

И. И. ПОПОВ, Р. П. ОКАТОВ

# БОРЬБА С ОПОЛЗНЯМИ НА КАРЬЕРАХ

70 КОД.

ИДРА

И. И. ПОПОВ, Р. П. ОКАТОВ

# **БОРЬБА С ОПОЛЗНЯМИ НА КАРЬЕРАХ**



МОСКВА «НЕДРА» 1980

Попов И. И., Окатов Р. П. Борьба с оползнями на карьерах. М., Недра, 1980. 239 с.

В книге приведены результаты исследования и данные практики по предупреждению и борьбе с оползнями на карьерах. Обобщены сведения по месторождениям о физико-механических свойствах горных пород, структурно-тектонических особенностях горного массива, слагающего борта карьеров; установлены взаимосвязи между отдельными показателями. Приведены теоретические разработки и расчетные схемы по определению рациональных параметров уступов и бортов карьеров в разных горно-геологических условиях, а также результаты исследований влияния буровзрывных работ на устойчивость откосов. В книге освещены вопросы устойчивости внешних отвалов на слабом и твердом основании и приведены результаты теоретических и экспериментальных работ.

Книга рассчитана на инженерно-технических работников горнодобывающей промышленности.

Табл. 39, ил. 93, список лит. — 108 назв.

Рецензент д-р техн. наук А. М. Демин

Предупреждение и борьба с оползневыми явлениями на карьерах является важной народнохозяйственной проблемой.

Открытый способ разработки полезных ископаемых в сравнении с подземным обеспечивает высокую производительность труда, низкую себестоимость, лучшие и сравнительно безопасные условия работы. Увеличение удельного веса добычи полезных ископаемых открытым способом происходит не только за счет ввода новых мощностей, но и за счет реконструкции существующих горных предприятий, применения более совершенной технологии и систем разработки на базе новой техники, механизации и автоматизации производственных процессов.

При современных достижениях горной науки и техники представляется возможным и экономически целесообразным вести разработку полезных ископаемых открытым способом на глубинах 500—700 м и более. В этих условиях роль горной науки и ее отдельных направлений, например геомеханики, резко возрастает. Определяющим при выполнении научных исследований становятся эффективность и внедрение полученных данных в практику ведения открытых горных работ.

За последние годы были опубликованы работы, посвященные решению этой проблемы. Подавляющее большинство из них — работы теоретические, в которых приводятся результаты исследований, выполненных в лабораторных условиях.

Практика показывает, что почти все открытые горные работы как в нашей стране, так и за рубежом сопровождаются оползневыми явлениями. Наличие оползней и обрушений уступов и бортов карьеров снижает основные преимущества открытых работ, наносит значительный материальный ущерб горному предприятию, нарушает правильное и безопасное ведение горных работ, вызывает значительные потери полезного ископаемого. Поэтому обеспечение устойчивости откосов на карьерах при максимально крутых углах их наклона и изыскание мер по предупреждению и борьбе с оползневыми явлениями являются важными вопросами [12, 25, 92].

В СССР решением этих вопросов занимаются целый ряд научно-исследовательских и проектно-конструкторских институтов, как, например, ВНИМИ и его филиалы, ВНИОГЕМ, Унитпромь, УкрНИИпроект, ИГД им. А. А. Скочинского и др., а

также и некоторые кафедры высших учебных заведений, например Свердловского горного, Карагандинского политехнического и других институтов. Большое внимание уделяется борьбе с оползнями на карьерах ГДР, ПНР, ЧССР, НРБ, ФРГ, США, Канады, Австралии и других стран [4, 18].

Несмотря на многочисленные исследования, проблема обеспечения устойчивости бортов карьеров в их предельном положении в силу своей сложности и разнообразия горно-геологических и гидрогеологических особенностей месторождений все еще далеко не решена. Наибольшую остроту эта проблема приобретает для глубоких и сверхглубоких карьеров. Наиболее полно изучен вопрос устойчивости бортов карьеров лишь в условиях изотропной среды. В условиях со сложными структурно-тектоническими особенностями горного массива решение этих вопросов является трудной задачей.

Имеются случаи, когда из-за недостаточной геологической изученности района расположения стационарных бортов карьеров запроектированные параметры ведения горных работ на практике не обеспечивают устойчивости откосов. В сложных горно-геологических условиях по результатам геологической разведки нельзя получить исчерпывающие данные о структуре горного массива и трещиноватости пород, чтобы их можно было заранее предусмотреть в технических проектах разработки месторождений.

Исследование и обеспечение устойчивости откосов уступов, бортов карьеров и отвалов является сложной проблемой. Эта работа комплексная, многоплановая и многофакторная. Успешное решение этой проблемы по ее важнейшим разделам и аспектам может быть обеспечено только в результате общих усилий большого коллектива ученых, проектировщиков и работников производства.

Авторы настоящей работы поставили своей целью ознакомить читателя с комплексом мероприятий по предупреждению деформаций уступов, бортов карьеров и отвалов во взаимосвязи с горно-геологическими, гидрогеологическими и горнотехническими факторами, эффективностью выполняемых работ и результатами их внедрения на производстве. Обобщения научных исследований и опыт работы 28 карьеров Казахстана и Урала при разработке 19 месторождений, в том числе по 8 угольным, 5 железорудным, 3 меднорудным, 2 полиметаллическим и одному хромитовому, по рассматриваемой проблеме охватывают 30-летний период. За это время некоторые карьеры отработаны с учетом внедренных противооползневых мероприятий. Опыт этих работ может быть полезен для разработки других месторождений с аналогичными условиями.

В настоящей работе авторы стремились максимально отразить практическую сторону вопроса, привести материалы, уже апробированные и проверенные по экибастузским, Куу-Чекин-

скому, Кумыскудукскому, Майкубенскому, Алакульскому, волчанским, богословским, Веселовскому, Соколовскому, Каражальскому, Гороблагодатскому, Высокогорскому, Малому Куйбасскому, Коунрадскому, Златоуст-Беловскому, саякским, Майканискому, Карагайлинскому, Объединенному, Миллионному, Северному, Южному, Геофизическому и другим карьерам.

Приведены взаимосвязи между физико-механическими свойствами горных пород и структурно-тектоническими особенностями горного массива по рассматриваемым месторождениям; теоретические разработки по определению параметров горных работ, при которых исключается возникновение деформаций; установлено влияние буровзрывных работ на разрушаемость пород приконтурной зоны на рудных карьерах; даны технологические схемы горных и буровзрывных работ с выделением из них наиболее целесообразных для решения поставленной задачи.

При подготовке книги использованы научно-технические обобщения и анализ причин имевших место оползневых явлений, мер борьбы с оползнями; натурные наблюдения, замеры и съемки для изучения структурно-тектонических особенностей горного массива и деформаций пород в откосах бортов карьеров; лабораторные и натурные методы изучения физико-механических свойств горных пород; методы математической статистики и корреляционного анализа при обработке данных; аналитический и графоаналитический методы при разработке расчетных схем по устойчивости откосов; промышленно-экспериментальные работы по выявлению наиболее эффективных мер предупреждения и борьбы с оползнями на карьерах; технико-экономический анализ.

В книге использованы работы сотрудников кафедры, работающих в институте в различные периоды времени: д-ра техн. наук проф. М. Л. Рудакова, кандидатов техн. наук А. П. Ли, А. М. Леонова, Н. В. Ешуткина, А. В. Шабурникова, В. Н. Попова, П. С. Шапова, В. Г. Федорова, инженеров А. Т. Каймакова, Э. П. Пятковой и других товарищей по совместной работе, которым авторы искренне благодарны за содействие и оказанную помощь.

# I. ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ГОРНЫХ ПОРОД

## 1.1. МЕТОДЫ И ПРИБОРЫ ПО ОПРЕДЕЛЕНИЮ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ГОРНЫХ ПОРОД

Физико-механические свойства горных пород во взаимосвязи со структурно-тектоническими особенностями горного массива определяют напряженное состояние и параметры устойчивости уступов и бортов карьеров. Тщательное и всестороннее изучение и получение необходимых прочностных характеристик должны предшествовать решению вопросов предупреждения и борьбы с оползневыми явлениями на карьерах.

Прочность и устойчивость горных пород связаны с переменными физико-механическими характеристиками, которые могут быть различными по отдельным участкам одного и того же месторождения. Замена их обобщенными характеристиками свойств, как это обычно делается при производстве расчетов, иногда приводит к ошибочным решениям. Поэтому необходимо уметь определять эти характеристики и знать, как, когда и в каких условиях их использовать при расчетах устойчивости откосов.

На достоверность получаемых данных в значительной мере влияет масштабный фактор. Исследованиями установлено, что изменение линейных размеров образцов горных пород вызывает изменение численных значений характеристик, и при испытаниях можно получить как заниженные, так и завышенные их значения.

Большой вклад в изучение физико-механических свойств горных пород внесли такие видные советские ученые, как М. М. Протодьяконов, Л. И. Барон, К. В. Руппенейт, Г. Н. Кузнецов и др. Фундаментальные работы по этому вопросу ведутся не только в нашей стране, но и за рубежом — в США, Скандинавии, Нидерландах, ГДР, ФРГ и других странах [14]. Исследуются техника отбора проб, методика испытания образцов горных пород, разработка и использование приборов и оборудования для трехосного сжатия при боковом давлении до  $1 \cdot 10^6$  Па. Для комплексного определения прочностных характеристик горных пород используются стабилометры с полной автоматизацией проводимых исследований при помощи автоскопических устройств. В настоящее время существуют методические руководства, инструкции, справочная литература, монографии и научные статьи по совершенствованию методики и техники этих работ. К таким обобщающим работам последнего времени от-

носятся монографии Е. И. Ильиной, Р. И. Тедера, Е. С. Ваголина, М. Ф. Куптыша [86], Л. С. Бурштейна [11]. Большой вклад в дело изучения физико-механических свойств горных пород внесли работники Института горной геомеханики и маркшейдерского дела (ВНИМИ), Всесоюзного научно-исследовательского и проектно-конструкторского института по осущению месторождений полезных ископаемых, специальным горным работам, рудничной геологии и маркшейдерскому делу (ВИО-ГЕМ), института УкрНИИпроект и др.

Основными физико-механическими свойствами горных пород, необходимыми для решения вопросов устойчивости уступов и бортов карьеров, а также откосов отвалов, являются средняя плотность  $\gamma$ , естественная влажность пород  $W$ , сопротивление пород на сжатие  $\sigma_{сж}$  и разрыв  $\sigma_r$ , сцепление  $C$  и угол внутреннего трения  $\phi$ .

В лабораторных условиях эти характеристики получают путем испытания образцов горных пород. Подготовка образцов для испытаний производится из кернов скважин или путем выливания их из кусков на камерезных станках. Для сохранения в образцах горных пород свойств, присущих массиву, при отборе их покрывают парафином.

Методика определения физико-механических свойств горных пород и твердых полезных ископаемых должна соответствовать ГОСТу 21153.7—75.

Средняя плотность образцов правильной геометрической формы определяется по формуле

$$\gamma = \frac{p}{V}, \quad (1)$$

где  $p$  — масса образца, кг;  $V$  — объем образца, подсчитанный по линейным замерам,  $m^3$ .

Средняя плотность образцов неправильной формы может быть получена методами гидростатического взвешивания

$$\gamma = \frac{p}{(p - p_2) - k(p_1 - p)}, \quad (2)$$

где  $p$  — масса незапарафинированного образца на воздухе, кг;  $p_1$  — масса запарафинированного образца на воздухе, кг;  $p_2$  — масса запарафинированного образца в воде, кг;  $k$  — коэффициент, вычисляемый по формуле

$$k = \frac{1}{\gamma_n - 1}, \quad (3)$$

где  $\gamma_n$  — плотность парафина,  $kg/m^3$ .

Парафинируются обычно слабые песчано-глинистые породы, угли и руды. Для скальных и полускальных пород парафинирование не требуется, а поэтому при этом методе определения

$$\gamma = \frac{\rho}{\rho - \rho_2'} \quad (4)$$

Здесь  $\rho_2'$  — масса образца в воде, кг.

Влияние влажности на свойства горных пород общеизвестно. Под влиянием влажности породы становятся менее плотными и изменяют свои первоначальные прочностные характеристики. В песчано-глинистых породах количество связанной и свободной влаги изменяется в широких диапазонах. Изменение физико-механических свойств пород под действием воды связано с их пористостью и трещиноватостью. Поры и трещины в горном массиве являются теми каналами, по которым движется вода. Высокий уровень подземных вод в бортах карьеров создает дополнительное гидростатическое давление, способствующее возникновению оползней.

Естественная влажность пород  $W$  устанавливается на основании отношения массы породы до просушки  $\rho_1$  и после просушки  $\rho_2$  к первоначальной массе  $\rho_1$ .

$$W = \frac{\rho_1 - \rho_2}{\rho_1} 100\% \quad (5)$$

Определение прочности горных пород на одноосное сжатие производится в соответствии с ГОСТом 21153—75—21153.7—75. Необходимое число образцов для испытаний на сжатие определяется в зависимости от коэффициента вариации:

Коэффициент вариации $V$	Необходимое число образцов для испытаний $n$
30 . . . . .	9
25 . . . . .	6
20 . . . . .	4
15 . . . . .	3

При указанных значениях коэффициентов вариации и числе образцов для испытания сохраняется согласно требованиям математической статистики условие надежности получаемого результата.

При испытании используются обычно образцы цилиндрической или кубической формы с отношением высоты  $h$  к диаметру  $d$ , равным единице, т. е.  $\frac{h}{d} = 1$ . Торцевые опорные грани шлифуются.

Образец при испытании помещается в центре между плитами пресса. Скорость нагружения при статических нагрузках принимается  $5-10 \cdot 10^6$  Па до полного разрушения.

Временное сопротивление пород на одноосное сжатие определяется по формуле

$$\sigma_{сж} = \frac{P_{max}}{S} \quad (6)$$

где  $P_{max}$  — разрушающая образец нагрузка, Н;  $S$  — площадь образца, на которую распространяется давление,  $m^2$ .

Если образец не стандартный и размер его высоты отличается от диаметра, то делается пересчет по формуле

$$\sigma_N = \frac{9\sigma_{сж}}{7 + 2 \frac{d}{h}} \quad (7)$$

где  $\sigma_N$  — прочность на сжатие, полученная на образце с иным отношением высоты к диаметру, Па.

Прочность горных пород на одноосное сжатие может быть определена и методом соосных пуансонов.

Горные породы обычно представлены комплексом минералов с различными физико-механическими характеристиками. Даже у однородных пород имеется различие в прочностных характеристиках. Если для металлов прочностные характеристики на сжатие и растяжение равны между собой, то для горных пород эти величины на порядок или более отличаются друг от друга.

Сопротивление пород на разрыв определяется как

$$\sigma_p = \frac{P_p}{S_p} \quad (8)$$

где  $P_p$  — усилие при разрыве образца, Н;  $S_p$  — размер площади поперечного сечения образца в месте разрыва,  $m^2$ .

Наличие анизотропии в образцах горных пород и неблагоприятное расположение трещин по отношению к прилагаемой нагрузке иногда не позволяют определить прочность пород как на сжатие, так и на разрыв. Если плоскости анизотропии лежат в сечении, перпендикулярных к оси образца, или наклонены на угол не более  $10^\circ$  от нормали, то целесообразно прочность горных пород определять методом раскалывания, получившим название «бразильского» метода. Предел прочности пород при растяжении определяется по формуле Герца

$$\sigma_p = \frac{2P_p}{ndh} \quad (9)$$

На основе теории упругости в формулу (9) вводят упругую характеристику и предлагают расчетную формулу вида [86]

$$\sigma_p = 0,637 \frac{P_p}{S} (1 + \nu) (1 + 2\nu), \quad (10)$$

где  $\nu$  — коэффициент Пуассона.

Сопротивление горных пород срезу является одной из основных прочностных характеристик, используемых при решении задач устойчивости откосов на карьерах. Предложенные к назначению времени методы определения этой характеристики пород объединяются в четыре основные группы: кручение, продольный срез, срез со сжатием, сдвиг [86].

Одной из наиболее сложных задач для решения вопроса устойчивости откосов в горной и инженерно-строительной практике является проблема соответствия получаемых физико-механических свойств пород на образце их свойствам в массиве. При испытании пород стремятся создать условия, близкие к природным, используя различные приборы трехосного сжатия — стабилометры [36]. При помощи стабилометра УСВ-2, разработанного в ВНОГЕМ, представляется возможным определить всего лишь по одному образцу песчано-глинистых пород целый комплекс характеристик: модуль упругости, модуль деформации, показатель прочности, коэффициент бокового распора, коэффициент Пуассона, параметры порового давления, коэффициент фильтрации, параметры ползучести пород, коэффициент уплотнения и др. Эти данные могут быть использованы не только для решения вопросов устойчивости уступов, бортов карьеров и отвалов, но и при исследовании деформирования пород при водопонижении и установлении величины осадок, расчета несущей способности грунтов при проектировании и возведении различного рода инженерных сооружений.

При исследовании механических свойств горных пород наиболее сложным является изучение их деформационных характеристик в массиве. И хотя используемые при этом компрессионные приборы трехосного сжатия или стабилометры в какой-то мере приближают нас к природным условиям, но все же они не могут обеспечить полного подобия.

Из всего многообразия существующих методов определения сопротивления пород сдвигу (сцепления  $S$  и угла внутреннего трения  $\varphi$ ) для решения вопросов устойчивости уступов, бортов карьеров и отвалов наиболее рациональными являются лабораторный способ, базирующийся на испытании образцов, натурное определение, проводимое непосредственно в откосах уступов и шурфах, и определение по результатам съемок происшедших обрушений и оползней на карьерах (метод обратных расчетов).

При лабораторном методе определения  $S$  и  $\varphi$  получают нормальные  $\sigma_n$  и касательные  $\tau_n$  напряжения при срезе образцов

горных пород на срезном приборе с помощью пресса под различными углами наклона плоскости среза к прикладываемой нагрузке [86, 99].

Для испытания изготавливаются три-четыре образца одной и той же породы естественной плотности и влажности. Их помещают в специальные обоймы и срезают под углами  $\epsilon$ , равными 30, 45 и 60°. Срезной прибор состоит из одной пары чугуновых или стальных обойм, ориентированных под углом 45° к направлению приложения силы  $P$ , и стальных клиньев, позволяющих создавать наклон под углами 30 и 60°. Для испытания цилиндрических образцов используются обоймы цилиндрической формы с вкладышами, позволяющими производить испытания образцов разного диаметра.

При срезе образца измеряется площадь среза, а по манометру пресса берется нагрузка, при которой произошел срез. Нормальные и касательные напряжения при срезе вычисляются по формулам:

$$\sigma_n = \frac{P_n}{S_n} \cos \epsilon; \quad (11)$$

$$\tau = \frac{P_n}{S_n} \sin \epsilon, \quad (12)$$

где  $P_n$  — усилие при срезе, создаваемое прессом, Н;  $S_n$  — площадь среза, м<sup>2</sup>;  $\epsilon$  — угол между направлением приложения нагрузки и нормалью к плоскости среза, градус.

Производя последовательное испытание образцов одной и той же породы, получают  $\sigma_{30}$ ,  $\sigma_{45}$ ,  $\sigma_{60}$  и  $\tau_{30}$ ,  $\tau_{45}$ ,  $\tau_{60}$ , а затем составляют паспорт прочности горной породы (рис. 1). Полученная кривая отражает зависимость между касательными и нормальными напряжениями. На основании исследований ВНИИМ на участке между линиями, выходящими из начала координат под углами 45 и 60° к оси  $\sigma_n$ , кривая заменяется хордой. Угол наклона хорды к оси абсцисс определяет угол внутреннего трения данной породы  $\varphi$ , а отрезок, отсекаемый по оси ординат, — сцепление  $S$  в масштабе графика.

При натуральных испытаниях определяют величину сцепления при известном значении для данной породы угла внутреннего трения. Работа выполняется путем среза гидродомкратами или гидродушками призм, оконеченных с трех сторон

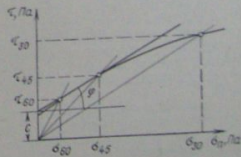


Рис. 1. Паспорт прочности горной породы

щелями в откосе уступов или в стенках шурфов. Ввиду того что свойства пород в массиве по разным направлениям относительно ослабленных поверхностей различны, плоскости срезов следует располагать по наслонению, вкряст наслонения и под некоторым углом к слоистости пород.

Наиболее трудоемкой частью исследований является подготовка оконтуривающих щелей для среза. Эта работа может быть выполнена с помощью электросверла, долотьев, а при массовых испытаниях в мягких породах могут быть использованы специальные самоходные установки с барами от врубочных машин или комбайнов. Размер срезаемых призм может быть различным и зависит от мощности используемого оборудования. Схемы определения прочностных свойств горных пород в натуральных условиях показаны на рис. 2.

Величина сцепления пород в массиве вычисляется по формуле, приведенной в работе [65]

$$C_m = \left( \frac{P + q \sin \delta}{s} \right) \sin \epsilon - \left( \frac{P + q \cos \delta}{s} \right) \cos \epsilon \operatorname{tg} \varphi, \quad (13)$$

где  $C_m$  — сцепление пород в массиве, Па;  $q$  — масса срезаемой призмы, кг;  $\delta$  — угол наклона плоскости среза к горизонту, определяемый горным компасом или высичым полукругом, градус,  $\varphi$  — угол внутреннего трения пород по лабораторным испытаниям, градус.

Практика показывает, что подготовка для испытания призм без их разрушения возможна в мягких и частично полускальных сильно каолинизированных породах. При массовых испытаниях глинистых пород и повышении производительности работ целесообразно использовать оборудование, приборы и методику, предложенную ВНОГЕМ [41]. Схема устройства и расположение оборудования для испытания пород на сдвиг показаны на рис. 3. Данное устройство в сравнении с применяемым на карьерах, когда для сдвига используется одна сдвигающая нагрузка, имеет большие преимущества; увеличивается производительность труда за счет сокращения трудоемких работ по оконтуриванию массива пород для сдвига; при одной установке упорного приспособления можно произвести три и более сдвига; сдвиги можно производить с различной нормальной нагрузкой, что повышает точность определения прочностных показателей.

При сильной трещиноватости горных пород и высокой их хрупкости натурные испытания в откосах уступов, как правило, не удаются — подготавливаемые призмы разрушаются уже при вырубке щелей.

Определение прочностных характеристик горного массива на основании замеров и маркшейдерских съемок обрушений и

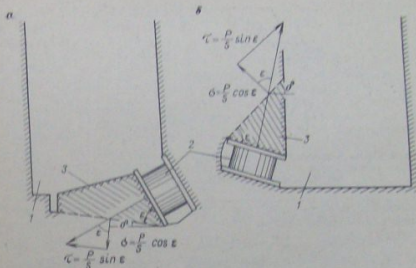


Рис. 2. Схемы к определению прочностных свойств горных пород в натуральных условиях: а — срез призмы на дне шурфа; б — срез на стенке шурфа; 1 — шурф; 2 — гидродомкрат; 3 — призма среза

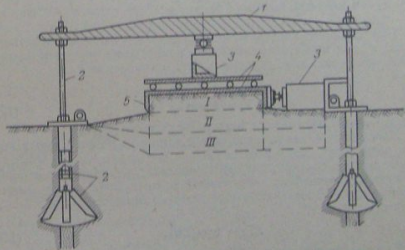


Рис. 3. Устройство для натуральных испытаний горных пород: 1 — упорная балка; 2 — анкеры-расширители; 3 — гидравлические домкраты; 4 — инерционные плиты; 5 — сдвигаемая обойма; I, II, III — срезаемые призмы

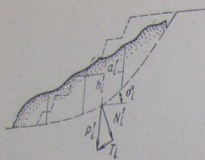


Рис. 4. Схема к определению прочностных свойств горных пород по результатам сдвига оползней и обрушений

равновесии силами сцепления и трения, действующими по наиболее слабой поверхности. Уравнение равновесия запишется так

$$\Sigma T_i = \text{tg } \varphi_m \Sigma N_i + C_m L, \quad (14)$$

где  $\Sigma T_i$  — сумма сил, сдвигающих массив;  $N_i$ ;  $\text{tg } \varphi_m \Sigma N_i + C_m L$  — сумма сил, удерживающих массив в равновесии,  $N_i$ .

Для определения нормальных ( $\Sigma N_i = N_1 + N_2 + \dots$ ) и касательных ( $\Sigma T_i = T_1 + T_2 + \dots$ ) сил по поверхности скольжения длиной  $L$  массив горных пород на вертикальном разрезе делится на отдельные расчетные блоки. Масса пород каждого блока на единицу его длины по фронту определится как

$$P_i = a_i h_i \gamma_i, \quad (15)$$

где  $a_i$  — расчетная ширина блока, м;  $h_i$  — высота блока, м;  $\gamma_i$  — плотность, кг/м<sup>3</sup>.

Нормальные и касательные напряжения в каждом расчетном блоке в зависимости от массы породных блоков и угла наклона поверхности скольжения вычисляются по формулам:

$$N_i = P_i \cos \delta_i, \quad (16)$$

$$T_i = P_i \sin \delta_i, \quad (17)$$

где  $\delta_i$  — угол наклона площадки скольжения, градус.

После обрушения или сползания данного массива горных пород устанавливается новое состояние его равновесия; приближенно можно считать, что силы сцепления по наиболее слабой поверхности перестают действовать. В этом случае сумма касательных сил уравновешивается только силами трения

$$\Sigma T_i' = \text{tg } \varphi_m \Sigma N_i'. \quad (18)$$

Суммы нормальных  $\Sigma N_i'$  и касательных  $\Sigma T_i'$  составляющих определяются по указанной выше методике. Из уравнения (18) делим величину  $\varphi_m$ , а подставив ее в уравнение (14), опре-

## 1.2. ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ГОРНЫХ ПОРОД, СЛАГАЮЩИХ БОРТА УГОЛЬНЫХ КАРЬЕРОВ В КАЗАХСТАНЕ

Исследование физико-механических свойств горных пород произведено на Экибастуском, Куу-Чекинском, Майкубеньском, Кумыскудукском и Алакульском месторождениях на образцах и в натуральных условиях. Основные породы указанных месторождений: песчаники, алевролиты, аргиллиты и редко конгломераты. Испытания проведены для всех видов перечисленных пород. Число проведенных испытаний по месторождениям приведено в табл. 1.

На основании испытаний получены основные физико-механические характеристики [64].

Плотность пород определена на 1070 образцах, естественная влажность — на 490, сопротивление пород на одноосное сжатие и разрыв — на 357, сцепление и угол внутреннего трения — на 1565 образцах и т. д.

Методами математической статистики и корреляционного анализа установлено, что существует устойчивая связь между средней плотностью, естественной влажностью, сцеплением, крепостью пород и глубиной их залегания, т. е.  $\gamma$ ,  $W$ ,  $C$ ,  $\sigma_{сж}$  =  $f(H)$ ; между влажностью, сцеплением, прочностью и плотностью, т. е.  $W$ ,  $C$ ,  $\sigma_{сж}$  =  $f(\gamma)$  и т. д. Взаимосвязи физико-механических свойств горных пород друг с другом, а также с глубиной их залегания представлены графиками, показанными на рис. 5. Кривые изменения свойств горных пород проведены по усредненным групповым показателям на интервалах глубины через 50 м. Их средние значения найдены по опытным данным, в отдельных случаях из 70 испытаний по интервалу.

Оценка и надежность определения зависимостей произведена по формулам математической статистики [13, 82]:

$$\sigma = \pm \sqrt{\frac{\Sigma (x_i - \bar{x})^2}{n-1}}; \quad (19)$$

Таблица 1

Число проведенных испытаний свойств пород по месторождениям

Месторождение	Всего проведено испытаний	В том числе	
		в лабораторных условиях	в натуральных условиях
Экибастуское (карьерные поля № 1,	951	932	19
4) Майкубеньское (Шонтыкульский участок)	1410	1400	10
Кумыскудукское	639	630	9
Куу-Чекинское	339	320	19
Алакульское (приграничный участок)	200	200	—

$$V = \frac{\sigma}{\bar{x}} 100, \% ; \quad (20)$$

$$m_V = \frac{V \sqrt{0,5 + \left(\frac{V}{100}\right)^2}}{\sqrt{n}} \quad (21)$$

где  $\sigma$  — стандарт;  $x_i$  — значение признака;  $\bar{x}$  — среднеарифметическое значение признака;  $n$  — число наблюдений;  $V$  — коэффициент вариации;  $m_V$  — надежность вычисления коэффициента вариации.

Если соблюдается условие  $3m_V < V$ , то результаты можно считать надежными и число исходных данных для определения статистических средних достаточным.

В пределах рассматриваемого интервала по глубине залегания пород наблюдался значительный разброс определяемых ха-

рактеристик. Коэффициент вариации  $V$  изменялся по горным породам и интервалам глубины их залегания от 15 до 48%.

Полученные графоаналитические зависимости позволяют сделать некоторые научные обобщения. Например, по изменению величины сцепления песчаников с глубиной их залегания (рис. 5, а) все месторождения Казахстана, где добыча угля осуществляется открытым способом, можно разделить на две группы. Первая — это Куу-Чекинское и Экибастузское месторождения, где величина сцепления резко возрастает до глубины 150—200 м и далее стабилизируется. Вторая — это Майкубенское и Кумыскудукское месторождения. Здесь нарастание величины сцепления с глубиной идет постепенно с интервалом (12—15)  $\times 10^6$  Па. Расхождение в величине сцепления по песчаникам между группами месторождений с глубины 100 м уже составляет (25—30)  $\cdot 10^6$  Па.

Наибольшую плотность имеют песчаники Куу-Чекинского и Экибастузского месторождений и наименьшую — Майкубенского. По этим месторождениям  $\Delta \rho$  с глубины 100 м составляет уже  $0,3 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup>.

Величина сцепления песчаников Куу-Чекинского и Майкубенского месторождений очень чувствительна к изменению влажности. При изменении влажности всего лишь на 0,5% сцепление этих пород уменьшается на  $5 \cdot 10^6$  Па. Это же наблюдается с плотностью пород, когда при незначительном изменении влажности она у песчаников начинает резко меняться.

Кроме того, величина сцепления песчаников связана с изменением плотности и прочности пород. Например, величина сцепления куу-чекинских песчаников изменяется на  $7 \cdot 10^6$  Па при изменении их плотности на  $0,2 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup> и на  $1 \cdot 10^7$  Па — при изменении прочности пород на  $3 \cdot 10^7$  Па.

Песчаники на рассматриваемых угольных месторождениях сравнительно сухие. Наиболее обводнены контакты литологических разностей пород. Повышенную влажность имеют породы верхних горизонтов. Почти на всех месторождениях естественная влажность пород стабилизируется уже на глубине 150—200 м и составляет 2—3%.

Полученные графоаналитические зависимости позволяют дать качественную и количественную оценку изменения свойств горных пород. Вид кривых связи по литологическим разностям, как видно из графиков (см. рис. 5, а, б), примерно одинаков, имеются лишь качественные различия. Между показателями существует устойчивая связь. При известных одних показателях представляется возможным, используя графики, определить другие, тем самым открываются пути прогнозирования свойств горных пород по месторождениям. Исходными данными для этого являются наименование пород, глубина их залегания и отдельные характеристики, как, например, плотность пород и др., для определения которых не требуется трудоемких лабора-

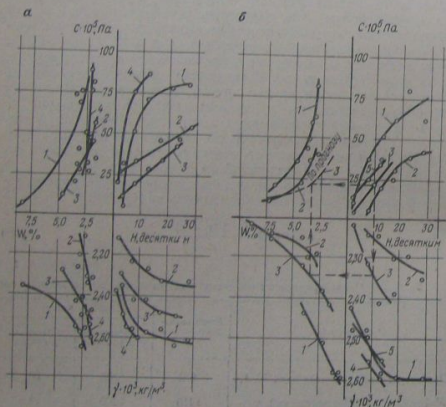


Рис. 5. Взаимосвязь физико-механических свойств пород: а — песчаники; б — аллювиолиты: 1 — Экибастузское месторождение; 2 — Кумыскудукское; 3 — Майкубенское; 4 — Куу-Чекинское; 5 — Алакульское. Точки — групповые средние ( $n=3-7$ )



Изменение сцепления  $C$  с глубиной залегания пород  $H$  характеризуется уравнением

$$C = \pm a \pm bH \pm gH^2. \quad (25)$$

Численное значение коэффициентов, их знаки и пределы пользования зависимостью (25) приведены в табл. 4.

