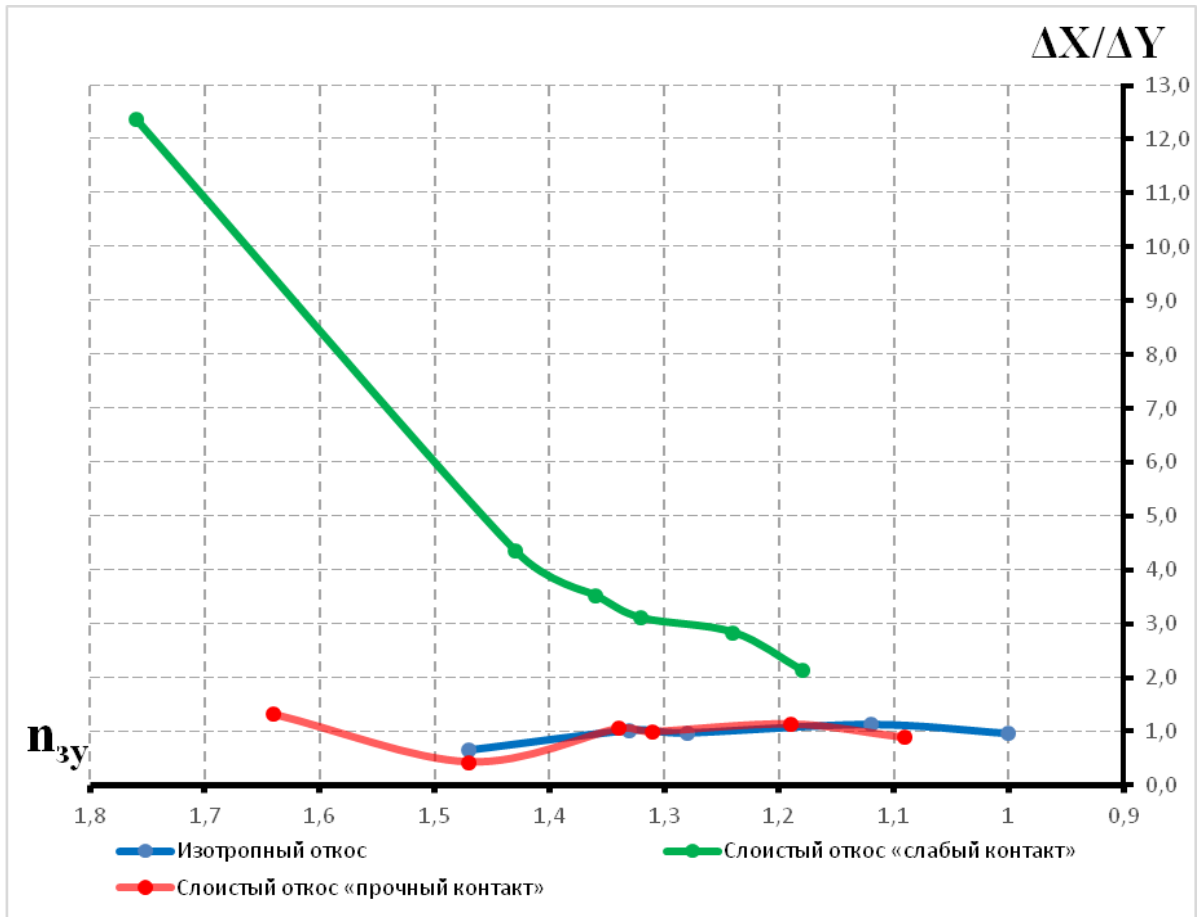


Рисунок 3.17 – Зависимость отношения горизонтальных и вертикальных смещений от коэффициента запаса устойчивости

Как показано на рисунке 3.17, при деформировании слоистого откоса «слабый контакт» отношение горизонтальных и вертикальных смещений уменьшилось с 12 до 2. Угол наклона векторов смещений при этом меняется в пределах $85-65^\circ$. Значительное преобладание горизонтальных смещений над вертикальными и дальнейшее изменение их соотношения обусловлено поворотом слоев, в результате чего форма векторов смещений представляет собой дугу окружности с центром, расположенным на некоторой линии, ограничивающей зону обрушения. При деформировании слоистого откоса «прочный контакт»

характер векторов смещений аналогичен характеру смещений при разрушении изотропного откоса. Соотношение горизонтальных и вертикальных смещений в процессе деформирования меняется незначительно, и находится в пределах 1,3-0,9. Углы векторов смещений меняются в пределах 49-41°.

Как показывают результаты физического моделирования величина сцепления играет важную роль в процессах формирования напряженно-деформационного состояния в бортах карьерах с обратной слоистостью. С изменением величины сцепления, интенсивность наклона слоев, характеризующаяся преобладанием горизонтальных смещений, и период активации процессов трещинообразования до наступления предельного состояния становится меньше, а сам механизм разрушения становится ближе к изотропному, что обусловлено увеличением предельного угла откоса. Такой вывод имеет особенное значение в криолитозоне, при оценке предельных параметров откосов с обратной слоистостью в мерзлом состоянии, для которых характерно повышение величины сцепления на контактах слоев.

3.3 Выводы по третьей главе

На сегодняшний день не существуют надежного метода, позволяющего прогнозировать механизмы разрушения откосов с обратной слоистостью. Методика, принятая в правилах [70], существенно завышает влияние обратного падения на предельно возможный угол падения борта и не учитывает влияния сцепления слоев. В то же время пренебрежение слоистостью, направленной в массив, ведет к недопустимому завышению углов откосов и риску обрушения бортов.

Механизм разрушения откоса с падением слоев в массив в первую очередь определяется прочностью контактов: при прочностных свойствах контактов, приближающихся к прочности основного массива, наиболее вероятно разрушение по плавной криволинейной поверхности скольжения, как у однородного откоса; при менее прочных контактах («прочный контакт») наиболее вероятен механизм разрушения, сочетающий изгибы слоев с их дальнейшей подрезкой по

криволинейной поверхности; при еще меньшей прочности контактов («слабый контактов») – изгибы слоев с последующем опрокидыванием [83].

Проведенные исследования показали, что с помощью физического моделирования методом эквивалентных материалов, современного оборудования и способов обработки результатов можно устанавливать закономерности деформирования бортов карьеров применительно к конкретным горно-геологическим условиям, а также выявлять особенности поведения прибортового массива непосредственно перед обрушением и определять предельный угол борта карьера. Однако, не смотря на свое преимущество, данный метод является весьма трудоемким.

Поэтому для оценки устойчивости откосов с обратной слоистостью необходимо разработать методику, отличающуюся простотой использования и учитывающую наиболее основные факторы, которые оказывают влияние на предельные параметры откоса.

ГЛАВА 4 РАЗРАБОТКА РЕКОМЕНДАЦИЙ ПО ОЦЕНКИ УСТОЙЧИВОСТИ БОРТОВ КАРЬЕРОВ С ОБРАТНОЙ КРУТОПАДАЮЩЕЙ СЛОИСТОСТЬЮ

4.1 Метод прогнозирования полной потери устойчивости бортов с обратным падением слоев

В ходе физического моделирования были установлены смещения в моделях откосов на каждом этапе отработки моделей. Для соответствующих этапов дополнительно выполнялся поверочный расчет устойчивости откосов с использованием метода алгебраического сложения сил и численного моделирования методом конечных элементов.

Метод алгебраического сложения сил представлен в нормативных методических документах [61, 44] и основан на теории предельного равновесия сыпучей среды, согласно которой оценка устойчивости откосов осуществляется путем сравнения удерживающих и сдвигающих сил, действующих по наиболее напряженной поверхности скольжения.

Также в последнее время с развитием компьютерных технологий для оценки устойчивости откосов все большее применение находит численное моделирование [23, 29, 34, 62, 90], в частности метод конечных элементов. Основная концепция МКЭ состоит в дискретизации исследуемой области на множество подобластей, внутри которых среда считается однородной и изотропной [10, 12, 21, 41, 50, 55, 75, 93]. Такие подобласти называются конечными элементами, которые взаимодействуют между собой узловыми силами и перемещениями. Приложенное усилие к одному узлу и его перемещение отражается на всей системе, на каждом из ее узлов. Перемещение узлов элемента через функцию формы связано с перемещением внутренних точек, а взаимное перемещение внутренних точек характеризуется вектором деформаций. В свою очередь вектор деформаций связан с вектором напряжений законом Гука. Исходя из этого, устанавливается связь вектора внутренних напряжений с вектором

перемещений узловых элементов. Таким образом, поставленная задача будет решена, если будут известны перемещения узлов под действием приложенной нагрузки. По сравнению с аналитическими методами, данный способ осуществляет не только оценку устойчивости откосов, но также позволяет определять деформации прибортовых массивов.

Численное моделирование проводилось при помощи программного обеспечения «RS2» компании Rocscience. На рисунке 4.1 представлен пример численного моделирования слоистого откоса «слабый контакт».

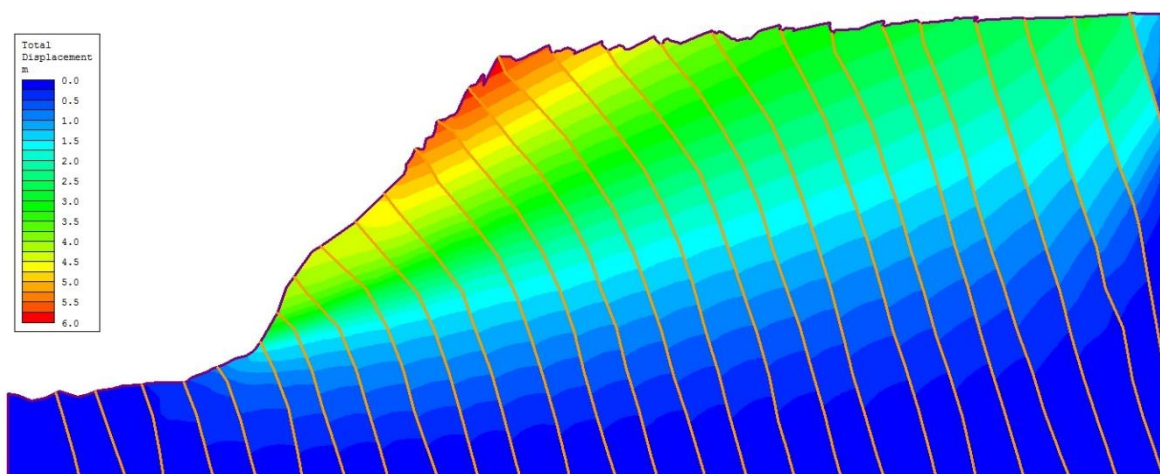


Рисунок 4.1 – Моделирование борта карьера с обратным падением слоев методом конечных элементов (слоистый откос «слабый контакт»)

Результаты расчетов коэффициентов запаса (n) алгебраическим методом и методом конечных элементов, а также величины максимальных общих (ΔL), горизонтальных (X) и вертикальных (Y) смещений, переведенных в натурные значения по результатам физического моделирования, отображены в таблицах 4.1-4.3. Стоит отметить, что величины смещений, представленных в таблицах 4.1-4.3, характеризуют собой смещение относительно предыдущего этапа.