Таблица 4  
Коэффициенты уравнений связи сцепления с глубиной залегания пород

Породы	Коэффициенты			Пределы $H$ , м
	$a \cdot 10^5$	$b \cdot 10^5$	$g \cdot 10^5$	
<b>Экибастузское месторождение</b>				
Песчаники	-1,8	+7,12	-0,1137	$300 > H > 25$
Аргиллиты	+2,3	+5,40	-0,1255	$300 > H > 25$
Алевролиты	+8,00	+4,16	-0,064	$300 > H > 25$
<b>Куу-Чекинское месторождение</b>				
Песчаники:				
северо-западный борт	-10,24	+17,2	-0,76	$150 > H > 25$
юго-восточный борт	+0,5	+6,64	—	$170 > H > 25$
<b>Майкубеньское месторождение</b>				
Песчаники	+19,3	+1,33	—	$300 > H > 25$
Аргиллиты	+10,5	+1,8	—	$125 > H > 75$
Алевролиты	-1,9	+1,92	—	$250 > H > 25$
<b>Кумыскудукское месторождение</b>				
Песчаники	+11,6	+1,19	—	$250 > H > 25$
Аргиллиты	+8,4	-1,658	+0,110	$200 > H > 50$
Алевролиты	+4,8	+2,63	-0,059	$200 > H > 50$
<b>Алакульское месторождение</b>				
Алевролиты	+15,8	+1,3	—	$150 > H > 25$

Изменение сопротивления пород на одноосное сжатие  $\sigma_{сж}$  в зависимости от глубины их залегания  $H$  характеризуется уравнением

$$\sigma_{сж} = \pm a \pm bH \pm gH^2, \quad (26)$$

где  $\sigma_{сж}$  — сопротивление пород на сжатие,  $10^5$  Па.

Численное значение коэффициентов и их знаки приведены в табл. 5.

Таблица 5  
Коэффициенты уравнений связи сопротивления пород сжатие с глубиной их залегания

Породы	Коэффициенты			Пределы $H$ , м
	$a \cdot 10^5$	$b \cdot 10^5$	$g \cdot 10^5$	
<b>Куу-Чекинское месторождение</b>				
Песчаники	+146	-27,5	+7,1	$80 > H > 25$
<b>Майкубеньское месторождение</b>				
Песчаники	+75	+9,5	-0,17	$275 > H > 25$
Аргиллиты	+11,2	+1,0	+0,17	$175 > H > 25$
Алевролиты	+175	-1,4	—	$175 > H > 25$
<b>Кумыскудукское месторождение</b>				
Песчаники	+36	+8,8	—	$175 > H > 25$
Аргиллиты	+21	-2,7	+0,5	$225 > H > 25$
Алевролиты	+55,6	+3,8	+0,47	$175 > H > 25$
<b>Алакульское месторождение</b>				
Алевролиты	+14	+31,7	-0,56	$150 > H > 25$

Связь средней плотности пород  $\gamma$  с их естественной влажностью  $W$  характеризуется уравнением

$$\gamma = \pm a \pm bW \pm gW^2. \quad (27)$$

Значения коэффициентов, входящих в формулу (27), их знаки и пределы пользования указанной зависимостью приведены в табл. 6.

Таблица 6  
Коэффициенты уравнений связи плотности с влажностью пород

Породы	Коэффициенты			Пределы $W$ , %
	$a \cdot 10^4$	$b \cdot 10^4$	$g \cdot 10^{-3}$	
<b>Экибастузское месторождение</b>				
Песчаники	+2,73	-0,043	—	$10 > W > 2,5$
Аргиллиты	+2,90	-0,08	-0,002	$15 > W > 3,0$
Алевролиты	+2,72	-0,044	—	$8 > W > 2,5$
<b>Куу-Чекинское месторождение</b>				
Песчаники	+3,08	-0,24	—	$3 > W > 2$

Породы	Коэффициенты			Пределы $W, \%$
	$a \cdot 10^3$	$b \cdot 10^3$	$g \cdot 10^{-3}$	
Майкубское месторождение				
Песчаники Аргиллиты Алевриты	+3,11	-0,334	—	$3 > W > 2$
	+2,91	-0,2265	+0,0152	$6 > W > 3$
	+2,45	-0,054	+0,0035	$8 > W > 2$
Кумысудульское месторождение				
Песчаники Аргиллиты Алевриты	+2,81	-0,1335	—	$4 > W > 2$
	+2,70	-0,137	+0,00775	$12 > W > 2$
	+2,51	-0,06	+0,0031	$10 > W > 1$

Связь средней плотности пород  $\gamma$  с коэффициентом их крепости  $f$  характеризуется уравнением

$$\gamma = \pm a \pm bf \pm gf^2, \quad (28)$$

где  $f = \sigma_{сж} \cdot 10^2$  (по шкале проф. М. М. Протождяконова).

Значения коэффициентов, входящих в формулу (28), их знаки приведены для отдельных видов пород по месторождению, где прослеживается эта связь, в табл. 7.

Таблица 7

Породы	Коэффициенты			Пределы $f$
	$a \cdot 10^3$	$b \cdot 10^3$	$g \cdot 10^3$	
Куу-Чекинское месторождение				
Песчаники	+2,21	+0,196	-0,0254	$4,2 > f > 1,0$
Майкубское месторождение				
Песчаники	+1,89	+0,23	—	$2,36 > f > 2,1$
Кумысудульское месторождение				
Песчаники Аргиллиты	+2,07	+0,4	-0,1	$2,0 > f > 0,6$
	+2,04	+0,392	-0,1083	$0,8 > f > 0,2$

Связь сцепления пород  $C$  с их средней плотностью  $\gamma$  характеризуется уравнением

$$C = \pm a \pm b\gamma \pm g\gamma^2. \quad (29)$$

Значения и знаки коэффициентов уравнения (29) приведены в табл. 8.

Таблица 8

Породы	Коэффициенты			Пределы $\gamma \cdot 10^{-3},$ кг/м <sup>3</sup>
	$a \cdot 10^6$	$b \cdot 10^6$	$g \cdot 10^6$	
Экибастузское месторождение				
Песчаники Аргиллиты Алевриты	+49,6	-42,05	+9,3	$2,6 > \gamma > 2,3$
	+8,60	-8,04	+1,89	$2,64 > \gamma > 2,20$
	-55,32	+22,33	—	$2,52 > \gamma > 2,49$
Куу-Чекинское месторождение				
Песчаники	+67,98	-57,0	+12,0	$2,60 > \gamma > 2,38$
Майкубское месторождение				
Песчаники Алевриты	-6,32	+3,0	—	$2,36 > \gamma > 2,10$
	-6,78	+3,15	—	$2,36 > \gamma > 2,20$
Кумысудульское месторождение				
Песчаники	+28,9	-25,15	+5,5	$2,50 > \gamma > 2,28$

С увеличением плотности пород их прочностные свойства увеличиваются, что наблюдается по всем породам рассматриваемых месторождений.

Изменение сцепления пород  $C$  в зависимости от их естественной влажности  $W$  характеризуется уравнением

$$C = \pm a \pm bW \pm gW^2 \pm eW^3. \quad (30)$$

Значения и знаки коэффициентов, входящих в уравнение (30), приведены в табл. 9.

Связь сцепления пород  $C$  с сопротивлением их на одноосное сжатие  $\sigma_{сж}$  характеризуется уравнением

$$C = \pm a \pm b\sigma_{сж} \pm g\sigma_{сж}^2. \quad (31)$$

Значения коэффициентов, входящих в формулу (31), и их знаки приведены в табл. 10.

Связь влажности горных пород  $W$  с их крепостью  $f$  наиболее четко прослеживается для пород Кумысудульского месторождения. С уменьшением влажности породы становятся крепче, и эта взаимосвязь характеризуется уравнением

$$W = \pm a \pm bf \pm gf^2. \quad (32)$$

Таблица 9  
Коэффициенты уравнений связи сцепления с влажностью пород

Породы	Коэффициенты				Пределы $\Psi$ , %
	$a \cdot 10^5$	$b \cdot 10^5$	$g \cdot 10^5$	$z \cdot 10^5$	
Экибастузское месторождение					
Песчаники Аргиллиты Алевриты	+3,68	-1,77	+0,279	-0,013	$7,5 > \Psi > 2,5$
	+2,10	-0,516	+0,0342	—	$8 > \Psi > 2$
	+1,32	-0,294	+0,017	—	$9 > \Psi > 1,5$
Майкубское месторождение					
Алевриты	+2,47	-0,815	+0,068	—	$7,5 > \Psi > 3,5$
Кумыскудукское месторождение					
Песчаники	+0,41	-0,06	—	—	$5 > \Psi > 1,5$
Куу-Чекинское месторождение (юго-восточный борт)					
Песчаники	+13,32	-9,408	+1,75	-0,0534	$6 > \Psi > 1,8$

Таблица 10  
Коэффициенты уравнений связи сцепления с сопротивлением пород сжатию

Породы	Коэффициенты			Пределы $\sigma_{сж} \cdot 10^{-3}$ , Па
	$a \cdot 10^5$	$b \cdot 10^5$	$g \cdot 10^5$	
Куу-Чекинское месторождение				
Песчаники	+3,4	+0,132	+0,00043	$400 > \sigma_{сж} > 100$
Майкубское месторождение				
Песчаники	+44,3	-0,338	+0,00175	$220 > \sigma_{сж} > 100$
Кумыскудукское месторождение				
Песчаники Алевриты	+6,2	+0,125	—	$190 > \sigma_{сж} > 60$
	-3,5	+0,214	—	$180 > \sigma_{сж} > 70$
Алакульское месторождение				
Алевриты	+22,0	-0,0625	+0,000325	$300 > \sigma_{сж} > 100$

Численные значения коэффициентов уравнения (32) и их знаки приведены в табл. 11.  
Средние значения углов внутреннего трения по породам этих месторождений приведены в табл. 12.

Таблица 11  
Коэффициенты уравнений связи влажности с коэффициентом крепости пород

Породы	Коэффициенты			Пределы $f$
	$a$	$b$	$z$	
Кумыскудукское месторождение				
Песчаники Аргиллиты и алевриты	+5,24	-1,82	—	$2,0 > f > 0,4$
	+10,4	-7,12	+1,5	$2,6 > f > 0,1$

Таблица 12  
Угол внутреннего трения пород

Месторождение	Значения угла внутреннего трения (градус) для			
	песчаника	аргиллита	алеволита	конгломерата
Экибастузское	35	28	32	—
Куу-Чекинское	35	33	33	—
Кумыскудукское	34	34	32	36
Алакульское	41	30	32	18

Лабораторный способ определения свойств горных пород, а тем более натурные испытания в производственных условиях весьма трудоемки. Нашими исследованиями установлено, что для приближенной оценки некоторых свойств горных пород можно воспользоваться величиной  $\sigma_{сж}$ , которая в сравнении с другими параметрами определяется более просто. По рассматриваемым угольным месторождениям Казахстана устанавливается, что численные значения величин сцепления пород и напряжений при срезе образцов под углом  $60^\circ$  близки, а иногда и совпадают. Для песчаников Майкубского месторождения расхождения колеблются от 2,3 до 12,4%, Куу-Чекинского — от 8 до 13%, Кумыскудукского — от 4 до 15%; для аргиллитов и алевритов по Майкубу — от 11 до 27%, Кумыскудукскому — от 4 до 22%, по Алакульскому — от 5 до 9% и Куу-Чекинскому — от 2 до 12%.

Приближенные значения величин сцепления  $C$ , а также нормальных и касательных напряжений при срезе образцов под углами  $45^\circ$  и  $60^\circ$  ( $\sigma_{45}$ ,  $\tau_{45}$ ,  $\sigma_{60}$ ,  $\tau_{60}$ ) в зависимости от показателей прочности пород на одноосное сжатие  $\sigma_{сж}$  могут быть определены по эмпирическим формулам при усредненных коэффициентах связи, приведенных в табл. 13.

Уравнения связи сцепления, нормального и касательного напряжений с сопротивлением пород сжатию

Месторождение	Породы	
	песчаники	аргиллиты, алевролиты
Куу-Чекинское	$C = \sigma_{60} = 0,22 \sigma_{сж}$ $\tau_{60} = 0,43 \sigma_{сж}$ $\tau_{45} = \sigma_{45} = 0,70 \sigma_{сж}$	$C = \sigma_{60} = 0,20 \sigma_{сж}$ $\tau_{60} = 0,33 \sigma_{сж}$ $\tau_{45} = \tau_{60} = 0,59 \sigma_{сж}$
Майкубьское	$C = \sigma_{60} = 0,24 \sigma_{сж}$ $\tau_{60} = 0,47 \sigma_{сж}$ $\tau_{45} = \sigma_{60} = 0,59 \sigma_{сж}$	$C = \sigma_{60} = 0,22 \sigma_{сж}$ $\tau_{60} = 0,40 \sigma_{сж}$ $\tau_{45} = \sigma_{45} = 0,33$
Кумыскудукское	$C = \sigma_{60} = 0,19 \sigma_{сж}$ $\tau_{60} = 0,31 \sigma_{сж}$ $\tau_{45} = \sigma_{45} = 0,39 \sigma_{сж}$	$C = \sigma_{60} = 0,19 \sigma_{сж}$ $\tau_{60} = 0,28 \sigma_{сж}$ $\tau_{45} = \sigma_{45} = 0,47 \sigma_{сж}$

Сцепление горных пород является одной из основных характеристик при производстве расчетов, связанных с устойчивостью уступов и бортов карьеров. Наибольшее значение на численную величину этой характеристики оказывают глубина залегания горных пород, их влажность, плотность и др. Совместное влияние этих факторов на величину сцепления и определение, например, зависимостей вида  $C=f(H, W)$ ,  $C=f(H, \gamma)$  могут быть установлены методом множественной корреляции. При этом используются данные лабораторных исследований свойств пород. Такие исследования нами проведены для пород Экибастузского и Кумыскудукского месторождений и получены следующие аналитические зависимости:

## Экибастузское месторождение

Песчаник:

$$C = (64,6 + 1,44H - 7,49W) 10^6 \pm 7 \cdot 10^6 \quad (33)$$

при

$$R_{сж\gamma} = 0,89 \pm 0,09$$

и

$$\eta = 10,2;$$

при

$$C = (-54,4 + 1,89H + 33,8 \cdot 10^{-3}\gamma) 10^6 \quad (34)$$

и

$$R_{сж\gamma} = 0,82 \pm 0,13$$

Аргиллит:

$$\eta = 6,1.$$

$$C = (40,7 + 0,89H - 1,45W) 10^6 \pm 6,8 \cdot 10^6 \quad (35)$$

при

$$R_{сжW} = 0,84 \pm 0,11$$

и

$$C = (8,6 + 1,76H + 5,2 \cdot 10^{-3}\gamma) 10^6 \quad (36)$$

при

$$R_{сж\gamma} = 0,79 \pm 0,15$$

и

$$\eta = 5,1.$$

Алевролит:

$$C = (82,4 + 0,55H - 9,70W) 10^6 \quad (37)$$

при

$$R_{сжW} = 0,83 \pm 0,14$$

и

$$\eta = 4,4;$$

$$C = (-3,7 + 1,61H + 12,3 \cdot 10^{-3}\gamma) 10^6 \quad (38)$$

при

$$R_{сж\gamma} = 0,73 \pm 0,19$$

и

$$\eta = 3,8.$$

Кумыскудукское месторождение

Песчаник:

$$C = (19,3 + H - 2W) 10^6 \pm 2,2 \cdot 10^6 \quad (39)$$

при

$$R_{сжW} = 0,81 \pm 0,17$$

и

$$\eta = 4,7;$$

Аргиллит:

$$C = (10,2 + 0,72H - 1,23W) 10^6 \pm 6,7 \cdot 10^6 \quad (40)$$

при

$$R_{сжW} = 0,69 \pm 0,23$$

и

$$\eta = 3,1;$$

Алевролит:

$$C = (27,2 + 0,27H - 1,71W) 10^6 \pm 4,2 \cdot 10^6 \quad (41)$$

при

$$R_{сжW} = 0,71 \pm 0,25$$

и

$$\eta = 2,8.$$

где  $R$  — коэффициент множественной корреляции;  $\eta$  — надежность его определения.

В формулах (33)–(41) надежность определения коэффициентов множественной корреляции сравнительно невелика, но выше допустимой  $\eta \geq 2,6$  согласно теореме Ляпунова, поэтому их следует использовать для приближенной оценки связи между установленными признаками. Для пород обоих месторождений зависимость вида  $C=f(H, W)$  следующая:

$$C = a + bH - gW, \quad (42)$$

где знаки сохраняют свое постоянство, а изменяются лишь численные значения коэффициентов  $a, b, g$ .

Для практического использования физико-механических свойств горных пород, полученных в лабораторных условиях, необходимо знать коэффициенты структурного ослабления пород  $\lambda_0$ . Эта величина находится по формуле

$$\lambda_0 = \frac{C_m}{C_0}, \quad (43)$$

где  $C_m, C_0$  — сцепление пород соответственно в массиве и образце, Па.

Численные значения средних коэффициентов структурного ослабления по породам угольных месторождений Казахстана приведены в табл. 14.

Таблица 14

Коэффициенты структурного ослабления по породам угольных месторождений

Условия	Породы	Средние значения коэффициента структурного ослабления пород на месторождениях $\lambda_0$			
		Эмбаусту-ский	Майкубень-ский	Кумыскудук-ский	Куу-Чекинском
Срезы в однородных породах при отсутствии слоистости или ослабленных поверхностей	Песчаник	0,40	—	—	0,10
	Аргиллит	0,16	0,16	0,15	—
	Алевролит	0,15	—	—	0,01
Срезы перпендикулярно к слоистости	Конгломерат	—	—	0,11	—
	Углистые породы	0,26	—	—	—
Срезы по направлению слоистости	Песчаник	0,10	—	—	0,015
	Алевролит и аргиллит	—	0,05	—	0,002
Срезы по ослабленным поверхностям, контактам, геологическим нарушениям, а также данные по съемке обрушений и оползней	Заполняющие контакты материалы: глинистые отложения, аргиллит, алевролит	0,02	0,015	—	0,002—0,005
	Углистый аргиллит	0,07	—	—	—

Анализ данных табл. 14 показывает, что породы Куу-Чекинского месторождения отличаются очень малой величиной коэффициента структурного ослабления. По своему геологическому строению это месторождение очень сложное, с глубокой разработкой следует ожидать усиления оползневых явлений. Это требует и принятия соответствующих мер уже в настоящее время. На Майкубеньском и Кумыскудукском месторождениях натурные определения механических свойств структурных ослаблений всем породам, а на Алакульском месторождении проведены не по водились. При решении вопросов проектирования, разработки и иных коэффициентов структурного ослабления можно принимать по аналогии.

В работе [99] установлена эмпирическая зависимость между сцеплением в образце и массиве при наличии поверхности скольжения, не совпадающих с поверхностями ослабления,

$$C_m = \frac{C_0}{1 + a \ln \frac{H}{l}}, \quad (44)$$

откуда

$$\lambda_0 = \frac{1}{1 + a \ln \frac{H}{l}}, \quad (45)$$

где  $a$  — коэффициент, зависящий от прочности породы в монолитном образце и характера трещиноватости;  $\frac{H}{l}$  — отношение глубины залегания пород к среднему размеру элементарных блоков.

По формуле (45) коэффициент структурного ослабления определяется относительной величиной интенсивности трещиноватости массива.

Одной из основных причин различия свойств пород в образцах и горном массиве является отсутствие подобия по структурно-тектоническим особенностям. При оценке устойчивости разломы структурных блоков имеют второстепенное значение, бо́лее существенными и определяющими факторами являются протяженность и взаимная направленность трещин, состояние поверхностей, вид заполнителя и ориентирование поверхностей ослабления относительно простирания откосов уступов и бортов карьеров.

Для получения расчетных прочностных характеристик  $C_p$ ,  $\Phi_p$ , необходимых для оценки устойчивости откосов на карьерах, в ранее полученные значения  $C_m, \Phi_m$  в зависимости от свойств пород, структурных особенностей месторождения и срока служ-

бы бортов карьеров вводится коэффициент запаса  $n_3$ . Согласно исследованиям, проводимым во ВНИИ, коэффициент запаса  $n_3$  колеблется от 1,15 до 2,0. Для угольных месторождений он равен 1,2—1,7. Этот же коэффициент может быть вычислен по формуле, приведенной в работах [48, 49],

$$n_3 = \sqrt{\frac{m_1(T + m_1)}{m_2}} \quad (46)$$

где  $T$  — срок службы борта карьера в целом или определенной его зоны;  $m_1, m_2$  — коэффициенты, зависящие от характеристики пород;  $n_1$  — показатель, зависящий от породы и механизма выветривания.

Расчетные прочностные характеристики пород равны

$$C_p = \frac{C_m}{n_3} \quad (47)$$

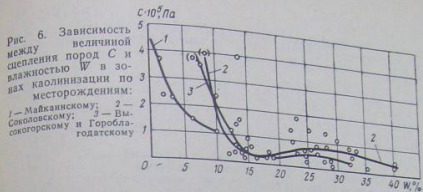
$$\varphi_p = \arctg \frac{\text{tg } \varphi_m}{n_3} \quad (48)$$

В расчетах на устойчивость по ослабленным поверхностям (по заранее фиксированным контактам) величины  $C_p$  и  $\varphi_p$  следует принимать по данным съемок обрушений и оползней. Анализ фактического материала по карьерам Казахстана и Северного Урала говорит о некоторой стабильности прочностных свойств по контактам пород. Поскольку в большинстве случаев заполняющим контакту материалом являются глинистые отложения, то они характеризуются почти одинаковыми прочностными свойствами. В среднем величина сцепления по таким контактам составляет  $(0,5 \pm 1,5) \cdot 10^4$  Па, но угол внутреннего трения колеблется от 15 до 30° и в среднем может быть принят равным 19—22°.

### 1.3. ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПОРОД, СЛАГАЮЩИХ БОРТА НЕКОТОРЫХ РУДНЫХ КАРЬЕРОВ КАЗАХСТАНА И УРАЛА

Обследования проводятся по 10 рудным карьерам, в том числе железорудным: Соколовскому, Каражальскому, Малому Куйбасковскому, Высокогорскому и Гороблагодатскому, меднорудным: Коунрадскому, Златоуст-Беловскому, Саякскому, полиметаллическим: Майкаинскому, Карагайлинскому. Для установления зависимости между свойствами пород на карьерах Коунрадском и Карагайлинском использованы исходные данные ВНИИ.

Породы указанных месторождений в вертикальном разрезе разделяются на две зоны: зону, представленную опоко-песча-



нистыми глинами, кварцево-глауконитовыми песками, каолинизированными туфосланцами, глинами, элювными туфа и другими слабыми породами, и зону скальных и полускальных пород высокой крепости, хрупкости, трещиноватости. По взаимосвязи свойств пород в указанных зонах и значимости полученных данных для практического пользования при решении вопросов устойчивости откосов на карьерах имеются принципиальные различия.

Зона каолинизированных пород на ряде рассматриваемых карьеров достигает глубины 50—80 м от поверхности, в результате чего пять-семь верхних уступов в значительной мере отличаются по устойчивости от нижних. Устойчивость этих уступов связана с целым рядом факторов и прежде всего с обводненностью каолинизированных пород. На рис. 6 показаны зависимости между величиной сцепления пород и их влажностью.

По карьерам Соколовскому (Казахстан), Гороблагодатскому и Высокогорскому (Урал) кривые почти совпадают. Там, где зона наносов и каолинизированных пород представлена опоко-песчанистыми и глинистыми образованиями, связь устойчива, несмотря на то что месторождения расположены в разных географических и климатических условиях. Эта связь описывается эмпирическим уравнением

$$C = (10,4 - 1,137W + 0,043W^2 - 0,00055W^3) \cdot 10^4 \quad (49)$$

При решении вопросов взаимосвязи сцепления пород с их влажностью сопоставлялись данные, полученные при испытании пород, взятых из кернов скважин и отобранных непосредственно откосов уступов, где естественная влажность не соответствовала влажности, присущей массиву. В порядке эксперимента образцы каолинизированных порфиритов Майкаинского карьера в лабораторных условиях увлажнялись или высушивались, а затем известными методами с помощью срезных приборов определялась величина сцепления. Кривые изменения величин сцепления от естественной влажности пород на некотором интервале почти совпадают и повторяют друг друга.

Таблица 15  
Коэффициенты уравнения связи сцепления с сопротивлением пород  
сжатия для зон каолинизации пород

Карьер	Горная порода	Средние значения коэффициента $a_1$
Соколовский	Глина вязкая, сланцы, песчаная опока	0,10
	Опоясовая глина	0,17
	Суглинок и альбитофиры выветрелые	0,28
	Песчаник каолинизированный	0,25
Златоуст-Беловский Гороблагодатский и Высокотгорский	Элювий сиенита, каолин с включением маршита	0,13
	Каолин и элювий туфа	0,28

Угол внутреннего трения пород каолинизированной толщи по результатам испытания образцов колеблется от 26 до 43°, и, как показали исследования, не наблюдалось закономерности снижения  $\varphi$  от увеличения влажности. Между величиной сцепления и крепостью пород существует связь  $S = a_1 \sigma_{сж}$ . Усредненные коэффициенты этой связи для пород рассматриваемых карьеров приведены в табл. 15.

Для производства инженерных расчетов значения  $S$ , полученные при испытании образцов или по приближенным эмпирическим формулам, должны быть скорректированы на величину структурного ослабления  $\lambda_0$ , а для получения расчетных характеристик следует ввести в  $S$  и  $\varphi$  коэффициент запаса  $n_3$ .

Средние значения величины  $\lambda_0$  приведены в табл. 16.

Таблица 16  
Коэффициенты структурного ослабления горного массива по рудным карьерам

Условия испытаний	Карьер			
	Златоуст-Беловский	Майкалинский	Коунрадский	Западный Каражал
сланец, песчаник, аргиллит		каолинизованный порфирит, туф	каолинизованные вторичные кварциты по эффузивным породам	глинистые и сланцевые породы
По наслонению пород	0,006	0,005	—	0,001
По системам трещин	0,024	0,040—0,100	0,018—0,200*	—
Вокрест наслонения и трещиноватости	0,050	0,150	0,025—0,410*	0,035

\* По данным ВНИИМ.

Таблица 17  
Коэффициенты структурного ослабления по породам Златоуст-Беловского карьера

Условия испытаний	Порода	$\lambda_0$	Примечание
По наслонению	Песчаник розовый Сланец серо-зеленый Алевролит красный	0,003	По сцеплению обрушений
		0,007	
		0,009	
По системам трещин	Песчано-глинистый сланец	0,026	Натурные испытания По сцеплению обрушений
		0,017	
		0,025	
Вокрест наслонения пород и трещиноватости	Сланец серо-зеленый Алевролит красный	0,064	Натурные испытания
		0,022	

Наиболее полные данные о величине коэффициента структурного ослабления получены по породам Златоуст-Беловского карьера. Средние значения величины  $\lambda_0$  приведены в табл. 17. Данные табл. 17 дают не только количественную характеристику величины  $\lambda_0$ , но также отображают ее качественную сторону, детализируя и оценивая способы получения этой величины в различных условиях.

Физико-механические свойства полускальных и скальных пород по указанным выше месторождениям определялись лабора-

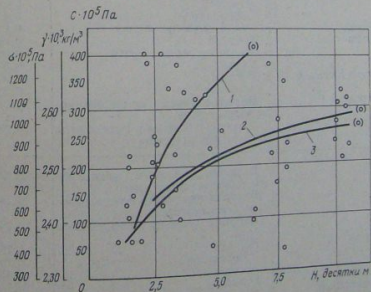


Рис. 7. Зависимости между  $\lambda_0$  и глубиной их залегания  $H$  на Златоуст-Беловском карьере  
1 — средней плотностью  $\gamma$ ; 2 — крепостью  $\sigma_{сж}$ ; 3 — сцеплением  $S$  песчаников

торным способом на образцах. Коэффициенты структурного ослабления в производственных условиях не исследовались. Для перехода от образца к массиву в этих условиях могут быть использованы сведения, приведенные в работах [37, 99].

Исследованиями установлено, что в скальном трещиноватом массиве между отдельными свойствами пород и глубиной их залегания не наблюдается той устойчивой взаимосвязи, которая имеет место по угольным месторождениям. Только на Златоуст-Беловском карьере прослеживается некоторое увеличение плотности, крепости и сцепления пород с глубиной их залегания.

Кривые, представленные на рис. 7, являются примером иллюстрации наблюдающихся тенденций.

Для скальных и полускальных пород сцепление целесообразно определять через  $\sigma_{сж}$ . Здесь также прослеживаются опре-

Таблица 18  
Коэффициенты уравнений связи сцепления с сопротивлением пород сжатию для скальных массивов

Карьер	Горные породы	Средний коэффициент $a_2$
Соколовский	Песчаник Сиезит-порфиры	0,22
		0,20
Малый Куйбасский	Граносиениты Роговики	0,20
		0,21
Западный Каражал	Габбро-диориты Железо-кремнистые породы Известняк Железо-карбонатные породы	0,22
		0,26
		0,28
		0,36
Златоуст-Беловский	Сланцы Песчаник	0,25
		0,30
Коурадский	Вторичные кварциты по осадочно-эффузивным породам Гранодиорит-порфиры слабо каолинизированные	0,16
		0,20
Саякский	Вторичные кварциты по гранодиоритам и гранодиорит-порфирам Вторичные кварциты по гранодиоритам сильно каолинизированные Вторичные кварциты по эффузивным породам	0,22
		0,34
		0,36
		0,19
Карагайлинский	Песчаник Тuffоалевролиты Мрамор Известняк Песчаники полимиктовые Сланцы кремнисто-глинистые Роговики кварцево-полевошпатовые	0,16
		0,20
		0,17
		0,26
		0,27
		0,40

деленные связи в виде  $S = a_2 \sigma_{сж}$ . Усредненные значения коэффициентов  $a_2$  для пород рассматриваемых карьеров приведены в табл. 18.

Анализ табл. 18 показывает, что средние значения переходных коэффициентов при  $a_2$  в отдельных случаях имеют значительные отклонения от единичных определений, например для цев и известняков Западного Каражала — на 30—42%, сланцев и известняков Западного Каражала — на 29—30%, для песчаников карьера Златоуст-Беловского — на 20%. Ввиду большого разброса показателей указанные выше зависимости для инженерных расчетов можно использовать с известным приближением.

Между пределом прочности породы на растяжение и коэффициентом Пуассона также существует эмпирическая связь. Например, для месторождения Малый Куйбасс для габбро-сиенитов

$$\sigma_p = (2,8 - 20v + 65v^2) 10^4; \quad (50)$$

для габбро-диоритов при их средней плотности  $\gamma = (2,9 - 3,0) 10^3 \text{ кг/м}^3$

$$\sigma_p = (3,5 - 11,4v + 12,5v^2) 10^4; \quad (51)$$

для роговиков

$$\sigma_p = (14 - 87v + 149v^2) 10^4. \quad (52)$$

## II. СТРУКТУРНО-ТЕКТОНИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ГОРНОГО МАССИВА И ТРЕЩИНАТОСТЬ ПОРОД

### II.1. СТРУКТУРНО-ТЕКТОНИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ГОРНОГО МАССИВА И ИХ ВЛИЯНИЕ НА УСТОЙЧИВОСТЬ ОТКОСОВ НА КАРЬЕРАХ

Структурно-тектонические особенности горного массива, характеризующие дизъюнктивную и пликтивную нарушенность пород, степень и характер их трещиноватости, слоистость и слоистцеватость, являются одним из основных и главных факторов, которые следует учитывать при решении целого ряда задач горного дела.

Решению вопросов по изучению структуры горного массива, установлению различных закономерностей и связей, влияющих на ослабленные поверхности на выбор расчетных схем по определению оптимальных параметров горных работ, исключая оползневые явления, посвящены работы многих советских исследователей. Большое внимание этим вопросам уделяется и в зарубежной практике. Почти все исследователи, занимающиеся вопросами устойчивости откосов, отмечают значительное влияние структурно-тектонических особенностей горного массива на возникновение оползневых явлений.

Общезвестно, что породы угольных месторождений менее трещиноваты, чем полускальные и скальные породы, слагающие в большинстве случаев борта рудных карьеров. В условиях осадочных пород почти все оползневые явления происходят по кровле или почве угольных пластов, по контактам пород, поверхностям геологических нарушений и редко по направлению трещин или кливажу. В скальных породах дизъюнктивные геологические нарушения, трещиноватость пород и их неблагоприятная пространственная ориентировка по отношению к откосам уступов и бортам карьеров являются основными причинами деформации, хотя и не исключаются случаи обрушения по поверхностям, разделяющим литологические разности горных пород.

В настоящее время большинство исследователей [10, 34, 75] считают, что трещины в горном массиве образуются от эндогенных процессов на первом этапе формирования массива пород, когда возникают эндокливаж, первые трещины отделимости и трещины усыхания; затем возникают трещины от экзогенных процессов как результат воздействия тектонических процессов на уже сформированный массив горных пород, а затем уже трещины выветривания, образовавшиеся в результате длительного воздействия на поверхности зоны земной коры

комплекса разнообразных факторов (холод, тепло, вода и т. д.) и трещины, образовавшиеся в процессе ведения горных работ. Группируя указанное применительно к решению поставленной задачи, нарушенность горного массива можно объединить в две группы: естественную (природную) и искусственную — вызванную деятельностью человека при ведении горных работ.

Большинство скальных пород формируется в недрах Земли в условиях сильного всестороннего сжатия, обусловленного силами тектоники и гравитации. Горные работы вызывают на свободной поверхности напряженного массива образование зон разгрузки, при этом потенциальная энергия расходуется на образование трещин, так как горные породы обладают малыми прочностными характеристиками на разрыв. Мощность таких зон разгрузки может достигать нескольких десятков метров. Трещины от воздействия взрывов развиваются по плоскостям ослаблений, уже сформированных в массиве.

Таким образом, массив горных пород разбит сетью трещин различного происхождения, трещины имеют разные длину, ширину, возраст и т. д. Изучение трещиноватости пород ведется для решения разного рода задач, в том числе и задач горного дела. Трещиноватость пород связана с прочностными и деформационными свойствами пород, следовательно, и с устойчивостью горных выработок. Все трещины большого протяжения, неблагоприятно ориентированные по отношению откосов уступов и бортов карьеров, практически можно рассматривать как поверхности скольжения [10, 77].

В комплекс работ по изучению трещиновой тектоники месторождения, разрабатываемого открытым способом, входят: полевые работы, состоящие из разбивки поверхности откоса уступа на замерные точки, замеров элементов залегания трещин и линейных элементов структурных блоков, образуемых трещинами, установления процентного соотношения структурных блоков на поверхности откоса уступа по классу крупности;

составление и обработка точечных диаграмм на основе данных полевых измерений;

построение участковых стереограмм систем трещин по каждой точке замера с помощью стереографических сеток;

обработка замеров трещиноватости методом математической статистики;

выделение из всех структурно-тектонических поверхностей ослабления наиболее неблагоприятно ориентированных относительно простирания уступов, т. е. таких систем, которые могут служить поверхностями скольжения;

построение структурных разрезов по уступам и бортам карьера;

составление карты трещиноватости по бортам карьера;



Таблица 19

Необходимое и достаточное число замеров элементов залегания систем трещин горных пород

Автор	Число замеров на одну систему трещин	Автор	Число замеров на одну систему трещин
Н. Н. Кузнец [30]	15—20	М. Л. Рудаков [80]	30—40
М. В. Рац [75]	50—60	Г. Л. Фисенко [99]	10—20

На участках карьеров, недоступных для непосредственных измерений, элементы залегания поверхностей ослабления могут быть определены с помощью наземной фотограмметрической съемки с последующей обработкой полученных фотоснимков на стереоавтографах. К настоящему времени этот перспективный метод выявления залегания поверхностей ослабления на карьерах не получил широкого распространения.

При производстве замеров элементов залегания поверхностей ослабления неизбежно возникает вопрос о необходимом и достаточном их числе. Число необходимых замеров при съемке связано со степенью изменчивости трещиноватости пород, наличием тектонических нарушений, количеством опасных для деформации откосов систем трещин и относительного его существуют различные мнения. Эти данные приведены в табл. 19.

Как видно из табл. 19, необходимое и достаточное число замеров, приходящихся на одну систему трещин, разными авторами рекомендуется принимать в широком диапазоне. Видимо, общее число замеров в точке необходимо находить произведением числа выявленных систем трещин на число замеров, характеризующих одну систему. Однако здесь возникает неопределенность, так как полностью системы трещин могут быть выявлены только в результате обработки замеров трещиноватости. Поэтому вопрос о необходимом и достаточном числе замеров трещиноватости в замерной точке остается открытым.

Протяженность точки замера определяется особенностями структурного строения месторождения. При наличии складок, разломов системы трещин меняют свою пространственную ориентировку по отношению к простиранию откосов уступа. Уступок уступа, ограниченный крупными дисъюнктивными или плюккативными нарушениями и имеющий в структурном отношении примерно одинаковый характер, может быть отнесен к одной замерной точке. Поскольку на каждой замерной точке наблюдается целый ряд систем трещин с выдержанными элементами залегания, то число единичных замеров, по нашим исследованиям, может колебаться от 10 до 60. Линейные вели-

чины участка откоса уступа при детальной съемке трещиноватости, объединенные в одну замерную точку, могут колебаться ны 70—80 м.

Одновременно со съемкой элементов залегания поверхностей ослабления следует вести замеры трещиноватости, объединенные в одну замерную точку, могут колебаться ны 70—80 м. Одновременно со съемкой элементов залегания поверхностей ослабления следует вести замеры трещиноватости, объединенные в одну замерную точку, могут колебаться ны 70—80 м.

### III. СПОСОБЫ ОБРАБОТКИ ЗАМЕРОВ ТРЕЩИНОВАТОСТИ ПОРОД

Наличие трещиноватости в горном массиве всегда неблагоприятно сказывается на устойчивости откосов, но наиболее опасными являются те трещины или другие поверхности ослабления, которые могут служить поверхностями для оползания или обрушения пород при ведении открытых горных работ. Для систематизации, обобщения данных полевых замеров, выделения из общей совокупности основного материала для решения поставленной задачи используются графоаналитические методы.

В некоторых случаях для точки замера строят диаграмму-розку, по которой можно проследить основные системы трещин и видеть их пространственное положение. По масштабу векторов можно судить о числе замеров по определению каждой системы. Но выделенные здесь системы трещин распределены только по азимуту простирания, в то время как углы их наклона различны. В этом основной недостаток такой диаграммы.

Обработка результатов съемки трещиноватости может быть произведена на круговых диаграммах с помощью сеток Вульфа, Каврайского, Вальтера — Шмидта, а также могут быть применены полярные ортографическая и стереографические сетки. Сетки Вульфа и Каврайского значительно искажают плоские соотношения, что делает их малоприменимыми для изучения трещиноватости горных пород. Наиболее удобны полярные ортографические и стереографические сетки. Их приращение равнозначно. На эти диаграммы наносятся результаты замеров и оконтуриваются системы трещин, а затем определяются их средний азимут простирания и угол наклона. Эти же данные могут быть показаны в изогониях. При пользовании диаграммами возникают затруднения в определении средних значений элементов залегания систем трещин, расположенных

близке к центру сетки, из-за разной величины площадей трапеций.

Наиболее наглядное представление о концентрации трещин в каждой замерной точке дают прямоугольные диаграммы, они лишены недостатков, относящихся к круговым диаграммам. Прямоугольная диаграмма представляет собой две взаимно перпендикулярные оси: по вертикальной откладывается угол наклона трещины, а по горизонтальной — азимут простирания (рис. 9, а, б).

Каждая трещина изображается на диаграмме точкой. Оконтуривание точек, относящихся к отдельным системам, производится путем их группирования в интервалах угла наклона и водится путем их группирования в интервалах угла наклона и азимута простирания, равных  $30^\circ$ . Средние значения элементов залегания каждой системы трещин определяются графически

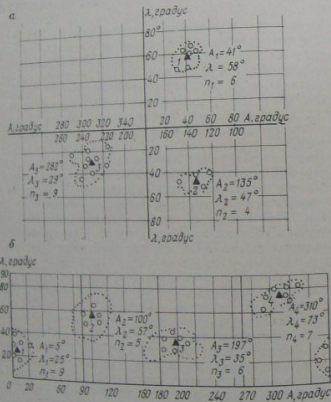


Рис. 9. Прямоугольные точечные диаграммы трещиноватости: а — гор. 620 м, точка № 47, длина замерной точки  $L = 50$  м, азимут простирания откоса уступа  $A_{уст} = 100^\circ$ , угол наклона откоса уступа  $\alpha_{уст} = 65^\circ$ ; б — гор. 920 м, точка № 8, длина замерной точки  $L = 70$  м, азимут простирания откоса уступа  $A_{уст} = 149^\circ$ , угол наклона откоса уступа  $\alpha_{уст} = 70^\circ$ .

как средневзвешенные путем последовательного нахождения их центра тяжести. В результате такой обработки на диаграмме четко выделяются преобладающие системы трещин, для которых определяются азимут простирания  $A_i$ , угол  $\lambda_i$  и устанавливается число замеров  $n_i$ .

Для обеспечения еще большей наглядности и установления количественной оценки структурно-тектонических особенностей горного массива прямоугольные точечные диаграммы могут быть видоизменены. На рис. 9, б приведена такая диаграмма. Она удобна для обработки систем трещин, объединенных в группы, пересекающие смежные квадраты.

Рассмотренные выше диаграммы позволяют судить о пространственной ориентировке систем трещин и преобладании той или иной системы в каждой замерной точке, но они не дают возможности в полной мере установить степень влияния выявленных систем на устойчивость уступов и бортов карьеров.

В работе [9] приводится классификация трещиноватости горных пород, согласно которой все трещины делятся на продольные, диагональные и поперечные. К продольным относятся трещины, если линия их пересечения с напластованием отклоняется от линии простирания напластования не более чем на  $20^\circ$ . К поперечным относятся трещины, когда линия их пересечения отклоняется от линии падения напластования не более чем на  $20^\circ$ . Все остальные трещины относятся к диагональным.

Для определения влияния трещиноватости пород и других ослабленных поверхностей на устойчивость уступов и бортов карьеров эту классификацию целесообразно несколько видоизменить и принять в следующем виде.

К продольным трещинам относятся такие, направление простирания (а не линии пересечения) которых отличается от направления простирания плоскости откоса не более чем на  $20^\circ$ . К диагональным трещинам относятся такие, направление простирания которых отличается от направления простирания плоскости откоса в пределах  $21^\circ - 70^\circ$ . Все остальные трещины относятся к поперечным.

По углу наклона трещины разделяют на пологие — с углом наклона менее  $30^\circ$ , наклонные — от  $30$  до  $60^\circ$  и крутые — от  $60$  до  $90^\circ$ .

Относительно плоскости откоса трещины разделяются на согласно падающие и несогласно падающие с откосом. Наиболее опасными с точки зрения устойчивости являются продольные и диагональные согласнопадающие с откосом уступа трещины [31, 50, 94]. Выделить эти системы трещин с помощью точечных и круговых диаграмм не представляется возможным. Для этого используются стереографические сетки Вульфа-Ламберта или Каврайского, на которых каждая система, выявленная с диаграмм, и элементы залегания плоскости откоса уступа

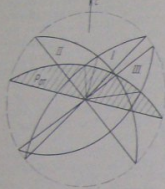


Рис. 10. Стереограмма:  $P_{от}$  — плоскость откоса уступа; I, II, III — системы трещин

0–180° сетки, представляющий собой след пересечения плоскости трещины с горизонтальной плоскостью сферы, т. е. линию простирания изображаемой системы. После этого проводится дуга по меридиану, соответствующему углу наклона системы. Эта кривая есть след пересечения данной системы трещин с поверхностью полусферы. Диаметр и дуга полностью определяют положение системы трещин в пространстве. В такой последовательности на участковую стереограмму наносятся все системы трещин и плоскость откоса уступа. Угол между линиями простирания системы трещин и линией простирания плоскости уступа определяется по меридиану сетки, по сетке же может быть определена и величина двугранного угла между выявленными системами трещин. По численным значениям этих углов производится классификация систем трещин и выявляется их степень опасности для устойчивости откосов.

Для обеспечения устойчивости уступов и бортов карьера в скальном трещиноватом массиве и прогнозирования структурно-тектонических особенностей пород на нескрытые горными работами горизонты предлагается новый метод обработки результатов замеров трещиноватости горных пород [50]. Суть его состоит в следующем.

Продольные, диагональные и поперечные согласно и несогласно падающие по отношению к откосам уступов системы трещин изображаются в виде классификационной круговой диаграммы, представляющей своего рода папку, изготовленную из прозрачного материала (рис. 11). По внешнему виду такая папка напоминает схему, предложенную в работе [35] для классификации основных типов геологических смещений (сбросов, взбросов, надвигов и т. д.), но качественно и своей

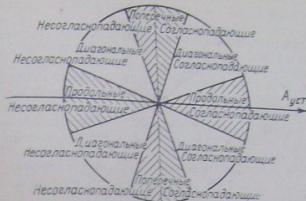


Рис. 11. Классификационная круговая диаграмма трещиноватости

целенаправленностью отличается от нее. Это не статическая схема, а динамическая модель.

Приложением к классификационной круговой диаграмме служит частотная диаграмма, изготовленная в виде секторного круга такого же диаметра. Все системы трещин, выявленные при обработке точечных диаграмм, группируются по азимутам простирания в выбранном интервале, например через 10°. Их частоты  $m_i$  проставляются в соответствующих интервальных секторах круга (рис. 12). При наложении круговой диаграммы трещиноватости на частотную, совместив их центры и используя принцип работы экспонетра, можно подсчитать частоты по отдельным видам трещин согласно принятой классификации, последовательно изменяя азимут простирания уступа через принятые интервалы.

Зная частоты появления трещин  $m_i$ , можно подсчитать их частоты по формуле

$$m_i^* = \frac{m_i}{n}, \quad (53)$$

где  $m_i^*$  — частота появления трещин в пределах заданного азимута простирания откоса уступа;  $n$  — общее число трещин, а затем построить азимутальные полигональные кривые распределения всех систем

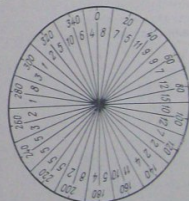


Рис. 12. Частотная круговая диаграмма трещиноватости пород (карьер Карагайлинский):  
0, 20, 40, ..., 360 — градусная шкала трещин в азимутальных интервалах;  
1, 2, 5, 10 — частоты появления систем трещин в азимутальных интервалах

с выделением из них продольных, диагональных и поперечных согласно- и несогласнопадающих трещин.

Для решения вопросов предупреждения оползневых явлений необходимо знать не только частоты появления тех или иных систем трещин по периметру карьера или на его отдельных участках, но и углы наклона трещин, особенно согласнопдающих продольных и диагональных систем, образующих призмы обрушения. Для того чтобы судить о крутизне таких трещин, следует составить интервальные ряды углов их наклона соответственно для каждого значения азимута простирания уступа. Частоты в этих рядах относятся не к отдельным значениям признака, а к средним интервалам, предсчитываемым по формуле

$$h_i = \frac{x_{\max} - x_{\min}}{1 + 3,2 \lg n} \quad (54)$$

где  $h_i$  — оптимальная величина интервала;  $x$  — значение признака;  $n$  — число единиц систем трещин.

Интервальные ряды углов наклона трещин могут быть представлены также в виде полигональных кривых.

#### И.4. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ТРЕЩИНОВАТОСТИ И ИХ ПРАКТИЧЕСКОЕ ПРИЛОЖЕНИЕ

Для того чтобы технически грамотно решать вопросы предупреждения и борьбы с оползневыми явлениями в условиях сложных структур, необходимо знать элементы залегания горных пород на любом участке карьера и степень их влияния на устойчивость уступов и бортов [40]. Наиболее представительны полигональные кривые, полученные на основании обработки данных замера трещиноватости пород, структурные разрезы по бортам карьеров и карты трещиноватости.

Ниже приводятся результаты исследований по некоторым карьерам Казахстана с целью детальной характеристики структурно-тектонических особенностей горного массива рассматриваемых месторождений.

На рис. 13 приведена полигональная кривая распределения всех си-

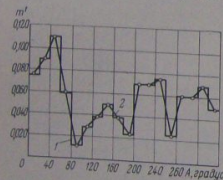


Рис. 13. Кривые распределения всех систем трещин по их азимутам простирания  $A$  на карьере Саяк-1:  
1 — гистограмма; 2 — полигональная кривая

стем трещин по их азимутам простирания  $A$  на карьере Саяк-1. Как видно из графика, на карьере наиболее развита трещиноватость пород с азимутами простирания в пределах 20—60, 140—160, 200—260 и 290—330°. Сопоставляя полученные данные с азимутами простирания откосов карьера, отдельно выделяются продольные и диагональные согласно залегания системы трещин, в сочетании образующие породные призмы возможного обрушения.

Данные по результатам съемки трещиноватости пород и последующей их обработки на карьере Саяк-1 приведены в табл. 20.

Как видно из приведенных данных, на месторождении преобладают диагональные и продольные трещины, т. е. наиболее

Таблица 20  
Распределение систем трещин по карьере Саяк-1

Тип трещин по классификации	Частота $m_i$	Частота $m_i'$
Продольные системы	37	0,255
Диагональные системы	82	0,565
Поперечные системы	26	0,180
<b>Всего</b>	<b>145</b>	<b>1,000</b>
Согласнопадающие	90	0,620
Несогласнопадающие	55	0,380
<b>Всего</b>	<b>145</b>	<b>1,000</b>
Продольные согласнопадающие	24	0,650
несогласнопадающие	13	0,350
<b>Всего</b>	<b>37</b>	<b>1,000</b>
Диагональные согласнопадающие	55	0,670
несогласнопадающие	27	0,330
<b>Всего</b>	<b>82</b>	<b>1,000</b>
Поперечные согласнопадающие	11	0,424
несогласнопадающие	15	0,576
<b>Всего</b>	<b>26</b>	<b>1,000</b>

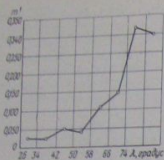


Рис. 14. Полигональная кривая углов наклона трещины на карьере Саяк-1

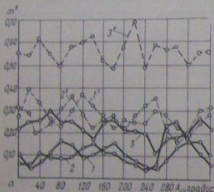


Рис. 15. Кривые распределения по азимуту простирания согласно падающих с откосами продольных (1, 2, 3) и диагональных (1', 2', 3') систем трещины по карьерам: 1, 1' — Объединенному; 2, 2' — Миллионному и 3, 3' — Карагайлинскому

углов их наклона позволяют в целом оценить структурно-тектонические особенности массива того или иного карьера. Для решения практических задач по прогнозированию наиболее опасных в оползневом отношении участков и принятия профилактических мер по предупреждению оползней и обрушений необходимо конкретизировать полученные общие данные.

На рис. 15 приведены кривые распределения продольных и диагональных согласно падающих с откосом трещин по карьерам Донского хромитового месторождения Объединенному и Карагайлинскому карьерам полиметаллического месторождения.

На всех карьерах диагональные трещины наблюдаются ча-

опасные с точки зрения устойчивости откосов уступов и бортов.

Распределение ослабленных поверхностей по их азимуту простирания в откосах уступов дает некоторое представление об устойчивости уступов, но чтобы решать конкретные задачи устойчивости откосов, необходимо еще знать углы наклона трещин.

На рис. 14 приведен интервальный ряд углов наклона опасных трещин по карьере Саяк-1, представленных в виде полигональной кривой, позволяющей судить о преобладающих углах наклона трещин на карьере. Как видно, подавляющее большинство систем трещин имеют углы наклона 70—80°, что благоприятно для устойчивости, поскольку они близки к углам наклона уступов, и заоткоску их можно вести на отдельных участках по этим плоскостям.

Приведенные полигональные кривые частостей появления трещин и оценить структурно-тектонические особенности массива того или иного карьера. Для решения практических задач по прогнозированию наиболее опасных в оползневом отношении участков и принятия профилактических мер по предупреждению оползней и обрушений необходимо конкретизировать полученные общие данные.

На рис. 15 приведены кривые распределения продольных и диагональных согласно падающих с откосом трещин по карьерам Донского хромитового месторождения Объединенному и Карагайлинскому карьерам полиметаллического месторождения.

На всех карьерах диагональные трещины наблюдаются ча-

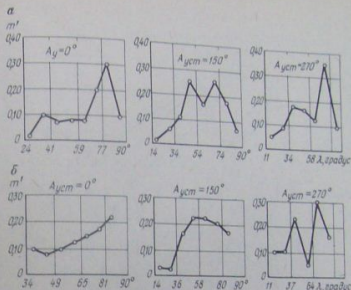


Рис. 16. Полигональные кривые углов наклона согласно падающих с откосами уступов систем трещин на карьере Карагайлинском: а — продольные системы; б — диагональные системы

ще, чем продольные, особенно ощутима эта разница на Карагайлинском карьере. Полигональные кривые углов наклона опасных трещин для участков с конкретными азимутами простирания уступов на этом карьере показаны на рис. 16.

Структурно-тектонические особенности горного массива по бортам карьера Саяк-1 характеризуются картой трещиноватости (рис. 17), а данные по выделенным участкам приведены в табл. 21.

На карте трещиноватости каждая система трещин изображается вектором в масштабе, показывающим направление азимута простирания системы трещин и число замеров, объединяющих эту систему, а цифра, стоящая рядом, указывает величину и направление угла падения пород.

По структурно-тектоническим особенностям горного массива на карьере Саяк-1 выделяется восемь участков и для каждого участка — от одной до трех наиболее опасных систем трещин, которые в основном определяют угол устойчивого откоса уступов и могут реализоваться работами.

Анализ полученных результатов исследований структурно-тектонических особенностей пород и пространственного положения ослабленных поверхностей по отношению к откосам уступов дает возможность установить, что первая система трещин

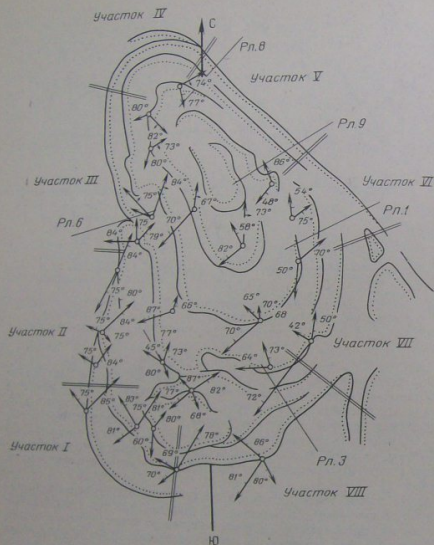


Рис. 17. Карта трещиноватости пород на карьере Саяк-1

наиболее опасна для западного борта, вторая и третья — для восточного. Размеры возможных клинообразных призм обрушения по выделенным участкам на площадках уступов могут быть в пределах  $r = 4 \div 10$  м.

Для оценки устойчивости бортов карьеров по структурно-тектоническим особенностям горного массива построенные карты трещиноватости должны сопровождаться структурными разрезами. С целью нанесения опасных систем трещин на струк-

Таблица 21  
Структурно-тектонические особенности особенности горного массива по участкам бортов карьера Саяк-1

Участок	Абсолют простирания уступа, градус	Элементы залегания систем трещин		Породы	Физико-механические характеристики пород			Расчетные параметры уступа	
		А, градус	А', градус		$\gamma \cdot 10^3$ , кг/м <sup>3</sup>	С', $10^3$ , Па	$\varphi'$ , градус	Угол откоса $\alpha$ , градус	Ширина призмы обрушения, м
I	344	309	78	Туфодiorит	2,70	6	16	90	10
		21	79						
II	24	326	84	Мраморы Туфоалеволиты	2,72	6	16	85	5
		11	81						
III	356	48	84	Мраморы	2,73	6	16	90	4
		39	78						
IV	70	313	75	Мраморы	2,73	6	16	80	6
		54	73						
V	123	180	80	Гранодиориты Гранатовые скарны	2,68	6	16	80	6
		150	67						
VI	200	192	60	Гранодиориты	2,69	6	16	70	6
		207	74						
VIII	250	209	83	Диориты Туфоалеволиты	2,72	6	16	80	6
		209	83						

турные разрезы необходимо знать углы их наклона в плоскости, перпендикулярной к откосу уступа. Для этого удобно использовать стереографические сетки Вульфа или Каврайского.

На рис. 18 представлен структурный разрез по участку борта карьера Объединенного. Такие структурные разрезы совместно с картой трещиноватости пород могут служить основанием для подбора и разработки расчетных методов по определению оптимальных параметров уступов и бортов карьера и позволяют решать задачи по рациональной отработке приконтурных лент и заоткоске стационарных уступов на проектной контуре.

Для прогнозирования структурных особенностей горного массива на еще не вскрытые горизонты и установления рациональных параметров горных работ полученный материал при съемке трещиноватости и замерам структурных блоков может быть обработан методами математической статистики и установлены корреляционные зависимости изменения углов наклона на согласно падающих с откосом систем трещин и величины структурных блоков от глубины залегания горных пород [54, 67]. При выполнении этих работ используется методика, изложенная в работах [13, 82].

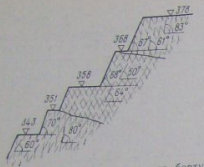


Рис. 18. Структурный разрез по борту карьера Объединенный

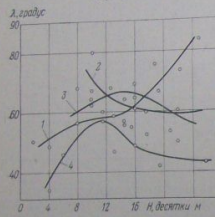


Рис. 19. Изменение углов наклона трещин с глубиной залегания пород по бортам Коурадского карьера: 1 — северный; 2 — южный; 3 — восточный; 4 — западный

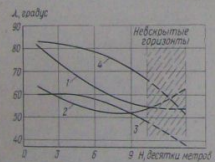


Рис. 20. Изменение углов падения продольных согласноподпадающих систем трещин на Карагайлинском карьере на участках простирания уступов: 1 — 0°; 2 — 180°; 3 — 240°; 4 — 300°

Изменение углов наклона согласноподпадающих систем трещин от глубины залегания пород по бортам Коурадского карьера представлено на рис. 19.

Средний угол наклона трещин по северному борту увеличивается с глубиной, в то время как по южному борту он имеет тенденцию к выполаживанию. Структурные особенности пород по северному борту благоприятствуют увеличению угла наклона уступов, уменьшению ширины площадок на уступах, а на южном — принятые в проекте параметры горных работ должны быть уточнены, поскольку откосы уступов будут иметь более крутой угол, чем согласно падающие с откосами системы трещин, и не исключены при ведении горных работ оползани и обрушения клинообразных приз.

По восточному борту карьера угол наклона трещин, равный 60—65°, почти совпадает с проектными углами наклона уступов на нижних горизонтах, заоткоска уступов по этим трещинам позволяет повысить устойчивость борта.

По западному борту наклон опасных систем трещин составляет 45—55°, поэтому уступы нижних горизонтов на проектном контуре следует укреплять.

Изменение углов наклона продольных согласноподпадающих с откосами систем трещин по бортам Карагай-

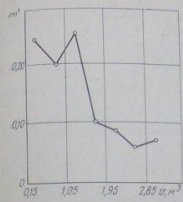


Рис. 21. Полигональная кривая распределения структурных блоков по бортам Коурадского карьера

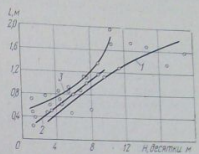


Рис. 22. Изменение размеров структурных блоков горных пород с глубиной их залегания на карьерах: 1 — Коурадский (м'), 2 — Сакки; 3 — Карагайлинский (м). Точки — групповые, средние ( $n_3 = 3-10$ )

линского карьера с прогнозированием на три нескрытых горизонта показано на рис. 20.

Исследованиями, приведенными в работе [31], установлено, что на угольных карьерах при условии сохранения элементов залегания пород трещиноватость по направлению простирания залежи также сохраняет свою ориентировку. На основании этого делается вывод о том, что данные по трещиноватости, полученные на небольших глубинах, можно экстраполировать на глубину до 300—400 м. Этот вопрос, по нашему мнению, является спорным. Согласно теории вероятностей и математической статистики будет более правильным экстраполирование производить на 1/3 интервала, в пределах которого установлена зависимость.

К настоящему времени нижние уступы Карагайлинского карьера вскрыты горными работами. Результаты замеров элементов трещиноватости подтверждают правильность ранее сделанного прогноза.

Методами математической статистики и корреляционного анализа может быть также произведена обработка замеров структурных блоков в зависимости от глубины залегания пород. Полигональная кривая распределения объема структурных блоков по частотам  $m'$  на Коурадском карьере представлена на рис. 21, а обобщающие результаты экспериментальных работ по бортам карьеров по определению изменения размеров структурных блоков в зависимости от глубины их залегания в недрах показаны на рис. 22.

Аналитическая зависимость изменения объема структурных блоков  $V$  от глубины залегания пород  $H$  для геологических условий Коунрадского карьера имеет вид

$$V = 0,21 + 0,18H - 0,004H^2 \quad (55)$$

при коэффициенте парной корреляции  $r_{\text{н}} = 0,65$  и корреляционному отношению  $\tau_0 = 0,78$ .

Эмпирическая зависимость изменения линейных размеров структурных блоков  $l_{\text{ср}}$  с глубиной залегания пород имеет вид: для Карагайлинского карьера

$$l_{\text{ср}} = 0,6 + 0,025H + 0,0125H^2, \quad (56)$$

для карьера Саяк-1:

$$l_{\text{ср}} = 0,1 + 0,12H \quad (57)$$

при  $r_{\text{н}} = 0,87 \pm 0,024$ ; здесь  $\eta = 36 \gg 2,6$  по Ляпунову.