Таблица 4.1 – Результаты анализа поведения устойчивости изотпроного откоса на каждом этапе моделирования

Этап моделирования	Расчет коэффициента запаса устойчивости		Величина максимальных смещений		
	Алгебраический метод	Численный метод (RS2)	Общие (ΔL), м	Горизонт. (X), м	Вертик. (Y), м
1	2,73	2,88	0,07	0,06	0,05
2	2,38	2,63	0,13	0,09	0,16
3	2,32	2,54	0,26	0,24	0,09
4	2,18	2,38	0,19	0,06	0,18

Продолжение таблицы 4.1

5	1,69	1,82	0,11	0,10	0,04
6	1,47	1,54	0,09	0,05	0,07
7	1,35	1,39	0,19	0,13	0,13
8	1,28	1,33	0,04	0,03	0,03
9	1,12	1,15	4,57	3,42	3,04
10	0,99	1,02	186,99	129,50	134,88

Таблица 4.2 – Результаты анализа поведения устойчивости слоистого откоса «слабый контакт» на каждом этапе моделирования

Этап моделирования	Расчет коэффициента запаса устойчивости		Величина максимальных смещений		
	Алгебраический метод	Численный метод (RS2)	Общие (ΔL), м	Горизонт. (X), м	Вертик. (Y), м
1	2,56	3,74	0,40	0,37	-0,13
2	2,41	3,25	0,42	0,35	0,13
3	2,39	3,37	0,28	0,28	0,02
4	2,29	3,27	0,77	0,57	0,08
5	2,24	3,48	0,62	0,59	0,19
6	1,72	2,00	0,97	0,97	0,08
7	1,43	1,43	2,90	2,82	0,65
8	1,34	1,25	10,24	9,85	2,80
9	1,31	1,18	6,47	6,15	1,98
10	1,23	1,01	22,20	20,93	7,39

Таблица 4.3 – Результаты анализа поведения устойчивости слоистого откоса «прочный контакт» на каждом этапе моделирования

Этап моделирования	Расчет коэффициента запаса		Величина максимальных смещений		
	Алгебраический метод	Численный метод (RS2)	Общие (ΔL), м	Горизонт. (X), м	Вертик. (Y), м
1	2,44	3,53	0,12	0,11	0,04
2	2,44	3,4	0,25	0,24	0,08
3	2,25	3,23	0,11	0,07	0,08
4	2,04	2,74	0,11	0,09	0,06
5	1,59	1,96	0,12	0,09	0,07
6	1,45	1,62	0,15	0,06	0,14
7	1,34	1,43	0,80	0,58	0,56
8	1,30	1,38	1,97	1,38	1,40
9	1,17	1,19	1,26	0,95	0,84
10	1,09	1,03	205,47	135,75	154,23

Исходя из результатов определения коэффициентов запаса устойчивости (алгебраическим методом / МКЭ) и максимальных смещений, представленных в

таблицах 4.1–4.3, а также при определении углов наклона откосов, при которых произошла потеря устойчивости, отметим следующие особенности деформирования и потери устойчивости откосов разного строения:

- Изотропный откос:

- Резкий скачок деформаций: $n = 1,12 / 1,15$ макс. $\Delta l = 4,57$ м;
- Обрушение откоса: $n = 0,99 / 1,02$ макс. $\Delta l = 186,99$ м;
- Угол откоса на момент потери устойчивости: 49° .

- Слоистый откос «слабый контакт»:

- Резкий скачок деформаций: $n=1,72 / 2,00; 1,43 / 1,43$ макс. $\Delta l = 0,97; 2,90$ м;
- Изгиб слоев: $n=1,34 / 1,25; 1,31 / 1,18$, макс. $\Delta l = 10,24; 6,47$ м;
- Опрокидывание слоев: $n=1,23 / 1,03$ $\Delta l = 22,20$ м;
- Угол откоса на момент потери устойчивости: 39° .

- Слоистый откос «прочный контакт»:

- Резкий скачок деформаций - $n=1,34 / 1,43; 1,30 / 1,38; 1,17 / 1,19$ макс. $\Delta l = 0,80; 1,97; 1,26$ м;
- Разрушение откоса - $n=1,09$ макс. $\Delta l = 205,47$ м;
- Угол откоса на момент потери устойчивости - 44° .

Зависимость максимальных общих смещений (Δl) от коэффициента запаса (n) на каждом этапе для всех моделей, приведена на рисунке 4.2.

Сопоставление результатов физического и численного моделирования бортов карьеров с обратным падением слоев, а также метода алгебраического сложения сил показало, что на момент разрушения откосов коэффициент запаса методом алгебраического сложения сил составлял 1,1-1,3, в то время как методом конечных элементов – 0,98-1,03, что более достоверно характеризует предельное состояние откоса. В ходе дополнительных поверочных расчетов методом алгебраического сложения сил и МКЭ по 55 моделям с обратной слоистостью, разработанных при выполнении работы [54], были получены аналогичные результаты.



Рисунок 4.2 – Зависимость максимальных смещений (Δl) от коэффициента запаса (n) на каждом этапе отработки (ось Y имеет логарифмический масштаб; пунктирная линия характеризует результаты расчетов методом алгебраического сложения сил, сплошная линия – методом конечных элементов)

Также в ходе физического моделирования было установлено, что перед разрушением откосов наблюдается спад максимальной величины относительных смещений, что, вероятно, обусловлено накоплением энергии, способствующей в дальнейшем ускорению сдвигения и прорастания трещин.

Явление скачкообразного изменения характера смещений можно отметить по результатам радарного мониторинга в работе [89], в ходе которого осуществлялись наблюдения скорости смещений в прибортовом массиве на всех этапах деформирования откосов вплоть до разрушения (рисунок 4.3 – 4.6). Как показано на рисунках 4.3 – 4.4, при снижении обратной скорости смещений выявлен интервал времени, при котором перед обрушением наблюдается уменьшение изменения скорости, характеризующее собой «затишье» перед дальнейшим разрушением. Данное явление по природе сопоставимо со спадом скорости смещений, выявленных нами в ходе физического моделирования (рисунки 4.5 – 4.6).

Подобное явление также установлено в ходе радарного мониторинга участков бортов карьера «Железный» Кавдороского ГОКа [65]. По результатам радарного мониторинга с использованием 2D радара с синтезированной

апертурой IBIS FM фирмы IDS, перед обрушением откосов в прибортовом массиве зафиксирован скачкообразный спад ускорения смещений (рисунок 4.7 – 4.8).

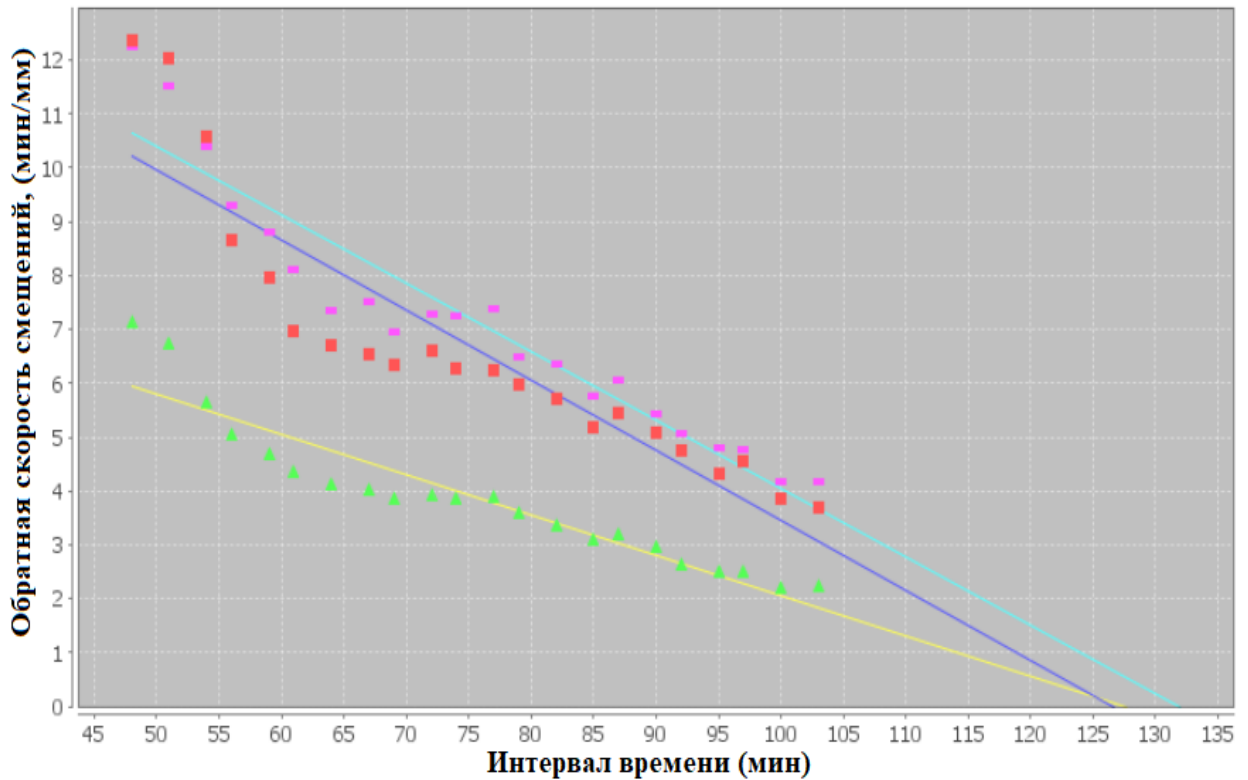


Рисунок 4.3 – Графическая иллюстрация активных точек обратной скорости смещений (Figure 6.17 [89])

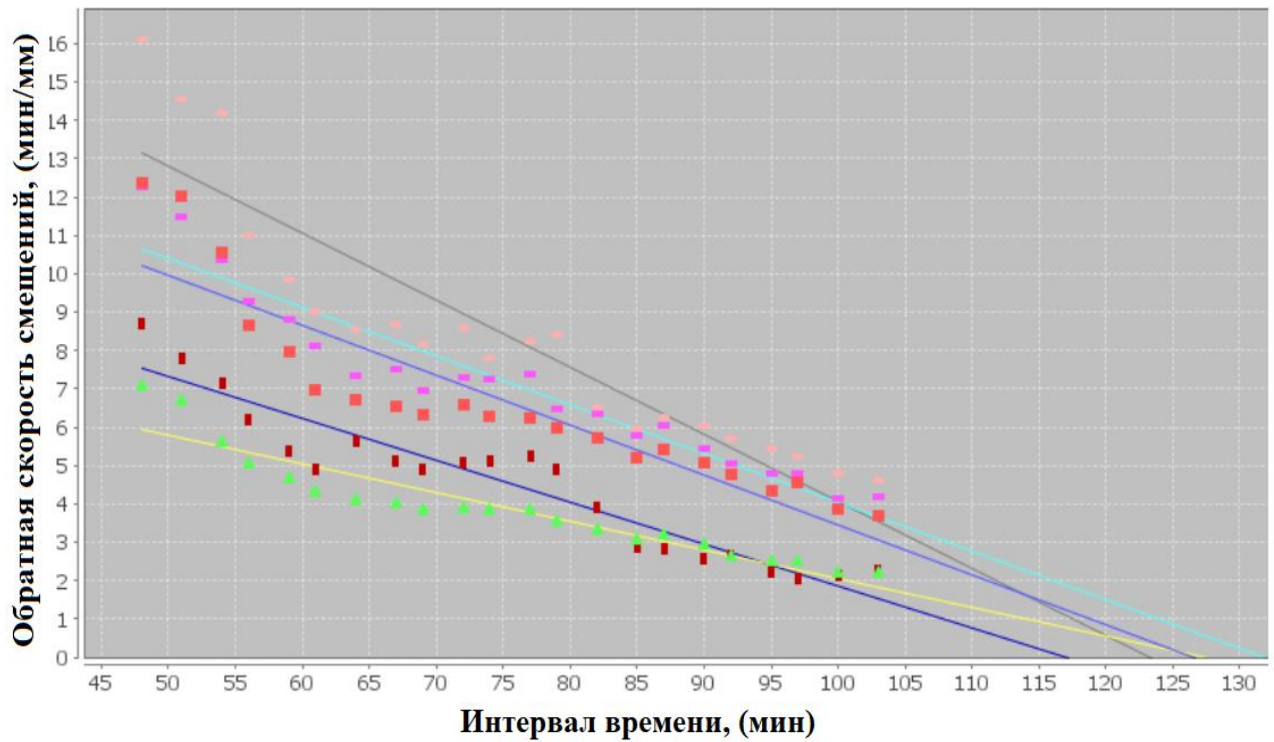


Рисунок 4.4 – Графическая иллюстрация активных точек обратной скорости смещений (Figure 6.27 [89])