Обеспечение устойчивости откосов уступов и бортов карьеров является одним из главных полезных вопросов горного дела. Увеличение удельного веса добычи полезных ископаемых открытым способом и разработка месторождений на больших глубинах в настоящее время требуют еще более обстоятельного решения вопросов предупреждения деформаций стационарных откосов во взаимосвязи со всеми влияющими факторами и в первую очередь со структурно-тектоническими особенностями горного массива. Иногда в целях сокращения объемов вскрышных работ при отстройке бортов в предельном контуре делают углы откосов круче, площадки на уступах меньше, чем возможно по условиям устойчивости горных пород. Это нарушает технологический процесс добычных и вскрышных работ, повышая опасные условия труда на нижних горизонтах. В то же время необоснованное занижение углов наклона откосов уступов и бортов карьеров приводит к значительному материальному ущербу за счет увеличения объема вскрышных работ и потерь полезного ископаемого. В связи с этим возникает необходимость в установлении максимальных углов наклона откосов устойчивых уступов и бортов карьеров, требующая детального изучения литологии месторождения, физико-механических свойств горных пород, трещиноватости и тектоники массива. Для обеспечения устойчивости откосов наиболее важным является выбор метода расчета углов наклона откосов уступов и бортов карьеров. Наличие в массиве горных пород поверхностей ослабления различного происхождения резко изменяет картину устойчивости откоса. Поэтому задачу устойчивости необходимо решать по-разному для изотропного и анизотропного массивов.

#### III.1. РАСЧЕТЫ УСТОЙЧИВОСТИ ОТКОСОВ В ИЗОТРОПНОЙ СРЕДЕ

К настоящему времени известно много методов расчета углов откосов в изотропной среде. Все методы расчета основываются на предельном равновесии сыпучей среды. При этом выделяют два подхода: в первом случае анализируются воз-

никающие напряжения, во втором — действующие силы. Методы первой группы более точны в математическом отношении, но в реальных геологических и горнотехнических условиях могут быть использованы в редких случаях. Дело в том, что метод предельного напряженного состояния строится откосом вогнутой формы с вертикальными стенками в верхней части, а это недопустимо по условиям безопасности. Кроме того, увеличен объем вскрышных работ на карьере. Данный метод используется в основном как критерий упрощенных в математическом отношении инженерных способов расчета устойчивости откосов.

Наиболее широкое применение получили методы второй группы, основанные на предельном равновесии по наиболее слабым поверхностям, положение которых устанавливают тем или иным способом. Эти методы просты в математическом отношении, дают достаточную для практики точность расчетов и рекомендованы к применению Госгортехнадзором СССР. К ним относятся: а) метод многоугольника сил; б) метод алгебраического сложения сил по круглоцилиндрической или монотонной криволинейной поверхности; в) комбинация методов алгебраического сложения сил и предельного напряженного состояния.

Метод круглоцилиндрической поверхности скольжения достаточно полно освещен в работах [37, 99]. Оценку устойчивости бортов карьеров с их известными параметрами в изотропной среде по этому способу производят через коэффициент устойчивости  $n_y$ , равный отношению сил, удерживающих призму возможного обрушения, к сдвигающим силам, по формуле

$$n_y = \frac{\lg \varphi \Sigma P_i \cos \delta_i + C l_i}{\Sigma P_i \sin \delta_i} \quad (58)$$

где  $\varphi$  и  $C$  — угол внутреннего трения и сцепление в массиве горных пород;  $P_i$  — масса элементарного вертикального блока призмы возможного обрушения;  $\delta_i$  — угол наклона элементарной площадки скольжения длиной  $l_i$ , служащей основанием элементарного блока.

Расчеты ведут по наиболее опасной поверхности скольжения. Если массив находится в допредельном состоянии, то всегда  $n_{y \min} > 1$ . При  $n_{y \min} = 1$  выполняется условие предельного равновесия по наиболее слабой поверхности скольжения. В работе [99] по результатам большого числа решений представлен график зависимости предельно устойчивой высоты откоса от угла его наклона для пород с любыми физико-механическими свойствами. Здесь по оси абсцисс отложены углы откоса, а по оси ординат — условная высота  $H' = \frac{H}{H_{90}}$ , где

$H$  — предельно устойчивая высота откоса. Если задан угол откоса  $\alpha$ , то по его значению и углу внутреннего трения  $\varphi$  на

графике находят величину  $H'$ , затем определяют  $H_{90}$ . Тогда истинное значение высоты

$$H = H' H_{90} \quad (59)$$

Если задана высота откоса  $H$ , а требуется определить предельно устойчивый угол откоса  $\alpha$ , то вычисляют  $H_{90}$  и  $H'$  по графику согласно  $H'$  находят значение угла.

Этот метод широко применяется в практике и дает результаты, наиболее близкие к действительности. Однако использование в формуле (59) величины  $H_{90}$  вызывает возражения. Общеизвестно, что прочностные свойства в массиве горных пород изменяются с глубиной. Породы на верхних горизонтах, находясь в зоне интенсивного выветривания, имеют сцепление, в несколько раз меньше, чем на нижних горизонтах. А в отвалах песчано-глинистых пород нижние слои в результате уплотняющей нагрузки имеют значительное сцепление, в то время как верхний рыхлый слой практически сцепления не имеет. В этих случаях  $H_{90}$  фактически близка к нулю, что и наблюдается на практике. Например, отвалы горных пород обычно не имеют вертикальных стенок отрыва. Но тогда согласно выражению (59) высота откоса должна равняться нулю, чего на самом деле нет. Откосы отвальных пород имеют значительную высоту, что никак не связано с отсутствием сцепления в породах верхнего слоя и, естественно, с  $H_{90}$ .

Все дело в том, что методика, приведенная в работе [99], предполагает использование в формуле для  $H_{90}$  усредненных физико-механических свойств горных пород всего массива по глубине. А если это так, тогда величина  $H_{90}$  теряет в некоторых случаях свой физический смысл как глубина возникновения площадок скольжения и становится обычным коэффициентом, который к тому же сложно вычислять. Практически оказывается, что для конкретных условий истинная величина  $H_{90}$ , вычисленная по физико-механическим свойствам пород верхних слоев, может быть в несколько раз меньше (а иногда и больше), чем условная  $H_{90}$ , используемая в формуле (59) и определяемая по средним значениям  $C$ ,  $\varphi$  и  $\gamma$ . В связи с этим нами предлагается вообще исключить из расчетов величину  $H_{90}$ , а известные графики [99]  $H' = f(\alpha, \varphi)$  интерпретировать как  $H_1 = F(\alpha, \varphi)$ , где  $H_1 = 2H' \operatorname{ctg} \left( 45^\circ - \frac{\varphi}{2} \right)$  (рис. 23). Тогда окончательно формула по определению высоты устойчивого откоса в общем виде будет записана как

$$H = \frac{C}{\gamma} H_1 \quad (60)$$

Отметим, что к подобному виду сведены решения по устойчивости откосов и других исследователей.

Уравнение (63) перепишем в виде

$$Z_i = Z_0 e^{\theta_i \operatorname{ctg} \mu} \quad (64)$$

Для определения значения начального радиуса-вектора  $Z_0$  воспользуемся рис. 24, из которого следует система уравнений:

$$\begin{cases} Z_n = \frac{H}{\sin \alpha} + \frac{BC}{\cos \alpha}; \\ Z_n = Z_0 e^{\frac{\pi(90^\circ - \alpha)}{180^\circ} \operatorname{ctg} \mu}; \\ Z_0 = BC (\operatorname{tg} \alpha + \operatorname{tg} \mu) + H_{90}, \end{cases} \quad (65)$$

где  $H_{90} = \frac{2C}{\gamma} \operatorname{ctg} \mu$  — высота упругого слоя пород.

После решения этой системы получим

$$Z_0 = \frac{H \cos(\alpha - \mu) - H_{90} \sin \mu}{e^k \cos(\alpha - \mu) - \sin \mu}, \quad (66)$$

где

$$k = \frac{\pi(90^\circ - \alpha)}{180^\circ} \operatorname{ctg} \left( 45^\circ - \frac{\varphi}{2} \right).$$

Представляется возможным аналитически найти зависимость предельной высоты устойчивого откоса от угла его наклона и физико-механических свойств горных пород с учетом напряженного состояния массива, основываясь на вышеприведенных положениях [107]. В общем случае коэффициент устойчивости призмы возможного обрушения  $ABDFE$

$$n_y = \frac{\operatorname{tg} \varphi (\Sigma P_i \cos \delta_i + P_2 \sin \mu) + C(\Sigma l_i + l)}{\Sigma P_i \sin \delta_i + P_2 \cos \mu} \quad (67)$$

где  $P_i$  — масса элементарного столбца в  $i$ -й точке криволинейного участка, кг;  $P_2$  — масса призмы  $ECDF$ , кг;  $l_i$  — длина элементарной  $i$ -й площадки, м;  $l$  — длина поверхности скольжения  $EF$ , м.

Нетрудно убедиться, что

$$\Sigma P_i \cos \delta_i = \gamma \int_0^{\theta} h_i \cos^2 \delta_i d\theta;$$

$$\Sigma P_i \sin \delta_i = \gamma \int_0^{\theta} h_i \sin 2\delta_i d\theta;$$

$$\Sigma l_i = \int_0^{\theta} \frac{Z_0 e^{k\theta}}{\sin \mu} d\theta;$$

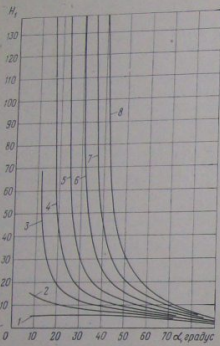


Рис. 23. График зависимости высоты плоского откоса от его угла наклона (по методике ВНИМИ):  
1 —  $\varphi=0^\circ$ ; 2 —  $\varphi=5^\circ$ ; 3 —  $\varphi=10^\circ$ ; 4 —  $\varphi=15^\circ$ ;  
5 —  $\varphi=20^\circ$ ; 6 —  $\varphi=25^\circ$ ; 7 —  $\varphi=30^\circ$ ; 8 —  $\varphi=35^\circ$

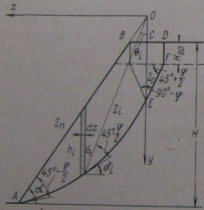


Рис. 24. Схема для вывода зависимости высоты откоса от его угла наклона при использовании поверхности скольжения в виде логарифмической спирали

Предлагаемые графики более удобны для практического их использования во всех случаях расчетов высоты устойчивого откоса.

Исследования, проведенные на моделях [21] в институте ВИОГЕМ, показали, что криволинейная часть потенциальной поверхности скольжения по форме близко совпадает с логарифмической спиралью (рис. 24), уравнение которой получается интегрированием выражения

$$\operatorname{tg} \left( 45^\circ - \frac{\varphi}{2} \right) = Z \frac{d\theta}{dz}, \quad (61)$$

где  $Z$  — радиус-вектор главного напряжения  $\sigma_1$ ;  $\theta_i$  — полярный угол между начальным радиусом-вектором  $Z_0$  и  $Z_i$  — вектором главного напряжения в  $i$ -й точке.

Угол  $\theta_i$  изменяется от 0 до  $(90^\circ - \alpha)$ . Угол наклона  $\delta_i$  в любой точке криволинейной части поверхности скольжения находится из выражения

$$\begin{aligned} \operatorname{tg} \delta_i &= \frac{dy}{dx} = \\ &= \operatorname{tg} \left[ \left( 45^\circ + \frac{\varphi}{2} \right) - \theta_i \right]. \end{aligned} \quad (62)$$

После интегрирования выражения (61) получаем

$$\ln Z = \frac{\theta}{\operatorname{tg} \mu} + \ln C, \quad (63)$$

где  $\mu = \left( 45^\circ - \frac{\varphi}{2} \right)$ ;

$\ln C$  — постоянная интегрирования, зависящая от параметров откоса и физико-механических свойств горных пород. Это есть не что иное, как  $Z_0$ .

$$I = \frac{(Z_0 - H_{90}) \cos \alpha}{\cos(\alpha - \mu)}; \quad P_2 = \frac{H_{90}^2 \cos \alpha \sin \varphi}{4 \cos(\alpha - \mu)} \times$$

$$\times \left( \frac{Z_0}{H_{90}} - 1 \right) \left[ \frac{Z_0}{H_{90}} + 1 - \frac{2 \left( \frac{Z_0}{H_{90}} - 1 \right) \sin \alpha \sin \mu}{\cos(\alpha - \mu)} \right] \gamma.$$

Подставив эти выражения в выражение (67) и приняв  $n_\gamma = 1$  (условие предельного равновесия), после математических преобразований получим уравнение высоты устойчивого откоса в виде

$$H = \frac{C}{\gamma} H_2, \quad (68)$$

где

$$H_2 = \frac{2 \cos \mu \sin \alpha}{\cos(\alpha - \mu)} \left\{ 1 + I \left[ e^k \frac{\cos(\alpha - \mu)}{\sin \mu} - 1 \right] \right\};$$

$$I = \frac{\left[ (e^k - 1) \frac{\cos(\alpha - \mu)}{\cos \alpha \cos \mu} + \frac{\cos(\alpha + \mu)}{\cos(\alpha - \mu)} \right] + \sqrt{(e^k - 1)^2 \frac{\cos^2(\alpha - \mu)}{\cos^2 \alpha \cos^2 \mu} - 2 \frac{\cos(\alpha + \mu)}{\cos \alpha} \left[ \frac{e^k - 1}{\cos \mu} + \frac{A}{\sin^2 \mu} \right]}}{\left[ \frac{2A \cos(\alpha - \mu)}{\cos \alpha \sin^2 \mu} + \frac{\cos(\alpha + \mu)}{\cos(\alpha - \mu)} \right]};$$

$$A = \frac{\cos \mu}{\cos \alpha} \left\{ \frac{e^{2k} \left[ \sin 2\alpha - \operatorname{tg} \mu \left( \sin \varphi - \frac{1}{2} \cos 2\alpha \right) \right] + \operatorname{tg} \mu \sin \alpha \left( \frac{1}{2} + \sin \varphi \right) - 2 \cos \alpha \left( \frac{1}{2} - \sin \varphi \right)}{5 + 3 \sin \varphi} \right.$$

$$\left. - \frac{e^{2k} (\sin 2\alpha + 1,5 \operatorname{tg} \mu \cos 2\alpha) + (\cos \alpha + 1,5 \operatorname{tg} \mu \sin \alpha)}{13 - 5 \sin \varphi} \right\}.$$

При  $\alpha = 90^\circ$  в выражении (74)  $H = H_{90}$ . Аналитическое выражение для  $H_2$  громоздко, поэтому оно было запрограммировано и решено на ЭВМ. По результатам вычислений построены рабочие графики для значений углов внутреннего трения  $\varphi$  от 0 до  $40^\circ$  и для углов откоса  $\alpha$  от 0 до  $90^\circ$  с интервалами  $2^\circ$  (рис. 25). Использование графиков позволяет быстро и точно определять высоту устойчивых откосов, значения которых хорошо согласуются с практикой.

Например, при  $C = 4 \cdot 10^5$  Па,  $\varphi = 26^\circ$ ,  $\gamma = 2,5 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup> и той методике [99]  $H = 300$  м. Расхождение составляет 6%. Сопоставительные расчетные данные по методу [99] и предлагаемому приведены в табл. 22, из которой видно, что при разности углов  $(\alpha - \varphi) > 10^\circ$   $H_2$  отличается от  $H_1$  на значительную величину. И только при  $(\alpha - \varphi) = 10^\circ$   $H_2$  практически в 2 раза больше, чем  $H_1$ . В этом случае трудно сказать, какой способ расчета более точен, так как при  $\alpha - \varphi \rightarrow 0$  обе величины  $H_1$  и  $H_2$  стремятся к бесконечности. Однако известно, что метод круглоцилиндрической поверхности скольжения дает завышенный коэффициент устойчивости откоса, а это значит соответственно — заниженное значение высоты. Поэтому предлагаемый аналитический расчет высоты устойчивого откоса в изотропной среде является математически обоснованным и вполне приемлемым для практики. В данном разделе необходимо упомянуть об эквивалентном угле наклона выпуклых и вогнутых откосов.

В практике обработки карьеров профили бортов бывают в основном плоскими, выпуклыми или вогнутыми (рис. 26). Для принятой глубины разработки плоский борт имеет конкретный и постоянный угол наклона. Выпуклые же и вогнутые борты имеют переменные углы, увеличивающиеся с глубиной для

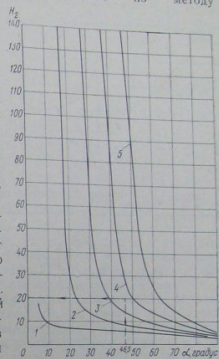


Рис. 25. График зависимости высоты плоского откоса от его угла наклона (по методике Карпи): 1 —  $\varphi = 0^\circ$ ; 2 —  $\varphi = 10^\circ$ ; 3 —  $\varphi = 20^\circ$ ; 4 —  $\varphi = 30^\circ$ ; 5 —  $\varphi = 40^\circ$ .

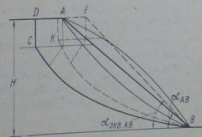


Рис. 26. Схема к выводу эквивалентного угла наклона выпуклых и вогнутых бортов карьера



вом скальных пород. Для откосов же значительной высоты, т. е. бортов карьеров, только единичные крупные тектонические нарушения и контакты слоев, соизмеримые с их высотой, могут представлять опасность. В общем случае трещиноватость ухудшает прочностные свойства горного массива. Так как прочностные характеристики по поверхностям ослаблений в несколько раз меньше, чем в массиве, то величина углов наклона откосов устойчивых уступов полностью зависит от пространственной ориентировки этих поверхностей ослаблений. Совершенно очевидно, что устойчивость откоса уступа в скальных породах складывается из устойчивости отдельных породных призм и пирамид, оконтуренных с одной стороны поверхностью откоса, а с другой — одной или несколькими поверхностями ослабления. Выявлено несколько видов деформации откосов, обусловленных сочетанием отдельных поверхностей ослабления:

1. Обрушение породной призмы по наклонной поверхности трещины, продольной или диагональной по отношению к откосу;
2. Вывал породной призмы по крутопадающей и подсекающей трещинам продольного и диагонального залегания;
3. Обрушение породного клина по двум сопряженным поверхностям ослабления, подрезанным откосом;
4. Вывал породной призмы по двум диагональным поверхностям ослабления;
5. Вывалы породных призм и пирамид, образованных не менее чем тремя основными системами трещин.

В зависимости от названных выше видов деформации массива скальных пород разработаны расчетные схемы по определению параметров устойчивых откосов в их предельном состоянии. Необходимо отметить, что задачу по нахождению этих параметров условно называют плоской, если линия простирания систем трещин параллельна или близка к параллельной линии простирания откоса. Такие задачи носят частный характер, потому что в скальных породах при наличии в массиве уступа нескольких систем трещин, различно ориентированных в пространстве, трудно отдать предпочтение той или иной системе при расчетах устойчивости откосов. Все они в равной мере могут служить поверхностями скольжения. В этом случае задачу устойчивости следует решать в объемном виде.

Ниже приведены схемы расчета устойчивости откосов в анізотропной среде с последующими математическими выкладками (табл. 23).

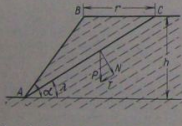


Рис. 27. Схема I к расчету устойчивости при подрезке уступом продольных поверхностей ослабления (к табл. 23)

Таблица 23  
Схемы расчета устойчивости откосов уступов и бортов карьеров в анізотропной среде

Номер схемы расчета	Способы заложения	Номера формул и рисунка	Условия применения схем
I	С подрезной поверхностью ослабления	(71), (72) 27	При пологом и наклонном залегании одной системы продольных поверхностей ослабления
II	а — положе поверхности ослабления; б — по схеме приложенного откоса	(84), (85), (86), (87) 29, а, б	При наклонном и крутом залегании одной системы продольных поверхностей ослабления
III	С подрезной поверхностью ослабления	(97), (98) 30	При пологом залегании одной системы диагональных поверхностей ослабления
IV	а — положе крутопадающей поверхности ослабления; б — параллельно крутопадающей поверхности ослабления	(105), (106), (107), (108) 31, а, б	При наличии в массиве уступа двух систем продольных трещин — пологого и крутого залегания
V	С подрезной поверхностью ослабления	(116), (117) 33	При пологом и наклонном залегании двух систем диагональных поверхностей ослабления
VI	а — положе линии скрещивания поверхностей ослабления; б — параллельно линии скрещивания положе	(134), (137), (140), (141) 35	При наклонном и крутом залегании двух систем диагональных поверхностей ослабления
VII	а — положе линии скрещивания крутопадающих поверхностей ослабления; б — параллельно поверхности ослабления	(155), (157), (158), (159) 36	При наличии в массиве уступа двух основных систем трещин — пологой и крутопадающей и диагональной крутопадающей
VIII	Положе крутопадающей поверхности ослабления, по крутопадающей	(163), (164) 37	При наличии в массиве уступа трех основных систем поверхностей ослабления — одной пологой, крутопадающей и двух диагональных крутопадающих

Примечание. В скобках — номера формул, в знаменателе — номера рисунков.

Схема 1 (рис. 27, табл. 23). При подрезке уступов наклонно падающих в сторону выемки контактов слоев горных пород условие предельного равновесия призмы возможного обрушения ABC по поверхности AC запишется согласно закону Кулона в виде

$$T = N \operatorname{tg} \varphi' + C' AC, \quad (70)$$

где

$$T = P \sin \lambda; \quad N = P \cos \lambda;$$

$P$  — масса призмы ABC,  $\tau$ ,  $C'$  и  $\varphi'$  — соответственно сцепление и угол трения горных пород по наиболее слабому контакту, Па и градус;  $\lambda$  — угол наклона контакта, градус.

Тогда высота устойчивого откоса определится как

$$h = \frac{2C' \cos \varphi' \sin \alpha}{\gamma \sin (\lambda - \varphi') \sin (\alpha - \lambda)}. \quad (71)$$

Нетрудно убедиться, что ширина призмы возможного обрушения, необходимая для определения размера предохранительных берм, не зависит от параметров  $h$  и  $\alpha$  и определяется из выражения

$$r = \frac{2C' \cos \varphi'}{\gamma \sin \lambda \sin (\lambda - \varphi')}. \quad (72)$$

Таким образом, обрушение породного блока ABC при нарушении устойчивости произойдет по контакту, удаленному от верхней бровки уступа на расстояние  $r$ . Неизвестные же параметры  $h$  и  $\alpha$  можно получить графически или аналитически из зависимости

$$h = \frac{r}{\operatorname{ctg} \lambda - \operatorname{ctg} \alpha}. \quad (73)$$

задаваясь одним из них.

Если известна высота откоса, то угол его наклона определяется выражением

$$\operatorname{ctg} \alpha = \operatorname{ctg} \lambda - \frac{2C' \cos \varphi'}{\gamma h \sin \lambda \sin (\lambda - \varphi')}. \quad (74)$$

Произведем некоторые исследования для установления наиболее опасного положения контактов слоев как поверхностей ослабления в массиве горных пород с точки зрения устойчивости откосов. В случае неравенства сил, удерживающих и сдвигающих призму возможного обрушения, их отношение дает коэффициент устойчивости

$$n_y = \operatorname{ctg} \lambda \operatorname{tg} \varphi' + \frac{2C' \sin \alpha}{\gamma h \sin (\alpha - \lambda) \sin \lambda}. \quad (75)$$

Значение для угла наклона контакта слоев, соответствующее минимальному значению коэффициента устойчивости, находится экстремальным способом при  $\frac{dn_y}{d\alpha} = 0$  из выражения (75)

$$\operatorname{ctg} \lambda_0 = \operatorname{ctg} \alpha + \frac{1}{\sin \alpha \sqrt{1 + \frac{\gamma h}{2C'} \operatorname{tg} \varphi'}}. \quad (76)$$

При подстановке  $\lambda_0$  из выражения (76) в выражение (75), когда  $n_{y \min} = 1$  (условие предельного равновесия), можно получить выражение для высоты устойчивого откоса  $h_{\min}$ , соответствующее наиболее опасному положению поверхности ослабления. Однако проще выражение для  $h_{\min}$  получить экстремальным способом из выражения (71), когда  $\frac{dh}{d\alpha} = 0$ . В этом случае

$$\lambda_0 = \frac{\alpha + \varphi'}{2}. \quad (77)$$

Подставив значение для  $\lambda_0$  из выражения (77) в формулу (71), получим

$$h_{\min} = \frac{2C' \cos \varphi' \sin \alpha}{\gamma \sin^2 \frac{\alpha - \varphi'}{2}}. \quad (78)$$

Следует отметить, что формула, подобная формуле (78), выведена П. М. Цимбаревичем [102] для изотропной среды в предположении, что призма возможного обрушения при нарушении предельного равновесия будет сдвигаться по плоской поверхности скольжения, проходящей через биссектрису угла, образованного углом наклона откоса  $\alpha$  и углом внутреннего трения пород в массиве  $\varphi$ . Вывод, сделанный в работе [102], имеет ограниченное применение, так как в изотропной среде обрушение пород по плоской поверхности скольжения может происходить только при крутых углах наклона откоса и небольшой его высоте. В этих случаях с достаточной для практических целей точностью можно заменить криволинейную поверхность скольжения AC (рис. 28) плоской, угол наклона которой равен  $\frac{\alpha + \varphi}{2}$ . В общем случае такое допущение приводит к завышению расчетной высоты устойчивого откоса.

Выражение (84) применимо для расчета  $h_{\min}$  во всех случаях подрезки откосом согласно падающих с ним

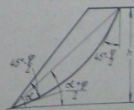


Рис. 28. Схема замены криволинейной поверхности скольжения плоской в сыпучей среде

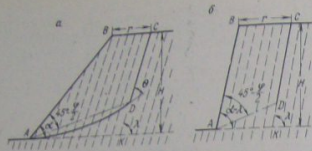


Рис. 29. Схема II заоткоски уступов:

*a* — подложке слоистости пород; *b* — параллельно слоистости (к табл. 23)

поверхностей ослабления. При этом в частном случае  $\lambda_0$  находится из выражения (77). Выражение (76) является общим для нахождения наиболее опасного положения поверхности ослабления в массиве. Действительно, подставляя  $h_{\min}$  из выражения (78) в выражение (76), получим выражение (77).

Минимальная высота устойчивого вертикального откоса ( $\alpha = 90^\circ$ ) может быть получена при падении контактов слоев под углом  $\lambda_0 = 45 + \frac{\varphi'}{2}$  согласно выражению (77). Это положение отмечено в работе [99]. При этом из выражения (78)

$$h_{b \min} = \frac{4C'}{\gamma} \operatorname{ctg} \left( 45^\circ - \frac{\varphi'}{2} \right). \quad (79)$$

Схема II (рис. 29, см. табл. 23). Если участок борта карьера сложен слоистыми породами крутого залегания в сторону выемки со слабыми прочностными характеристиками по контактам, то для предотвращения обрушений стремятся не подрезать эти слои более крутым откосом. Чаще всего угол наклона борта принимают меньшим, чем падение слоев, или равным ему.

Известно, что в изотропном массиве вектор главного напряжения изменяет свое положение от вертикального направления при бесконечном его удалении от откоса, выполаживаясь до угла наклона борта вблизи откоса. При определенных условиях, начиная с глубины  $H_0$ , в массиве возникают площадки скольжения, направленные под углом  $\left( 45^\circ - \frac{\varphi}{2} \right)$  к наибольшему главному напряжению. Совокупность таких площадок образует в массиве борта карьера поверхность скольжения криволинейной формы, по которой возможно обрушение.

Наличие контактов слоев крутого залегания как ослабляющего фактора изменяет картину распределения напряжений в массиве. На каком-то удалении от верхней бровки откоса  $r$

(см. рис. 29, *a*) направление главных напряжений совпадает с направлением слоистости, а так как силы сцепления по контактам слоев в несколько раз меньше, чем в массиве, естественно полагать, что один из контактов, например *CD*, будет служить потенциальной поверхностью скольжения. Все остальные контакты в приоткосной зоне пересекаются векторами главных напряжений и не являются поверхностями скольжения. Именно этим можно объяснить появлением на верхних площадках откосов, находящихся в предельном напряженном состоянии, трещины заколов, значительно удаленных от бровки.

В основании призма возможного обрушения имеет криволинейную форму с изломом в точке пересечения *K* с контактом *CK* под углом  $\theta'$  и выходящую в откос под углом  $\left( 45^\circ - \frac{\varphi'}{2} \right)$ .

Определим предельную высоту устойчивого уступа при его заоткоске положе наслоения, заменив в первом приближении криволинейную поверхность вкrest слоистости плоской поверхностью среза *AD*.

В общем случае призма *ABCD* давит на свое основание с силой *Q*, равной разности сдвигающих и удерживающих сил по контакту *CD*,

$$Q = P \sin \lambda - P \cos \lambda \operatorname{tg} \varphi' - C \overline{CD} = P \frac{\sin(\lambda - \varphi')}{\cos \varphi'} - C'CD. \quad (80)$$

При условии предельного равновесия сила *Q* должна уравниваться разностью удерживающих и сдвигающих сил по плоскости среза *AD*, т. е.

$$N \operatorname{tg} \varphi + CAD = T, \quad (81)$$

где  $N = Q \sin(\lambda - \alpha + \mu)$  — нормальная составляющая силы *Q* по плоскости среза *AD*;  $T = Q \cos(\lambda - \alpha + \mu)$  — сдвигающая сила по плоскости среза;  $C$  и  $\varphi$  — соответственно сцепление и угол внутреннего трения пород вкrest слоистости;  $\mu = \left( 45^\circ - \frac{\varphi}{2} \right)$ .

Совместное решение выражений (80) и (81) позволяет написать уравнение предельного равновесия в виде

$$P = \frac{\cos \varphi'}{\sin(\lambda - \varphi')} \left[ \frac{C \cos \varphi AD}{\sin(\mu - \lambda + \alpha)} + C'CD \right], \quad (82)$$

где

$$P = \frac{\gamma}{2 \sin(\lambda - \alpha + \mu)} \left[ 2rH \frac{\sin \mu \sin \lambda}{\sin \alpha} + H^2 \frac{\sin \mu \sin(\lambda - \alpha)}{\sin^2 \alpha} - r^2 \sin \lambda \sin(\alpha - \mu) \right];$$

$$AD = \frac{\sin \lambda}{\sin(\lambda - \alpha + \mu)} [r + H(\operatorname{ctg} \alpha - \operatorname{ctg} \lambda)];$$

$$CD = \frac{H \frac{\sin \mu}{\sin \alpha} - r \sin(\alpha - \mu)}{\sin(\lambda - \alpha + \mu)}$$

Анализ выражения (82) показал, что величины  $r$  и  $H$  связаны между собой параболической зависимостью. Поэтому расстояние  $r$  от верхней бровки откоса до наиболее напряженного контакта слоев  $CD$ , которому соответствует  $H$ , находим экстремальным способом. В результате из неявной функции (82), используя равенство  $\frac{dH}{dr} = 0$ , получаем

$$r = \frac{H \sin \mu}{\sin \alpha \sin(\alpha - \mu)} - \frac{\cos \varphi'}{\gamma \sin(\lambda - \varphi')} \times \left[ \frac{C \cos \varphi}{\sin(\alpha - \mu) \sin(\mu - \lambda + \alpha)} - \frac{C'}{\sin \lambda} \right]. \quad (83)$$

Подставляя выражение для  $r$  из формул (83) в (82), получаем

$$H = A(1 + \sqrt{1 - B}). \quad (84)$$

где

$$A = \frac{2C \cos \mu \cos \varphi' \sin \alpha}{\gamma \sin(\lambda - \varphi') \sin(\mu - \lambda + \alpha)};$$

$$B = \frac{\sin \lambda \sin \mu}{\sin \alpha \sin(\lambda - \alpha + \mu)} \left[ 1 - \frac{C' \sin(\alpha - \mu) \sin(\mu - \lambda + \alpha)}{C \cos \varphi \sin \lambda} \right]^2.$$

Через те же обозначения независимо от  $H$

$$r = \frac{\sin \mu A \sqrt{1 - B}}{\sin \alpha \sin(\alpha - \mu)} + \frac{C' \cos \varphi'}{\gamma \sin \lambda \sin(\lambda - \varphi')}. \quad (85)$$

При заоткоске борта карьера по наслоению ( $\alpha = \lambda$ ) (см. рис. 29)

$$H = \frac{H_{90}}{(1 - \text{ctg } \lambda \text{ tg } \varphi')} \left\{ 1 + \sqrt{1 - \left[ 1 - \frac{C'}{2C} (1 - \text{ctg } \lambda \text{ tg } \mu) \right]^2} \right\}. \quad (86)$$

где

$$H_{90} = \frac{2C}{\gamma} \text{ctg } \mu,$$

а ширина призмы возможного обрушения

$$r = \frac{\cos \varphi'}{\gamma \sin(\lambda - \varphi')} \left\{ \frac{2C \cos \mu}{\sin(\lambda - \mu)} \sqrt{1 - \left[ 1 - \frac{C'}{2C} (1 - \text{ctg } \lambda \text{ tg } \mu) \right]^2} + \frac{C'}{\sin \lambda} \right\}. \quad (87)$$

В том случае, когда величина сцепления по контактам слоев близка к нулю и ею можно пренебречь, высота устойчивого откоса

$$H_{\min} = A \left[ 1 + \sqrt{\frac{\sin(\lambda - \alpha) \sin(\alpha - \mu)}{\sin \alpha \sin(\lambda - \alpha + \mu)}} \right], \quad (88)$$

а при  $\alpha = \lambda$

$$H_{\min} = \frac{H_{90}}{1 - \text{ctg } \alpha \text{ tg } \varphi'}. \quad (89)$$

Выражение (89) идентично формуле (154) из работы [99].