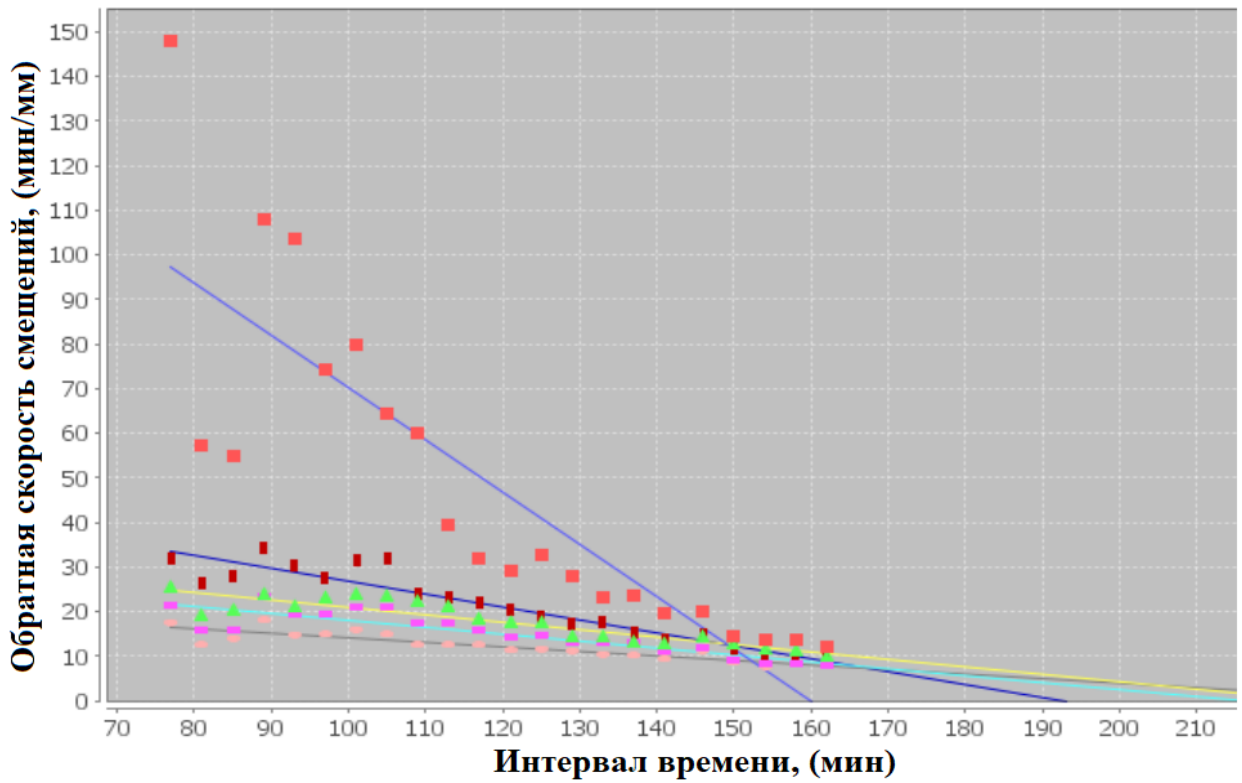


Рисунок 4.5 – Графическая иллюстрация активных точек обратной скорости смещений (Figure 6.20 [89])

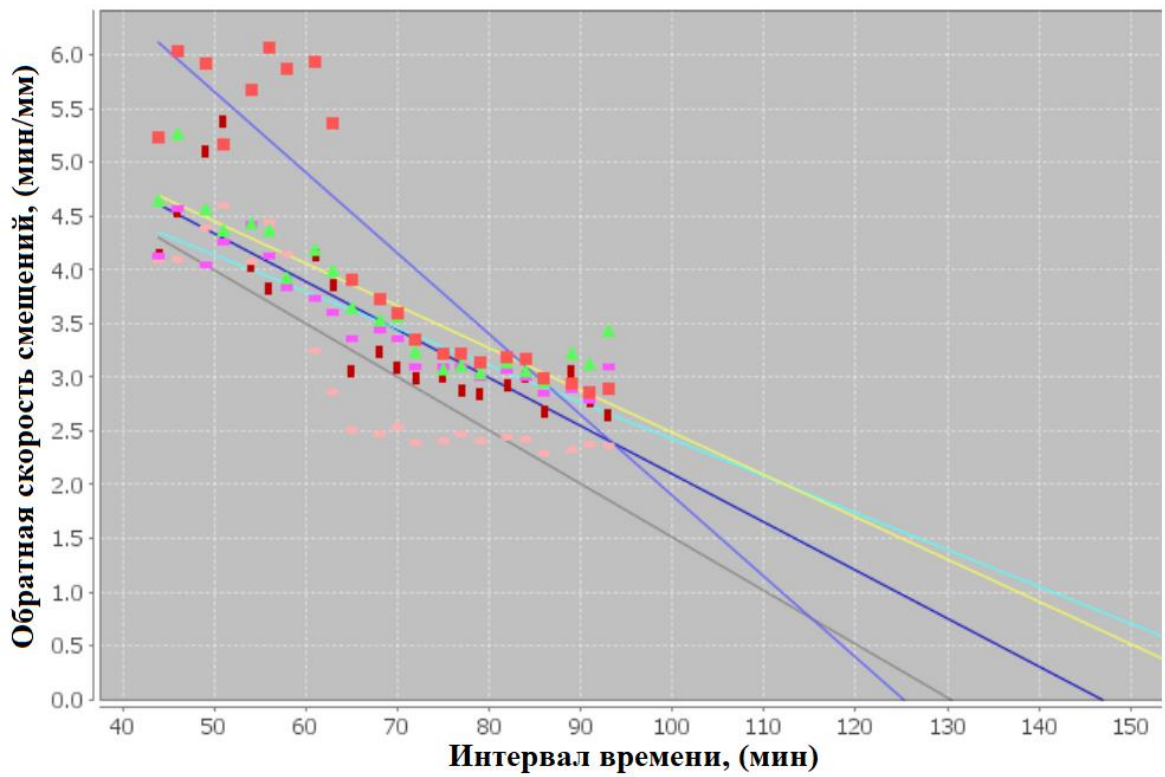


Рисунок 4.6 – Графическая иллюстрация активных точек обратной скорости смещений (Figure 6.24 [89])



Рисунок 4.7 – График изменения ускорения смещений (обрушение 01.10.2014)



Рисунок 4.8 – График изменения ускорения смещений (обрушение 24.28.2015)

Как показывают результаты физического моделирования, при деформировании откосов с обратной слоистостью во время скачкообразного спада деформаций величина максимальных смещений относительно величин смещений предыдущего этапа уменьшилась в 1,5 раза.

В ходе наблюдений установлено, что параметры откосов на этапе спада скоростей смещений близки к предельным, превышение которых приводит к разрушению откосов.

По результатам расчетов методом конечных элементов, на этапах снижения скорости относительных смещений коэффициент запаса устойчивости откосов с обратной слоистостью составляет 1,19-1,22. Исходя из этого, с помощью численного моделирования был проведен ряд расчетов для различных условий по установлению максимального предельного угла откоса с обратной слоистостью, при котором общая устойчивость борта сохраняется, а также допустимо выполнение мероприятий по управлению устойчивостью. В качестве критерия принимался коэффициент запаса 1,25, характеризующий состояние откоса на момент спада скоростей смещения.

Выполнение поверочных расчетов осуществлялось для тех же условий, при которых проводилась численное моделирование, но с различной мощности слоев $H/m=6\div 20$ (H – высота откоса, m – мощность слоев).

По результатам расчетов были установлены зависимости предельных углов наклона откосов с обратной слоистостью перед разрушением (α) от сцепления по контактам слоев (C_k), соотнесенного со сцеплением массива горных пород (C_m) (рисунок 4.3) [82].

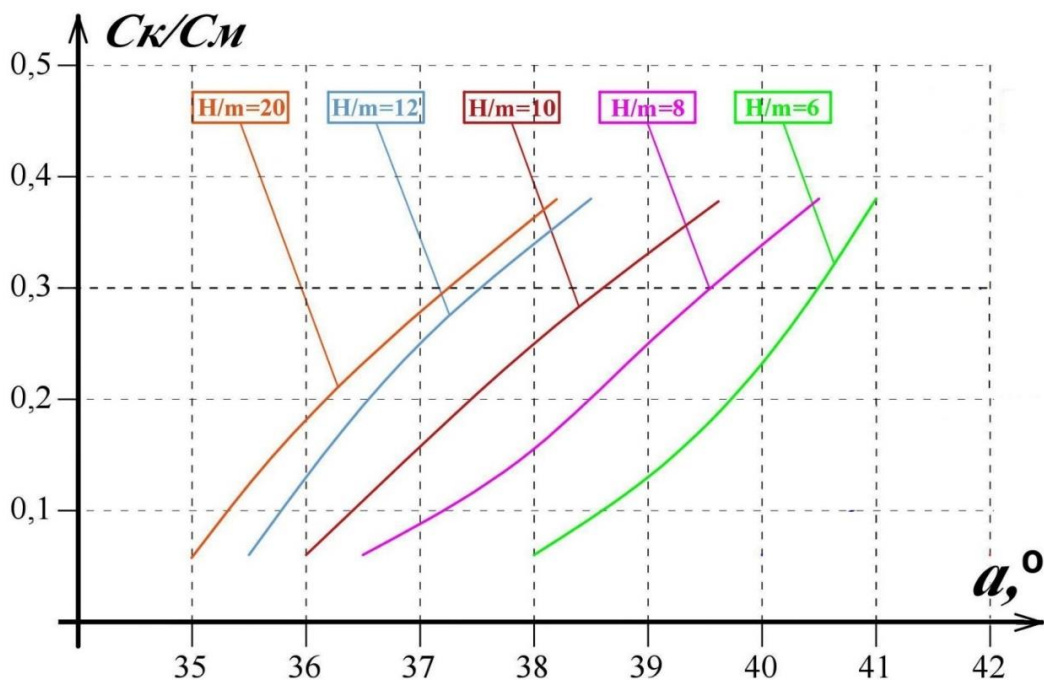


Рисунок 4.9 – Зависимость предельных углов откосов с обратной слоистостью от величины сцепления на контактах слоев

Таким образом, оценка устойчивости бортов карьеров с обратной слоистостью в условиях криолитозоны методом конечных элементов позволяет более надежно определить предельные параметры откосов до разрушения, чем известные методы [61]. Однако в каждом конкретном случае данные численного моделирования должны быть проверены и уточнены натурными наблюдениями. Тогда зафиксированный спад смещений будет сигналом прекращения дальнейшей отработки карьера или изменения технологии отработки.

4.2 Обоснование предельных параметров бортов карьеров с обратным падением слоев

Одной из основных особенностей процессов деформирования бортов карьеров с обратной слоистостью является длительный процесс деформирования, характеризующийся проявлением трещин в откосе задолго до наступления предельного состояния.

Настоящие традиционные методы оценки устойчивости, приведенные в нормативных документах, основаны на теории предельного равновесия и осуществляют оценку только по несущей способности откосов, тем самым позволяя установить предельные параметры до их разрушения. Однако данные методы никак не учитывают образования трещин, которые могут проявиться в откосах за несколько этапов до обрушения.

В отличие от традиционных методов, наиболее точную оценку устойчивости бортов при крутопадающей слоистости дает численное моделирование. Численные методы охватывают более широкий спектр решаемых геомеханических задач, чем методы предельного равновесия. Кроме того они позволяют проводить анализ напряженно-деформированного состояния прибортовых массивов. Однако анализ геомеханических процессов за пределами упругой зоны возможен только при коэффициенте запаса меньше 1,0. В то время как в натуральных условиях такие процессы в изотропных откосах начинают происходить при коэффициенте запаса в пределах 1,2-1,3, а в случае с обратной слоистостью при еще большей величине коэффициента запаса.

Для решения данной проблемы в ходе диссертационных исследований разработана методика определения параметров бортов с обратной слоистостью, учитывающая образования трещин в процессе деформирования откосов. Суть методики заключается в определении необходимого коэффициента запаса устойчивости исходя из допустимой величины смещения для рассматриваемого откоса. Затем полученный коэффициент запаса используется для определения параметров бортов карьеров. Разработанная методика представлена для расчетов, выполненных как методом предельного равновесия (метод алгебраического сложения сил), так и численным методом (метод конечных элементов). Стоит отметить, что расчет методом алгебраического сложения сил проводился по схеме «однородный откос», где не учитывается обратная слоистость, а при расчетах МКЭ обратная слоистость учитывалась.

Величина допустимых смещений в откосе определяется по формуле:

$$S_{don} = \varepsilon \cdot \Delta l, \quad (4.1)$$

где: ε – допустимая относительная горизонтальная деформация, при условии проявления в прибортовом массиве упругих деформаций принимается $\varepsilon = 1 \cdot 10^{-3}$; Δl – определяется, исходя из общей расчетной длины наиболее напряженной поверхности скольжения в изотропном откосе.

Приближенная величина длины наиболее напряженной поверхности скольжения может быть определена по формуле:

$$\Delta l = H \sqrt{1 + (\sin \alpha + (0,2 \div 0,3))^2}, \quad (4.2)$$

где: α – угол борта карьера, H – высота борта карьера.

Далее на основании графиков зависимостей допустимых смещений от коэффициентов запаса устойчивости (рисунок 4.10 – 4.11), полученного в ходе обработки результатов физического моделирования и проведенных расчетов численным методом и алгебраическим методом, исходя из рассчитанной допустимой величины смещений, определяется необходимый коэффициент запаса.