Ширину призмы возможного обрушения  $r$  по данным расчетным схемам можно свести к минимуму. Для этого правую часть равенства (83) приравняем к нулю. Тогда при заоткоске борта карьера положе контактов слоев

$$H_{\min} = \frac{\cos \varphi' \sin \alpha}{\gamma \sin(\lambda - \varphi')} \left[ \frac{2C \cos \mu}{\sin(\mu - \lambda + \alpha)} - \frac{C' \sin(\alpha - \mu)}{\sin \lambda \sin \mu} \right], \quad (90)$$

а при  $\alpha = \lambda$

$$H_{\min} = \frac{H_{90}}{(1 - \text{ctg } \lambda \text{ tg } \varphi')} \left[ 1 - \frac{C'}{2C} (1 - \text{ctg } \lambda \text{ tg } \mu) \right]. \quad (91)$$

Использование расчетных формул (90) и (91) позволяет определять ширину предохранительных берм без учета ширины призмы возможного обрушения.

Схема III (рис. 30, см. табл. 23). Когда поверхности ослаблений в массиве борта карьера (контакты слоев, тектонические трещины, трещины отдельности большого протяжения) расположены диагонально по отношению к откосу и подрезаны им, возможны обрушение блоков породы на бермы различного назначения, а также разрушение самих берм. Чем меньше угол разворота поверхностей ослабления относительно откоса, тем больше вероятность обрушения участка борта или отдельного уступа. Рассмотрим устойчивость подобных блоков породы, определяющих устойчивость откоса. Призма возможного обрушения околнута с одной стороны поверхностью откоса, а с другой — поверхностями трещины и отрыва в массиве. При нарушении равновесия сдвигание призмы произойдет по линии скрепления поверхностей.

Если ориентация трещины легко выявляется съемкой трещиноватос-

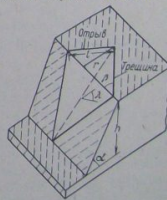


Рис. 30. Схема III для случая подрезки уступом системы диагональных трещин (к табл. 23)

ти, то расположение поверхности отрыва в массиве в общем случае неопределенно. Однако нет сомнения, что эта поверхность должна быть вертикальной для уменьшения по ней удерживающих сил. Расположение же поверхности отрыва в плане различные исследователи принимают по-разному. Некоторые [100] считают, что отрыв возможен только по сечению, составленному с линией простирания трещины угол более  $90^\circ$ , другому с линией между линией простирания откоса и линией отрыва равным  $90^\circ$ . По нашему мнению [59], ориентация поверхности отрыва в массиве должна определяться из принципа наибольшей ее несущей способности. Именно там, где поверхность отрыва несет наибольшую нагрузку, и будет происходить наиболее вероятный отрыв в массиве. Поверхность должна быть вертикальной.

Устойчивость призмы возможного обрушения определяется зависимостями:

$$\begin{aligned} P_1 \sin \psi &= P_1 \cos \psi \operatorname{tg} \varphi + CS_{\text{отр}}; \\ P_2 \sin \psi &= P_2 \cos \psi \operatorname{tg} \varphi' + C'S_{\text{тр}}, \end{aligned} \quad (92)$$

где  $P_1 + P_2 = P$ .

Здесь  $P$  — масса призмы обрушения, кг;  $P_1$  и  $P_2$  — части массы призмы, удерживаемые соответственно поверхностью отрыва и трещиной, кг;  $\psi$  — угол наклона линии скрещивания поверхностей, градус;  $S_{\text{отр}}$  и  $S_{\text{тр}}$  — соответственно площади поверхностей отрыва и трещины,  $\text{м}^2$ .

Согласно зависимостям (92)

$$P_1 = \frac{CS_{\text{отр}} \cos \varphi}{\sin(\psi - \varphi)}; \quad P_2 = \frac{C'S_{\text{тр}} \cos \varphi'}{\sin(\psi - \varphi')}.$$

Тогда

$$P = \frac{CS_{\text{отр}} \cos \varphi}{\sin(\psi - \varphi)} + \frac{C'S_{\text{тр}} \cos \varphi'}{\sin(\psi - \varphi')}. \quad (93)$$

Выразим значения  $P$ ,  $S_{\text{отр}}$  и  $S_{\text{тр}}$  через длину поверхности отрыва в плане  $l$

$$P = \frac{\gamma h^2 \sin \theta \sin [180^\circ - (\beta + \theta)]}{6 \sin \beta};$$

$$S_{\text{отр}} = \frac{lh}{2}; \quad S_{\text{тр}} = \frac{lh \sin \theta}{2 \sin \lambda \sin \beta}.$$

где  $h$  — высота откоса, м;  $\beta$  — угол разворота трещины по отношению к откосу в плане (определяется как разность азимутов линии простирания трещины и откоса), градус;  $\theta$  — угол разворота поверхности отрыва по отношению к откосу в плане, градус.

Условная несущая способность поверхности отрыва будет определяться отношением  $\frac{P}{S_{\text{отр}}}$ . Эта величина связана с углом

$\theta$  параболической зависимостью. Производная этой зависимости  $\frac{d \frac{P}{S_{\text{отр}}}}{d \theta} = \frac{\gamma l}{3 \sin \beta} \sin(180^\circ - \beta - 2\theta)$ . Вторая производная меньше нуля, значит, здесь имеет место максимум функции. Экстремальное значение найдем при  $\sin(180^\circ - \beta - 2\theta) = 0$ . Отсюда следует, что угол

$$\theta = 90^\circ - \frac{\beta}{2}. \quad (94)$$

Подставим значение угла  $\theta$  из выражения (94) в уравнение равновесия (93) с учетом  $P$ ,  $S_{\text{отр}}$  и  $S_{\text{тр}}$ , откуда найдем

$$l = \frac{3}{\gamma \cos \frac{\beta}{2}} \left[ \frac{2C \cos \varphi \sin \frac{\beta}{2}}{\sin(\psi - \varphi)} + \frac{C' \cos \varphi'}{\sin \lambda \sin(\psi - \varphi')} \right]. \quad (95)$$

Геометрически через высоту откоса  $h$

$$l = \frac{h}{\cos \frac{\beta}{2}} (\operatorname{ctg} \psi' - \operatorname{ctg} \alpha), \quad (96)$$

где  $\psi'$  — угол наклона линии скрещивания поверхностей в плоскости, перпендикулярной к откосу, градус.

Совместное решение выражений (95) и (96) после соответствующих преобразований дает предельную высоту устойчивого откоса в аналитической форме

$$h = \frac{3 \sqrt{\cos^2 \frac{\beta}{2} + \operatorname{ctg}^2 \lambda}}{\gamma (\operatorname{ctg} \lambda - \operatorname{ctg} \alpha)} \left[ \frac{2C \sin \frac{\beta}{2}}{\cos \frac{\beta}{2} - \operatorname{ctg} \lambda \operatorname{tg} \varphi} + \frac{C'}{\sin \lambda (\cos \frac{\beta}{2} - \operatorname{ctg} \lambda \operatorname{tg} \varphi')} \right]. \quad (97)$$

Ширина призмы возможного обрушения

$$r = h (\operatorname{ctg} \lambda - \operatorname{ctg} \alpha). \quad (98)$$

Схема IV (рис. 31, см. табл. 23). Если массив горных пород расчленяют две системы продольных трещин, согласно падающему с откосом уступу (одна подоглапающая, а другая — крущая с откосом уступа) (одна расчетной схемой является топадающая, рис. 32, а), то общей расчетной схемой является такая, в которой угол откоса не равен углу наклона ни одной

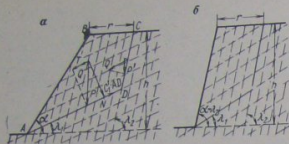


Рис. 31. Схема IV заоткоски уступов: а — положение системы продольных крутопадающих трещин; б — параллельно системе трещин (к табл. 23)

из трещин. Призма возможного обрушения  $ABCD$  находится в равновесии за счет удерживающих сил по крутопадающей поверхности ослабления  $CD$  и подсекающей поверхности  $AD$  [53]. Прочностные характеристики по этим поверхностям ослабления в общем случае различны. Породный блок  $ABCD$  стремится сдвинуться по направлению пологопадающей трещины и действует на поверхность  $CD$  с силой

$$Q = P \sin \lambda_1 - P \cos \lambda_1 \operatorname{tg} \varphi_1' - C_1' AD = P \frac{\sin(\lambda_1 - \varphi_1')}{\cos \varphi_1'} - C_1' AD, \quad (99)$$

где  $P$  — масса призмы возможного обрушения  $ABCD$ , кг;  $\lambda_1$  — угол наклона пологопадающей трещины, градус;  $\varphi_1'$  и  $C_1'$  — соответственно угол внутреннего трения и сцепление по пологопадающей трещине, градус и Па.

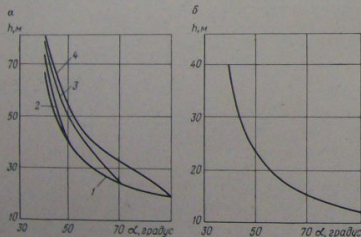


Рис. 32. Зависимость высоты устойчивого уступа от угла наклона откоса для условий Карагайлинского карьера: а — при наличии бермы обрушения; б — при ее отсутствии; 1 —  $\lambda_1 = \alpha$ ; 2 —  $\lambda_1 = 60^\circ$ ; 3 —  $\lambda_1 = 70^\circ$ ; 4 —  $\lambda_1 = 90^\circ$

Проектируя силу  $Q$  на крутопадающую трещину, найдем ее сдвигающую составляющую

$$T_{CD} = Q \cos(\lambda_2 - \lambda_1),$$

где  $\lambda_2$  — угол наклона крутопадающей трещины, градус.

Сдвиг по крутопадающей трещине происходит под действием силы, обусловленной массой  $P'$ , которая является частью общей массы призмы возможного обрушения и эквивалентна силе  $Q$ . Не определяя непосредственно массу  $P'$ , найдем нормальную составляющую ее  $N_{CD}$  через  $T_{CD}$  как

$$N_{CD} = T_{CD} \operatorname{ctg} \lambda_2 = Q \cos(\lambda_2 - \lambda_1) \operatorname{ctg} \lambda_2.$$

При этом выдерживается соотношение между нормальной и сдвигающей составляющими сил по крутопадающей трещине  $\operatorname{ctg} \lambda_2$ . Тогда условие равновесия породного блока по крутопадающей трещине запишется в виде  $Q \cos(\lambda_2 - \lambda_1) = Q \cos(\lambda_2 - \lambda_1) \operatorname{ctg} \lambda_2 \operatorname{tg} \varphi_2' + C_2' CD$ .

Откуда

$$Q = \frac{C_2' CD \sin \lambda_2 \cos \varphi_2'}{\cos(\lambda_2 - \lambda_1) \sin(\lambda_2 - \varphi_2')}, \quad (100)$$

где  $\varphi_2'$  и  $C_2'$  — угол внутреннего трения и сцепление по крутопадающей трещине, градус и Па.

Объединяя выражения (99) и (100), окончательно запишем уравнение предельного равновесия

$$P \frac{\sin(\lambda_1 - \varphi_1')}{\cos \varphi_1'} - C_1' AD = \frac{C_2' CD \sin \lambda_2 \cos \varphi_2'}{\cos(\lambda_2 - \lambda_1) \sin(\lambda_2 - \varphi_2')}. \quad (101)$$

Выразим линейные элементы  $CD$  и  $AD$ , а также массу призмы возможного обрушения через высоту откоса  $h$  и ширину призмы  $r$  по формулам:

$$\begin{cases} CD = \frac{h(\operatorname{ctg} \lambda_1 - \operatorname{ctg} \alpha) - r}{\sin \lambda_2 (\operatorname{ctg} \lambda_1 - \operatorname{ctg} \lambda_2)}; \\ AD = \frac{r + h(\operatorname{ctg} \alpha - \operatorname{ctg} \lambda_2)}{\sin \lambda_1 (\operatorname{ctg} \lambda_1 - \operatorname{ctg} \lambda_2)}; \\ P = \frac{2rh(\operatorname{ctg} \lambda_1 - \operatorname{ctg} \alpha) + h^2(\operatorname{ctg} \alpha - \operatorname{ctg} \lambda_2)(\operatorname{ctg} \lambda_1 - \operatorname{ctg} \alpha) - r^2}{2(\operatorname{ctg} \lambda_1 - \operatorname{ctg} \lambda_2)} \gamma. \end{cases} \quad (102)$$

Подставив выражения из формул (102) в уравнение (101), получим квадратное уравнение с двумя неизвестными  $h$  и  $r$

$$ah^3 + (br - k)h - (fr^2 + er) = 0, \quad (103)$$

где

$$a = \frac{\gamma \sin(\lambda_1 - \varphi_1') (\operatorname{ctg} \lambda_1 - \operatorname{ctg} \lambda_2) (\operatorname{ctg} \lambda_1 - \operatorname{ctg} \alpha)}{2 \cos \varphi_1'};$$

$$b = \frac{\gamma \sin(\lambda_1 - \varphi_1') (\operatorname{ctg} \lambda_1 - \operatorname{ctg} \alpha)}{\cos \varphi_1'};$$

$$k = \frac{C_1' (\operatorname{ctg} \alpha - \operatorname{ctg} \lambda_2)}{\sin \lambda_1} + \frac{C_2' \cos \varphi_2' (\operatorname{ctg} \lambda_1 - \operatorname{ctg} \alpha)}{\cos(\lambda_2 - \lambda_1) \sin(\lambda_2 - \varphi_2')};$$

$$f = \frac{\gamma \sin(\lambda_1 - \varphi_1')}{2 \cos \varphi_1'}; \quad e = \frac{C_1'}{\sin \lambda_1} - \frac{C_2' \cos \varphi_2'}{\cos(\lambda_2 - \lambda_1) \sin(\lambda_2 - \varphi_2')}.$$

Отсюда следует, что решение задачи устойчивости призмы возможного обрушения является неопределенным, так как единственному условию равновесия соответствуют два неизменных: 1) неизвестно, по какой из пологопадающих трещин произойдет сдвиг породного блока, что определяет высоту откоса; 2) неизвестно, по какой из крутопадающих трещин произойдет отрыв блока, что определяет ширину призмы по верхней площадке. В то же время  $h$  и  $r$  связаны между собой параболической зависимостью. Это позволяет, используя экстремальный способ, найти такое значение для  $r$ , которое соответствует минимальной высоте откоса  $h_{\min}$  для данной расчетной схемы. Из выражения (103) при  $\frac{dh}{dr} = 0$

$$r = \frac{bh - e}{2f}. \quad (104)$$

Подставив полученное выражение для  $r$  в общее уравнение (103) и решив последнее относительно высоты устойчивого откоса  $h$ , получим

$$h = \frac{C_1'}{\gamma} d \left[ 1 + \sqrt{1 - m \left( 1 - \frac{C_2'}{C_1'} n \right)^2} \right], \quad (105)$$

где

$$d = \frac{\cos \varphi_1' \sin \alpha}{\sin(\lambda_1 - \varphi_1') \sin(\alpha - \lambda_1)};$$

$$m = \frac{\operatorname{ctg} \lambda_1 - \operatorname{ctg} \alpha}{\operatorname{ctg} \lambda_1 - \operatorname{ctg} \lambda_2};$$

$$n = \frac{\sin \lambda_1 \cos \varphi_2'}{\cos(\lambda_2 - \lambda_1) \sin(\lambda_2 - \varphi_2')}.$$

Ширина призмы возможного обрушения

$$r = \frac{C_1'}{\gamma} (\operatorname{ctg} \lambda_1 - \operatorname{ctg} \alpha) \left[ \frac{C_2'}{C_1'} n + \sqrt{1 - m \left( 1 - \frac{C_2'}{C_1'} n \right)^2} \right]. \quad (106)$$

Расчетная схема заточки параллельно крутопадающим трещинам (см. рис. 32, б) непосредственно вытекает из предыдущей схемы, когда угол наклона уступа  $\alpha$  равен углу наклона крутопадающей трещины  $\lambda_2$ . В этом случае высота устойчивого откоса

$$h = \frac{C_1'}{\gamma} d' \left[ 1 + \sqrt{1 - \left( 1 - \frac{C_2'}{C_1'} n \right)^2} \right], \quad (107)$$

где

$$d' = \frac{\cos \varphi_1' \sin \lambda_2}{\sin(\lambda_1 - \varphi_1') \sin(\lambda_2 - \lambda_1)},$$

а ширина призмы возможного обрушения

$$r = \frac{C_1'}{\gamma} (\operatorname{ctg} \lambda_1 - \operatorname{ctg} \alpha) \left[ \frac{C_2'}{C_1'} n + \sqrt{1 - \left( 1 - \frac{C_2'}{C_1'} n \right)^2} \right]. \quad (108)$$

Как видно, вышеприведенные расчеты параметров устойчивых откосов не учитывают интенсивности трещиноватости горных пород. Может возникнуть вопрос: совпадает ли расчетная поверхность скольжения с поверхностью одной из трещин или при относительно малой интенсивности может пройти между трещинами по массиву, где прочностные характеристики горных пород в несколько раз больше, чем по трещинам? Расстояние между трещинами обычно не превышает 2–3 м.

Погрешности же определения  $h$  и  $r$  в несколько раз больше. Например, согласно выражению (106) при  $C_1 = (6 \div 10) \times 10^4$  Па;  $C_2 = (1 \div 3) 10^4$  Па;  $\gamma = (1,5 \div 3,5) 10^3$  кг/м<sup>3</sup>;  $\varphi_{1,2} = 15 \div 25^\circ$ ;  $\lambda_1 = 30 \div 50^\circ$ ;  $\lambda_2 = 50 \div 90^\circ$  среднее значение высоты устойчивого откоса  $h = 28,9$  м, а погрешности ее определения  $m_h = \pm 6,5$  м, если частные погрешности составляют  $m_{C_1} = \pm 1 \cdot 10^4$  Па;  $m_{C_2} = \pm 10$  кг/м<sup>3</sup>;  $m_{\varphi_1} = \pm 3^\circ$ ;  $m_{\varphi_2} = \pm 3^\circ$ . Таким образом, несомненно, что потенциальная поверхность скольжения совпадает с поверхностью одной из трещин.

На рис. 32, а представлены графики зависимости  $h = f(\alpha, \lambda)$  для условий Карагайлинского карьера, где

$$C_1' = 8 \cdot 10^4 \text{ Па}; \quad C_2' = 1 \cdot 10^4 \text{ Па}; \quad \gamma = 2,72 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3; \quad \varphi_1' = \varphi_2' = 16^\circ; \quad \lambda_1 = 30^\circ; \quad \lambda_2 = 60 \div 90^\circ. \text{ Графики показывают, что с увели-$$

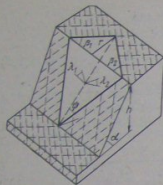


Рис. 33. Схема V для случая подрезки уступом двух систем диагональных трещин (к табл. 23)

чением углов наклона откоса высоты устойчивого уступа закономерно уменьшается. Для этого участка возможно сдвигание 15-метровых уступов на проектном контуре с углом наклона  $\alpha = 60^\circ$ .

При расчете предохранительных берм для исключения влияния ширины призмы возможного обрушения примем в выражении (104)  $r=0$  и найдем соответствующее ему значение  $h$  по формуле

$$h = \frac{d}{\gamma} (C_1' - C_2'n), \quad (109)$$

а при  $\alpha = \lambda_2$  (заоткоска уступа параллельна крутопадающим трещинам)

$$h = \frac{d'}{\gamma} (C_1' - C_2'n). \quad (110)$$

Для того же участка борта Карагайлинского карьера на рис. 32, б [58] построен график зависимости  $h=f(\alpha)$  при  $r=0$ . В этом случае 30-метровый уступ на проектном контуре может быть отстроен под углом  $\alpha = 43^\circ$ .

Схема V (рис. 33, см. табл. 23). При подрезке уступом двух систем диагональных трещин, согласно падающих с откосом, возможное сдвигание породной пирамиды будет происходить по линии скрещивания поверхностей скольжения. В общем случае прочностные характеристики по поверхностям трещин различны ( $C_1, \phi_1$  и  $C_2, \phi_2$  — сцепление и угол внутреннего трения по I и II поверхностям).

Так как площади поверхностей скольжения  $S_1$  и  $S_2$  и удерживающие силы по ним различны по величине, то каждая грань породной пирамиды, прилегающая к массиву, способна удержать определенную массу  $P_1$  или  $P_2$ . При этом должно соблюдаться условие, что полная масса пирамиды возможного обрушения  $P = P_1 + P_2$ .

Надо полагать, что устойчивость или неустойчивость породного блока будет определяться выражениями следующего вида:

$$\begin{cases} P_1 \sin \psi < P_1 \cos \psi \operatorname{tg} \phi_1' + C_1 S_1; \\ P_2 \sin \psi < P_2 \cos \psi \operatorname{tg} \phi_2' + C_2 S_2, \end{cases} \quad (111)$$

где  $\psi$  — угол наклона линии скрещивания поверхностей.

Принимая коэффициент устойчивости  $n_\gamma$  равным отношению сил, удерживающих блок, к сдвигающим, запишем, что, согласно выражениям (111),

$$n_\gamma = \frac{(P_1 \operatorname{tg} \phi_1' + P_2 \operatorname{tg} \phi_2') \cos \psi + C_1' S_1 + C_2' S_2}{P \sin \psi}. \quad (112)$$

Определив несущую способность поверхностей скольжения из выражений

$$P_1 = \frac{C_1' S_1 \cos \phi_1'}{\sin(\psi - \phi_1')} \quad \text{и} \quad P_2 = \frac{C_2' S_2 \cos \phi_2'}{\sin(\psi - \phi_2')}$$

и подставив эти значения в выражение (112), получим

$$n_\gamma = \frac{1}{P} \left[ \frac{C_1' S_1 \cos \phi_1'}{\sin(\psi - \phi_1')} + \frac{C_2' S_2 \cos \phi_2'}{\sin(\psi - \phi_2')} \right]. \quad (113)$$

Предполагая  $n_\gamma = 1$  (условие предельного равновесия), преобразуем выражение (113) в выражение

$$P = \frac{C_1' S_1 \cos \phi_1'}{\sin(\psi - \phi_1')} + \frac{C_2' S_2 \cos \phi_2'}{\sin(\psi - \phi_2')}. \quad (114)$$

Здесь  $P, S_1$  и  $S_2$  через высоту породного откоса  $h$  определяются по формулам:

$$P = \frac{\gamma}{6} h^3 (\operatorname{ctg} \psi' - \operatorname{ctg} \alpha)^3 (\operatorname{ctg} \beta_1 + \operatorname{ctg} \beta_2); \quad (115)$$

$$S_1 = \frac{h^2 (\operatorname{ctg} \psi' - \operatorname{ctg} \alpha)}{2 \sin \beta_1 \sin \lambda_1}; \quad S_2 = \frac{h^2 (\operatorname{ctg} \psi' - \operatorname{ctg} \alpha)}{2 \sin \beta_2 \sin \lambda_2}.$$

где  $\psi'$  — угол наклона линии скрещивания поверхностей скольжения в плоскости, перпендикулярной к откосу, градус;  $\beta_1$  и  $\beta_2$  — углы разворота трещин по отношению к откосу (определяются как разность азимутов линий простираения трещин и откоса), градус.

Совместное решение выражений (114) и (115) позволяет определить предельную высоту устойчивого откоса по данной расчетной схеме

$$h = \frac{3 \sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \psi}}{\gamma \sin(\beta_1 + \beta_2) (\operatorname{ctg} \psi' - \operatorname{ctg} \alpha)} \times \left[ \frac{C_1' \sin \beta_2}{\sin \lambda_1 (\operatorname{tg} \psi - \operatorname{tg} \phi_1')} + \frac{C_2' \sin \beta_1}{\sin \lambda_2 (\operatorname{tg} \psi - \operatorname{tg} \phi_2')} \right], \quad (116)$$

где  $\lambda_1$  и  $\lambda_2$  — углы наклона трещин, градус;

$$\operatorname{tg} \psi = \frac{\sin(\beta_1 + \beta_2)}{\sqrt{\operatorname{ctg}^2 \lambda_1 + \operatorname{ctg}^2 \lambda_2 - 2 \operatorname{ctg} \lambda_1 \operatorname{ctg} \lambda_2 \cos(\beta_1 + \beta_2)}};$$

$$\operatorname{ctg} \psi' = \frac{\sin \beta_1 \operatorname{ctg} \lambda_2 + \sin \beta_2 \operatorname{ctg} \lambda_1}{\sin(\beta_1 + \beta_2)}.$$

Ширина призмы возможного обрушения  $r$  определяется независимо от  $h$  и  $\alpha$  по формуле

$$r = \frac{3\sqrt{1+\operatorname{tg}^2\psi}}{\gamma \sin(\beta_1 + \beta_2)} \left[ \frac{C'_1 \sin \beta_2}{\sin \lambda_1 (\operatorname{tg} \psi - \operatorname{tg} \varphi'_1)} + \frac{C'_2 \sin \beta_1}{\sin \lambda_2 (\operatorname{tg} \psi - \operatorname{tg} \varphi'_2)} \right]. \quad (117)$$

Если прочностные характеристики по поверхностям ослабления практически можно считать одинаковыми ( $C'_1 = C'_2 = C'$  и  $\varphi'_1 = \varphi'_2 = \varphi'$ ), что часто имеет место, тогда

$$h = \frac{3C' \sqrt{1+\operatorname{tg}^2\psi} \left( \frac{\sin \beta_1}{\sin \lambda_2} + \frac{\sin \beta_2}{\sin \lambda_1} \right)}{\gamma \sin(\beta_1 + \beta_2) (\operatorname{ctg} \psi - \operatorname{ctg} \alpha) (\operatorname{tg} \psi - \operatorname{tg} \varphi')}, \quad (118)$$

$$r = \frac{3C' \sqrt{1+\operatorname{tg}^2\psi} \left( \frac{\sin \beta_1}{\sin \lambda_2} + \frac{\sin \beta_2}{\sin \lambda_1} \right)}{\gamma \sin(\beta_1 + \beta_2) (\operatorname{tg} \psi - \operatorname{tg} \varphi')}. \quad (119)$$

Необходимо отметить, что задача по устойчивости породного клина, образованного двумя диагональными подрезанными откосом трещинами, решалась многими исследователями [29, 39, 69, 83]. В свое время некоторые из этих задач были проанализированы авторами настоящей работы [56]. Отмечалось, что недостатком одних решений было то, что они сводились к частным случаям, других — что они были сложны по вычислению, третьих — что они были графоаналитическими. Одни и те же условия решения задачи дали различные результаты, что показано в графиках на рис. 34, а, б. Предлагаемый метод является общим и наиболее целесообразным из существующих

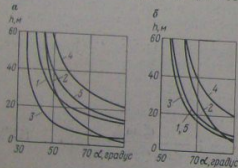


Рис. 34. Зависимости  $h = f(\alpha)$  для условий Карагайлинского карьера: а — в общем случае; б — при симметричном расположении поверхностей ослабления в горном массиве по отношению откоса уступа; 1 — по ВНИИМ; 2 — по Л. В. Савкову; 3 — по В. Н. Топову и др.; 4 — по Д. И. Киму; 5 — по предлагаемому способу

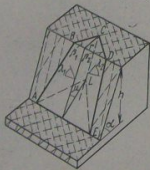


Рис. 35. Схема VI для случая заоткоски уступа полого и параллельно линии скрещивания двух систем крутопадающих диагональных трещин (к табл. 23)

с точки зрения математической обоснованности, простоты вычисления, возможности программирования на ЭВМ. Он охватывает все случаи пространственного расположения трещин относительно откоса.

В частном случае, когда одна из трещин является продольной по отношению к откосу (например,  $\beta_1 = 0^\circ$ ), высота устойчивого откоса  $h$ , исходя из выражения (116), в общем случае определится как

$$h = \frac{3C'_1 \cos \varphi'_1 \sin \alpha}{\gamma \sin(\alpha - \lambda_1) \sin(\psi - \varphi'_1)}, \quad (120)$$

где

$$\psi = \operatorname{arctg} \frac{\sin \beta_2}{\sqrt{\operatorname{ctg}^2 \lambda_1 + \operatorname{ctg}^2 \lambda_2 - 2 \operatorname{ctg} \lambda_1 \operatorname{ctg} \lambda_2 \cos \beta_2}}.$$

а ширина призмы возможного обрушения

$$r = \frac{3C'_1 \cos \varphi'_1}{\gamma \sin \lambda_1 \sin(\psi - \varphi'_1)}. \quad (121)$$

Схема VI (рис. 35, см. табл. 23). При наличии в массиве борта карьера двух крутопадающих диагональных систем трещин согласного с откосом залегания угол наклона обычно принимают меньшим или равным углу наклона линии скрещивания этих трещин. В этом случае призма возможного обрушения  $ALEBCD$  околнуривается со стороны массива поверхностями трещин  $ABCL$  и  $CDEL$ , а снизу — поверхностью скольжения  $ALE$ , пересекающей откос под углом  $\mu = \left(45^\circ - \frac{\varphi}{2}\right)$ .

В общем случае породная призма давит на свое основание с силой  $Q$ , равной разности сдвигающих и удерживающих сил по поверхностям ослабления. Считаем, что

$$\begin{aligned} P_1 \sin \psi &> P_1 \cos \psi \operatorname{tg} \varphi'_1 + C'_1 S_1; \\ P_2 \sin \psi &> P_2 \cos \psi \operatorname{tg} \varphi'_2 + C'_2 S_2, \end{aligned} \quad (122)$$

где  $P_1$  и  $P_2$  — массы, соответственно действующие на поверхности  $S_1$  и  $S_2$ .

Из выражения (122)

$$Q_1 = P_1 \frac{\sin(\psi - \varphi'_1)}{\cos \varphi'_1} - C'_1 S_1;$$

$$Q_2 = P_2 \frac{\sin(\psi - \varphi'_2)}{\cos \varphi'_2} - C'_2 S_2, \quad (123)$$

при этом  $Q_1 + Q_2 = Q$ .