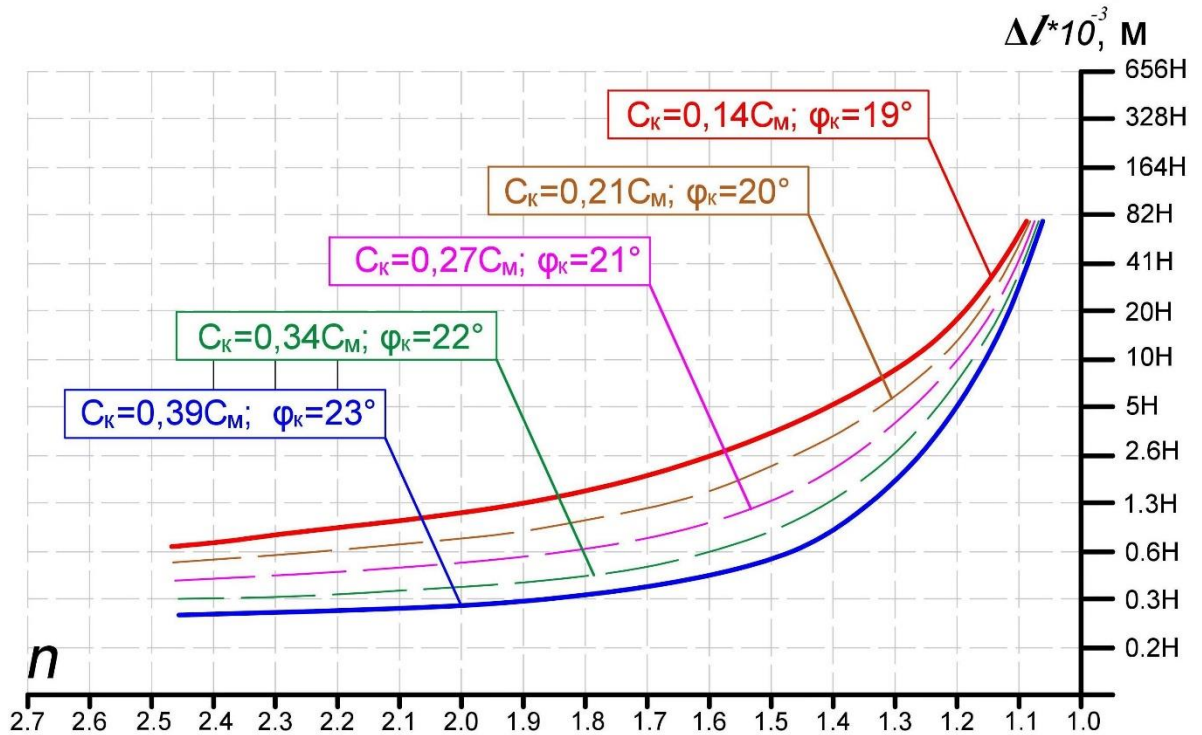


Рисунок 4.10 – Зависимость максимальных смещений Δl от коэффициента запаса n на каждом этапе обработки; ось Y (относительные смещения) имеет логарифмический масштаб; коэффициент запаса рассчитывается численным методом

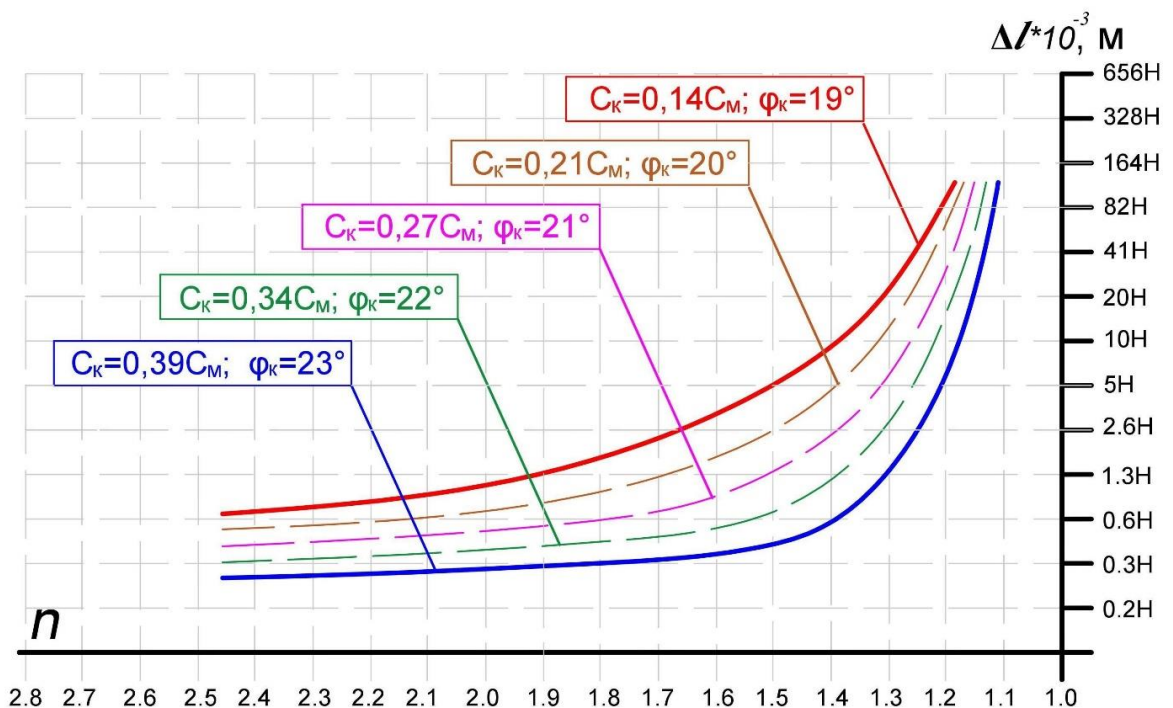


Рисунок 4.11 – Зависимость максимальных смещений Δl от коэффициента запаса n на каждом этапе обработки; ось Y (относительные смещения) имеет логарифмический масштаб; коэффициент запаса рассчитывается алгебраическим методом

Допустимые смещения на графике приведены в относительных величинах. Поэтому перед использованием графика, необходимо перестроить ось ординат в зависимости от рассматриваемой высоты откоса (H) в соответствии с геометрическим масштабом. Величина сцепления на контактах слоев, характеризующаяся кривыми, также приведена в долевых соотношениях относительно величины сцепления в массиве. Далее после масштабирования оси ординат и выбора необходимой кривой через допустимую величину смещения проводится горизонтальная линия до пересечения с кривой с заданными прочностными свойствами по контакту. Затем от данной кривой опускается вертикальная линия до пересечения с осью абсцисс. Полученный таким образом коэффициент запаса является минимально требуемым для рассматриваемых условий и обеспечивающим заданную величину допустимых смещений.

Предельные параметры бортов карьеров определяются либо при помощи программного обеспечения «RS2» компании Rocscience путем подбора параметров исходя из коэффициента запаса, установленного по графику (рисунок 4.4), либо по схеме «Однородный откос» при коэффициенте запаса, полученном по графику (рисунок 4.5). В данном случае, полученные предельные параметры будут характеризовать состояние откосов до активации процессов образования трещин.

4.3 Особенности распространения деформаций на поверхности прибортового массива

Одной из особенностей деформирования откосов является развитие зон деформаций за пределы призмы обрушения по поверхности прибортового массива. Как указано в правилах ... [61], для однородных откосов зона деформирования от верхней бровки по земной поверхности может достигнуть величины $1,5H$ (где H – высота борта карьера).

По результатам физического моделирования установлено, что на этапе предшествующем разрушению зона деформаций по поверхности прибортового массива распространилась на величину $1,5H$ (рисунок 4.12). В то время как при

разрушении откоса зона деформирования уменьшилась до $0,7H$ (рисунок 4.13) [79]. Уменьшение зоны распространения деформаций обусловлено разгрузкой приборного массива во время разрушения откосов.

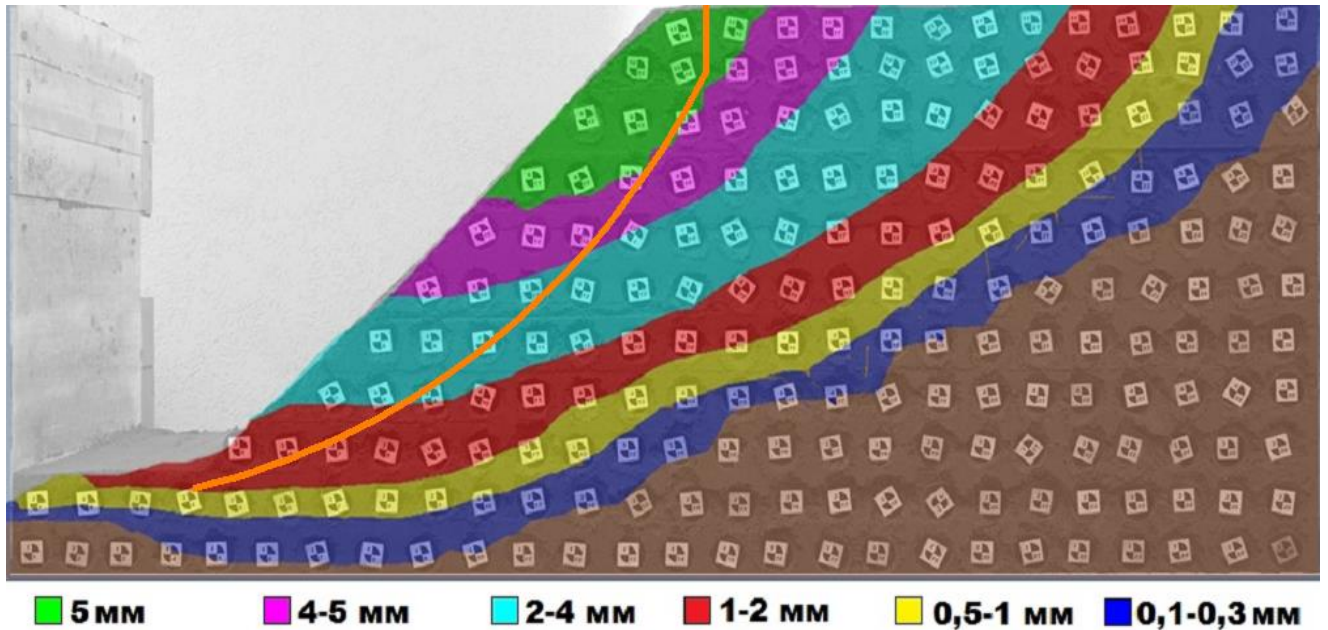


Рисунок 4.12 – Распространение деформаций в модели приборного массива на этапе перед разрушением (наиболее напряженная поверхность скольжения выделена оранжевым цветом)

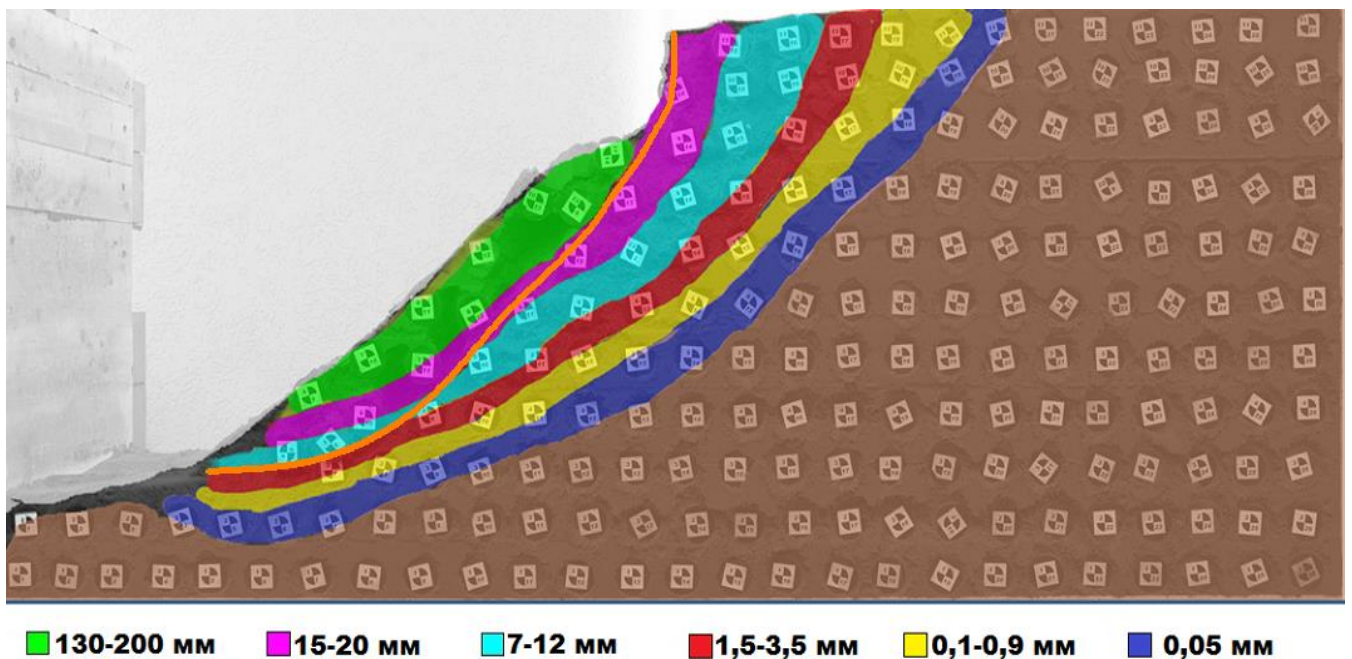


Рисунок 4.13 – Распространение деформаций в модели приборного массива на этапе разрушения (наиболее напряженная поверхность скольжения выделена оранжевым цветом)

При деформировании слоистого откоса «слабый контакт», величина зоны деформирования достигла значения $2H$, а при деформировании слоистого откоса «прочный контакт» – $1,6H$, но при полной потери устойчивости зона распространения смещений уменьшилась до величин $1,6H$ и $1,2H$ соответственно. На рисунке 4.14 приведены зависимости величин относительных смещений на поверхности борта карьера массива от расстояния от верхней бровки откоса борта вглубь прибортового массива.