При условии предельного равновесия силы  $Q_1$  и  $Q_2$  должны уравновешиваться разностью удерживающих и сдвигающих сил по плоскости среза  $ALE$ , т. е.

$$N_1 \operatorname{tg} \varphi + CS_{3(1)} = T_1; \quad (124)$$

$$N_2 \operatorname{tg} \varphi + CS_{3(2)} = T_2,$$

где  $N_1 = Q_1 \sin(\psi' - \alpha + \mu)$  и  $N_2 = Q_2 \sin(\psi' - \alpha + \mu)$  — нормальные составляющие сил  $Q_1$  и  $Q_2$  по соответствующим областям  $S_{3(1)}$  и  $S_{3(2)}$  плоскости среза;  $T_1 = Q_1 \cos(\psi' - \alpha + \mu)$  и  $T_2 = Q_2 \cos(\psi' - \alpha + \mu)$  — сдвигающие силы по соответствующим областям плоскости среза.

Из выражения (124) получаем

$$Q_1 = \frac{C \cos \varphi S_{3(1)}}{\sin(\mu - \psi' + \alpha)}; \quad Q_2 = \frac{C \cos \varphi S_{3(2)}}{\sin(\mu - \psi' + \alpha)}. \quad (125)$$

Из совместного решения уравнений (123) и (125) находим

$$\begin{cases} P_1 \frac{\sin(\psi - \varphi_1)}{\cos \varphi_1} - C_1 S_1 = \frac{C \cos \varphi S_{3(1)}}{\sin(\mu - \psi' + \alpha)}; \\ P_2 \frac{\sin(\psi - \varphi_2)}{\cos \varphi_2} - C_2 S_2 = \frac{C \cos \varphi S_{3(2)}}{\sin(\mu - \psi' + \alpha)}. \end{cases} \quad (126)$$

Несущая способность плоскости среза предполагает следующие соотношения:

$$\frac{P_1}{S_{3(1)}} = \frac{P_2}{S_{3(2)}} = \frac{P}{S_2}.$$

Откуда

$$P_1 = S_{3(1)} \frac{1P}{S_2}; \quad P_2 = S_{3(2)} \frac{P}{S_2}.$$

Подставив эти значения масс в выражение (126) и учитывая, что  $S_{3(1)} + S_{3(2)} = S_2$ , получаем уравнение предельного равновесия для рассматриваемой схемы

$$1 = \frac{C_1' S_1}{P \frac{\sin(\psi - \varphi_1)}{\cos \varphi_1} - S_2 \frac{C \cos \varphi}{\sin(\mu - \psi' + \alpha)}} + \frac{C_2' S_2}{P \frac{\sin(\psi - \varphi_2)}{\cos \varphi_2} - S_2 \frac{C \cos \varphi}{\sin(\mu - \psi' + \alpha)}}. \quad (127)$$

Здесь

$$\begin{cases} P = \frac{\gamma \sin(\beta_1 + \beta_2) [\operatorname{ctg}(\alpha - \mu) - \operatorname{ctg} \alpha] [2hr^2 + 3rh^2 (\operatorname{ctg} \alpha - \operatorname{ctg} \psi') + h^2 (\operatorname{ctg} \alpha - \operatorname{ctg} \psi')^2] - r^2}{6 \sin \beta_1 \sin \beta_2 [\operatorname{ctg}(\alpha - \mu) - \operatorname{ctg} \psi']}; \\ S_1 = \frac{2rh [\operatorname{ctg}(\alpha - \mu) - \operatorname{ctg} \alpha] - r^2 + h^2 [\operatorname{ctg}(\alpha - \mu) - \operatorname{ctg} \alpha] \times}{\times (\operatorname{ctg} \alpha - \operatorname{ctg} \psi')}; \\ S_2 = \frac{2 \sin \lambda_3 \sin \beta_1 [\operatorname{ctg}(\alpha - \mu) - \operatorname{ctg} \psi']}{2rh [\operatorname{ctg}(\alpha - \mu) - \operatorname{ctg} \alpha] - r^2 + h^2 [\operatorname{ctg}(\alpha - \mu) - \operatorname{ctg} \alpha] \times}; \\ S_3 = \frac{\times (\operatorname{ctg} \alpha - \operatorname{ctg} \psi')}{2 \sin \lambda_3 \sin \beta_1 [\operatorname{ctg}(\alpha - \mu) - \operatorname{ctg} \psi']}; \\ S_0 = \frac{\sin(\beta_1 + \beta_2) [r + h (\operatorname{ctg} \alpha - \operatorname{ctg} \psi')]^2}{2 \sin(\alpha - \mu) \sin \beta_1 \sin \beta_2 [\operatorname{ctg}(\alpha - \mu) - \operatorname{ctg} \psi']}; \end{cases} \quad (128)$$

углы  $\psi$  и  $\psi'$  определяются так же, как для выражения (116). Как видим, уравнение (127) очень сложное. Проанализируем его, приведя к общему знаменателю и преобразовав как

$$\begin{aligned} & P^2 \frac{\sin(\psi - \varphi_1) \sin(\psi - \varphi_2)}{\cos \varphi_1 \cos \varphi_2} - P \left[ \frac{S_2 C \cos \varphi}{2 \sin(\mu - \psi' + \alpha)} \times \right. \\ & \times \left[ \frac{\sin(\psi - \varphi_1)}{\cos \varphi_1} + \frac{\sin(\psi - \varphi_2)}{\cos \varphi_2} \right] + \left[ C_1' S_1 \frac{\sin(\psi - \varphi_2)}{\cos \varphi_2} + \right. \\ & \left. \left. + C_2' S_2 \frac{\sin(\psi - \varphi_1)}{\cos \varphi_1} \right] \right] = P \frac{S_2 C \cos \varphi}{2 \sin(\mu - \psi' + \alpha)} \left[ \frac{\sin(\psi - \varphi_1)}{\cos \varphi_1} + \right. \\ & \left. + \frac{\sin(\psi - \varphi_2)}{\cos \varphi_2} \right] - \frac{S_2^2 C^2 \cos^2 \varphi}{\sin^2(\mu - \psi' + \alpha)} - \\ & - \frac{S_2 C \cos \varphi}{\sin(\mu - \psi' + \alpha)} (C_1' S_1 + C_2' S_2). \end{aligned} \quad (129)$$

Анализ равенства (129) показывает, что при  $C_1' = C_2' = C'$  и  $\varphi_1 = \varphi_2 = \varphi'$  выражения в левой и правой частях равнозначны для отыскания величины массы призмы возможного обрушения  $P$ . Многочисленные решения выражения (129) показали, что и при различных  $C_i'$  и  $\varphi_i'$  выражения левой и правой частей и при различных  $C_i'$  и  $\varphi_i'$  приравненные к нулю, дают равенства, предварительно приравненные к нулю, дают равенства, предварительно приравненные к нулю, дают равенства, предварительно приравненные к нулю, что типически одно и то же значение для  $P$ . Это объясняется тем, что на разность значений массы призмы возможного обрушения из левой и правой частей оказывает влияние только разность углов трения по поверхностям трещины, которая обычно является несущественной. Поэтому из левой части равенства (129) окончательно примем уравнение предельного равновесия в виде

$$P = \frac{S_2 C \cos \varphi}{2 \sin (\mu - \psi' + \alpha)} \left[ \frac{\cos \varphi_1'}{\sin (\psi - \varphi_1')} + \frac{\cos \varphi_2'}{\sin (\psi - \varphi_2')} \right] + \left[ \frac{S_1 C_1' \cos \varphi_1'}{\sin (\psi - \varphi_1')} + \frac{S_2 C_2' \cos \varphi_2'}{\sin (\psi - \varphi_2')} \right]. \quad (130)$$

Подставив в это уравнение значения  $P$ ,  $S_3$ ,  $S_2$ ,  $S_1$ , выраженные через высоту откоса  $h$  и ширину призмы возможного обрушения  $r$ , получим неявную функцию вида

$$r^2 D + r^2 (E - hA) + r (2hF - h^2 B) + h^2 (\operatorname{ctg} \alpha - \operatorname{ctg} \psi') F - h^3 C = 0, \quad (131)$$

где

$$D = \frac{\gamma}{3} \sin (\beta_1 + \beta_2); \quad A = \gamma \sin (\beta_1 + \beta_2) [\operatorname{ctg} (\alpha - \mu) - \operatorname{ctg} \alpha];$$

$$B = \gamma \sin (\beta_1 + \beta_2) (\operatorname{ctg} \alpha - \operatorname{ctg} \psi') [\operatorname{ctg} (\alpha - \mu) - \operatorname{ctg} \alpha];$$

$$C = \frac{\gamma}{3} \sin (\beta_1 + \beta_2) [\operatorname{ctg} (\alpha - \mu) - \operatorname{ctg} \alpha] (\operatorname{ctg} \alpha - \operatorname{ctg} \psi')^2;$$

$$E = \frac{C \cos \varphi \sin (\beta_1 + \beta_2)}{2 \sin (\alpha - \mu) \sin (\mu - \psi' + \alpha)} \left[ \frac{\cos \varphi_1'}{\sin (\psi - \varphi_1')} + \frac{\cos \varphi_2'}{\sin (\psi - \varphi_2')} \right] - \left[ \frac{C_1' \cos \varphi_1' \sin \beta_1}{\sin \lambda_1 \sin (\psi - \varphi_1')} + \frac{C_2' \cos \varphi_2' \sin \beta_1}{\sin \lambda_2 \sin (\psi - \varphi_2')} \right];$$

$$F = \frac{C \cos \varphi \sin (\beta_1 + \beta_2) \sin (\psi' - \alpha)}{2 \sin (\alpha - \mu) \sin (\mu - \psi' + \alpha) \sin \alpha \sin \psi'} \left[ \frac{\cos \varphi_1'}{\sin (\psi - \varphi_1')} + \frac{\cos \varphi_2'}{\sin (\psi - \varphi_2')} \right] + \frac{\sin \mu \left[ \frac{C_1' \cos \varphi_1' \sin \beta_2}{\sin \lambda_1 \sin (\psi - \varphi_1')} + \frac{C_2' \cos \varphi_2' \sin \beta_1}{\sin \lambda_2 \sin (\psi - \varphi_2')} \right]}{\sin (\alpha - \mu) \sin \alpha}.$$

Между двумя неизвестными значениями  $h$  и  $r$  в выражении (131) установлена параболическая связь. Поэтому одно из неизвестных представляется возможным найти экстремальным способом. По правилу нахождения производной неявной функции (131) определим  $\frac{dh}{dr}$  и приравняем ее к нулю. В результате получим квадратное уравнение

$$3r^2 + 2r \frac{E - hA}{D} + \frac{2hF - h^2 B}{D} = 0. \quad (132)$$

В конечном итоге получаем систему кубического и квадратного уравнений

$$\begin{cases} r^3 + r^2 \frac{(E - hA)}{D} + r \frac{2hF - h^2 B}{D} + \frac{h^2 (\operatorname{ctg} \alpha - \operatorname{ctg} \psi') F - h^3 C}{D} = 0; \\ r^2 + r \frac{2(E - hA)}{3D} + \frac{h(2F - hB)}{3D} = 0. \end{cases}$$

Для их решения произведем некоторые преобразования. Запишем эти уравнения в таком виде

$$\begin{cases} r \left[ r^2 + r \frac{(E - hA)}{D} + \frac{h(2F - hB)}{D} \right] + \frac{h^2 (\operatorname{ctg} \alpha - \operatorname{ctg} \psi') F - h^3 C}{D} = 0; \\ r^2 = -r \frac{2(E - hA)}{3D} - \frac{h(2F - hB)}{3D}. \end{cases}$$

Подставим значение для  $r^2$  из второго уравнения в первое и получим новую систему двух квадратных уравнений

$$\begin{cases} r^2 + 2r \frac{h(2F - hB)}{(E - hA)} + \frac{3h^2 [(\operatorname{ctg} \alpha - \operatorname{ctg} \psi') F - hC]}{(E - hA)} = 0; \\ r^2 + 2r \frac{(E - hA)}{3D} + \frac{h(2F - hB)}{3D} = 0. \end{cases}$$

Выражения при  $r$  в этих уравнениях равны, т. е.

$$\frac{h(2F - hB)}{(E - hA)} = \frac{(E - hA)}{3D}.$$

Отсюда запишем квадратное уравнение для определения высоты откоса  $h$

$$h^2 - 2h \frac{(3DF + AE)}{(3DB + A^2)} + \frac{E^2}{(3DB + A^2)} = 0. \quad (133)$$

После соответствующих преобразований получим

$$h = a(1 + \sqrt{1 - b}), \quad (134)$$

где

$$a = \frac{C \cos \mu \sin \alpha}{\gamma \sin (\mu - \psi' + \alpha)} \left[ \frac{\cos \varphi_1'}{\sin (\psi - \varphi_1')} + \frac{\cos \varphi_2'}{\sin (\psi - \varphi_2')} \right];$$

$$b = \frac{\sin \psi' \sin \mu}{\sin \alpha \sin (\psi' - \alpha + \mu)} \left[ 1 - \frac{2 \sin (\alpha - \mu) \sin (\mu - \psi' + \alpha) \times}{C \cos \varphi \sin (\beta_1 + \beta_2) \times} \right]$$

$$\rightarrow \frac{\left[ \frac{C'_1 \cos \varphi'_1 \sin \beta_2}{\sin \lambda_1 \sin (\psi - \varphi'_1)} + \frac{C'_2 \cos \varphi'_2 \sin \beta_1}{\sin \lambda_2 \sin (\psi - \varphi'_2)} \right]^2}{\left[ \frac{\cos \varphi'_1}{\sin (\psi - \varphi'_1)} + \frac{\cos \varphi'_2}{\sin (\psi - \varphi'_2)} \right]^2}$$

Ширину призмы возможного обрушения определим из уравнения (132) как

$$r = \frac{1}{3D} [(hA - F) + \sqrt{h^2(3DB + A^2) - 2h(3DF + AE) + E^2}]. \quad (135)$$

Подкоренное выражение правой части этого уравнения есть не что иное, как квадратное уравнение для определения высоты откоса  $h$  по формуле (133). После подстановки вместо  $h$  ее значения из выражения (134), подкоренное выражение в формуле (135) равняется нулю. В результате получаем

$$r = \frac{hA - F}{3D}, \quad (136)$$

или

$$r = \frac{1}{\gamma} \left[ \frac{C \cos \varphi \sqrt{1 - b} \left[ \frac{\cos \varphi'_1}{\sin (\psi - \varphi'_1)} + \frac{\cos \varphi'_2}{\sin (\psi - \varphi'_2)} \right]}{2 \sin (\alpha - \mu) \sin (\mu - \psi' + \alpha)} + \frac{\left[ \frac{C'_1 \cos \varphi'_1 \sin \beta_2}{\sin \lambda_1 \sin (\psi - \varphi'_1)} + \frac{C'_2 \cos \varphi'_2 \sin \beta_1}{\sin \lambda_2 \sin (\psi - \varphi'_2)} \right]}{\sin (\beta_1 + \beta_2)} \right]. \quad (137)$$

Когда прочностные характеристики по поверхностям ослабления одинаковы ( $C'_1 = C'_2 = C'$  и  $\varphi'_1 = \varphi'_2 = \varphi'$ ),

$$h = a' (1 + \sqrt{1 - b'}); \quad (138)$$

$$r = \frac{\cos \varphi'}{\gamma \sin (\psi - \varphi')} \left[ \frac{C \cos \varphi \sqrt{1 - b'}}{\sin (\alpha - \mu) \sin (\mu - \psi' + \alpha)} + \frac{C' \left( \frac{\sin \beta_1}{\sin \lambda_2} + \frac{\sin \beta_2}{\sin \lambda_1} \right)}{\sin (\beta_1 + \beta_2)} \right], \quad (139)$$

где

$$a' = \frac{2C \cos \mu \cos \varphi' \sin \alpha}{\gamma \sin (\psi - \varphi') \sin (\mu - \psi' + \alpha)};$$

$$b' = \frac{\sin \psi' \sin \mu}{\sin \alpha \sin (\psi' - \alpha + \mu)} \left[ 1 - \frac{C' \sin (\alpha - \mu) \sin (\mu - \psi' + \alpha)}{C \cos \varphi \sin (\beta_1 + \beta_2)} \right] \times$$

$$\times \left( \frac{\sin \beta_1}{\sin \lambda_2} + \frac{\sin \beta_2}{\sin \lambda_1} \right)^2.$$

Если заоткоска борта карьера осуществлена параллельно линии скрещивания поверхности ослабления ( $\alpha = \psi'$ ) при различных прочностных характеристиках по ним, то

$$h = a_1 (1 + \sqrt{1 - b_1}); \quad (140)$$

$$r = \frac{1}{\gamma} \left[ \frac{C \cos \mu \sqrt{1 - b_1}}{\sin (\psi' - \mu)} \left[ \frac{\cos \varphi'_1}{\sin (\psi - \varphi'_1)} + \frac{\cos \varphi'_2}{\sin (\psi - \varphi'_2)} \right] + \frac{\left[ \frac{C'_1 \cos \varphi'_1 \sin \beta_2}{\sin \lambda_1 \sin (\psi - \varphi'_1)} + \frac{C'_2 \cos \varphi'_2 \sin \beta_1}{\sin \lambda_2 \sin (\psi - \varphi'_2)} \right]}{\sin (\beta_1 + \beta_2)} \right], \quad (141)$$

где

$$a_1 = \frac{C \operatorname{ctg} \mu \sin \psi'}{\gamma} \left[ \frac{\cos \varphi'_1}{\sin (\psi - \varphi'_1)} + \frac{\cos \varphi'_2}{\sin (\psi - \varphi'_2)} \right];$$

$$b_1 = \left[ 1 - \frac{\sin (\psi' - \mu) \left[ \frac{C'_1 \cos \varphi'_1 \sin \beta_2}{\sin \lambda_1 \sin (\psi - \varphi'_1)} + \frac{C'_2 \cos \varphi'_2 \sin \beta_1}{\sin \lambda_2 \sin (\psi - \varphi'_2)} \right]}{C \cos \mu \sin (\beta_1 + \beta_2) \left[ \frac{\cos \varphi'_1}{\sin (\psi - \varphi'_1)} + \frac{\cos \varphi'_2}{\sin (\psi - \varphi'_2)} \right]} \right]^2$$

При одинаковых прочностных характеристиках по поверхностям ослабления в этом случае

$$h = a'_1 (1 + \sqrt{1 - b'_1}); \quad (142)$$

$$r = \frac{\cos \varphi'}{\gamma \sin (\psi - \varphi')} \left[ \frac{2C \cos \mu \sqrt{1 - b'_1}}{\sin (\psi' - \mu)} + \frac{C'}{\sin (\beta_1 + \beta_2)} \left( \frac{\sin \beta_1}{\sin \lambda_2} + \frac{\sin \beta_2}{\sin \lambda_1} \right) \right], \quad (143)$$

где

$$a'_1 = \frac{H_{00} \sin \psi' \cos \varphi'}{\sin (\psi' - \varphi')};$$

$$b'_1 = \left[ 1 - \frac{C' \sin (\psi' - \mu)}{2C \cos \mu \sin (\beta_1 + \beta_2)} \left( \frac{\sin \beta_1}{\sin \lambda_2} + \frac{\sin \beta_2}{\sin \lambda_1} \right) \right]^2.$$

Когда рассматриваемая схема применяется для расчета параметров устойчивых уступов, то для исключения влияния

ширины призмы возможного обрушения на размер предохранительной бермы на проектном контуре нужно в выражении (136) принять  $r=0$ .

Тогда в общем случае

$$h_{r=0} = \frac{F}{A} \frac{\sin \alpha}{\gamma \sin \mu} \left[ \frac{C \cos \varphi}{2 \sin (\mu - \psi' + \alpha)} \left[ \frac{\cos \varphi_1'}{\sin (\psi - \varphi_1')} + \frac{\cos \varphi_2'}{\sin (\psi - \varphi_2')} \right] - \frac{\sin (\alpha - \mu)}{\sin (\beta_1 + \beta_2)} \left[ \frac{C_1' \cos \varphi_1' \sin \beta_2}{\sin \lambda_1 \sin (\psi - \varphi_1')} + \frac{C_2' \cos \varphi_2' \sin \beta_1}{\sin \lambda_2 \sin (\psi - \varphi_2')} \right] \right] \quad (144)$$

При одинаковых прочностных характеристиках горных пород по поверхностям ослаблений

$$h_{r=0} = \frac{\sin \alpha \cos \varphi'}{\gamma \sin \mu \sin (\psi - \varphi')} \left[ \frac{C \cos \varphi}{\sin \mu} - C' \frac{\sin (\alpha - \mu)}{\sin (\beta_1 + \beta_2)} \left( \frac{\sin \beta_1}{\sin \lambda_2} + \frac{\sin \beta_2}{\sin \lambda_1} \right) \right] \quad (145)$$

Если  $\alpha = \psi'$ ,

$$h_{r=0} = \frac{\sin \psi'}{\gamma \sin \mu} \left[ C \cos \mu \left[ \frac{\cos \varphi_1'}{\sin (\psi - \varphi_1')} + \frac{\cos \varphi_2'}{\sin (\psi - \varphi_2')} \right] - \frac{\sin (\psi' - \mu)}{\sin (\beta_1 + \beta_2)} \left[ \frac{C_1' \cos \varphi_1' \sin \beta_2}{\sin \lambda_1 \sin (\psi - \varphi_1')} + \frac{C_2' \cos \varphi_2' \sin \beta_1}{\sin \lambda_2 \sin (\psi - \varphi_2')} \right] \right] \quad (146)$$

При этом, когда  $C_1' = C_2' = C'$  и  $\varphi_1' = \varphi_2' = \varphi'$ ,

$$h_{r=0} = \frac{\sin \psi' \cos \varphi'}{\gamma \sin \mu \sin (\psi - \varphi')} \left[ 2C \cos \mu - C' \frac{\sin (\psi' - \mu)}{\sin (\beta_1 + \beta_2)} \left( \frac{\sin \beta_1}{\sin \lambda_2} + \frac{\sin \beta_2}{\sin \lambda_1} \right) \right] \quad (147)$$

Схема VII (рис. 36, см. табл. 23). Когда массив горных пород расчленяют три основные системы трещин или других поверхностей ослабления, из которых одна подсекающая продольная, согласно падающая с откосом, а две другие — крутопадающие диагональные, заоткоску производят положе или параллельно линии скрещивания крутопадающих трещин. Крутопадающие трещины могут быть согласнопадающими или вертикальными. В общем случае системы трещин, имеющие различные прочностные характеристики по своим поверхностям, вместе с поверхностью откоса образуют породную призму обрушения,

которая стремится сдвинуться по подсекающей трещине. По аналогии с решением плоской задачи по схеме IV по поверхностям ослабления  $ABCK$  и  $KCDE$  действует сила  $Q$ , равная разности сдвигающих и удерживающих сил по подсекающей поверхности ослабления, т. е.

$$Q = P \frac{\sin (\lambda_2 - \varphi_3)}{\cos \varphi_3} - C_3' S_3 \quad (148)$$

где  $\lambda_3$  — угол наклона подсекающей трещины, градус;  $C_3$  и  $\varphi_3$  — соответственно сцепление и угол трения по подсекающей трещине, Па и градус;  $S_3$  — площадь подсекающей поверхности ослабления, м<sup>2</sup>.

Часть этой силы  $Q_1$  должна удерживаться первой диагональной поверхностью ослабления, а  $Q_2$  — второй.

Найдем сдвигающие составляющие сил  $Q_1$  и  $Q_2$  при проектировании их на соответствующие крутопадающие поверхности трещин  $T_1 = Q_1 \cos (\psi' - \lambda_3)$ ;  $T_2 = Q_2 \cos (\psi' - \lambda_3)$ , где  $\psi'$  — угол наклона линии пересечения крутопадающих диагональных трещин в плоскости, перпендикулярной к откосу. Нормальные составляющие  $N_1$  и  $N_2$  определяются через  $T_1$  и  $T_2$  как  $N_1 = -T_1 \operatorname{ctg} \psi' = Q_1 \cos (\psi' - \lambda_3) \operatorname{ctg} \psi'$ . По аналогии  $N_2 = Q_2 \cos (\psi' - \lambda_3) \operatorname{ctg} \psi'$ . Условие равновесия по крутопадающим поверхностям ослабления запишется в виде

$$\begin{cases} Q_1 \cos (\psi' - \lambda_3) = Q_1 \cos (\psi' - \lambda_3) \operatorname{ctg} \psi' \operatorname{tg} \varphi_1' + C_1' S_1; \\ Q_2 \cos (\psi' - \lambda_3) = Q_2 \cos (\psi' - \lambda_3) \operatorname{ctg} \psi' \operatorname{tg} \varphi_2' + C_2' S_2, \end{cases} \quad (149)$$

откуда

$$\begin{cases} Q_1 = \frac{C_1' S_1 \cos \varphi_1' \sin \psi'}{\cos (\psi' - \lambda_3) \sin (\psi' - \varphi_1')} ; \\ Q_2 = \frac{C_2' S_2 \cos \varphi_2' \sin \psi'}{\cos (\psi' - \lambda_3) \sin (\psi' - \varphi_2')} ; \end{cases}$$

где  $S_1, S_2$  — площади крутопадающих поверхностей ослабления;  $\varphi_1, C_1$  и  $\varphi_2, C_2$  — угол трения и сцепление соответственно по первой и второй крутопадающим поверхностям ослабления.

Сумма  $Q_1 + Q_2 = Q$ , т. е.

$$Q = \frac{\sin \psi'}{\cos (\psi' - \lambda_3)} \left[ \frac{C_1' S_1 \cos \varphi_1'}{\sin (\psi' - \varphi_1')} + \frac{C_2' S_2 \cos \varphi_2'}{\sin (\psi' - \varphi_2')} \right] \quad (150)$$

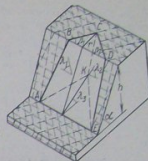


Рис. 36. Схема VII для случая заоткоски уступа положе и параллельно линии скрещивания двух систем крутопадающих диагональных трещин при наличии третьей продольной подсекающей (к табл. 24)

Условие равновесия призмы возможного обрушения составляется из равенства правых частей выражений (149) и (150) в виде

$$P \frac{\sin(\lambda_3 - \varphi_3)}{\cos \varphi_3} - C_3 S_3 = \frac{\sin \psi'}{\cos(\psi' - \lambda_2)} \left[ \frac{C_1' S_1 \cos \varphi_1'}{\sin(\psi' - \varphi_2')} + \frac{C_2' S_2 \cos \varphi_2'}{\sin(\psi' - \varphi_2')} \right]. \quad (151)$$

где

$$P = \frac{\gamma \sin(\beta_1 + \beta_2) \{ (ctg \lambda_3 - ctg \alpha) [3hr^2 + 3r^3 (ctg \alpha - ctg \psi') + h^3 (ctg \alpha - ctg \psi')^2 - r^3] \}}{6 \sin \beta_1 \sin \beta_2 (ctg \lambda_3 - ctg \psi')};$$

$$S_1 = \frac{2rh (ctg \lambda_3 - ctg \alpha) - r^2 + h^2 (ctg \lambda_3 - ctg \alpha) (ctg \alpha - ctg \psi')}{2 \sin \lambda_1 \sin \beta_1 (ctg \lambda_3 - ctg \psi')};$$

$$S_2 = \frac{2rh (ctg \lambda_3 - ctg \alpha) - r^2 + h^2 (ctg \lambda_3 - ctg \alpha) (ctg \alpha - ctg \psi')}{2 \sin \lambda_2 \sin \beta_2 (ctg \lambda_3 - ctg \psi')};$$

$$S_3 = \frac{\sin(\beta_1 + \beta_2) [r + h (ctg \alpha - ctg \psi')]^2}{2 \sin \lambda_3 \sin \beta_1 \sin \beta_2 (ctg \lambda_3 - ctg \psi')}.$$

После подстановки полученных выражений для  $P$ ,  $S_1$ ,  $S_2$ ,  $S_3$  в (151) и соответствующих преобразований получаем зависимость

$$h = f(r, \alpha, C_1', C_2', C_3', \varphi_1', \varphi_2', \varphi_3', \gamma, \lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \beta_1, \beta_2),$$

записанную в неявном виде как  $F(r, h) = 0$  или в нашем случае

$$r^2 T - r^2 (B + hE) + rh(A - hF) + h^2(D - hG) = 0, \quad (152)$$

где

$$T = \frac{\gamma \sin(\lambda_3 - \varphi_3) \cos(\psi' - \lambda_2) \sin(\beta_1 + \beta_2)}{3 \cos \varphi_3 \sin \psi'};$$

$$B = \frac{C_1' \cos \varphi_1' \sin \beta_2}{\sin \lambda_1 \sin(\psi' - \varphi_1')} + \frac{C_2' \cos \varphi_2' \sin \beta_1}{\sin \lambda_2 \sin(\psi' - \varphi_2')} - \frac{C_3' \cos(\psi' - \lambda_2) \sin(\beta_1 + \beta_2)}{\sin \lambda_3 \sin \psi'};$$

$$E = \frac{\gamma \sin(\lambda_3 - \varphi_3) (ctg \lambda_3 - ctg \alpha) \cos(\psi' - \lambda_2) \sin(\beta_1 + \beta_2)}{\cos \varphi_3 \sin \psi'};$$

$$A = (ctg \lambda_3 - ctg \alpha) \left[ \frac{C_1' \cos \varphi_1' \sin \beta_2}{\sin \lambda_1 \sin(\psi' - \varphi_1')} + \frac{C_2' \cos \varphi_2' \sin \beta_1}{\sin \lambda_2 \sin(\psi' - \varphi_2')} \right] +$$

$$+ \frac{C_3' (ctg \alpha - ctg \psi') \cos(\psi' - \lambda_2) \sin(\beta_1 + \beta_2)}{\sin \lambda_3 \sin \psi'};$$

$$F = \frac{\gamma (ctg \alpha - ctg \psi') (ctg \lambda_3 - ctg \alpha) \sin(\lambda_3 - \varphi_3) \cos(\psi' - \lambda_2) \sin(\beta_1 + \beta_2)}{\cos \varphi_3 \sin \psi'};$$

$$D = (ctg \alpha - ctg \psi') \left\{ (ctg \lambda_3 - ctg \alpha) \left[ \frac{C_1' \cos \varphi_1' \sin \beta_2}{\sin \lambda_1 \sin(\psi' - \varphi_1')} + \frac{C_2' \cos \varphi_2' \sin \beta_1}{\sin \lambda_2 \sin(\psi' - \varphi_2')} \right] + \frac{C_3' (ctg \alpha - ctg \psi') \cos(\psi' - \lambda_2) \sin(\beta_1 + \beta_2)}{\sin \lambda_3 \sin \psi'} \right\}$$

$$G = \frac{\gamma (ctg \alpha - ctg \psi')^2 \sin(\lambda_3 - \varphi_3) \cos(\psi' - \lambda_2) \sin(\beta_1 + \beta_2)}{3 \cos \varphi_3 \sin \psi'}.$$

Как видно из уравнения (152), решение задачи устойчивости призмы возможного обрушения в общем случае является неопределенным, так как условие предельного равновесия соответствуют два неизвестных: неизвестно, по какой из подсекающих трещин произойдет сдвиг породной призмы, что определяет высоту откоса  $h$ ; неизвестно, по какой из пар диагональных крутопадающих трещин произойдет отрыв призмы, что определяет ширину призмы обрушения  $r$ . Вероятно, потенциальной поверхностью скольжения призмы обрушения будет такая совокупность поверхности подсекающих и крутопадающих трещин, по которым коэффициент устойчивости будет минимальным. Такому  $n_{\gamma, \min} = 1$  (условие предельного равновесия) должно соответствовать единственное значение ширины призмы возможного обрушения  $r$ . Предварительным анализом установлено, что между  $r$  и  $h$  существует параболическая связь. Тогда величину  $r$  можно найти экстремальным способом из  $\frac{dh}{dr} = 0$ . По правилу нахождения производной неявной функции (152) в конечном итоге получаем квадратное уравнение

$$r^2 - 2r \frac{(B + hE)}{3T} + \frac{h(A - hE)}{3T} = 0. \quad (153)$$

В результате совместного решения уравнений кубического (152) и квадратного (153) по методу, рассмотренному для определения  $h$  и  $r$  согласно предыдущей схеме VI, получим два приведенных квадратных уравнения, выражения при  $r$  в которых равны, т. е.

$$\frac{h(A - hE)}{(B + hE)} = \frac{(B + hE)}{3T}. \quad (154)$$

Отсюда представляется возможным записать квадратное уравнение для определения высоты устойчивого откоса  $h$ , из которого

$$h = M(1 + \sqrt{1 - N}), \quad (155)$$

где

$$M = \frac{C_3' \cos \varphi_3' \sin \alpha}{\gamma \sin (\lambda_3 - \varphi_3') \sin (\alpha - \lambda_3)} ;$$

$$N = \frac{\sin \psi' \sin (\alpha - \lambda_3)}{\sin \alpha \sin (\psi' - \lambda_3)} \left\{ 1 - \frac{\sin \lambda_3 \sin \psi'}{C_3' \cos (\psi' - \lambda_3) \sin (\beta_1 + \beta_2)} \times \right.$$

$$\left. \times \left[ \frac{C_1' \cos \varphi_1' \sin \beta_2}{\sin \lambda_1 \sin (\psi' - \varphi_1')} + \frac{C_2' \cos \varphi_2' \sin \beta_1}{\sin \lambda_2 \sin (\psi' - \varphi_2')} \right] \right\}^2 .$$

Ширину призмы возможного обрушения  $r$  найдем из квадратного уравнения (153) после подстановки в него значения  $h$  из выражения (154)

$$r = \frac{B + hE}{3T} \quad (156)$$

или после преобразований

$$r = \frac{C_3' \cos \varphi_3'}{\gamma \sin \lambda_3 \sin (\lambda_3 - \varphi_3')} \times$$

$$\times \left[ \frac{\sin \lambda_3 \sin \psi' \left[ \frac{C_1' \cos \varphi_1' \sin \beta_2}{\sin \lambda_1 \sin (\psi' - \varphi_1')} + \frac{C_2' \cos \varphi_2' \sin \beta_1}{\sin \lambda_2 \sin (\psi' - \varphi_2')} \right]}{C_3' \cos (\psi' - \lambda_3) \sin (\beta_1 + \beta_2)} + \sqrt{1 - N'} \right] . \quad (157)$$

При схеме так называемого прислоненного откоса ( $\alpha = \psi'$ )

где

$$h = M' (1 + \sqrt{1 - N'}) ,$$

$$M' = \frac{C_3' \cos \varphi_3' \sin \psi'}{\gamma \sin (\lambda_3 - \varphi_3') \sin (\psi' - \lambda_3)} ;$$

$$N' = \left\{ 1 - \frac{\sin \lambda_3 \sin \psi'}{C_3' \cos (\psi' - \lambda_3) \sin (\beta_1 + \beta_2)} \times \right.$$

$$\left. \times \left[ \frac{C_1' \cos \varphi_1' \sin \beta_2}{\sin \lambda_1 \sin (\psi' - \varphi_1')} + \frac{C_2' \cos \varphi_2' \sin \beta_1}{\sin \lambda_2 \sin (\psi' - \varphi_2')} \right] \right\}^2 .$$

$$r = \frac{C_3' \cos \varphi_3'}{\gamma \sin \lambda_3 \sin (\lambda_3 - \varphi_3')} \times$$

а

92

$$\times \left[ \frac{\sin \lambda_3 \sin \psi' \left[ \frac{C_1' \cos \varphi_1' \sin \beta_2}{\sin \lambda_1 \sin (\psi' - \varphi_1')} + \frac{C_2' \cos \varphi_2' \sin \beta_1}{\sin \lambda_2 \sin (\psi' - \varphi_2')} \right]}{C_3' \cos (\psi' - \lambda_3) \sin (\beta_1 + \beta_2)} + \sqrt{1 - N'} \right] . \quad (159)$$

При исключении ширины призмы возможного обрушения из расчетов размера предохранительных берм примем в выражении (156)  $r = 0$ . В этом случае в общем виде

$$h_{r=0} = -\frac{B}{E} = \frac{C_3' \cos \varphi_3' \sin \alpha}{\gamma \sin (\lambda_3 - \varphi_3') \sin (\alpha - \lambda_3)} \times$$

$$\times \left[ 1 - \frac{\sin \lambda_3 \sin \psi' \left[ \frac{C_1' \cos \varphi_1' \sin \beta_2}{\sin \lambda_1 \sin (\psi' - \varphi_1')} + \frac{C_2' \cos \varphi_2' \sin \beta_1}{\sin \lambda_2 \sin (\psi' - \varphi_2')} \right]}{C_3' \cos (\psi' - \lambda_3) \sin (\beta_1 + \beta_2)} \right] . \quad (160)$$

В частном случае, когда прочностные характеристики по крутопадающим поверхностям ослабления равны ( $C_1' = C_2' = C'$  и  $\varphi_1' = \varphi_2' = \varphi'$ ),

$$h = M (1 + \sqrt{1 - N_1}) , \quad (161)$$

где

$$N_1 = \frac{\sin \psi' \sin (\alpha - \lambda_3)}{\sin \alpha \sin (\psi' - \lambda_3)} \left[ 1 - \frac{C' \sin \lambda_3 \sin \psi' \cos \varphi' \left( \frac{\sin \beta_1}{\sin \lambda_2} + \frac{\sin \beta_2}{\sin \lambda_1} \right)}{C_3' \cos (\psi' - \lambda_3) \sin (\beta_1 + \beta_2) \sin (\psi' - \varphi')} \right]^2 .$$

При  $\alpha = \psi'$

$$h = M' (1 + \sqrt{1 - N_1'}) , \quad (162)$$

где

$$N_1' = \left[ 1 - \frac{C' \sin \lambda_3 \sin \psi' \cos \varphi' \left( \frac{\sin \beta_1}{\sin \lambda_2} + \frac{\sin \beta_2}{\sin \lambda_1} \right)}{C_3' \cos (\psi' - \lambda_3) \sin (\beta_1 + \beta_2) \sin (\psi' - \varphi')} \right]^2 .$$

Формулы, подобные выражениям (161) и (162) для определения высоты устойчивого откоса, приведены в работе [57].  
Схема VIII (рис. 37, см. табл. 23). На участках откосов карьеров, массив горных пород которых расчленен двумя системами поверхностей ослабления — диагональной крутопадающей

93

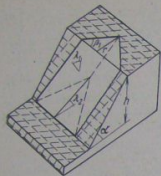


Рис. 37. Схема VIII заоткоски при наличии в массиве уступа двух систем поверхностей ослабления — диагональной крутопадающей и продольной подсекающей (табл. 23)

где

$$m = \frac{C_2' \cos \varphi_2' \sin \alpha}{\gamma \sin (\lambda_2 - \varphi_2') \sin (\alpha - \lambda_2)} ;$$

$$n = \frac{\sin \lambda_1 \sin (\alpha - \lambda_2)}{\sin \alpha \sin (\lambda_1 - \lambda_2)} \times \left[ 1 - \frac{\sin \lambda_1 \sin \lambda_2}{C_2' \cos (\lambda_1 - \lambda_2)} \left[ \frac{C_1' \cos \varphi_1'}{\sin \lambda_1 \sin (\lambda_1 - \varphi_1')} + \frac{2C \cos \varphi \sin \frac{\beta_1}{2}}{\sin (\lambda_1 - \varphi)} \right] \right]^2 .$$

Здесь  $\lambda_1, \beta_1, \varphi_1, C_1'$  — соответственно углы наклона, разворота, трения и сцепление, относящиеся к диагональной крутопадающей трещине, градус и Па;  $\lambda_2, \varphi_2, C_2'$  — соответственно углы наклона и трения и сцепление по подсекающей продольной трещине, градус, Па;  $\varphi, C$  — соответственно угол внутреннего трения и сцепление в массиве горных пород, градус, Па.

Ширина призмы возможного обрушения

$$r = \frac{C_2' \cos \varphi_2'}{\gamma \sin \lambda_2 \sin (\lambda_2 - \varphi_2')} \left\{ \frac{\sin \lambda_1 \sin \lambda_2}{C_2' \cos (\lambda_1 - \lambda_2)} \times \left[ \frac{C_1' \cos \varphi_1'}{\sin \lambda_1 \sin (\lambda_1 - \varphi_1')} + \frac{2C \cos \varphi \sin \frac{\beta_1}{2}}{\sin (\lambda_1 - \varphi)} \right] + \sqrt{1 - n} \right\} . \quad (164)$$

и продольной подсекающей, — также возможны обрушения. В этом случае одной из поверхностей призмы возможного обрушения является поверхность отрыва по массиву.

Такая расчетная схема непосредственно вытекает из схемы VII при замене одной из диагональных трещин поверхностью отрыва с углом наклона  $90^\circ$  и углом разворота относительно откоса  $(90 - \frac{\beta}{2})$ , как это принималось при решении схемы II.

После соответствующих преобразований расчетная аналитическая формула по определению высоты устойчивого откоса по данной расчетной схеме запишется в виде

$$h = m(1 + \sqrt{1 - n}) , \quad (163)$$

При  $r=0$  высота устойчивого откоса по данной расчетной схеме выводится из выражения (160) в виде

$$h_{r=0} = \frac{C_2' \cos \varphi_2' \sin \alpha}{\gamma \sin (\lambda_2 - \varphi_2') \sin (\alpha - \lambda_2)} \left\{ 1 - \frac{\sin \lambda_1 \sin \lambda_2}{C_2' \cos (\lambda_1 - \lambda_2)} \times \left[ \frac{C_1' \cos \varphi_1'}{\sin \lambda_1 \sin (\lambda_1 - \varphi_1')} + \frac{2C \cos \varphi \sin \frac{\beta_1}{2}}{\sin (\lambda_1 - \varphi)} \right] \right\} . \quad (165)$$

Когда диагональная крутопадающая поверхность ослабления подрезается только по линии простирания откоса и не подрезается по падению, то согласно формуле (158) (в этом случае  $\alpha = \lambda_1$ )

$$h = m'(1 + \sqrt{1 - n'}) , \quad (166)$$

где

$$m' = \frac{C_2' \cos \varphi_2' \sin \lambda_1}{\gamma \sin (\lambda_2 - \varphi_2') \sin (\lambda_1 - \lambda_2)} ;$$

$$n' = \left\{ 1 - \frac{\sin \lambda_1 \sin \lambda_2}{C_2' \cos (\lambda_1 - \lambda_2)} \left[ \frac{C_1' \cos \varphi_1'}{\sin \lambda_1 \sin (\lambda_1 - \varphi_1')} + \frac{2C \cos \varphi \sin \frac{\beta_1}{2}}{\sin (\lambda_1 - \varphi)} \right] \right\}^2 .$$

Необходимо отметить, что при  $\beta_1 = 0^\circ$  рассматриваемая схема переходит в схему IV.

### III.3. ГРАФИЧЕСКАЯ ИНТЕРПРЕТАЦИЯ АНАЛИТИЧЕСКИХ СПОСОБОВ РАСЧЕТА УСТОЙЧИВОСТИ ОТКОСОВ УСТУПОВ И БОРТОВ КАРЬЕРОВ В АНИЗОТРОПНОЙ СРЕДЕ

Рассмотренные выше способы расчета устойчивости откосов с учетом поверхностей ослабления характеризуются сравнительно большой сложностью конечных формул. Особенно это относится к тем формулам, где используется много исходных данных. Решение подобных формул в конкретных случаях требует больших затрат времени. Применение ЭВМ не всегда экономически целесообразно, а в производственных условиях при необходимости определения параметров устойчивого откоса по данным съемки трещиноватости на каком-либо участке карьера при выбранной расчетной схеме использование ЭВМ вообще невозможно. Оперативно оценить устойчивость откоса в конкретной ситуации возможно только с помощью каких-либо типовых или разработанных заранее номограмм. При подготовке данных для построения номограмм при наличии большого числа вариантов необходимо использовать ЭВМ.

Точность расчета неизвестных параметров по номограммам ниже точности аналитических способов расчета, но, однако, подбор оптимального масштаба по соответствующим осям может обеспечить такую точность, которая достаточна для инженерных расчетов. Для составления номограмм имеющиеся формулы необходимо несколько изменить, придав им вид, более пригодный для номограммирования.

Ниже приводятся построенные номограммы для некоторых формул по разработанным расчетным схемам, сравнительно просто поддающихся номограммированию.

По схеме I расчета устойчивости при подрезке откосом уступа одной системы продольных трещин формулы (71) и (72) для определения высоты устойчивого откоса  $h$  и ширины призмы возможного обрушения  $r$  преобразуем в следующий вид:

$$h = \frac{C}{\gamma} h'; \quad r = \frac{C'}{\gamma} r', \quad (167)$$

где

$$h' = r'K; \quad K = \frac{1}{\operatorname{ctg} \lambda - \operatorname{ctg} \alpha};$$

$$r' = \frac{2 \cos \varphi'}{\sin \lambda \sin (\lambda - \varphi')}.$$

Тогда условные величины  $h'$  и  $r'$  находятся из номограммы, показанной на рис. 38.

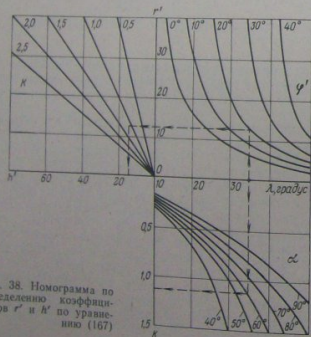


Рис. 38. Номограмма по определению коэффициентов  $r'$  и  $h'$  по уравнению (167)

При заоткоске борта карьера положе крутопадающих контактов слоев пород продольного с откосом залегания (см. схему II, а) для построения соответствующих номограмм необходимо формулу (84) привести к виду

$$H = \frac{C}{\gamma} A' \left[ 1 + \sqrt{1 - B' \left( 1 - \frac{C'}{C} D \right)^2} \right], \quad (168)$$

где

$$A' = A_1 A_2 = \frac{2 \sin \alpha \cos \varphi'}{\sin (\lambda - \alpha) \sin (\lambda - \varphi')} \frac{1}{[\operatorname{tg} \mu \operatorname{ctg} (\lambda - \alpha) - 1]};$$

$$B' = B_1 B_2 = \frac{1}{[\operatorname{ctg} \mu + \operatorname{ctg} (\lambda - \alpha)]} \frac{\sin \lambda}{\sin \alpha \sin (\lambda - \alpha)};$$

$$D' = D_1 D_2 = \frac{\sin (\alpha - \mu) \sin (\alpha + \mu)}{\cos \varphi} [\operatorname{ctg} \lambda - \operatorname{ctg} (\alpha + \mu)].$$

Формула (168) гораздо сложнее предыдущей и коэффициенты  $A'$ ,  $B'$ ,  $D'$  требуют построения отдельных номограмм. Все они приведены на рис. 39, 40, 41. Порядок нахождения входящих коэффициентов через промежуточные величины  $l$ ,  $s$ ,  $q$ ,  $m$  показан на номограммах стрелками.

Когда заоткоска борта карьера производится по наслоению пород (схема II, б), формула (86) для построения номограммы запишется в виде

$$H = \frac{2C}{\gamma} A'' \left[ 1 + \sqrt{1 - \left( 1 - \frac{C'}{1-2C} D'' \right)^2} \right], \quad (169)$$

где

$$A'' = \frac{\operatorname{ctg} \mu}{1 - \operatorname{ctg} \alpha \operatorname{tg} \varphi'}; \quad D'' = 1 - \operatorname{ctg} \alpha \operatorname{tg} \varphi.$$

Номограмма, показанная на рис. 42, состоит всего из двух квадрантов.

Когда в массиве горных пород залегают две системы продольных по отношению к откосу трещин — крутопадающая и подсекающая (см. схему IV, а, табл. 23), для построения номограмм коэффициенты  $d$ ,  $m$  и  $n$  в формуле (105) разбиваем на произведения  $d_1 d_2$ ,  $m_1 m_2$ ,  $n_1 n_2$ . Затем строим три номограммы (рис. 43, 44, 45).

Если заоткоска уступа производится параллельно крутопадающим трещинам (схема IV, б), то в формуле (107) коэффициент  $n$  находится по номограмме на рис. 45, коэффициент  $d'$  как произведение  $d_1 d_2$  по номограмме на рис. 43, где вместо углов откоса  $\alpha$  нужно использовать углы  $\lambda_2$ .

При подрезке откосом двух систем диагональных трещин (схема V, табл. 23) формулу (117) по определению ширины призмы возможного обрушения разложим на два слагаемых

$$r = \frac{C'_1}{\gamma} A + \frac{C'_2}{\gamma} B, \quad (170)$$

где

$$A = A_1 A_2 = \frac{3}{\cos \psi (\lg \psi - \lg \psi'_1)} \cdot \frac{\sin \beta_2}{\sin \lambda_1 \sin (\beta_1 + \beta_2)};$$

$$B = B_1 B_2 = \frac{3}{\cos \psi (\lg \psi - \lg \psi'_2)} \cdot \frac{\sin \beta_1}{\sin \lambda_2 \sin (\beta_1 + \beta_2)}.$$

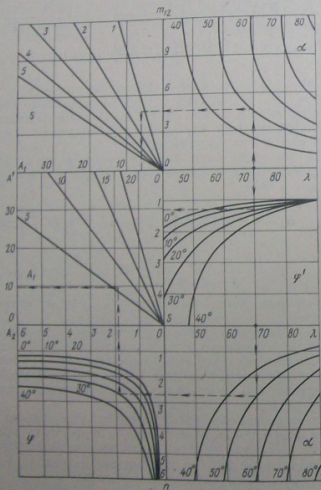


Рис. 39. Номограмма по определению коэффициента  $A'$  по уравнению (168)

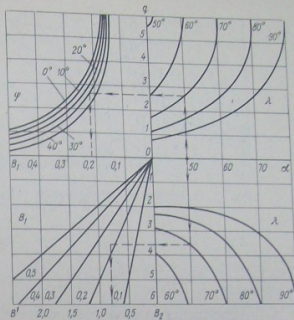


Рис. 40. Номограмма по определению коэффициента  $B'$  по уравнению (168)

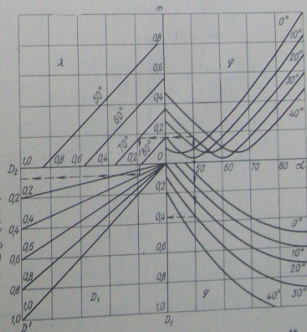


Рис. 41. Номограмма по определению коэффициента  $D'$  по уравнению (168)

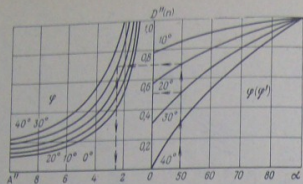


Рис. 42. Номограмма по определению коэффициентов  $A''$  и  $D''$  по уравнению (169)

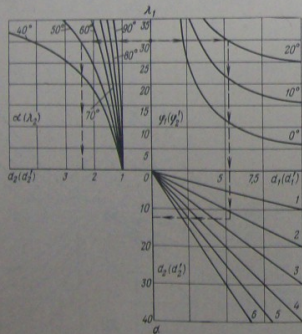


Рис. 43. Номограмма по определению коэффициента  $d$  по уравнению (105)



Рис. 44. Номограмма по определению коэффициента  $m$  по уравнению (105)

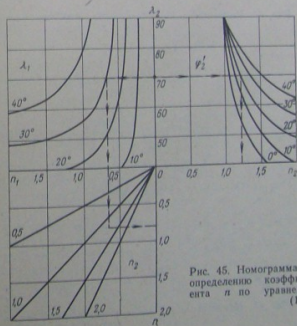


Рис. 45. Номограмма по определению коэффициента  $n$  по уравнению (105)

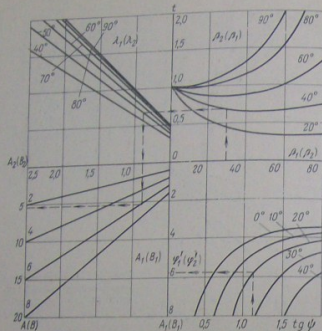


Рис. 46. Номограмма по определению коэффициентов  $A$  и  $B$  по уравнению (170)

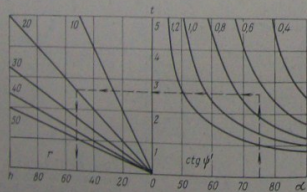


Рис. 47. Номограмма по определению высоты откоса  $h$  по уравнению (171)

Построенная на рис. 46 номограмма для коэффициентов  $A$  и  $B$  состоит из четырех квадрантов. Высота устойчивого откоса  $h$  согласно формуле

$$h = rt, \quad (171)$$

где

$$t = \frac{1}{\text{ctg } \psi' - \text{ctg } \alpha},$$

легко находится по номограмме на рис. 47, состоящей из двух квадрантов. Углы  $\psi$  и  $\psi'$  удобнее всего находить по стереографической сетке Вульфа или Каврайского, используя элементы залегания системы трещин и поверхности откоса.

Когда массив горных пород расчленяют три основные системы трещин, из которых одна подсекающая, а две другие — диагональные крутопадающие, соответствующую формулу (155) преобразуем в такой вид

$$h = \frac{C_3'}{\gamma} a \left[ 1 + \sqrt{1 - b \left( \frac{C_1'}{C_3} K - \frac{C_2'}{C_3} L - 1 \right)^2} \right], \quad (172)$$

где

$$a = a_1 a_2 = \frac{\cos \varphi_3'}{\sin (\lambda_3 - \varphi_3')} \cdot \frac{\sin \alpha}{\sin (\alpha - \lambda_3)};$$

$$b = b_1 b_2 = \frac{\sin \psi'}{\sin (\psi' - \lambda_3)} \cdot \frac{\sin (\alpha - \lambda_3)}{\sin \alpha};$$

$$K = K_1 K_2 K_3 = \frac{\sin \lambda_3 \sin \psi'}{\cos (\psi' - \lambda_3)} \cdot \frac{\cos \varphi_1'}{\sin (\psi' - \varphi_1')} \cdot \frac{\sin \beta_2}{\sin \lambda_1 \sin (\beta_1 + \beta_2)};$$

$$L = L_1 L_2 L_3 = \frac{\sin \lambda_3 \sin \psi'}{\cos (\psi' - \lambda_3)} \cdot \frac{\cos \varphi_2'}{\sin (\psi' - \varphi_2')} \cdot \frac{\sin \beta_1}{\sin \lambda_2 \sin (\beta_1 + \beta_2)}.$$

Тогда номограммы для коэффициентов  $a$  и  $b$ , показанные на рис. 48, 49, будут состоять из трех квадрантов, а для коэффициентов  $K$  и  $L$  составляется одна номограмма, состоящая из шести квадрантов (рис. 50). При заоткоске уступа параллельно линии скрещивания диагональных крутопадающих трещин ( $\alpha = \psi'$ , схема VII, табл. 23) коэффициент  $b = 1$ , коэффициенты  $K$  и  $L$  определяются по номограмме на рис. 50. Коэффициент  $a$  вычисляется по номограмме, показанной на рис. 48, с заменой угла  $\alpha$  на угол  $\psi'$ .



### III.4. ПАРАМЕТРЫ ВЕРТИКАЛЬНОГО ОТКОСА

Основным видом деформаций откосов уступов, сложенных скальными трещиноватыми породами, являются обрушения. Объем распространения обрушений зависит от высоты откоса и наличия в массиве поверхностей ослабления, представленных трещинами отдельности большого протяжения или контактно-трещинами отдельности прочностных характеристиках пород. При определенных прочностных характеристиках пород вероятность обрушения увеличивается при увеличении угла наклона откоса и достигает максимума при  $\alpha = 90^\circ$ . В свою очередь, на высоту вертикального откоса  $H_n$  и ширину призмы возможного обрушения  $r_0$  оказывает влияние пространственная ориентировка поверхностей ослабления. Надо полагать, что чем больше угол разворота трещин  $\beta$  относительно откоса, тем большую устойчивость будет иметь вертикальный откос.

Известные в практике расчетные формулы по определению высоты вертикального откоса применимы только для изотропной среды, так как не учитывают влияния возможных поверхностей ослабления в массиве горных пород. Кроме того, в этих формулах не учитывается сопротивление пород отрыву [91].

С учетом  $E = \sigma_p H_{90}$  (рис. 51, а) условие равновесия призмы ABCD будет

$$P \cos \left( 45^\circ - \frac{\varphi}{2} \right) = P \sin \left( 45^\circ - \frac{\varphi}{2} \right) \operatorname{tg} \varphi + Cl + \frac{\sigma_p H_{90}}{\sin \left( 45^\circ - \frac{\varphi}{2} \right)}, \quad (173)$$

где  $P = \gamma \frac{H_n + H_{90}}{2} l \sin \left( 45^\circ - \frac{\varphi}{2} \right)$  — масса призмы, т;  $l = \frac{H_n - H_{90}}{\cos \left( 45^\circ - \frac{\varphi}{2} \right)}$  — длина линии скольжения, м;  $H_{90}$  — глубина

возникновения площадки скольжения AD, м;  $H_n$  — высота вертикального обнажения, м;  $\sigma_p$  — временное сопротивление горных пород отрыву, Па.

После соответствующих преобразований получаем квадратное уравнение

$$H_n^2 - 2H_{90}H_n + H_{90}^2 \left[ 1 - \frac{2\sigma_p \operatorname{ctg} \left( 45^\circ - \frac{\varphi}{2} \right)}{c} \right] = 0,$$

из которого предельная высота вертикального откоса с учетом сопротивления отрыву

$$H_n = H_{90} \left[ 1 + \sqrt{\frac{2\sigma_p \operatorname{ctg} \left( 45^\circ - \frac{\varphi}{2} \right)}{c}} \right]. \quad (174)$$

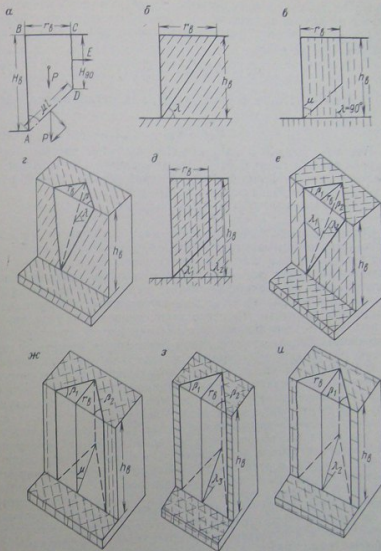


Рис. 51. Схемы расчета устойчивости вертикального откоса в скальных породах с учетом поверхностей ослабления

Необходимо отметить, что величина сопротивления отрыву сопоставима со сцеплением только для песчано-глинистых пород. Для таких пород, в механике грунтов пользуются упрощенной диаграммой, принимая огибающую больших кругов

Мора за прямую линию. В этом случае разрушающее напряжение на разрыв  $\sigma_p$  связано с прочностными характеристиками пород — сцеплением  $C$  и углом внутреннего трения  $\varphi$  — приближенной зависимостью

$$\sigma_p = 2c \operatorname{tg} \left( 45^\circ - \frac{\varphi}{2} \right). \quad (175)$$

Подставив (175) в формулу (174), для мягких пород получаем

$$H_n = 3H_{90}. \quad (176)$$

Породы скальные и полускальные, разбитые частой сетью трещин, подобно сыпучей среде имеют сравнительно небольшую величину сопротивления отрыву, которой можно пренебречь. В этом случае согласно формуле (174)

$$H_n \approx H_{90}.$$

Обследование фактического состояния устойчивости откосов при ведении открытых работ показывает, что массив вмещающих скальных и полускальных горных пород, имеющий поверхность ослабления в виде трещин большого протяжения, контактов слоев, тектонических трещин, не имеет вертикальных откосов высотой, равной  $3H_{90}$ . Дело в том, что в формуле для определения величины  $H_{90}$  используют сцепление и угол внутреннего трения, характерные для массива вкрест простирания поверхностей ослабления. При этом сцепление в массиве в несколько раз больше, чем сцепление по поверхностям ослабления. Практически площадки скольжения в некоторых случаях могут проявляться с поверхности. Разработанные выше аналитические решения по определению параметров устойчивых откосов позволяют определить предельную высоту вертикального откоса  $h_n$  и ширину призмы возможного обрушения  $r_n$  с учетом прочностной ориентировки по поверхностям ослабления, их пространственное управление высотой вертикального обнажения пород позволит управлять обрушением уступов в скальных и полускальных породах. В последнее время при открытой разработке месторождений внедряется такой вид их отработки, который основан на способности горных пород обрушаться под действием собственного веса и позволяющий резко повысить эффективность открытых горных работ.

Рассмотрим все возможные схемы к расчету предельной высоты вертикального обнажения горных пород относительно расчетных методов, вытекающие из приведенных выше

При подрезке вертикальным откосом уступа системы продольных трещин (рис. 51, б) из выражения (71) следует, что

$$h_n = \frac{2C \cos \varphi'}{\gamma \cos \lambda \sin (\lambda - \varphi')}. \quad (177)$$

Выше мы показывали, что ширина призмы возможного обрушения для рассматриваемой схемы не зависит от параметров откоса ( $h$  и  $a$ ), поэтому ширина  $r_n$  также определяется по формуле (72).

Когда заоткоска уступов производится по контактам слоев горных пород, залегающим вертикально (рис. 51, в), в этом случае согласно выражениям (86) и (87)

$$h_n = H_{90} \left[ 1 + \sqrt{\frac{C'}{C} \left( 1 - \frac{C'}{4C} \right)} \right], \quad (178)$$

$$r_n = \frac{1}{\gamma} \left[ C' + 2\sqrt{C' \left( C - \frac{C'}{4} \right)} \right]. \quad (179)$$

При ширине призмы возможного обрушения, равной нулю, из формулы (91)

$$h_{n\varphi=0} = H_{90} \left( 1 - \frac{C'}{2C} \right). \quad (180)$$

Если вертикальным откосом подрезается система диагональных трещин (рис. 51, г), то его высота определяется по формуле, вытекающей из формулы (103),

$$h_n = \frac{3}{\gamma} \sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \lambda \cos^2 \frac{\beta}{2}} \left[ \frac{2C \sin \frac{\beta}{2}}{\cos \frac{\beta}{2} - \operatorname{ctg} \lambda \operatorname{tg} \varphi} + \frac{C'}{\sin \lambda \left( \cos \frac{\beta}{2} - \operatorname{ctg} \lambda \operatorname{tg} \varphi' \right)} \right], \quad (181)$$

а ширина призмы возможного обрушения

$$r_n = h_n \operatorname{ctg} \lambda. \quad (182)$$

При наличии в массиве уступа двух систем продольных по отношению к откосу систем трещин, из которых одна подсекающая, а другая вертикальная (рис. 51, д), высота вертикального откоса  $h_n$  определится из выражения (107) как

$$h_n = \frac{\cos \varphi'_1}{\gamma \sin (\lambda_1 - \varphi'_1) \cos \lambda_1} \left[ C'_1 + \sqrt{C'_2 (2C'_1 - C'_2)} \right], \quad (183)$$

а из выражения (108)

$$r_n = \frac{\operatorname{ctg} \lambda_1}{\gamma} \left[ C'_2 + \sqrt{C'_2 (2C'_1 - C'_2)} \right]. \quad (184)$$

Минимальная высота вертикального откоса при  $r_n=0$  в этом случае определяется по формуле, вытекающей из выражения (110).

$$h_{n=0} = \frac{\cos \varphi'_1 (C'_1 - C'_2)}{\gamma \sin (\lambda_1 - \varphi'_1) \cos \lambda_1}. \quad (185)$$

Когда вертикальным откосом подрезаются две системы диагональных поверхностей ослабления наклонного залегания (рис. 51, е) с различными прочностными характеристиками по ним, высота вертикального откоса из выражения (116) определяется как

$$h_n = \frac{3\sqrt{1+\operatorname{tg}^2\psi}}{\gamma \operatorname{tg}\psi \sin(\beta_1 + \beta_2)} \left[ \frac{C'_1 \sin \beta_2}{\sin \lambda_1 (\operatorname{tg}\psi - \operatorname{tg}\varphi'_1)} + \frac{C'_2 \sin \beta_1}{\sin \lambda_2 (\operatorname{tg}\psi - \operatorname{tg}\varphi'_2)} \right], \quad (186)$$

а ширина призмы возможного обрушения  $r_n$  находится по формуле (117).