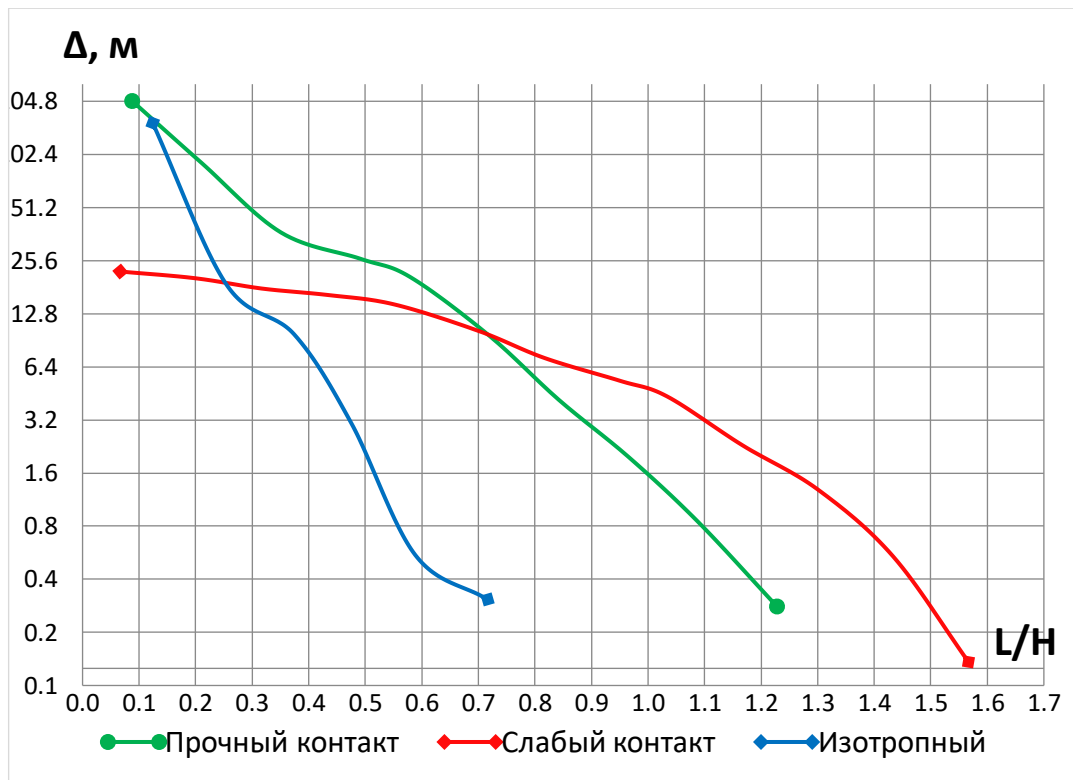


Рисунок 4.14 – Распределение смещений по поверхности модели на этапе разрушения борта карьера высотой 500 м (ось Y имеет логарифмический масштаб, Δ - обозначает смещение, L – расстояние точки смещения от поверхности откоса, H – высота откоса.)

На основании результатов физического моделирования бортов карьеров с обратной слоистостью и расчетов устойчивости откосов методом предельного равновесия был получен ряд зависимостей величин относительных смещений (смещений относительно предыдущего рассматриваемого этапа отработки) и абсолютных смещений (относительно первоначального исходного положения репера) от расстояния от верхней бровки откоса борта на горизонтальной поверхности земли (рисунки 4.15 – 4.21). На графиках (рисунки 4.15 – 4.21)

величины смещений (Δ) и зоны деформирования (L) представлены в относительных значениях от высоты борта карьера (H).

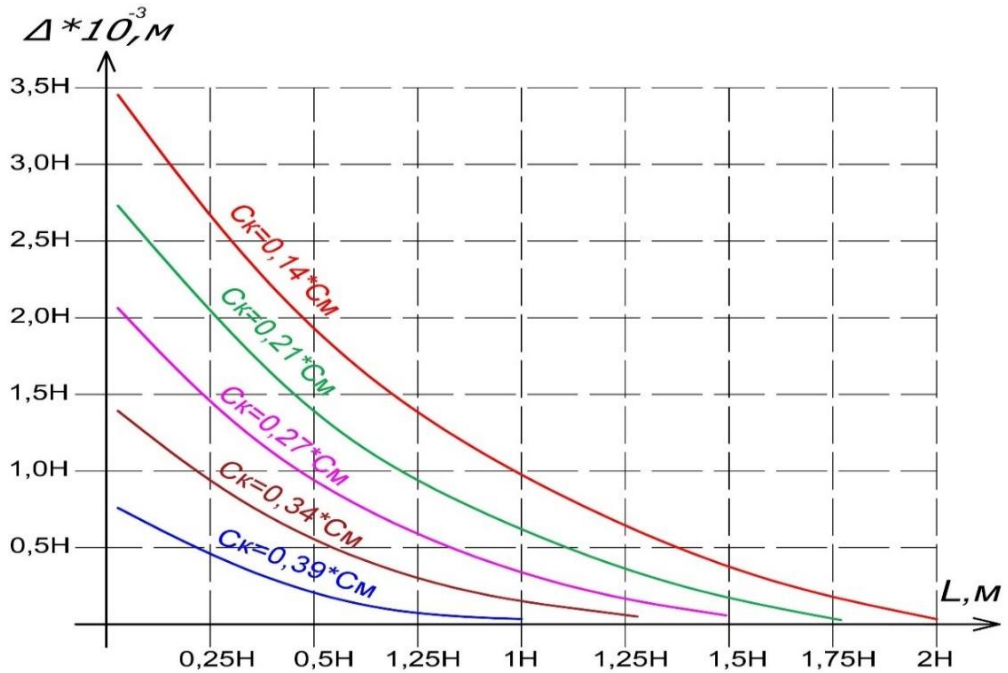


Рисунок 4.15 – Распространений абсолютных смещений на поверхности прибортового массива при коэффициенте запаса устойчивости откоса борта с обратной слоистостью $n = 1,60-1,70$

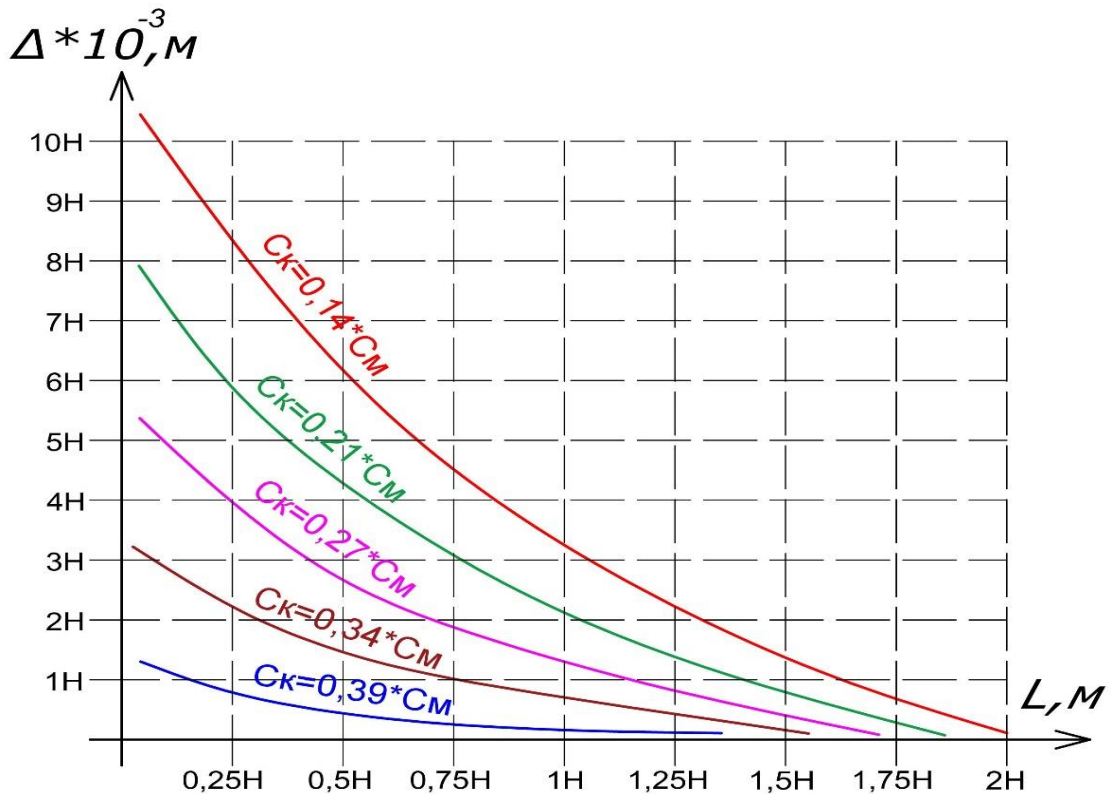


Рисунок 4.16 – Распространений абсолютных смещений на поверхности прибортового массива при коэффициенте запаса устойчивости откоса борта с обратной слоистостью $n = 1,45$

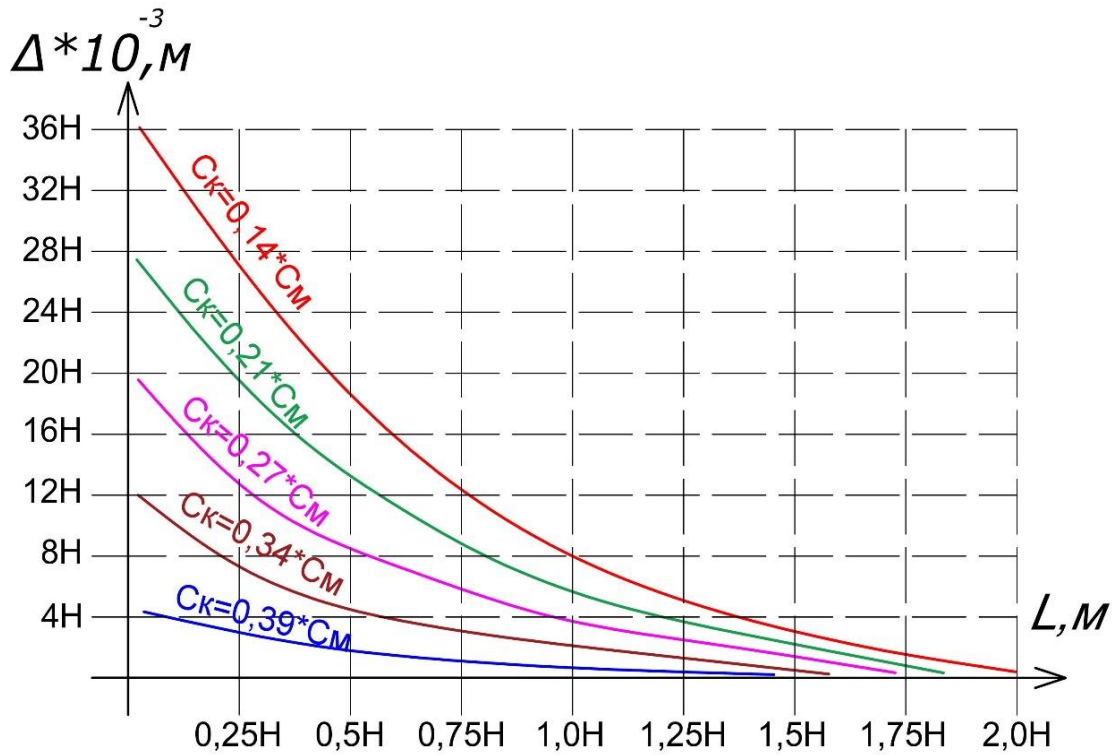


Рисунок 4.17 – Распространений абсолютных смещений на поверхности приборного массива при коэффициенте запаса устойчивости откоса борта с обратной слоистостью $n = 1,35$

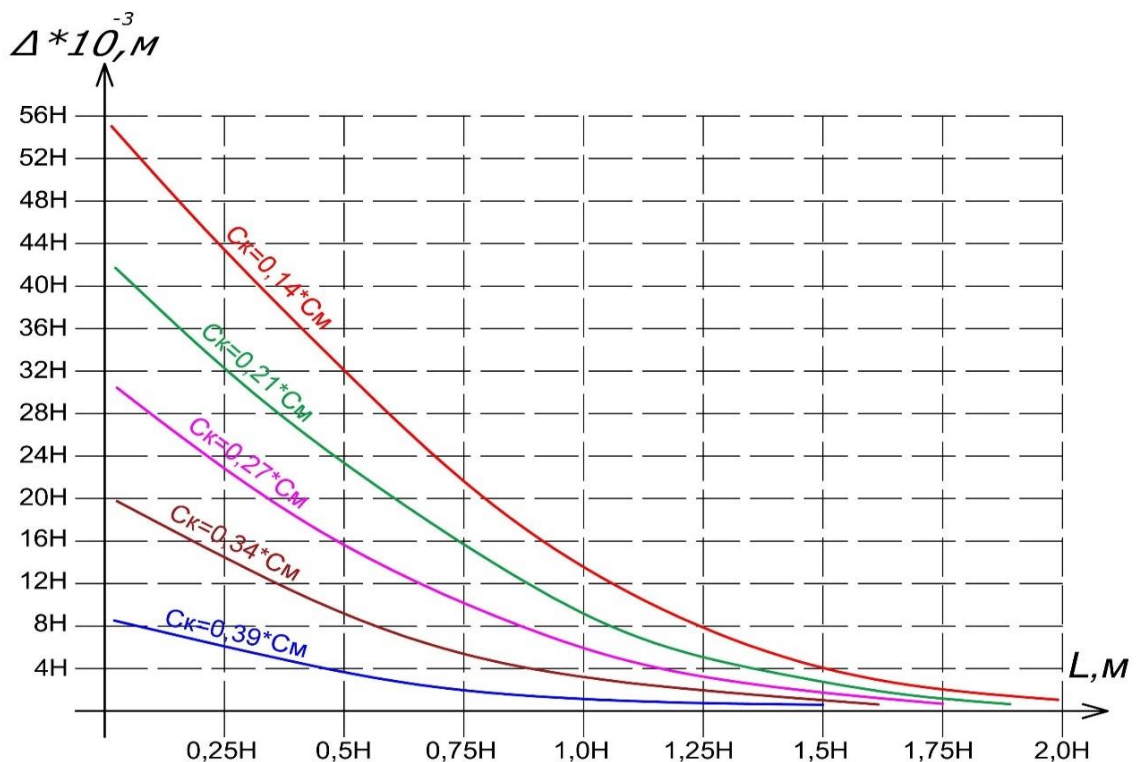


Рисунок 4.18 – Распространений абсолютных смещений на поверхности приборного массива при коэффициенте запаса устойчивости откоса борта с обратной слоистостью $n = 1,30$

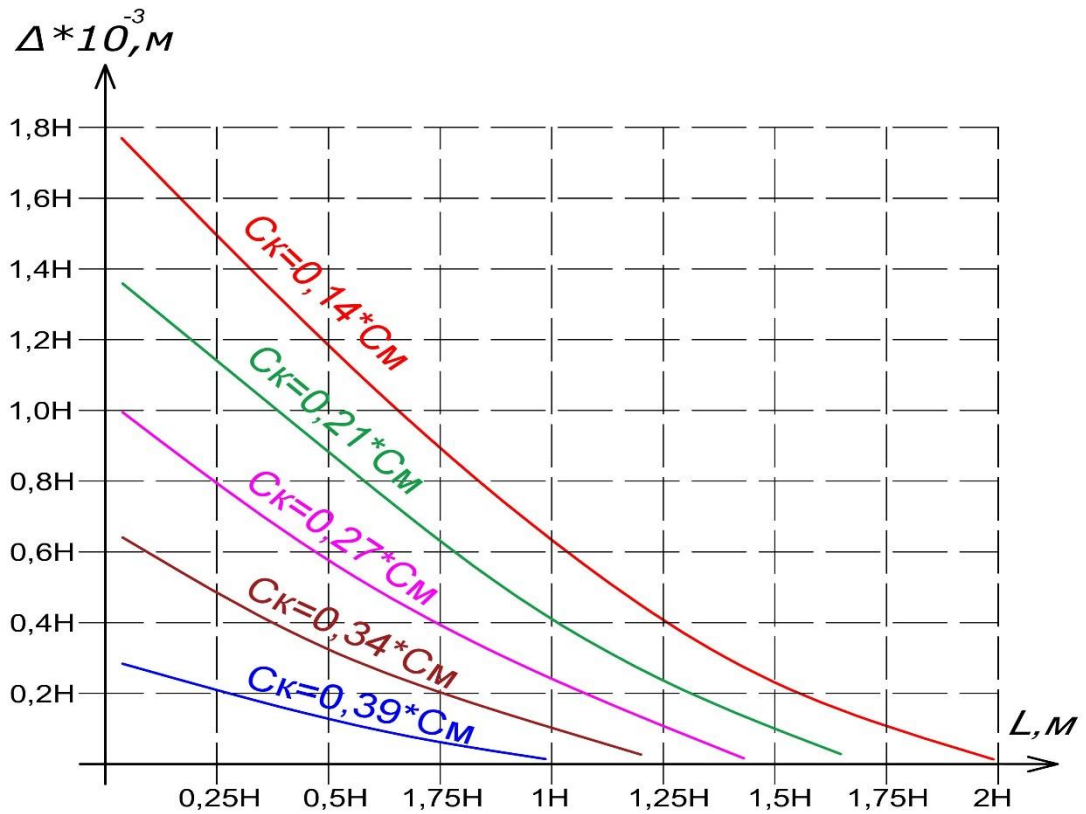


Рисунок 4.19 – Распространений относительных смещений на поверхности приборного массива при коэффициенте запаса устойчивости откоса борта с обратной слоистостью $n = 1,60-1,70$

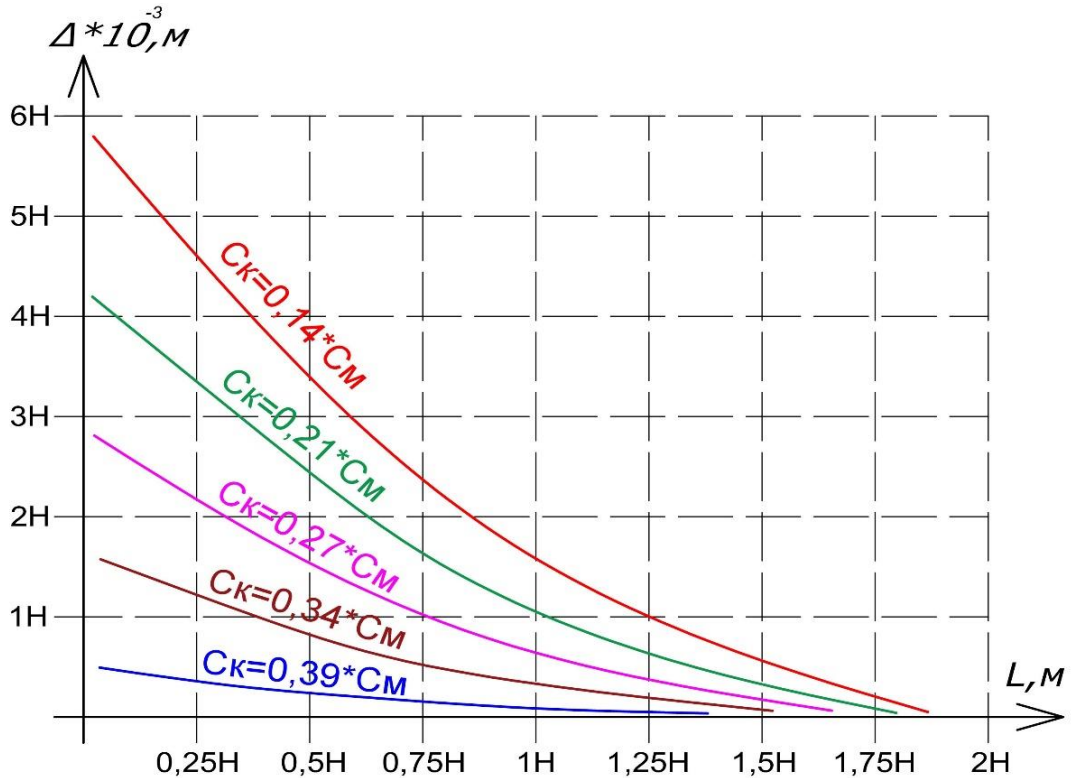


Рисунок 4.20 – Распространений относительных смещений на поверхности приборного массива при коэффициенте запаса устойчивости откоса борта с обратной слоистостью $n = 1,45$

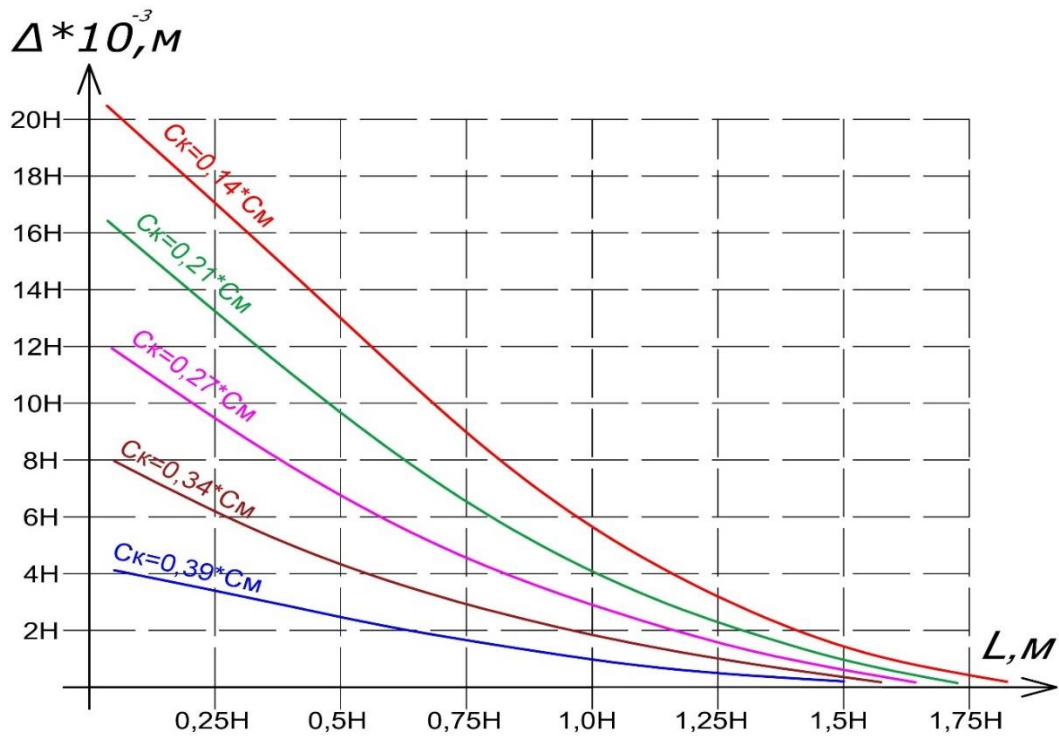


Рисунок 4.21 – Распространений относительных смещений на поверхности прибортового массива при коэффициенте запаса устойчивости откоса борта с обратной слоистостью $n = 1,30-1,35$

4.4 Выводы по четвертой главе

На основании обработки данных физического моделирования и результатов расчетов устойчивости откосов методами предельного равновесия и конечных получено следующее:

1. Установлена зависимость величин максимальных относительных смещений, зафиксированных по результатам физического моделирования, от коэффициента запаса устойчивости, рассчитанным методом алгебраического сложения сил, характеризующего состояние откоса, на котором наблюдалось это смещение (рисунок 4.2);

2. По мере приближения откоса к предельному состоянию наблюдается этап снижения скорости смещений в прибортовом массиве, что может быть обусловлено накоплением упругой энергии, способствующей в дальнейшем ускорению сдвижения и процессов появления и прорастания трещин (рисунок 4.2). Установлено, что перед разрушением слоистых откосов, величина относительных смещений уменьшается в 1,5 раза;

3. Выполнены расчеты устойчивости откосов на каждом этапе моделирования методом конечных элементов. На основании данных расчетов получена зависимость, характеризующая состояние откоса на этапе спада смещений, которое прогнозирует дальнейшую полную потерю устойчивости борта карьера (рисунок 4.3)

4. При деформировании откосов виде опрокидывания и изгибов слоев, на поверхности прибортового массива наблюдаются трещины, еще задолго до наступления предельного устойчивого состояния откоса. Величина смещений при образовании трещин и параметры откосов, при которых прогрессирует процесс трещинообразования, зависят от прочностных свойств по контактам слоев.