В практике встречаются случаи, когда в массиве горных пород находятся две системы диагональных поверхностей ослабления вертикального залегания. Здесь высота вертикального откоса будет определяться глубиной возникновения площадок скольжения, выходящих в откос под углом  $(45^\circ - \frac{\varphi}{2})$  (рис. 51, ж). Тогда согласно формуле (140)

$$h_n = \frac{4C \cos \mu}{\gamma} (1 + \sqrt{1 - b'_1}), \quad (187)$$

где

$$b'_1 = \left[ 1 - \frac{C'_1 \sin \beta_2 + C'_2 \sin \beta_1}{2C \sin(\beta_1 + \beta_2)} \right]^2.$$

Ширина призмы возможного обрушения в этом случае, исходя из выражения (141),

$$r_n = \frac{2C}{\gamma} (1 + \sqrt{1 - b'_1} - \sqrt{b'_1}). \quad (188)$$

При  $r_n=0$

$$h_{n=0} = \frac{c \operatorname{tg} \mu}{\gamma} \left[ 2C - \frac{C'_1 \sin \beta_2 + C'_2 \sin \beta_1}{\sin(\beta_1 + \beta_2)} \right]. \quad (189)$$

Если помимо двух систем диагональных поверхностей ослабления вертикального залегания в массиве горных пород присутствует система подсекающих трещин, согласно падающая с

откосом (рис. 51, з), то высота вертикального откоса определяется согласно формуле (158) как

$$h_n = \frac{C'_3 \cos \varphi'_3}{\gamma \sin(\lambda_3 - \varphi'_3) \cos \lambda_2} (1 + \sqrt{1 - N'_1}), \quad (190)$$

где

$$N'_1 = \left[ 1 - \frac{C'_1 \sin \beta_2 + C'_2 \sin \beta_1}{C'_3 \sin(\beta_1 + \beta_2)} \right]^2.$$

Ширина призмы возможного обрушения вертикального откоса

$$r_n = \frac{C'_3 \cos \varphi'_3}{\gamma \sin(\lambda_3 - \varphi'_3) \sin \lambda_2} (1 + \sqrt{1 - N'_1} - \sqrt{N'_1}). \quad (191)$$

При  $r_n=0$

$$h_{n=0} = \frac{\cos \varphi'_3}{\gamma \sin(\lambda_3 - \varphi'_3) \cos \lambda_2} \left[ C'_3 - \frac{C'_1 \sin \beta_2 + C'_2 \sin \beta_1}{\sin(\beta_1 + \beta_2)} \right]. \quad (192)$$

Одним из вариантов взаимного расположения поверхностей ослабления в скальном массиве может быть такой, когда одна система вертикальна и диагональна по отношению к откосу, а другая — продольная наклонная и согласно падающая с откосом (рис. 51, и). Здесь высота вертикального откоса может быть определена по формуле, вытекающей из выражения (166), как

$$h_n = \frac{C'_2 \cos \varphi'_2}{\gamma \sin(\lambda_2 - \varphi'_2) \cos \lambda_2} (1 + \sqrt{1 - n'_1}), \quad (193)$$

где

$$n'_1 = \left[ 1 - \frac{C'_1 + 2C \sin \frac{\beta_1}{2}}{C'_2} \right]^2.$$

При  $\beta_1=0^\circ$  рассматриваемая схема переходит в схему, показанную на рис. 51, д.

Ширина призмы возможного обрушения

$$r_n = \frac{C'_2 \cos \varphi'_2}{\gamma \sin(\lambda_2 - \varphi'_2) \sin \lambda_2}. \quad (194)$$

И, наконец, при  $r_n=0$

$$h_{n=0} = \frac{\cos \varphi'_2}{\gamma \sin(\lambda_2 - \varphi'_2) \cos \lambda_2} (C'_2 + C'_1 + 2C \sin \frac{\beta_1}{2}). \quad (195)$$

Приведенные аналитические исследования показывают, что высота вертикального откоса в скальных породах, расчлененных различного рода трещинами и контактами слоев, в основном зависит от пространственного расположения их по отношению к откосу, от прочностных характеристик пород по поверхностям ослабления. Конкретные расчеты показывают, что  $h_{\text{в}}$ , вычисленные по предлагаемым формулам, всегда меньше  $H_{90}$ , определенные по прочности массива горных пород без учета деляемой, исходя из прочности массива горных пород без учета поверхностей ослабления.

### III.5. ГРАНИЧНЫЕ УСЛОВИЯ ВЛИЯНИЯ ПОВЕРХНОСТЕЙ ОСЛАБЛЕНИЯ НА УСТОЙЧИВОСТЬ ОТКОСОВ

Как отмечалось выше, в условиях скальных трещиноватых пород устойчивость откосов обуславливается в основном пространственной ориентировкой трещин различного происхождения и прочностными характеристиками пород по трещинам. В определенных условиях при решении задачи устойчивости откосов скальных пород необходимо учитывать влияние диагональных и даже поперечных трещин. В то же время в некоторых случаях продольные трещины могут не реализоваться в поверхности обрушения. Несомненно, существуют какие-то предельные значения углов разворота трещин  $\beta_{\text{пр}}$  в плане по отношению к откосу, свыше которых трещины не оказывают влияния на устойчивость последних. Величина  $\beta_{\text{пр}}$  зависит от угла наклона откоса и трещин, соотношения прочностных характеристик по поверхностям трещин и в массиве горных пород. Нахождение этих углов возможно сравнением для одних и тех же условий высот устойчивых откосов, вычисленных с учетом поверхностей ослабления и без их учета. Проанализируем в этом направлении все разработанные нами расчетные схемы, имеющие диагональное расположение поверхностей ослабления по отношению к откосу.

Одна система диагональных поверхностей ослабления может реализоваться в поверхности скольжения только при их подрезке откосом. При этом призма возможного обрушения, устойчивость которой рассматривается, образуется одной из поверхностей ослабления этой системы и вертикальной поверхностью отрыва в массиве. Высота устойчивого откоса определяется по выражению (97). При углах разворота в плане  $\beta_i > \beta_{\text{пр}}$  относительно откоса, например, трещины большого протяжения в массиве даже с их сравнительно небольшой прочностью не влияют на устойчивость откоса, а задача устойчивости в этом случае решается как в изотропной среде с использованием прочностных характеристик только массива горных пород. Поэтому для нахождения  $\beta_{\text{пр}}$  приравняем значения для  $h$  из выражений (97)

и (60), используя метод [99]. Тогда получим выражение функции  $\beta_{\text{пр}} = f\left(\alpha, \lambda, \frac{C'}{C}, \varphi', \varphi\right)$ , записанное в неявном виде как

$$H_1 = \frac{3 \sqrt{\cos^2 \frac{\beta_{\text{пр}}}{2} + \text{ctg}^2 \lambda}}{(\text{ctg} \lambda - \text{ctg} \alpha)} \left[ \frac{2 \sin \frac{\beta_{\text{пр}}}{2}}{\cos \frac{\beta_{\text{пр}}}{2} - \text{ctg} \lambda \text{tg} \varphi} + \frac{C'}{C \sin \lambda \left( \cos \frac{\beta_{\text{пр}}}{2} - \text{ctg} \lambda \text{tg} \varphi' \right)} \right]. \quad (196)$$

Например, на рис. 52 представлены графики  $h=f(\alpha, \beta)$  и  $H=F(\alpha)$  при  $C=57,4 \cdot 10^4$  Па;  $C'=8 \cdot 10^4$  Па;  $\varphi=30^\circ$ ;  $\varphi'=16^\circ$ ;  $\gamma=2,72 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup>,  $\lambda=40^\circ$  (характеристики скальных пород Карагайлинского карьера).

Графическое сравнение дает следующие значения углов предельного влияния трещин на устойчивость откоса: при  $\alpha=50^\circ$   $\beta_{\text{пр}}=29^\circ$ , при  $\alpha=60^\circ$   $\beta_{\text{пр}}=31^\circ$  и т. д. Решение формулы (196) для пород Карагайлинского карьера позволило получить значения  $\beta_{\text{пр}}$  при изменении углов наклона трещин и откоса от  $40$  до  $90^\circ$ , приведенные в табл. 24.

Как видно из табл. 24, при данной прочности горных пород на устойчивость откосов влияют только трещины, секущие откос под острым углом к его простиранию. С уменьшением прочности пород по трещинам их предельный угол разворота увеличивается, что видно из данных табл. 25.

При  $C' \rightarrow C$  диагональные трещины не влияют на устойчивость откосов, так как в этом случае  $\beta_{\text{пр}} \rightarrow 0^\circ$ . Максимальное значение  $\beta_{\text{пр}}$  наблюдается при угле наклона откоса  $\alpha=60-70^\circ$ .

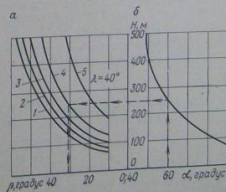


Рис. 52. Зависимость  $h=f(\alpha)$  для условий Карагайлинского карьера:  
а — с учетом углов разворота трещин; б — без учета трещиноватости;  
1 —  $\alpha=90^\circ$ ; 2 —  $\alpha=80^\circ$ ; 3 —  $\alpha=70^\circ$ ;  
4 —  $\alpha=60^\circ$ ; 5 —  $\alpha=50^\circ$

Таблица 24

Предельные углы разворота трещин  $\beta_{пр}$  при изменении угла наклона откоса  $\alpha$  и трещины  $\lambda$

$\alpha$ , градус	$\lambda$ , градус					
	40	50	60	70	80	90
50	29					
60	31	22				
70	28	25	14			
80	23	28	22	10		
90	10	23	19	12	0	

Таблица 25

Предельные углы разворота трещин  $\beta_{пр}$  при изменении угла наклона откоса  $\alpha$  и отношения сцепления по трещинам  $\frac{C'}{C}$

$\alpha$ , градус	$\frac{C'}{C}$							
	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7
50	25	22,5	19,5	15	10,5	7	2,5	0
60	27	25	22	19	15	11	7,5	2,5
70	27	25	22	19	15	11	7,5	2,5
80	23	21	17,5	14	10	5	0	0
90	15	11	7	3				

При подрезке откосом уступа двух систем диагональных трещин  $\beta_{пр}$  находится из равенства выражений (116) и (60) по формуле, записанной в неявном виде, как

$$H_1 = \frac{3\sqrt{1+tg^2\psi}}{C \sin(\beta_{1пр} + \beta_{2пр})(ctg\psi' - ctg\alpha)} \times \left[ \frac{C_1 \sin \beta_{2пр}}{\sin \lambda_1 (tg\psi - tg\varphi_1)} + \frac{C_2 \sin \beta_{1пр}}{\sin \lambda_2 (tg\psi - tg\varphi_2)} \right] \quad (197)$$

где

$$tg\psi = \frac{\sin(\beta_{1пр} + \beta_{2пр})}{\sqrt{ctg^2\lambda_1 + ctg^2\lambda_2 - 2ctg\lambda_1 ctg\lambda_2 \cos(\beta_{1пр} + \beta_{2пр})}};$$

$$ctg\psi' = \frac{\sin \beta_{1пр} ctg\lambda_2 + \sin \beta_{2пр} ctg\lambda_1}{\sin(\beta_{1пр} + \beta_{2пр})}$$

В этом выражении предельный угол разворота одной системы трещин может определяться лишь при одном значении угла

в другой системы трещин. Если же откос расположен в плане симметрично относительно обеих систем трещин ( $\beta_1 = \beta_2$ ), то в этом случае  $\beta_{пр}$  определяется из выражения

$$H_1 + \frac{3\sqrt{1+tg^2\psi}}{2C \cos \beta_{пр}(ctg\psi' - ctg\alpha)} \left[ \frac{C_1}{\sin \lambda_1 (tg\psi - tg\varphi_1)} + \frac{C_2}{\sin \lambda_2 (tg\psi - tg\varphi_2)} \right] \quad (198)$$

где

$$tg\psi = \frac{2 \sin \beta_{пр}}{\sqrt{ctg^2\lambda_1 + ctg^2\lambda_2 - 2ctg\lambda_1 ctg\lambda_2 \cos 2\beta_{пр}}};$$

$$ctg\psi' = \frac{ctg\lambda_1 + ctg\lambda_2}{2 \cos \beta_{пр}}$$

Когда прочностные характеристики пород по трещинам одинаковы ( $C_1 = C_2 = C'$  и  $\varphi_1 = \varphi_2 = \varphi'$ ), формула (198) значительно упрощается

$$H_1 = \frac{3\sqrt{1+tg^2\psi} (\operatorname{cosec}\lambda_1 + \operatorname{cosec}\lambda_2) C'}{2C \cos \beta_{пр}(ctg\psi' - ctg\alpha)(tg\psi - tg\varphi')} \quad (199)$$

Если угол наклона меньше или равен углу наклона линии скрещивания диагональных трещин, то для определения предельных углов разворота трещин также необходимо приравнять формулу (60) к выражению (134) или (140). В обоих случаях углы  $\beta_{пр}$  запишутся в неявном виде, а конкретные их значения удобнее находить построением соответствующих графиков.

При наличии в массиве уступа двух систем диагональных крутопадающих трещин и третьей продольной подсекающей предельный угол разворота трещин можно найти, руководствуясь следующими соображениями. Когда  $\beta_i > \beta_{пр}$ , устойчивость откоса будет определяться только подсекающей трещиной, а его высота находится по формуле (71). Таким образом, пределы влияния диагональных трещин при заоткоске уступа положе или параллельно их линии скрещивания нужно находить, приравняв выражения (71) и (155) или (71) и (158). Здесь также функции  $\beta_{пр}$  от элементов залегания трещин и прочностных характеристик по ним запишутся в неявном виде. В первом случае из равенства (71) и (155) получаем, что  $N=0$ .

Откуда

$$\frac{C_3 \cos(\psi' - \lambda_3) \sin(\beta_{1пр} + \beta_{2пр})}{\sin \lambda_3 \sin \psi'} = \frac{C_1 \cos \varphi_1 \sin \beta_{2пр}}{\sin \lambda_1 \sin(\psi' - \varphi_1)} + \frac{C_2 \cos \varphi_2 \sin \beta_{1пр}}{\sin \lambda_2 \sin(\psi' - \varphi_2)} \quad (200)$$

Необходимо отметить, что при равенстве выражений (71) и (158) также получается выражение (200), т. е. пределы влияния диагональных трещин по обеим рассматриваемым схемам одинаковы.

При симметричном расположении откоса в плане относительно диагональных трещин  $\beta_{np}$  находится из выражения

$$\frac{2C'_3 \cos(\psi' - \lambda_3) \cos \beta_{np}}{\sin \lambda_3 \sin \psi'} = \frac{C'_1 \cos \varphi'_1}{\sin \lambda_1 \sin(\psi' - \varphi'_1)} + \frac{C'_2 \cos \varphi'_2}{\sin \lambda_2 \sin(\psi' - \varphi'_2)} \quad (201)$$

где

$$\operatorname{ctg} \psi' = \frac{\operatorname{ctg} \lambda_3 + \operatorname{ctg} \lambda_2}{2 \cos \beta_{np}}$$

При одинаковых прочностных характеристиках горных пород по диагональным трещинам выражение (201) принимает вид

$$1 = \frac{C' \sin \lambda_3 \sin \psi' \cos \varphi' (\operatorname{cosec} \lambda_3 + \operatorname{cosec} \lambda_2)}{2C'_3 \cos(\psi' - \lambda_2) \cos \beta_{np} \sin(\psi' - \varphi')} \quad (202)$$

Рассмотрим зависимость  $\beta_{np}$  от отношения сцепления пород по диагональным и подсекающим трещинам  $\frac{C'}{C_3}$  при следую-

щих исходных данных:  $\lambda_1 = 50^\circ$ ;  $\lambda_2 = 70^\circ$ ;  $\lambda_3 = 30^\circ$ ;  $\varphi' = 16^\circ$ .

Эта зависимость, представленная на рис. 53, показывает, что при  $\frac{C'}{C_3} \rightarrow 0$   $\beta_{np} \rightarrow 80^\circ$ , т. е. в этом случае даже поперечные круто-

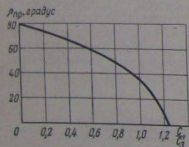


Рис. 53. Зависимость предельных углов разворота трещин  $\beta_{np}$  при изменении отношения  $\frac{C'}{C_3}$

падающие трещины оказывают влияние на устойчивость откосов.

При  $\frac{C'}{C_3} \rightarrow 1,25$   $\beta_{np} \rightarrow 0^\circ$ , т. е. при

этом продольные крутопадающие трещины могут не оказывать влияния на устойчивость откосов. В связи с этим возникает задача предварительной проверки расчетных схем устойчивости с учетом поверхностей ослабления не только объемного, но и плоского вида. Таким образом, наличие в массиве уступов и бортов карьеров диагональных трещин влия-

ет на устойчивость откосов только до некоторых значений  $\beta_{np}$ . В определенных условиях эти углы могут иметь значения от 0 до  $90^\circ$ . Применение той или иной расчетной схемы заоткоски борта карьера требует определения в первую очередь предельного угла влияния трещин соответственно по одной из предлагаемых формул. В противном случае применяемые расчетные схемы в некоторых случаях могут дать завышенные параметры устойчивых откосов.

Аналитических исследований по выявлению пределов влияния поверхностей ослабления на устойчивость откосов в вертикальной плоскости никем не проводилось. Однако необходимо отметить, что поверхность какой-либо трещины не реализуется в поверхность обрушения при двух совместных условиях: 1) угол наклона трещины  $\lambda$  меньше угла трения пород по трещине  $\varphi'$ ; 2) угол наклона откоса  $\alpha$  больше величины  $\left[ \left( 45^\circ - \frac{\varphi'}{2} \right) + \lambda \right]$ .

При  $\lambda > \varphi'$  поверхность трещины в любом случае является потенциальной поверхностью скольжения. При  $\alpha < \left[ \left( 45^\circ - \frac{\varphi'}{2} \right) + \lambda \right]$  поверхность трещины реализуется в поверхность скольжения, даже когда  $\lambda < \varphi'$ .

### III.6. АНАЛИТИЧЕСКОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ И УЧЕТ КОЭФФИЦИЕНТА ЗАПАСА УСТОЙЧИВОСТИ В РАСЧЕТАХ ВЫСОТЫ СКАЛЬНЫХ ОТКОСОВ

Разработанные выше аналитические формулы по определению предельно устойчивой высоты откосов скальных пород с учетом поверхностей ослабления являются расчетными. Для перехода от предельной расчетной высоты откоса к устойчивой его высоте, приемлемой для практики, необходимо использовать коэффициент запаса устойчивости. До сих пор большинство исследователей принимают коэффициент запаса устойчивости откосов как отношение сил удерживающих к сдвигающим силам. Но, как отмечено в работе [104], «Такая точка зрения на вопрос о величине  $\lambda_3$  в настоящее время должна считаться устаревшей, так как она имеет следующие два недостатка.

Во-первых, в некоторых случаях бывает трудно решить вопрос о том, к какой категории отнести данную силу: к категории удерживающих или к категории сдвигающих сил. Во-вторых, пользуясь указанным определением  $\lambda_3$ , нет возможности обоснованно установить численное значение допустимого коэффициента запаса  $\lambda_3$ .

С современной точки зрения под коэффициентом запаса  $\lambda_3$  устойчивости следует понимать специальный корректив, вводи-

мый в наш расчет с целью исправить все возможные погрешности, которые мы могли сделать, выполняя данный расчет».

Такая точка зрения совершенно правильна. И если изложенное выше положение принять за основу, то отношение устойчивости к сдвигающим силам можно считать так называемым коэффициентом устойчивости  $n_y$ , отличным от  $n_p$ . Поэтому нами принимается, что  $n_p$  служит для исключения всех возможных погрешностей при определении какого-либо параметра откоса, например его высоты, а  $n_y$  служит собственно для оценки его устойчивости.

Совершенно очевидно, что высота устойчивого откоса  $h_3$  с учетом коэффициента запаса  $n_3$  определяется как отношение предельной расчетной высоты к этому коэффициенту, т. е.

$$h_3 = \frac{h_p}{n_3}. \quad (203)$$

Такое положение было предложено в работах [17] и [68].

Коэффициент запаса  $n_3$  должен включать в себя в первую очередь погрешности определения прочностных характеристик горных пород в массиве и по трещинам, элементов залегания неблагоприятно ориентированных поверхностей ослабления, составляющих призмы возможного обрушения;  $n_3$  может учитывать погрешности методов расчетов, которые согласно исследованиям [99] составляют 3—5%, влияние динамических нагрузок при массовых взрывах, снижение прочности пород с течением времени под влиянием выветривания и набухания.

Динамические нагрузки при кратковременности их действия не оказывают существенного влияния на устойчивость откосов большой высоты (например, бортов карьеров), но влияют на устойчивость отдельных уступов. Однако при постановке уступов в проектный контур, для которых в основном и производят расчеты параметров, обработку приконтурной полосы осуществляют на уменьшенных зарядах, значительно снижая этим динамические нагрузки. Фактор времени, снижающий прочность скальных горных пород под влиянием выветривания, требует проведения длительных натурных наблюдений и в настоящее время не может быть учтен с количественной стороны. Поэтому в данной работе при определении  $n_3$  в первом приближении учитываются только факторы, непосредственно входящие в аналитические решения.

Представляется возможным определить  $n_3$ , основываясь на положениях теории погрешностей [52]. При этом вначале определяются средние квадратические погрешности нахождения параметров, входящих в расчетную формулу по вычислению предельной высоты откосов ( $h_p$ ): сцепления в массиве горных пород и по трещинам ( $m_c$ ), плотности пород ( $m_p$ ), углов внутреннего

трения в массиве и по трещинам ( $m_\phi$ ), углов наклона трещин ( $m_\lambda$ ) и углов разворота трещин относительно откоса ( $m_\beta$ ) и т. д.

В общем случае

$$m = \pm \sqrt{\frac{[\delta\delta]}{n-1}}, \quad (204)$$

где  $[\delta\delta] = \delta_1^2 + \delta_2^2 + \delta_3^2 + \dots + \delta_n^2$  — сумма квадратов истинных случайных погрешностей равноточных измерений;  $n$  — число измерений.

Затем определяется средняя квадратическая погрешность ( $m_h$ ) функции  $h_p = f(C, \phi, \gamma, \beta)$  по формуле

$$m_h = \pm \sqrt{\left(\frac{\partial h}{\partial C} m_C\right)^2 + \left(\frac{\partial h}{\partial \phi} m_\phi\right)^2 + \left(\frac{\partial h}{\partial \gamma} m_\gamma\right)^2 + \left(\frac{\partial h}{\partial \lambda} m_\lambda\right)^2 + \left(\frac{\partial h}{\partial \beta} m_\beta\right)^2}, \quad (205)$$

где  $\frac{\partial h}{\partial C}$ ,  $\frac{\partial h}{\partial \phi}$  и др. — частные производные.

Коэффициент запаса  $n_3$  представляет собой отношение расчетной высоты откоса  $h_p$  с учетом абсолютного значения  $m_h$  к расчетной высоте откоса без его учета, т. е.

$$n_3 = \frac{h_p + |m_h|}{h_p} = 1 + \frac{|m_h|}{h_p} \quad (206)$$

или  $n_3$  равняется единице плюс относительная погрешность вычисления высоты  $h_p$ .

Так как расчетные формулы, учитывающие трещиноватость горных пород, математически сложны и по ним затруднительно непосредственно находить частные производные, можно использовать известный классический метод [72] согласно которому общее уравнение представляется в виде суммы частных уравнений, если влияющие факторы поочередно изменять в определенных интервалах при неизменных средних прочих параметрах.

По вновь полученному общему уравнению легко находить

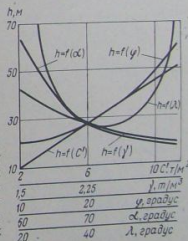


Рис. 54. Графики зависимости  $h$  от  $C, \gamma, \phi, \lambda$

Таблица 26

Результаты решений частных уравнений по формуле (71)

№ п/п	C', 10 <sup>3</sup> Па	γ · 10 <sup>-3</sup> кг/м <sup>3</sup>	φ', градус	α, градус	λ, градус	h <sub>p</sub> , м	Формула	m <sub>г</sub> , м	n <sub>3</sub>		n <sub>γ</sub>
									h <sub>2</sub> , м	h <sub>3</sub> , м	
1	2					9,2		6,8	1,724	5,3	1,416
2	4					18,4		6,8	1,369	13,4	1,210
3	6	2,25	70	40		27,6	$h_p = 4,6 C'$	6,8	1,246	22,1	1,140
4	8					36,8		6,8	1,185	31,1	1,102
5	10					46,0		6,8	1,148	40,1	1,082
6	1,5					31,0		6,8	1,164	35,5	1,092
7	2,0					41,3		6,8	1,219	25,4	1,124
8	3,0					49,8		6,8	1,274	19,4	1,157
9	3,0	20	70	40		24,8	$h_p = \frac{62,0}{\gamma}$	6,8	1,329	15,6	1,184
10	1,5	10				20,7		5,1	1,258	15,7	1,204
11	2,25	20	70	40		19,8	$h_p = 2,64 - 1,38\phi' + 0,072(\phi')^2$	6,8	1,246	22,1	1,140
12	30					27,6		10,21	1,205	41,4	1,064
13	50					49,8		6,8	1,105	58,5	1,060
14	6	2,25	20	70	50	27,6	$h_p = 283 - 6,16\alpha + 0,03588\alpha^2$	6,8	1,246	22,1	1,140
15	90					19,2		6,8	1,354	14,2	1,197
16	30					42,2		9,0	1,213	34,8	1,086
17	6	2,25	20	70	40	27,6	$h_p = 168,4 - 6,32\lambda + 0,07025\lambda^2$	6,8	1,246	22,1	1,140
18	50					27,6		6,8	1,246	22,1	1,172

частные производные, а следовательно, и погрешность  $m_h$ .

Рассмотрим часто встречающийся в практике случай подрезки откосом системы продольных согласно падающих трещин (см. рис. 27). Здесь  $h_p$  находится по формуле (71).

На рис. 54 представлены графики частных уравнений, имеющего вид кривых, а решение их сведено в табл. 26.

Согласно табл. 26 общее уравнение зависимости  $h_p = f(C', \phi', \gamma, \lambda, \alpha)$  запишется в виде

$$h_p = 477,8K_T + 4,6C' + \frac{62,0}{\gamma} - 1,38\phi' + 0,072(\phi')^2 - 6,16\alpha + 0,03588\alpha^2 - 6,32\lambda + 0,07025\lambda^2, \quad (207)$$

где  $K_T$  — коэффициент, обеспечивающий тождество этого выражения при подстановке в него конкретных значений всех остальных параметров.  $K_T$  находится решением выражения (207) для пяти вариантов, взятых из табл. 26, а данные этого решения сведены в табл. 27.

Окончательно

$$h_p = 367,3 + 4,6C' + \frac{62,0}{\gamma} - 1,38\phi' + 0,072(\phi')^2 - 6,16\alpha + 0,03588\alpha^2 - 6,32\lambda + 0,07025\lambda^2. \quad (208)$$

Отсюда

$$\frac{\partial h}{\partial C'} = 4,6; \quad \frac{\partial h}{\partial \gamma} = \frac{62}{\gamma^2};$$

$$\frac{\partial h}{\partial \phi'} = 0,144\phi' - 1,38;$$

$$\frac{\partial h}{\partial \alpha} = 0,07176\alpha - 6,16;$$

$$\frac{\partial h}{\partial \lambda} = 0,1405\lambda - 6,32.$$

По полученным значениям частных производных и, принимая  $m_c = \pm 1 \cdot 10^4$  Па;  $m_\gamma = 30$  кг/м<sup>3</sup>;  $m_\phi = m_\alpha = m_\lambda = \pm 3^\circ$ , согласно формуле (205) определяем погрешность  $m_h$ , затем по формулам (206) и (208) находим коэффициент запаса  $n_3$  и предельную высоту откоса с учетом этого коэффициента (см. табл. 26).

Из расчетов видно, что на погрешность определения высоты откоса  $m_h$  оказывают влияние в основном величина угла трения по трещине  $\phi'$  и угол ее наклона  $\lambda$ ; на коэффициент запаса  $n_3$  наибольшее влияние оказывает сцепление  $C'$ .

Далее проведем оценку устойчивости откоса высотой  $h_p$ . Коэффициент устойчивости откоса по рассматриваемой схеме как отношение сил, удерживающих и сдвигающих призму возможного обрушения, определяем нами по формуле (75).

Расчеты по формуле (75) также приведены в табл. 26, откуда видно, что  $n_\gamma > 1$  по всем вариантам. Подобные решения по определению  $n_3$  произведены по остальным расчетным схемам согласно их аналитическим решениям.

В табл. 28 приведены расчетные данные по определению  $m_h$ ,  $n_3$  и  $h_2$  только для средних значений параметров, входящих в исходные формулы через интервалы: сцепления по трещинам  $C'_t = (1 \div 10) \cdot 10^4$  Па; угла трения по трещинам  $\phi' = 10 \div 30^\circ$ ; сцепления в массиве  $C = (2 \div 6) \cdot 10^5$  Па; угла внутреннего трения в массиве  $\phi = 20 \div 40^\circ$ ; средней плотности  $\gamma = (1,5 \div 3,5) \times 10^3$  кг/м<sup>3</sup>; угла наклона откоса  $\alpha = 30 \div 90^\circ$ ; углов разворота трещин относительно откоса  $\beta_1 = 10 \div 70^\circ$ ; угла наклона поверхностей ослабления  $\lambda_i = 30 \div 90^\circ$ . При этом погрешности определения исходных параметров приняты прежние (табл. 28).

Анализ данных табл. 28 показывает, что чем больше изменение расчетной высоты откоса  $h_p$  при сравнительно небольших изменениях какого-либо показателя, тем большее влияние оказывает погрешность этого показателя на общую погрешность  $m_h$ . Зывает погрешность этого показателя на определение средней

Практически не влияют на  $m_h$  погрешности определения средней плотности пород и сцепления по трещинам. В значительной

Таблица 27  
Определение коэффициента  $K_T$ 

№ п/п	№ из табл. (26)		$K_T$
	1	2	
1	3		0,7655
2	7		0,7655
3	11		0,7655
4	14		0,7655
5	17		0,7655
$K_T$ ср =			0,7655