5. Разработана методика оценки устойчивости откосов с обратной слоистостью, которая основана на определении не только коэффициента запаса устойчивости, но и на допустимой величине смещений (рисунок 4.10 и 4.11)

6. Установлены зоны распространения деформаций на верхней площади прибортового массива при различных коэффициентах запаса устойчивости. Наблюдения показали, что при деформировании откосов, зона деформаций распространялась за пределы призмы обрушения и для различных откосов достигала следующих значений: для изотропного – до $1,5H$; для слоистого откоса «слабый контакт» – $2,0H$; для слоистого откоса «прочный контакт» – $1,6H$, где H – высота борта карьера. Однако во время обрушения величина зоны деформирования уменьшилась: для изотропного – до $0,8H$; для слоистого откоса «слабый контакт» – $1,6H$; для слоистого откоса «прочный контакт» – $1,6H$. По результатам моделирования установлен ряд зависимостей величин относительных и абсолютных смещений от расстояния от верхней бровки откоса борта вглубь прибортового массива для откосов с обратной слоистостью с различными прочностными свойствами на контактах слоев (рисунок 4.15 – 4.21).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выполненные в диссертационной работе исследования посвящены разработке рекомендаций по определению предельных параметров бортов карьеров с обратной крутопадающей слоистостью, а также способам прогнозирования их потери устойчивости. Основные результаты выполненных исследований:

1. С увеличением величины сцепления по контактам слоев процессы деформирования и разрушения бортов карьеров с обратной крутопадающей слоистостью, представляющий собой наклоны и опрокидывания слоев, приближается к известным механизмам потери устойчивости изотропных прибортовых массивов.

2. Установлен критерий, прогнозирующий характер разрушения откосов с обратной слоистостью, который представляет собой отношение горизонтальных и вертикальных смещений. Процесс деформирования бортов в виде опрокидывания слоев характеризуется преобладанием горизонтальных смещений. В ходе деформирования таких откосов, величина отношения горизонтальных и вертикальных смещений на момент появления первых трещин составляет 10-12, и при дальнейшем процессе деформирования это отношение снижается до 2. Однако при больших величинах сцепления по контактам слоев данное отношение на всех этапах деформирования остается практически в постоянном диапазоне и составляет 0,9-1,3, что близко к величинам, характерным для деформирования изотропного откоса.

3. Разработана методика определения предельных параметров бортов с обратной крутопадающей слоистостью, где в качестве критерия оценки состояния выступает величина относительных смещений.

4. Определены размеры зоны деформирования прибортовой полосы, на разных этапах деформирования в зависимости от прочностных свойств на контактах.

5. Выявлен критерий, прогнозирующий разрушение бортов с обратной слоистостью, который характеризуется спадом скорости смещений в 1,5 раза относительно скорости смещений предыдущего этапа. Совместное использование натуральных наблюдений по выявлению спада скорости смещений и результатов численного моделирования позволяет прогнозировать предельное состояние бортов карьеров с обратной слоистостью.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алькова, Е. Л. Экспериментальные исследования прочности на срез мерзлых горных пород на образцах большого размера / Е. Л. Алькова, С. В. Панише, Д. С. Козлов, М. С. Максимов // Успехи современного естествознания. Пенза: Издательский дом «Академия Естествознания». – 2016. – № 8. – С. 145-149
2. Афанасьев, Б. Г. Влияние формы профиля откосов в массиве с крутопадающей слоистостью / Б. Г. Афанасьев, Б. К. Абрамов, Ю. К. Ташкинов, В. Е. Трофимов // Известия вузов. Горный журнал. – 1983. – № 8. – С. 28–30.
3. Афанасьев, Б. Г. Деформирование откосов с крутой и вертикальной слоистостью / Б. Г. Афанасьев, Б. К. Абрамов, Б. П. Голубко, В. Т. Сапожников // Известия вузов. Горный журнал. – 1983. – № 6. – С. 30–33.
4. Афанасьев, Б. Г. К расчету устойчивости слоистых откосов пород в уступах, заоткошенных по наслоению / Б. Г. Афанасьев // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 1983. – № 6. – С. 25 – 29.
5. Афанасьев, Б. Г. Расчет устойчивости откосов в условиях поворота и опрокидывания слоев / Б. Г. Афанасьев // Проблемы разработки глубоких карьеров: Тезисы докладов всесоюзной научно-технической конференции. – Кривой Рог, 1987. – С. 77 – 78.
6. Афанасьев, Б. Г. Характер деформирования и устойчивотть откосов в некоторых нетиповых условиях залегания пород / Б. Г. Афанасьев // Научно–технические проблемы повышения эффективности работ и совершенствования маркшейдерской службы на горных предприятиях: Тезисы докладов всесоюзной научно-технической конференции. – Свердловск, 1984. – С. 65 – 66.
7. Афанасьев, Б. Г. Приближенный способ определения параметров устойчивых откосов в массиве с крутопадающей слоистостью / Б. Г. Афанасьев, В. Т. Сапожников // Сдвигение и деформации массива при разработке полезных ископаемых: Сборник научных трудов. – Л.: ВНИМИ, 1982. – С. 35 – 39.

8. Афанасьев, Б. Г. Разработка научных основ расчета устойчивости слоистых прибортовых массивов на угольных разрезах. автореф. дис. ... д-ра техн. наук: 05.15.01 /Афанасьев Борис Григорьевич. – СПб, 1992. – 31 с.

9. Баклашов, И. В. Геомеханика: учебник для вузов / И. В. Баклашов // Том 2 – М.: Издательство московского государственного университета, 2004. – 249 с.

10. Барулин, А. И. Оценка устойчивости откосов слабых горных пород методом конечных элементов / А. И. Барулин, З. Р. Рахимов // Труды университет. Карагандинский государственный университет. – 2006. – № 4(25). – С. 29 – 34.

11. Боровиков, В. А. Физическое моделирование действия взрыва и процесса разрушения горных пород взрывом / В. А. Боровиков, И. Ф. Ванягин. – М.: Недра, 1990. – 231 с.

12. Введение в метод конечных элементов: учеб. пособие / Д. В. Иванов, А. В. Доль; Учеб.-метод. пособие для студентов естественно-научных дисциплин. – Саратов: Амирит, 2016. – 84 с. – ISBN 978-5-9909127-3-1

13. Веников, В. А. Теория подобия и моделирования: (применительно к задачам электроэнергетики) / В. А. Веников. – М.: Высшая школа, 1984. – 439 с.

14. Воронков, О. К. Об определении предела прочности на одноосное сжатие, коэффициентов размокания и морозостойкости скальных пород геофизическими методами / О. К. Воронков, Т. В. Ростомян // Известия ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева. – 1973. – Т. 101. – С. 222–234.

15. Воронков, О. К. Влияние физического выветривания на состояние и свойства горных пород / О. К. Воронков, Л. Ф. Ушаков. – СПб.: Изд-во ОАО «ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева», 2007. – 154 с.

16. Вялов, С. С. Реология мерзлых грунтов / С. С. Вялов. – М.: Стройиздат, 2000. – 464 с.

17. Газиев, Э. Г. Вероятностная оценка надежности скальных массивов / Э. Г. Газиев, В. И. Речицкий – М.: Стройиздат, –1985. –105 с.

18. Газиев, Э. Г. Устойчивость скальных массивов и методы их закрепления / Э. Г. Газиев. – М.: Стройиздат, – 1977. – 160 с.

19. Галустьян, Э. Л. Построение плоско-логарифмической поверхности скольжения в оползневых откосах и расчет устойчивости поддерживающих сооружений / Э. Л. Галустьян // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 1972. – Вып. 3. – С. 106-109.

20. Глушихин, Ф. П. Моделирование в геомеханике / Ф. П. Глушихин., Г. Н. Кузнецов, М. Ф. Шклярский и др. – М.: Недра. – 1991. – 240 с.

21. Горшков, Н. И. Опыт разработки и применения геомеханического обеспечения для оценки устойчивости откосов массивов горных пород и оснований инженерных сооружений на основе метода конечных элементов / Н. И. Горшков, М. А. Краснов // Горный информационно–аналитический бюллетень. – 2007. – № S15. – С. 143 – 153.

22. Жабко, А. В. Теория расчета устойчивости откосов и оснований. анализ, характеристика и классификация существующих методов расчета устойчивости откосов / А. В. Жабко // Известия уральского государственного горного университета. – 2015. – № 4(40). – С. 45-57.

23. Журавков, М. А. Компьютерное моделирование в геомеханике / М. А. Журавков, Л. О. Коноалов, С. И. Богдан, П. А. Прохоров, А. В. Круподеров. – Мн.: БГУ, 2008. – 443 с.

24. Забелин, А. В. Оценка влияния криогенного выветривания на устойчивость откосов бортов угольных карьеров Южной Якутии: автореферат... дис. кандидата технических наук: 05.15.11 / Забелин Алексей Викторович. – Хабаровск, 2000. – 23 с.

25. Захаров, Е. В. Влияние знакопеременных температурных воздействий на энергоемкость процесса дробления горных пород: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 25.00.20 / Захаров Евгений Васильевич. – Якутск, 2012. – 120 с.

26. Захаров, Е. В. Энергетические показатели разрушения горных пород и их зависимость от температурного фактора / Е. В. Захаров, А. С. Курилко // Наука и образование. - 2009. - №1. – С. 19 - 25.

27. Зотеев, В. Г. Нетипичные деформации бортов глубоких рудных карьеров и меры по их предотвращению / В. Г. Зотеев, О. В. Зотеев // Горный журнал. – 2007. – №1. – С. 40-45.

28. Инструкция по наблюдениям за деформациями бортов, откосов уступов и отвалов на карьерах и разработке мероприятий по обеспечению их устойчивости. – Л.: ВНИМИ. 1971. 188 с.

29. Кожогулов, К. Ч. Прогнозирование устойчивости откосов и склонов на основе численного моделирования напряженно-деформированного состояния горных пород / К. Ч. Кожогулов, В. И. Нифадьев, С. Ф. Усманов // Фундаментальные и прикладные вопросы горных наук. – 2017. – т. 4. – № 3. – С. 54-59.

30. Козеев, А. А. Термо- и геомеханика алмазных месторождений / А. А. Козеев, В. Ю. Изаскин, Н. К. Звонарев. – Новосибирск: Наука. Сибирская издательская фирма РАН, 1995. – 245 с.

31. Козлов, Ю. С. Исследование методов расчета устойчивости откосов. автореф. дис. ... канд. техн. наук. Свердловск. – 1969. – 31 с.

32. Козлов, Ю. С. Моделирование предельного состояния откосов / Ю.С. Козлов // Сборник трудов ВНИМИ. 1968. – Вып. 64. – С. 335 - 352.

33. Козлов, Ю. С. Моделирование слоистых откосов / Ю. С. Козлов // сборник трудов ВНИМИ. – 1972. – Вып. 86. – С. 103- 108.

34. Корнев, Е. С. Разработка комплекса программ и численное моделирование геомеханических процессов в углепородном массиве: дис. ... канд. техн. наук: 05.13.18 // Корнев Евгений Сергеевич. – Новокузнецк, 2013. – 166 с.

35. Куваев, Н. Н. Расчет устойчивости бортов карьеров сложенных твердыми трещиноватыми породами / Н. Н. Куваев // Сборник трудов ВНИМИ. – Вып. 32. –1958.

36. Кузнецов, Г. Н. Моделирование проявлений горного давления / Г. Н. Кузнецов, М. Н. Будько, Ю. И. Васильев, М. Ф. Шклярский. – Л.: Недра, 1968. –280 с.

37. Кузнецов, Г. Н. Изучение проявлений горного давления на моделях / Г. Н. Кузнецов, М. Н. Будько, А. А. Филипова, М. Ф. Шклярский – М.: Углетехиздат, 1959. – 283 с.

38. Курилко, А. С. Влияние циклов замораживания – оттаивания на массообменные свойства дисперсных горных пород: автореф. дис. ... канд. техни. наук: 05.15.11 / Курилко Александр Сардокович. – Якутск, 2000. – 16 с.

39. Курилко, А. С. Управление физико-механическими свойствами горных пород при знакопеременном температурном воздействии : автореф. дис. ... д-ра техн. наук: 25.00.20 / Курилко Александр Сардокович. – Якутск, 2005. – 37 с.

40. Курилко, А. С. Экспериментальные исследования влияния циклов замораживания-оттаивания на физико-механические свойства горных пород / А. С. Курилко – Якутск: Издательство СО РАН, 2004. – 154 с.

41. Леханова, К. В. Сравнение численных и аналитических методов / К. В. Леханова, А. Л. Новодзинский // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Строительство и архитектура. – 2011. – № 1. – 45 – 50.

42. Лужин, О. В. Обследование и испытание сооружений / О. В. Лужин и др. – М.: Стройиздат, 1987. – 263 с.

43. Методические указания по наблюдениям за деформациями бортов разрезов и отвалов, интерпретации их результатов и прогнозу устойчивости. – Л.: ВНИМИ. –1987. – 118 с.

44. Методические указания по определению углов наклона бортов, откосов уступов и отвалов строящихся и эксплуатируемых карьеров. – Л: ВНИМИ. 1972 г. – 165 с.

45. Методическое пособие по определению углов откосов уступов и углов наклона бортов карьеров, сложенных многолетнемерзлыми породами. Л: ВНИМИ. 1972.– 102 с.

46. Москалев, А. Н. Разрушение горных пород при термоциклическом воздействии / А. Н. Москалев и др. – Киев: Наукова думка. – 1987. – 248 с.

47. Мочалов, А. М. Исследование деформаций бортов карьеров при оценке их устойчивости: дис. ... канд. техн наук / Мочалов Алексей Матвеевич. – Л.: ВНИМИ. – 198 с.

48. Мочалов, А. М. Расчет устойчивости откосов плоского профиля в однородной среде / А. М. Мочалов // Труды ВНИМИ. – 1976.– № 100. – С. 116-128.

49. Насонов, И. Д. Моделирование физических процессов в горном деле / И. Д. Насонов, В. И. Ресин. – М.: Академия горных наук, 1999 . – 342 с .

50. Неверов, А. А. Прогнозная оценка устойчивости бортов карьера "Чернореченский" на конечной стадии разработки / А. А. Неверов // Вестник кузбасского государственного технического университета. – 2012. – 6(94). – С. 27 – 33.

51. Новикова, Л. К. Деформирование уступов в карьерах в условиях крутого залегания слоев / Л. К. Новикова // Рациональное использование недр и рекультивация земель на горных предприятиях: Сборник научных трудов. – Караганда: Карагандинский политехнический институт, 1988. – С. 53 – 55.

52. Новикова, Л. К. Оценка состояния и параметров бортов Экибастузских разрезов в условиях крутого залегания слоев // Сдвигение горных пород и земной поверхности при разработке месторождений полезных ископаемых: Сборник научных трудов. – Караганда: Карагандинский политехнический институт, 1989. – С. 52 – 57.

53. Новикова, Л. К. Расчет оптимальных параметров бортов угольных разрезов в условиях крутого залегания слоев горных пород: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.15.01 / Новикова Людмила Кирилловна. – Караганда, 1994. – 21 с.

54. Отчет НИР «Разработать предложения по совершенствованию методов расчета устойчивости бортов и отвалов и методов наблюдения деформациями откосов (Предложения по методике расчета параметров откосов с вертикальной и крутой слоистостью)». Свердловск: ВНИМИ, 1979 г. – 125 с.

55. Панченко, А. В. Маркшейдерская оценка устойчивости криволинейного в плане борта карьера: дис. ... канд. техн. наук: 25.00.16 / Панченко Алексей Викторович. – СПб, 2014. – 119 с.

56. Панюков, П. Н. Инженерная геология. 2-е издание, переработанное и дополненное / П. Н. Панюков. – М., «Недра», – 1978. – 296 с.

57. Певзнер, М. Е. Борьба с деформациями горных пород на карьерах / М. Е. Певзнер М.Недра, 1978. – 255 с.

58. Пекарская, Н. К. Сопротивление сдвигу многолетнемерзлых грунтов различной текстуры и льдистости / Н. К. Пекарская // Исследования по физике и механике мерзлых грунтов. – М.: Изд-во АН СССР, 1961. – №4. – С. 116-185.

59. Попов, В. Н. Управление устойчивостью карьерных откосов: Учебник для Вузов / В. Н. Попов, П. С. Шпаков, Ю. Л. Юнаков. – М.: Издательство Московского государственного горного университета, издательство «Горная книга». – 2008. – 683 с.

60. Попов, И. И. Устойчивость породных отвалов / И. И. Попов, П. С. Шпаков, Г. Г. Поклад – Алма-Ата: Наука, 1987. – 224 с.

61. Правила обеспечения устойчивости откосов на угольных разрезах. – СПб: ВНИМИ, 1998. – 208 с.

62. Протосеня, А. Г. Оценка прочности блочного горного массива методом численного моделирования / А. Г. Протосеня, П. Э. Вербило // Известия высших учебных заведений «Горный журнал». – 2016 г. – № 1.– С. 47 – 55.

63. Пушкарев, В. И. Практический расчет предельных откосов в массиве с крутопадающей слоистостью / В. И. Пушкарев, Л. К. Новикова // Механика горного массива и свойств горных пород: Сб. научн. тр. Караганда: Карагандинский политех. ин-т. – 1990. С. 52–57.

64. Пушкарев, В. И. Предупреждение деформаций прибортовго массива с крутопадающей слоистостью / В. И. Пушкарев, В. Г. Федоров, Л. К. Новикова // Рациональное использование недр и рекультивация земель на горных предприятиях: Сборник научных трудов. – Караганда: Карагандинский политехнический институт, 1988. – С. 49 – 53.

65. Розанов, И. Ю., Применение радара IBIS FM для контроля состояния борта карьера рудника «Железный» (АО «Ковдорский ГОК») / И. Ю. Розанов, А. А. Завьялов // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). № 7, 2018, С. 40-46.

66. Розенбаум, М. А. Геомеханические основы управления горным давлением при разработке угольных пластов в зоне многолетней мерзлоты: автореф. дис. ... д-ра техн. наук: 05.15.11, 05.15.02 / Розенбаум Марк Абрамович. – СПб, 1996. – 32 с.

67. Рыбин, В. В. Развитие теории геомеханического обоснования рациональных конструкций бортов карьеров в скальных тектонически напряженных породах : автореф. дис. ... д-ра техн. наук: 25.00.20 / Рыбин Вадим Вячеславович. – Апатиты, 2016. – 41 с.

68. Рыльникова, М. В. Развитие нормативной базы в области обеспечения устойчивости бортов и уступов карьеров, разрезов и отвалов / М. В. Рыльникова, О. В. Зотеев, И. Л. Никиорова // Горная промышленность. – 2018. – №3. – С. 95 –98.

69. Савков, Л. В. Расчет устойчивости бортов сложных профилей / Л. В. Савков // Физ.-техн. проблемы разработки полезных ископаемых. – 1975. – №4.

70. Сапожников, В. Т. Моделирование откосов / В. Т. Сапожников // Известия вузов. Горный журнал. – 1960. – №9. – С. 39 – 48.

71. Свиридова, Т. В. Обеспечение устойчивости откосов бортов карьеров с целью предупреждения аварий и чрезвычайных ситуаций / Т. В. Свиридова, О. Б. Боброва, Е. А. Волкова, А. Ю. Перятинский, Ю. В. Сомова // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носкова, 2016. – Т. 14 – №4. – С. 5-10.

72. Соколовский, В. В. Статика сыпучей среды. Изд. 3-е перераб. и доп / В. В. Соколовский – М.: Физ.-мат. лит. –1960. – 242 с.

73. Степанов, А. В. Тепломассообменные свойства техногенных грунтов криолитозон / А. В. Степанов. – Новосибирск: Наука, 2011. – 152 с.

74. Степанов, А. В. Влияние циклов замораживания-оттаивания на тепло-массообменные свойства техногенных грунтов / А. В. Степанов, Е. К. Далбаева // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2012. – том 14 – №4(5). – С. 1296–1299.

75. Фадеев, А. Б. Метод конечных элементов в геомеханике / А. Б. Фадеев. – М.: Недра, 1987. – 221 с.

76. Фисенко, Г. Л. Устойчивость бортов карьеров и отвалов / Г. Л. Фисенко – М: Недра. – 1965. – 378 с.

77. Фисенко, Г. Л. Устойчивость бортов угольных разрезов / Г. Л. Фисенко. – М: Углетехиздат. – 1956. – 230 с.

78. Цирель, С. В. Оценка устойчивости бортов карьеров и откосов уступов при крутом несогласном падении слоев / С. В. Цирель, А. А. Павлович, Б. Ю. Зуев, Н. Я. Мельников, // VIII Международная научно-практическая конференция «Инновационные направления в проектировании горнодобывающих предприятий: геомеханическое обеспечение проектирования и сопровождения горных работ». Санкт-Петербургский горный университет. – 2017. – С. 171-182.;

79. Цирель, С. В. Применение физического моделирования для установления критериев потери устойчивости прибортового массива / С. В. Цирель, А. А. Павлович, Н. Я. Мельников // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. – 2017. – №2. С. 145–152.;

80. Цирель, С. В. Проблемы и пути развития геомеханического обоснования параметров бортов карьеров / С. В. Цирель, А. А. Павлович // Горный журнал. – 2017. – №7. – С. 39-45.

81. Цирель, С. В. Совместное влияние сейсмичности и многолетней мерзлоты на устойчивость бортов карьеров / С.В. Цирель, Н.Я. Мельников. // Сборник статей VIII Международной научно-практической конференции «Традиционная и инновационная наука: история, современное состояние, перспективы», Изд-во: Общество с ограниченной ответственностью "Аэтерна", г. Уфа, 2016. – С. 318-321;

82. Цирель, С. В. Совместное использование физического и численного моделирования при оценке устойчивости бортов карьеров со сложным структурным строением / С. В. Цирель, А. А. Павлович, Н. Я. Мельников, М. М. Идиятуллин // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2019. – № 7 (специальный выпуск 21). – С. 3–12. DOI: 10.25018/0236-1493-2019-7-21-3-12

83. Цирель, С. В. Физическое моделирование процессов деформирования прибортового массива карьера с крутопадающей слоистостью горных пород / С. В. Цирель, А. А. Павлович, Н. Я. Мельников, Б. Ю. Зуев // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. Новосибирск: Изд. Со РАН. – 2019. – №3. – С. 22–30. DOI: 10.15372/FTPRPI20190303

84. Цытович, А. Н. Механика мерзлых грунтов: Учеб. пособие для инж.-строит. вузов / А. Н. Цытович – М.: Высшая школа, 1973. – 448 с.

85. Шушерина, Е. П. Зависимость прочности мерзлых грунтов и льда от температуры / Е. П. Шушерина, Ю. П. Бобкова // Труды V Всесоюзного совещания по строительству. – т. VI. – Красноярск, – 1968

86. Alzo'ubi, A. K. The role of block ratio and layer thickness on rock slopes movement style / A. K. Alzo'ubi // Int. J. of Geomate. Vol. 8, No. 2 (Sl. No. 16), – pp. 1271-1277. – 2015.

87. Goodman, R. E. Toppling of rock slopes. / R.E. Goodman, J.W. Bray //ASCE Specialty conference on rock engineering for foundations and slopes. Vol. 2. – 1976. pp. 201-234.

88. John, R Guidelines for open pit slope design / R. John, P. Stacey. – CRC Press / Balkema, 2009. – 509 p.

89. Kayode, S. O. Open-cast mine slope deformation and failure mechanisms interpreted from slope radar monitoring: PhD thesis / Kayode Stephen Osasan. – Johannesburg, 2012. – 245 p.

90. Khani, A. Effects of fracture geometry and stress on the strength of a fractured rock mass / A. Khani, A. Baghbanan, S. Norouzi, H. Hashemolhosseini // International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences. 2013. № 60. pp. 345–352.

91. Pritchard, M.A., Numerical modeling of toppling / M. A Pritchard, K. W. Savigny // Canadian Geotechnical Journal. – 1990. – pp. 823- 834.
92. Verification Examples. Canada: Rocscience. – 23 p.
93. Yang, J. P. Chen W. Z. Yang D. S., Yuan J. Q. Numerical determination of strength and deformability of fractured rock mass by FEM modeling / J. P. Yang, W. Z. Chen, D. S. Yang, J. Q. Yuan // Computers and Geotechnics. – 2015. – № 64. – pp. 20–31.